Analiza pripreme taljevine u ljevaonici aluminijevih legura

Hrastić, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:453656

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dario Hrastić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Branko Bauer
Dr. sc. Ivana Mihalic Pokopec

Student:

Dario Hrastić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Branku Baueru i dr. sc. Ivani Mihalic Pokopec na cjelokupnom vođenju i stručnoj pomoći u izradi završnog rada te djelatnicima laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava i laboratorija za materijalografiju. Zahvaljujem se i Ljevaonici Bujan na profesionalnoj pomoći u izradi eksperimentalnog dijela rada.

Dario Hrastić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DARIO HRASTIĆ** Mat. br.: 0035211000

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA PRIPREME TALJEVINE U LJEVAONICI ALUMINIJEVIH LEGURA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MELT TREATMENT ANALYSIS IN ALUMINIUM ALLOYS FOUNDRY**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju lijevanja aluminijevih legura i prikupiti podatke o pripremi taljevine (otplinjavanje, modifikacija i usitnjavanje zrna) aluminijevih legura.
Za zadanu taljevinu od aluminijeve legure, potrebno je analizirati parametre lijevanja i opisati njihov utjecaj na mikrostrukturu i mehanička svojstva odljevka. Napraviti toplinsku analizu taljevine i analizu kemijskog sastava. Ispitati mehanička svojstva i mikrostrukturu, te analizirati rezultate.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Branko Bauer

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Komentor:

Dr.sc. Ivana Mihalic Pokopec

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

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. OPĆENITO O LJEVARSTVU 2
2.1. Postupci lijevanja 2
2.1.1. Jednokratni kalupi 3
2.1.2. Trajni kalupi 3
2.2. Proizvodni proces u ljevaonici 4
2.3. Peći za taljenje metala 4
2.3.1. Kupolne peći 5
2.3.2. Plinske koritaste plamene peći 5
2.3.3. Peći s loncem 6
2.3.4. Elektropeći 7
2.4. Skrućivanje metala 8
2.5. Metalne legure za lijevanje 10
2.5.1. Željezne legure 10
2.5.2. Neželjezne legure 11
3. Aluminij i legure aluminija 13
3.1. Al - Cu legure 13
3.2. Al - Mg legure 14
3.3. Al - Si legure 14
3.3.1. Al - Si - Cu legura 15
3.3.2. Al - Si - Mg legura 15
4. Priprema i obrada taljevine aluminijevih legura 16
4.1. Usitnjavanje zrna 16

4.1.1. AlTiB 17
4.2. Modifikacija 17
4.2.1. Modifikacija s brzim hlađenjem 17
4.2.2. Kemijska modifikacija dodavanjem 18
4.3. Otplinjavanje 18
4.4. Obrada taliteljima 18
5. Eksperimentalni dio 19
5.1. Lijevanje 19
5.1.1. Lijevanje epruveta i uzorka za ispitivanja 20
5.1.2. Jednostavna toplinska analiza 22
5.1.3. Obrada taljevine 23
5.2. Analiza kemijskog sastava 25
5.3. Priprema epruveta za ispitivanja mehaničkih svojstava 26
5.4. Radiografsko ispitivanje 27
5.5. Ispitivanje mehaničkih svojstava 27
5.6. Priprema uzoraka za metalografska ispitivanja 28
5.7. Metalografsko ispitivanje 31
6. Rezultati i rasprava 32
6.1. Rezultati toplinske analize 32
6.2. Rezultati analize kemijskog sastava 34
6.3. Rezultati radiografskog ispitivanja 35
6.4. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja 36
6.5. Rezultati metalografskog ispitivanja 38
7. Zaključak 40

POPIS SLIKA

Slika 1. Kupolna peć [2] 5
Slika 2. Nagibna plinska koritasta plamena peć [2] 6
Slika 3. Peć s loncem [7] 6
Slika 4. Elektrolučna peć [7] 7
Slika 5. Indukcijska peć [7] 8
Slika 6. Krivulja hlađenja za: a) metal i b) leguru [3] 9
Slika 7. Vrste egzogenog i endogenog skrućivanja [3] 9
Slika 8. Podjela metalnih legura za lijevanje [2] 10
Slika 9. Dijagram stanja Al-Si legura i mikrostruktura podeutektiče, eutektičke i nadeutektičke legure [3] 14
Slika 10. Rotacijski mješač za otplinjavanje [3] 18
Slika 11. a) otvorena kokila, b) mjerenje temperature kokile 20
Slika 12. Prikaz lijevanja u kokilu 21
Slika 13. Odlivene epruvete i uzorak za ispitivanje kemijskog sastava 21
Slika 14. Quik-cup čašica 22
Slika 15. Prikaz uređaja za toplinsku analizu 23
Slika 16. Dodaci za obradu taljevine a) pakiranje AlTiB predlegure, b) pakiranje čistog natrija, c) briketi AlMn 24
Slika 17. Uređaj za otplinjavanje 24
Slika 18. Spektrometar za mjerenje kemijskog sastava 25
Slika 19. Dimenzije epruvete [19] 26
Slika 20. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje 26
Slika 21. Hidraulična kidalica „WEB WPM“ 27
Slika 22. Epruveta stegnuta u čeljusti kidalice 28
Slika 23. Uređaj za brušenje Minitech 233 29
Slika 25. Uzorci za metalografsko ispitivanje 30
Slika 26. Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“ 31
Slika 27. Rezultati toplinske analize bazne i obrađene taljevine prvog lijevanja 32
Slika 28. Rezultati toplinske analize bazne i obrađene taljevine drugog lijevanja 33
Slika 29. Radiogram epruveta za statičko vlačno ispitivanje 35

Slika 30. Grafički prikaz prosječne vrijednosti vlačne čvrstoće (R_m) bazne i obrađene legure 37
Slika 31. Grafički prikaz prosječne vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) bazne i obrađene legure 37
Slika 32. Grafički prikaz prosječne vrijednosti istezanja (A_5) bazne i obrađene legure 37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne vrste željeznog lijeva 11
Tablica 2. Temperature tališta i gustoća metala 12
Tablica 3. Svojstva čistog aluminija 13
Tablica 4. Kemijski sastav bazne taljevine 20
Tablica 5. Kvalitativni i kvantitativni podaci o obradi taljevine 23
Tablica 6. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava bazne taljevine prvog lijevanja 34
Tablica 7. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava obrađene taljevine prvog lijevanja 34
Tablica 8. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava bazne taljevine drugog lijevanja 34
Tablica 9. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava obrađene taljevine drugog lijevanja 34
Tablica 10. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja 36
Tablica 11. Mikrostruktura uzoraka bazne i obrađene AlSi12 legure prvog lijevanja 38
Tablica 12. Mikrostruktura uzoraka bazne i obrađene AlSi12 legure drugog lijevanja 39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezljivost
E	$N\ mm^{-2}$	Modul elastičnosti
L_o	mm	Duljina promatranog dijela epruvete
L_u	mm	Duljina promatranog dijela epruvete nakon
m	kg	Masa
R_m	$N\ mm^{-2}$	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	$N\ mm^{-2}$	Konvencinalna granica razvlačenja
T_t	°C	Temperatura tališta
T_L	°C	Temperatura likvidusa
T_S	°C	Temperatura solidusa
T_P	°C	Temperatura lijevanja
λ	$J\ s^{-1}\ m^{-1}$	Toplinska vodljivost
ρ	$kg\ dm^{-3}$	Gustoća
HB		Tvrdoća po Brinellu
HV		Tvrdoća po Vickersu

SAŽETAK

Cilj ovog rada je definirati tehnologiju lijevanja aluminijskih legura i objasniti postupak istih, prikupiti podatke o pripremi taljevine i objasniti njen utjecaj na mehanička svojstva i mikrostrukturu odljevka. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

Teorijski dio prati proces lijevanja s naglaskom na peći za taljenje te pripremu i obradu taljevine. Dan je kratak uvod u lijevanje te osnovne vrste metalnih legura za lijevanje. Detaljno je opisana uloga aluminija i njegovih legura u ljevarstvu te je napravljena podjela po kemijskom sastavu istih. Objašnjena je svrha pripreme i obrade taljevine kao i rezultat njihovog utjecaja na svojstva odljevka.

U svrhu ostvarivanja cilja rada, provedeno je laboratorijsko istraživanje u kojem je napravljena obrada taljevine aluminijske AlSi12 legure usitnjavanjem zrna, modifikacijom i otplinjavanjem kako bi se utvrdio njihov utjecaj na mikrostrukturu i mehanička svojstva navedene legure. U tu svrhu odliveni su uzorci osnovne i obrađene AlSi12 legure. Radi dobivanja rezultata provedena je toplinska analiza taljevine i analiza kemijskog sastava te su ispitana mehanička svojstva i mikrostruktura na pripremljenim uzorcima.

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja pokazalo se da priprema i obrada taljevine usitnjuje mikrostrukturu te da dolazi do povećanja vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istezljivosti.

Ključne riječi: AlSi12, obrada taljevine, mikrostruktura, mehanička svojstva

SUMMARY

The aim of this paper was to define the technology of casting of aluminum alloys and the process, to collect data of the melt preparation and to explain its influence on the mechanical properties and microstructure of the casting. The paper consists of theoretical and experimental part.

The theoretical part explains the casting process of aluminium alloys with an emphasis on melting furnaces and melt treatment. A brief introduction to the casting process of the basic types of metal casting alloys is given. The role of aluminum and its alloys in foundry industry is described in detail. The classification of aluminium alloys is also given. The purpose of the melt treatment of aluminium alloys is explained as well as the influence of these treatment on the casting properties.

In order to achieve the objectives of this paper, a laboratory study was performed in which the influence of melt treatment including grain refinement, modification and degassing on the microstructure and mechanical properties of AlSi12 aluminum alloy was investigated. For this purpose, samples of basic and treated AlSi12 alloy were cast. In order to obtain the results, a thermal analysis of the melt and an analysis of the chemical composition were performed. Also, tensile test and metallographic analysis of the test samples were carried out.

Based on the results, it was shown that the melt treatment had positive effect on the microstructure and mechanical properties; the fine grain structure was obtained after melt treatment improving the tensile strength, ultimate strength and elongation.

Key words: AlSi12, melt treatment, microstructure, mechanical properties

1. UVOD

Lijevanje je tehnologija u kojoj se ulijevanjem taljevine u kalup oblikuje predmet od metala koji tada poprima oblik i dimenzije zadane šupljinom kalupa i istog zadržava nakon skrućivanja. Predmet koji nastaje skrućivanjem naziva se odljevak. Proces skrućivanja traje vrlo kratko te se zbog toga postupak lijevanja smatra visokoproduktivnim. Kvaliteta odljevka ovisna je o kvaliteti uloženih materijala u proces lijevanja, o procesu taljenja, obradi i čistoći taljevine, temperaturi i brzini lijevanja te uljevnom sustavu. [1]

U ljevarstvu je najviše zastupljena proizvodnja željeznih lijevova, a nakon njih slijedi proizvodnja odljevaka od aluminijevih legura. [2]

Čisti aluminij rijetko se lijeva zbog lošijih mehaničkih svojstava i loše livljivosti, češće se koristi u obliku legura. Aluminij se legira velikim brojem drugih metala, od kojih se mogu izdvojiti silicij, magnezij i bakar, kao najčešće korišteni. Navedene legure karakteriziraju vrlo dobra mehanička svojstva i specifična čvrstoća (povoljan omjer čvrstoće i gustoće) pa se koriste u izgradnji strojnih dijelova, zrakoplova i svemirskih letjelica.

Taljenje aluminijevih legura se najčešće odvija u plinskim i električnim pećima koje su najekonomičnije i daju najbolju kvalitetu taljevine.

