

Utjecaj modifikacije Al-Si legure nasvojtva odljevka

Radanić, Davor

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:149498>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Davor Radanić

0035180043

Zagreb, 2016

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Davor Radanić

0035180043

Zagreb, 2016

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija uz uporabu navedene literature.

Zahvaljujem se mentoru Prof.dr.sc. Branku Baueru, te asistentici dipl. ing. Ines Mance na cjelokupnom vođenju kroz izradu rada, kako teoretskog tako i eksperimentalnog dijela. Zahvaljujem se i djelatnicima Laboratorija za ljevarstvo Katedre za ljevarstvo, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

DAVOR RADANIĆ

Mat. br.: 0035180043

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**UTJECAJ MODIFIKACIJE Al-Si LEGURE NA SVOJSTVA
ODLJEVKA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**EFFECT OF Al-Si ALLOY MODIFICATION ON THE PROPERTIES
OF CAST PART**

Opis zadatka:

U radu je potrebno istražiti utjecaj modifikacije aluminij-silicij legure na mikrostrukturu i mehanička svojstva odljevaka. Navesti primjere upotrebe aluminijjskih odljevaka.

Za zadani odljevak potrebno je razraditi tehnologiju lijevanja i konstruirati kalup. Prilikom pripreme taljevine provesti modifikaciju eutektika aluminij-silicij. Lijevati odljevke s modificiranom i nemodificiranom taljevinom. Provesti metalografska i mehanička ispitivanja, te analizirati rezultate.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| POPIS OZNAKA..... | VII |
| SAŽETAK | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1 UVOD..... | 1 |
| 2 LIJEVANJE..... | 2 |
| 2.1 Podjela lijevanja prema praoblikovanju | 2 |
| 2.1.1 Lijevanje ingota | 3 |
| 2.1.2 Kontinuirani lijev | 3 |
| 2.1.3 Lijevanje odljevaka..... | 4 |
| 2.2 Podjela lijevanja prema vrsti kalupa | 5 |
| 2.2.1 Lijevanje u jednokratne kalupe..... | 6 |
| 2.2.2 Lijevanje u stalne kalupe..... | 6 |
| 3 ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE ZA LIJEVANJE | 7 |
| 3.1 Aluminiij (Al) | 8 |
| 3.2 Silicij (Si)..... | 9 |
| 3.3 Al-Si legure | 10 |
| 3.3.1 Podeutektičke legure | 11 |
| 3.3.2 Eutektičke legure | 12 |
| 3.3.3 Nadeutektičke legure | 13 |
| 4 PROCES SKRUĆIVANJA | 14 |
| 4.1 Nukleacija..... | 16 |
| 4.2 Rast kristala..... | 16 |
| 4.2.1 Razvoj dendritne mikrostrukture | 17 |
| 4.2.2 Razvoj eutektičke mikrostrukture | 18 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5 | MODIFIKACIJA EUTEKTIKA | 21 |
| 5.1 | Kemijski modifikatori..... | 21 |
| 5.1.1 | Modifikacija natrijem | 25 |
| 5.1.2 | Modifikacija stroncijem..... | 26 |
| 5.1.3 | Modifikacija antimonom | 29 |
| 5.1.4 | Modifikacija cerijem..... | 29 |
| 5.2 | Modifikacija eutektika brzim hlađenjem | 32 |
| 5.3 | Negativne posljedice modificiranja | 33 |
| 5.3.1 | Pojava vodika..... | 33 |
| 5.3.2 | Smanjenje tečljivosti | 33 |
| 6 | EKSPERIMENTALNI DIO | 35 |
| 6.1 | Simulacija | 36 |
| 6.2 | Kalupljenje..... | 39 |
| 6.2.1 | Postupak vodeno staklo-CO ₂ | 39 |
| 6.2.2 | Lijevanje u svježu kalupnu mješavinu | 41 |
| 6.3 | Lijevanje | 44 |
| 6.3.1 | Legura..... | 44 |
| 6.3.2 | Uzorci od osnovne legure | 45 |
| 6.3.3 | Modificirani uzorci | 49 |
| 6.4 | Ispitivanje uzoraka..... | 52 |
| 6.4.1 | Statičko vlačno ispitivanje | 52 |
| 6.4.2 | Metalografska ispitivanja..... | 54 |
| 6.5 | Rezultati i analiza | 57 |
| 6.5.1 | Metalografsko ispitivanje..... | 57 |
| 6.5.2 | Statičko vlačno ispitivanje | 61 |
| 7 | ZAKLJUČAK..... | 64 |
| | LITERATURA: | 65 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2.1. Lijevanje ingota [1] | 3 |
| Slika 2.2. Kontinuirani lijev [1]..... | 4 |
| Slika 2.3. Ljevački kalup s jezgrom i uljevnim sustavom [1]..... | 4 |
| Slika 2.4. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [1] | 5 |
| Slika 3.1. Čisti aluminijski [9]..... | 8 |
| Slika 3.2. Čisti silicij [9] | 9 |
| Slika 3.3. Mikrostruktura Al-Si legure s obzirom na udio Si [5] | 10 |
| Slika 3.4. Prikaz mrežne sekundarne faze kod dvije podeutektičke legure [5]..... | 11 |
| Slika 3.5. Prikaz raspršene i mrežaste građe sekundarne faze kod dvije eutektičke legure [5]..... | 12 |
| Slika 3.6. Prikaz raspršene i mrežaste građe sekundarne faze kod dvije nadeutektičke legure [5]..... | 13 |
| Slika 4.1. Shematski prikaz krivulja hlađenja i skrućivanja: a) čistog metala, b)binarne legure [13]..... | 14 |
| Slika 4.2. Shematski prikaz skrućivanja metala [1] | 15 |
| Slika 4.3. Shematski prikaz probijanja početnog ravnog fronta u ćelije [13]. | 17 |
| Slika 4.4. Shematski prikaz grananja dendrita [14]..... | 18 |
| Slika 4.5. Shematski prikaz morfologije pravilnog eutektika [5] | 19 |
| Slika 4.6. Shematski prikaz morfologije nepravilnog eutektika [5] | 19 |
| Slika 4.7. Shematski prikaz tipova nestabilnosti planarne eutektičke granične površine kruto/tekuće [5]..... | 20 |
| Slika 5.1. Različiti stupnjevi modifikacije Al-Si eutektika: od potpuno nemodificiranog (A) do dobro modificiranog (F) [17]..... | 22 |
| Slika 5.2. Al_4SrSi_2 faza uzrokovana pretjeranim dodavanjem Sr u A356 leguru [19] 23 | |
| Slika 5.3. Nemodificirana mikrostruktura (lijevo), mikrostruktura modificirana natrijem (desno) [19] | 25 |
| Slika 5.4. Učinkovitost modifikacije natrijem i stroncijem kao funkcija vremena [4] .. | 27 |
| Slika 5.5. Utjecaj udjela Sr na vlačnu čvrstoću i produljenje za leguru 319 pri toplinskoj obradi po režimu T6 [16]..... | 28 |
| Slika 5.6. a) Ravnotežni fazni dijagram Al-Si-Ce, b) aluminijski kut faznog dijagrama Al-Si-Ce [10] | 30 |

| | |
|--|----|
| Slika 5.7. Utjecaj dodatka Ce na nadeutektičku leguru [10]..... | 31 |
| Slika 5.8. Mikrostruktura nadeutektičke legure (a) i legure s dodatkom 1 mas. % Ce (b) [10] | 31 |
| Slika 5.9. Promjena morfologije silicijske faze s brzinom skrućivanja [12]..... | 32 |
| Slika 6.1. Model epruvete | 35 |
| Slika 6.2. Model stošca..... | 35 |
| Slika 6.3. Početak skrućivanja stošca..... | 36 |
| Slika 6.4. Posljednje mjesto skrućivanja stošca..... | 37 |
| Slika 6.5. Poroznost na stošcu nakon skrućivanja | 37 |
| Slika 6.6. Skrućivanje epruvete nakon 45 sekundi | 38 |
| Slika 6.7. Skrućivanje epruvete nakon 322 sekunde | 38 |
| Slika 6.8. Kalupnik (lijevo), posipanje kalupnika likapodijem (desno) | 39 |
| Slika 6.9. Miješanje kalupne smjese (lijevo) te njeno usipanje u kalupnik (desno) ... | 40 |
| Slika 6.10. Sabijanje kalupne mješavine..... | 40 |
| Slika 6.11. Izrada odušaka u kalupnoj mješavini (lijevo) te očvršćivanje mješavine CO ₂ plinom (desno)..... | 40 |
| Slika 6.12. Vađenje jedne strane kalupa iz kalupnika | 41 |
| Slika 6.13. Kalup spreman za ulijevanje | 41 |
| Slika 6.14. Postavljanje modela u kalupnik (lijevo) te posipanje likapodijem (desno) | 42 |
| Slika 6.15. Zasipavanje modela modelnom kalupnom mješavinom (lijevo), popunjavanje kalupa punidbenom kalupnom mješavinom (desno) | 42 |
| Slika 6.16. Sabijanje kalupne mješavine (lijevo), sabijena mješavina (desno)..... | 43 |
| Slika 6.17. Vađenje modela | 43 |
| Slika 6.18. Kalup spreman za ulijevanje | 43 |
| Slika 6.19. Predgrijavanje kokile i lonca za prijenos taljevine | 45 |
| Slika 6.20. Kokila poprskana cirkonskim premazom..... | 46 |
| Slika 6.21. Uklanjanje troske s vrha taline | 46 |
| Slika 6.22. Ulivanje taljevine u kokilu | 47 |
| Slika 6.23. Lijevanje epruvete u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO ₂ | 47 |
| Slika 6.24. Lijevanje stošca u kalup od svježe kalupne mješavine | 48 |
| Slika 6.25. Vađenje odljevka iz kalupa vodeno staklo-CO ₂ (lijevo), kokila (desno) ... | 48 |
| Slika 6.26. Gotovi odljevci nakon vađenja iz kalupa | 48 |
| Slika 6.27. Tableta Simodal 77 | 49 |
| Slika 6.28. Grijanje modifikatora u zvonu za uranjanje | 50 |

| | |
|---|----|
| Slika 6.29. Uranjanje modifikatora u taljevinu | 51 |
| Slika 6.30. Ulijevanje modificirane taljevine u kalup izrađen postupkom vodeno staklo–CO2 | 51 |
| Slika 6.31. Odljevci od taljevine modificirane natrijem | 51 |
| Slika 6.32. Dimenzije epruvete [24] | 52 |
| Slika 6.33. Kidalica „VEB WPM“ | 53 |
| Slika 6.34. Uzorak pripremljen za metalografsko ispitivanje | 54 |
| Slika 6.35. Mjesta na stošcu s kojih su uzeti uzorci | 55 |
| Slika 6.36. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 | 56 |
| Slika 6.37. Struktura osnovne taljevine s udaljenosti 30 mm od vrha stošca | 57 |
| Slika 6.38. Struktura osnovne taljevine s udaljenosti 47,5mm od vrha stošca | 57 |
| Slika 6.39. Struktura osnovne taljevine s baze stošca | 58 |
| Slika 6.40. Modificirana struktura uzorka udaljenog 30 mm od vrha stošca | 59 |
| Slika 6.41. Modificirana struktura uzorka udaljenog 47,5 mm od vrha stošca | 59 |
| Slika 6.42. Modificirana struktura uzorka s baze stošca | 60 |
| Slika 6.43. Usporedba vlačne čvrstoće | 62 |
| Slika 6.44. Epruvete nakon kidanja | 63 |

POPIS TABLICA

| | | |
|--------------|--|----|
| Tablica 3.1. | Osnovna svojstva čistog aluminija [1] | 8 |
| Tablica 5.1. | Ovisnost vlačnih svojstava Al-Si legure o modifikaciji [2]..... | 23 |
| Tablica 5.2. | Svojstva elemenata koji se upotrebljavaju kao modifikatori silicija u Al-Si legurama [2] | 24 |
| Tablica 5.3. | Usporedba modifikatora Al-Sr i Na [18] | 28 |
| Tablica 6.1. | Mehanička svojstva legure EN 44100 [21]..... | 44 |
| Tablica 6.2. | Kemijski sastav EN 44100 legure [21] | 44 |
| Tablica 6.3. | Rezultati ispitivanja na kidalici | 61 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|----------------------|---|
| T_L | [K] | Temperatura likvidusa |
| T_L | [K] | Temperatura solidusa |
| R_m | [N/mm ²] | Vlačna čvrstoća |
| A | [%] | Produljenje epruvete |
| $R_{p0,2}$ | [N/mm ²] | Granica razvlačenja |
| d_0 | [mm] | Promjer užeg dijela epruvete |
| d_u | [mm] | Promjer užeg dijela epruvete nakon kidanja |
| L_0 | [mm] | Duljina promatranog dijela epruvete |
| L_u | [mm] | Duljina promatranog dijela epruvete nakon kidanja |
| d_1 | [mm] | Promjer šireg dijela epruvete |
| L_c | [mm] | Duljina užeg dijela epruvete |
| L_t | [mm] | Ukupna duljina epruvete |
| F_b | [kN] | Sila pri kojoj je došlo do loma epruvete |
| F_m | [kN] | Maksimalna sila |
| S_0 | [mm ²] | Površina poprečnog presjeka epruvete |

SAŽETAK

Ovaj rad se sastoji od dva dijela teorijskog i eksperimentalnog.

U teorijskom dijelu kratko je opisan uvod u lijevanje te osnovne podjele lijevanja prema praoblikovanju i prema vrsti kalupa. Također su opisane Al-Si legure te je opisan proces skrućivanja aluminijskih legura. Dan je detaljan opis modifikacije eutektika aluminijskih legura. Opisana je kemijska modifikacija natrijem, stroncijem, antimonom i cerijem, te modifikacija eutektika brzim hlađenjem legure. Također su opisane i negativne posljedice modifikacije aluminijskih legura.

U eksperimentalnom dijelu je napravljena simulacija lijevanja i skrućivanja epruvete i stošca. Izrađeni su kalupi te su odlivena dva stošca jedan od taljevine modificirane natrijem te jedan od osnovne taljevine AlSi12, te je odliveno osam epruveta od kojih četiri od modificirane taljevine te četiri od nemodificirane taljevine. Za modifikaciju taljevine korišten je Simodal 77 (natrijeva tableta). Nakon lijevanja odljevci su strojno obrađeni te su epruvetama ispitana mehanička svojstva statičkim vlačnim ispitivanjem, a na uzorcima uzetih iz stožaca je napravljena metalografska analiza.

Ključne riječi: AlSi12 legura, modifikacija eutektika, mikrostruktura, mehanička svojstva

SUMMARY

This thesis consists of two parts: theoretical and experimental.

Theoretical part briefly describes the introduction to casting and classification of casting according to primary shaping and type of mold. This part also describes Al-Si alloys and the process of solidification of aluminium alloys. Modification of eutectics of aluminium alloy was also described in detail. This paper describes chemical modification with sodium, strontium, antimony and cerium and modification of aluminum alloy with rapid cooling. Negative consequences of modification of aluminium alloys are also described.

In the experimental part simulation of casting and solidification of the test rod and the cone was made. Two cones were cast, one with modified alloy and one with unmodified alloy, and eight test rods of which four with modified alloy and four with unmodified alloy. For modification of an alloy Simodal 77 (sodium tablet) was used. After they were cast, castings were machined and test rods mechanical properties were tested and metallographic test carried out for the cones

Keywords: AlSi12 Alloy, modification of eutectics, microstructure, mechanical properties

1 UVOD

Lijevanje je kompleksan postupak izrade proizvoda praoblikovanjem. Jedan od najvećih razloga kompleksnosti je činjenica da se cijeli proces odvija unutar zatvorenog kalupa te nije vidljiv. Zbog svoje kompleksnosti lijevanje je podložno pojavi velikog broja neželjenih rezultata. Na kvalitetu i svojstva odljevka utječe veliki broj varijabli kao što su: metalurško stanje i čistoća taljevine, kvaliteta uložnih materijala, proces taljenja i obrade taljevine, temperatura i brzina lijevanja i mnoge druge.

Čisti se aluminij, kao ljevačka sirovina, vrlo rijetko koristi zbog loše livljivosti i slabih mehaničkih svojstava, već se prvenstveno koriste legure aluminija [1].

Aluminij se legira širokim rasponom elemenata, od kojih su najvažniji silicij, magnezij i bakar. Aluminijsko-silicijske legure pokazuju vrlo poželjnu kombinaciju svojstava kao što su livljivost, zavarljivost, dobra otpornost na koroziju, otpornost na trošenje i strojna obradivost. Ljevana ili primarna struktura određuje u principu mehanička svojstva lijeva. Stoga za dani kemijski sastav postoji mogućnost optimizacije veličine zrna, eutektičke strukture i veličine i raspodjele međumetalnih čestica, što određuje svojstva odljevaka. Postizanje optimalne kombinacije mehaničkih svojstava odljevka za određeni sustav lijevanja zahtjeva poznavanje mehanizama modifikacije te kontrolu neželjenih pratećih djelovanja modifikacije [2].

2 LIJEVANJE

Lijevanje je tehnologija oblikovanja predmeta kojom se rastaljeni metal oblikuje ulijevanjem u kalup, gdje nakon skrućivanja poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine. Lijevanje se koristi više od 5000 godina za proizvodnju odljevaka definiranog geometrijskog oblika i svojstava. U tom razdoblju tehnologija se kontinuirano razvijala i napredovala, tako da se danas mogu proizvesti visoko zahtjevne metalne komponente komplicirane geometrije pomoću najmodernijih mehaniziranih i automatiziranih uređaja. Izrada kvalitetnih odljevaka traži veliku vještinu jer proces nastajanja odljevka nije vidljiv, odnosno metal popunjava zatvoreni kalup. Za razvoj ljevačkih postupaka, potrebna su znanja iz područja kemije, nauke o metalima, fizike, mineralogije, strojarstva i metalurgije [1].

Lijevanje je često jedina tehnologija za izradu vrlo složenih dijelova s unutrašnjim šupljinama (npr. blokova motora i dr.) ili za velika i masivna kućišta strojeva. Kako se kod lijevanja geometrija izratka stvara iz početno tekućeg metala, koji skrućivanjem postaje odljevak odnosno kruto tijelo, lijevanje se ubraja u postupke praoblikovanja. Praoblikovanje je proizvodnja čvrstog tijela od bezobličnih tvari stvaranjem povezanosti čestica. Pritom nastaje početna struktura koja definira početna svojstva materijala. Bezoblične tvari su: plinovi, kapljevine, prašci, vlakna, strugotine i granulati. Većina praoblikovanih dijelova proizvodi se iz kapljevito stanja [1].

Lijevanje se može podijeliti prema stupnju oblikovanja, prema vrsti kalupa i dr.

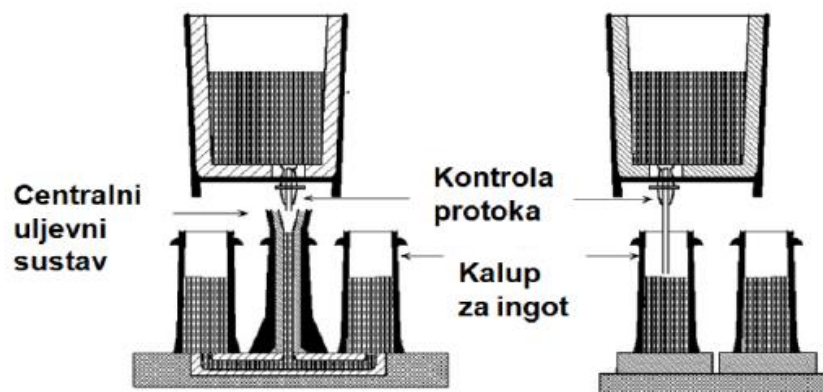
2.1 Podjela lijevanja prema praoblikovanju

Prema praoblikovanju lijevanje se može podijeliti na:

- lijevanje ingota
- kontinuirani ljev
- lijevanje odljevaka

2.1.1 Lijevanje ingota

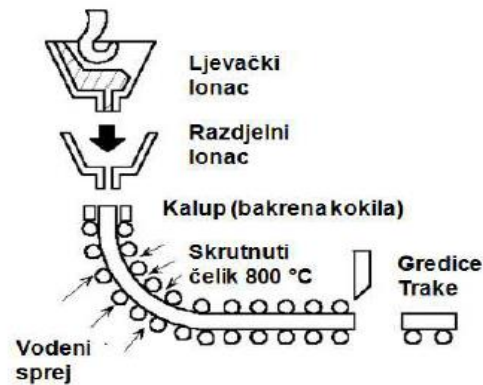
Lijevanje ingota je diskontinuirani proces. Stalni metalni kalupi (kokile) za ingote popunjavaju se tekućim metalom uljevanjem s gornje strane ili kroz uljevni sustav (slika 2.1). Odvođenjem topline taljevina se skrućuje i nastaju ingoti, koji predstavljaju poluproizvod namijenjen daljnjoj obradi. Veličina ingota ovisi o kapacitetu primarnih valjaka za naknadno valjanje. Može iznositi od 4 do 30 t i više ako su predviđeni za kovanje [1].



