

Utjecaj usitnjavanja zrna na mikrostrukturu i mehanička svojstva AlSi7Mg legure

Rostok, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:756739>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Rostok

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Branko Bauer, dipl. ing.

Student:

Marko Rostok

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru, dipl.ing. na savjetima, uputstvima i pomoći pri izradi ovog rada. Zahvaljujem se tvrtci Ljevaonica Bujan na prilici za izvođenje lijevanja legura te izvođenja ispitivanja u njihovim prostorima i svim ostalim djelatnicima Katedre i Laboratorija za ljevarstvo, Fakulteta strojarstva i brodogradnje na stručnoj pomoći.

Marko Rostok



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARKO ROSTOK**

Mat. br.: 0035194467

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj usitnjavanja zrna na mikrostrukturu i mehanička svojstva AlSi7Mg legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of grain refinement on microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg alloy**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju lijevanja aluminijskih legura i prikupiti podatke o sredstvima za usitnjavanje primarnog zrna aluminija. Navesti područja primjene AlSi7Mg legure. Prilikom pripreme taljevine provesti usitnjavanje zrna primarnog aluminija koristeći različite količine sredstva za usitnjavanje. Lijevati ispitne uzorke za statički vlačni pokus. Napraviti toplinsku analizu svake taljevine i analizu kemijskog sastava. Provesti metalografska i mehanička ispitivanja, te analizirati rezultate. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
6. svibnja 2021.

Rok predaje rada:
8. srpnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Branko Bauer

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJEVE LEGURE	2
2.1. Aluminij	2
2.1.1. Fizikalna svojstva.....	2
2.1.2. Prednosti i nedostatci	3
2.2. Aluminijske legure.....	4
2.2.1. Glavni legirni elementi	4
2.2.2. Dodatni legirni elementi	5
2.2.3. Al-Si legure	8
2.2.3. AlSi7Mg legura.....	10
3. LIJEVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA	14
3.1 Postupci lijevanja	14
3.2 Proizvodni proces u ljevačkoj industriji.....	17
3.3 Koraci pri izradi taljevine.....	20
3.4 Talioničke peći za taljenje aluminijskih legura.....	21
4. SKRUĆIVANJE I OBRADA ALUMINIJSKE TALJEVINE	25
4.1 Kristalizacija metala	25
4.2 Vrste skrućivanja metala	28
4.3 Skupljanje pri skrućivanju.....	29
5. USITNJAVANJE ZRNA I OBRADA TALJEVINE	30
5.1 O usitnjavanju zrna.....	30
5.2 Model usitnjavanja aluminijskih legura	32
5.3 Modifikacija i usitnjavanje podeutektskih Al-Si legura	32
5.4 Modifikacija i usitnjavanje nadeutektskih Al-Si legura.....	35
5.5 Usitnjavanje AlSi7Mg legure	36
5.6 Obrada otplinjavanjem	40
6. EKSPERIMENTALNI DIO	43
6.1. Postupak lijevanja	43
6.2. Toplinska analiza.....	48
6.3. Određivanje kemijskog sastava	54
6.4. Obrada uzoraka za statički vlačni pokus	56
6.5. Radiografsko ispitivanje.....	58
6.6. Statičko vlačno ispitivanje	60
6.7. Metalografsko ispitivanje	64

7. ZAKLJUČAK.....	71
LITERATURA.....	72

POPIS SLIKA

Slika 1.	Ljevačke Al-Si legure: a) fazni dijagram Al-Si, b) podeutektička struktura legure, c) eutektička struktura i d) nadeutektička struktura [3].....	9
Slika 2.	Ribarsko sidro nastalo gravitacijskim lijevanjem AlSi7Mg legure u pješčani kalup [7]	11
Slika 3.	Ovjes Airbusa od AlSi7Mg legure [7]	12
Slika 4.	Kućiste hlađanjaka [7].....	12
Slika 5.	Kontakti nosač za visokonaponski prekidač [7].....	13
Slika 6.	Fiting za gorivo [7].....	13
Slika 7.	Podjela postupaka lijevanja [8]	16
Slika 8.	Proizvodni proces u ljevaonici [9].....	19
Slika 9.	Vrste energije za talioničke peći [8].....	21
Slika 10.	Izvedbe peći s loncem a) podizni, b) fiksni, c) nagibni [8]	22
Slika 11.	Indukcijska peć [8]	23
Slika 12.	Krivulja hlađenja čistog metala [9]	25
Slika 13.	Krivulja hlađenja binarne legure [9]	26
Slika 14.	Proces skrućivanja [11]	27
Slika 15.	Egzogeno i endogeno skrućivanje [9]	28
Slika 16.	Lijevani AlSi7 uzorci koji pokazuju učinak usitnjavanja zrna: a) bez usitnjavanja zrna i b) s usitnjavanjem zrna [12]	31
Slika 17.	Različiti stupnjevi modifikacije eutektika Al-Si u rasponu od nemodificirane (A) do dobro modificirane (F) [12].....	33
Slika 18.	Mehanička svojstva uzoraka legure A356 u ovisnosti o modifikaciji i veličini zrna [12]	34
Slika 19.	Prikaz mikrostrukture Al-Si legure A356: a) bez dodanih elemenata, b) struktura s dodatkom 0,02 % Sr i 0,002 % Ti, c) 0,02% Sr, d) 0,002 % Ti [13]	35
Slika 20.	Prikaz mikrostrukture prije dodavanja sredstva za usitnjavanje zrna AlSi7Mg leguri [15]	37
Slika 21.	Utjecaj predlegure AlB ₃ na usitnjavanje zrna AlSi7Mg legure: a) veličina zrna prije dodavanja, b) veličina zrna nakon dodavanja [15]	37
Slika 22.	Utjecaj AlTi ₅ B ₁ predlegure: a) gnječena legura 1070, b) AlSi7Mg legura, c) i d) legura 1070 prije i poslije dodavanja predlegure, e) i f) AlSi7Mg legura prije i nakon dodavanja predlegure [15]	39
Slika 23.	Struktura usitnjenih AlSi7Mg legura: a) AlTi ₅ B ₁ , b) AlTi ₃ B ₃ , c) AlB ₃ ; d) AlB ₃ kod AlSi7Mg legure bez Ti e) dijagram veličine zrna u ovisnosti o vremenu nakon dodavanja predlegure [15]	40
Slika 24.	Topivost vodika u aluminiju [12].....	41
Slika 25.	Prikaz ingota legure AlSi7Mg prije taljenja.....	44
Slika 26.	Bazna taljevina AlSi7Mg u peći pri temperaturi 764 °C	45
Slika 27.	Quik-Cup čašica s termoparom za dobivanje krivulje hlađenja.....	46
Slika 28.	Kalupi za lijevanje uzoraka: a) Dvodjelna kokila za epruvetu za mehanička svojstva, b) Dvodjelna kokila za uzorak za ispitivanje kemijskog sastava	47
Slika 29.	Krivulja hlađenja i prva derivacija [16]	49
Slika 30.	Krivulja hlađenja za prvu baznu taljevinu.....	50
Slika 31.	Prikaz usporedbe krivulja hlađenja druge bazne taljevine i prve obrađene taljevine	52
Slika 32.	Prikaz usporedbe krivulja hlađenja druge bazne taljevine i druge modificirane taljevine	53
Slika 33.	Uređaj Hitachi Foundry-Master za određivanje kemijskog sastava legure.....	55

Slika 34.	Izgled epruvete za statički vlačni pokus prema normi DIN 50125:2009-077	56
Slika 35.	Prikaz obrade epruvete na tokarilici	57
Slika 36.	Prikaz radiograma za sve četiri epruvete od AlSi7Mg.....	58
Slika 37.	Uzorci prije statičkog vlačnog ispitivanja na kidalici	60
Slika 38.	Kidalica Werkstoffprüfmaschinen EU 40 mod	61
Slika 39.	Graf statičkog vlačnog ispitivanja za bazni uzorak 1	62
Slika 40.	Graf statičkog vlačnog ispitivanja za bazni uzorak 2.....	62
Slika 41.	Graf statičkog vlačnog ispitivanja za modificirani uzorak 1	63
Slika 42.	Graf statičkog vlačnog ispitivanja za modificirani uzorak 2.....	63
Slika 43.	Uređaj za brušenje Mintech 233.....	65
Slika 44.	Uređaj za poliranje Struers DAP-V	66
Slika 45.	Mikroskop Olympus GX51	66
Slika 46.	Mikrostruktura prvog baznog uzorka AlSi7Mg legure	67
Slika 47.	Mikrostruktura drugog baznog uzorka AlSi7Mg legure	67
Slika 48.	Mikrostruktura prvog usitnjenog i modificiranog uzorka AlSi7Mg legure	68
Slika 49.	Mikrostruktura drugog usitnjenog i modificiranog uzorka AlSi7Mg legure	68
Slika 50.	Nagrižena mikrostruktura prvog baznog uzorka	69
Slika 51.	Nagrižena mikrostruktura drugog usitnjenog uzorka.....	70

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav AlSi7Mg legure DIP 523	44
Tablica 2. Kemijski sastav Nukleanta 100 SP	48
Tablica 3. Prikaz karakterističnih temperatura krivulje hlađenja prije i nakon obrade.....	51
Tablica 4. Prikaz vrijednosti R_{ek} i d_{TE} prije i poslije obrade	53
Tablica 5. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava prve bazne taljevine	55
Tablica 6. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava druge bazne taljevine	55
Tablica 7. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava prve obrađene taljevine.....	56
Tablica 8. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava druge obrađene taljevine.....	56
Tablica 9. Rezultati i izmjere statičkog vlačnog ispitivanja AlSi7Mg legure.....	64
Tablica 10. Kemijski sastav Kellerovog reagensa.....	69

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T _L	°C	temperatura likvidusa
T _E	°C	temperatura eutektika
T _P	°C	temperatura ulijevanja
E	N/mm ²	modul elastičnosti
R _m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
F _m	N	maksimalna sila
S ₀	mm ²	površina početnog presjeka epruvete
F _b	N	konačna sila pri kojoj dolazi do loma epruvete
d ₀	mm	promjer epruvete
d ₁	mm	promjer navoja
L _C	mm	paralelna dužina
L _t	mm	ukupna dužina epruvete
L ₀	mm	početna mjerna duljina epruvete

SAŽETAK

Ovaj rad podijeljen je na dva dijela, teorijski dio i eksperimentalni.

U okviru teorijskog dijela rada, proučene su Al-Si legure, s naglaskom na AlSi7Mg leguru, njezina svojstva i primjenu. Također, obuhvaćene su tehnologije lijevanja aluminijevih legura te je detaljnije objašnjena obrada taljevine.

U eksperimentalnom dijelu provedena je obrada taline AlSi7Mg legure. Napravljeno je usitnjavanje zrna pomoću Nukleanta 100 SP i modifikacija eutektika pomoću Simodala 77. Lijevani su odljevci za statički vlačni pokus i ispitivanje kemijskog sastava bazne i obrađene taline. Također je provedena toplinska analiza i snimljene su krivulje hlađenja. Napravljena je metalografska analiza mikrostrukture.

Toplinska analiza pokazala je učinak sredstva za usitnjavanje zrna. Metalografija je pokazala učinak modifikacije eutektika. Očekivani utjecaj obrade taline na mehanička svojstva nije dobiven.

Ključne riječi: aluminijeve legure, lijevanje, usitnjavanje zrna

SUMMARY

This paper is divided into two parts, the theoretical part and the experimental part.

Within the theoretical part of the paper, Al-Si alloys were studied, with emphasis on AlSi7Mg alloy, its properties and applications. Also, the technologies of aluminum alloys casting are included and the melting process with melt treatment is explained in more detail.

In the experimental part, the AlSi7Mg alloy melt treatment was processed. Grain refinement was performed using Nucleant 100 SP and eutectic modification using Simodal 77. Samples were cast for tensile testing and testing of the chemical composition of the base and treated melt. Thermal analysis was also performed and cooling curves were recorded. A metallographic analysis of the microstructure was performed.

Thermal analysis showed the effect of grain refining agent. Metallography showed the effect of eutectic modification. The expected influence of melt treatment on mechanical properties was not obtained.

Key words: aluminium alloys, casting, grain refinement

1. UVOD

Aluminij je najrašireniji laki metal u Zemljinoj kori koji se u prirodi nalazi kao sastavni dio stijena i gline, a prvi put je izoliran kao zasebna čestica 1825. godine. Charles M. Hall i Paul Héroult dvojica su znanstvenika zaslužni za otkriće taljenja aluminija. Obojica su patentirali isti elektrolitički postupak, neovisno jedan o drugom čak 61 godinu nakon same izolacije čestice te su u svojoj metodi koristili glinicu kao sirovinu i rastaljeni kriolit. Sljedeće važno otkriće bilo je Bayerov postupak s kojim se dobiva glinica iz fino samljevene boksit rude. Ta otkrića su spustila cijenu aluminija i pokrenula industriju aluminija, a ujedno su i danas najekonomičnija rješenja proizvodnje aluminija. [1]

Zbog slabijih svojstava koje ima kao samostalan metal, počele su se razvijati aluminijeve legure. Ključno otkriće u razvoju legura je bio fenomen otvrdnjavanja starenjem (eng. *age hardening*) u kojem legure aluminija, iako još uvijek slabe nakon toplinske obrade, polako očvršćavaju tijekom starenja na sobnoj temperaturi. Ovakvo ponašanje legura prvi put je predstavljeno na leguri koja sadržava 4% Cu od strane njemačkog metalurga Alfreda Wilma.

Aluminijeve legure se općenito dijele u tri skupine – gnječene legure koje se ne obrađuju toplinom; gnječene legure koje se obrađuju toplinski i lijevane legure. Zbog značajnih mehaničkih svojstava, ali i niske gustoće, aluminijeve legure zauzimaju važno mjesto u ljevačkoj industriji. Prema tome, primjena aluminijskih legura je vrlo široka te su najčešće prisutne u avioindustriji, automobilskoj, brodogradnji, kemijskoj industriji i prehrambenoj industriji.

Dodavanje legiranih i dodatnih elemenata aluminiju radi poboljšavanja strukture, te samim time i mehaničkih svojstava nije dovoljno. Temeljno pravilo kod oblikovanja metala, te samim time u ljevarstvu je da mikrostruktura kontrolira konačna svojstva produkta uz moguće nastale defekte prilikom lijevanja. Postupak lijevanja aluminijskih legura je složen proizvodni proces koji zahtijeva točnost i besprijeckornu izvedbu prilikom pripreme i zagrijavanja taljevine.

Ovaj rad bavit će se problematikom lijevanih aluminijskih legura i kako usitnjavanje zrna utječe na mikrostrukturu i mehanička svojstva odabrane AlSi7Mg legure.

2. ALUMINIJEVE LEGURE

2.1. Aluminij

Aluminij je metal, kemijskog simbola Al, koji čini oko 8% zemljine kore. Čisti aluminij je slab, s vlačnom čvrstoćom u rasponu od 90 N/mm² do 140 N/mm² i gustoćom $\rho=2,7$ g/cm³. Svoju primjenu, kao samostalan metal, je našao u elektroničkoj industriji zbog svoje izvrsne toplinske i električne vodljivosti, ali i u prehrambenoj industriji kao dio ambalaža, limenki ali i posuđa.

Međutim, za ozbiljniju primjenu, kao primjerice konstrukcijski metal, aluminij se mora ojačati legiranjem, gdje mu vlačna čvrstoća može doseći do 500 N/mm².

Izuzetno je pogodan za lijevanje, a u slučaju lijevanja velikih predmeta često ima prednost u odnosu na čelik. U odnosu na gnječene aluminijske legure, postoji puno veći spektar različitosti svojstava i vrsta lijevanih aluminijskih legura, prema tome ne čudi što su kao takve postale standard u nekim industrijama kao što je automobilska.

2.1.1. Fizikalna svojstva

Fizikalna svojstva aluminijske legure su slična, a to su [1]:

1. Niska gustoća. Za usporedbu, gustoća čelika je $\rho = 7,9$ g/cm³ dok je gustoća aluminijske legure $\rho = 2,7$ g/cm³. To ga čini izuzetno lakim metalom, pa mu masa iznosi čak trećinu mase čelika.
2. Modul elastičnosti E – aluminij je elastičan metal s relativno malim modulom elastičnosti. Čisti aluminij na sobnoj temperaturi ima modul elastičnosti 69 kN/mm² dok konstrukcijski čelik ima 205 kN/mm². Modul elastičnosti aluminijske legure postupno opada s temperaturom, a Poissonov faktor (ν) mu je nešto veći od čelika i iznosi 0,33.
3. Vrelište – točka vrelišta aluminijske legure je 1800 °C, dok na temperaturi od 660° započinje njegovo taljenje.
4. Električna konduktivnost – aluminij je uz bakar standardni metal u vodičima i električnim instalacijama, a otpornost čistog aluminijske legure iznosi oko 2,7 Ω , a vrijednost mu varira ovisno o legirnim elementima.

2.1.2. Prednosti i nedostatci

Prednosti korištenja aluminija su [1]:

1. Mala gustoća.
2. Čisti aluminij ne hrđa i normalno se može koristiti nebojen, osim kad je legiran i treba posebnu zaštitu.
3. Ima dobra svojstva pri niskim temperaturama. Aluminij je izuzetno pogodan za kriogene primjene, jer nije sklon lomu na niskoj temperaturi. Njegova se mehanička svojstva neprestano poboljšavaju kako temperatura opada.
4. Pogodan je za različite tehnologije proizvodnje:
 - ekstruziju – standardan način izrade aluminijskih profila
 - zavarivanje – većina legura se može elektrolučno zavarivati
 - obrada odvajanjem čestica – primjerice, glodanje
 - lijepljenje – upotreba lijepljenih veza koristi se kod spajanja aluminijskih limova

Veliki nedostatak je to da iako su troškovi proizvodnje aluminija jeftini, cijena samog metala je visoka, čak 1.5 puta veća od konstrukcijskog čelika. Nadalje, nedostatci korištenja aluminija su [1]:

1. Izvijanje – zbog nižeg modula elastičnosti.
2. S povećanjem temperature njegova svojstva slabe.
3. Prilikom zavarivanja, pod utjecajem topline, kod nekih legura dolazi do lokalnog pada čvrstoće na zavarenim spojevima.
4. Umor materijala – aluminijske legure i aluminij su sklonije oštećenju uslijed umora materijala za razliku od čeličnih.
5. Aluminij se širi i skuplja s temperaturom dvostruko više od čelika.
6. Sklon je elektrolitičkoj koroziji – u kontaktu s drugim metalima može doći do ozbiljne korozije aluminija, osim ako se ne poduzmu ispravne mjere opreza. To se može primijeniti čak i kada koristite legure koje su inače vrlo izdržljive.

2.2. Aluminijeve legure

Aluminijeve legure se obično razvrstavaju u tri skupine [2]:

1. Gnječene legure koje se ne obrađuju toplotom

Ovakve legure otvrdnjavaju hladnim oblikovanjem i to su obično legure Al-Mn (serije 3xxx) ; Al-Si (serije 4xxx) i Al-Mg (serije 5xxx)

2. Gnječene legure koje se obrađuju toplinski

Toplinskom obradom se postiže veća čvrstoća i u ovu vrstu spadaju legure Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si (serije 6xxx), Al-Zn-Mg i Al-Zn-Mg-Cu (serije 7xxx), Al-Li (serije 8xxx)

3. Lijewane legure

Aluminijeve legure za lijevanje su Al-Cu (2xxx), Al-Si + Cu ili Mg (serije 3xxx), Al-Si (serije 4xxx), Al-Mg (serije 5xxx), Al-Zn (serije 7xxx) i Al-Sn (serije 8xxx)

Gnječene legure su u konačnici boljih svojstava, ali i skuplje od odljevaka koji su manje plastični i dobivena svojstva nisu toliko visoka kao kod gnječenih legura koje se obrađuju toplinski.

U okviru ovog rada, obradit će se svojstva lijevanih legura.

2.2.1. Glavni legirni elementi

Legiranjem aluminija poboljšavaju mu se mehanička svojstva, a legirni elementi utječu na mikrostrukturu. Glavni legirni elementi kod ljevačkih legura su silicij (Si), magnezij (Mg) i bakar (Cu).

1. Silicij (Si)

Dodavanjem silicija aluminiju smanjuje se temperatura taljenja i poboljšava tečljivost legure. Al-Si legure se ne mogu tretirati toplinski, osim ako se doda magnezij te se koriste za izradu odljevaka. [3]

Silicij poboljšava otpornost na trošenje i smanjuje koeficijent toplinskog rastezanja Al-Si legura. Međutim, dodavanjem silicija strojna obrada legure postaje slabija. [4]

Povećanjem udjela silicija povećava se vrijeme skrućivanja legure, smanjuje se temperatura likvidusa, povećava se vlačna čvrstoća i raste tvrdoća.