Da bi se dobila kvalitetna taljevina, a time i kvalitetan odljevak potrebno je ispravno taliti i obraditi taljevinu. Postupci obrade taljevine su usitnjavanje zrna, modifikacija, otplinjavanje i obrada taliteljima. Obradom taljevine dobivaju se bolja mehanička svojstva, bolja strojna obradivost, smanjena poroznost i bolja livljivost. [3]

2. OPĆENITO O LJEVARSTVU

Lijevanje je tehnologija u kojoj rastaljeni metal poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine u koju se prethodno ulijeva, a skrućivanjem ih zadržava. Proizvod koji tada nastaje naziva se odljevak kojeg je u tijeku daljnje eksploatacije potrebno naknadno obraditi. Zbog svoje visoke produktivnosti i mogućnosti izrade jednakih odljevaka, lijevanje je pogodno za masovnu i serijsku proizvodnju. Također, koristi se u izradi masivnih kućišta strojeva i dijelova s unutrašnjim šupljinama kao što su blokovi motora.

U ljevačkoj industriji odljevak se dobije lijevanjem rastaljenog metala u kalupe s geometrijski definiranim oblikom kalupne šupljine pod djelovanjem gravitacijske ili neke druge sile. Kalup je napravljen od metalnog ili nemetalnog materijala te prilikom lijevanja metal na njega djeluje mehanički, kemijski i toplinski. Sam proces lijevanja je opasan zbog visokih temperatura taljevine i ima velik utjecaj na okoliš.

Prednost ljevačke industrije je mogućnost lijevanja svih metala različitim postupcima i proizvodnja odljevaka različitih oblika, dimenzija i stupnja složenosti. Zbog navedenog postoje ljevaonice različitih veličina i kapaciteta koje se dijele na ljevaonice željeznih ljevova i neželjeznih legura. Od neželjeznih legura najviše se proizvodi aluminijeva legura i nešto manje magnezijeva legura. [2]

Postupak taljenja, kalupljenja i ulijevanje taljevine u kalup je osnova po kojoj se obavlja proizvodnja odljevaka.[4] Nakon lijevanja u kalup, kao procesa praoblikovanja, slijedi obrada odvajanjem čestica i toplinska obrada kako bi se na kraju prevlačenja (nanošenje boje) dobio gotov proizvod. [2]

2.1. Postupci lijevanja

Postupak lijevanja opisuje se sljedećim proizvodnim koracima [2]:

1. priprema metalnog zasipa,
2. taljenje metalnog materijala,
3. ulijevanje taljevine u kalupnu šupljinu,
4. skrućivanje taljevine i
5. vađenje odljevka iz kalupa.

Popunjavanje kalupa taljevinom rezultat je djelovanja sile teže ili tlačne sile. Kako bi se postigla optimizirana tehnologija lijevanja metala razvijeni su različiti postupci koji se dijele u dvije osnovne skupine, a to su:

1. lijevanje u jednokratne kalupe i
2. lijevanje u trajne kalupe.

Kod jednokratnih kalupa se nakon skrućivanja i hlađenja odljevka kalup mora razrušiti kako bi se izvadio odljevak, dok se trajni kalupi mogu iskoristiti više puta.

Prema vrsti kalupa postupci lijevanja dijele se na [2]:

1. jednokratni kalupi
    - pješčani lijev,
    - školjkasti lijev,
    - lijevanje u pune kalupe i
    - precizni lijev.
2. trajni kalupi
    - kokilni lijev,
    - centrifugalni lijev,
    - tlačni lijev i
    - niskotlačni lijev.

2.1.1. Jednokratni kalupi

Jednokratni kalupi upotrebljavaju se u pojedinačnoj, serijskoj i masovnoj proizvodnji. Mogu se lijevati odljevci svih dimenzija i oblika te različitih vrsta metala, a materijal za izradu kalupa se najčešće reciklira.

Karakterizira ih relativno niska cijena i mogućnost izrade kompleksnijih odljevaka, a kao nedostatak može se izdvojiti dugo vrijeme izrade čime se smanjuje produktivnost. [2]

U većini slučajeva lijevanje u jednokratne kalupe naziva se lijevanje u pijesak. [5]

2.1.2. Trajni kalupi

Materijali od kojih se izrađuje trajni kalup najčešće su sivi lijev i posebno toplinski obrađen čelik, a većinom se u njega lijevaju neželjezne legure. Trajni kalupi nazivaju se kokile. Troškovi izrade kokila su visoki te se koriste u velikoserijskoj i masovnnoj proizvodnji.

Ciklus izrade jednog odljevka u kokili kraći je od njegove izrade u jednokratnim kalupima zbog veće brzine hlađenja, a samim time je i sitnija mikrostruktura odljevka.
Kao prednosti trajnih kalupa mogu se izdvojiti odljevci visoke kvalitete, dobrih mehaničkih svojstva i visoka produktivnost, a kao nedostatak geometrijsko ograničenje u konstrukciji zbog vađenja odljevka iz kalupa. [1,3]

2.2. Proizvodni proces u ljevaonici

Proizvodni proces može se podijeliti u osam glavnih koraka, no moguće su promjene koje ovise o metalu koji se lijeva, veličini proizvodnje i o vrsti odljevka.
Na razliku u proizvodnom procesu najviše utječu vrsta lijevanog metala i kalupa, odnosno lijevaju li se željezni ljevovi ili neželjezne legure te lijevaju li se u jednokratni ili trajni kalup. Također, razlika u koracima proizvodnog procesa ovisi o peći koja se koristi za taljenje metala, načinu kalupljenja i izradi jezgre, načinu lijevanja i naknadnoj obradi dobivenog odljevka. [3]

Osam osnovnih faza proizvodnog procesa su [3]:

1. tehnološka priprema,
2. taljenje i obrada metalnog zasipa,
3. priprema i izrada kalupa,
4. lijevanje metala,
5. skrućivanje i hlađenje odljevka,
6. vađenje odljevka iz kalupa,
7. kontrola kvalitete i naknadna obrada te
8. otprema.

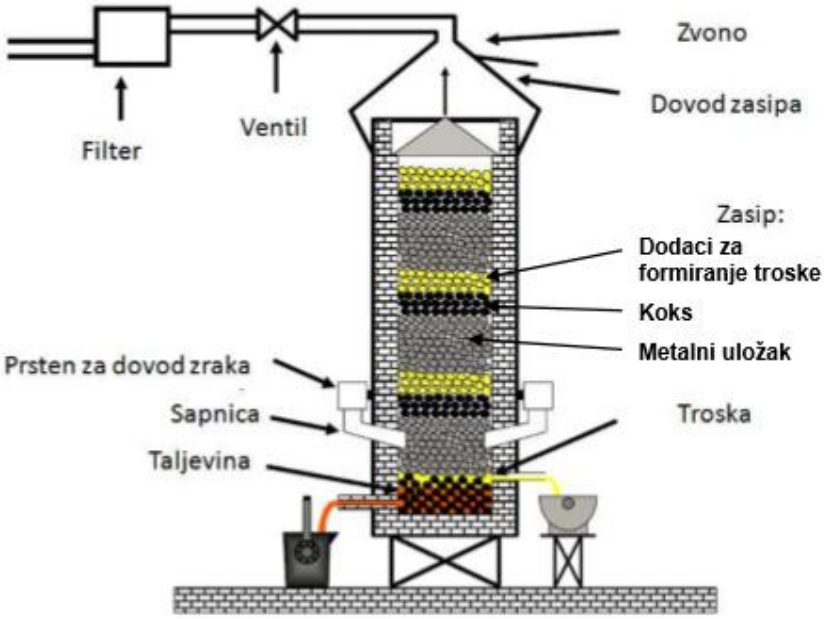
2.3. Peći za taljenje metala

Kod taljenja metala, ali i kako bi se zadržala taljevina do ulijevanja u kalupe, koriste se:

1. kupolne peći,
2. plinske koritaste,
3. peći s loncem i
4. elektropeći.

2.3.1. Kupolne peći

Kupolne peći su vertikalne cilindrične peći sa žlijebom koji služi za izlijevanje taljevine pri dnu. Kupolna peć obzidana je šamotnom opekom ili šamotnom masom za nabijanje, mogu se koristiti ugljična opeka i masa za nabijanje, a debljina ovisi o promjeru peći. [6]
Pri vrhu peći nalaze se otvor za izlaz plinova i otvor za ubacivanje zasipa. Na suprotnoj strani od žlijeba za izlijev taljevine nalazi se žlijeb za odvajanje troske. Kupolna peć prikazana je na slici 1. Toplina potrebna za taljenje metala dobiva se izgarenjem koksa, koji služi kao gorivo. [2]

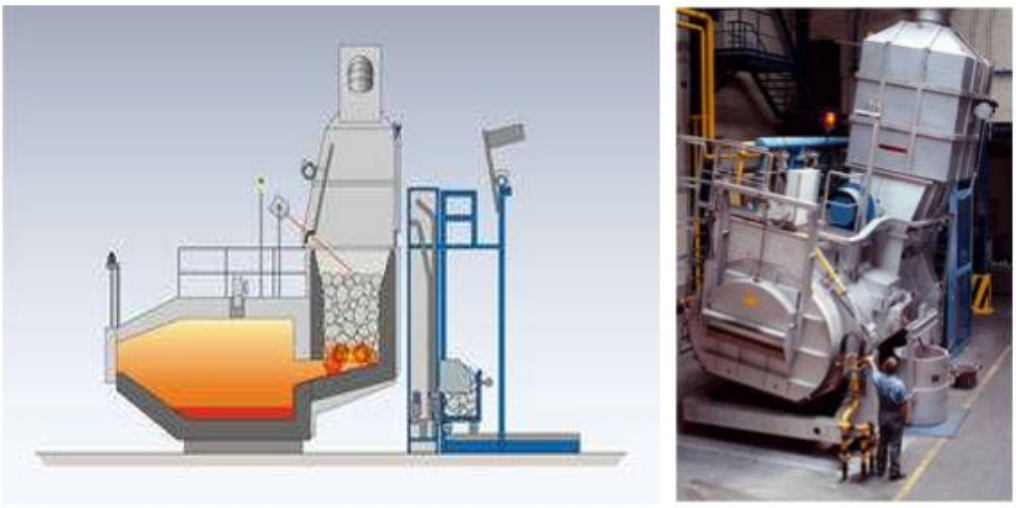


Slika 1. Kupolna peć [2]

2.3.2. Plinske koritaste plamene peći

Plinske koritaste plamene peći pretežno se koriste za taljenje većih količina aluminija. Peć se najčešće zagrijava s više plamenika gdje se toplina prenosi na svod i zidove peći koji isijavanjem prenose toplinu na metal. Na dnu peći nalazi se otvor za ispuštanje rastaljenog metala. Plinskih koritastih plamenih peći dijele se na [2]:

1. stabilne i
2. nagibne, slika 2.



Slika 2. Nagibna plinska koritasta plamena peć [2]

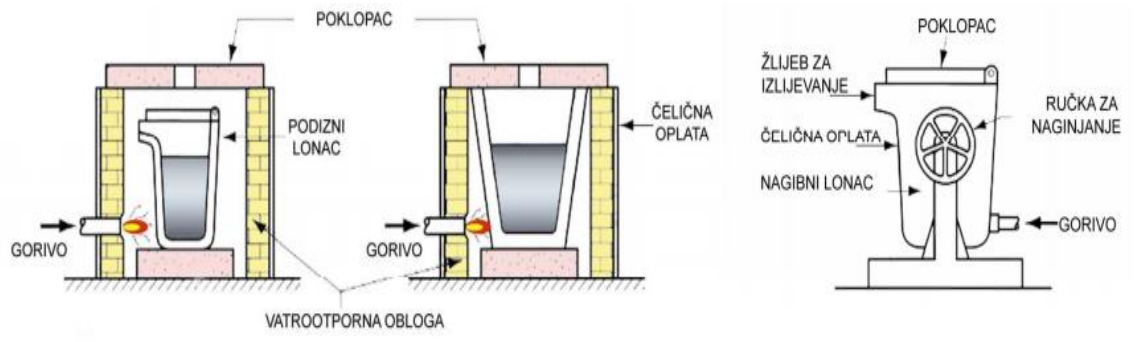
2.3.3. Peći s loncem

Na slici 3 prikazana je peć s loncem. Ove peći nazivaju se i plamene tiganjske peći te se prilikom taljenja u njima toplina metalu predaje zagrijavanjem stijenki lonca. Metal se nalazi unutar lonca koji je od čelika ili vatrootpornog materijala čime je omogućen rad pri visokim temperaturama. Koriste se za taljenje neželjeznih legura bakra, cinka i aluminija, a kako im je učinak taljenja mali, koriste samo za potrebe malih količina taljevina.