Slika 2.1. Lijevanje ingota [1]

2.1.2 Kontinuirani lijev

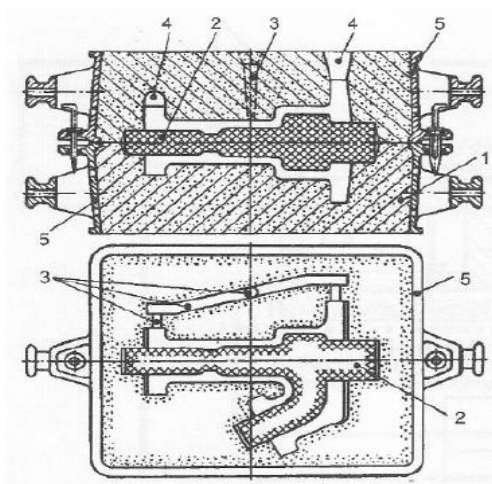
Kontinuirani lijev je razvijen zbog složene primjene kokila za ingote, njihovih ograničenja u dimenzijama i visokog udjela materijala za kompenzaciju usahlina u pojilima. Rastaljeni metal uljeva se u otvorenu bakrenu kokilu hladenu vodom (slika 2.2). Odvođenjem topline talina skrućuje od rubova prema sredini i pomicanjem prema dolje nastaje beskonačna metalna gredica ili traka. Za ubrzano hlađenje koristi se sekundarno hlađenje vodenim sprejom. Gredice se reže na određenu mjeru i nakon toga ako je površina dobre kvalitete prolaze kroz peć i odlaze na vruće valjanje. Mogu se lijevati i aluminijske i bakrene legure. Prednost u odnosu na ingote su: smanjenje gubitka materijala na pojila, veća produktivnost, bolja prilagodba oblika za daljnje preoblikovanje (valjanje) [1].



Slika 2.2. Kontinuirani lijev [1]

2.1.3 Lijevanje odljevaka

Lijevanje odljevaka se koristi za proizvodnju metalnih izradaka različitih oblika i debljina stjenki. Rastaljeni metal se ulijeva pod djelovanjem gravitacije ili neke druge sile u kalupe, u kojima je napravljena šupljina definiranog geometrijskog oblika. Kalupi pritom mogu biti od nemetalnih materijala ili od metala. Nakon skrućivanja tekućeg metala, kalup od nemetalnih materijala se razruši i izvadi odljevak, dok kod metalnog kalupa otvaranje omogućuje vađenje odljevka. Teži se lijevanju odljevaka čiji je oblik nakon lijevanja što sličniji željenom, što je dovelo do razvoja postupaka lijevanja s povećanom točnošću [1]. Slika 2.3 prikazuje ljevački kalup s jezgrom i uljevnim sustavom.



Slika 2.3. Ljevački kalup s jezgrom i uljevnim sustavom [1]

Dijelovi ljevačkog kalupa prikazani na slici 2.3: 1-Kuka za dizalicu, 2-Jezgra, 3-Uljevni sustav, 4-Pojilo, 5-Kalupnik

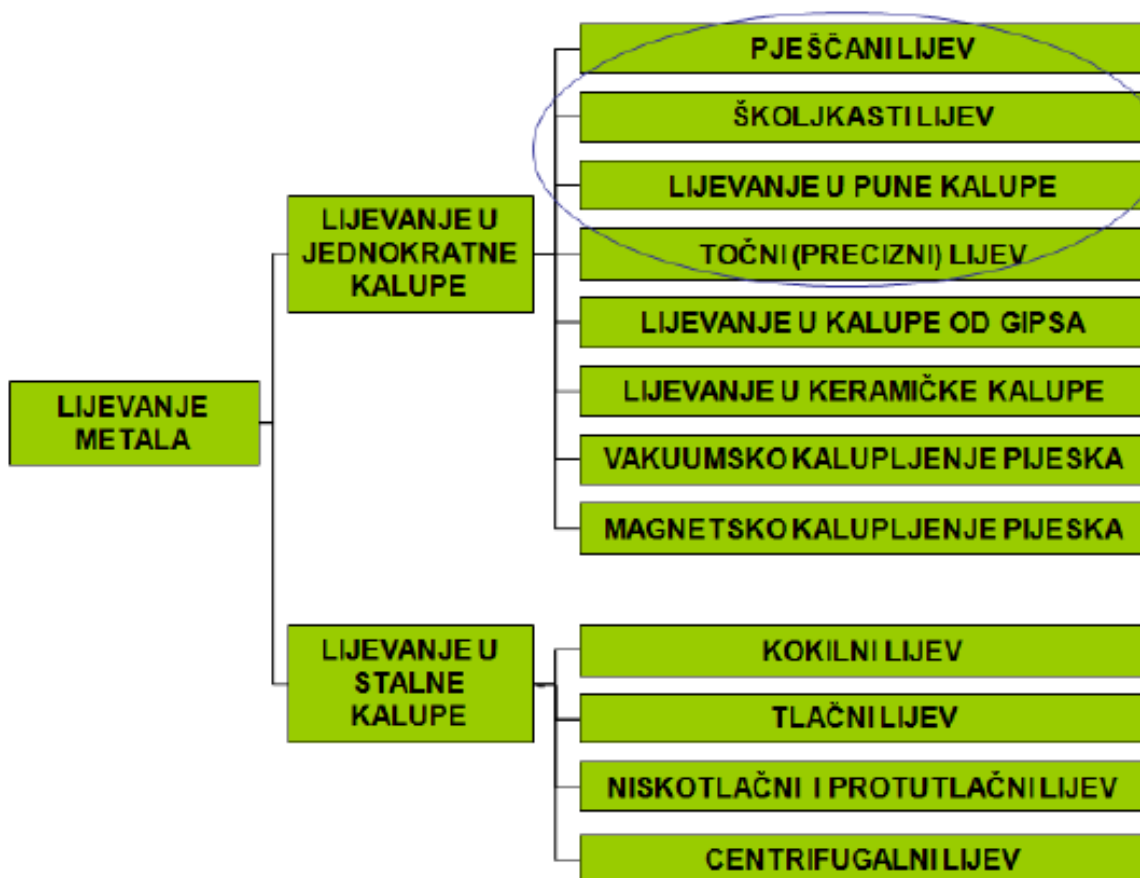
2.2 Podjela lijevanja prema vrsti kalupa

Lijevanje s obzirom na vrstu kalupa može se podijeliti u dvije grupe:

- lijevanje u kalupe za jednokratnu primjenu (izgubljene kalupe)
- lijevanje u kalupe za višekratnu primjenu (stalne kalupe)

Kod lijevanja u jednokratne kalupe za izradu svakog pojedinog odljevka mora se svaki puta izraditi novi kalup, tj. kalup je jednokratno upotrebljiv, dok se kod lijevanja u stalne kalupe pomoću jednog kalupa oblikuje veliki broj odljevaka. Izbor stalnog ili jednokratnog kalupa vrlo je složen, a ovisi o tehnološkim i ekonomskim kriterijima, od kojih su najvažniji vrsta legure koja se lijeva i veličina serije [1].

Svako od ranije navedenih lijevanja se može dodatno podijeliti prema postupku lijevanja što je vidljivo na slici 2.4.



Slika 2.4. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [1]

2.2.1 Lijevanje u jednokratne kalupe

U jednokratnim kalupima se mogu lijevati odljevci svih oblika i dimenzija, te se mogu lijevati svi metali, a primjereni su i za pojedinačnu, serijsku i masovnu proizvodnju. Treba naglasiti kako se materijal za izradu jednokratnog kalupa ne odbacuje odmah nego se od istog materijala, uz određene tehnološke zahvate, ponovno izrađuje kalup [1].

Jednokratni kalup izrađuje se u dvije operacije. Najprije se vrši nasipavanje kalupne mješavine i popunjavanje prostora iznad modela, a zatim sabijanje koje kalupu daje potrebna mehanička svojstva. Sabijanje je operacija koja zahtijeva veliki mehanički rad i zato se obavlja pomoću kalupilice. Meki kalupi uglavnom služe za lijevanje manjih i srednjih odljevaka, i kod serijske i masovne proizvodnje, a zbog upotrebe kalupilice i automatizacije procesa zahtijevaju kvalitetne modele, obično izrađene od metala. Lijev u jednokratne kalupe često se naziva i lijev u pijesak [3].

2.2.2 Lijevanje u stalne kalupe

Kod lijevanja u stalne kalupe, kalup se sastoji od dva ili više dijelova koji se koriste za izradu velike količine istih oblika. Rastaljeni materijal popunjava kalup pomoću gravitacijske sile. Jezgre koje je moguće jednostavno ukloniti iz odljevka se obično izrađuju od metala, ali kompleksnije jezgre se izrađuju od pijeska ili gipsa [4].

Stalni kalupi se izrađuju od izdržljivih metalnih materijala otpornih na toplinu, obično sivog lijeva i posebnog čelika koji su prošli specifičnu toplinsku obradu. Metalni kalupi nazivaju se kokile i koriste se prvenstveno za lijevanje neželjeznih materijala. Zbog svoje visoke cijene izrade troškove obrade treba raspodijeliti na proizvedene odljevke i zato se stalni kalupi koriste za velikoserijsku i masovnu proizvodnju. Sloboda u konstruiranju odljevaka je ograničena jer treba predvidjeti mogućnost vađenja odljevka iz kalupa. Ciklus izrade jednog odljevka znatno je kraći nego kod lijevanje u jednokratne kalupe, jer je veća brzina hlađenja odljevka nego kod pješčanog kalupa. Zbog bržeg hlađenja dobiva se i finija struktura (sitnije zrno) i bolja mehanička svojstva odljevka [1].

3 ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE ZA LIJEVANJE

Čisti aluminij se zbog svojih svojstava kao što su: loša livljivost i niska granica razvlačenja (7-11 MPa), vrlo rijetko koristi, te se obično lijevaju aluminijske legure. Legure na bazi aluminija su među najčešće lijevanim materijalima, jedino se željezni ljevovi lijevaju više od aluminijskih legura. Povećana potražnja za aluminijskim legurama se pojavila rastom automobilske i zrakoplovne industrije. Nove legure su još u razvoju s obzirom na široku mogućnost poboljšanja mehaničkih svojstava koristeći jednostavne, jeftine postupke kao što su legiranje i toplinska obrada. Veliki broj različitih legiranih elemenata može biti dodan aluminiju kao što su: cink, magnezij, bakar, silicij, željezo, mangan, nikal, srebro, litij, kositar i titan. Topljivost ovih elemenata u aluminiju znatno varira. Najčešće korištene aluminijske legure su: aluminij-silicij (Al-Si), aluminij-bakar (Al-Cu) i aluminij-magnezij (Al-Mg) [5].

Lijevanje aluminija je imalo ključnu ulogu u razvoju industrije proizvodnje i prerade aluminija od njenih početaka u kasnom 19. stoljeću. Prvi komercijalni aluminijski proizvodi su bili odljevci, kao što su posude za kuhanje i dekorativni dijelovi. Razvoj legure i karakterizacija fizikalnih i mehaničkih karakteristika su postavili temelje za razvoj novih proizvoda u godinama koje su slijedile. Tehnologija taljenja metala, skrućivanja te razvoj svojstava su znatno unaprijeđeni kako bi olakšali lijevačima mogućnost ekonomične i pouzdane proizvodnje dijelova koji zadovoljavaju specifične zahtjeve [4].

Danas postoje stotine različitih aluminijskih legura koje se proizvode svim komercijalnim lijevačkim procesima uključujući lijevanje u pješčane kalupe, stalne kalupe, kalupe od gipsa, precizni lijev, lijevanje u pune kalupe i drugo [4].

Najvažnije lijevačke legure aluminija temelje se na Al-Si sustavu i one sudjeluju sa 85-90 % u ukupnoj proizvodnji Al-odljevaka. Prednosti ovih legura su vrlo dobra livljivost, zavarljivost, otpornost prema koroziji i trošenju te rezljivost. Na mehanička svojstva ovih legura jako utječu nečistoće koje su uvijek prisutne u tehničkom materijalu, a s upotrebom recikliranog aluminija se još dodatno akumuliraju [6].

3.1 Aluminij (Al)

Čisti aluminij (slika 3.1) je mekan, relativno krt, srebrno-bijeli i metal. Lagan je, i može ga se lako oblikovati, gustoća mu je dvije trećine manja nego kod čelika, bakra ili mjedi. Dobar je vodič električne struje i topline, te je izrazito otporan na koroziju [7].

Tablica 3.1. Osnovna svojstva čistog aluminija [1]

| SVOJSTVA ALUMINIJA | |
|--|----------|
| Talište (°C) | 660 |
| Gustoća (kg/dm ³) | 2,7 |
| Vlačna čvrstoća (N/mm ²) | 50...150 |
| Tvrdoća (HB) | 20...35 |
| Modul elastičnosti (kN/mm ²) | 690 |
| Istezljivost (%) | 50...4 |

Aluminij je treći najrasprostranjeniji element na zemlji, čini 8% mase zemljine kore. Površina aluminija može biti izrazito reflektirajuća što omogućuje širok raspon u dekorativnoj i funkcionalnoj primjeni npr. žica, skulpture i drugo [8].

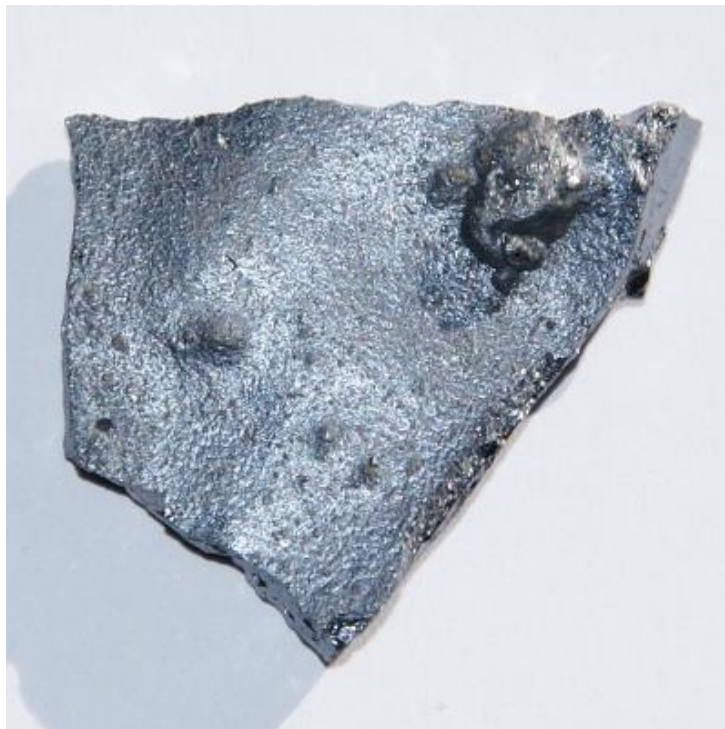


Slika 3.1. Čisti aluminij [9]

3.2 Silicij (Si)

Silicij (lat. Silex=tvrd kamen) je prijelazni metal, znatno manje reaktivan od ugljika, te je drugi najzastupljeniji element na Zemlji (25,7% zemljine mase) iza kisika. Silicij je kemijski otporan, netopljiv u kiselinama, ali polako topljiv u jakim lužinama. Ima visoko talište i vrelište te je tvrd i krt. Čisti silicij je prikazan na slici 3.2.

Talište silicija je 1414°C gustoća mu je 2,33 kg/cm³. Primjena silicija se može podijeliti u dvije grupe: metalurška i poluvodička. Metalurški silicij se dobiva reakcijom u elektrolučnoj peći te sadrži približno 98% Si. Nečistoće koje sadrži uključuju aluminij, kalcij i željezo. Metalurški silicij se primarno koristi u kombinaciji s aluminijem i čelikom [8].

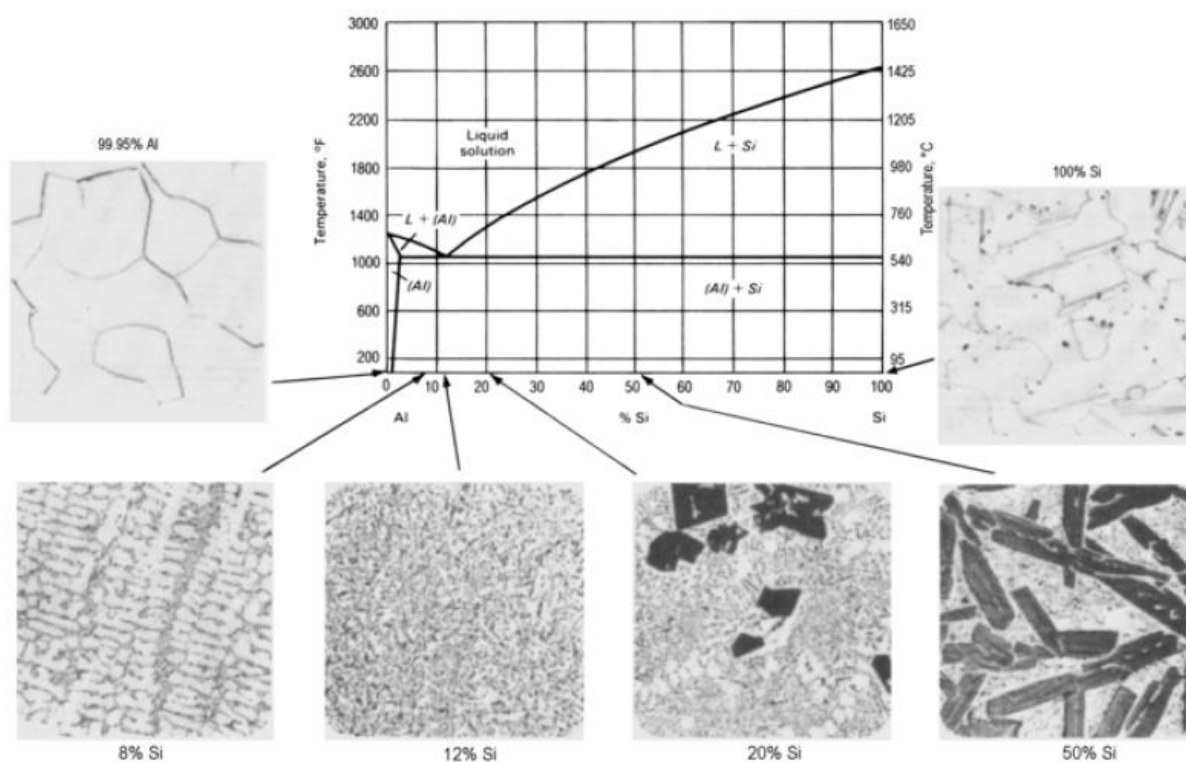


Slika 3.2. Čisti silicij [9]

3.3 Al-Si legure

Kod Al-Si legura silicij je osnovni element koji doprinosi dobroj livljivosti Al-legura, zato su to najrasprostranjenije legure u grupi lijevanih aluminijskih legura, posebno one s 10% i 13% Si. Osim livljivosti, silicij u Al-Si legurama poboljšava i otpornost prema nastajanju toplih pukotina te svojstva napajanja odljevka. Al-Si legure mogu se upotrebljavati kao čiste binarne legure koje imaju izvrsnu livljivost i otpornost prema koroziji, no zbog slabijih mehaničkih svojstava, prije svega male čvrstoće, te slabe strojne obradivosti, ovim se legurama često dodaju i drugi legirni elementi (najčešće Mg, Cu, Fe) [1].

S obzirom na udio silicija u Al-Si legurama, razlikujemo podeutektičke legure (<12% Si), eutektičke legure (12-13% Si) te nadeutektičke legure (15-24% Si) [1]. Promjenom udjela silicija mijenja se i mikrostruktura legure što je vidljivo na slici 3.3.



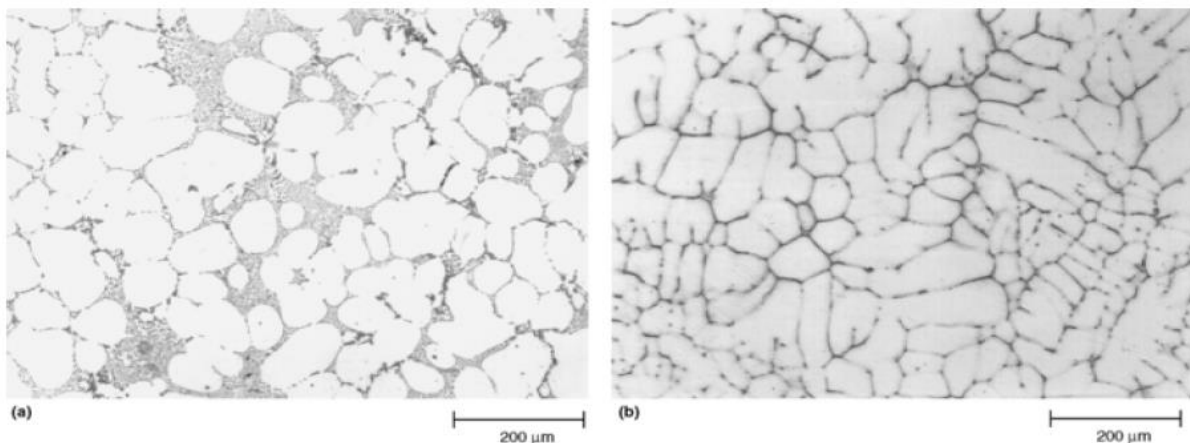
Slika 3.3. Mikrostruktura Al-Si legure s obzirom na udio Si [5]

Primjena aluminijske legure za automobilske dijelove poput klipova, košuljica cilindara, blokova motora i različitih dijelova toplinskih strojeva važna je zbog njihove otpornosti na trošenje, toplinske otpornosti i malog toplinskog rastezanja [10].

3.3.1 Podeutektičke legure

Najčešće se primjenjuju podeutektičke legure sa 7-11 % Si koje su pogodne za izradu dijelova namijenjenih za rad na povišenim temperaturama. Ostali se legirni elementi kao što su bakar i magnezij koji povećavaju čvrstoću pri sobnoj temperaturi, nikal i bakar koji povećavaju čvrstoću na sobnoj i povišenoj temperaturi, male količine nikla i željeza koji povećavaju čvrstoću pri sobnoj i povišenoj temperaturi bez smanjenja žilavosti, dodaju ovisno o zahtijevanim mehaničkim svojstvima. Ovakve legure moguće je dodatno poboljšati modifikacijom eutektika ili usitnjavanjem zrna [11].