2. Bakar (Cu)

Dodavanjem bakra utječe se na čvrstoću i tvrdoću aluminijskih legura. Poboljšava obradljivost legure i omogućuje ojačanje prilikom toplinske obrade, ali povećava korozijsku osjetljivost. Smanjuje plastičnost odljevka. [4]

Livljivost Al-Cu legure se pogoršava povećanjem količine bakra, a nedostatak im je i sklonost pukotinama prilikom skrućivanja. [4]

3. Magnezij (Mg)

Magnezij povećava otpornost na koroziju, utječe na povećanje čvrstoće te poboljšava karakteristike hladnog očvršćavanja. U kombinaciji sa silicijem, stvara se intermetalni spoj Mg_2Si koji ojačava leguru. [4]

Al-Mg legure koriste se za konstrukcijske primjene i pripadaju 5xxx seriji, te se kao takve proizvode u obliku lima i ploča. Pružaju dobru zavarljivost, a u slučaju lijevanja imaju nižu livljivost. [3]

2.2.2. Dodatni legirni elementi

Izbor dodatnih legirnih elemenata utječe na integritet legure što u konačnici rezultira poboljšanim tribološkim i mehaničkim svojstvima.

Dodatni legirni elementi su [4,5]:

- **Mangan (Mn)**

Dodavanjem mangana poboljšavaju se svojstva otvrdnjavanja i legura ojačava, dok se duktilnost ne smanjuje kao ni otpornost na koroziju. U kombinaciji s kromom (Cr) povećava se duktilnost aluminijskim legurama. Ovakve legure pripadaju seriji 3xxx i koriste se za izradu posuda i izmjenjivača topline.

- **Cink (Zn)**

Cink je prisutan samo u aluminijskim legurama serije 7xxx, a često je prisutan kao prihvatljiva nečistoća u mnogim legurama jer je prilično neutralan element – niti poboljšava svojstva, niti umanjuje svojstva legure.

- **Željezo (Fe)**

Željezo je neprihvatljiva nečistoća u aluminijskim legurama jer ono dovodi do neželjenih intermetalnih faza tijekom skrućivanja koje nepovoljno utječu na mehanička svojstva, posebice duktilnost.

Najčešći netopivi intermetalni spojevi koje željezo stvara zbog reaktivnosti u Al-Si legurama su α -Al₈Fe₂Si i β -Al₅FeSi. Ukoliko je prisutan i magnezij u leguri, tada dolazi i do stvaranja π faza, π -Al₈FeMg₃Si₆.

Kritična razina željeza je povezana s postotkom silicija. U ljevačkim legurama željezo utječe na pretjeranu poroznost odljevaka, stoga je bitno voditi se sljedećim smjernicama u ljevaonicama:

1. Minimizirati razinu željeza u legurama što znači pažljivo birati uložni materijal i održavati dobar vatrostalni premaz na svim čeličnim alatima koji se koriste za pripremu legure.
2. Dodavanjem mangana u Al-Si legure neutralizira se utjecaj željeza te nastaje Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂. Dolazi do stvaranja većeg broja manjih zrna tijekom skrućivanja čime se izravno utječe na smanjenje poroznosti. Glavni cilj je omogućiti rast α fazi (α -Al₈Fe₂Si) i eliminirati štetniju β fazu (β -Al₅FeSi).
3. Iako toplinska obrada pospješuje svojstva legure, potrebno je i dalje održati minimalnu razinu željeza u legurama.

- **Nikal (Ni)**

Nikal u legurama Al-Cu poboljšava tvrdoću i čvrstoću na povišenim temperaturama i smanjuje koeficijent toplinskog rastezanja.

- **Kositar (Sn)**

Kositar ima svojstvo smanjenja trenja te se zato koristi u legurama za lijevanje ležajeva i čahura. [4]

- **Titan (Ti) i Bor (B)**

Titan bitno poboljšava antikorozivna svojstva legura. Dodaje se aluminiju radi poboljšanja efekta usitnjavanja zrna a taj efekt se pospješuje ukoliko je i Bor (B) prisutan u talini. Međutim, ako se sadržaj titana poveća iznad peritektičke točke koja iznosi 0,15 % tada se javljaju poteškoće u usitnjavanju zrna i poteškoće u lijevanju jer struktura zrna postaje grublja. [4]

- **Krom (Cr) i Kobalt (Co)**

Krom suzbija rast zrna na povišenim temperaturama i poboljšava duktilnost i žilavost aluminijskim legurama, dok u kombinaciji sa kobaltom povećava otpornost na koroziju. [5]

Od ostalih dodatnih elemenata, u aluminijske legure se dodaju stroncij, natrij, kalcij i antimon. Ti se elementi dodaju eutektičkim ili podeutektičkim lijevačkim legurama aluminija i silicija kako bi se modificirala morfologija i mikrostruktura eutektične silicijske faze. [4]

Cirkonij (Zr) stvara intermetalne spojeve u rekristalizacijskoj fazi te tako povećava temperaturu kristalizacije. [3]

Zanimljivo je spomenuti i utjecaj berilij (Be) u kombinaciji sa željezom koji utječe na promjenu intermetalnih spojeva u aluminijskim legurama. [4]

Dodatak litija (Li) aluminiju povećava čvrtoću i modul elastičnosti, te također smanjuje gustoću. Za poboljšanje obradivosti aluminijskih legura dodaju se olovo (Pb) i bizmut (Bi). [3]

2.2.3. Al-Si legure

Al-Si legure mogu se podijeliti u tri glavne kategorije, ovisno o masenom udjelu silicija [4]:

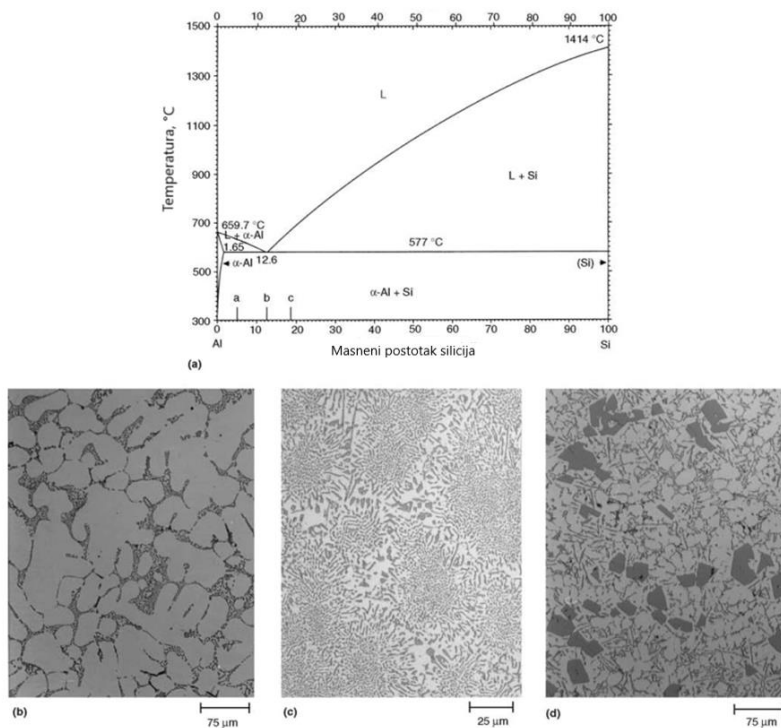
- podeutektičke (<12% Si)
- eutektičke (12-13% Si)
- nadeutektičke (14-25% Si)

Topivost silicija u aluminijskog leguri je niska, a u komercijalnim legurama često se nalaze nečistoće željeza Fe nastale kao produkti rafiniranja, topljenja i taljenja. Pri niskim udjelima nečistoća, većina željeza ostaje u taljevini sve dok se ne dogodi eutektička reakcija kada nastaje intermetalni spoj Al_3Fe s monoklinskom strukturom kristala. Ako je prisutan i mangan Mn, a ovisno o brzini skrućivanja, umjesto toga može doći i do taloženja Al_6Fe . Komercijalne legure Al-Si koje sadrže nečistoće željeza tvore dvije vrste intermetalnih spojeva eutektičkom reakcijom u kojoj se taljevina pri eutektičkoj temperaturi i sastavu pretvara u krutinu. Kod legura s malim udjelom silicija, željezo je prisutno u spoju Al_3Fe , dok je na malo višim udjelima silicija u Al-Si legurama prisutno kao $\alpha\text{-Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$ u kubičnoj kristalnoj strukturi ili kod najviših razina silicija pojavit će se kao $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}$ u monoklinskoj kristalnoj strukturi. [6]

Topivost silicija se može pratiti Al-Si faznim dijagramom (Slika 1). Može se uočiti da su talište aluminija i silicija $660,45\text{ }^\circ\text{C}$ i $1414\text{ }^\circ\text{C}$, a da se eutektička reakcija javlja pri masenom postotku silicija 12,6 % i temperaturi $577 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$. Na eutektičkoj temperaturi dolazi do maksimalne topivosti silicija i ona iznosi 1,65 %. Modificiranje eutektika je moguće vrlo malim dodavanjem natrija. Također, isti učinak se može dobiti povećavanjem brzine skrućivanja, te se upravo zato često koriste tlačni lijev i lijevanje u trajne kalupe jer oba postupka mogu stvoriti sitnije zrnate strukture i bolja svojstva.

Kod nadeutektičkih Al-Si legura, ustanovljeno je da je fosfor najučinkovitiji modifikator silicijske faze koji smanjuje veličinu i količinu čestica silicija.

Podeutektičke legure su široko rasprostranjene i koriste se najčešće u automobilske industriji, a nadeutektičke se koriste u primjenama koje zahtijevaju otpornost trošenju.



Slika 1. Ljevačke Al-Si legure: a) fazni dijagram Al-Si, b) pondeutektička struktura legure, c) eutektička struktura i d) nadeutektička struktura [3]

2.2.3. AlSi7Mg legura

Legura s kojom će se odraditi eksperimentalni dio je AlSi7Mg legura i pripada takozvanim antikorodalima. Ova legura se može prilagoditi svim poljima rada zbog svojih izvrsnih mehaničkih svojstava, električne vodljivosti i otpornosti na koroziju, zahvaljujući niskom udjelu silicija. Zbog viskog udjela magnezija, posjeduje visoku čvrstoću i tvrdoću i malo istezanje. A zbog svojih mehaničkih karakteristika posjeduje dobru zavarljivost i može se izvrsno oblikovati obradom odvajanjem čestica. [7]

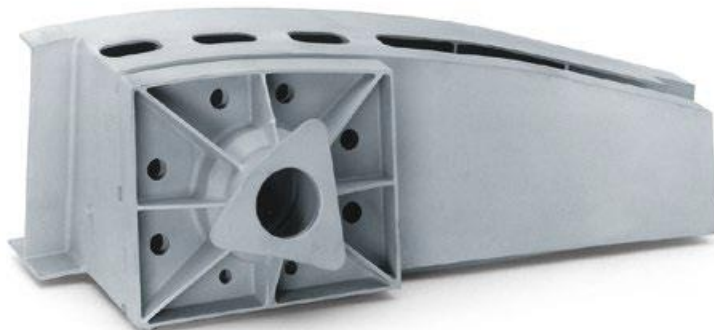
Najčešće se koristi u arhitekturi, avioindustriji, automobilskom inženjerstvu, brodogradnji i kemijskoj industriji.

Slika 2. prikazuje ribarsko sidro nastalo gravitacijskim pješčanim lijevom s legurom AlSi7Mg, sa udjelom magnezija od 0,6%. [7]



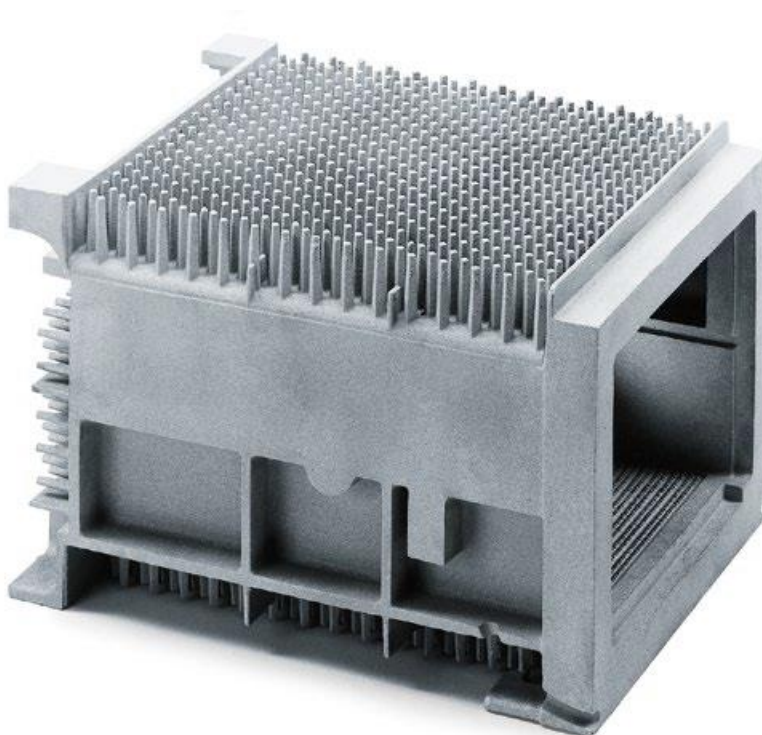
Slika 2. Ribarsko sidro nastalo gravitacijskim lijevanjem AlSi7Mg legure u pješčani kalup [7]

Slika 3. prikazuje ovjes Airbusa 320, proizveden niskotlačnim lijevanjem AlSi7Mg legure i umjetno ostaren.



Slika 3. Ovjes Airbusa od AlSi7Mg legure [7]

Slika 4. prikazuje kućište hladnjaka nastalo pješčanim lijevom AlSi7Mg legure sa udjelom magnezija od 0,3%.



Slika 4. Kućište hladanjaka [7]

Slika 5. prikazuje kontakti nosač za visokonaponski prekidač nastao gravitacijskim lijevanjem AlSi7Mg legure.



Slika 5. Kontakti nosač za visokonaponski prekidač [7]

Slika 6. prikazuje industrijski fitting za gorivo nastao pješčanim lijevom.



Slika 6. Fiting za gorivo [7]

3. LIJEVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA

Aluminijski odljevci imaju važnu ulogu u rastu aluminijske industrije još od 19. stoljeća. Danas se oni proizvode svim komercijalnim postupcima lijevanja – od tlačnog i niskotlačnog lijeva, do pješčanog i gravitacijskog lijevanja u trajne kalupe.

Lijevanje pripada među najjednostavnije, ali i najstarije oblike proizvodnje kojim se dobiva poluproizvod - odljevak, kojeg je najčešće potrebno naknadno obraditi. Postupak pješčanog lijeva u osnovi uključuje fazu pripreme i izrade modela, odnosno replike koja služi za oblikovanje kalupne šupljine u koju se rastaljeni metal pod utjecajem gravitacijske sile ulijeva te skrućivanjem preuzima oblik šupljine. Završne faze lijevanja su istresanje odljevka iz kalupa, čišćenje, toplinska obrada i kontrola.

Glavne prednosti tehnologije lijevanja su:

1. Ne postoje ograničenja u odabiru vrste metala ili legure
2. Lijevanjem se mogu proizvesti predmeti različitih dimenzija
3. Mogućnost izrade kompliciranih vanjskih i unutarnjih oblika, što niti jednom drugom tehnologijom nije moguće postići
4. Mehanička svojstva ovise o izboru metala i toplinske obrade
5. Lijevanje je jeftina i ekonomična tehnologija.

Upravo zbog širokog spektra primjene, lijevačka industrija zadovoljava tržište s lijevaonicama različitih kapaciteta i veličina, ali i s različitim postupcima lijevanja.

3.1 Postupci lijevanja

Postoje dvije vrste lijevanja, koje se dijele po vrsti uljevnice sile:

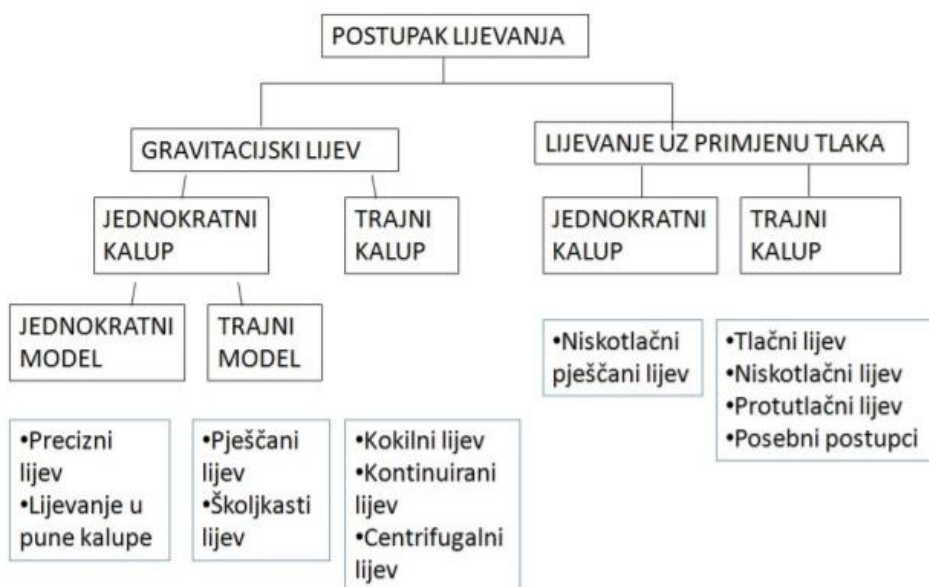
- gravitacijski lijev
- lijevanje uz primjenu tlaka

Također se dijele s obzirom na vrstu kalupa, na jednokratne kalupe - koji se mogu koristiti samo jednom i u trajne kalupe.

Jednokratni klupi, u koje pripadaju - pješčani lijev, školjkasti, precizni lijev i lijevanje u pune kalupe imaju nisku cijenu za razliku od trajnih kalupa. Međutim, zbog dugog vremena izrade samog kalupa, produktivnost im je manja u odnosu na lijevanje u trajne kalupe. Jednokratni kalupi su idealni za kompleksne odljevke velikih dimenzija, a primjenjuju se i u pojedinačnoj i u serijskog proizvodnji. Kalupna mješavina, smjesa pijeska, veziva i dodataka, je materijal od kojeg se izrađuje jednokratni kalup. Nakon lijevanja, uz određene tehnološke tretmane, kalupna mješavina se može ponovno upotrijebiti.

Trajni kalupi - kokile se izrađuju od čvrstih metalnih materijala otpornih na toplinu, a sastavljeni su od više dijelova te imaju metalne jezgre s izvlakačima kako bi se i složeniji odljevci mogli izvaditi iz kalupa. Nedostatak trajnih kalupa su geometrijska ograničenja u konstrukciji povezana s mogućnošću otvaranja kalupa i vrlo skupa izrada, čime su pogodniji za serijsku proizvodnju, većinom neželjeznih legura. [8]

U trajni kalupima mogu se dobiti viskokvalitetni odljevci, manjih dimenzija s dobrim mehaničkim svojstvima – sitnozrnatom strukturom.



Slika 7. Podjela postupaka lijevanja [8]

3.2 Proizvodni proces u ljevačkoj industriji

Ljevaonica je prostor namijenjen za :

- proizvodnju kalupa
- taljenje i obradu taljevine
- provođenje postupaka lijevanja
- čišćenje i obradu odljevaka
- antikorozivnu zaštitu.

Proizvodni proces se u ljevaonicama može podijeliti na osam temeljnih koraka [9]:

1. **Tehnološka priprema** – razrada gotovog proizvoda koja uključuje simulaciju lijevanja i skrućivanja.

2. **Taljenje i obrada metalnog zasipa** – metal se tali u posebnim pećima ovisno da li se radi o željeznom lijevu ili neželjeznim legurama.