Postoje stabilne plamenske peći koje se lože drvenim ugljenom ili koksom (starije) te stabilne i nagibne koje se lože tekućim gorivom ili plinom (suvremene). Razlikuju se po tome što kod nagibne lonac ostaje u peći, a rastaljeni metal se izlije njenim naginjanjem u stranu. [6]

Tri tipa peći s loncem koje se koriste u ljevaonicama su [7]:

1. peći s podiznim loncem,
2. peći sa statičnim loncem i
3. peći s nagibnim loncem.



Slika 3. Peć s loncem [7]

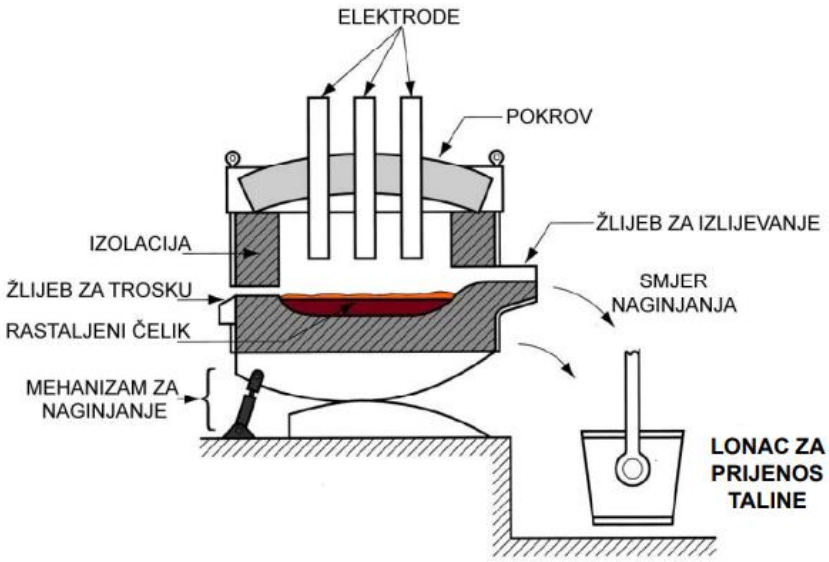
2.3.4. Elektropeći

Kod elektropeći za taljenje metala koristi se električna energija. Mogu se konstruirati za velike kapacitete pa ih je moguće koristiti za potrebe velikih količina taljevina, ali troše velike količine električne energije.

Kao prednosti elektropeći mogu se izdvojiti dobra kvaliteta taljevine, koeficijent toplinske iskoristivosti, manji odgor i zagađenje atmosfere. [6]

Elektropeći se koriste za taljenje različitih vrsta metala, a dijele na:

1. elektrolučne, slika 4
2. elektrootporne i
3. indukcijske peći.

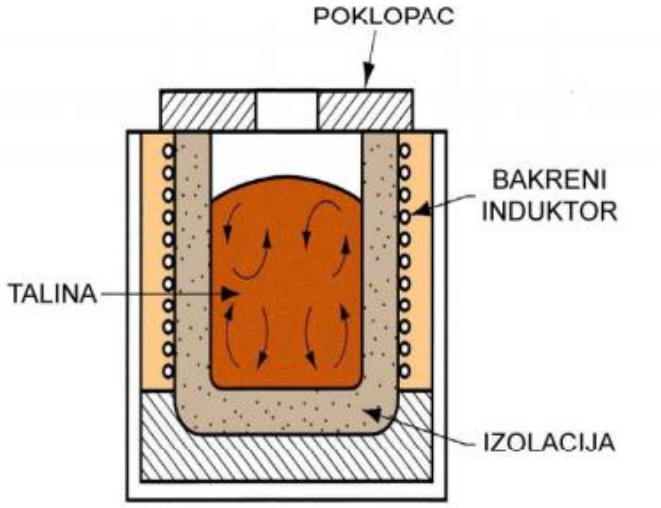


Slika 4. Elektrolučna peć [7]

Na slici 5 prikazana je indukcijska peć. Ona radi na način da izmjenična struja prolazi kroz induktor (zavojnica peći) i tada se inducira magnetsko polje u materijalu koji se tali. Zbog inducirane struje dolazi do brzog ugrijavanja i taljenja metala, a zbog elektromagnetske struje istovremeno dolazi do miješanja rastaljenog metala.

Kod indukcijske peći dobiva se taljevina visoke kvalitete i čistoće jer se metal ne dodiruje s grijaćim tijelom što omogućava dobru kontrolu atmosfere okoline.

Indukcijske peći koriste se za taljenje čelika, željeznih ljevova i aluminijskih legura. [6]



Slika 5. Indukcijska peć [7]

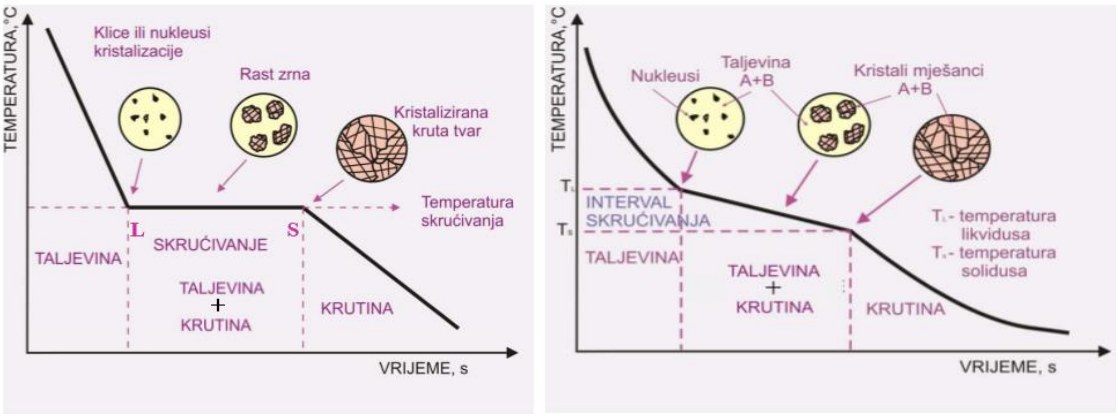
2.4. Skrućivanje metala

Prelazak rastaljenog metala u krutu fazu naziva se skrućivanje. Prelazak u krutu fazu rezultira stvaranjem kristala, tj. stvaranjem mnoštva kristala koji su međusobno odvojeni granicama zrna. [1] Snimanjem krivulje hlađenja prati se promjena temperature te se definiraju točke pretvorbi.

Proces skrućivanja odvija se u dvije faze, a to su:

1. nukleacija i
2. rast kristala.

Prvo nastaju klice ili nukleusi iz kojih se formiraju različito orijentirana kristalna zrna. Rastom kristalnih zrna dolazi do njihovog sudaranja. Nakon sudara zrna nastavljaju rasti, ali su međusobno odijeljena granicama kristalnih zrna. Proces se završava kada taljevina nestane. Proces skrućivanja odvija se između temperature likvidusa T_L i temperature solidusa T_S, te je različit za čiste metale i legure. Na slici 6 shematski je prikazana krivulja hlađenja čistog metala i krivulja hlađenja legure te popratne sheme prikaza skrućivanja metala.



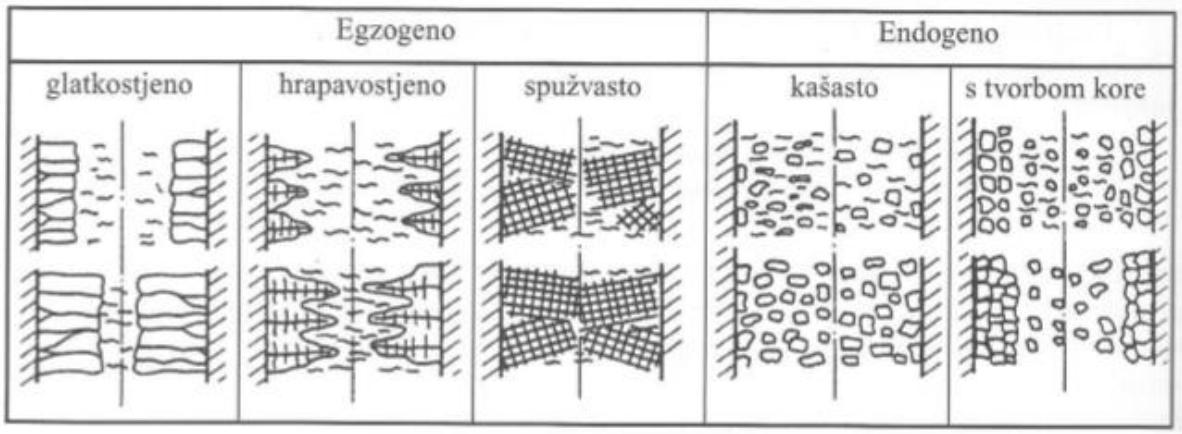
a) b)

Slika 6. Krivulja hlađenja za: a) metal i b) leguru [3]

Razlika između skrućivanja legure i čistog metala je u tom što proces skrućivanja kod čistog metala teče pri konstantnoj temperaturi. Razlog tome je oslobađanje latentne topline pri skrućivanju čistog metala koja sprječava pad temperature pri hlađenju. Pri kraju skrućivanja ona se prestaje stvarati te opet dolazi do pada temperature. Latentna toplina pri skrućivanju legura nije dovoljna da nadoknadi odvedenu toplinu hlađenjem.

Na slici 7 prikazane su dvije vrste skrućivanja čistih metala i legura:

1. egzogeno - kristali rastu od granične površine kalup-taljevina i
2. endogeno - kristali rastu iz taljevine.

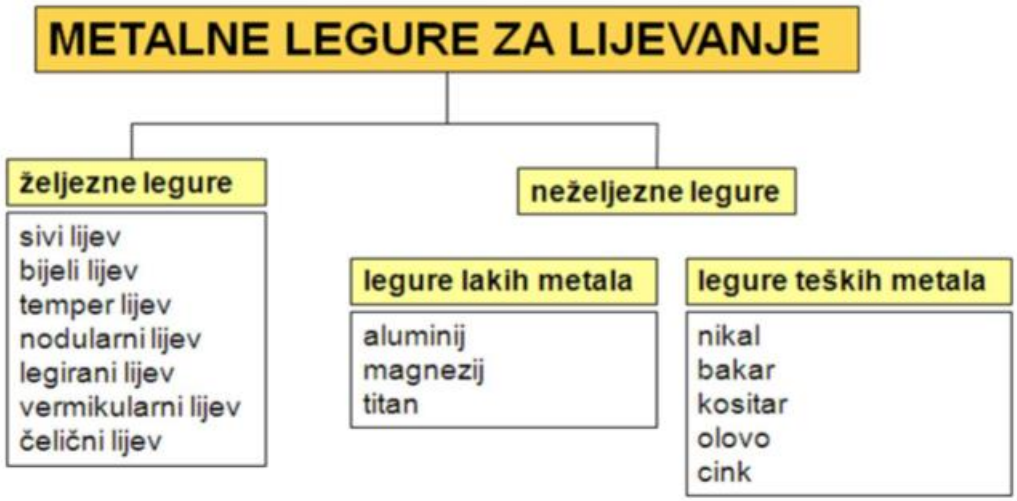


Slika 7. Vrste egzogenog i endogenog skrućivanja [3]

Legure skrućuju hrapavostjeno, spužvasto, kašasto ili s tvorbom kore, a glatkostjeno skrućivanje je karakteristično za čiste metale i eutektičke legure.[3]

2.5. Metalne legure za lijevanje

Odljevci se izrađuju od legiranih metala koji se još nazivaju legure za lijevanje. Legure imaju bolju livljivost i bolja mehanička svojstva od čistih metala, stoga se i češće koriste. Metalne legure za lijevanje podijeljene su u dvije grupe, slika 8.