Kao što je prikazano na slici 3.4 podeutektičke aluminijske legure imaju mrežnu građu sekundarne faze (siva boja na slici) koja okružuje zrna aluminijske otopine (svijetlije na slici) [5].



Slika 3.4. Prikaz mrežne sekundarne faze kod dvije podeutektičke legure [5]

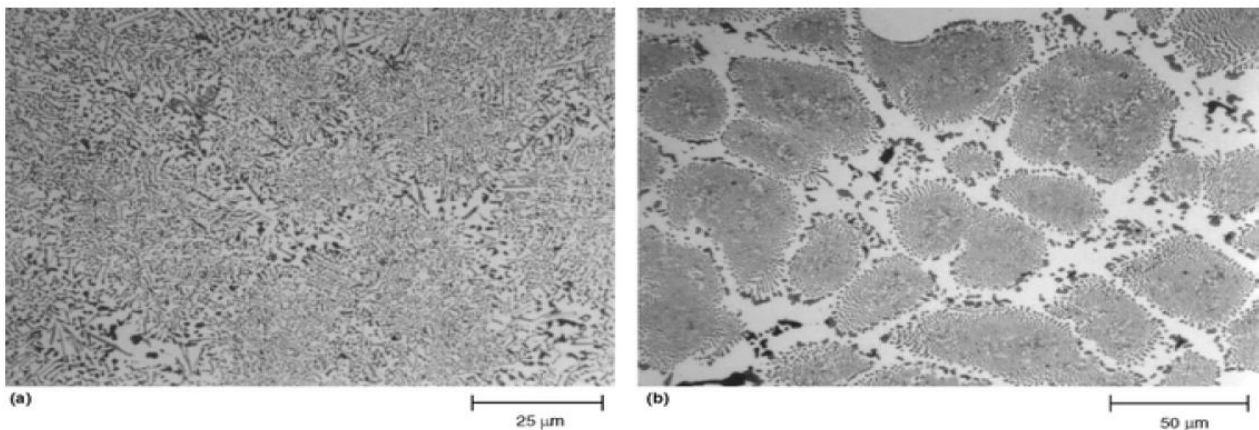
Mikrostruktura podeutektičke legure sastoji se od primarno izlučenog α_{Al} i eutektika ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) [12].

Binarne podeutektičke legure se vrlo rijetko primjenjuju. Uglavnom se legiraju i drugim elementima pa im se i mikrostruktura mijenja. Tako ne postoje samo primarni dendriti aluminijske faze (α_{Al}) i eutektik ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$), nego se prilikom skrućivanja javljaju i drugi intermetalni spojevi i faze. Osim toga, i nečistoće utječu na složenost procesa skrućivanja [11].

3.3.2 Eutektičke legure

Legirane eutektičke Al-Si legure se primjenjuju za proizvodnju dijelova namijenjenih za rad pri povišenim temperaturama, posebice u automobilske industriji za izradu klipova i ventila. Legure za izradu klipova moraju podnositi temperature više i od $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ te toplinski umor između sobne temperature i $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Moraju imati visoku toplinsku vodljivost, povišenu čvrstoću te toplinsku stabilnost [11].

Eutektička se legura sastoji od čistog eutektika ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) [12]. Za razliku od podeutektičkih legura kod eutektičkih legura sekundarna faza može imati mješovitu građu, mrežastu i raspršenu što je vidljivo na slici 3.5 [5].



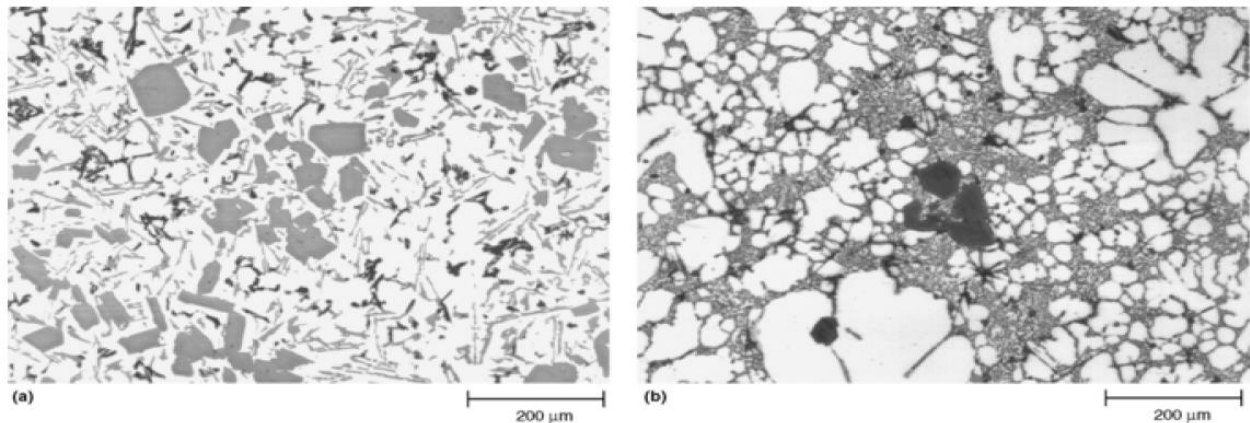
Slika 3.5. Prikaz raspršene i mrežaste građe sekundarne faze kod dvije eutektičke legure [5]

Samo malim dodatkom nikla utječe se na povećanje čvrstoće i modul elastičnosti, pogotovo za rad pri povišenim temperaturama. Ukoliko se takvoj leguri doda i željezo (Fe), učinak nikla postaje još veći [11].

3.3.3 Nadeutektičke legure

Al-Si legure s više od 12 mas. % silicija imaju nadeutektičku mikrostrukturu koja se najčešće sastoji od primarne silicijske faze β_{Si} u eutektičkoj metalnoj osnovi ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$). Ove se legure obično primjenjuju za blokove motora ili košuljice cilindara i idealno su rješenje da zamjene odljevke od željeznih ljevova pri proizvodnji monolitnih blokova motora [10,12].

Kao i kod eutektičkih legura kod nadeutektičkih legura sekundarna faza može imati mješovitu građu, mrežastu i raspršenu što je vidljivo na slici 3.6 [5].



Slika 3.6. Prikaz raspršene i mrežaste građe sekundarne faze kod dvije nadeutektičke legure [5]

Nadeutektičke Al-Si legure za rad pri povišenim temperaturama najčešće se legiraju magnezijem (Mg), bakrom (Cu) i željezom (Fe). Ovisno o željenim svojstvima određuje se njihov udio u leguri [11].

Obzirom na sve veće zahtjeve za legurama s većom otpornošću na trošenje te većim modulom elastičnosti, sve se više proučavaju i ispituju nadeutektičke Al-Si legure. Zaključeno je da je moguće poboljšati i ostala mehanička svojstva, kao što su duktilnost i čvrstoća. Povećanim udjelom silicija (preko 14 %) moguće je povećati modul elastičnosti te sniziti koeficijent toplinskog rastezanja [11].

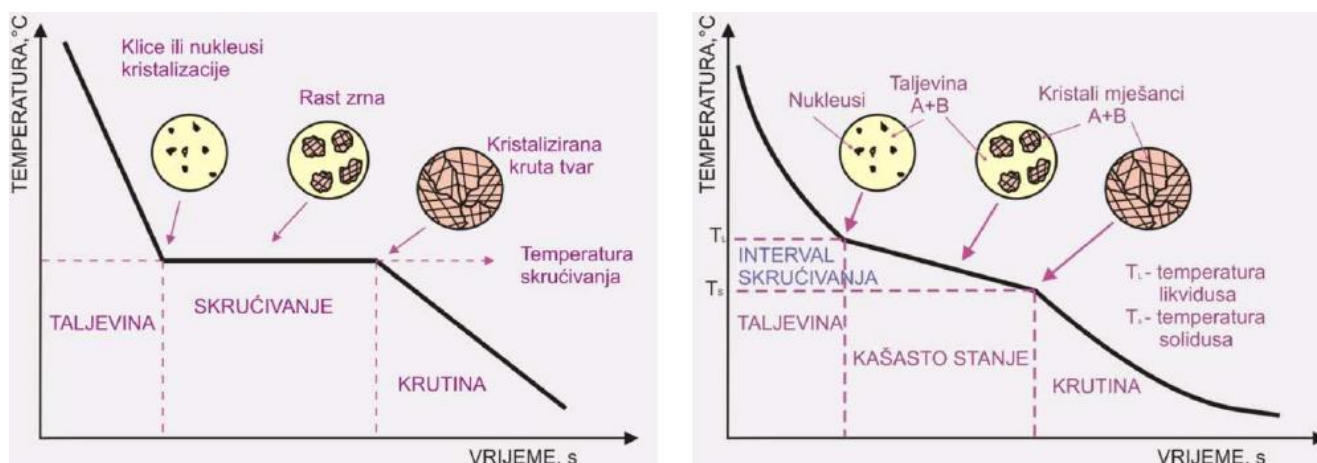
4 PROCES SKRUĆIVANJA

Proces skrućivanja metala ima važnu ulogu u određivanju tehnologije lijevanja i definiranju svojstava gotovog odljevka. Tijekom skrućivanja, rastaljeni metal prelazi u krutu fazu tvorbom kristala. Odljevak se sastoji od mnoštva kristalnih zrna međusobno odvojenih granicama zrna. Izuzetak je odljevak od monokristala, gdje se rast omogućava samo jednom zrnju [1].

Do skrućivanja metala ili legura može doći kada su ispunjeni slijedeći uvjeti:

- pothlađenost taline
- prisustvo klica
- odvođenje topline iz sustava

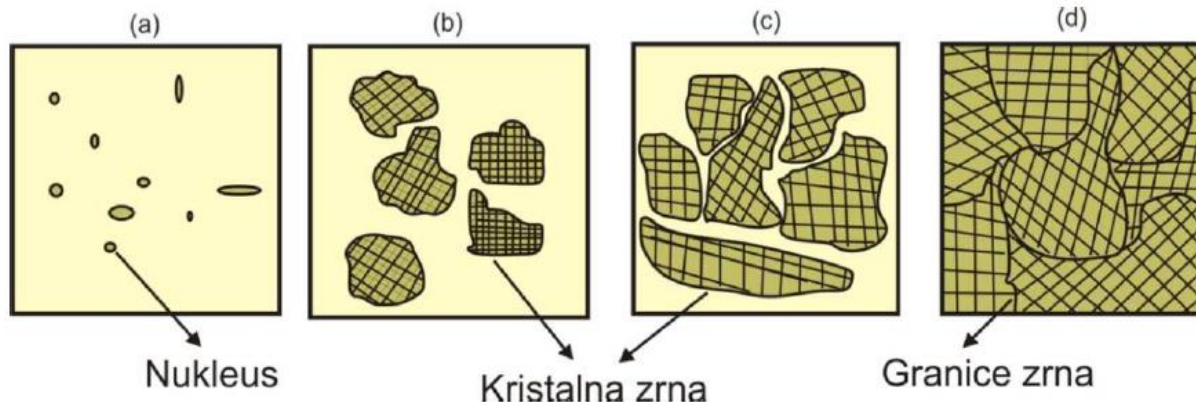
Prijelaz iz kapljevito u kruto stanje popraćen je oslobađanjem latentne topline skrućivanja. Latentna toplina skrućivanja je količina topline koja se oslobodi kada tvar, odnosno taljevina promjeni svoje agregatno stanje iz kapljevito u kruto pri konstantnoj temperaturi. Brzina skrućivanja proporcionalna je brzini odvođenja topline. Na slici 4.1 prikazana je krivulja hlađenja i skrućivanja čistog metala i binarne legure [13].



Slika 4.1. Shematski prikaz krivulja hlađenja i skrućivanja: a) čistog metala, b) binarne legure [13]

Na slici 4.1 je uočljiv zastoj na krivulji hlađenja u oba slučaja. Zastoj predstavlja latentnu toplinu skrućivanja. Zastoj u slučaju b) je manji, a razlog tome je što se skrućivanje binarnih legura odvija u temperaturnom intervalu između T_L i T_S , dok kod skrućivanja čistih metala, skrućivanje započinje i završava na istoj temperaturi.

Na slici 4.2 prikazan je tijek skrućivanja. Uočava se da prvo u taljevini slučajno nastaju klice iz kojih se onda razvijaju kristalna zrna. Ta kristalna zrna postaju sve veća dok se ne sudare i jedna drugima ne onemoguće daljnji rast. Kada se sudare, različito orijentirana kristalna zrna (orijentacija ovisi o smjeru odvođenja topline i o kristalnoj strukturi metala) vežu se jedna na druge, a između njih se javljaju nepravilne granične površine koje se nazivaju granicama zrna. Proces skrućivanja završen je kada nestane taljevine. Veličina, oblik i položaj kristalnih zrna nastalih tijekom skrućivanja čini mikrostrukturu odljevka. [1].



Slika 4.2. Shematski prikaz skrućivanja metala [1]

- a) nukleacija kristala u taljevini metala
- b) i c) rast kristala s napredovanjem skrućivanja
- d) skrućivanje je završeno (vide se pojedine granice zrna)

4.1 Nukleacija

Nukleacija je nastanak nove faze u taljevini, odnosno proces nastajanja klica. Nukleacija se dijeli na:

- homogenu nukleaciju
- heterogenu nukleaciju
- dinamičku nukleaciju

Homogena nukleacija je nastanak klica kod čistih metala. U realnim uvjetima skrućivanja ne dolazi do homogene nukleacije, zbog prisustva stranih čestica u taljevini i stjenki kalupa [13,14].

Heterogena nukleacija odvija se u realnim uvjetima pri skrućivanju metala i legura uz vrlo malo pothlađenje. Nukleacija se odvija uz prisustvo stranih čestica, a to su uključci, nečistoće, oksidni filmovi i stjenke kalupa. Strane čestice već imaju neku postojeću graničnu površinu, te se na taj način smanjuje energetska barijera koju treba prevladati da bi nastala klica. U industrijskoj praksi heterogena nukleacija potpomaže se dodatkom sredstava za usitnjavanje zrna u taljevinu [13,14].

Dinamička nukleacija je poseban primjer heterogene nukleacije, gdje je nukleacija olakšana u pothlađenim taljevinama kavitacijom odnosno mehaničkim utjecajima [13,14].

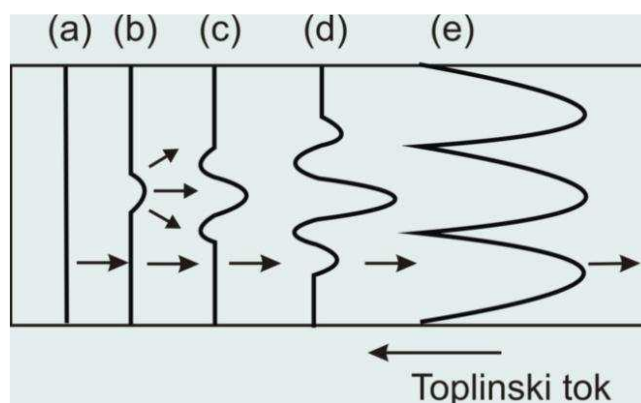
4.2 Rast kristala

Daljnijim odvođenjem topline, nakon što je započeo proces nukleacije, dolazi do rasta kristala. Ovaj stadij skrućivanja traje sve dok ne nestane taljevine. Nukleus raste i stvara kristale. Rast kristala ovisi o kristalnoj rešetki koja nastaje na međufaznoj granici kruto/tekuće i o temperaturi. Najveći utjecaj na brzinu rasta kristala ima temperatura [13,14].

4.2.1 Razvoj dendritne mikrostrukture

Skrućivanje pri kojem nastaju ćelijaste i ćelijasto-dendritne strukture imaju brzinu hlađenja veću od kritične, te im front skrućivanja nije ravan. Pretpostavlja se da ćelije i dendriti nastaju zbog konstitucijskog pothlađenja. Konstitucijsko pothlađenje je u taljevini pokretačka snaga stvaranja prve stabilne izbočine. Do konstitucijskog pothlađenja dolazi zbog djelovanja kemijskog sastava ili konstitucije legure, a uzrokuje nestabilnost ravnog fronta i stvaranje stabilnih izbočina na frontu koje se ne mogu rastaliti u taljevini (temperatura izbočina je manja od likvidus temperature) [13,14].

Slika 4.3 prikazuje nastanak ćelijaste strukture. Smanjenjem temperaturnog gradijenta ispod kritične vrijednosti ispred početne granične površine, dolazi do nastanka ćelijaste strukture [13,14].

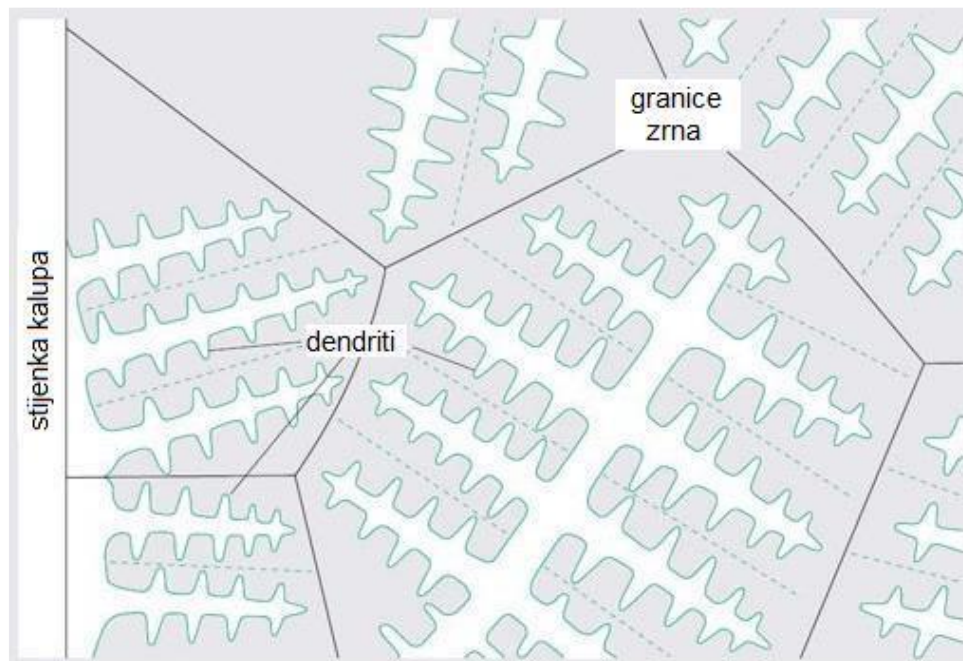


Slika 4.3. Shematski prikaz probijanja početnog ravnog fronta u ćelije [13].

Prva izbočina nastaje bočnim odbacivanjem otopljene komponente i njenim gomilanjem u korijenu izbočine (b). Nastanak izbočine uzrokuje smanjenje temperature skrućivanja i stvaranje udubina (c). Nastale udubine stvaraju druge izbočine (d). Izbočine se razvijaju u druge grane ili ćelije (e). Rast ćelija i grana je suprotan od smjera odvođenja topline [13,14].

Dendriti su razgranate kristalne tvorevine, koje omogućavaju djelotvorniji odvod topline i povećavaju brzinu skrućivanja. Kada brzina granične površine premaši ćelijasto-

dendritni režim nastaje dendritna struktura. Dendriti koji sporo rastu, jako se granaju. Ako se talina brzo hladi dendriti brže rastu, te se dobiju finije grane. Shematski prikaz grananja dendrita vidljiv je na slici 4.4 [13,14].



Slika 4.4. Shematski prikaz grananja dendrita [14]

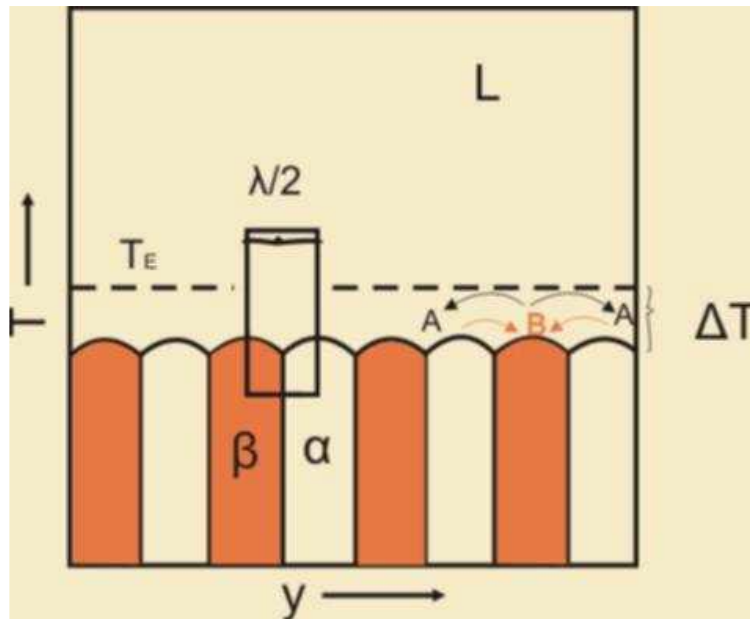
4.2.2 Razvoj eutektičke mikrostrukture

Aluminijske legure se skrućuju eutektičkim načinom. Proces eutektičkog skrućivanja se sastoji od: stvaranja klica iz dijela taljevine eutektičkog sastava, te razvitka kristala na tim klicama koji dalje rastu, izlučivanja jedne od krutih faza na granici taljevina/kristal, a potom druge krute faze. Eutektičko skrućivanje započinje na mjestu dodira dva rastuća kristala [13,14].