3. **Priprema i izrada kalupa** - kod jednokratnih kalupa obuhvaća izradu modela i jezgrenika, jezgre i kalupa te njihovo sastavljanje. Kod trajnih kalupa obuhvaća zagrijavanje kalupa, nanošenje premaza te zatvaranje kalupa

4. **Lijevanje metala** – nakon taljenja metalnog zasipa, taljevina se prelijeva u ljevačke lonce iz kojih se ulijeva u kalupe

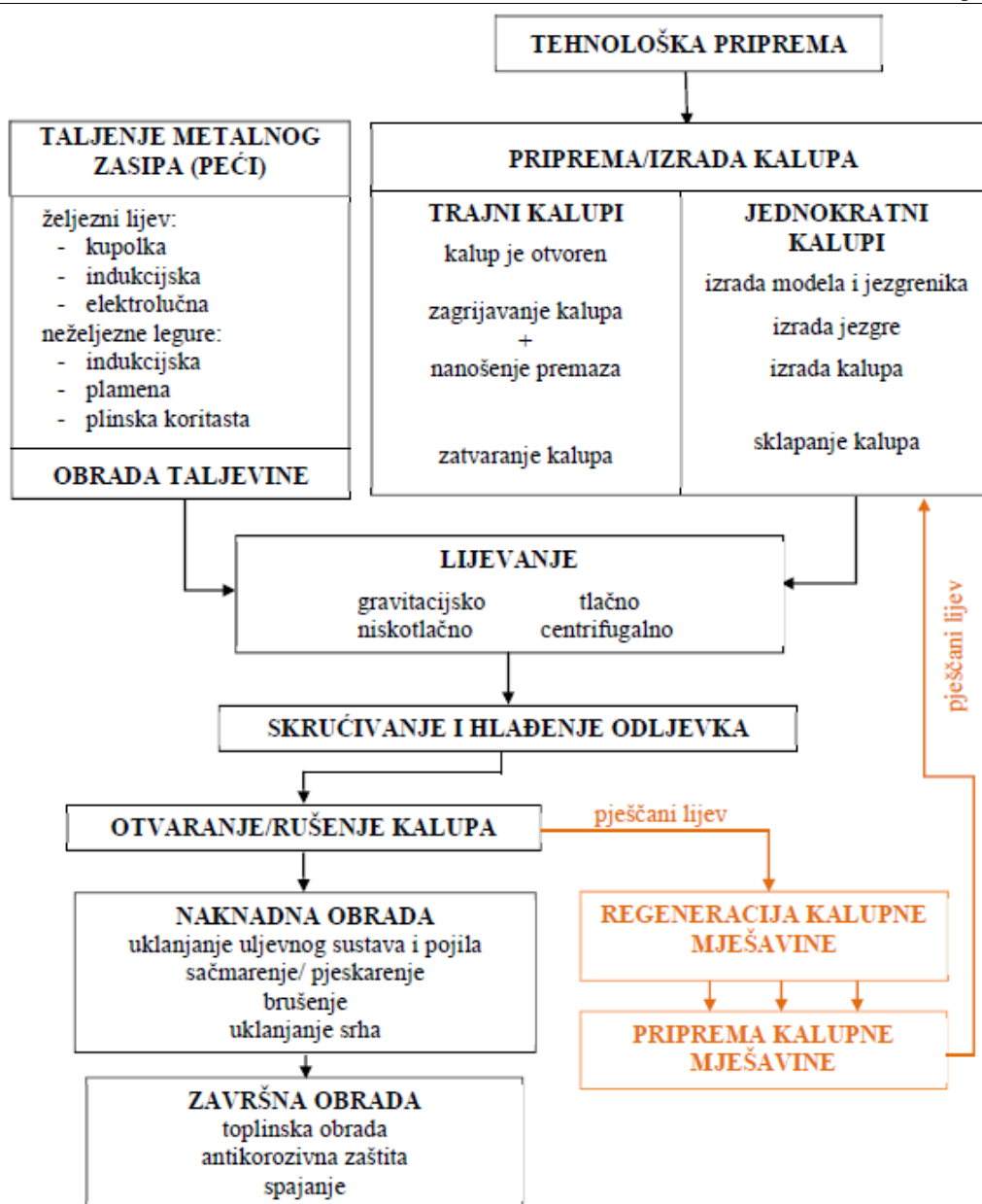
5. **Skrućivanje i hlađenje odljevka**

6. **Vađenje odljevka iz kalupa** – nakon hlađenja, trajni kalup se otvara kako bi se odljevak izvadio dok se jednokratni kalup razrušuje kako bi se došlo do odljevka.

7. Kontrola kvalitete i naknadna obrada – ako odljevak zadovolji kriterije, šalje se na dodatnu obradu u kojoj se uklanjaju uljevni sustav i sustav napajanja te se podvrgava obradi – pjeskarenju, brušenju i sl.

8. Otprema - kad su odljevci poluproizvodi slijedi njihova montaža i spajanje te otprema cijelog sklopa naručitelju.

Na slici 8. prikazan je proizvodni proces, koji može varirati u ovisnosti o metalu koji se lijeva, kapacitetima lijevaonice i vrsti kalupa i odljevaka.



Slika 8. Proizvodni proces u ljevaonici [9]

3.3 Koraci pri izradi taljevine

Taljenje metala se odvija u talioničkim pećima, a može se podijeliti u nekoliko faza [10]:

1. Priprema metala

Priprema metala uključuje predgrijavanje ili sušenje komadića metala ili ingota čime se uklanjaju vlaga i električki nabijene čestice koje mogu prouzrokovati eksploziju u pećima. Ukoliko se radi o taljenju 'otpadnih komada metala' radi se o skidanju lakova, ulja i drugih onečišćenja. Obično se ovakav proces radi u pećima na prirodni plin, a česta je izvedba da se sustavi za predgrijavanje baziraju na iskoristivosti dimnih plinova i topline talioničkih peći.

2. Taljenje

Nakon pripreme slijedi proces taljenja metala u pećima što je vrlo agresivan proces u kojem su taljevina, obloge peći i atmosferski plinovi kao produkti izgaranja na vrlo visokim temperaturama. Važan čimbenik u taljenju je i ušteda energije koja se lako može izgubiti prijenosom taljevine do mjesta ulijevanja. Primjerice, ako se peći pune dok su hladne, postupak taljenja postaje neučinkovit.

Peć za taljenje može dobivati toplinu iz nekoliko načina – putem krutih goriva, kao što su koks i prirodni plin ili električne energije. Osim što se razlikuju po vrsti metala koji se tali, peći se razlikuju i u dizajnu, geometriji, produktivnosti i kapacitetu, ali i po energiji koju koriste. Detaljni pregled vrsta peći nalazi se u poglavlju 3.1.

3. Obrada rastaljenog metala i rafiniranje

Rafiniranje je postupak obrade taljevine uklanjanjem nepoželjne faze – najčešće oksida. U ovoj se fazi taljevina pročišćava te joj se kvaliteta povećava. Prema tome postupci legiranja, otplinjavanja, filtriranja, obrade praškovima, pročišćavanja i modifikacije zrna obično se izvode u tekućem metalu prije lijevanja. U ovoj fazi, sastav taljevine se može fino prilagoditi do željenih udjela pomoću odgovarajućih dodataka. Stoga, može se reći da mikrostruktura direktno utječe na svojstva odljevka. Kada se odabire vrsta legirnih elemenata kod aluminijevih legura, treba pripaziti na činjenicu da neki pri povišenim temperaturama pridonose gubitku mehaničkih svojstava aluminijeve legure. Istodobno, na kvalitetu odljevka utječu i plinovi – nusprodukti izgaranja, ali i iz okolnog zraka koji se otapaju u talini.

Primjerice, taljevina aluminija ima veliki afinitet prema vodiku. Prilikom skrućivanja taljevine, topivost vodika u krutoj leguri naglo opada i vodik stvara plinsku poroznost. Zato se preporučuje u talionicama imati i sustave otplinjavanja ali i nadzora. Nadzor kvalitete taljevine je skup i dugotrajan proces u kojem se mali uzorak taljevine uzima iz peći i prenosi u laboratorij na analizu, što i nije najtočniji prikaz stvarne kvalitete taljevine. Danas se sve više za nadzor primjenjuje analiza taljevine u stvarnom vremenu pomoću lasera i spektroskopije.

4. Držanje taljevine

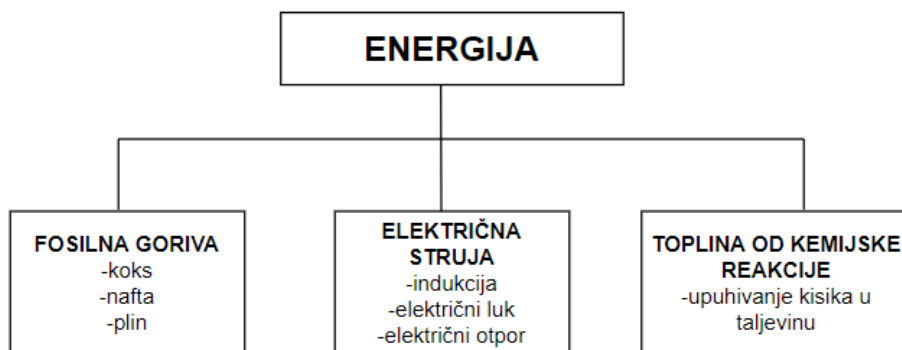
Prije ulijevanja taljevine u kalupne šupljine, najpovoljnije ih je držati u pećima kako bi se održala konzistentnost i kvaliteta u procesu lijevanja. Međutim, najidealnije bi bilo kada bi se taljevina direktno iz peći ulijevala u kalupe, umjesto da se koriste ljevački lonci. Taljevina se vadi iz peći pomoću ljevačke žlice ili ako je riječ o nagibnoj peći, onda se taljevina direktno preljeva u lonce.

5. Transport taljevine

Nakon izlijevanja taljevine, ona se prenosi do sustava ulijevanja. Lonci koji prenose taljevinu moraju biti prethodno zagrijani kako bi se održala temperatura taljevine.

3.4 Talioničke peći za taljenje aluminijskih legura

Peći se razlikuju po mnogim značajkama. Jedna od njih je i energija koju koriste kako bi se metal rastalio (Slika 9).



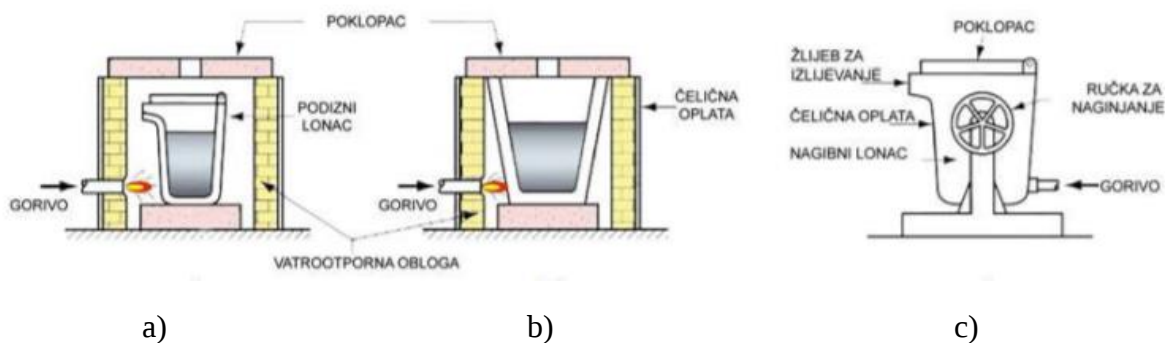
Slika 9. Vrste energije za talioničke peći [8]

Princip rada svake peći je da se metal ugrije, rastali i pregrije na temperaturu višu od temperature likvidusa (temperatura lijevanja) na kojoj se održava sve do ulijevanja u kalupe. Osim taljenja, u tim se pećima vrši i legiranje i rafinacija. Postoji pet glavnih vrsta talioničkih peći a to su: kupolke, plamene peći, elektrootporne peći, elektrolučne peći i elektroindukcijske peći. Za taljenje aluminijevih legura koriste se plamene, indukcijske i elektrootporne peći.

Plamene peći

Kod plamenih peći zasip se zagrijava plamenicima. Postoje dvije izvedbe – s loncem i plinske koritaste peći.

Na slici 10. prikazane su plamene peći s loncem. U odnosu na kupolne peći, ova vrsta ima značajno manji kapacitet i prikladnija je za manje serije. Princip rada se bazira na tome da se toplina plamena prenosi na lonac koje se zagrijava i tali metal. Budući da u plamenim pećima taljevina nije u neposrednom kontaktu s gorivom i dimnim plinovima, smanjena je mogućnost oksidacije i apsorpcije vodika.



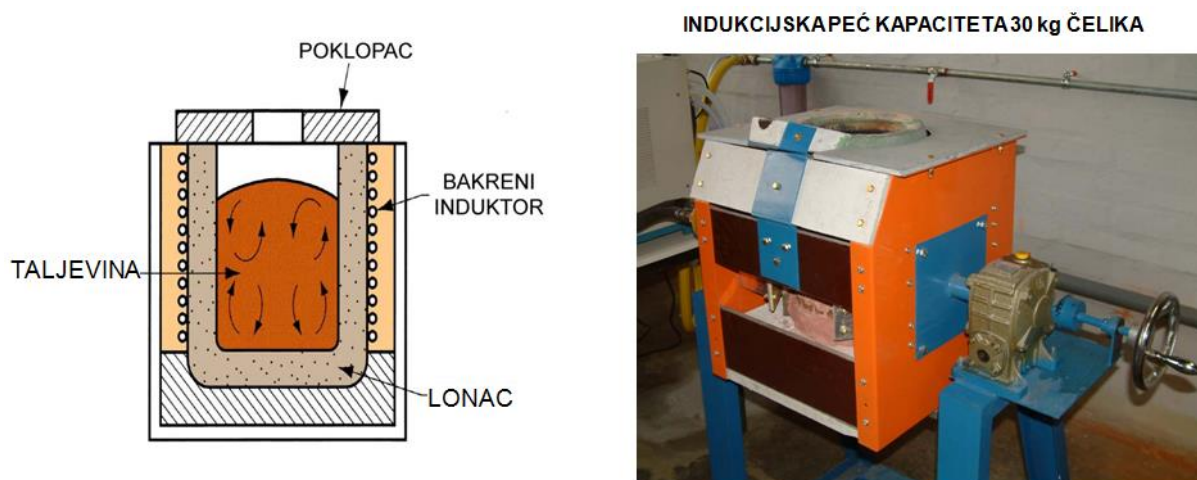
Slika 10. Izvedbe peći s loncem a) podizni, b) fiksni, c) nagibni [8]

Plamene plinske koritaste peći se najčešće koriste za taljenje aluminija. Toplina se prenosi od plamenika (najčešće nekoliko njih) na svod i zidove peći koji se zagriju na $1100 - 1200^{\circ}\text{C}$, a oni zatim isijavanjem prenose toplinu na metal. Problem kod ovakvog načina taljenja je što lako može doći do lokalnog pregrijavanja i oksidacije taljevine.

Zbog zaštite, koriste se razne soli koje sprječavaju oksidaciju. Taljevina se iz peći izlijeva u ljevačke lonce pomoću otvora koji se nalazi na dnu peći. [8]

Indukcijske peći

Indukcijske peći (Slika 11) su moderne peći s velikim kapacitetom. Prilikom taljenja, manje je kemijskih reakcija koje utječu na kvalitetu taljevine, za razliku od npr. kupolnih peći.



Slika 11. Indukcijska peć [8]

Postoje dvije izvedbe:

Indukcijska peć s loncem – peć se pokreće tako da se postavi metalni zasip unutar lonca, oko kojeg je postavljena bakrena spirala, hlađena vodom. Puštanjem struje kroz bakrenu spiralu, stvara se magnetsko polje koje inducira struju u metalu. Zbog stvaranja struje u metalu, metal pruža električni otpor zbog kojeg dolazi do taljenja samog metala. Prednost ovakvog taljenja metala je visoka kvaliteta i homogenost taljevine i čistoća.

Kanalna indukcijska peć – izgrađena je od čeličnog lima, te je iznutra obložena vatrostalnim materijalom. Na dnu peći nalazi se kanal koji zajedno s dnom peći čini zatvoreni krug u kojem se nalazi primarni namotaj s jezgrom od transformatorskog lima. Prolaskom električne struje nastaje magnetsko polje i u rastaljenom materijalu se inducira struja. Metal u kanalu ima značajke sekundarnog namotaja transformatora, a zbog visokog otpora metala se stvara toplina i metal se tali.

Indukcijske peći su tijekom godina poboljšale svoje kritične točke a te su:

- Korištenje poklopca peći presudno je za energetske učinkovitost kada metal bude rastaljen. Najjednostavniji sustav je zadržavanje troske na rastaljenom metalu, smanjujući gubitke zračenja kroz gornju površinu.
- Smanjen je utjecaj frekvencija i problema s elektronikom
- Razvijen je sustav automatske izmjene vatrostalnih obloga čime se smanjilo vrijeme i troškovi održavanja

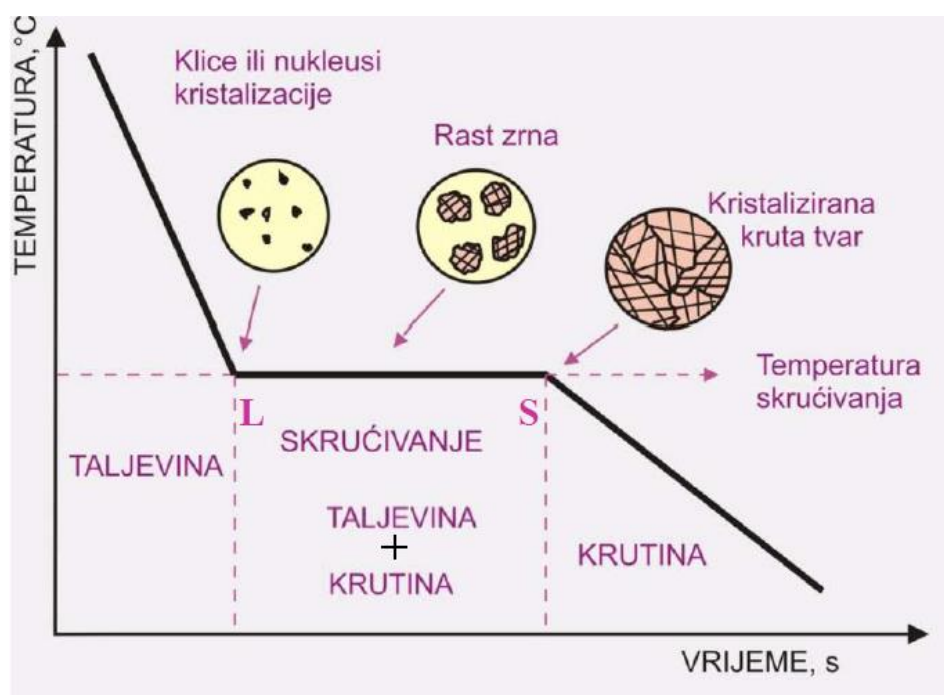
Elektrotopne peći

Taljevina se ugrijava provođenjem električne struje kroz grijače, odnosno materijale koji imaju veliki specifični otpor te se toplina prenosi na lonac s taljevinom. Glavne karakteristike su lako održavanje i univerzalna primjena, međutim nisu učinkovite te se zbog toga danas sve više zamjenjuju drugim pećima. Uglavnom se koriste za držanje taljevine kod postupaka lijevanja u trajne kalupe.

4. SKRUĆIVANJE I OBRADA ALUMINIJSKE TALJEVINE

4.1 Kristalizacija metala

Kristalizacija ili skrućivanje je proces u kojem taljevina prelazi u krutu tvar, a proces se prati krivuljom hlađenja. Uvjeti u kojima se takav proces odvija uvelike utječu na mikrostrukturu – raspored i veličine faza. Na slici 12. prikazana je krivulja hlađenja čistog metala. Proces skrućivanja započinje u onom trenutku kada taljevina dosegne temperaturu likvidusa T_L u kojem se stvaraju klice kristalizacije, a završava kada dosegne temperaturu solidusa T_S u kojem taljevina u potpunosti dosegne krutu fazu. Brzina kristalizacije je proporcionalna brzini odvođena topline. Bitno je naglasiti da faze kristalizacije nisu jednake kod čistih metala i legura.