Slika 8. Podjela metalnih legura za lijevanje [2]

2.5.1. Željezne legure

Željezne legure su legure željeza (Fe) i ugljika (C), pratioca silicija (Si) i mangana (Mn) te nečistoća sumpora (S) i fosfora (P).

Svojstva ovih legura ovise o količini sadržanih legirnih elemenata te se s obzirom na količinu ugljika mogu podijeliti na čelični lijev (do 2 % C) i željezni lijev (>2 % C). [2]

Legiranjem čeličnog lijeva drugim elementima i određenom toplinskom obradom dobivaju se povoljna mehanička svojstva koja rezultiraju vrlo čestom primjenom ovog lijeva. Željezni lijev je legura s velikom tečljivosti te minimalnim volumenskim i unutarnjim skupljanjem. Postoji pet osnovnih vrsta željeznog lijeva koje su prikazane u Tablici 1.

Tablica 1. Osnovne vrste željeznog lijeva

VRSTA LIJEVA	MIKROSTRUKTURA	SVOJSTVA
SIVI LIJEV	željezna osnova (F, P, F-P) + ugljik (listići grafita)	• niska vlačna čvrstoća, istezljivost i modul elastičnosti • dobra strojna obradivost • visoki stupanj prigušenja vibracija • dobra livljivost • visoka tlačna čvrstoća
BIJELI LIJEV	željezna osnova (P) + ugljik (Fe_3C)	• izrazito tvrd >400 HV • visoka tvrdoća • otpornost na abrazijsko trošenje
TEMPER LIJEV	željezna osnova (P i F) + ugljik (čvorići - temper)	• niska tvrdoća • viša istezljivost i žilavost • dobra obradivost
NODULARNI LIJEV	željezna osnova (F,P,F-P) + ugljik (kuglice - nodule)	• visoka žilavost i čvrstoća • dobra livljivost
VERMIKULARNI LIJEV	željezna osnova (F,F-P) + ugljik (crvićasti - vermikularni grafit)	• dobra toplinska vodljivost • dobra strojna obradivost • dobra livljivost • prigušuje vibracije

2.5.2. Neželjezne legure

Neželjezne legure metala dijele se u dvije skupine prema gustoći [2]:

1. legure lakih metala (<4,5 kg/dm^3) i
2. legure teških metala (>4,5 kg/dm^3).

U tablici 2 prikazana su svojstva metala, odnosno njihova gustoća i talište.

Tablica 2. Temperature tališta i gustoća metala

Element	**Gustoća [kg/dm^3]**	**Talište [°C]**
Al	2,69	658
Mg	1,74	650
Zn	7,13	420
Sn	7,28	232
Cu	8,93	1083
Pb	11,34	327
Ni	8,86	1455
Ti	4,51	1668
Fe	7,86	1530

3. ALUMINIJ I LEGURE ALUMINIJA

Aluminija (Al) u zemljinoj kori ima 8 % što ga poslije kisika (O) čini najrasprostranjenim elementom. U prirodi se ne nalazi u elementarnom stanju već se dobiva postupkom elektrolize iz rude boksita koja se prerađuje u glinicu (Al_2O_3). U tablici 3 prikazana su svojstva čistog aluminija. [8,9]

Tablica 3. Svojstva čistog aluminija

Talište	660 °C
Gustoća (20 °C)	2,7 $kgdm^{-3}$
Modul elastičnosti (20 °C)	71900 MPa
Toplinska vodljivost	240 $J\ s^{-1}m^{-1}$
Istezljivost	50...4 %
Vlačna čvrstoća	50...150 Nmm^{-2}
Tvrdoća	20...35 HB

Zbog svoje male gustoće aluminij se naziva laki metal kojeg karakterizira srebrno-bijela boja sa sjajem. Dobar je vodič topline i električne energije s velikim afinitetom prema kisiku koji mu omogućava da bude korozijski postojan i da ima široku primjenu. [10]

Korištenje čistog aluminija kao ljevačke sirovine je vrlo rijetko pa se upotrebljavaju legure aluminija zbog bolje livljivosti i mehaničkih svojstava. Iako se može legirati velikim brojem različitih elemenata, najčešće se koriste silicij (Si), magnezij (Mg) i bakar (Cu). [9]

Proizvodnja odljevaka od aluminijskih legura prevladava u automobilskoj industriji. Glavni cilj automobilske industrije je povećanje učinkovitosti goriva smanjenjem mase vozila, stoga aluminijski ljevovi zamjenjuju željezne ljevove. [3]

3.1. Al - Cu legure

Karakteristike Al - Cu legura su visoka čvrstoća, otpornost na povišene temperature i dobra rezljivost. Same legure su slabo livljive, a povećanjem količine bakra u njoj se još više pogoršava livljivost. Pri skrućivanju su sklone tvorbi toplih pukotina i pogrubljivanju zrna. Korozivno su najneotpornije od svih aluminijevih legura. [2, 10]

3.2. Al - Mg legure

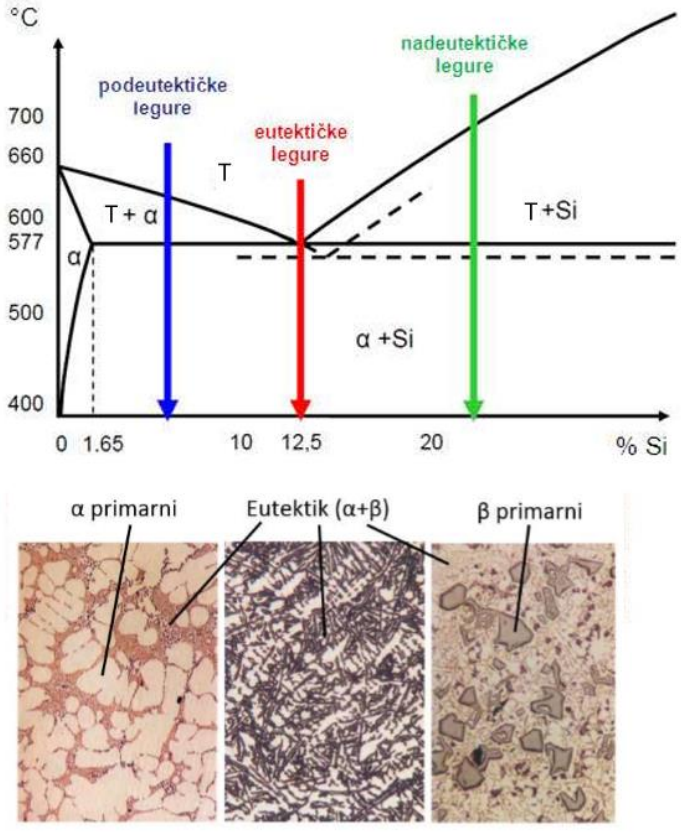
Najznačajnija svojstva ovih legura su otpornost na koroziju i povećana čvrstoća. Imaju vrlo dobru zavarljivost te se koriste u dekorativne svrhe. U komparaciji s ostalim legurama aluminija imaju lošiju livljivost, veliku sklonost poroznosti, stvaranju troske i lošu žitkost. Najčešće su u upotrebi legure s 3 % i 5 % Mg. [11]

3.3. Al - Si legure

Al - Si legure su najčešće u skupini ljevačkih legura zbog svoje dobre livljivosti i korozijske otpornosti. Dobra livljivost i otpornost nastajanju toplih pukotina je rezultat legiranja sa Si, a najčešće legure imaju 10 % i 13 % Si. Al-Si legure imaju slabija mehanička svojstva te se radi poboljšanja istih legiraju s dugim elementima (najčešće Mg i Cu). [2,11]

Slika 9 prikazuje mikrostrukturu skupina Al - Si legura podijeljenih s obzirom na udio Si:

1. podeutektičke (< 12 % Si)
2. eutektičke (12 - 13 % Si)
3. nadeutektiče (15 - 24 % Si)



Slika 9. Dijagram stanja Al-Si legura i mikrostruktura podeutektiče, eutektičke i nadeutektičke legure [3]

Povećanjem udjela Si mijenja se i mikrostruktura legure. Mikrostruktura svih vrsta Al - Si legura prikazana je na slici 9 gdje α primarno označava primarne dendrite aluminija, dok β primarni označava primarni pločasti silicij. [3]

Legure sa 7 - 11 % Si najviše se primjenjuju zbog postojanosti legura na povišenim temperaturama. Ovisno o mehaničkim svojstvima koja su potrebna, legure se legiraju ostalim legirnim elementima. Moguće je dodatno poboljšati legure modifikacijom eutektika ili usitnjavanjem zrna. [12]

3.3.1. Al - Si - Cu legura

U leguri je smanjen udio silicija, a povećan udio bakra što za rezultat ima poboljšanje čvrstoće i rezljivosti te smanjenje livljivosti i otpornosti.

Dodavanjem titana dobije se sitnozrnata struktura što rezultira dobrom žilavosti i obradivosti. Primjenom odgovarajuće toplinske obrade, precipitacijskog očvrsnuća i rastvornog žarenja, dolazi do dodatnog povećanja tvrdoće i čvrstoće. [10]

3.3.2. Al - Si - Mg legura

Kod ove legure provodi se precipitacijsko očvršćivanje uz dodatak 0,2 - 0,5 % Mg.

Karakteristike legure su dobra livljivost i dobra korozijska postojanost. Odljevci ovih legura postojani su do 200 °C. [10]

4. PRIPREMA I OBRADA TALJEVINE ALUMINIJEVIH LEGURA

Taljenje aluminijevih legura se najčešće odvija u plinskim i električnim pećima. [3]

Električne peći su najekonomičnije i daju najbolju kvalitetu taljevine. Uz njih, u rutinskoj upotrebi su i plamene peći.

Metalni uložak sastoji se od ingota odgovarajućeg kemijskog sastava i kružnog (povratnog) materijala. U kemijskom sastavu ingota značajnu ulogu igra propisan sadržaj željeza, kao osnovna nečistoća koja snizuje mehanička svojstva formirajući grube kristale i koja utječe na toplinsku obradu aluminijevih legura. Aluminij zbog velikog afiniteta prema kisiku stvara uključke. Nemetalni uključci su najčešće kemijski spojevi plinova i metala prisutnih u taljevini te su raspoređeni po granicama zrna što daje smanjenu čvrstoću i otpornost na koroziju. Topivost vodika u tekućem aluminiju je visoka. Prisutnost vodika u taljevini Al legura rezultira poroznošću u odljevcima. [6]

Postupci obrade taljevine su:

1. usitnjavanja zrna,
2. modifikacija,
3. otplinjavanje i
4. obrada taliteljima.

4.1. Usitnjavanje zrna

Kao što sam naziv govori, postupak se temelji na usitnjavanju grubozrnate strukture taljevine. Usmjereni stubičasti rast kristala primarnog aluminija mijenja se u pogodniji istoosni oblik. Kao rezultat ovog postupka obrade taljevine javljaju se značajna poboljšanja mehaničkih svojstava, npr. granica razvlačenja i žilavost, smanjuje se poroznost, a povećava strojna obradivost i otpornost na tople pukotine. [3]

U industriji najpopularnija metoda usitnjavanja zrna je pomoću sredstava za usitnjavanje zrna koja se još nazivaju predlegurama. Konstituenti predlegura djeluju kao podloga za stvaranje nukleusa prema mehanizmu heterogene nukleacije. [13]

Predlegure su kemijski dodaci taljevini, a dolaze u obliku žica, ploča, saća i tableta. O kemijskom sastavu taljevine, uvjetima lijevanja i sadržaju nečistoće ovisi koja količina predlegura se dodaje u taljevinu.