Eutektik je smjesa sastavljena od dvije ili više faza koje imaju niže talište od svake čiste komponente. Eutektička točka najniža je temperatura na kojoj eutektička faza može postojati u tekućem stanju i u njoj je sastav taljevine i krute faze jednak. Mogu se podijeliti na pravilne eutektike te nepravilne i kompleksne pravilne eutektike [13,14].

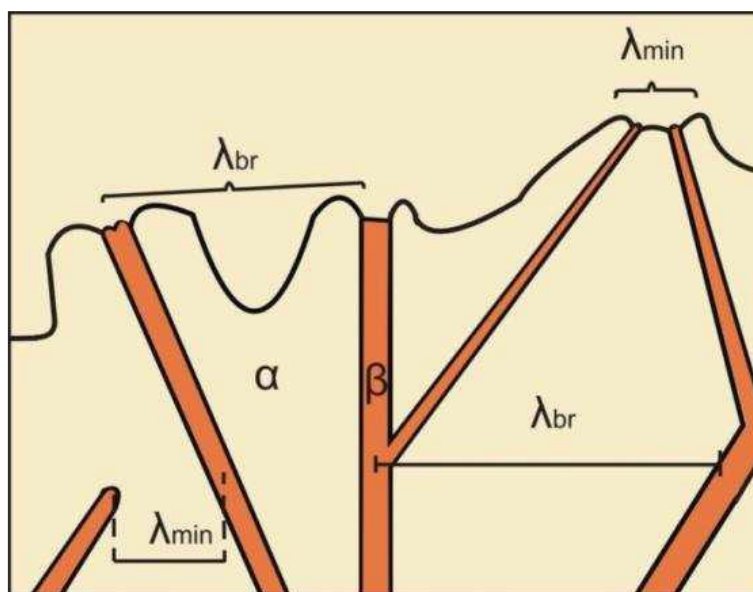
Pravilna morfologija pravilnih eutektika (slika 4.5) proizlazi iz činjenice da su obje faze nefasetirane, odnosno granična površina kruto/tekuće u atomskom mjerilu je hrapava.

Lamele obju faza (α i β) tijekom skrućivanja rastu u smjeru odvođenja topline i okomite su na graničnu površinu kruto/tekuće [13,14].



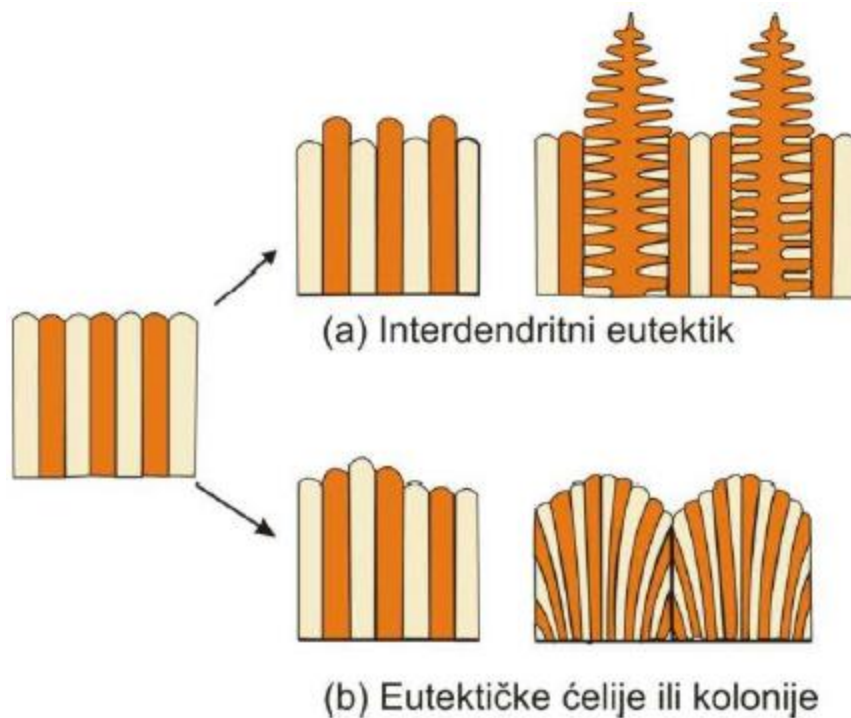
Slika 4.5. Shematski prikaz morfologije pravilnog eutektika [5]

Nepravilna morfologija nepravilnih eutektika uzrokovana je rastom fasetirane faze, koja ima glatku graničnu površinu kruto/tekuće, u smjeru koji je određen specifičnom orijentacijom slaganja atoma, tako da dolazi do niza različitih lamelarnih razmaka. Ako dvije lamele konvergiraju jedna od njih prestaje rasti, a lamele koje divergiraju kada dosegnu kritični lamelarni razmak prestaju rasti [13,14].



Slika 4.6. Shematski prikaz morfologije nepravilnog eutektika [5]

U realnim višekomponentnim tehničkim legurama, prisutni su i brojni legirajući elementi koji mijenjaju morfologiju eutektika, odnosno granična površina kruto/tekuće postaje nestabilna. U tom slučaju nastaje morfologija koja se sastoji od dendrita i eutektika. Tu pojavu nazivamo konkurentni rast dendrita i eutektika, što je vidljivo na slici 4.7 [13,14].



Slika 4.7. Shematski prikaz tipova nestabilnosti planarne eutektičke granične površine kruto/tekuće [5]

- a) nestabilnost jedne faze rezultira nastajanjem dendrita jedne faze i interdendritnog eutektika
- b) nestabilnost dviju faza rezultira nastajanjem eutektičkih ćelija ili kolonija u prisustvu trećeg legirajućeg elementa

5 MODIFIKACIJA EUTEKTIKA

Modifikacija eutektika Al-Si legure je proces tretiranja metala u kapljevitom stanju koji dovodi do formiranja finih kristalnih zrna što rezultira poboljšanjem mehaničkih svojstava odljevka [15].

Al-Si legure se mogu modificirati brzim hlađenjem ili dodavanjem kemijskih elemenata kao što su: natrij, stroncij, antimon i cerij.

Lijevana ili primarna struktura određuje mehanička svojstva lijeva. Stoga za dani kemijski sastav postoji mogućnost optimalizacije veličine zrna, eutektičke strukture i veličine i raspodjele međumetalnih čestica, što određuje svojstva odljevaka. Postizanje optimalne kombinacije mehaničkih svojstava odljevaka za određenu vrstu lijevanja zahtjeva poznavanje mehanizama modifikacije te kontrolu neželjenih pratećih djelovanja modifikacije [2,4].

Modificiranjem eutektičke strukture poboljšavaju se mehanička svojstva legure. Ovisno o stupnju nukleacije i promjene oblika eutektičkog silicija, mikrostrukturni konstituenti Si mogu poprimiti različite morfologije. Te su morfologije silicija grupirane u šest razreda: pločice Si, igličasti (acikularni) Si, lamelarna, djelomično modificirana ili fina struktura Si i vlaknasta mreža Si [16].

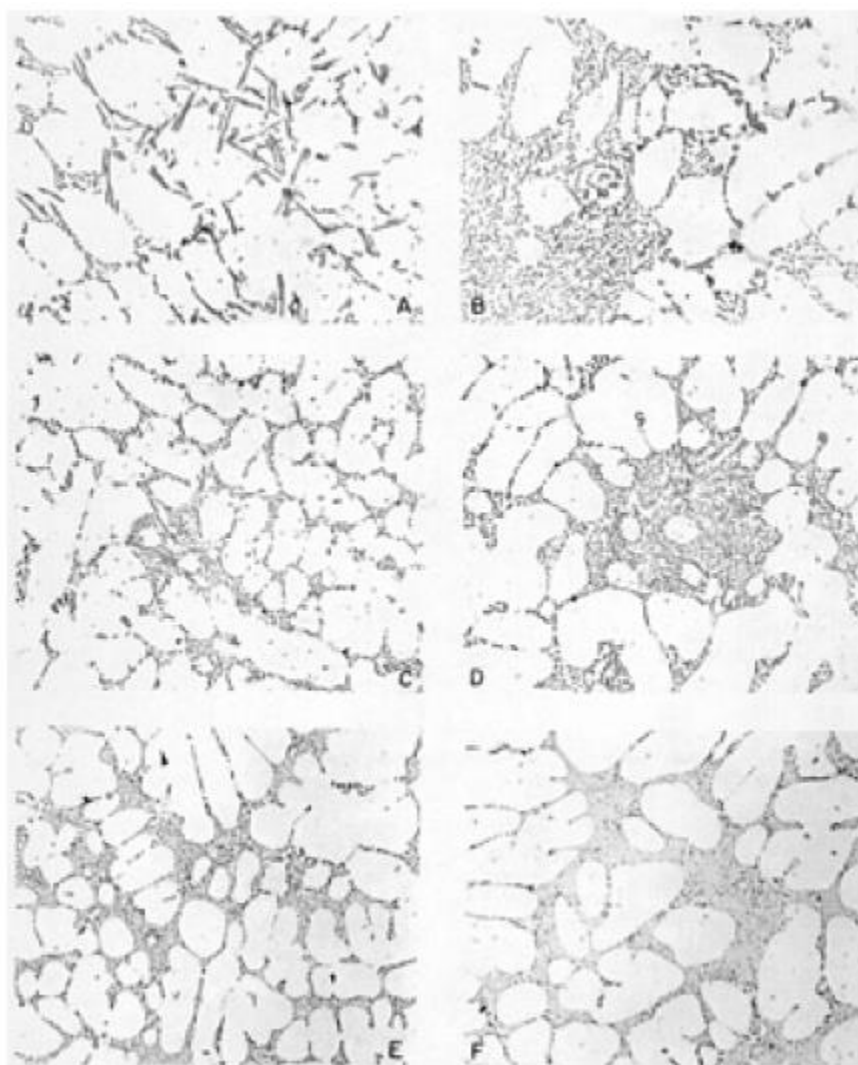
Modificiranjem se prvenstveno povećava žilavost odljevka. Budući da su konstituenti legure manji i jednolično disperzirani, poboljšava se i mehanička obradivost, te vrijeme za toplinsku obradu odljevka može biti znatno kraće. I dinamička je izdržljivost lijevanih dijelova veća, a u mnogo je slučajeva veća i granica tečenja i vlačna čvrstoća [16].

5.1 Kemijski modifikatori

Radi promjene oblika silicijske faze u zaobljeniji oblik, koji je također mnogo koherentniji s metalnom aluminijskom osnovom, dodaju se ciljano u taljevinu kemijski

modifikatori. Ova promjena oblika silicijske faze djeluje na disperziju poroznosti od stezanja pri skrućivanju i značajno poboljšava mehanička svojstva kao i strojnu obradivost legure. Elementi kao što su natrij, kalcij, stroncij i antimon upotrebljavaju se danas za modifikaciju silicijske faze kod podeutektičkih legura, a fosfor za sitnije silicijske faze kod nadeutektičkih legura [2,4].

Modifikacija eutektičke faze kod podeutektičkih i eutektičkih aluminijsko silicijskih legura, dopušta optimalnu kombinaciju čvrstoće i produljenja. Nedovoljna ili prekomjerna modifikacija rezultira promjenom mikrostrukture, što je vidljivo na slici 5.1 te slabljenjem mehaničkih svojstava što je vidljivo u tablici 5.1 [2,4].



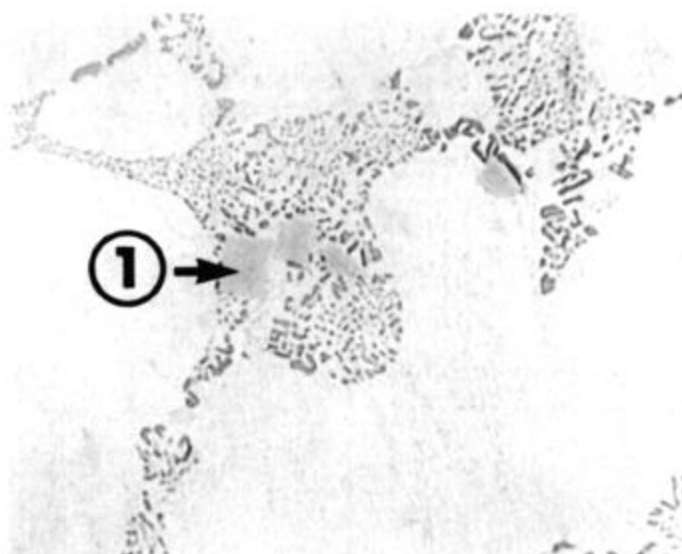
Slika 5.1. Različiti stupnjevi modifikacije Al-Si eutektika: od potpuno nemodificiranog (A) do dobro modificiranog (F) [17]

Elementi I. i II.a. skupine te rijetke zemlje europij, lantan, cerij, praseodimij i deodimij mogu također modificirati silicijsku fazu, ali samo natrij i stroncij imaju veliku sposobnost modifikacije pri niskim koncentracijama, koje se zahtijevaju pri industrijskoj primjeni [2,4].

Tablica 5.1. Ovisnost vlačnih svojstava Al-Si legure o modifikaciji [2]

| | Vlačna čvrstoća, MPa | Produljenje, % |
|--------------------------------|----------------------|----------------|
| Specifikacija | 160 min. | 5 |
| Nemodificirana legura | 77 | 2 |
| Djelomično modificirana legura | 147 | 4 |
| Potpuno modificirana legura | 188 | 8 |
| Premodificirana legura | 167 | 6 |

Kao što je vidljivo iz tablice 5.1 pretjerano dodavanje modifikacijskog elementa npr. >0,03% Sr (slika 5.2) ili > 0,02% Na u leguru će rezultirati premodifikacijom što dovodi do lošijih mehaničkih svojstava [19].



Slika 5.2. Al_4SrSi_2 faza uzrokovana pretjeranim dodavanjem Sr u A356 leguru [19]

Tablica 5.2. Svojstva elemenata koji se upotrebljavaju kao modifikatori silicija u Al-Si legurama [2]

| ELEMENT | Odnos atomskih radijusa u odnosu na Si atomski radijus | Temperatura taljenja, K | Tlak para kod 1000K, Pa | Slobodna energija stvaranja oksida kod 1000 K, kJ/mol |
|-------------------------|--|-------------------------|-------------------------|---|
| BARIJ ⁽¹⁾ | 1,85 | 998 | 5,07 | -482 |
| KALCIJ ⁽²⁾ | 1,68 | 1112 | 26,3 | -509 |
| STRONCIJ ⁽³⁾ | 1,84 | 1042 | 101,3 | -480 |
| NATRIJ ⁽⁴⁾ | 1,58 | 371 | 2×10^4 | -367 |
| CERIJ ⁽⁵⁾ | 1,56 | 1071 | 10^{-11} | -497 |
| ALUMINIJ | 1,22 | 933 | $5,4 \times 10^{-6}$ | -457 |
| SILICIJ | 1,00 | 1683 | $9,0 \times 10^{-11}$ | -354 |

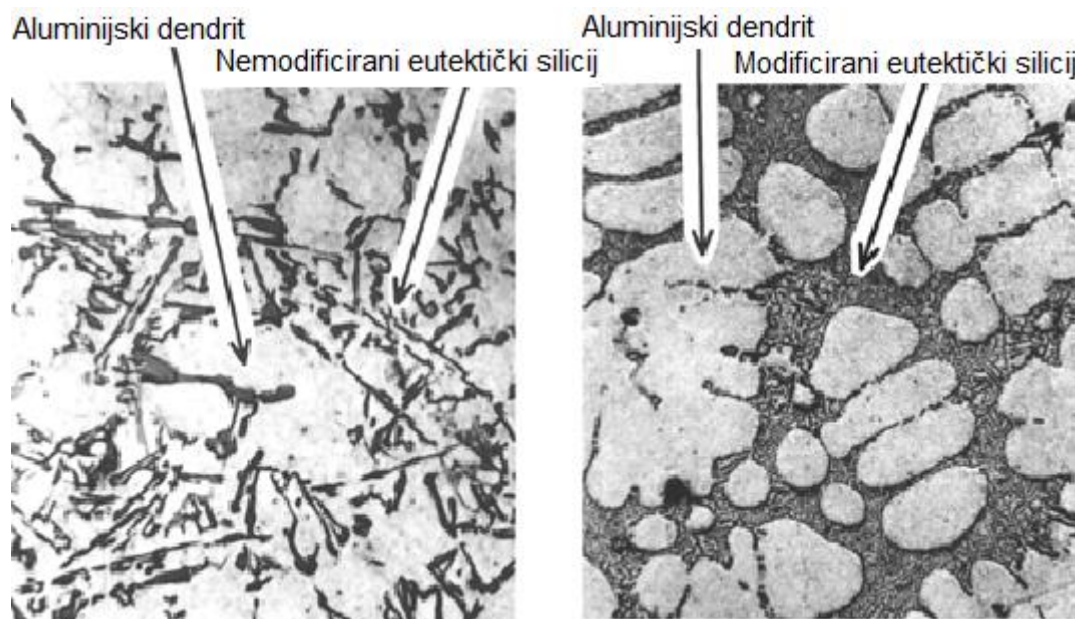
- (1) osrednja moć modifikacije
- (2) slabo modifikacijsko djelovanje
- (3) osrednja moć modifikacije; optimalni dodatak: 0,1-0,2 %. Dobra otpornost na slabljenje djelovanja; polutrajno djelovanje; lakše skladištenje i održavanje od natrija; premodificiranje nije tako ozbiljan problem kao kod natrija, ali može povećati poroznost
- (4) vrlo jak modifikator kod 0,1 % dodatka. Brzo se otapa; zbog isparavanja brzo gubi moć djelovanja, otežano skladištenje i održavanje; teška kontrola dodavanja može dovesti do premodificiranja; može povećati poroznost
- (5) može se pogodno dodati kao mišmetal. Treba i više od 60 minuta za otapanje.

Iz tablice 5.2 je vidljivo da osim veličine atoma na djelotvornost modifikatora utječu i drugi faktori. Niska temperatura taljenja i visok tlak para pospješuju brzo raspršivanje modifikatora u taljevini, ali će visok tlak para pospješiti slabljenje djelovanja modifikatora zbog evaporacije. Gubitak oksidacijom predstavlja problem kod modifikatora koji imaju slobodnu energiju stvaranja oksidnih spojeva veću od aluminija [2,4].

5.1.1 Modifikacija natrijem

Prvi modifikatori podeutektičkih legura bili su na osnovi Na i do danas se stalno rabe. Natrij se obično dodaje ili kao metalni Na ili u kapsuli od aluminijske folije. Zbog velike reaktivnosti i male topljivosti, iskoristivost Na je svega 20 %. Djelovanje Na u procesu s vremenom postupno slabi, te ga je teško nadzirati [18].

Niska topljivost u krutom stanju i široko područje netopljivosti koje ima mono-eutektičku točku kod vrlo niske koncentracije modifikatora, kao u sustavu Al-Na, uzrokovat će veliko povećanje koncentracije modifikatora na fronti rasta i snažno modifikacijsko djelovanje. Stoga se natrij brzo otapa i raspršuje u taljevini bez oksidacije, ali brzo gubi djelotvornost (<20 min), premda unutar tog vremenskog raspona osigurava značajan modifikacijski učinak. Modificirana mikrostruktura ima oblik disperznog vlaknastog eutektika (slika 5.3) [2,4].



Slika 5.3. Nemodificirana mikrostrukture (lijevo), mikrostruktura modificirana natrijem (desno) [19]

Dodatak natrija više od 0,02% uzrokuje premodifikaciju povezanu sa stvaranjem spoja AlSiNa i slabljenjem mehaničkih svojstava. Natrij se može često dodavati kao metal u

prethodno odvaganim vakuumiranim aluminijskim konzervama ili u obliku natrijevih spojeva u sredstvima za prekrivanje taljevine [2,4].

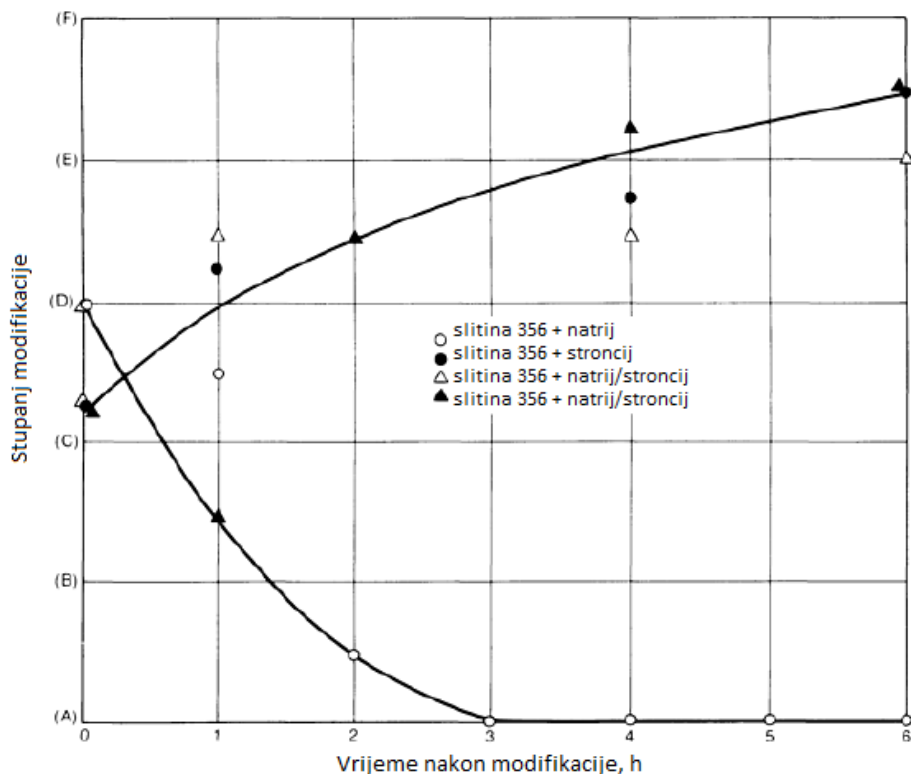
Uvijek kada se rabi modifikacijsko sredstvo, kod aluminijskih legura, postoji opasnost od povišenja sadržaja vodika u taljevini. Upijanje vodika nastaje kada oksidni film na aluminijskoj taljevini pukne i dođe do reakcije s vlagom iz atmosfere. Stoga, da bi se spriječilo upijanje, moraju se modifikatori (i usitnjavala zrna) dodavati sa što manje mogućim uzburkavanjem površine taljevine. Dodatak natrija, čak i kada se brižljivo dodaje uporabom vakuumski pakiranog oblika, uvodi plin u taljevinu. Problem postaje veći pri višim temperaturama taljenja i višim koncentracijama modifikatora [2,4].