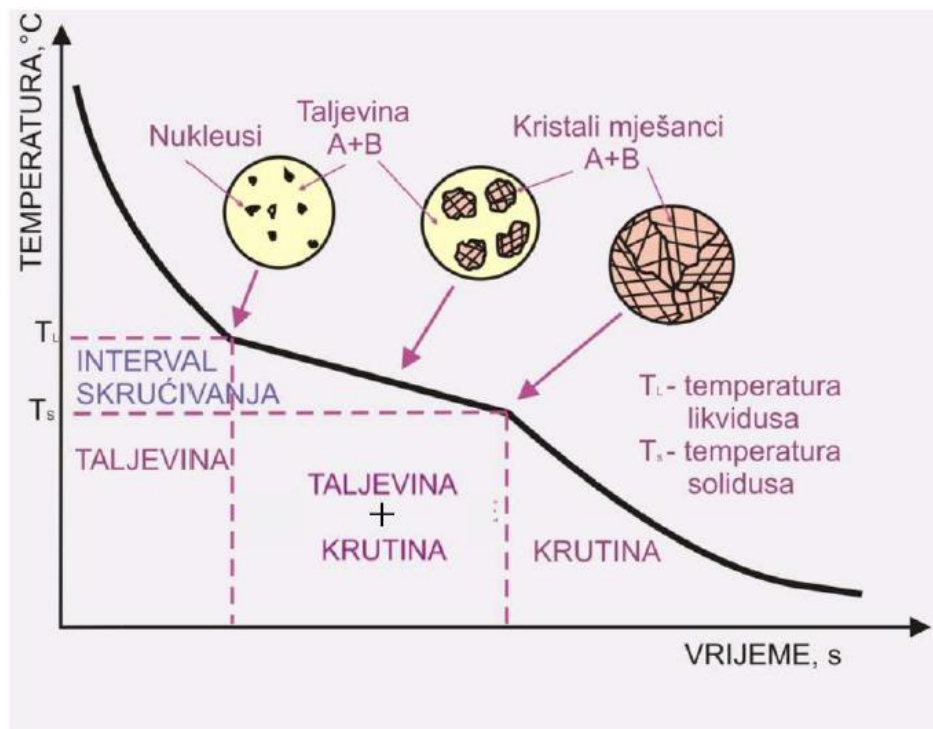
Slika 12. Krivulja hlađenja čistog metala [9]

Na slici 12. može se uočiti postojanje horizontalnog platoa, što znači da se skrućivanje odvija na konstantnoj temperaturi, sve do između točaka L i S kada taljevina doseže kruto stanje. Toplina se iz taljevine odvođuje ulijevanjem u kalup, međutim temperatura pada i kada se dosegne temperatura likvidusa u kojoj dolazi do izlučivanja nukleusa s kojim započinje proces skrućivanja.

Što se brže odvodi toplina, tako kristali sve više rastu sve dok taljevina u potpunosti ne prijeđe u kruto stanje.

Bitno je naglasiti da pri ovom procesu ne dolazi do pada temperature budući da se razvija latentna toplina.[10]

Kruta tvar, odnosno faza, se hladi sve do sobne temperature.



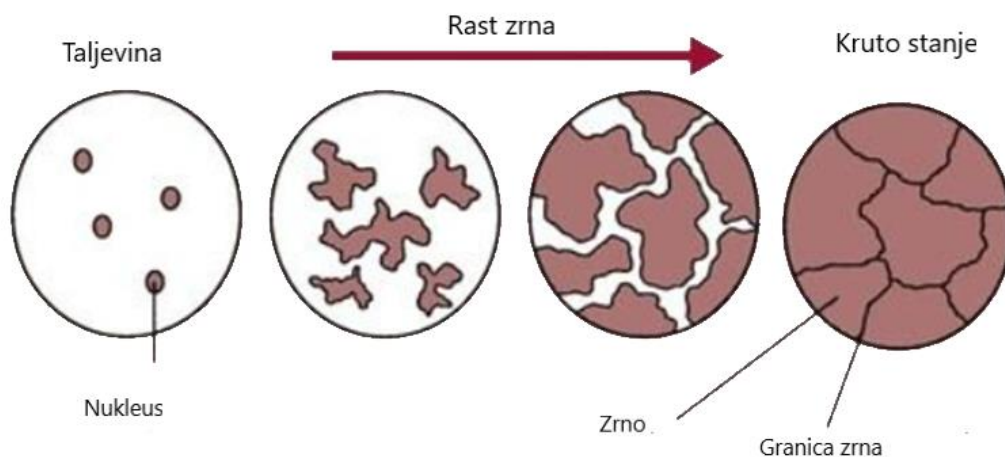
Slika 13. Krivulja hlađenja binarne legure [9]

Na slici 13. može se vidjeti graf hlađenja taljevine kod legure, odnosno proces skrućivanja iste. Može se primijetiti da plato nije izražen kao kod krivulje hlađenja čistih metala, jer latentna toplina koja se oslobađa kristalizacijom nije dostatna kako bi se nadoknadila odvedena toplina. Razlog tomu je činjenica da kod legura druga komponenta (legirni i dodatni elementi) ometaju proces kristalizacije prve komponente i obrnuto. [9]

Gledajući krivulje hlađenja čistog metala i legure, može se zaključiti da se kristalizacija odvija u dvije faze:

- nukleacija – proces stvaranja nove faze u talini
- rast zrna - transport atoma iz taljevine na graničnu površinu kruto/tekuće

Prvo nastaju klice iz kojih se postepeno razvijaju različito orijentirana kristalna zrna koja se vežu jedna na druge. Kristali s vremenom postaju sve veći i nastavljaju rast dok se ne sudare, čime nastaju nepravilne granične površine – granice zrna (Slika 14).



Slika 14. Proces srućivanja [11]

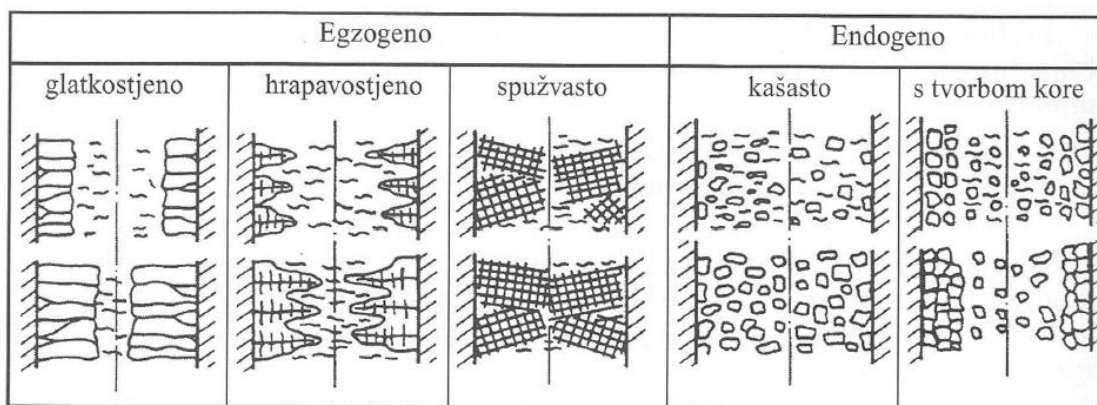
Postoje dvije vrste nukleacije:

1. **Homogena nukleacija** – koja se događa kod čistih metala, a teže se događa u realnim uvjetima zbog stranih čestica prisutnih na stijenkama kalupa i u taljevini
2. **Heterogena nukleacija** – događa se kod legura gdje su nukleacijska mjesta stijenke kalupa (egzogeni nukleacija) ili strane čestice (nečistoće, oksidni filmovi) u rastaljenom metalu (endogeni nukleacija)

4.2 Vrste skrućivanja metala

Glavne vrste skrućivanja su (Slika 15):

1. Egzogeno u kojem kristali rastu od granične površine kalup-taljevina a dijeli se na [9]:
 - Glatkostijeno skrućivanje u kojem je granica između taljevine i rastućih kristala (rast započinje od stijenke kalupa prema unutrašnjosti) ravna. Ovakvo skrućivanje karakteristično je za čistemetale i čiste eutektičke legure.
 - Spužvasto skrućivanje u kojem razgranati kristali tvore mrežastu strukturu. Grane dendrita iz te mreže tijekom skrućivanja postaju sve deblje, dok sva taljevina ne skrutne.
 - Hrapavostijeno skrućivanje – karakterizira ga razvedena i neravna granica između taljevine i kristala.
2. Endogeno skrućivanje u kojem kristali rastu iz taljevine, a dijeli se na [9]:
 - Kašasto skrućivanje u kojem kristali nastaju direktno iz taljevine i tvore kašastu smjesu s taljevinom, odvija se dok se sva taljevina ne iscrpi.
 - Endogeno skrućivanje s tvorbom kore u kojem taljevina tijekom skrućivanja uvelikegubi svojstva kaše, a Kora se tvori na rubnim područjima u kojima je slabija pokretljivost kristala.



Slika 15. Egzogeno i endogeno skrućivanje [9]

4.3 Skupljanje pri skrućivanju

Skupljanje metala se odvija u tri faze:

1. Skupljanje u tekućem stanju u kojem se volumen tekućeg metala smanjuje gotovo linearno s padom temperature
2. Skupljanje tijekom skrućivanja karakterizira smanjenje volumena taljevine, a događa se tijekom hlađenja između temperature likvidusa i solidusa.
3. Skupljanje u krutom stanju u kojem se skupljanje metala događa od temperature solidusa do sobne temperature

Ovisno o veličini intervala skrućivanja između likvidus temperature i solidus temperature, postoje [9]:

- Legure s uskim intervalom skrućivanja: od T_L do $T_s < 50$ °C gdje prvo nastaje kora na stijenci kalupa. Kod ovih legura skrućivanje je progresivno, a fronta skrućivanja je hrapava i nepravilna.
- Legure sa srednjim intervalom skrućivanja: od T_L do T_s , 50 - 110 °C koje karakterizira kašasta unutrašnjost i pojava velikog broja malih kanala tekućeg metala pri kraju skrućivanja
- Legure sa širokim intervalom skrućivanja: od T_L do $T_s > 110$ °C gdje skrućivanje nije progresivno i također se pojavljuje velik broj malih kanala tekućeg metala pri kraju skrućivanja

Kod čistih metala interval skrućivanja je vrlo kratak, gotovo da i ne postoji, odnosno do skrućivanja dolazi na jednoj temperaturi.

5. USITNJAVANJE ZRNA I OBRADA TALJEVINE

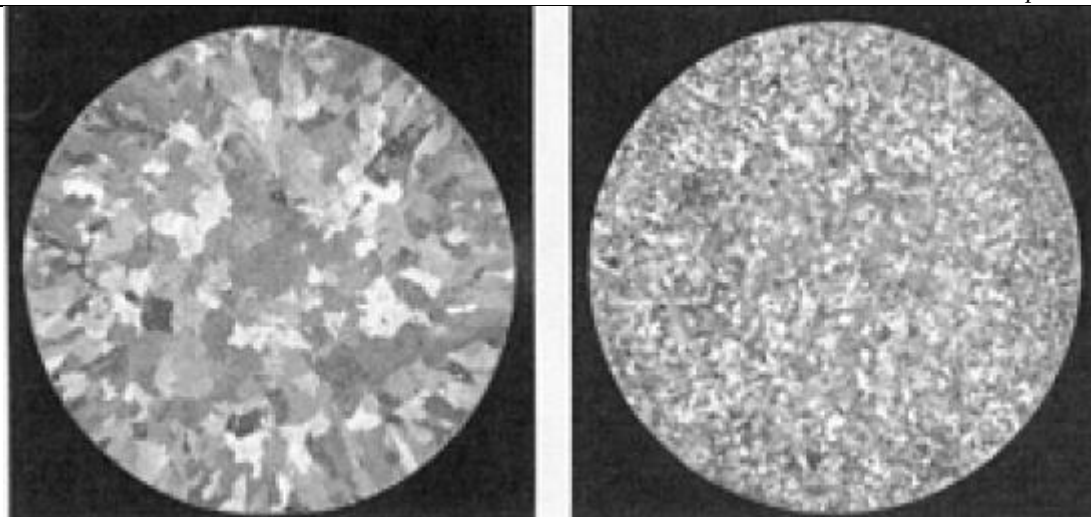
5.1 O usitnjavanju zrna

Fina, istoosna struktura zrna obično je poželjna u aluminijskim odljevcima. Vrsta i veličina nastalih zrna određena je sastavom legure, brzinom skrućivanja i dodatkom glavnih predlegura koje sadrže intermetalne spojeve, koji su mjesta za heterogenu nukleaciju zrna. [12]

Manja veličina zrna poboljšava čvrtoću te minimizira skupljanje, tople pukotine i vodikovu poroznost odljevka te se prema tome usitnjavanjem zrna postižu sljedeće prednosti [12]

- poboljšano napajanje,
- povećana otpornost na tople pukotine,
- poboljšana mehanička svojstva,
- povećana nepropusnost pri visokom tlaku,
- poboljšano ponašanje pri toplinskoj obradi,
- poboljšani izgled nakon kemijske, elektrokemijske i mehaničke obrade.

U normalnim uvjetima skrućivanja kod alumininijskih legura bez usitnjavanja zrna, dolazi do grube stubičaste ili grube istoosne strukture. Grubozrnata stubičasta struktura (Slika 16.a)) je manje otporna na tople pukotine tijekom skrućivanja od sitnozrnate strukture iste legure (Slika 16.b)). To se događa zbog smanjenog otpora vlačnim silama na povišenim temperaturama kao rezultat povećane osjetljivosti prilikom formiranja granica zrna u grubozrnatim strukturama.



Slika 16. Lijevani AlSi7 uzorci koji pokazuju učinak usitnjavanja zrna: a) bez usitnjavanja zrna i b) s usitnjavanjem zrna [12]

Sitnozrnata struktura umanjuje učinke na livljivost i svojstva povezana sa veličinom i rasporedom intermetalnih spojeva, tako da potiče stvaranje finijih i ravnomjernije raspoređenih intermetalnih spojeva s odgovarajućim poboljšanjima u svojstvima napajanja. Većina krhkih intermetalnih spojeva izlučuje se kasno u procesu skrućivanja pa njihovo stvaranje na granicama zrna također dosta utječe na otpornost na tople pukotine i mehanička svojstva u grubozrnatim strukturama. Smanjenjem veličine zrna, smanjuje se pojava vrućih pukotina kod nekih legura, poput onih serije 2xxx i 5xxx. [12]

Poroznost skupljanja, ako se pojavi, je manjih dimenzija u sitnozrnatim strukturama. Veličina međudendritne poroznosti skupljanja direktno je povezana sa veličinom zrna. Utjecaj veličine zrna na poboljšanje napajanja minimalizira potencijal nastanka velike poroznosti skupljanja odnosno velikih usahlina. Ukoliko je vodikova poroznost prisutna, velike vodikove pore će imati veći razorni utjecaj u grubozrnatim odljevcima nego u fino zrnatim odljevcima. Finija raspodjela topivih intermetalnih spojeva preko odljevka s usitnjenim zrnima rezultira bržim i potpunijim odgovorom na toplinsku obradu, nakon koje se mogu očekivati konzistentija mehanička svojstva. [12]

5.2 Model usitnjavanja aluminijskih legura

Sve aluminijeve legure mogu postići potpuno istoosnu sitnozrnatu strukturu kroz upotrebu prikladnih dodataka za usitnjavanje zrna. Najčešće se za to primjenjuju predlegure titana te titana i bora u aluminiju. U slučaju predlegura s titanom, obično je riječ o udjelu titana od 3 do 10%, a isti raspon udjela titana se koristi i kod predlegura aluminij-titan-bor, s udjelom bora od 0,2 do 1% i omjerom titana i bora u raponu 5 do 50.

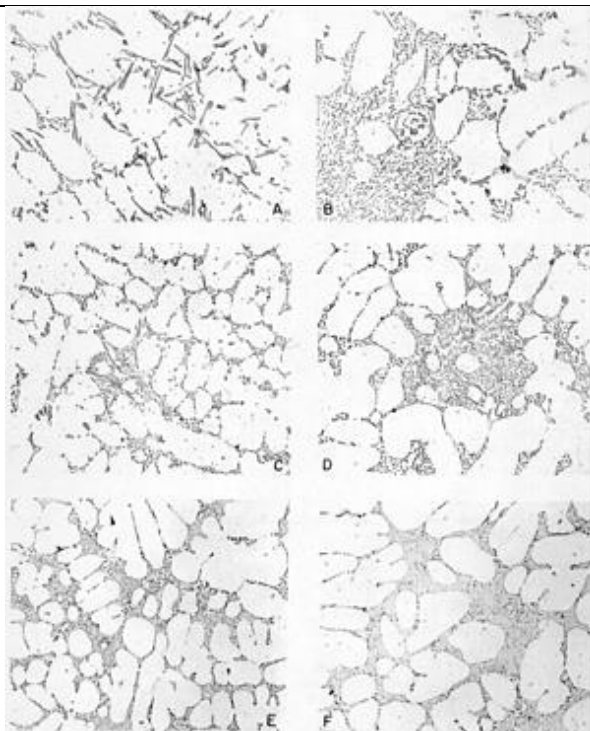
Unatoč velikim naporima u shvaćanjima osnova usitnjavanja zrna, ne postoji univerzalna prihvaćena teorija ili mehanizam usitnjavanja. Poznato je da je $TiAl_3$ aktivna faza u nukleaciji kristala aluminija, navodno zbog sličnosti u kristalnoj rešetki. Nukleacija se može dogoditi na $TiAl_3$ bazama koje su neotopljene ili se izlučuju na dovoljno visokoj koncentraciji titana peritektičkom reakcijom. Usitnjavanje zrna se može postići i pri mnogo nižim koncentracijama titana od onih predviđenih binarnom Al-Ti peritektičkom točkom od 0,15%.

Dodavanje titana u obliku predlegura u aluminijeve legure za lijevanje obično rezultira znatno sitnijom i istoosnom strukturom zrna, dok uloga borida TiB_2 produljuje trajanje učinka usitnjavanja i povećava sam učinak usitnjavanja zrna. Međutim, kada je borid prisutan u obliku velikih aglomeriranih čestica, tada poprima karakter vrlo nepoželjnog uključka sa štetnim učincima u strojnoj obradi. Aglomeracija čestica nalazi se u predlegurama loše kvalitete ili se događa kao produkt dugog perioda držanja na temperaturi lijevanja. Zato treba peći za držanje periodički temeljito očistiti kada se koriste predlegure s borom. [12]

5.3 Modifikacija i usitnjavanje podeutektičkih Al-Si legura

Podeutektičke Al-Si legure mogu se poboljšati induciranjem strukturne modifikacije normalno skrućujućeg eutektika. Najveći efekti se postižu kod legura sa udjelom silicija od 5% do eutektičke koncentracije od 12,6 %.

Dodavanjem određenih kemijskih elemenata, kalcij, natrij, stroncij ili antimon, podeutektičkoj Al-Si leguri dovodi do finije lamelarne ili vlaknaste eutektičke strukture, jer potiskuju rast kristala silicija unutar eutektika dovodeći do bolje raspodjele lamela u odnosu na rast eutektika (Slika 17).



Slika 17. Različiti stupnjevi modifikacije eutektika Al-Si u rasponu od nemodificirane (A) do dobro modificirane (F) [12]

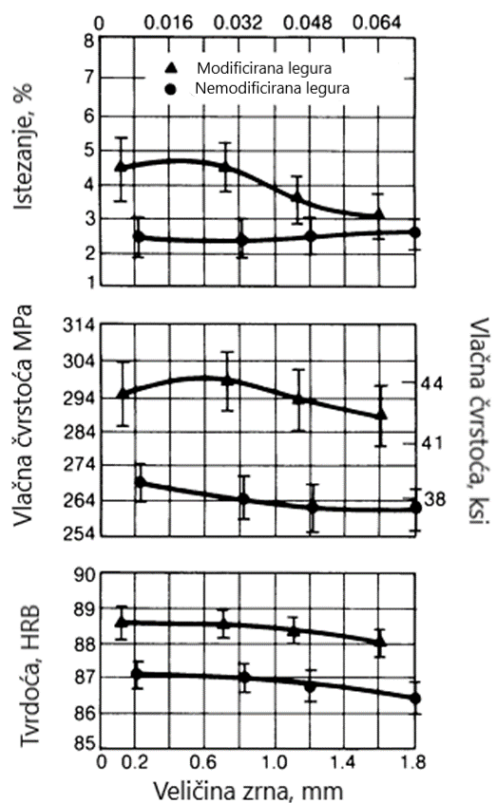
Najčešći modifikatori su natrij – koji je kompatibilan sa stroncijem i kalcijem, pa se mogu kombinirati i antimon s kojim se dobiva usitnjeni eutektik poboljšanih mehaničkih svojstava i livljivosti, koji nije kompatibilan s drugim modifikatorima.

Dodavanje modifikatora je u većini slučajeva popraćeno s povećanim sadržajem vodika, a u slučaju natrija i kalcija to dovodi do složenih reakcija, što povećava koncentraciju vodika, što nije slučaj kod antimona.

Fosfor je element koji ometa modifikaciju, reagirajući s natrijem, stroncijem i kalcijem stvara fosfide koji poništavaju traženu modificiranu strukturu. Stoga je poželjno koristiti metal s niskim udjelom fosfora.