Idealno sredstvo za usitnjavanje zrna ima kratko vrijeme u kojem se postiže određena mikrostruktura i ne dolazi do grubozrnatosti duljim zadržavanjem taljevine u peći. [14,15]

Oblici predlegura su:

1. AlTiB koji se u proizvodnji najviše koristi,
2. AlTi,
3. AlTiC i
4. Ti.

4.1.1. AlTiB

Testiranja su pokazala da bor (B) i titan (Ti) uspješno usitnjuju mikrostrukturu taljevine. Omjer Ti/B i mikrostruktura legure imaju velik utjecaj na učinkovitost predlegure. Omjer se kreće od 1:1 do 1:5. U predleguri AlTiB ima 2 - 10 % Ti i 0,1 - 3 % B. [16]

Najviše se koristi Al5TiB predlegura. [3]

4.2. Modifikacija

Postupkom modifikacije djeluje se na morfologiju silicijeve faze u Al - Si legurama. Si faza ima grubozrnatu strukturu što nepovoljno utječe na mehanička svojstva i smanjuje strojnu obradivost.

Modifikacijom silicija dobije se finija, vlaknasta struktura s ujednačenijom raspodjelom. [3] Prilikom modificiranja može doći i do neželjenih pojava kao što je ulazak vodika (H) u taljevinu i smanjenja livljivosti taljevine prilikom lijevanja. [17]

Željena struktura dobije se jednom od dvije vrste modifikacije [3]:

1. modifikacija brzim hlađenjem i
2. kemijska modifikacija dodavanjem.

4.2.1. Modifikacija s brzim hlađenjem

Pri modifikaciji brzim hlađenjem lamelarni (lističav) oblik eutektičkog silicija transformira se u vlaknasti. Brzina hlađenja utječe na stupanj usitnjenosti strukture eutektičkog silicija. Pri najvećim brzinama hlađenja nastaje sitan i zaobljen eutektički silicij što ima za posljedicu povoljna mehanička svojstva. [18]

4.2.2. Kemijska modifikacija dodavanjem

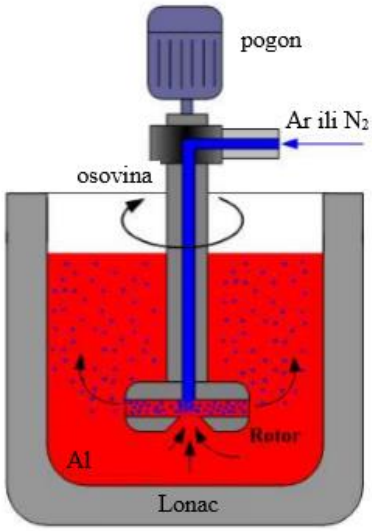
Za modifikaciju taljevine koriste se kemijski modifikatori koji se u propisanim količinama dodaju taljevini radi promjene silicijeve faze u zaobljen oblik.

Za modifikaciju Al - Si podeutektičkih legura koriste se natrij (Na), stroncij (Sr), a kod nadeutektičkih legura koristi se fosfor (P). [18]

4.3. Otplinjavanje

Veliku topivost u rastaljenom aluminiju ima vodik čiji je glavni izvor vlaga koje ima u zraku, u uložnom materijalu itd.. Otopljeni vodik koji nastaje kada aluminij reagira s vodom (vlagom) pravilno se dispergira po čitavom volumenu taljevine i time nastaju rupice po cijelom odljevku. Da bi se to spriječilo taljevina se otplinjava sljedećim metodama [3]:

1. otplinjavanjem pomoću tablete koje otpuštaju klor ili dušik,
2. uvođenjem plinova argona, dušika ili klora na dno taljevine i
3. pomoću rotacijskog mješača koji uvodi argon ili dušik u taljevinu, prikazanog na slici 10.



Slika 10. Rotacijski mješač za otplinjavanje [3]

4.4. Obrada taliteljima

Obrada taliteljima provodi se radi uklanjanja nečistoća i oksida legirajućih elemenata u taljevini.

U talitelje spadaju [3]:

1. sredstva za prekrivanje taljevine,
2. sredstva za pročišćavanje taljevine,

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada pripremljena je i modificirana AlSi12 legura. Napravljena je toplinska analiza bazne i obrađene taljevine te je određen kemijski sastav istih. Ispitana su svojstva bazne i obrađene taljevine u cilju određivanja utjecaja obrade i pripreme taljevine na mikrostrukturu i mehanička svojstva odljevaka.

Nakon pripreme bazne AlSi12 legure slijedilo je lijevanje uzorka za ispitivanje kemijskog sastava te epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava. Također je napravljena toplinska analiza bazne taljevine. Nakon završetka lijevanja slijedila je obrada bazne taljevine. Obrada je uključivala usitnjavanje, modifikaciju i otplinjavanje. Postupak izrade epruveta i uzoraka modificirane taljevine te toplinske analize identičan je postupku s baznom taljevinom. Izradom epruveta i uzoraka bazne i modificirane taljevine te toplinske analize gotov je proces lijevanja i slijede laboratorijska ispitivanja pripremljenih epruveta i uzoraka.

U eksperimentalnom dijelu napravljena su dva jednaka postupka lijevanja radi dobivanja uvida u ponovljivost rezultata.

Pripremljeni su uzorci bazne i obrađene taljevine za ispitivanja. Provedena su sljedeća ispitivanja na epruvetama i uzorcima:

1. određivanje kemijskog sastava
2. metalografska analiza
3. radiografsko ispitivanje
4. ispitivanje mehaničkih svojstava.

5.1. Lijevanje

Za potrebe eksperimentalnog dijela kao bazna taljevina korištena je predmodificirana AlSi12 legura sa 60 ppm natrija (bazna legura). Kemijski sastav navedene legure nalazi se u tablici 4. Korišteni su podaci od proizvođača.

Priprema bazne i obrađene legure te lijevanje provedeno je u Ljevaonici Bujan.

Tablica 4. Kemijski sastav bazne taljevine

Element	**Udio [%]**
Si	11,897
Fe	0,167
Cu	0,019
Mn	0,146
Mg	0,026
Zn	0,048
Ti	0,0848
Na	0,0065
Ostali	0,033
Al	ostalo

5.1.1. Lijevanje epruveta i uzorka za ispitivanja

Radi ispitivanja kemijskog sastava i mehaničkih svojstava odlivene su epruvete i uzorak u dvodjelnu kokilu. Slika 11a) prikazuje dvodjelu kokilu za lijevanje epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava, dok je za lijevanje uzoraka korištena druga kokila. Prije početka lijevanja kokila je bila predgrijana na 180 °C, što je prikazano na slici 11b). Prilikom lijevanja kokila je pritegnuta stegama kako nebi došlo do razdvajanja kalupa te izlijevanja taljevine iz kalupa.



a) b)

Slika 11. a) otvorena kokila, b) mjerenje temperature kokile

Na slici 12 prikazan je postupak lijevnaja u kokilu.



Slika 12. Prikaz lijevanja u kokilu

Za potrebe ispitivanja mehaničkih stvojstava bazne taljevine AlSi12 legure odlivene su dvije epruvete, a za ispitivanje kemijskog sastava jedan uzorak, kao što je prikazano na slici 13.



Slika 13. Odlivene epruvete i uzorak za ispitivanje kemijskog sastava

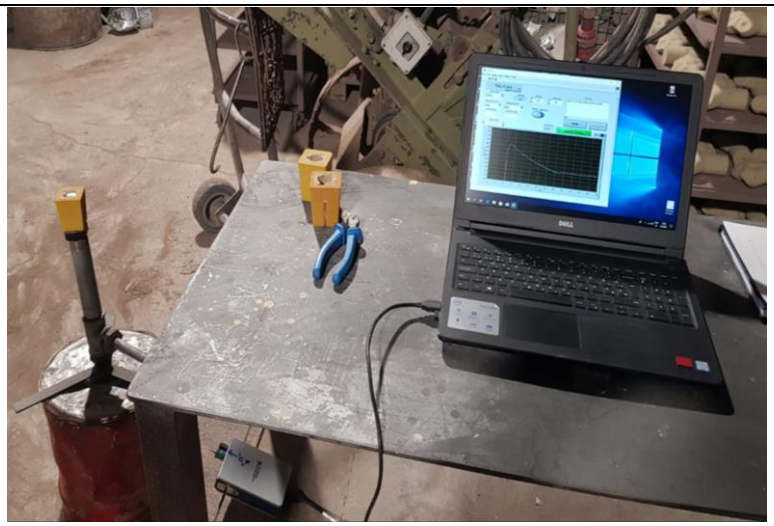
5.1.2. Jednostavna toplinska analiza

Jednostavna toplinska analiza rađena je u Ljevaonici Bujan, a njome se snima krivulja hlađenja. Analizom snimljenih krivulja hlađenja dobiva se uvid u tijek procesa skrućivanja. Praćenjem krivulja hlađenja može se vidjeti na kojoj je temperaturi došlo do stvaranja određene faze. Uvidom u tijek srućivanja može se pretpostaviti kakva će biti svojstva lijevane legure, ovisno o tome je li podeutektičkog, eutektičkog ili nadeutektičkog sastava.

Ulijevanjem bazne taljevine u Quik-cup čašicu, prikazanu na slici 14, spojenu na računalo putem softwera, pratila se ovisnost temperature o vremenu. Uređaj za mjerenje prikazan je na slici 15. Isti postupak je ponovljem s obrađenom taljevinom te se rezultati uspoređuju.



Slika 14. Quik-cup čašica





Slika 15. Prikaz uređaja za toplinsku analizu

5.1.3. Obrada taljevine

Podaci o obradi taljevine nalaze se u tablici 5.

Tablica 5. Kvalitativni i kvantitativni podaci o obradi taljevine

	1. LIJEVANJE	**2. LIJEVANJE**
Masa taljevine	220 kg	150 kg
AlTiB	150 g	100 g
Mn	150 g	100g
Navac	100 g	75 g
Otplinjavanje	Ar	Ar

Obrada taljevine išla je sljedećim redoslijedom. Prvo je napravljeno usitnjavanje zrna. Za usitnjavanje zrna korištena je AlTiB predlegura u obliku tablete, slika 16a). Dodano je 150 g predlegure na 220 kg taljevine.

Nakon toga slijedila je modifikacija taljevine. Za modifikaciju korišten je Navac 25 koji sadrži čisti natrij, slika 16b). Količina dodanog modifikattora prikazana je u tablici 5. Mangan se dodao u obliku tablete na dno peći prije lijevanja, u količini prikazanoj u tablici 4. Jedna tableta povisi postotak mangana u taljevini za 0,07 % na 100 kg Al. Slika 16c) prikazuje brikete AlMn.



a) **b)** **c)**

Slika 16. Dodaci za obradu taljevine a) pakiranje AlTiB predlegure, b) pakiranje čistog natrija, c) briketi AlMn

Na kraju je taljevina bila podvrgnuta postupku otplinjavanja gdje je korišten plin argon. Uređaj za otplinjavanje prikazan je na slici 17.