5.1.2 Modifikacija stroncijem

Stroncij je modifikator čija uporaba uzrokuje slične rezultate modifikacijskog djelovanja kao i modifikacija natrijem. Najčešće se dodaje u legure u ljevaonicama, ali je moguće i predmodificirati ingot [19].

Stroncij se brzo otapa, te iako neznatno oksidira, ima veću otpornost prema gubitku djelovanja od natrija, proizvodeći permanentnije, ali slabije modifikacijsko djelovanje što je vidljivo na slici 5.4. Kao i kod natrija i kod stroncija modificirana struktura ima oblik disperznog vlaknastog eutektika [2,4].

Stroncij ne pokazuje isto kompleksno premodifikacijsko djelovanje kao natrij, ali neželjeni spojevi tipa Al_4SrSi_2 u legurama A356 koje sadrže više od 0,05% Sr pridonose slabljenju mehaničkih svojstava [2,4].



Slika 5.4. Učinkovitost modifikacije natrijem i stroncijem kao funkcija vremena [4]

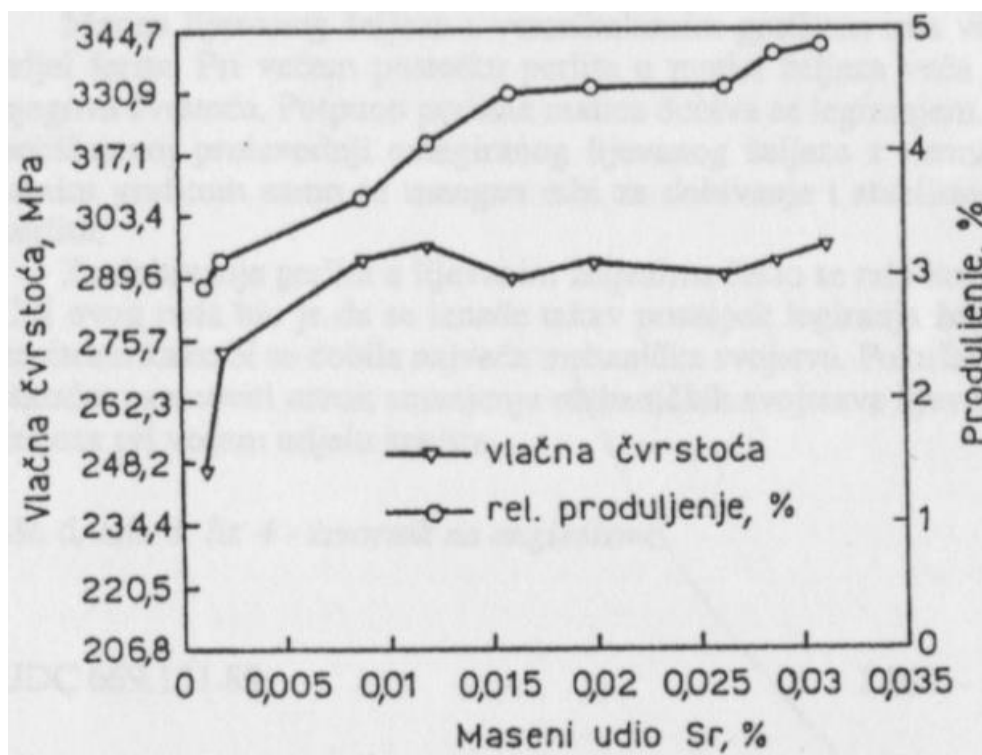
Sa stroncijem nema problema kao s natrijem u skladištenju i rukovanju i on se obično dodaje kao predlegura s niskim sadržajem stroncija, kao što su Al-10Sr ili Al-14Si-10Sr, kao predlegura s visokim sadržajem stroncija (npr. Al-90Sr) ili kao čisti metal. Dodaci metalnog stroncija su manji, otapaju se brže i unose manje željeza u leguru nego dodaci predlegure. Stroncij bi se trebao dodavati u temperaturnom području od 670°C do 720°C u legure A356 (Al-legura s 7% Si i 0,3% Mg). Predlegure s niskim sadržajem stroncija trebale bi se dodavati kod viših temperatura taljenja za brzo otapanje uz veće iskorištenje. Predlegure s visokim sadržajem stroncija trebale bi se dodavati u taljevinu s minimalnim predgrijavanjem [2,4].

Kao i kod natrija predlegure koje sadrže stroncij, izvor su vodika i postoje mnogi pokazatelji da topljivost vodika raste nakon legiranja te su prednosti eutektičke modifikacije do određenog stupnja smanjene upijanjem vodika, povezano sa stvaranjem oksidnog filma i mjehuravosti [2,4].

Na slici 5.5 prikazan je utjecaj stroncija na vlačnu čvrstoću i produljenje za leguru 319 (Al-legura sa 6% Si i 3,5% Cu) toplinski obrađenu po režimu T6 (termički obrađena u kupki, a zatim umjetno starena). Vidljivo da je vlačna čvrstoća bitno povećana do razine udjela Sr od oko 0,01 %. Dalje modificiranje s većim udjelom Sr neznatno povećava vlačnu čvrstoću, dok se produljenje konstantno povećava [16].

Tablica 5.3. Usporedba modifikatora Al-Sr i Na [18]

| | Al-Sr predlegura | metalni Na |
|----------------------|-----------------------|--|
| Iskoristivost | Visoka i ustaljena | Mala, promjenjiva i zavisna od radnika |
| Vrijeme otapanja | 10...20 minuta | Trenutno |
| Djelovanje | Dugo (više od 2 sata) | Kratko (20...40 minuta) |
| Pojave pri dodavanju | Nema ih | Pare i nagrizanje vatrostalne obloge |
| Premodificiranje | Malo vjerojatno | Moguće zbog teškoće nadzora |



Slika 5.5. Utjecaj udjela Sr na vlačnu čvrstoću i produljenje za leguru 319 pri toplinskoj obradi po režimu T6 [16]

5.1.3 Modifikacija antimonom

Antimon je modifikator koji se koristi za trajno modificiranje podeutektičkih aluminijskih legura. Zbog svoje toksičnosti i reaktivnosti s vodikom može doći do stvaranja stibina (SbH_3) te ga se ne bi trebalo dodavati u ljevaonici [19].

Antimon se preporučuje kao trajno sredstvo za postizanje modificirane strukture. Modificirana struktura ima oblik igličastog eutektika, za razliku od disperznog vlaknastog eutektika, koji se dobiva pri modificiranju natrijem i stroncijem. Kao rezultat toga postignuta mehanička svojstva nisu na razini legura obrađenih natrijem i stroncijem. Antimon nije kompatibilan s drugim modifikacijskim elementima jer u njihovoj prisutnosti nastaju grubi međumetalni spojevi koji sprječavaju modifikaciju strukture [2,4].

U ljevarskoj industriji antimon se, međutim, rijetko rabi za modificiranje zbog opasnosti od mogućeg razvijanja otrovnog plina (SbH_3). I svaka ponovna uporaba modificiranog otpada mora se uraditi s velikom pažnjom glede prisutnog Sb [18].

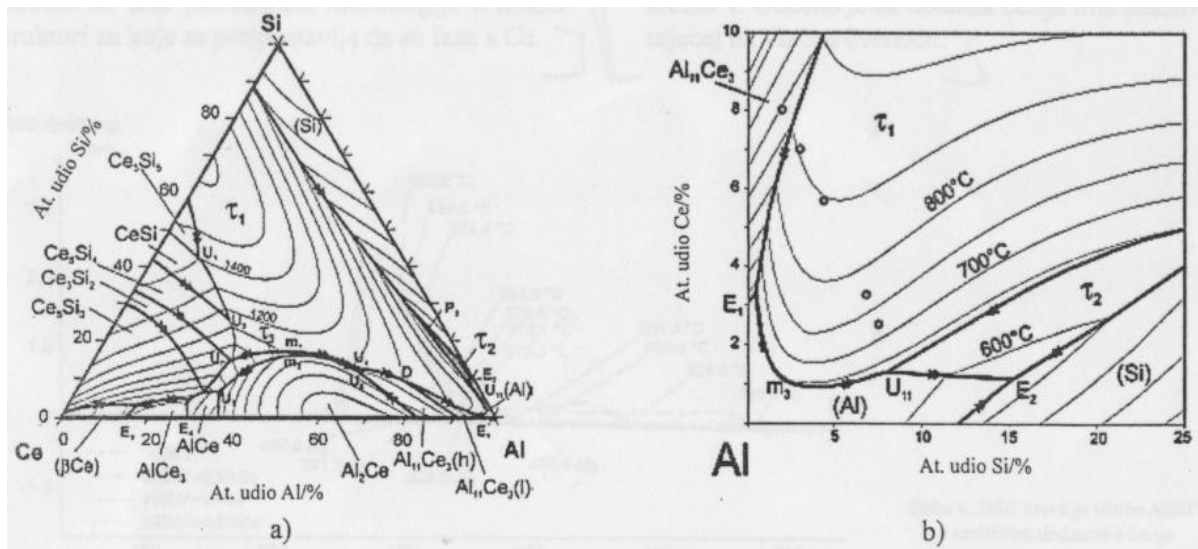
Za razliku od natrija i stroncija prednost usitnjavanja eutektika antimonom je u tome što se stvaranje mjehuravosti može ublažiti ispiranjem inertnim plinom ili smjesom inertnog plina i klorida, postižući nisku koncentraciju vodika bez gubitka antimona [2,4].

5.1.4 Modifikacija cerijem

Cerij se može pogodno dodati kao mišmetal, te zahtjeva i više od 60 minuta za otapanje. Ima veliku otpornost prema slabljenju djelovanja, modifikacijski efekt mu se povećava sve do 2 % dodatka, te smanjuje razmak između dendritnih grana u podeutektičkim legurama [2,4].

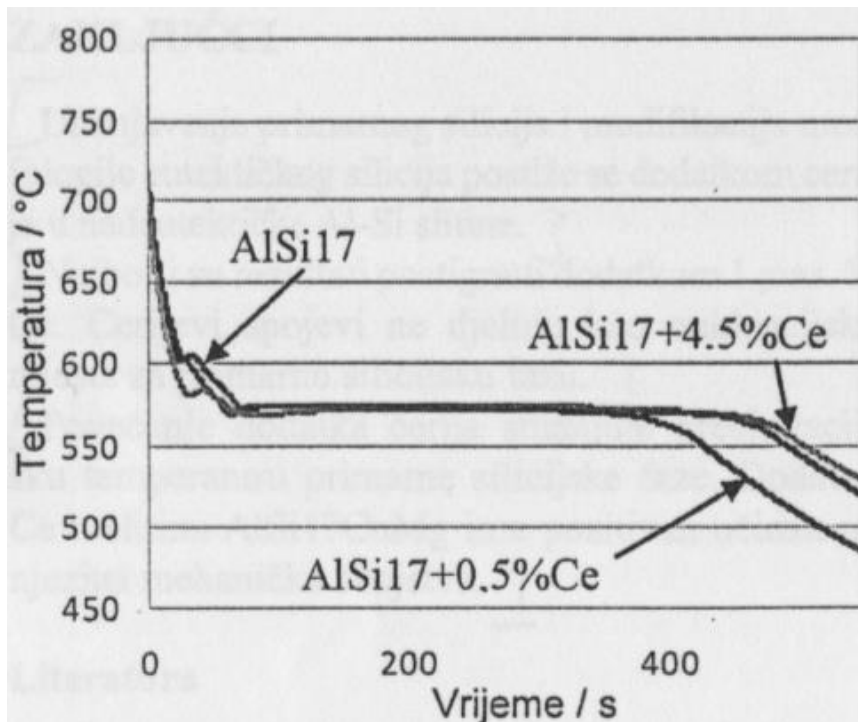
Cerij ne usitnjava primarni silicij, ali ima osrednji učinak na modifikaciju eutektičkog silicija. Mali dodatak cerija može uzrokovati nastanak faza τ_1 i τ_2 koje su u ravnoteži s

talinom Al-Si (slika 5.6). Ove faze mogu djelovati kao nukleacijska mjesta za (Al) i (Si) kristale u podeutektičkim i nadeutektičkim legurama [10].



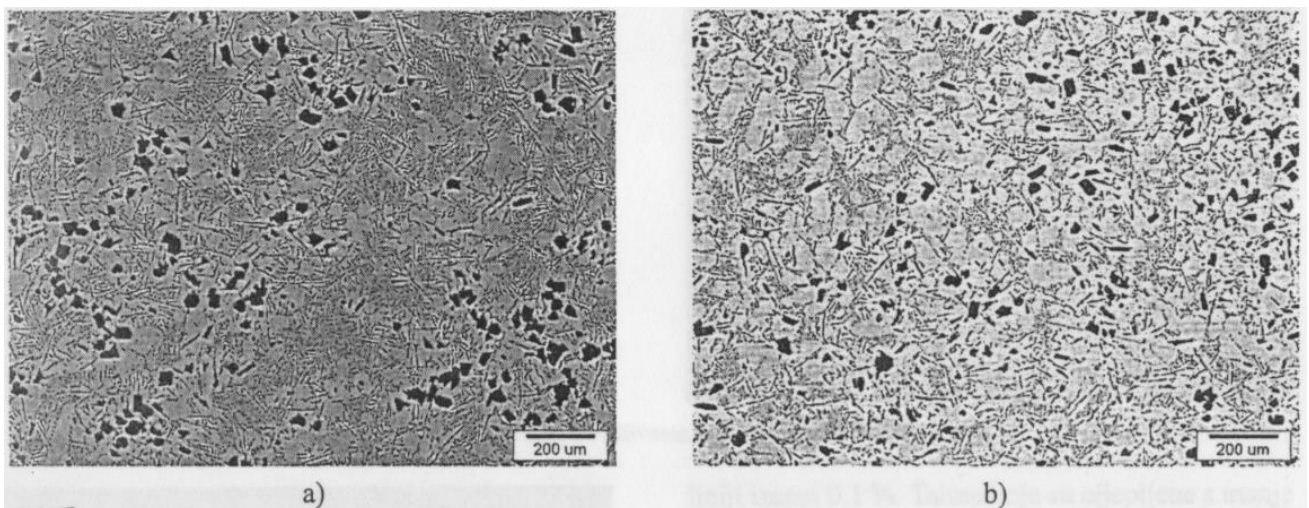
Slika 5.6. a) Ravnotežni fazni dijagram Al-Si-Ce, b) aluminijski kut faznog dijagrama Al-Si-Ce [10]

Modifikacijski učinak dodatka cerija na eutektički silicij pri skrućivanju nadeutektičke legure prikazan je krivuljom hlađenja na slici 5.7. Dodatak od 0,5 mas. % Ce utjecao je na primarni Si, što se očituje krivuljom hlađenja bez pothlađenja. Vrijeme skrućivanja je kraće nego za čistu leguru [10].



Slika 5.7. Utjecaj dodatka Ce na nadeutektičku leguru [10]

Slika 5.8 prikazuje mikrostrukturu nemođificirane (a) i modificirane eutektičke legure s 1 mas. % Ce (b) promatrane svjetlosnim mikroskopom. Pokazalo se da dodatak od 1 mas. % usitnjava primarna silicijska zrna od grubih u fine poliedarske oblike. Također je vidljiva finija modificirana mikrostruktura eutektičkog silicija [10].



Slika 5.8. Mikrostruktura nadeutektičke legure (a) i legure s dodatkom 1 mas. % Ce (b) [10]

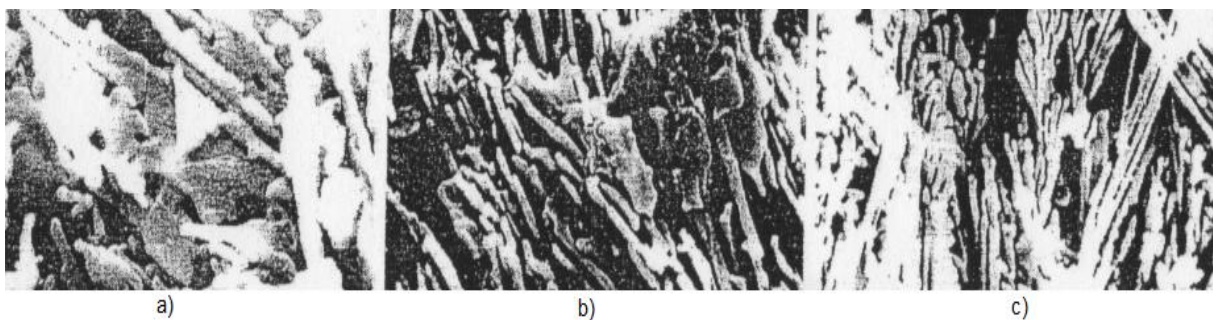
5.2 Modifikacija eutektika brzim hlađenjem

Prirodna modifikacija se pojavljuje kod visoke brzine skrućivanja (modifikacija gašenjem). Kao i kod kemijskog modifikacijskog djelovanja i prilikom modifikacije eutektika brzim hlađenjem transformira se lamelarni ili listićavi oblik eutektičkog silicija u vlaknasti, proizvedeći strukture slične kompozitima uz povećanje: maksimalne vlačne čvrstoće, plastičnosti, tvrdoće i mogućnosti strojne obrade [2,4].

Brzina hlađenja može utjecati na nastanak zrnate, lamelarne i oplemenjene mikrostrukture. Koja će od njih nastati, zavisi od brzine hlađenja i dodatka modifikacijskih elemenata. Poželjan je oplemenjeni tip mikrostrukture, koji nastaje pri najvećim brzinama hlađenja i ima sitan i zaobljen eutektički β_{Si} , a samim time i izrazito dobra mehanička svojstva [12].

Utjecaj povećanja brzine hlađenja očituje se u mikrostrukтури smanjenjem debljine i međusobnog razmaka čestica β_{Si} . Osim toga prisutna je i izrazitija tvorba blizanaca. Općenito, s brzinom hlađenja povećava se i stupanj usitnjavanja [12].

Mikrostruktura usmjerenog skrutnutog Al-Si eutektika postaje finija s porastom brzine skrućivanja. Modifikacija brzim hlađenjem počinje pri brzini skrućivanja od 505 $\mu\text{m/s}$ i završava se pri brzini skrućivanja od 807 $\mu\text{m/s}$. To je vidljivo na slici 5.9, koja pokazuje postupnu promjenu u Al-Si eutektičkoj mikrostrukтури [12].



Slika 5.9. Promjena morfologije silicijske faze s brzinom skrućivanja [12]

- a) potpuno listićasta morfologija s brzinom rasta od 308 $\mu\text{m/s}$
- b) miješani oblik listićaste i vlaknaste morfologije s rastom od 505 $\mu\text{m/s}$
- c) potpuno vlaknasta morfologija s rastom od 807 $\mu\text{m/s}$

5.3 Negativne posljedice modificiranja

Kod modificiranja eutektika aluminijskih legura postoje i pojedine nepoželjne nuspojave. Neke od negativnih posljedica modificiranja su pojava vodika u lijevu te smanjena fluidnost taline prilikom lijevanja.

5.3.1 Pojava vodika

Ova poteškoća može nastati jer se sadržaj plina često određuje iz poroznosti nastale nakon lijevanja, a ne izravnim mjerenjem sadržaja vodika u talini. Problem postaje izraženiji pri većim temperaturama taljenja, te pri većim koncentracijama modifikatora [4].

Stoga, prednosti modificiranja eutektika se smanjuju u određenoj mjeri zbog pojave vodika, formiranja oksidnog filma i generiranja poroznosti. To je posebno izraženo kod najefektnijih kemijskih modifikatora kao što su natrij i stroncij [4].

Vodik u aluminiju prouzročava nastajanje poroznosti tijekom skrućivanja odljevka. Zato je otplinjavanje taline prije ulijevanja jedna od najvažnijih mjera za kakvoću aluminijskih odljevaka [20].

5.3.2 Smanjenje tečljivosti

Jedan od glavnih atributa aluminijsko-silicijskih legura je odlična tečljivost, odnosno mogućnost dobrog popunjavanja kalupne šupljine [4]. Dok je utjecaj temperature

ulijevanja na fluidnost većine ljevarskih legura dobro istražen, utjecaj drugih odstupanja u procesu nije dobro dokumentiran, kao što je slučaj s Al-Si legurama [21].