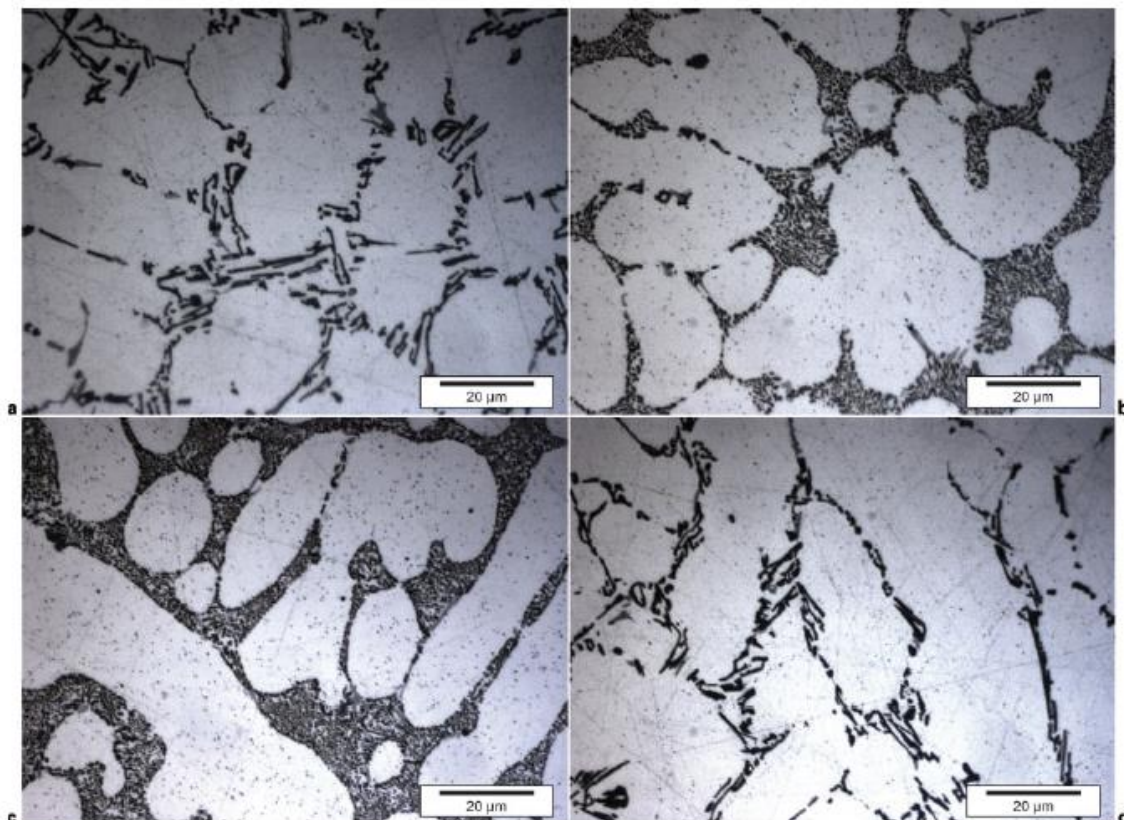
Modificirane strukture imaju nešto veća vlačna svojstva, znatno poboljšanu duktilnost u usporedbi sa sličnim nemodificiranim strukturama. Posjeduju poboljšane performanse u lijevanju, bolji protok i napajanje i otporne su na tople pukotine.

Slika 18. prikazuje utjecaj modifikacije i usitnjavanja zrna na mehanička svojstva legure.



Slika 18. Mehanička svojstva uzoraka legure A356 u ovisnosti o modifikaciji i veličini zrna [12]

Slika 19. prikazuje mikrostrukturu podeutektičke Al-Si legure A 356 i rezultate dodavanja modifikatora i sredstva za usitnjavanje zrna u leguru. Može se uočiti da se dodatkom stroncija kao modifikatora u udjelu 0,02% utjecalo na dobivanje finije strukturu eutektika i povećanje broja eutektičkih čestica silicija. Dodavanjem 0,002% titana u Al-Si leguru je gotovo prepolovilo veličinu zrna α -aluminija, ali je ostao grubozrnati igličasti silicij u eutektiku [13].



Slika 19. Prikaz mikrostrukture Al-Si legure A356: a) bez dodanih elemenata, b) struktura s dodatkom 0,02 % Sr i 0,002 % Ti, c) 0,02% Sr, d) 0,002 % Ti [13]

5.4 Modifikacija i usitnjavanje nadeutektskih Al-Si legura

Kod nadeutektskih legura treba se izvršiti eliminacija velikih i grubih primarnih kristala silicija koji su štetni pri lijevanju i strojnoj obradi. To se vrši dodavanjem fosfora rastaljenim legurama čija je koncentracija silicija veća od eutektske. Fosfor se dodaje u obliku čistog ili spojeva fosfor-bakar i fosfor-pentaklorid. Nakon obrade taljevine spojevima koji sadrže fosfor, veličina čestica primarnog zrna silicija se postupno povećava, reagirajući na gubitak koncentracije fosfora. Skrućivanje, hlađenje na sobnu temperaturu i ponovno taljenje ne utječe na prolaznost učinka usitnjavanja zrna. [12]

Praksa koja se preporučuje prilikom obrade taljevine je [12]:

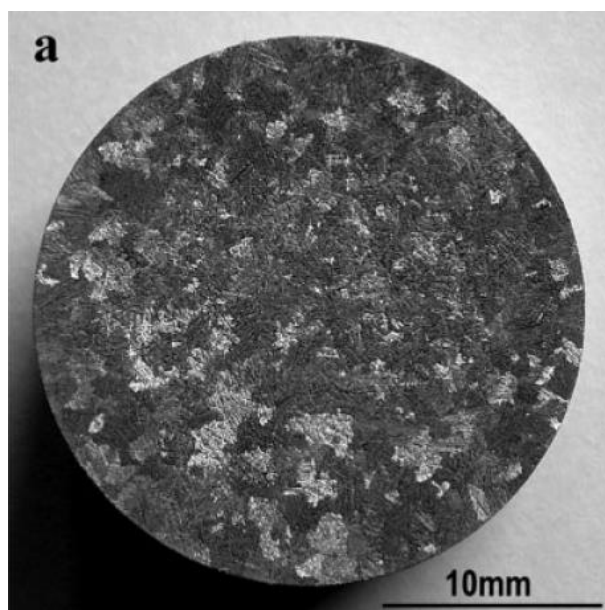
- temperatura taljenja i držanja treba biti minimalna
- legura se mora prije usitnjavanja pročistiti s klorom ili freonom kako bi se uklonile nečistoće poput kalcija i natrija
- preporučava se kratko otplinjavanje nakon dodavanja fosfora kako bi se uklonio vodik i ravnomjerno rasporedili nukleusi aluminijskog fosfida u talini.

Kod nadeutektskih legura usitnjavanje primarnog silicija značajno poboljšava mehanička svojstva i livljivost.

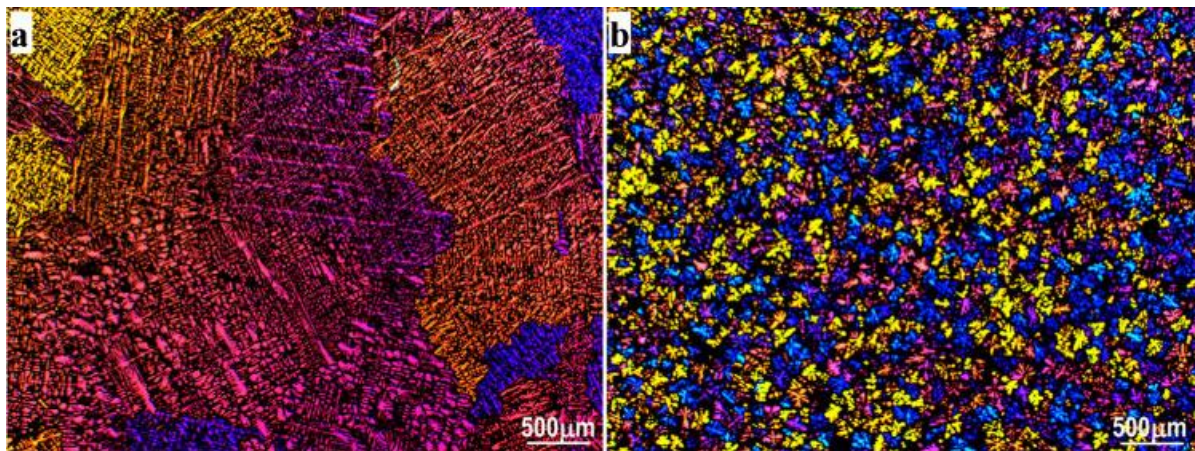
5.5 Usitnjavanje AlSi7Mg legure

Usitnjavanje zrna je kritična i uobičajena operacija u ljevaonicama aluminijske legure koja utječe ne samo na kvalitetu lijevanog dijela već i na učinkovitost postupka lijevanja. Ovim postupkom se dodaju sredstva za usitnjavanje zrna odnosno predlegure u rastaljeni aluminij kako bi se nakon skrućivanja taljevine postigla sitnozrnata mikrostruktura. [14]

Važnost usitnjavanja zrna može se vidjeti na slijedećem primjeru. Na slici 20. prikazana je mikrostruktura AlSi7Mg legure prije usitnjavanja. Rastaljenoj leguri su zatim dodane predlegure AlTi_5B_1 , AlTi_3B_3 i AlB_3 . [15]



Slika 20. Prikaz mikrostrukture prije dodavanja sredstva za usitnjavanje zrna AlSi7Mg leguri [15]



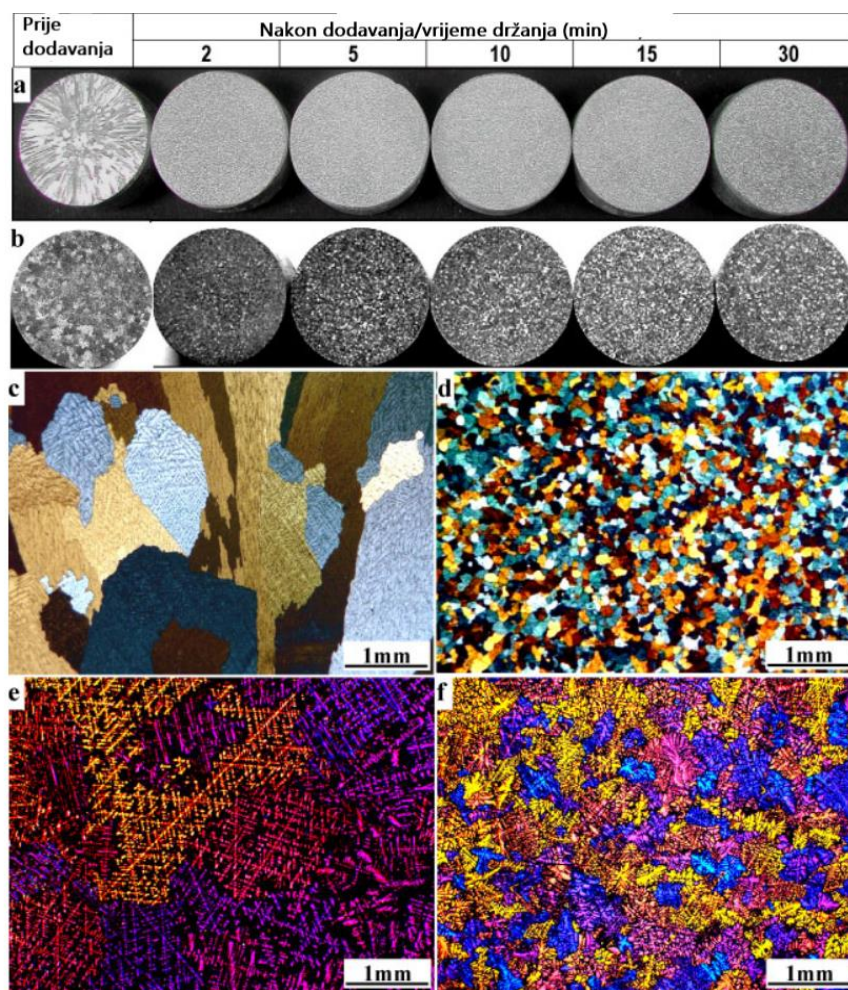
Slika 21. Utjecaj predlegure AlB_3 na usitnjavanje zrna AlSi7Mg legure: a) veličina zrna prije dodavanja, b) veličina zrna nakon dodavanja [15]

Na slici 21. prvo se može vidjeti utjecaj predlegure AlB_3 , koja se pokazala u raznim istraživanjima kao najbolja za usitnjavanje zrna AlSi7Mg legure. Učinkovitost predlegure $AlTi_5B_1$ se dobra pokazala za gnječene legure, dok za AlSi7Mg leguru nije bila toliko dobra.

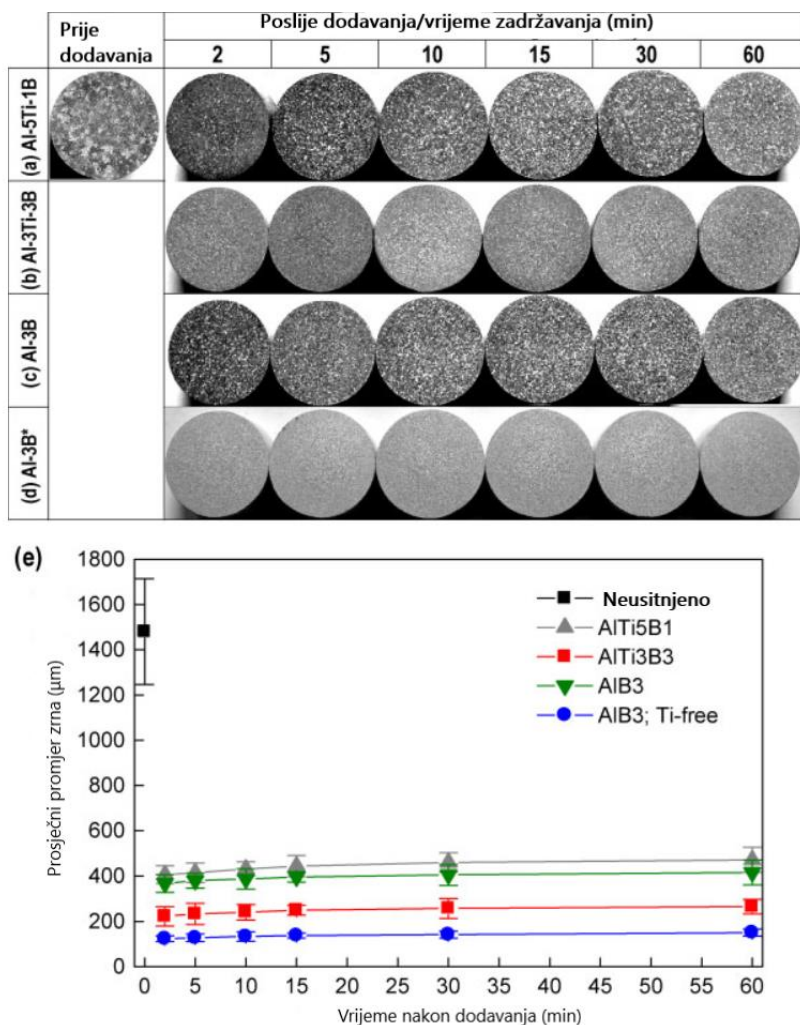
Čestice koje se unesu u taljevinu kroz ovu predleguru su topivi TiAl_3 i netopivi TiB_2 . TiB_2 čestice su 'otrovane' silicijem koji prekriva njihovu površinu sa Ti-Si spojevima i time ih čini neučinkovitima. Otopljeni titan u talini je također neučinkovit za usitnjavanje jer tvori Ti-Si spojeve i izlučuje se van iz taljevine. Prema tome nije preporučljivo usitnjavati Al7SiMg leguru s AlTi_5B_1 predlegurom (Slika 22). [15]

Na slici 23. može se vidjeti utjecaj sve tri predlegure na strukturu AlSi7Mg legure, te se može zaključiti sljedeće [15]:

- najbolja predlegura za komercijalnu leguru AlSi7Mg je AlTi_3B_3 , zatim slijede AlB_3 i AlTi_5B_1 ,
- najbolja predlegura za leguru AlSi7Mg bez titana je AlB_3 .



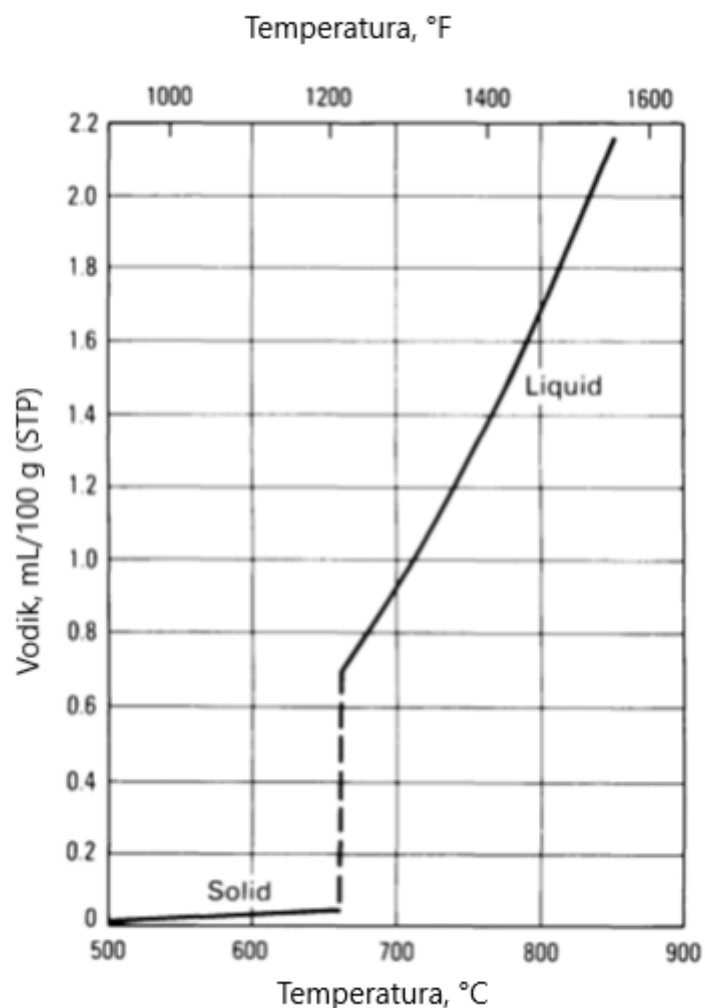
Slika 22. Utjecaj AlTi_5B_1 predlegure: a) gnječena legura 1070, b) AlSi7Mg legura, c) i d) legura 1070 prije i poslije dodavanja predlegure, e) i f) AlSi7Mg legura prije i nakon dodavanja predlegure [15]



Slika 23. Struktura usitnjenih AlSi7Mg legura: a) AlTi₅B₁, b) AlTi₃B₃, c) AlB₃; d) AlB₃ kod AlSi7Mg legure bez Ti e) dijagram veličine zrna u ovisnosti o vremenu nakon dodavanja predlegure [15]

5.6 Obrada otplinjavanjem

Aluminij i njegove legure vrlo su osjetljive na apsorpciju vodika u rastaljenom stanju, a glavni razlog tomu je vlaga u atmosferi i reakcija vodene pare sa taljevinom. Atomi vodika difundiraju u taljevinu. Ostali razlozi pojave vodika u taljevini su vlaga i masti na ingotu i kružnom materijalu koji, zatim većina soli koja se koristi u obradi aluminijskih legura je hidroskopska. Također, ljevački alati ukoliko nisu predgrijani mogu doprinjeti stvaranju vodika iz vlage na njima. [12]



Slika 24. Topivost vodika u aluminiju [12]

Topivost plinovitog vodika eksponencijalno raste s povećanjem temperature (Slika 24.) prema tome, bitno je izbjegavati prekomjerne temperature tijekom taljenja kako bi se apsorpcija vodika svela na najmanju moguću mjeru.

Različite aluminijeve legure imaju i različite afinitete prema apsorpciji vodika. Povećani udjeli silicija i bakra u aluminijским legurama smanjuju topivost vodika, dok magnezij povećava topivost.

Otplinjavanje je lakše i brže pri nižim temperaturama i višim koncentracijama vodika.

Vodik se iz taljevine otplinjuje na nekoliko načina, a najejednostavnije je zadržati taljevinu na ili blizu likvidus temperature tijekom dužeg perioda čime se osigurava prirodno otplinjavanje.

Također, potrebno je imati i uvjete lijevanja koji omogućuju skrućivanje prirodnim izbacivanjem vodika bez pojave poroznosti.

Čak i u normalnim uvjetima, navedene mogućnosti nisu uvijek moguće, prema tome treba koristiti mehaničku metodu otplinajvanja ili otplivanje propuhivanjem plinovima.