Slika 17. Uređaj za otplinjavanje

5.2. Analiza kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava provedena je u kemijskom laboratoriju Ljevaonice Bujan na spektrometru za ispitivanje kemijskog sastava „Hitachi“, prikazanom na slici 18. Prethodno odliven uzorak se pripremi (pobrusi) i stavi na uređaj koji elektronskim detektorom registrira i mjeri intenzitet spektra zračenja. Uzorak za analizu kemijskog sastava lijevan je jednom za banzu i jednom za modificiranu u svakom lijevanju (ukupno 4 uzorka) i na svakom uzorku provedena su tri mjerenja kemijskog sastava iz kojih se računa prosjek.



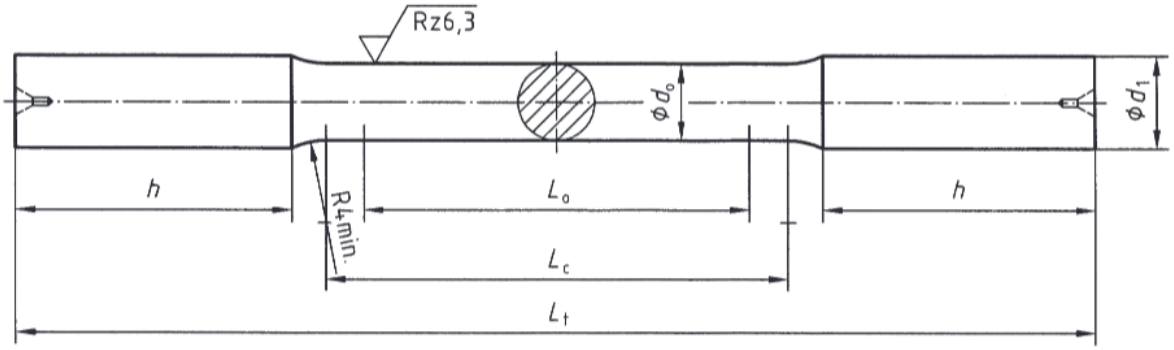
Slika 18. Spektrometar za mjerenje kemijskog sastava

5.3. Priprema epruveta za ispitivanja mehaničkih svojstava

Nakon lijevanja epruveta, potrebno ih je pripremiti za statičko vlačno ispitivanje. Postupak pripreme epruveta tekao je sljedećim redom:

1. odrezivanje uljevnog sustava i pojila
2. tokarenje.

Dimenzije epruvete propisane su normom DIN-50125-2004 (slika 19), gdje je d_o= 12mm; L_0= 60 mm.



Slika 19. Dimenzije epruvete [19]

Slika 20 prikazuje izrađene epruvete za statičko vlačno ispitivanje.



Slika 20. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje

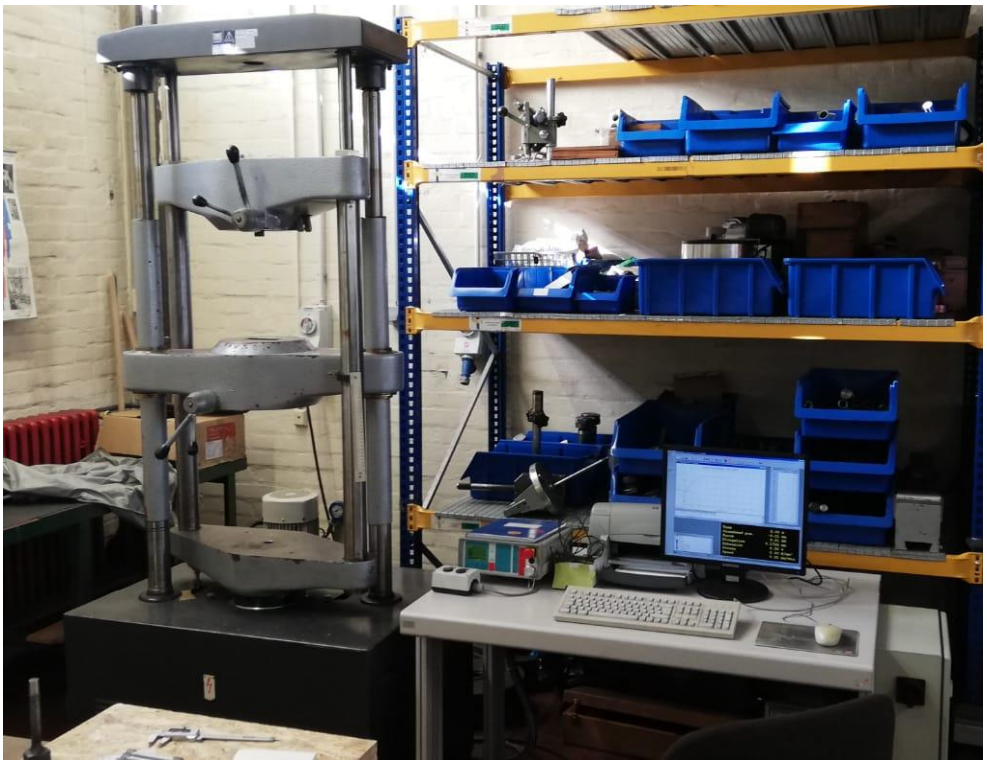
5.4. Radiografsko ispitivanje

Nakon izrade epruveta napravljeno je radiografsko ispitivanje radi provjere kvalitete epruveta tj. pojavu poroznosti. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja, Fakluteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Korištena oprema prilikom snimanja radiograma:

- RTG uređaj-Balteau 300D ,
- Skener-VMI 5100,
- Slikovna ploča-Kodak industrex flex Blue.

5.5. Ispitivanje mehaničkih svojstava

U Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, provedeno je statičko vlačno ispitivanje na hidrauličnoj kidalici „WEB WPM“ nazivne sile 400 kN, prikazane na slici 21. Kidalica je povezana s osobnim računalom radi upravljanja istom i prikaza rezultata ispitivanja. Kao rezultat ispitivanja određene su sljedeće veličine: vlačna čvrstoća (R_m), konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$). Nakon loma epruvete mjerila se njezina duljina (L_u) te na temelju početne i konačne duljine izračunalo se istezanje (A_5).



Slika 21. Hidraulična kidalica „WEB WPM“

Na slici 22 prikazana je epruveta u čeljustima kidalice na kraju ispitivanja.



Slika 22. Epruveta stegnuta u čeljusti kidalice

5.6. Priprema uzoraka za metalografska ispitivanja

Mali dio svake lijevane epruvete je odrezan i pripremljen kao uzorak za metalografsko ispitivanje. Ukupno je pripremljeno 7 ispitnih uzoraka u Laboratoriju za metalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Priprema uzoraka sastoji se od brušenja, poliranja i nagrizanja. Najprije se radilo brušenje uzoraka na uređaju „Mintech 233“, prikazanim na slici 23. Brusilo se na različitim vodootpornim brusnim papirima počevši od grubljih prem finijim pri stalnom broju okretaja od 300 o/min u potrebnom vremenu. Kao sredstvo hlađenja i podmazivanja koristila se voda.



Slika 23. Uređaj za brušenje Minitech 233

Nakon brušenja slijedilo je poliranje na uređaju „Struers DAP – V“ pri stalnom broju okretaja od 150 o/min te korištenje lubrikanta kao sredstva za hlađenje i podmazivanje. Poliranje se radilo u dva koraka. U prvom koraku poliralo se u vremenskom periodu od 2 minute te je korištena dijamantna pasta. U drugom koraku korištena tekućina „Silica“. Na slici 24 prikazan je uređaj za poliranje.



Slika 24. Uređaj za poliranje „Struers DAP – V“

Za potrebe metalografskog ispitivanja potrebno je provesti nagrizanje uzoraka u kiselini „Keller`s Reagent“ u trajanju od 10 sekundi te nakon toga staviti u destiliranu vodu da se prekinu kemijske reakcije. Slika 25 prikazuje uzorke spremne za metalografsko ispitivanje.



Slika 25. Uzorci za metalografsko ispitivanje

5.7. Metalografsko ispitivanje

U cilju određivanja mikrostrukture provedena su metalografska ispitivanja u Laboratoriju za materijalografska ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uređaj korišten za ispitivanja je svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“ koji ima mogućnost povećanja do 1000x, prikazan na slici 26. Na mikroskop je spojena kamera koja omogućava sliku na zaslonu računala.

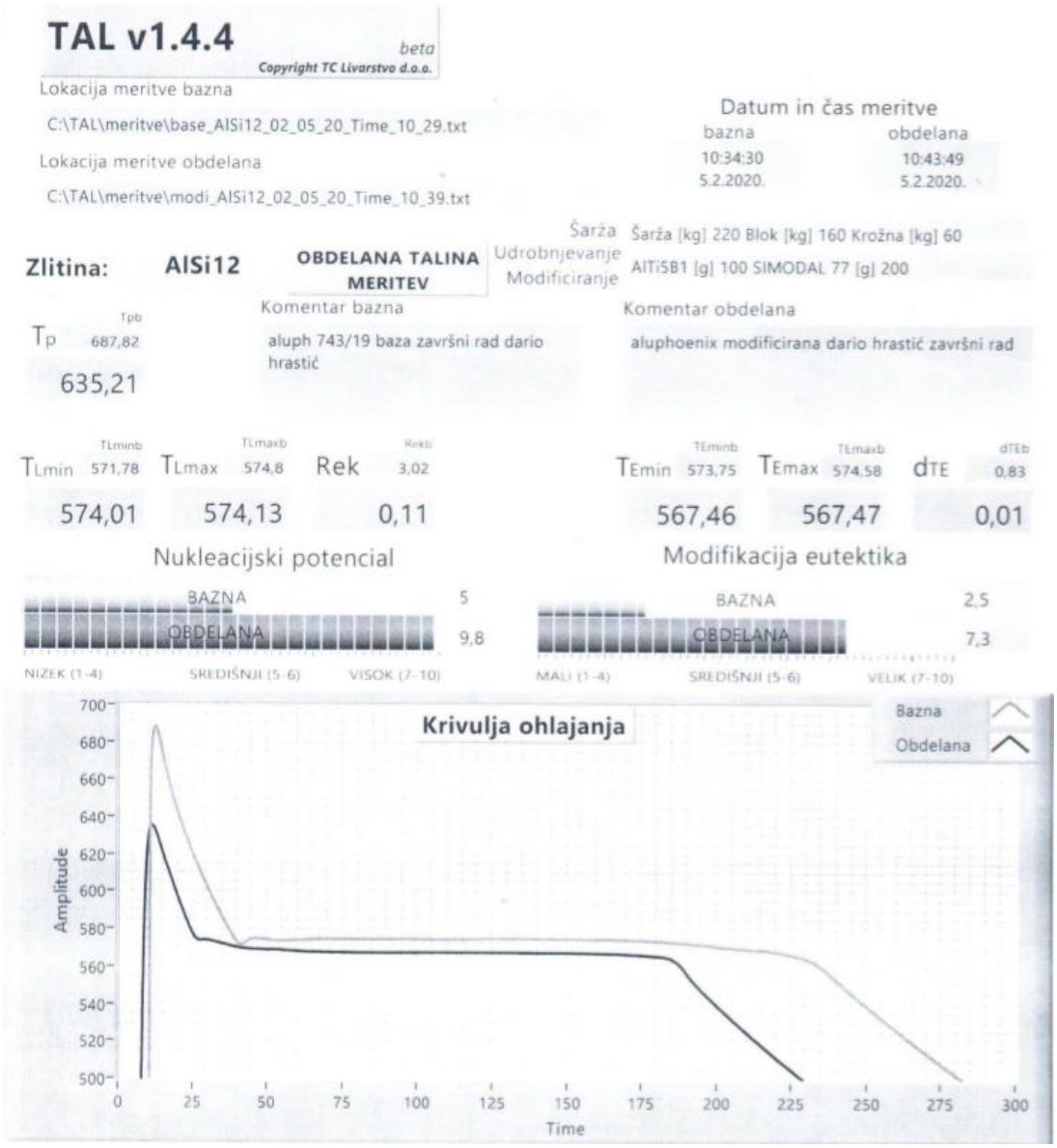


Slika 26. Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“

6. REZULTATI I RASPRAVA

6.1. Rezultati toplinske analize

Slika 27 prikazuje rezultate toplinske analize za baznu i obrađenu taljevinu dobivene prilikom prvog lijevanja AlSi12 legure.