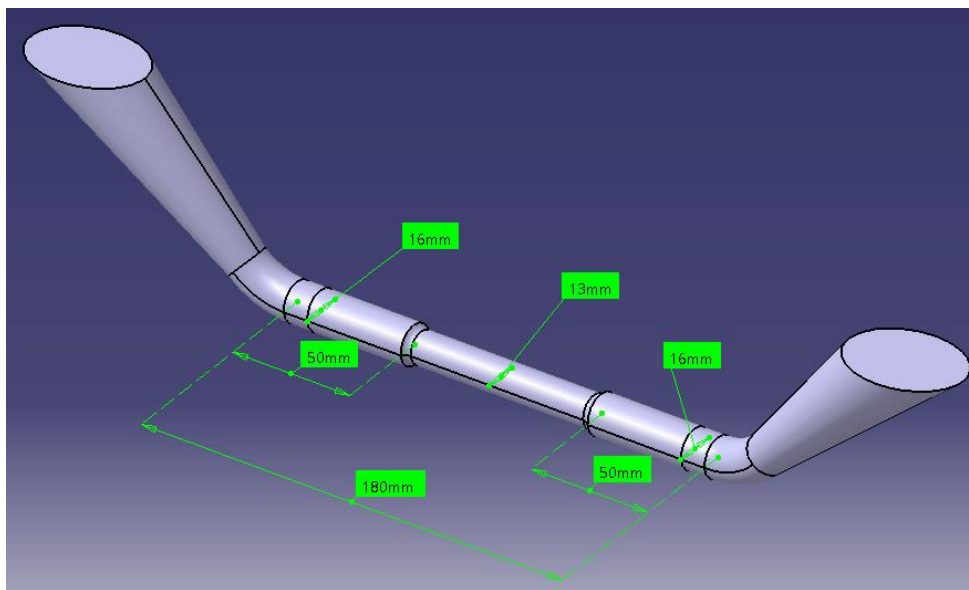
Pri razmatranju tečljivosti ljevarskih legura mora se imati na umu da izraz fluidnost ne znači recipročnu viskoznost, koja zavisi od temperature i predstavlja temeljno svojstvo rastaljenih materijala. Fluidnost ljevarskih legura je povezana s parametrima kalupa i metala, kao i s uvjetima lijevanja tijekom punjenja kalupa i kasnijim prijenosom metala za napajanje, pri čemu se i viskoznost smatra jednim od parametara [21].

Od različitih čimbenika koji utječu na fluidnost metala važniji su : viskoznost rastaljenog metala, površinska napetost, nastajanje nemetalnih uključaka u rastaljenom metalu, stupanj pregrijavanja, mehanizam skrućivanja, statički i dinamički tlak, veličina i oblik kalupa, sastav kalupa i temperatura kalupa [21].

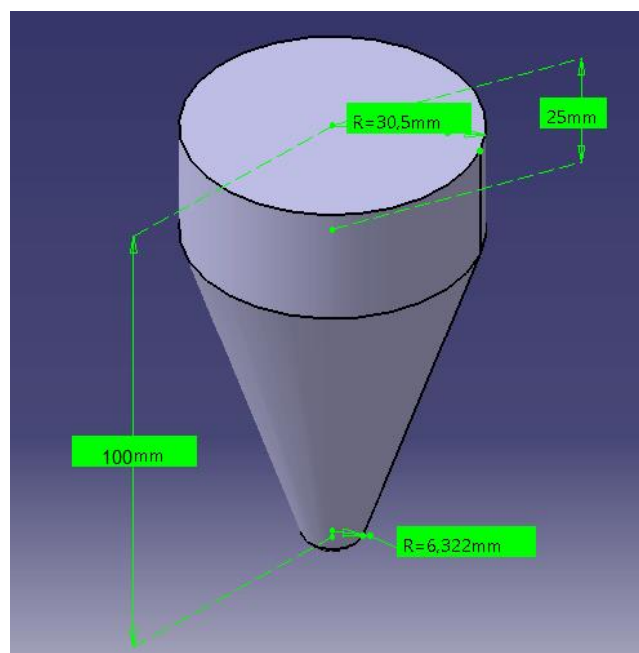
Kemijski modifikatori se generalno smatraju štetnim za fluidnost taline, unatoč činjenici da svi modifikatori koji se trenutno koriste smanjuju površinsku napetost. Ova anomalija se pojavljuje uslijed nadmoćnog utjecaja površinskog oksidnog filma, koji može povećati površinsku napetost čistog aluminijskog tri puta. Stoga, najčešće korišteni modifikator, natrij, smanjuje fluidnost taline za otprilike 10 %, dok prilikom modificiranja stroncijem modificirana talina ima istu fluidnost kao i nemodificirana [4].

6 EKSPERIMENTALNI DIO

Za potrebe eksperimentalnog dijela odliveno je osam epruveta i dva stošca. Na slikama 6.1 i 6.2 su prikazani modeli epruvete i stošca. Epruvete su lijevane u kokilu te u kalupe izrađene postupkom vodeno staklo-CO₂, dok su stošci lijevani u kalupe izrađene od svježe kalupne mješavine. Lijevanjem epruveta cilj je odrediti utjecaj brzine hlađenja te modifikacije taljevine natrijem na mehanička svojstva AISi12 legure, a lijevanjem stošca cilj je odrediti utjecaj brzine hlađenja te modifikacije natrijem na mikrostrukturu.



Slika 6.1. Model epruvete

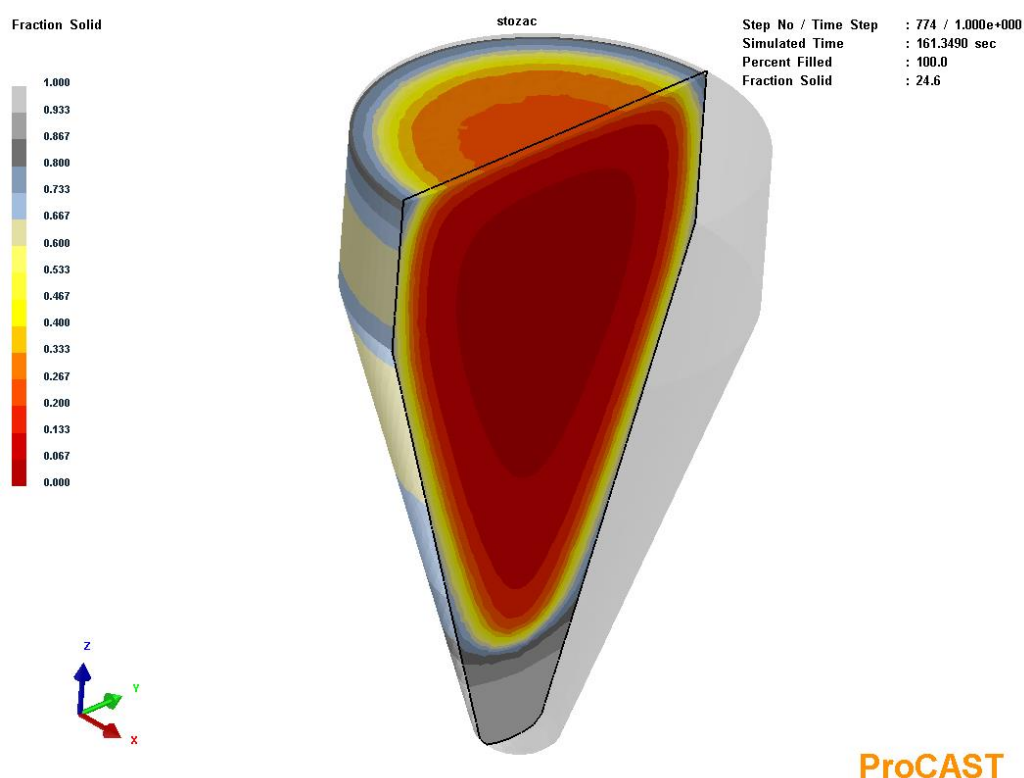


Slika 6.2. Model stošca

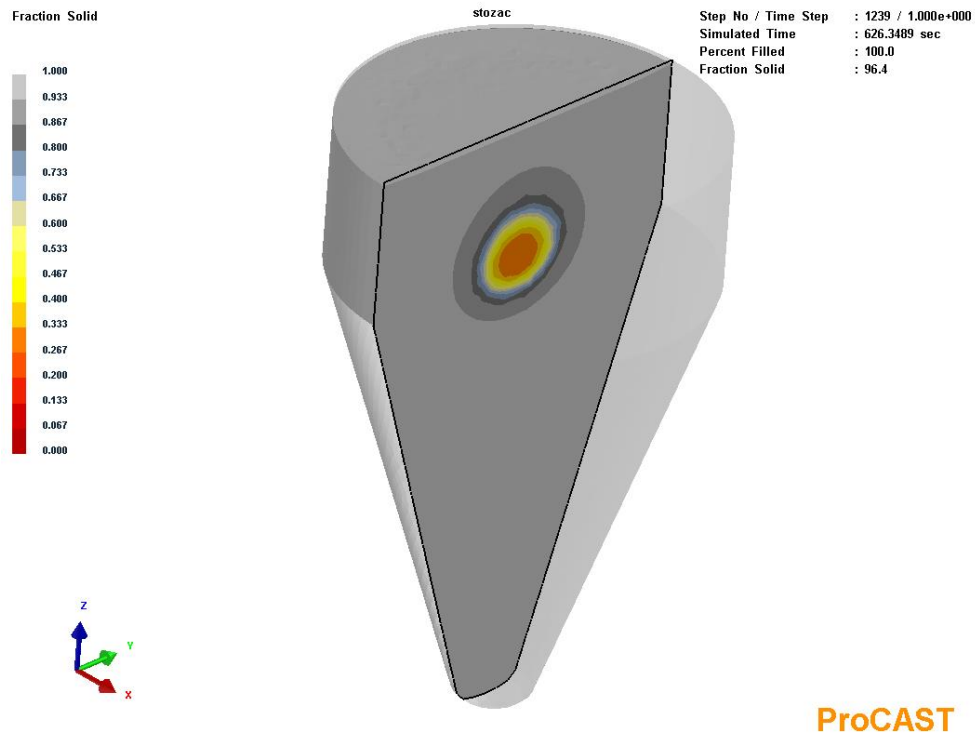
Eksperimentalni dio rada je proveden u Laboratoriju za ljevarstvo, Laboratoriju za materijalografiju, te u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

6.1 Simulacija

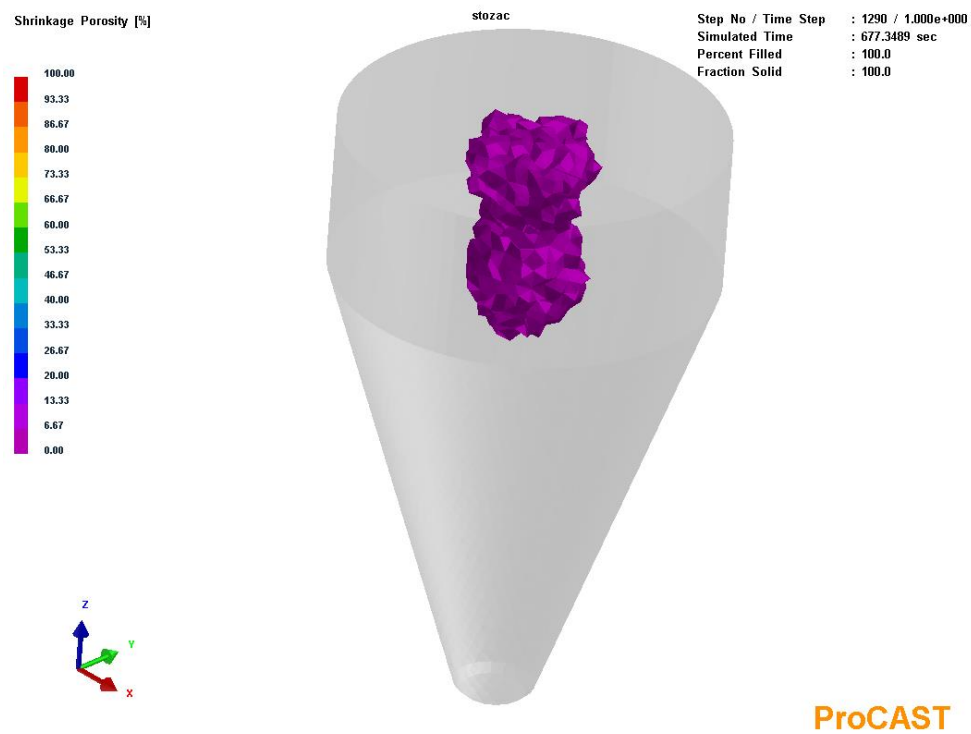
Simulacija lijevanja i skrućivanja je napravljena uz pomoć programskih paketa QuikCAST i ProCAST. Izrada simulacije počinje učitavanjem STL datoteke modela i generiranjem mreže, a zatim se dimenzionira kalup. Nakon što je dimenzioniran kalup određuju se parametri lijevanja te se može početi sa simulacijom. Simulirano je lijevanje i skrućivanje epruvete i stošca pri početnim temperaturama 660 °C i 690 °C. Na slikama 6.3 i 6.4 je prikazan postupak skrućivanja stošca te brzine hlađenja dok je na slici 6.5 prikazana poroznost stošca nakon skrućivanja i hlađenja do sobne temperature. Na slikama 6.6 i 6.7 je prikazan postupak skrućivanja epruvete.



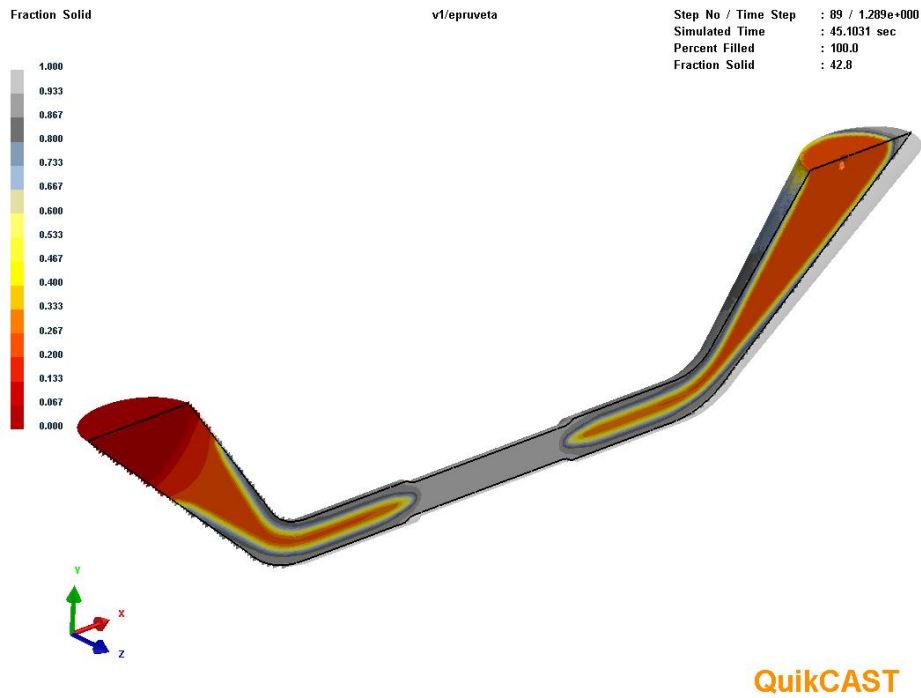
Slika 6.3. Početak skrućivanja stošca



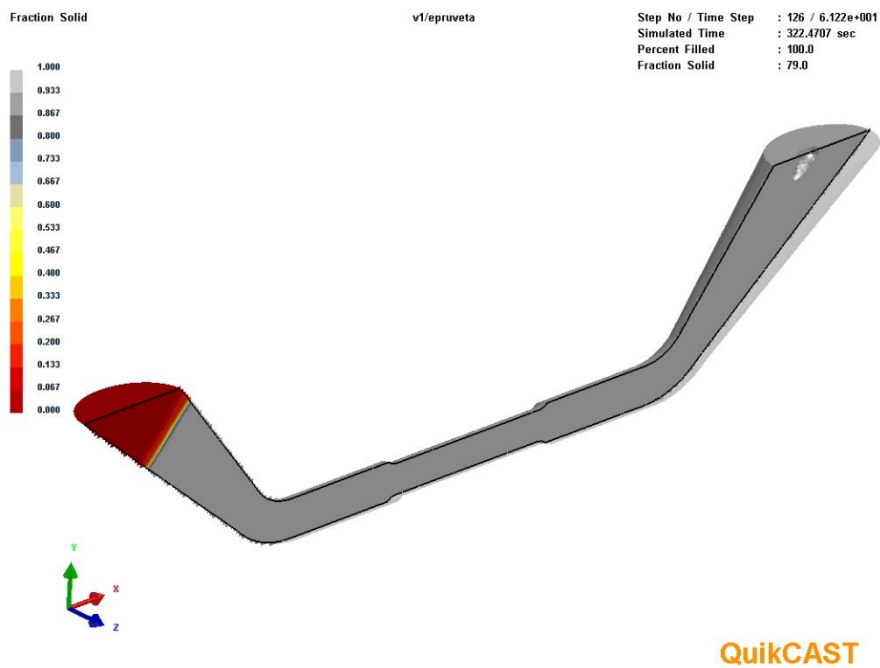
Slika 6.4. Posljednje mjesto skrućivanja stošca



Slika 6.5. Poroznost na stošcu nakon skrućivanja



Slika 6.6. Skrućivanje epruvete nakon 45 sekundi



Slika 6.7. Skrućivanje epruvete nakon 322 sekunde

6.2 Kalupljenje

Epruvete su lijevane korištenjem dva postupka: lijevanje u kokilu te postupkom vodeno staklo-CO₂, stožac je lijevan u kalup od sviježe kalupne mješavine.

6.2.1 Postupak vodeno staklo-CO₂

Kalupna mješavina se sastoji od kvarcnog pijeska i anorganskog veziva - vodenog stakla (natrijev silikat), a priprema se u miješalici. Za oblikovanje kalupne mješavine korišten je metalni model. Prije stavljanja kalupne mješavine u kalupnik, preko modela je posipan likapodij kako bi se spriječilo lijepljenje kalupne mješavine na model te kako bi se olakšalo vađenje modela iz kalupa. Nakon posipanja modela likapodijem usipana je kalupna mješavina u kalupnik te je sabijena. Nakon oblikovanja kalupne mješavine korištenjem metalnog modela, mješavina je očvrtnuta propuhivanjem plinom - ugljičnim dioksidom (CO₂). Nakon propuhivanja plinom jedna strana kalupa je izvađena iz kalupnika te je postupak ponovljen i za drugu stranu kalupa, nakon čega je uslijedilo njihovo spajanje stegama. Na slikama 6.8 – 6.12 je prikazan postupak kalupljenja dok je gotov kalup vidljiv je na slici 6.13.



Slika 6.8. Kalupnik (lijevo), posipanje kalupnika likapodijem (desno)



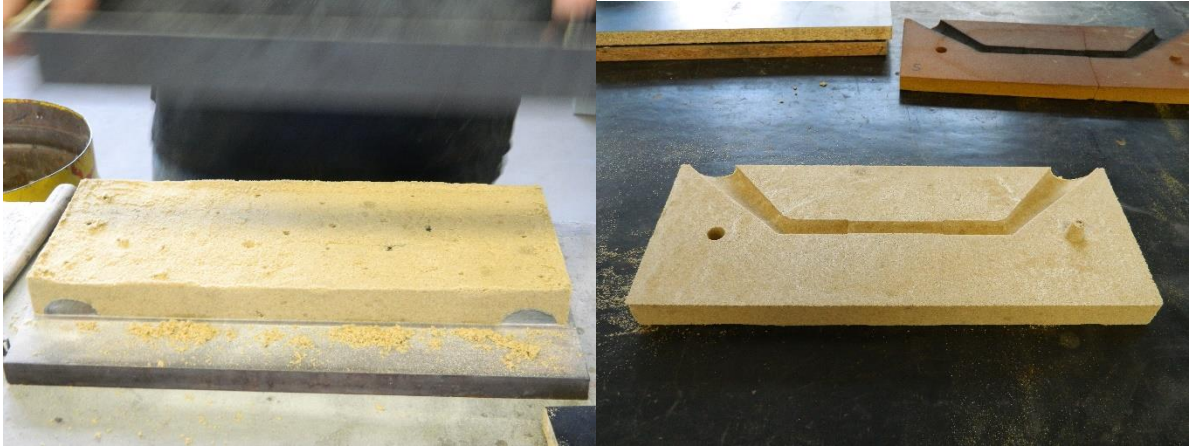
Slika 6.9. Miješanje kalupne smjese (lijevo) te njeno usipanje u kalupnik (desno)



Slika 6.10. Sabijanje kalupne mješavine



Slika 6.11. Izrada odušaka u kalupnoj mješavini (lijevo) te očvršćivanje mješavine CO₂ plinom (desno)



Slika 6.12. Vađenje jedne strane kalupa iz kalupnika

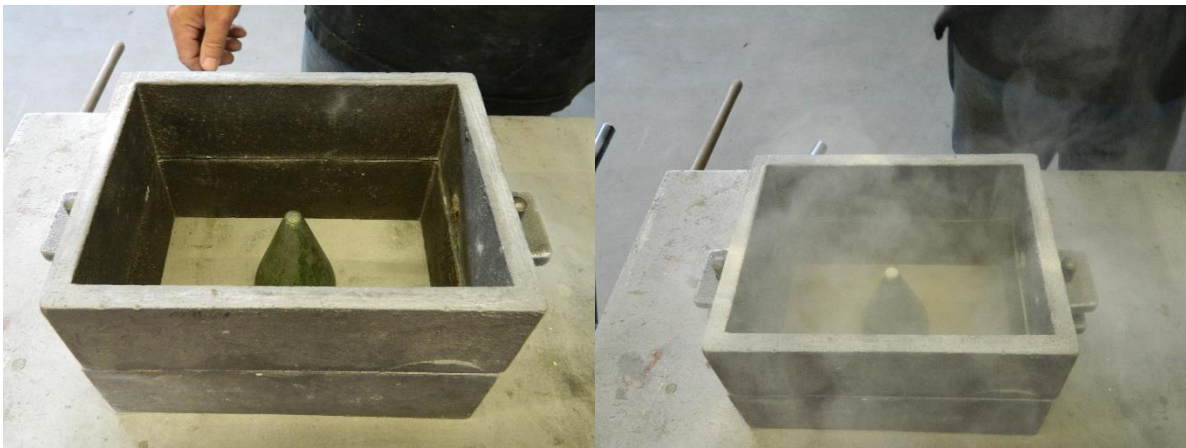


Slika 6.13. Kalup spreman za ulijevanje

6.2.2 Lijevanje u svježu kalupnu mješavinu

Kalupna šupljina u kalupu od sviježe kalupne mješavine se dobiva korištenjem modela koji odgovara obliku odljevka. Model u obliku odljevka je postavlja u kalupnik te je posipan likapodijem kako bi se spriječilo lijepljenje pijeska na model i kako bi se

olakšalo vađenje modela iz kalupa. Nakon toga model je prvo zasipan modelnom kalupnom mješavinom, a nakon toga dopunskom kalupnom mješavinom koja je zatim sabijena. Kalupna mješavina korištena za izradu kalupa sastoji se od osnovnog materijala (kvarcni pijesak) i veziva (voda-glina), a pripravljena je u miješalici. Nakon sabijanja kalupne mješavine uslijedilo je vađenje modela, te je kalup spreman za lijevanje. Postupak kalupljenja je prikazan na slikama 6.14 – 6.17, dok je na slici 6.18 prikazan kalup spreman za ulijevanje.