Plin se dovodi kroz cijev na dno taljevine u loncu, a može se koristiti i rotacijski mješač. Najčešće se koriste inertni plinovi poput argona i dušika ili reaktivni klor i freon.

Bitno je znati razlikovati poroznost nastalu zbog prisutnosti plina (metalografskim ispitivanjem mogu se uočiti zaobljeni i sjajni mjehurići plinova) i onu nastalu kao rezultat skupljanja metala prilikom skrućivanja (nepravilnog oblika). Poroznost direktno utječe na gubitak mehaničkih svojstava aluminijskih legura.

Ponekad određena količina plina može biti korisna jer pospješuje skrućivanje i pomaže u potpunom punjenju kalupa. Primjerice, brže hlađenje i skrućivanje kod trajnog kalupa u odnosu na pješčani kalup pospješuje stvaranje vodikovih pora. Brže hlađenje i skrućivanje pak utječe na finiju mikrostrukturu i poboljšava mehanička svojstva. [12]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Za odrađivanje eksperimentalnog zadatka korištena je legura AlSi7Mg prema kojoj će se vidjeti rezultati usitnjavanja zrna. Prilikom rađenja samog eksperimenta bitno je naglasiti da se lijevanje izvodilo s dva neusitnjena uzoraka, to jest bazna uzorka, te dva usitnjena uzorka prema kojima se vršila analiza za primjećivanje znatnijih promjena u strukturi. Nakon dobivenih gotovih uzoraka koji će zadovoljiti naše uvjete na njima je napravljeno nekoliko ispitivanja:

1. Toplinska analiza
2. Određivanje kemijskog sastava
3. Radiografsko ispitivanje
4. Ispitivanje mehaničkih svojstava
5. Određivanje mikrostrukture
6. Metalografsko ispitivanje

6.1. Postupak lijevanja

Prije nego što se krenulo s lijevanjem uzoraka za eksperiment bitno je provjeriti s kojim uvjetima se kreće i te iste uvjete promatrati tijekom samog procesa. Proces lijevanja se odvijao u Ljevaonici Bujan u Mađarevu gdje se odmah vršila i kemijska analiza odljevaka. Prvo je lijevana bazna legura dva puta, a nakon toga je usitnjena i lijevana su još dva uzorka prema kojima su uspoređivani rezultati. Samo lijevanje prvog baznog uzorka je krenulo pripremom AlSi7Mg legure koja je bila DIP 523 od proizvođača DIP d.o.o. Novi Sad. Njezin kemijski sastav prikazan je u tablici 1., a ingoti osnovnog materijala mogu se vidjeti na slici 25.

Tablica 1. Kemijski sastav AlSi7Mg legure DIP 523

Aluminijska legura EN AC 42100	Kemijski sastav (%)
Si	6.89
Fe	0.39
Cu	0.08
Mn	0.133
Mg	0.556
Cr	0.014
Ni	0.005
Zn	0.056
Ti	0.022
Bi	0.001



Slika 25. Prikaz ingota legure AlSi7Mg prije taljenja.

Masa kompletne palete prije uzimanja uzorka za analizu kemijskog sastava i sastavljanja šarže materijala iznosi 2000 kg. Temperatura netom prije početka lijevanja u peći je iznosila 764 °C. Sama peć je od proizvođača Nabertherm, te se bazna taljevina u njoj može vidjeti na slici 26.



Slika 26. Bazna taljevina AlSi7Mg u peći pri temperaturi 764 °C

Taljevina se tada ulijevala u tri kalupa ovisno o namjeni odljevka nakon samog lijevanja. To je Quik-Cup čašica prikazana na slici 27., u kojoj se nalazi termopar koji je direktno spojen s uređajem preko kojega se može računalno generirati krivulja hlađenja i prema njoj se može pratiti određena stanja skrućivanja, odnosno pratiti u kojoj fazi se taljevina nalazi.



Slika 27. Quik-Cup čašica s termoparom za dobivanje krivulje hlađenja

Drugi kalup koji se koristio je bila dvodijelna kokila, izrađena od čelika za topli rad H11, koja je bila predgrijana na temperaturu približno 190 °C. Kokila je bila osigurana stegama kako bi se izbjeglo izlijevanje taljevine iz same kokile. Iz nje su dobiveni uzorci prema kojima su napravljene epruvete za određivanje mehaničkih svojstava legure, dok je treći kalup namijenjen lijevanju uzorka za ispitivanje kemijskog sastava legure. Prikaz korištenih kokila namijenjenih za lijevanje uzorka za ispitivanje mehaničkih svojstava i kemijskog sastava nalazi se na slici 28.



Slika 28. Kalupi za lijevanje uzoraka: a) Dvodjelna kokila za epruvetu za mehanička svojstva, b) Dvodjelna kokila za uzorak za ispitivanje kemijskog sastava

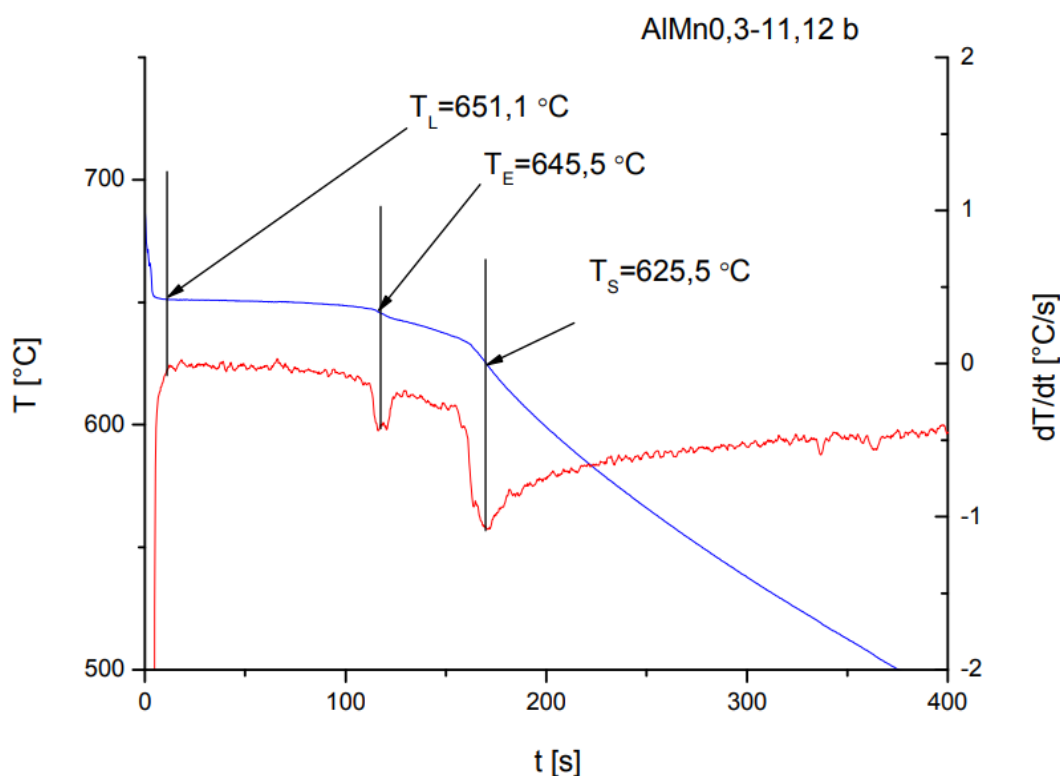
Prvo lijevanje bazne taljevine je započelo u 7:40, te su odlivena tri odljevaka prema prije navedenoj namijeni. Nakon lijevanja i odlaganja prva 3 uzorka i provedene toplinske analize, u 7:50 se krenulo u ponavljanje postupka na isti način za drugu mjerodavnu baznu taljevinu. Kod nje je temperatura u peći iznosila 757 °C. Nakon uspješno provedenog lijevanja baznih taljevina krenulo se s modificiranjem i usitnjavanjem 150 kg bazne taljevine sa 200 grama Simodala 77, te sa 100 grama nukleanta 100 SP. Simodal 77 kao i nukleant 100 SP su u obliku tableta koje se dodaju u peć direktno u baznu taljevinu. Kemijski sastav nukleanta SP 100 može sevidjeti u tablici 2. Lijevanje prve obrađene taljevine krenulo je u 8:05. Temperatura u peći je iznosila 737 °C, te su odmah uočene promjene u leguri prema krivulji hlađenja i toplinskoj analizi. Prema toplinskoj analizi modifikacija eutektika se povećala sa 1,7 na 6,2. U 8:15 krenulo se s lijevanjem drugog modificiranog uzorka, te se i na njemu odmah vide promjene i utjecaj dodanog natrija, jer se odmah spustila eutektička temperatura.

Tablica 2. Kemijski sastav Nukleanta 100 SP

Element	%
Titan	56,3
Bor	4
Oksidi, Fe, KCl, KF	Ostalo

6.2. Toplinska analiza

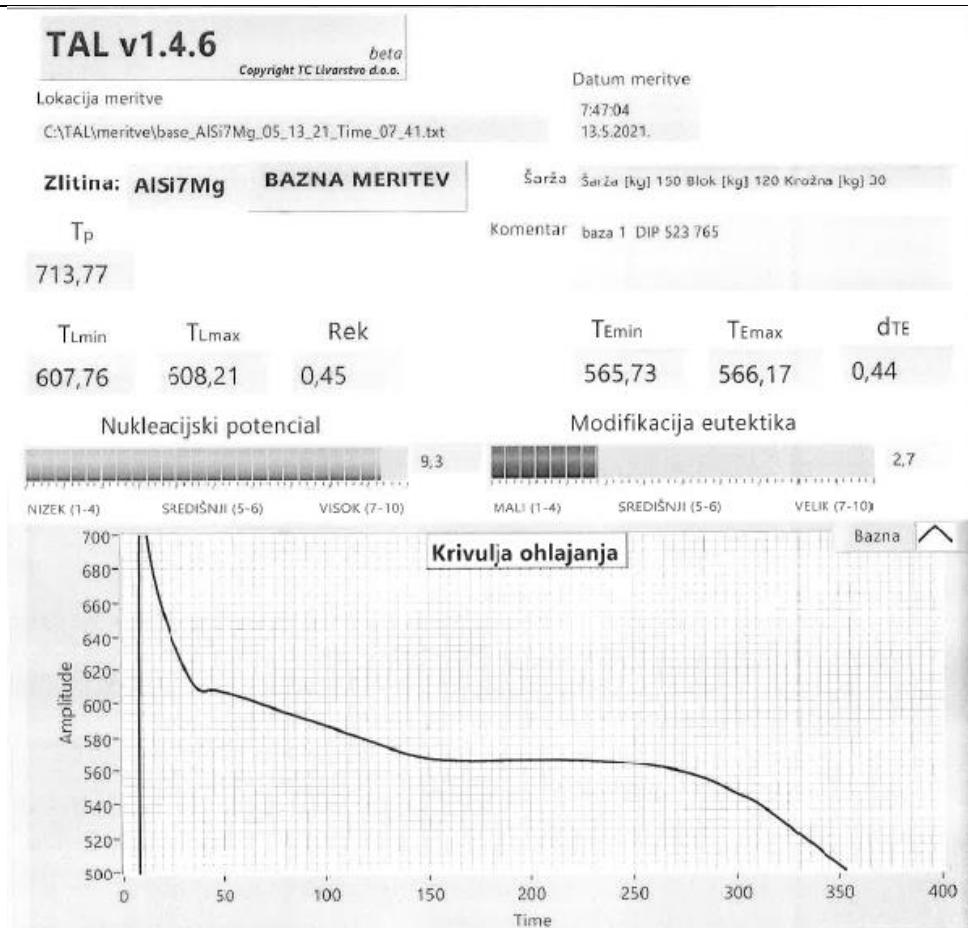
Postoji nekoliko vrsta toplinskih analiza (TA), ali će se u radu fokusirati samo na jednostavnu toplinsku analizu. Sama TA se primjenjuje za kontrolu metalurške kvalitete taljevine dugi niz godina. Preko nje se može vidjeti kako taljevina skrućuje, te sam način i uvid u nastajanje mikrostrukture. Time se provjerava da li će taljevina zadovoljiti određene zahtjeve koji su traženi od tog specifičnog tipa lijeva. Toplinska analiza je u srži jednostavan postupak barem što se tiče prikaza traženih podataka. Na X-osi je prikazano vrijeme, dok je na Y-osi prikazana temperatura taljevine. Kao što je prije već spomenuto toplinska analiza se vršila na sva četiri uzorka pomoću Quik-Cup čašice koja je vidljiva na slici 29. Quik-Cup čašica je mjerna ćelija za analizu, a u njoj se nalazi termopar koji je povezan sa programom koji prati signal koji je izmjeren sa tim istim termoparom i preoblikuje ga u digitalni oblik koji omogućava prikaz podataka promjene temperature s vremenom hlađenja. Na slici 29. je prikazana krivulja hlađenja i prva derivacija za leguru AlMn0,3.



Slika 29. Krivulja hlađenja i prva derivacija [16]

Iz prve derivacije preciznije se mogu odrediti; T_L -temperatura likvidusa na kojoj počinje skrućivanje taljevine, T_E -temperatura eutektičkog skrućivanja gdje počinje stvaranja eutektika i T_S -temperatura solidusa pri kojoj završava skrućivanje.

Karakteristične temperature najbolje je opisati redom kojim su i lijevani uzorci, jer se tako može najefikasnije pratiti promjene koje se događaju s legurom tijekom hlađenja i ono što je bitno nakon što se dodaju sredstva za obradu taljevine u baznu leguru, a to su 200 grama Simodala 77 te 100 grama nukleanta 100 SP. Prema ovoj mjernoj skali maksimalna vrijednost nukleacijskog potencijala i modifikacije eutektika iznosi 10, ali vrijednost koja je iznad 6 je već prihvatljiva. Ako je modifikacija eutektika iznad 10 znači da je taljevina premodificirana, te je onda potrebno pričekati nekoliko minuta i ponoviti isto mjerenje.



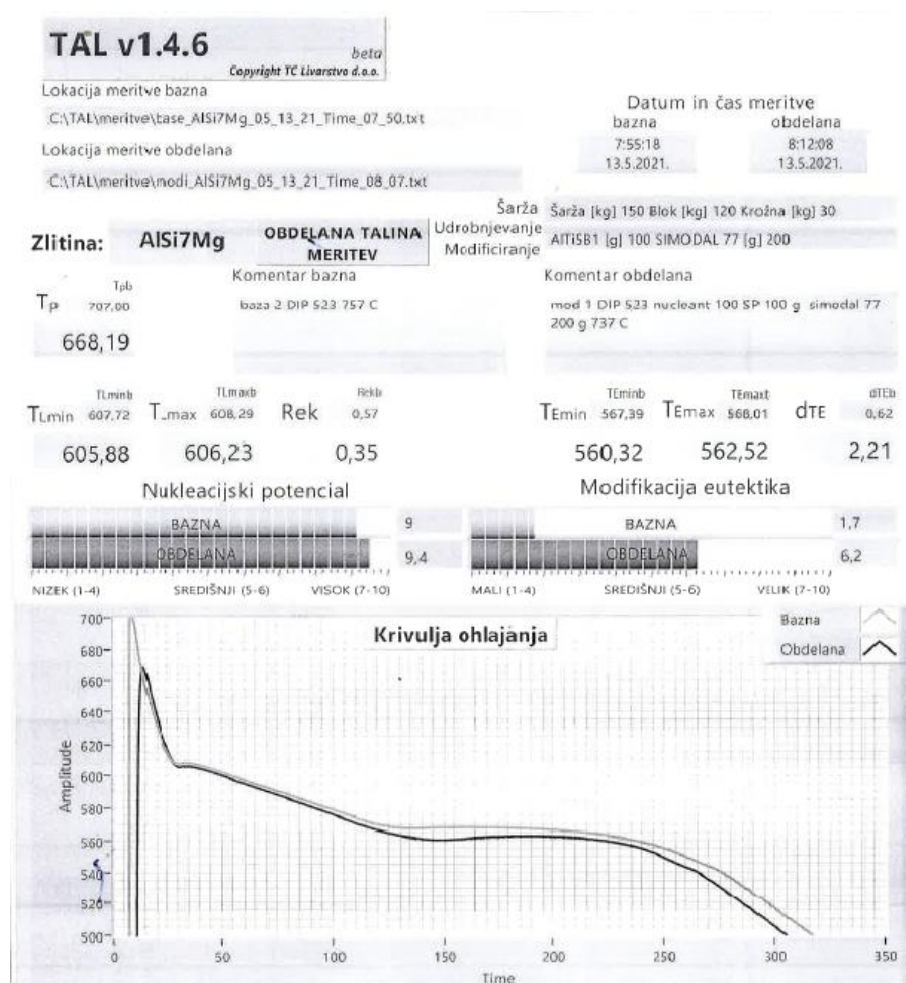
Slika 30. Krivulja hlađenja za prvu baznu taljevinu

Krivulja hlađenja prvog uzorka bazne taljevine se nalazi na slici 30. Može se vidjeti kako izgleda krivulja hlađenja izmjerena sa programom TAL v1.4.6. Za lijevanje, bitna početna informacija je masa šarže, koja je iznosila 150 kg, a od toga novi ingoti 120 kg i povrat 30 kg. Najbitniji podaci koji su potrebni za usporedbu su T_p – temperatura lijevanja, T_{Lmin} – minimalna likvidus temperatura, T_{Lmax} – maksimalna likvidus temperatura, Rek - rekalescencija, T_{Emin} – minimalna eutektička temperatura, T_{Emax} – maksimalna eutektička temperatura, d_{te} – razlika maksimalne i minimalne eutektičke temperature. U tablici 3. mogu se vidjeti karakteristične temperature za sve četiri taljevine.

Tablica 3. Prikaz karakterističnih temperatura krivulje hlađenja prije i nakon obrade

	$T_p, ^\circ\text{C}$	$T_{Lmin}, ^\circ\text{C}$	$T_{Lmax}, ^\circ\text{C}$	$T_{Emin}, ^\circ\text{C}$	$T_{Emax}, ^\circ\text{C}$
Bazna taljevina 1	713,77	607,76	608,21	565,73	566,17
Bazna taljevina 2	707,08	607,72	608,29	567,39	568,01
Obradena taljevina 1	668,19	605,88	606,23	560,32	562,52
Obradena taljevinaa 2	688,91	606,39	606,67	560,59	561,43

Temperatura lijevanja prve bazne taljevine u Quik-Cup čašicu je iznosila 713,77 °C. Slijedeća temperatura, temperatura likvidusa T_{Lmin} je iznosila između 607,76 °C te je na toj istoj temperaturi započelo skrućivanje. Sam eutektik se počinje formirati tek kod temperature T_{Emin} koja je iznosila 565,73 °C. Isti princip vrijedi i za ostale taljevine. Prema izloženim podacima iz tablice 3. može se vidjeti da odmah nakon obrade taljevine dodani natrij iz Simodala 77 počinje djelovati, a to se najočitije može primijetiti preko eutektičke temperature koja vidno pada nakon same modifikacije.



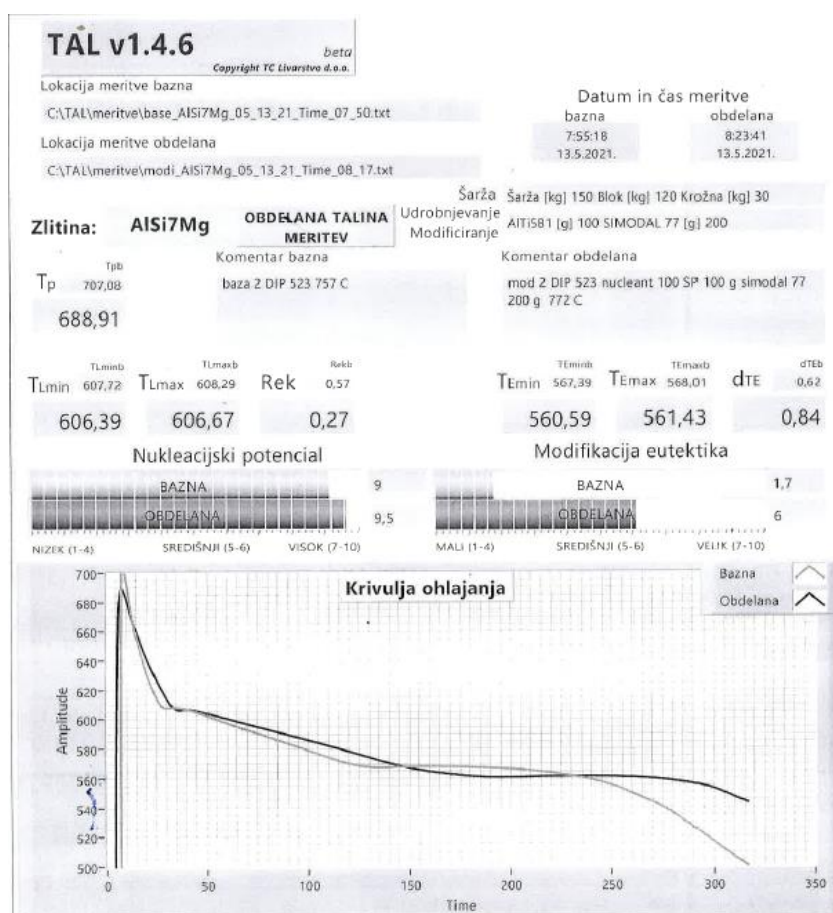
Slika 31. Prikaz usporedbe krivulja hlađenja druge bazne taljevine i prve obrađene taljevine

Na slici 31. može se vidjeti usporedba krivulja hlađenja druge bazne taljevine i prve obrađene taljevine prema kojima se može vidjeti rezultat uspješne modifikacije i usitnjavanja zrna. Nukleacijski potencijal i modifikacija eutektika su u prihvatljivom vrijednosnom spektru tako da se te vrijednosti mogu uzeti kao mjerodavne. Samo usitnjavanje je vidljivo prema podatku Rek koji kod druge bazne taljevine iznosi 0,57 °C dok kod prve obrađene taljevine iznosi 0,35 °C. Rekalescencija Rek, odnosno razlika temperatura likvidusa T_{Lmax} i T_{Lmin} prikazana je u tablici 4. Manja rekalescencija znači bolje usitnjenje zrna, odnosno postojanje više nukleacijskih mjesta u talini što jamči veći nukleacijski potencijal.