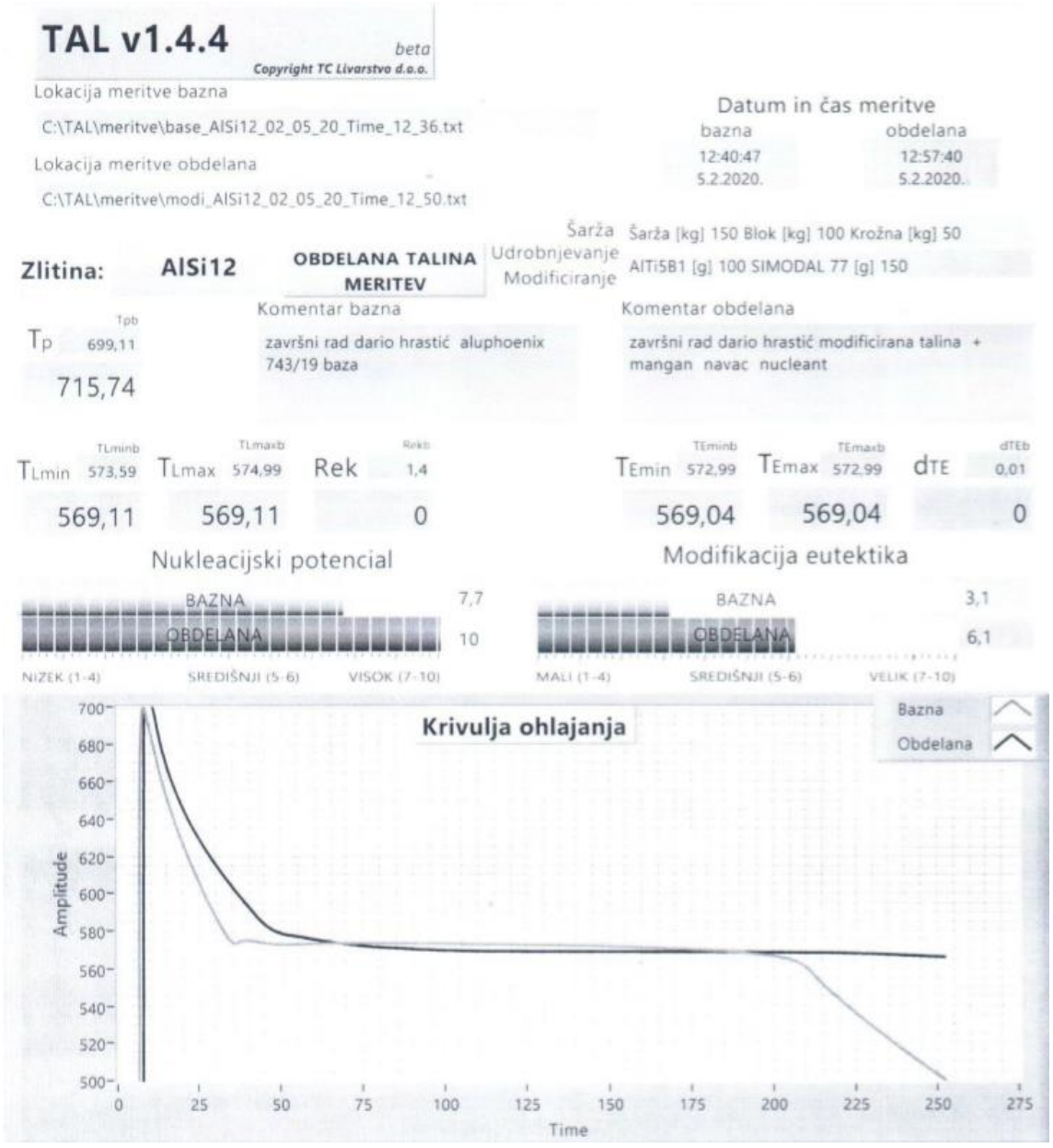


Slika 27. Rezultati toplinske analize bazne i obrađene taljevine prvog lijevanja

Temperatura bazne taljevina je prilikom ulijevanja u Quik-cup čašicu iznosila je 687,87 °C, dok je temperatura obrađene iznosila 635,21 °C. Iz dijagrama na slici 27 vidi se da je za baznu taljevinu temperatura likvidusa T_L između 572°C i 575°C. Na toj temperaturi počinje

skrućivanje taljevine. Temperatura likvidusa kod obrađene taljevine iznosi 574 °C. Skrućivanje napreduje formiranjem eutektika pri 574 °C uz rekalescenciju od 0,83 °C za baznu taljevinu, dok se kod obrađene eutektik počinje formirati pri 567,5 °C.

Slika 28 prikazuje rezultate toplinske analize bazne i obrađene taljevine drugog lijevanja AlSi12 legure.



Slika 28. Rezultati toplinske analize bazne i obrađene taljevine drugog lijevanja

Temperatura bazne taljevine prilikom ulijevanja u Quik-cup čašicu iznosila je 700 °C, dok je temperatura obrađene iznosila 715 °C. Iz dijagrama na slici 28 vidi se da je za baznu taljevinu temperatura likvidusa T_L između 573,6°C i 575°C. Na toj temperaturi počinje skrućivanje

taljevine. Temperatura likvidusa kod obrađene taljevine iznosi 569 °C. Skrućivanje napreduje formiranjem eutektika pri 573 °C bez rekalescencije za baznu taljevinu, dok kod obrađene formiranje eutektika počinje pri 569 °C.

Prilikom usporedbe rezultata jednostavne toplinske analize prvog i drugog lijevanja vidi se da su krivulje hlađenja identične po obliku, ali različite po veličini. Razlika se dogodila zbog više temperature ulijevanja obrađene taljevine u drugom lijevanju u odnosu na prvo pa je bilo potrebno duže vrijeme ohlađivanja da bi došlo do početka skrućivanja.

6.2. Rezultati analize kemijskog sastava

U sljedećim tablicama dane su prosječne vrijednosti mjerenja za svaki uzorak.

Tablica 6. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava bazne taljevine prvog lijevanja

Al [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]	Sr [%]	Na [%]
87,85	11,6	0,115	0,0167	0,217	0,0114	0,0033	0,0277	0,122	0,0005	0,0121

Tablica 7. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava obrađene taljevine prvog lijevanja

Al [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]	Sr [%]	Na [%]
87,85	11,7	0,105	0,0173	0,221	0,0097	0,0035	0,0287	0,161	0,0005	0,0136

Tablica 8. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava bazne taljevine drugog lijevanja

Al [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]	Sr [%]	Na [%]
87,49	12	0,126	0,0191	0,169	0,0186	0,0038	0,0326	0,145	0,0005	0,011

Tablica 9. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava obrađene taljevine drugog lijevanja

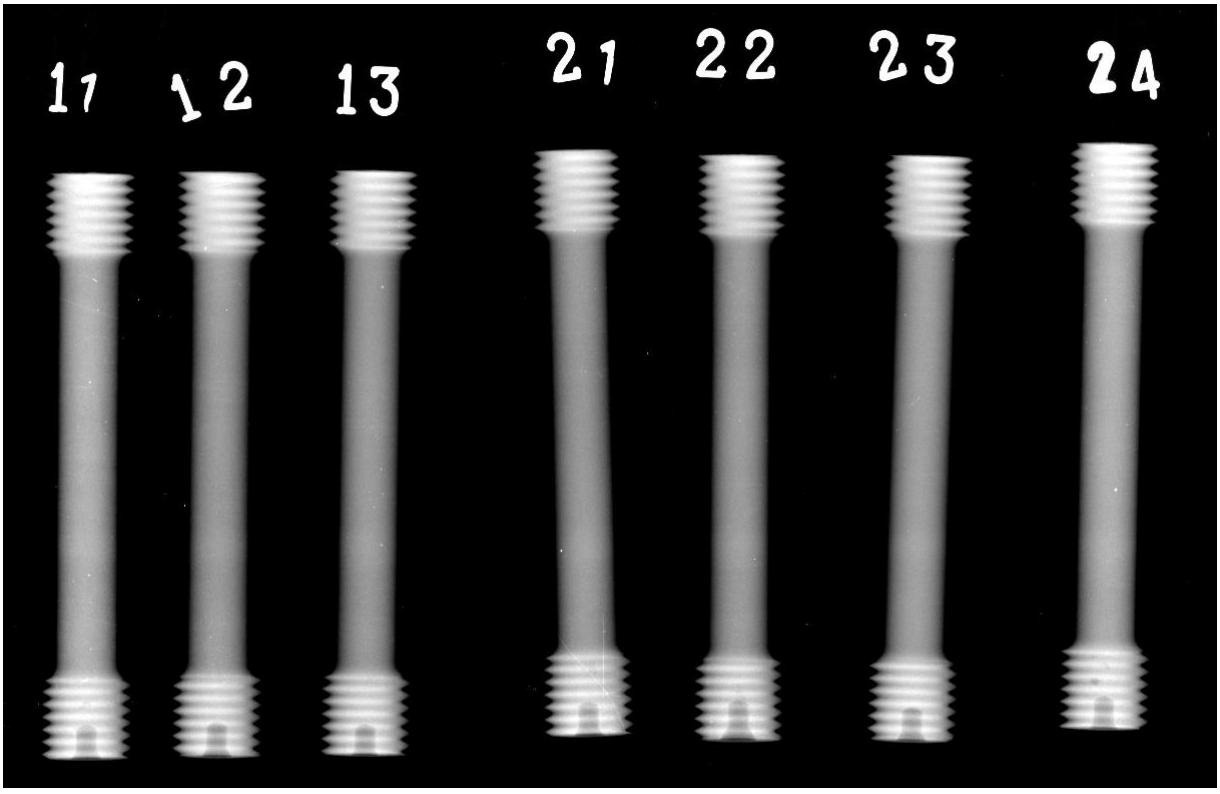
Al [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]	Sr [%]	Na [%]
87,22	12,1	0,12	0,018	0,197	0,0184	0,0039	0,033	0,191	0,0005	0,0245

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je obradom taljevine povišen sadržaj titana, natrija i mangana u navedenoj aluminijskoj leguri.

6.3. Rezultati radiografskog ispitivanja

Slika 29 prikazuje radiogram epruveta za statičko vlačno ispitivanje, pri čemu su:

- 11- epruveta bazne taljevine prvog lijevanja
- 12 i 13-epruvete obrađene taljevine prvog lijevanja
- 21 i 22- epruvete bazne taljevine drugog lijevanja
- 23 i 24 – epruvete obrađene taljevine drugog lijevanja.



Slika 29. Radiogram epruveta za statičko vlačno ispitivanje

Iz prikazanih rezultata radiografskog ispitivanja vidi se da ni jedna epruveta nema znakova poroznosti.

6.4. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja

U tablici 10 prikazani su rezultati statičko vlačnog ispitivanja sedam epruveta, četiri od obrađene taljevine i tri od bazne taljevine.