Slika 6.14. Postavljanje modela u kalupnik (lijevo) te posipanje likapodijem (desno)



*Slika 6.15. Zasipavanje modela modelnom kalupnom mješavinom (lijevo),
popunjavanje kalupa dopunskom kalupnom mješavinom (desno)*



Slika 6.16. Sabijanje kalupne mješavine (lijevo), sabijena mješavina (desno)



Slika 6.17. Vađenje modela



Slika 6.18. Kalup spreman za ulijevanje

6.3 Lijevanje

U kalup od sviježe kalupne mješavine su odlivena dva stošca jedan od osnovne taljevine AlSi12, te jedan od taljevine modificirane natrijem u obliku tablete (Simodal 77). Također je lijevano osam epruveta, četiri od osnovne taljevine AlSi12 te četiri od taljevine modificirane natrijem u obliku tablete (Simodal 77), od toga po dvije od taljevine modificirane natrijem te dvije od osnovne taljevine AlSi12 su lijevane u kokilu, kao i dvije od taljevine modificirane natrijem te dvije od osnovne taljevine AlSi12 u kalupe izrađene postupkom vodeno staklo-CO₂.

6.3.1 Legura

Pri lijevanju je korištena legura AlSi12, oznake EN 44100 prema Europskoj normi EN 1706. U tablici 6.1 prikazana su mehanička svojstva, a u tablici 6.2 je prikazan kemijski sastav legure prema Europskoj normi EN 1706.

Tablica 6.1. Mehanička svojstva legure EN 44100 [21]

| | Vlačna čvrstoća Rm [MPa] | Granica razvlačenja Rp _{0,2} [MPa] | Produljenje A [%] | Tvrdoća po Brinellu HBW |
|---------------------|-----------------------------|--|----------------------|----------------------------|
| Lijevanje u kokilu | 170 | 80 | 5 | 55 |
| Lijevanje u pijesku | 150 | 70 | 4 | 50 |

Tablica 6.2. Kemijski sastav EN 44100 legure [21]

| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Ni | Zn | Pb | Ti | drugi |
|------|-----------|----------------|----------------|------|------|------|------|------|----------------|-------|
| udio | 10,5-13,5 | 0,65 (0,55) | 0,15 (0,10) | 0,55 | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 0,10 | 0,20 (0,15) | 0,15 |

6.3.2 Uzorci od osnovne legure

Od osnovne legure AlSi12 su lijevane četiri epruvete, dvije u kokilu i dvije u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO₂, te jedan stožac lijevan u kalup od svježe kalupne mješavine. Legura je taljena u elektrootpornoj peći tvrtke Elektrosanitarij, masa taljevine je iznosila 3,5 kg, temperatura u peći je iznosila 850°C, a temperatura prilikom ulijevanja je iznosila 760°C.

Prije ulijevanja u kokilu predgrijani su, uz pomoć plinskog plamenika, lonac za prijenos taljevine te kokila na temperaturu iznad 100°C što je vidljivo na slici 6.19. Nakon što je ugrijana, kokila je zatim poprskana cirkonskim premazom što je vidljivo na slici 6.20, te pritegnuta stegama kako ne bi došlo do razdvajanja tokom lijevanja. Nakon pripreme kalupa s vrha taljevine je uklonjena troska (slika 6.21), te je izvršeno ulijevanje taline što je vidljivo na slici 6.22.



Slika 6.19. Predgrijavanje kokile i lonca za prijenos taljevine



Slika 6.20. Kokila poprskana cirkonskim premazom



Slika 6.21. Uklanjanje troske s vrha taline



Slika 6.22. Ulijevanje taljevine u kokilu

Lijevanje u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO₂ te lijevanje u kalup od svježe kalupne mješavine je izvedeno u ranije pripremljene kalupe što je vidljivo na slikama 6.23 i 6.24.



Slika 6.23. Lijevanje epruvete u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO₂



Slika 6.24. Lijevanje stošca u kalup od svježe kalupne mješavine

Nakon što su se odljevci ohladili uslijedilo je vađenje iz kalupa te čišćenje od ostatka pijeska što je vidljivo na slici 6.25. Na slici 6.26. su prikazani gotovi odljevci.



Slika 6.25. Vađenje odljevka iz kalupa vodeno staklo-CO₂ (lijevo), kokila (desno)



Slika 6.26. Gotovi odljevci nakon vađenja iz kalupa

6.3.3 Modificirani uzorci

Lijevane su četiri epruvete od legure AlSi12 modificirane natrijem, dvije u kokilu i dvije u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO₂, te jedan stožac lijevan u kalup od svježe kalupne mješavine. Masa taljevine je iznosila 3,5 kg, temperatura u peći je iznosila 800°C, a temperatura prilikom ulijevanja je iznosila 682°C.

Za modifikaciju taljevine je korišten Simodal 77 tvrtke Foseco (slika 6.27). Simodal 77 (natrijeva tableta) je univerzalno primjenjivo sredstvo za oplemenjivanje AlSi legura sa sadržajem silicija u količini od 5 do 13%. Simodal 77 u egzotermnoj reakciji s taljevinom oslobađa natrij koji se ravnomjerno raspoređuje i postiže normalnu eutektičku kristalizaciju sirovine taljevine. Istovremeno suzbija sklonost stvaranju šupljina na površini taljevine i poboljšava mehanička svojstva taljevine [22].

Simodal 77 osobito je prihvatljiv za okoliš, ne proizvodi prašinu i proizvodi minimalne količine dima pri upotrebi. Tablete se koriste u znatno manjim količinama u usporedbi s prašcima za istu primjenu [22].



Slika 6.27. Tableta Simodal 77

Za 3,5 kg taljevine je upotrijebljeno 10,5 g modifikatora. Modifikator je prvo stavljen u prethodno zagrijano zvono za uranjanje te je ostavljen iznad peći dok se ne ugrije (slika 6.28).



Slika 6.28. Grijanje modifikatora u zvonu za uranjanje

Nakon što se modifikator zapalio uronjen je pomoću zvona u taljevinu kojoj je u tom trenutku temperatura iznosila 780°C (slika 6.29), te je ostavljen da djeluje pet minuta uz lagano miješanje. Nakon što je prošlo pet minuta izvađeno je zvono te je s površine taljevine uklonjena troska i ostaci modifikatora. Lijevano je u ranije pripremljene kalupe (slika 6.30). Kao i kod lijevanja uzoraka od osnovne taljevine, kokila i lonac za prienos taljevine su predgrijani pomoću plinskog plamenika na temperaturu preko 100°C , poprskani cirkonskim premazom i pričvršćeni stegama kako ne bi došlo do razdvajanja tijekom lijevanja te su odliveni uzorci. Nakon što su se odljevci ohladili izvađeni su iz kalupa (slika 6.31).



Slika 6.29. Uranjanje modifikatora u taljevinu



Slika 6.30. Ulijevanje modificirane taljevine u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO₂



Slika 6.31. Odljevci od taljevine modificirane natrijem

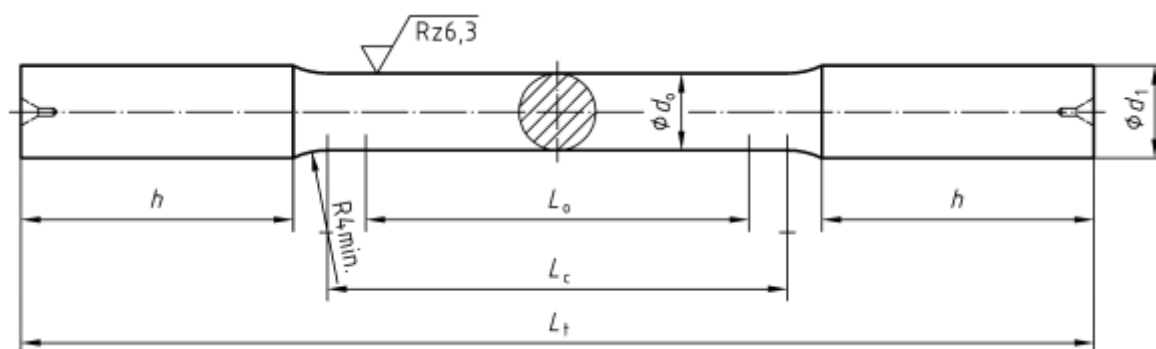
6.4 Ispitivanje uzoraka

Nakon lijevanja odljevci iz kokile i kalupa izrađeni postupkom vodeno staklo-CO₂ su obrađeni strojnom obradom kako bi se oblikovale epruvete na kojima su ispitivana mehanička svojstva na kidalici. Odljevci u obliku stožaca su tokareni na promjer 30 mm te su izrezani na pločice debljine 10 mm. Nakon toga su odneseni na metalografsku analizu.

6.4.1 Statičko vlačno ispitivanje

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava, te je to ujedno i najčešće primijenjeno ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava. Prirast sile pri statičkom vlačnom ispitivanju u jedinici vremena mora biti takav da prirast postignutog napreznja bude $\leq 10 \text{ N/mm}^2$ u sekundi [23].

Nakon lijevanja potrebno je pripremiti epruvete za ispitivanje. Epruvete su pripremljene za ispitivanje tako što su im prvo odrezani uljevni sustav i pojilo, a zatim su tokarene na dimenzije propisane normom DIN-50125-2004 (slika 6.32). Gdje je: $d_0=12 \text{ mm}$; $L_0=60 \text{ mm}$; $d_1=15 \text{ mm}$; $h=40 \text{ mm}$; $L_c=72$; $L_t=160 \text{ mm}$.



Slika 6.32. Dimenzije epruvete [24]

Nakon što su pripremljene epruvete, ispitivane su na kidalici u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Katedre za materijale i tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (slika 6.33). Za ispitivanje je korištena kidalica „VEB WPM“ nazivne snage 400 kN, koja je povezana s računalom opremljenim programom „TIRA“.

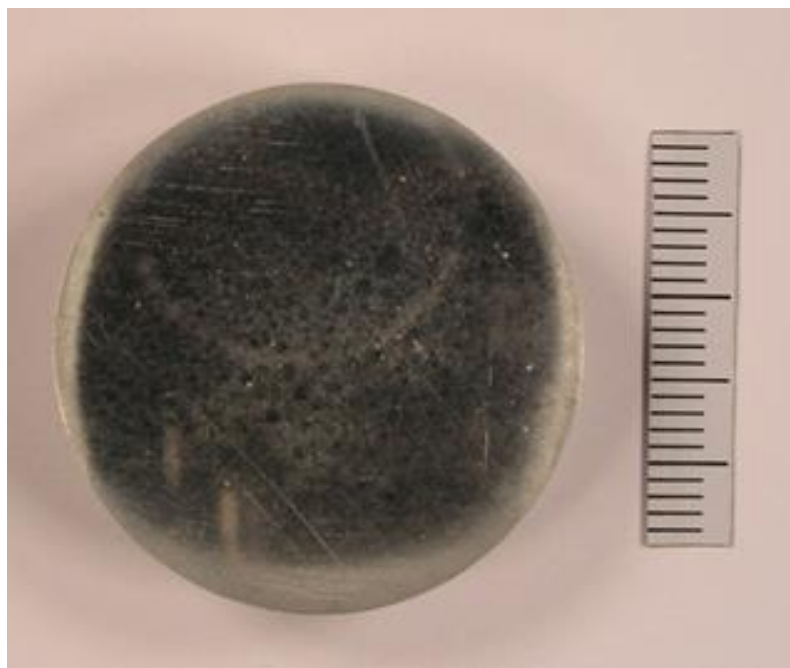


Slika 6.33. Kidalica „VEB WPM“

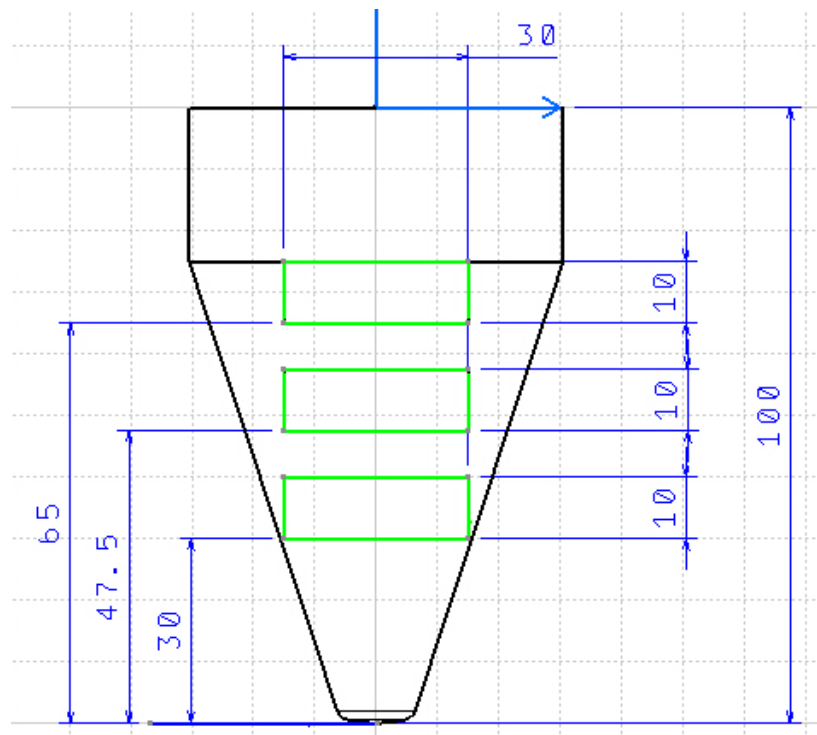
6.4.2 Metalografska ispitivanja

Metalografska analiza provedena je na uzorcima kako bi se utvrdila razina modifikacije te kako bi se provjerio utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu.

Uzorci za metalografsko ispitivanje su izrađeni tako da je stožac prvo tokaren na promjer 30 mm te nakon toga su izrezani uzorci debljine 10 mm (slika 6.34). Uzorci su uzimani s tri različita mjesta na stošcu: s udaljenosti 30 mm od vrha stošca, s udaljenosti 47,5 mm od vrha stošca te s udaljenosti 65 mm od vrha stošca (slika 6.35). Uzimani su s tih mjesta zbog toga što je na svakom od tih dijelova debljina stošca drugačija, a samim time i brzina hlađenja. Metalografska analiza uzoraka je provedena u Laboratoriju za materijalografiju Katedre za materijale i tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 6.34. Uzorak pripremljen za metalografsko ispitivanje



Slika 6.35. Mjesta na stošcu s kojih su uzeti uzorci

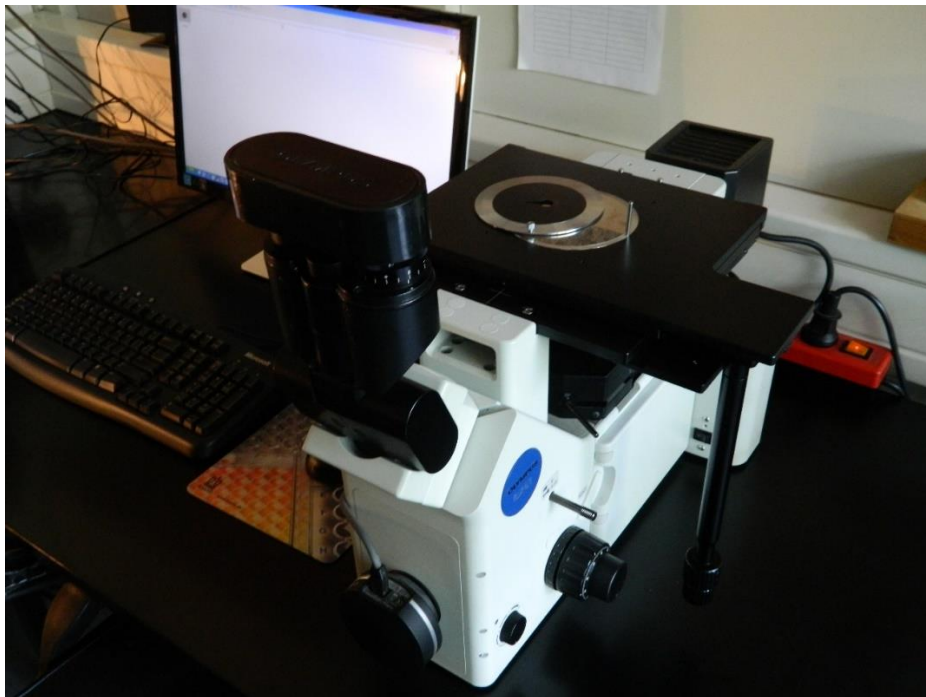
Prije provjere mikrostrukture potrebno je prethodno pripremiti uzorke. Prvo su brušeni, a zatim polirani.

Brušenje je provedeno na uređaju „Phoenix alpha“ grinder-polisher proizvođača „Buehler“ uz brzinu od 300 o/min te uz vodeno hlađenje. Korišteni su brusni papiri počevši od najgrubljeg oznake p320, zatim p500, p1000, p2000, te na kraju p4000 s kojim se dobije vrlo fina površina.

Nakon brušenja uzorci su polirani na uređaju „Struers Dap-V“ uz brzinu od 150 o/min te uz hlađenje lubrikantom (mješavina vode i alkohola) koji kapa po tkanini. Prvo je korištena MD-DAC tkanina uz dijamantnu pastu 3 μm , a zatim MD-MOL tkanina uz dijamantnu pastu 1 μm .

Kako bi se vidjela mikrostruktura uzorci su nagrizani u kiselini „Keller's Reagent“. Uzorci su nagrizani 1 minutu te su zatim isprani u demineraliziranoj vodi kako bi se zaustavila kemijska reakcija. Time su uzorci bili spremni za analizu.

Analiza je rađena svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 (slika 6.36) koji ima mogućnost povećanja 50×, 100×, 200×, 500×, 1000×. Uzorci su promatrani uz povećanje 200×.