Također, o uspješnosti modifikacije može se zaključiti prema sniženoj eutektičkoj temperaturi u odnosu na baznu taljevinu.

Tablica 4. Prikaz vrijednosti Re_k i d_{TE} prije i poslije obrade

	$Re_k, ^\circ C$	$d_{TE}, ^\circ C$
Bazna taljevina 1	0,45	0,44
Bazna taljevina 2	0,57	0,62
Obradena taljevina 1	0,35	2,21
Obradena taljevina 2	0,27	0,84



Slika 32. Prikaz usporedbe krivulja hlađenja druge bazne taljevine i druge modificirane taljevine

Na slici 32. može se vidjeti usporedba druge bazne taljevine i druge obrađene taljevine iz koje se može zaključiti još bolje usitnjavanje zrna nego prema prvoj usporedbi. Rekalescencija je u odnosu na prvo mjerenje smanjena sa 0,35 °C na 0,27 °C. Također, nukleacijski potencijal i modifikacija eutektika je u prihvatljivim vrijednostima, te se također, taj uzorak može uzimati u obzir. Eutektička temperatura je također manja u odnosu na baznu taljevinu.

O usitnjenosti samog zrna najbolje govori podatak Rek, to jest rekalescencija. Prema prikazanim podacima u tablici 4. može se zaključiti da je modifikacija zrna AlSi7Mg legure uspješno provedena. Niža eutektička temperatura u odnosu na baznu taljevinu daje podatak o modifikaciji eutektika, odnosno eutektičkog silicija. Prema podacima u tablici 3. može se zaključiti da je modifikacija eutektika također uspješno provedena.

6.3. Određivanje kemijskog sastava

Nakon što su uzorci za kemijsku analizu odliveni, pripremljeni su za kemijsku analizu. Donji dio uzorka je pobrušen i očišćen od eventualnih nečistoća radi točnijeg mjerenja. Inertizacija prostora oko uzorka prije same analize kemijskog sastava je rađena sa argonom, te se isto maralonaopraviti svaki puta prije ponovnog mjerenja. Uređaj Hitachi Foundry-Master sa kojim je vršena kemijska analiza je prikazan na slici 33.



Slika 33. Uređaj Hitachi Foundry-Master za određivanje kemijskog sastava legure

U tablicama 5, 6, 7 i 8 mogu se vidjeti prosječne vrijednosti kemijskog sastava svake analizirane taljevine.

Tablica 2. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava prve bazne taljevine

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sr	Na
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
91,68	7,34	0,336	0,0501	0,0667	0,314	0,0054	0,0776	0,0601	0,0005	0,0053

Tablica 6. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava druge bazne taljevine

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sr	Na
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
91,74	7,31	0,317	0,049	0,0671	0,315	0,0052	0,0782	0,0583	0,0005	0,003

Tablica 7. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava prve obrađene taljevine

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sr	Na
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
91,6	7,43	0,314	0,0487	0,0664	0,306	0,0054	0,0792	0,0728	0,0005	0,0086

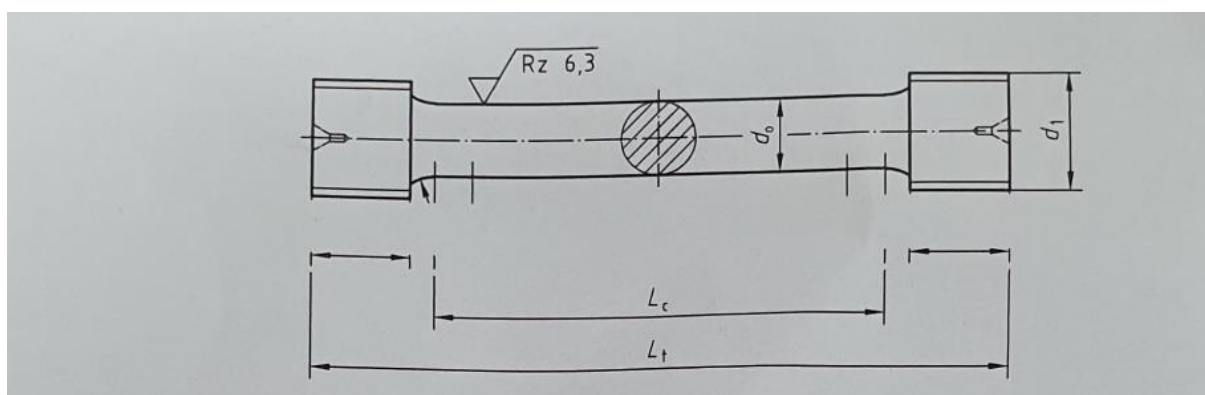
Tablica 8. Prosječne vrijednosti kemijskog sastava druge obrađene taljevine

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sr	Na
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
91,8	7,2	0,319	0,0491	0,0665	0,311	0,0051	0,0774	0,108	0,0005	0,0048

Prema rezultatima kemijske analize iz priloženih tablica se može zaključiti da je kemijski sastav obrađene taljevine promjenjen na temelju udjela natrija i titana, a to je upravo radi dodavanja Simodala 77 i nukleanta 100 SP. Udio titana se povećao kod druge obrađene taljevine jer je reakcija s tabletom nukleanta još trajala. Udio natrija se smanjio što je očekivano, ali se taj efekt ne vidi na eutektičkoj temperaturi druge obrađene taljevine.

6.4. Obrada uzoraka za statički vlačni pokus

Prije nego što se mogu lijevane epruvete vlačno ispitivati, potrebno ih je istokariti prema odgovarajućoj normi. Izrada epruveta za statički vlačni pokus napravljena je prema normi DIN 50125:2009-07.

**Slika 34. Izgled epruvete za statički vlačni pokus prema normi DIN 50125:2009-077**

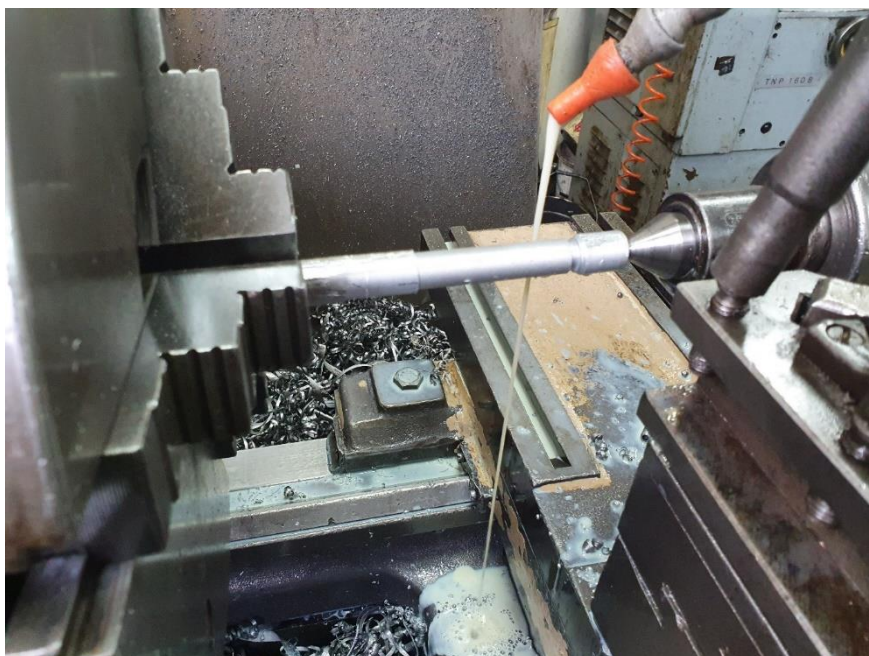
Na slici 34. mogu se vidjeti dimenzije i kvaliteta obrade koji su bitni prije nego što se može krenuti u samu izradu epruvete.

- d_0 – promjer epruvete
- d_1 – promjer navoja
- L_C – paralelna dužina ($L_c \geq L_0 + d_0$)
- L_t – ukupna dužina epruvete
- L_0 – početna mjerna duljina epruvete

U našem ispitivanju dimenzije epruvete su iznosile:

- $d_0 = 12 \text{ mm}$
- $d_1 = \text{M18}$
- $L_C = 72 \text{ mm}$
- $L_t = 116 \text{ mm}$
- $L_0 = 60 \text{ mm}$

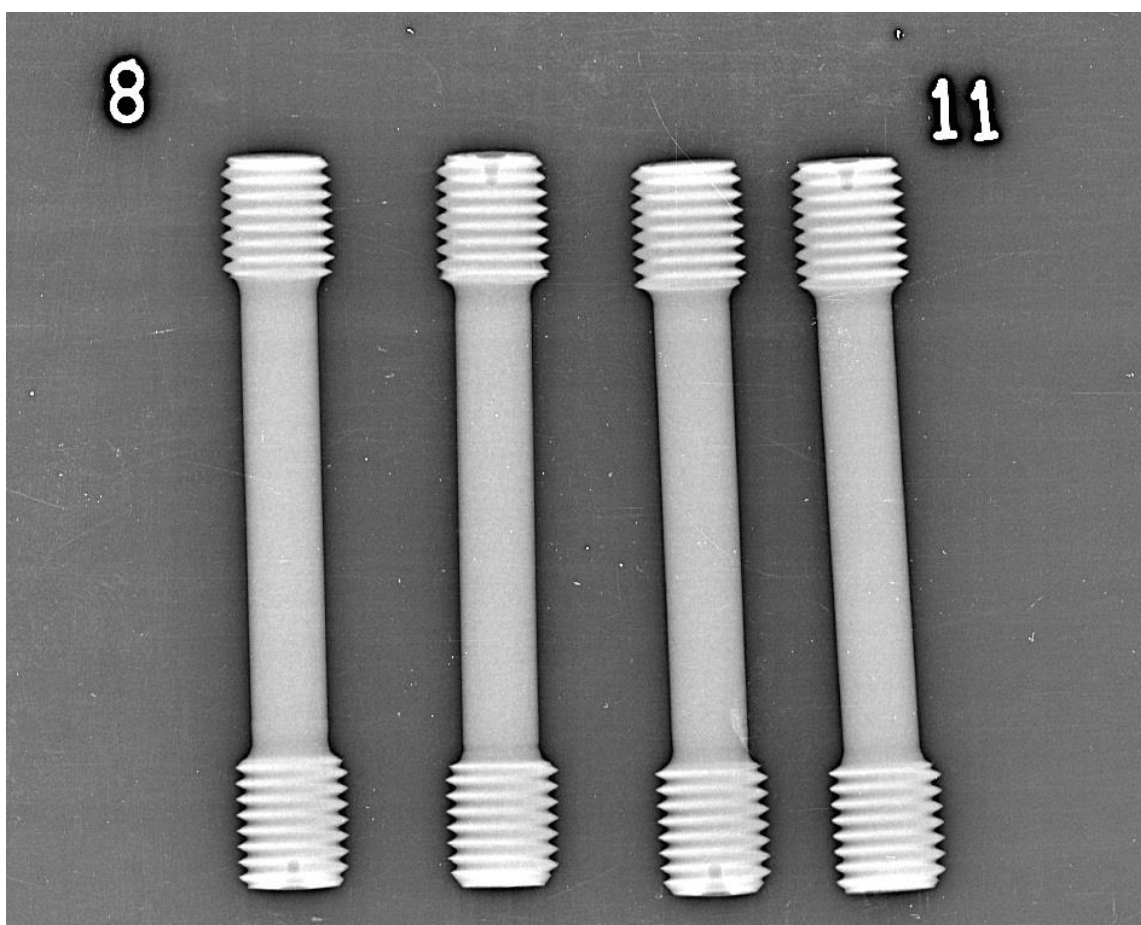
Na slici 35. vidi se izrada epruvete na tokarilici.



Slika 35. Prikaz obrade epruvete na tokarilici

6.5. Radiografsko ispitivanje

Nakon što su epruvete obrađene prema normi provedno je radiografsko ispitivanje kako bi vidjeli da li postoji prisutnost poroznosti u epruvetama, jer ako ih kojim slučajem ima moramo toga biti svjesni zato što mogu utjecati na zadnji dio eksperimenta, a to je vlačno ispitivanje uzoraka.



Slika 36. Prikaz radiograma za sve četiri epruvete od AlSi7Mg

Na slici 36. je vidljiv radiogram epruveta koje su redom označene od broja 8 do 11.

- 8 – epruveta prve bazne taljevine bez obrade
- 9 – epruveta druge bazne taljevine bez obrade
- 10 – epruveta prve obrađene taljevine
- 11 – epruveta druge obrađene taljevine

Za izvođenje radiografskog ispitivanja korišteni su sljedeći parametri i oprema:

Parametri snimanja:

Napon – 125 kV

Struja – 3 mA

Film fokus udaljenost – 700 mm

Vrijeme – 90 s

Parametri skeniranja:

Napon lasera – 15 V

Napon fotomultiplikatora – 5,25 V

Rezolucija skeniranja – 50 μm

Korištena oprema:

RTG uređaj – Balteau 300 D

Skener – VMI 5100

Slikovna ploča – Kodak industrex flex Blue

Radiogram je pokazao da u uzorcima nema prisutnih poroznosti, te sve epruvete zadovoljavaju kriterije za statičko vlačno ispitivanje.

6.6. Statičko vlačno ispitivanje

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava. Ispitivanje je provedeno na epruvetama od AlSi7Mg legure koje su pripremljene prema prije spomenutoj normi DIN 50125:2009-07. Ispitivanje je provedeno na kidalici Werkstoffprüfmaschinen EU 40 mod. Njezino mjerno područje je od 0 do 400 kN, te je umjerena 25.6.2020. godine prema potvrdi o umjeravanju br.: 0106/20. Na slici 37 su vidljivi uzorci netom prije ispitivanja na kidalici dok se na slici 38. može vidjeti kidalica.



Slika 37. Uzorci prije statičkog vlačnog ispitivanja na kidalici



Slika 38. Kidalica Werkstoffprüfmaschinen EU 40 mod

Tijekom ispitivanja izmjereno je nekoliko parametara:

Maksimalna sila – F_m , kN,

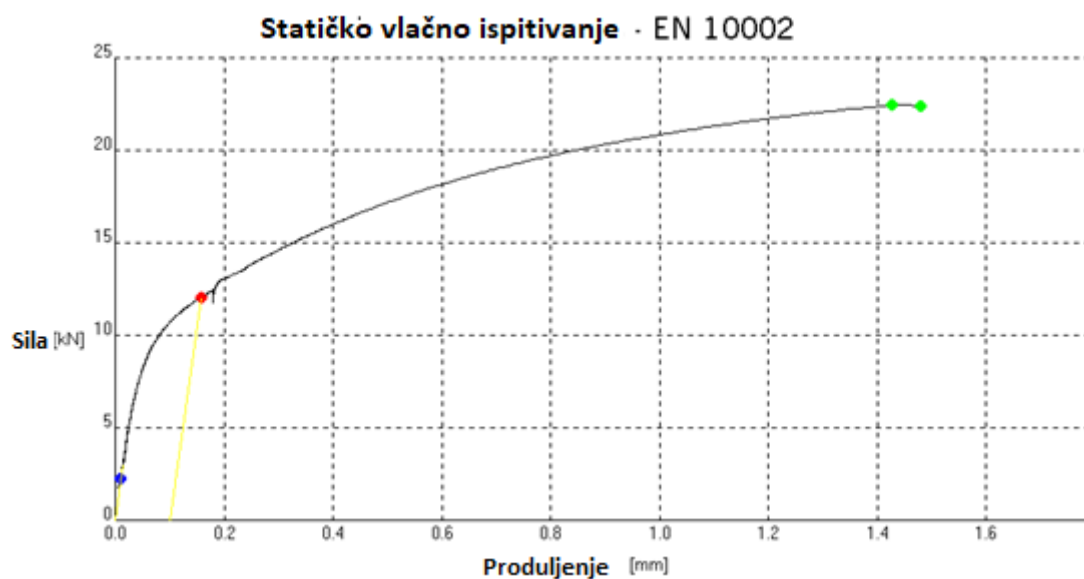
Naprezanje kod maksimalne sile to jest vlačna ili rastezna čvrstoća – R_m , N/mm²,

Konačna sila pri kojoj dolazi do loma epruvete – F_b , kN,

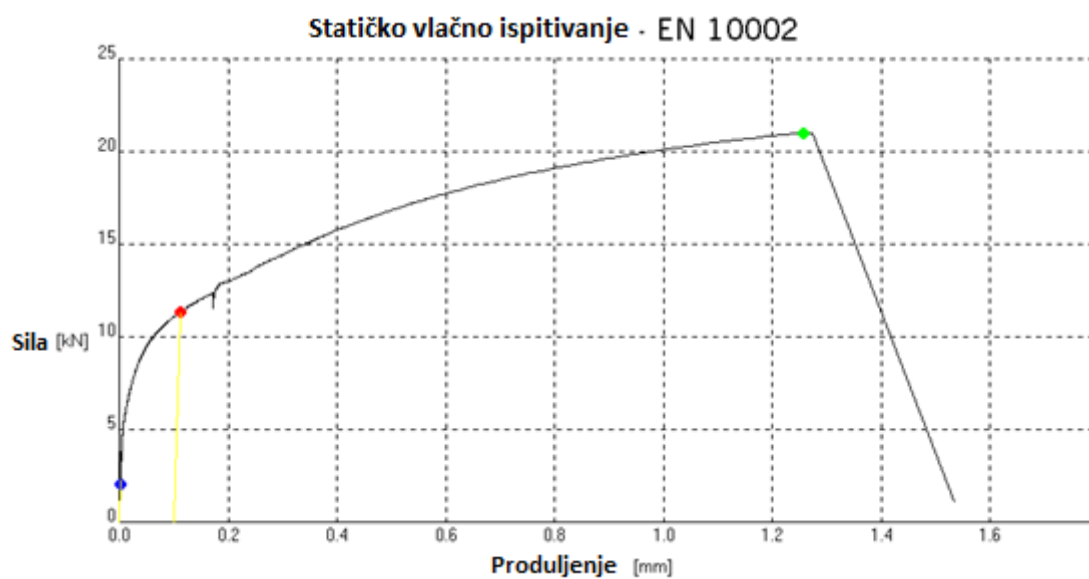
Površina početnog presjeka epruvete (ručno izmjerena) – S_0 , mm².

Ispitivanje je vršeno prema normi ISO 6892-1, te je za produljenje jednako nuli uzeta sila od 2 kN. Produljenje od 0 do 0,17 mm mjeri električni kontakti ekstenziometar proizvođača MF Model MFA 2 čije je mjerno područje od 0 do 2 mm. Njegova je rezolucija 0,0001 mm te spada pod klasu 1. U svrhu ovog ispitivanja on se uzima sa uzorka nakon što produljenje prijeđe 0,17 mm. Brzina ispitivanja je 350 N/s, a sami uzorci su u kidalici pričvršćeni sa navojnim čahurama.