Tablica 10. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja

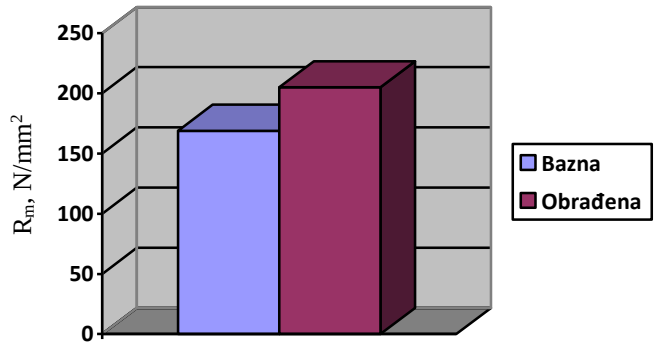
LIJEVANJE	**R_m [Nmm^{-2}]**	**$R_{p0,2}$ [Nmm^{-2}]**	**A_5 [%]**	**Napomena**
	Bazna taljevina			
1.	161,3	79,9	3	
2.	164,2	82,3	3,3	
2.	182,4	85,5	3,8	
	Obrađena taljevina			
1.	186,4	87,6	11	
1.	210,1	95	11,5	
2.	204,6	92,6	10,7	
2.	214,9	96,3	-	Lom izvan područja proučavanja

Vrijednosti prije kidanja: duljina (L_0) iznosila je 60 mm. Nakon kidanja očitane su veličine: vlačna čvrstoća (Rm), konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$), dok je produljenje (L_u) izmjereno. Produljenje epruvete (A_5) je izračunato prema formuli:

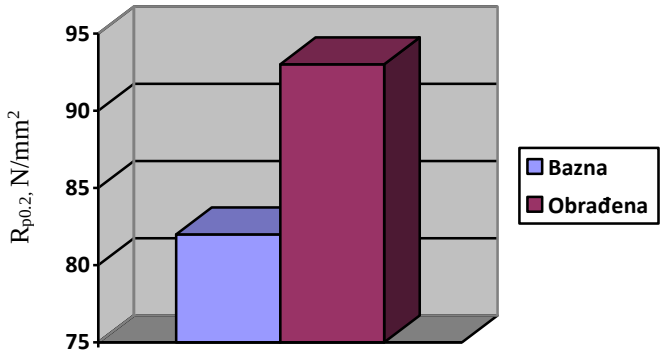
$$A=[(L_u-L_0)/L_0]\times 100$$

Istezljivost za epruvetu obrađene taljevine drugog lijevanja nije se mogla izračunati jer je lom bio zvan područja L_0.

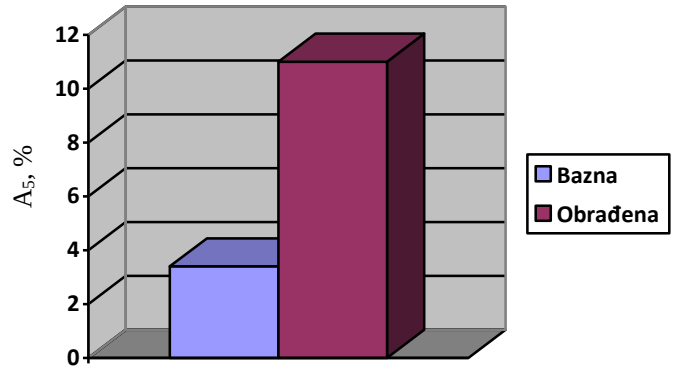
Grafički prikaz rezultata statičko vlačnog ispitivanja dani su na slikama 30-32.



Slika 30. Grafički prikaz prosječne vrijednosti vlačne čvrstoće (R_m) bazne i obrađene legure



Slika 31. Grafički prikaz prosječne vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) bazne i obrađene legure



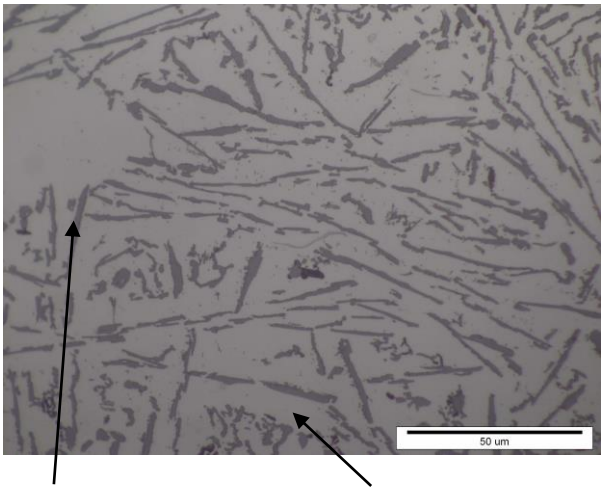
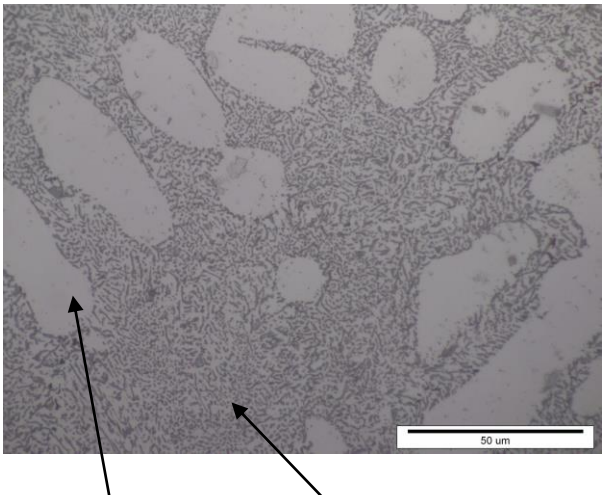
Slika 32. Grafički prikaz prosječne vrijednosti istezanja (A_5) bazne i obrađene legure

Iz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja vidi se da epruvete obrađene taljevine imaju bolja mehanička svojstva tj. veću vlačnu čvrstoću, konvencionalnu granicu razvlačenja i veću istezljivost.

6.5. Rezultati metalografskog ispitivanja

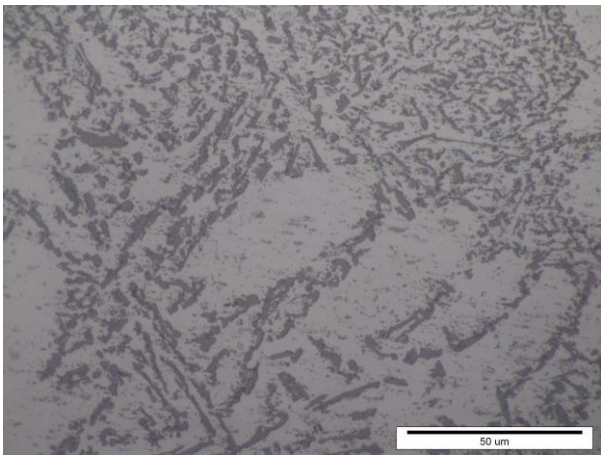
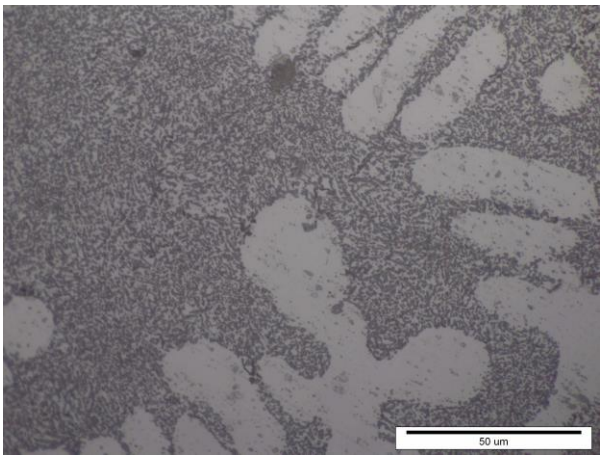
Mikrostrukture uzoraka bazne i obrađene AlSi12 legure prvog lijevanja prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Mikrostruktura uzoraka bazne i obrađene AlSi12 legure prvog lijevanja

Mikrostruktura uzoraka bazne AlSi12 legure	Mikrostruktura obrađene AlSi12 legure
	

Mikrostrukture uzoraka bazne i obrađene AlSi12 legure drugog lijevanja prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Mikrostruktura uzoraka bazne i obrađene AlSi12 legure drugog lijevanja

Mikrostruktura uzoraka bazne AlSi12 legure	Mikrostruktura obrađene AlSi12 legure
	

Na prethodnim slikama siva podloga predstavlja primarni aluminij, dok je eutektički silicij u obliku iglica i pločica. Vidljivo je da se u uzorcima modificirane AlSi12 legure mikrostruktura usitnila, tj. silicij u uzorcima bazne legure je grub i igličasti, dok je u uzorcima obrađene legure sitniji i pravilno raspoređen.

7. ZAKLJUČAK

Lijevanje je najdjelotvorniji način oblikovanja metalnih predmeta.

Iako se najviše proizvode odljevci od željeznih lijevova, aluminijeve legure imaju veliko značenje u ljevačkoj proizvodnji zbog svojih dobrih tehnoloških i mehaničkih svojstava. Najviše korištena legura aluminija je AlSi.

Postupcima obrade taljevine dobije se kvalitetna taljevina koja rezultira odljevcima visoke kvalitete, većom strojnom obradivošću i boljim mehaničkim svojstvima.

U radu je ispitan utjecaj obrade taljevine modifikacijom, usitnjavanjem zrna i otplinjavanjem na mehanička svojstva odljevka te njegovu mikrostrukturu. Određen je kemijski sastav bazne i modificirane taljevine i napravljena toplinska analiza.

Metalografskim ispitivanjem utvrđeno je da uzorci obrađene taljevine imaju sitniju mikrostrukturu tj. sitniji oblik silicija. Sitnija mikrostruktura daje bolja mehanička svojstva, što je potvrdilo mehaničko ispitivanje.

Na temelju rezultata statičkog vlačnog ispitivanja utvrđeno je da epruvete obrađene taljevine imaju veće vrijednosti vlačne čvrstoće (R_m), konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) i istezanja (A_5) od epruveta bazne taljevine.

LITERATURA

[1] Bonačić Mandinić, Z.; Budić, I.: Osnove tehnologije kalupljenja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.

[2] Bauer, B.; Mihalic Pokopec, I.: Osnove tehnologije lijevanja, FSB, Zagreb, 2017.

[3] Bauer, B.; Mihalic Pokopec, I.: Ljevarstvo, FSB, Zagreb, 2017.

[4] Budić, I.: Posebni ljevački postupci I. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, 2006.

[5] Budić, I.; Bonačić Mandinić, Z.: Osnove tehnologije kalupljenja, jednokratni kalupi 1 dio, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2001.

[6] Savez ljevača Hrvatske: Ljevački priručnik, Zagreb, 1985.

[7] Ljevarstvo 2011, dostupno na https://www.fsb.unizg.hr/ljevarstvo-2011.pdf, pristup 05. veljače 2020. godine

[8] Aluminij i legure aluminija, dostupno na https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf, pristup 05. veljače 2020. godine

[9] Grupa autora: ASM Speciality handbook, ASM International, Ohio, 2002.

[10] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstava i brodogradnje Zagreb, 2006.

[11] Foseco Non-Ferrous Foundryman´s Handbook, Foseco International, 2000.

Kaufman, J.G., Rooy, E.L.: Aluminium alloy casting - properties, processes and applications, ASM International, Ohio, 2005.

[12] Mihalic, I.; Mance, I.; Kramer, I.; Bauer, B.: Aluminijske legure za rad na povišenim temperaturama, Ljevarstvo 53, Zagreb, 2011.,

[13] Kalauz, V.: Istraživanje svojstava sekundarnih Al - legura, Magistarski rad, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2011.

[14] Bižić, V.: Livljivost, Diplomski rad, Metalurški fakultet u Sisku, Sisak, 2009.

[15] Dostupno na www.foseco.com, pristup 10.veljače 2020. godine

[16] Grupa autora: ASM Handbook, Vol. 15, Casting, ASM International, 1988., pp. 1038-1049

[17] Radanić, D.: Modifikacija eutektika kod lijevanja Al - legura, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[18] Zovko Brodarac, Z.: Pregled utjecaja brzog hlađenja na modifikaciju eutektičkog silicija u Al - Si slitinama, Ljevarstvo 45, 2003.

[19] Norma DIN-50125-2004, 2004.

PRILOZI

I. CD-R disc