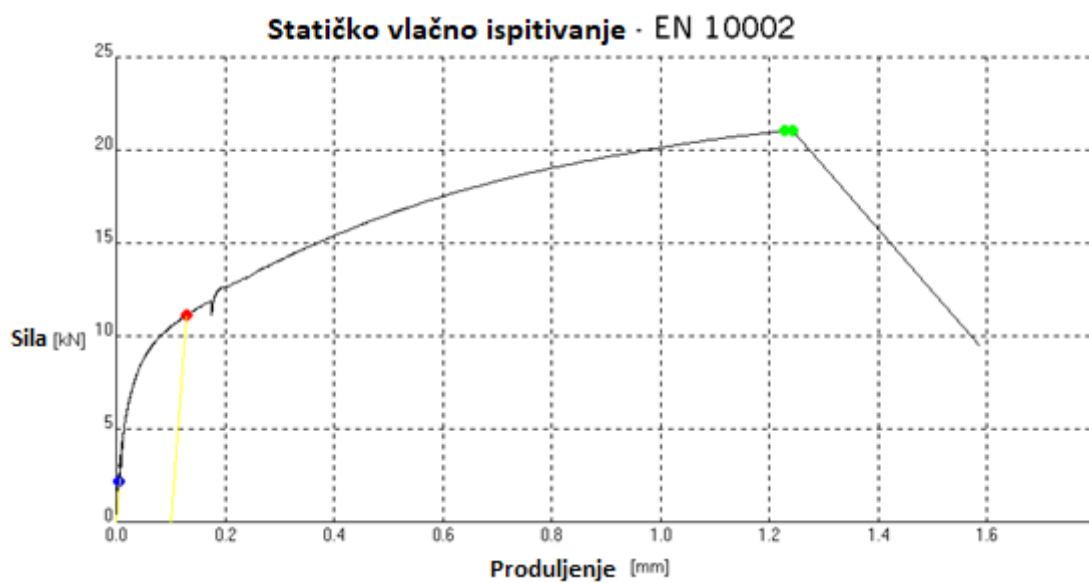
Na slikama 39., 40., 41. i 42. mogu se vidjeti grafovi statičkog vlačnog ispitivanja za sva 4 uzorka.



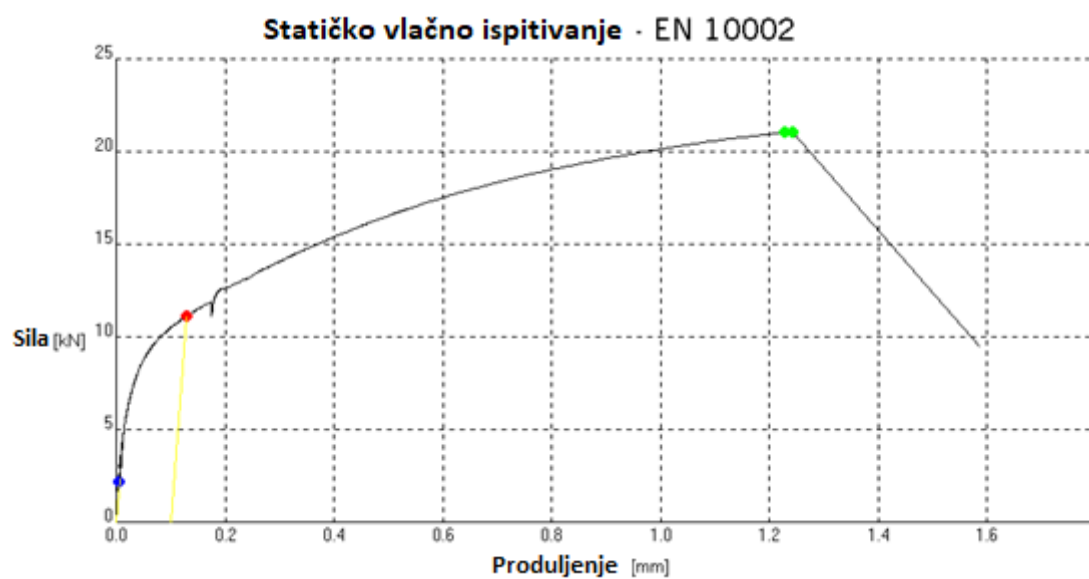
Slika 39. Graf statičkog vlačnog ispitivanja za bazni uzorak 1



Slika 40. Graf statičkog vlačnog ispitivanja za bazni uzorak 2



Slika 41. Graf statičkog vlačnog ispitivanja za modificirani uzorak 1



Slika 42. Graf statičkog vlačnog ispitivanja za modificirani uzorak 2

U tablici 9. prikazani su rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.

Tablica 9. Rezultati i izmjere statičkog vlačnog ispitivanja AlSi7Mg legure

	E, N/mm ²	Rp0,2, N/mm ²	Rm, N/mm ²	Fm, kN	Fb, kN	S0, mm ²
1.(baza)	89141,484	104,64	194,48	22,44	22,41	115,37
2.(baza)	382296,844	99,22	183,32	21,01	21,01	114,61
3.(usitnjeno)	162074,109	97,03	183,14	21,02	21,02	114,80
4.(usitnjeno)	163278,813	102,95	197,32	22,43	22,43	113,66

Prema rezultatima ispitivanja vidljivo je da su vrijednosti bazne i obrađene taljevine vrlo slične. Budući da su ostali rezultati poprilično bliski može se zaključiti da za ispitivanu taljevinu, usitnjavanje zrna AlSi7Mg legure nema utjecaj na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja. Jedan od mogućih razloga ovih rezultata je nedovoljna kvaliteta obrade samih epruveta, jer je toplinska analiza pokazala efekt usitnjavanja razlikom u rekalescenciji, tablica 4.

6.7. Metalografsko ispitivanje

Prije samog metalografskog ispitivanja, uzorci su pripremljeni brušenjem i poliranjem. Uzorci su uzeti iz odljevaka iz Quik-Cup čašica. Brušenje je provedeno vodootpornim brusnim papirima sa zrnima od silicij karbida. Gradacije brusnog papira koje su korištene za brušenje su redom: P320, P600, P1200, P2400, P4000. Uzorak je brušen na 300 o/min pod mlazom vode zbog hlađenja uzorka. Uzorci su zakretani za 90 stupnjeva prilikom svake izmjene brusnog papira kako bi se izbjegli eventualni prijašnji tragovi brušenja. Samo brušenje je vršeno na uređaju Mintech 233 koji je vidljiv na slici 43.



Slika 43. Uređaj za brušenje Mintech 233

Poliranje uzorka je proces koji se odvija u 2 koraka. Prvi je poliranje uzoraka za koji je korištena dijamantna pasta „Buehler 3 MICRON“ zbog stvaranja glatke površine bez eventualnih grešaka koje se mogu javiti na površini AlSi7Mg uzoraka za ispitivanje mikrostrukture pod mikroskopom. Drugi korak je poliranje pod tekućinom koja ima funkciju lubrikanta i dijamantne paste čija je veličina zrna 0,003 mikrometra. Poliranje je provedeno na uređaju za poliranje Struers DAP-V pri brzini 150 o/min, te je on vidljiv na slici 44.



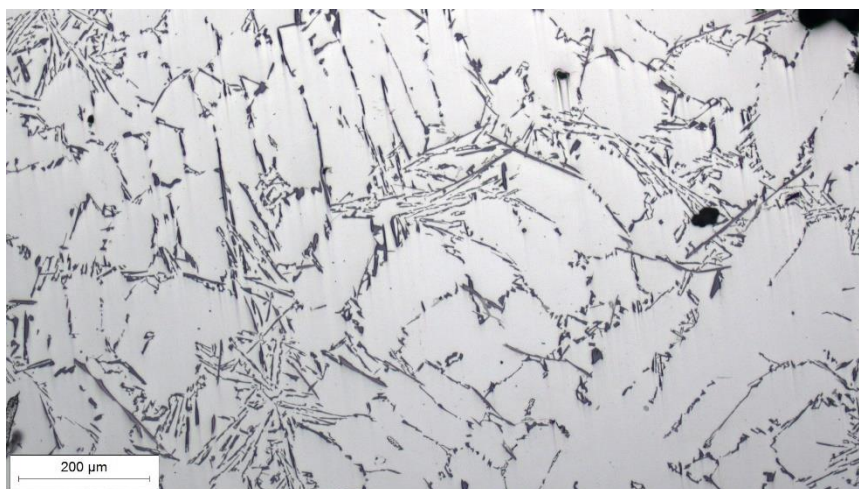
Slika 44. Uređaj za poliranje Struers DAP-V

Nakon što je uzorak brušen i poliran on zadovoljava kriterije za metalografsko ispitivanje koje je rađeno na mikroskopu Olympus GX51 koji je vidljiv na slici 45.

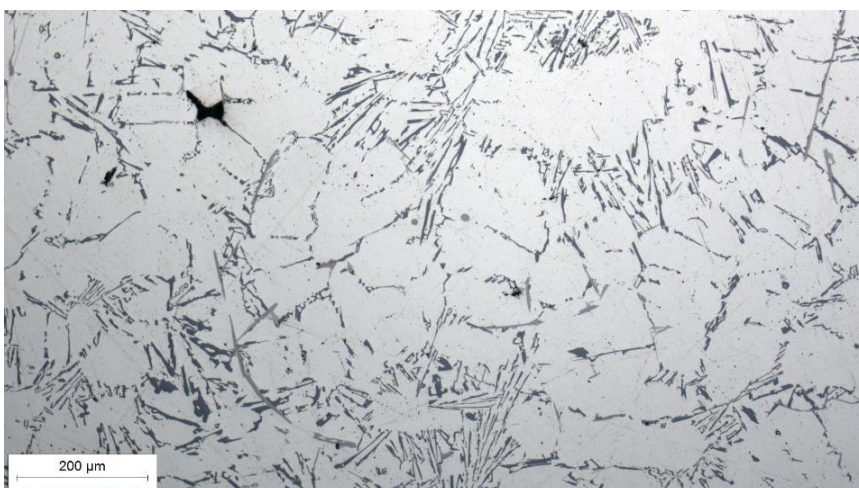


Slika 45. Mikroskop Olympus GX51

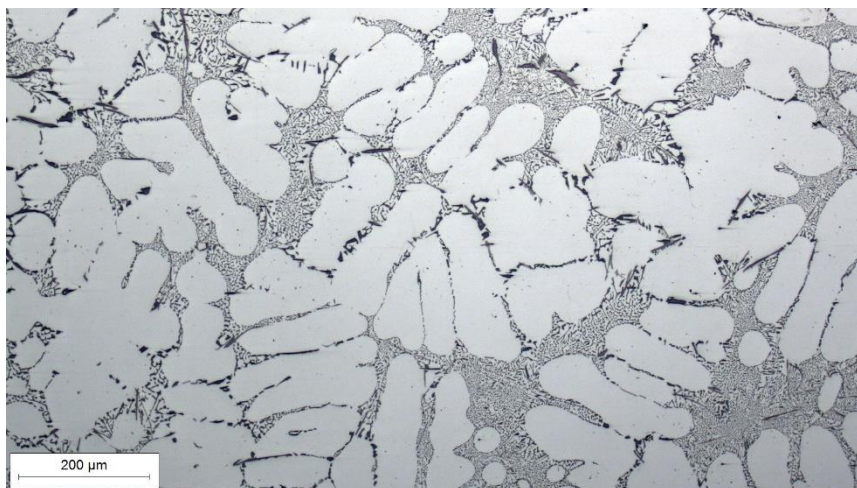
Mikrostruktura poliranih uzoraka za dvije bazne i dvije obrađene AlSi7Mg legure je prikazana na slikama 46. do 49.



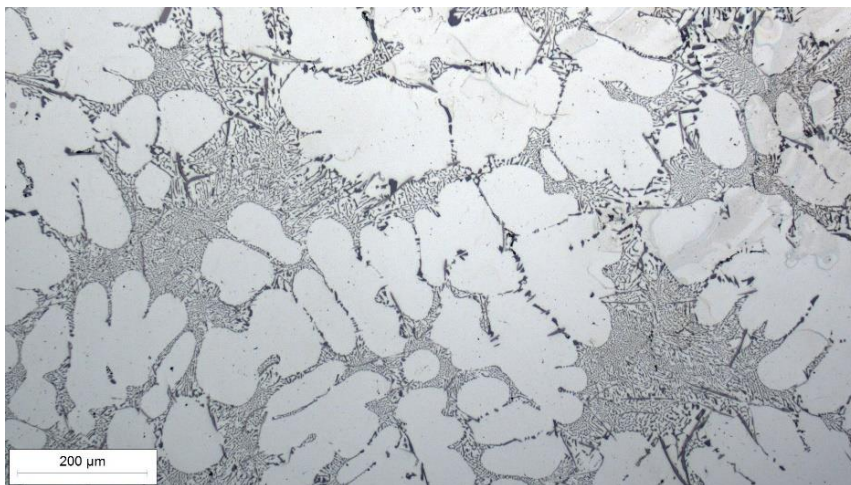
Slika 46. Mikrostruktura prvog baznog uzorka AlSi7Mg legure



Slika 47. Mikrostruktura drugog baznog uzorka AlSi7Mg legure



Slika 48. Mikrostruktura prvog usitnjenog i modificiranog uzorka AlSi7Mg legure



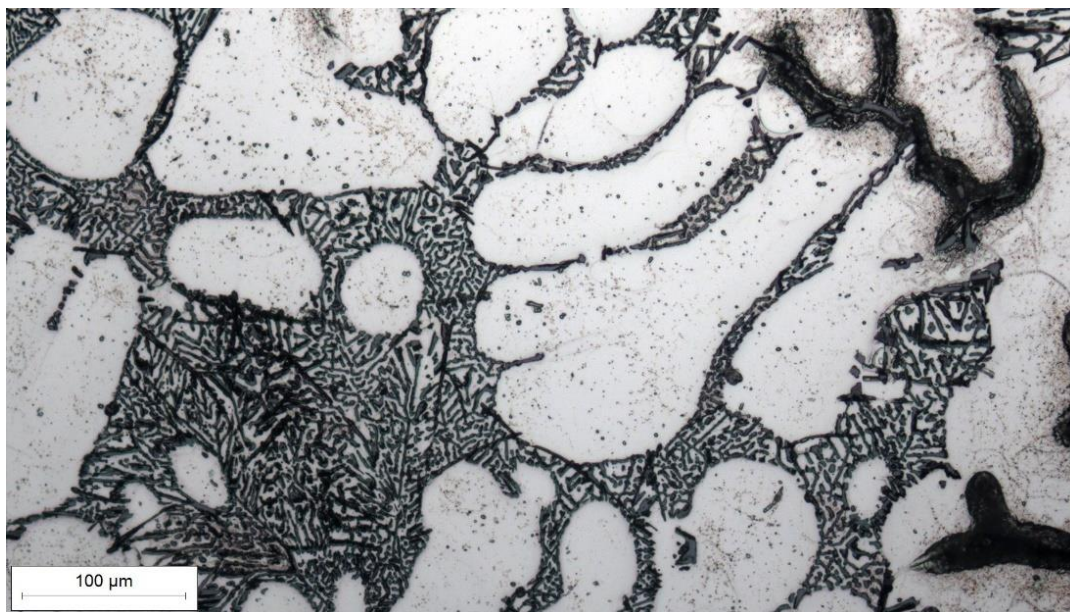
Slika 49. Mikrostruktura drugog usitnjenog i modificiranog uzorka AlSi7Mg legure

Mikrostruktura se može promatrati i na nagriženim uzorcima sa Kellerovim reagensom, slika 50. i 51. Sastav Kelerovog reagensa prikazan je u tablici 10.

Tablica 10. Kemijski sastav Kellerovog reagensa

Kellerov reagens	
HNO ₃	2,5 ml
HCl	1,5 ml
HF	1 ml
Destilirana voda	95 ml

**Slika 50. Nagrižena mikrostruktura prvog baznog uzorka**



Slika 51. Nagrižena mikrostruktura drugog usitnjenog uzorka

Na slikama mikrostrukture očito su vidljivi učinci modifikacije eutektika natrijem iz Simodala 77. Na slikama 46., 47. i 50. kod neobrađene bazne taline može se uočiti igličasti silicij (tamne boje) u eutektiku između primarnih alumenijevih dendrita (svjetle boje). Na uzorcima iz obrađene taline, slike 48., 49. i 51. može se vidjeti da eutektički silicij više nije igličast nego je vlaknast te je sam po sebi sitniji. Postupak nagrivanja uzoraka za metalografiju koji daje vidljiva zrna nije proveden u ovom radu, tako da se iz mikrostrukture ne može uočiti efekt usitnjavanja zrna koji je pokazala toplinska analiza.

7. ZAKLJUČAK

Usitnjavanje zrna trenutno se koristi u lijevanju aluminijevih legura kako bi se smanjila veličina zrna i kako bi se proizvela istoosna zrna tijekom skrućivanja legura. Korištenje predlegura za usitnjavanje zrna čini legure bolje livljivima. U radu je ispitan utjecaj obrade taline usitnjavanjem zrna AlSi7Mg legure na mikrostrukturu i mehanička svojstva. Talina je također bila modificirana. Usporedbe krivulja hlađenja za drugu baznu talinu i prvu obrađenu talinu prikazuju uspješnost usitnjenja zrna i modifikacije. Rekalescencija kao mjerodavni podatak o usitnjenju zrna prikazuje pad sa 0,57 °C na 0,35 °C. Postupak nagrizanja uzoraka za metalografiju koji daje vidljiva zrna nije proveden u ovom radu, tako da se iz mikrostrukture ne može uočiti efekt usitnjavanja zrna pomoću Nukleanta 100 SP, koji je pokazala toplinska analiza. Metalografskim ispitivanjem se može zaključiti da prilikom dodavanja modifikatora Simodala 77 dolazi do pretvorbe igličastog silicija, koji je krhak i poprilično tvrd, u sitniji vlaknasti silicij u eutektiku. Radiogram je pokazao da u epruvetama za statički vlačni pokus nema poroznosti. Statičko vlačno ispitivanje nije dalo očekivane rezultate povećanja čvrstoće zbog usitnjavanja zrna i modifikacije što bi se moglo prepisati nedovoljno preciznom tokarenju samih epruveta. Kod tri od četiri epruvete lom se dogodio izvan mjernog područja L_0 .

LITERATURA

- [1] Dwight J.: Aluminium Design and Construction, University of Cambridge; and Fellow of Magdalene College, Cambridge, 1999.
- [2] ...: ASM International: Aluminium and aluminium alloys, 2015.
https://www.asminternational.org/documents/10192/23555666/ASM+Subject+Guide_A_luminum.pdf/d8b67b75-1114-4279-b66e-fec86c62a880, Pristupljeno: 24. travnja 2021.
- [3] Fayomi O.S.I., Popoola A.P.I., Udoeye N.E.: Effect of Alloying Element on the Integrity and Functionality of Aluminium-Based Alloy, Intech, 2017., DOI: 10.5772/intechopen.71399.
- [4] Rana R.S., Purohit R., Das S.: Reviews on the Influences of Alloying elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Alloy Composites, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 6, 2012., ISSN 2250-3153.
- [5] Alkhaqani Baraa H.: Reviews on effect of Additions the alloying element on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium Alloys, International Journal of Engineering and Technology, 2020., DOI: 10.21817/ijet/2020/v12i2/201202027.
- [6] Voort G.F.V., Asensio-Lozano J.: The Al-Si Phase Diagram, Microscopy and Microanalysis, 2009., DOI:10.2017./S1431927609092642.
- [7] ...: Rheinfelden Alloys, Primary aluminium - Casting alloys.
- [8] Bauer B., Pokopec Mihalic I.: Osnove tehnologije lijevanja, FSB, 2017.
- [9] Bauer B., Pokopec Mihalic I.: Ljevarstvo, FSB, 2017.
- [10] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/advancedmeltingtechnologies.pdf>, Pristupljeno: 12. svibnja 2021.
- [11] <https://pocketdentistry.com/1-4-structure-of-metals-and-alloys/>, Pristupljeno: 10. svibnja 2021.
- [12] ...: ASM Metals Handbook Volume 15, Casting, Metals Handbook, 1988.
- [13] Faraji M., Katgerman L.: Microstructural analysis of modification and grain refinement in a hypoeutectic Al-Si alloy, International Journal of Cast Metals Research , August, 2009.
- [14] Birol Y.: AlB3 master alloy to grain refine AlSi₁₀Mg and AlSi₁₂Cu aluminium foundry alloys, 2012., DOI:10.1016/j.jallcom.2011.10.010.
- [15] Birol Y.: Performance of AlTi5B1, AlTi3B3 and AlB3 master alloys in refining grain structure of aluminium foundry alloys, Materials Science and Technology, 2012.

[16] Medved J.: predavanja Tehnike eksperimentalne analize, Sisak, Metalurški fakultet, 2012/2013.

PRILOZI

- I. CD-R disc