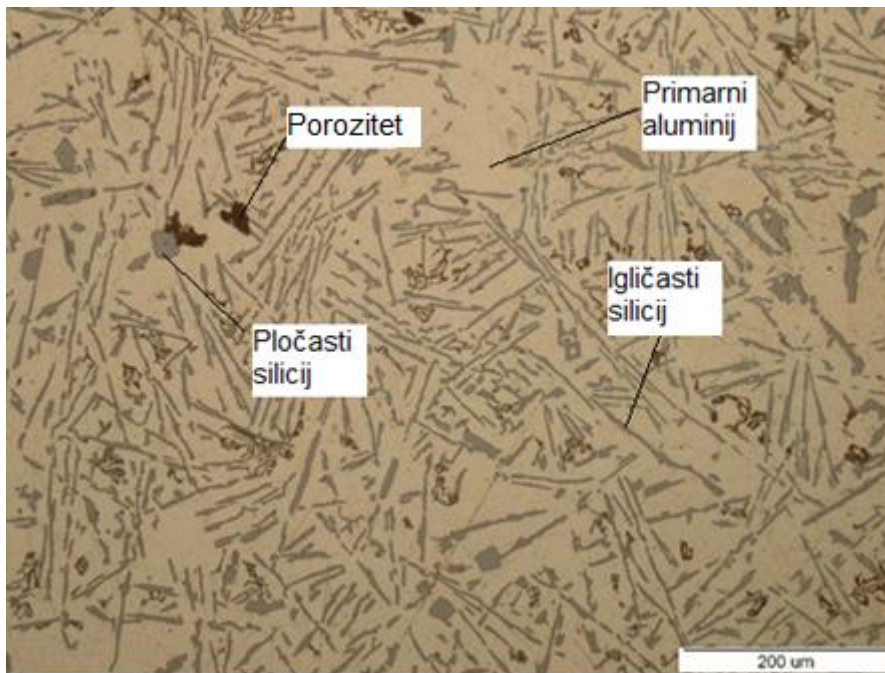


Slika 6.36. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

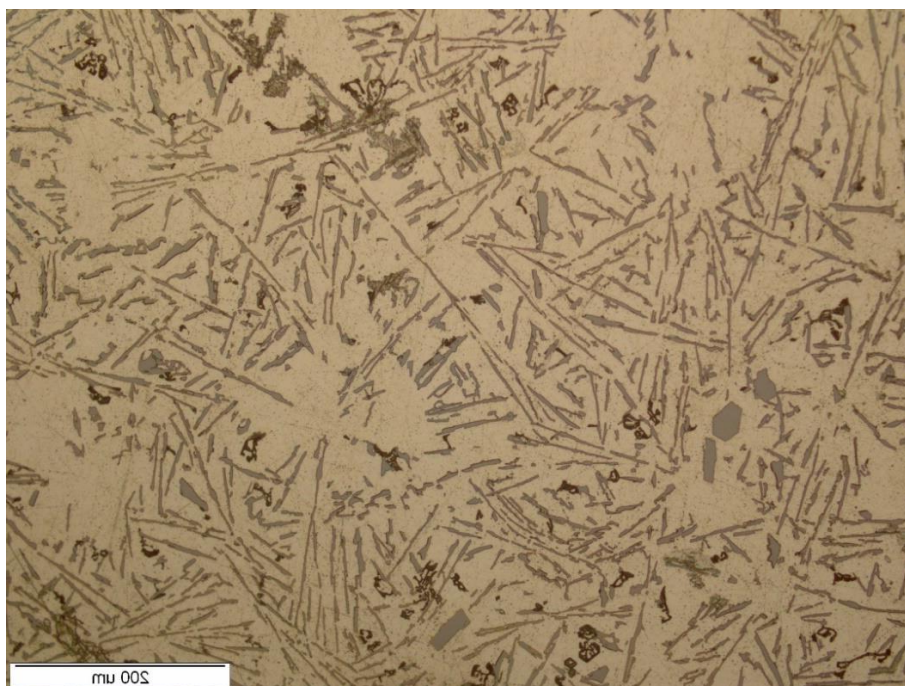
6.5 Rezultati i analiza

6.5.1 Metalografsko ispitivanje

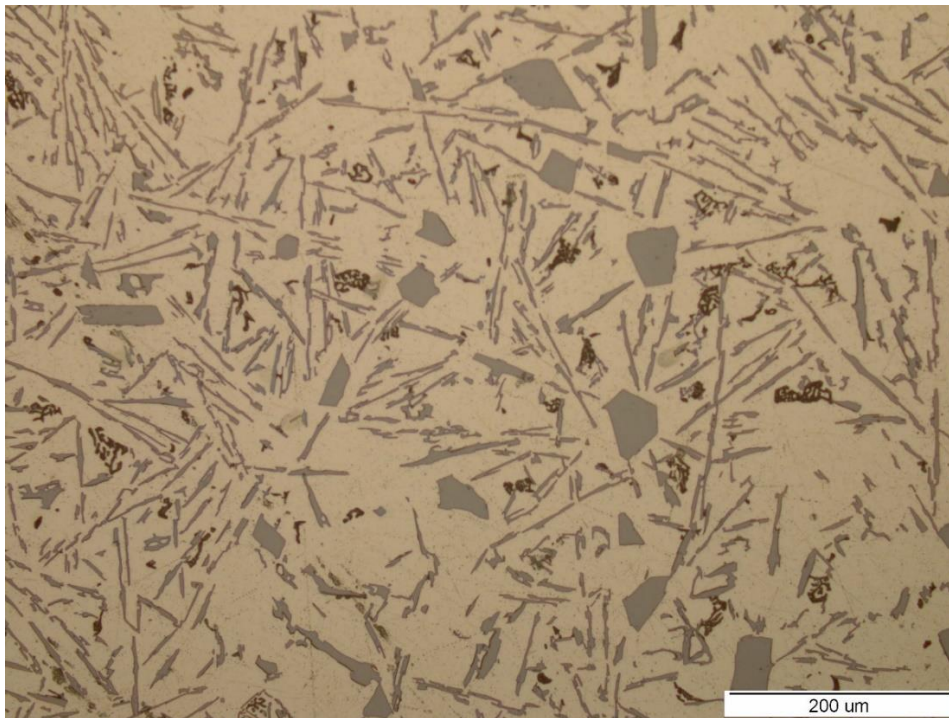
Na slikama 6.37 – 6.39 je prikazana mikrostruktura dobivena lijevanjem osnovne legure AlSi12 u oblik stošca. Slike prikazuju uzorke povećane svjetlosnim mikroskopom 200 puta.



Slika 6.37. Struktura osnovne taljevine s udaljenosti 30 mm od vrha stošca



Slika 6.38. Struktura osnovne taljevine s udaljenosti 47,5mm od vrha stošca

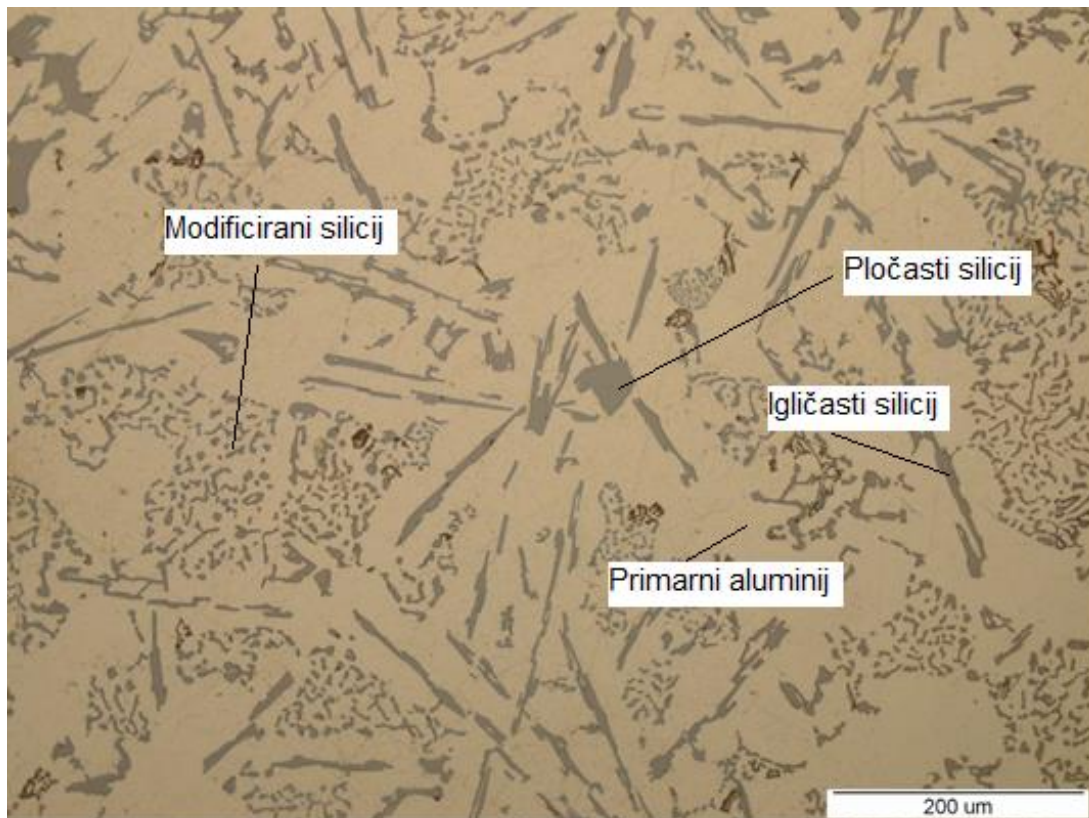


Slika 6.39. Struktura osnovne taljevine s baze stošca

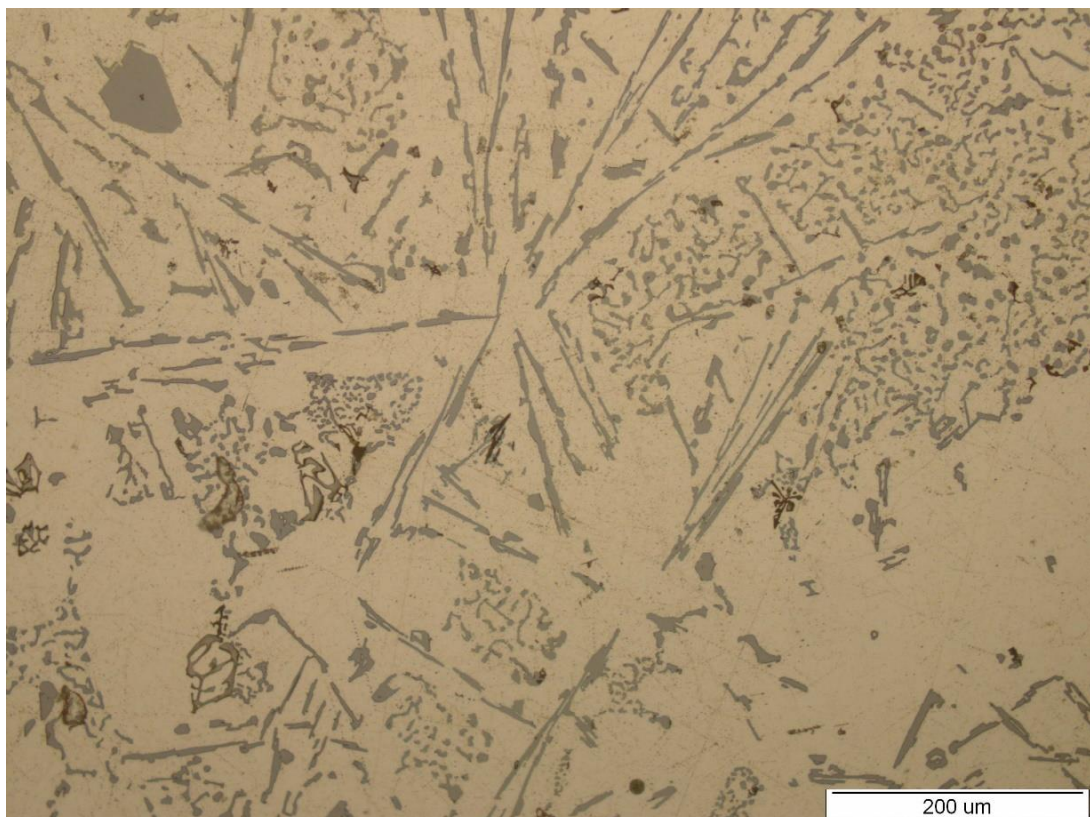
Svijetla podloga predstavlja primarni aluminij, dok siva boja u obliku iglica i pločica predstavlja silicij. Na slici je također vidljivo i da se pojavila poroznost (tamno smeđe boje).

Silicij na slici je eutektički silicij čija morfologija nepovoljno utječe na mehanička svojstva. Eutektički silicij nastoji se bržim hlađenjem prevesti u povoljniji vlaknasti oblik. Iz slika je vidljivo kako se strukture na uzorku bliže vrhu, na uzorku sa sredine i na uzorku s baze stošca razlikuju. Na uzorku koji se nalazio najbliže vrhu stošca je igličasti silicij najmanji, na uzorku sa sredine stošca nešto veći dok je na uzorku s baze stošca najveći. Kao i kod igličastog silicija i silicijske pločice su najmanje na uzorku koji se nalazio najbliže vrhu stošca, a najveće na uzorku s baze stošca. Ovakva struktura je rezultat bržeg ohlađivanja taljevine na vrhu stošca nego na bazi.

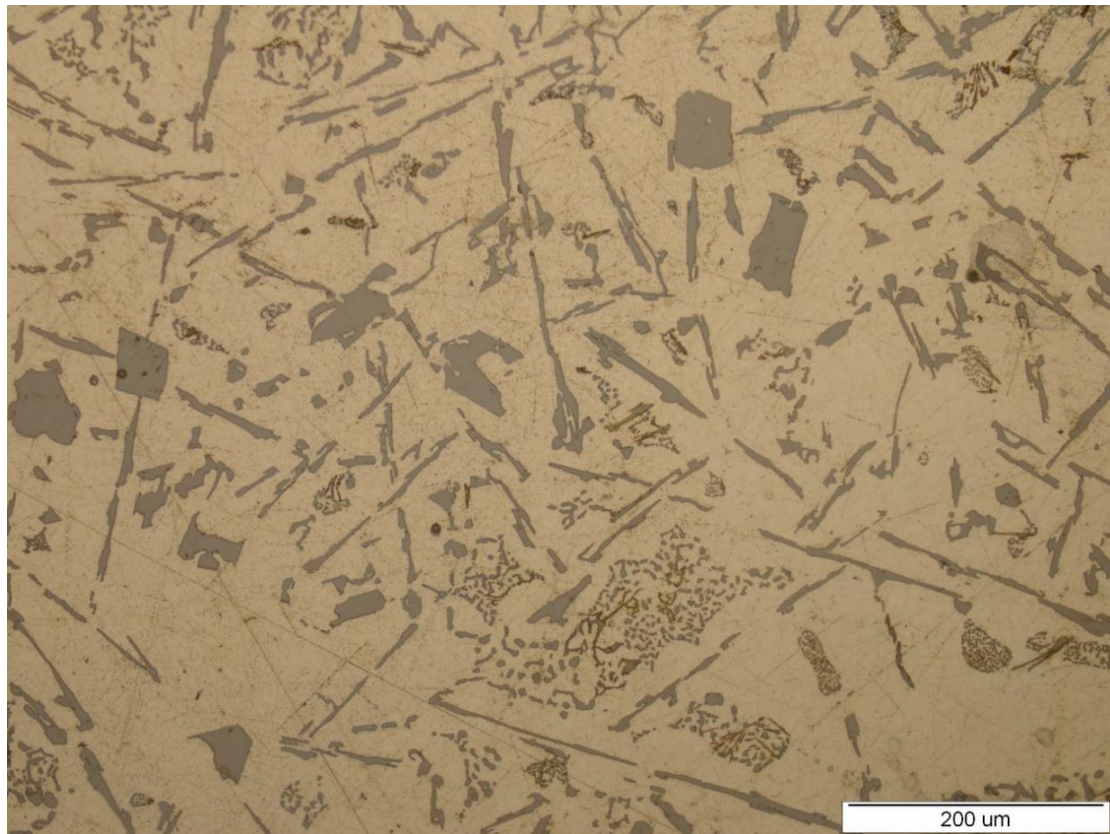
Na slikama 6.40 – 6.42 je prikazana mikrostruktura uzoraka izrađenih od taljevine modificirane natrijem.



Slika 6.40. Modificirana struktura uzorka udaljenog 30 mm od vrha stošca



Slika 6.41. Modificirana struktura uzorka udaljenog 47,5 mm od vrha stošca



Slika 6.42. Modificirana struktura uzorka s baze stošca

Kao što je bio slučaj i s uzorcima od osnovne taljevine AlSi12 i kod uzoraka od modificirane taljevine se mikrostruktura s uzorka koji se nalazio najbliže vrhu stošca razlikuje u odnosu na mikrostrukturu na uzorku s baze stošca. Iz slika je vidljivo da na uzorku s vrha stošca ima najmanje silicijskih pločica te da je legura najbolje modificirana, dok mikrostruktura na uzorku s baze stošca ima najviše igličastog i pločastog silicija, te je najslabije modificirana. Razlog toga je kao i kod uzoraka od osnovne taljevine AlSi12 brzina ohlađivanja taljevine koja je na vrhu stošca najveća, a na bazi stošca najmanja.

Sa slika je također vidljivo da legura nije potpuno modificirana: vidljiv igličasti i pločasti silicij na svim uzorcima, a razlog tome je što se modifikator zapalio prije uranjanja u taljevinu. Također je vidljiva i poroznost na uzorcima do koje je došlo uslijed pojave vodika zato što nije provedeno otplinjavanje taljevine prije modifikacije.

6.5.2 Statičko vlačno ispitivanje

U tablici 6.3 su prikazani rezultati statičkog vlačnog ispitivanja. Ispitivano je osam epruveta, četiri od osnovne taljevine AlSi12 te četiri od modificirane taljevine, od kojih po dvije lijevane u kokilu te dvije lijevanje u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO₂. Na slici 6.43 je prikazana grafička usporedba granice razvlačenja epruveta. Na slici 6.44 su prikazane epruvete nakon kidanja.

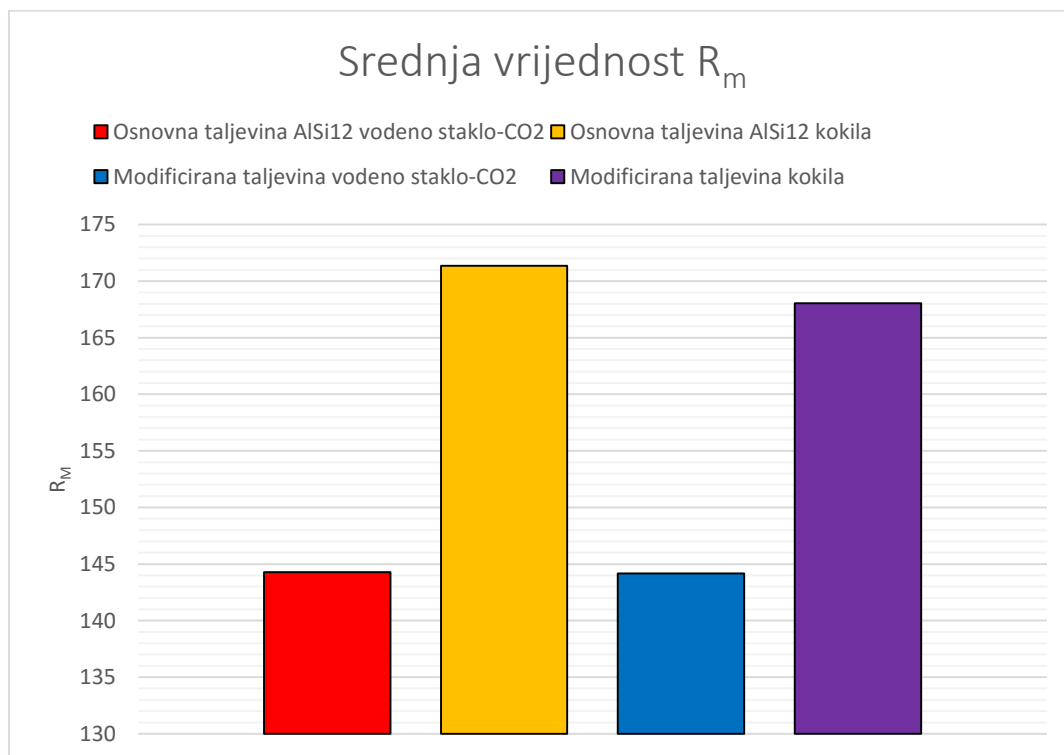
Tablica 6.3. Rezultati ispitivanja na kidalici

| | F _b [kN] | S ₀ [mm ²] | R _m [N/mm ²] | R _m (srednje) [N/mm ²] | F _m [kN] | L _u [mm] | d _u [mm] | A % |
|-----------------|------------------------|--------------------------------------|--|---|------------------------|------------------------|------------------------|--------|
| Nemodificirano | | | | | | | | |
| CO ₂ | 16,39 | 112,16 | 147,15 | 144,28 | 16,504 | 61,44 | 11,77 | 2,4 |
| CO ₂ | 16,02 | 113,47 | 141,4 | | 16,02 | - | 11,8 | - |
| kokila | 19,57 | 112,72 | 173,63 | 171,37 | 19,572 | - | 12,82 | - |
| kokila | 19,06 | 112,72 | 169,1 | | 19,06 | 62,4 | 11,73 | 4 |
| Modificirano | | | | | | | | |
| CO ₂ | 16,34 | 112,16 | 146,73 | 144,18 | 16,457 | 61,7 | 11,8 | 2,83 |
| CO ₂ | 16,07 | 113,47 | 141,62 | | 16,07 | 62,16 | 11,78 | 3,6 |
| kokila | 19,14 | 113,1 | 169,27 | 168,04 | 19,144 | - | 12,82 | - |
| kokila | 18,80 | 112,72 | 166,81 | | 18,803 | - | 11,84 | - |

Nakon kidanja očitane su veličine: vlačna čvrstoća (R_m), površina poprečnog presjeka (S₀), sila pucanja (F_b) te maksimalna sila (F_m) dok su produljenje (L_u) i promjer (d_u) izmjereni, produljenje epruvete (A) je izračunato prema formuli:

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

U tablici 6.3 je vidljivo da duljina promatranog dijela epruvete nakon kidanja nije izmjerena na svim uzorcima. Razlog tome je što su neke epruvete pukle izvan mjernog područja što je vidljivo na slici 6.44.



Slika 6.43. Usporedba vlačne čvrstoće

Iz rezultata je vidljivo da ne postoji izrazita razlika u vlačnoj čvrstoći između modificiranih i nemodificiranih epruveta. Razlog tome je poroznost koja se pojavila na uzorcima ponajprije zato što nije provedeno otplinjavanje taljevine prije modifikacije i lijevanja.

Također je na rezultate imala određeni utjecaj slabija modificiranost odljevaka koja je uslijedila zbog toga što se modifikator zapalio prije samog uranjanja u taljevinu te je došlo do nepotpune modifikacije odljevka.

Vidljivo je da je vlačna čvrstoća epruveta lijevanih u kokilu veća od vlačne čvrstoće epruveta lijevanih u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO₂. Razlog tome je što se epruvete lijevane u kokilu brže hlade nego epruvete lijevane u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-CO₂ te zbog toga imaju sitnije zrno.



Slika 6.44. Epruvete nakon kidanja

7 ZAKLJUČAK

Modifikacija eutektika je vrlo bitan mehanizam za poboljšanje mehaničkih svojstava aluminijskih legura. Modificiranjem se prvenstveno povećava vlačna čvrstoća odljevka. Budući da su konstituenti legure manji i jednolično disperzirani, poboljšava se i strojna obradivost.

Prilikom modifikacije eutektika kod aluminijskih legura treba obratiti pozornost i na određene negativne nuspojave koje modificiranje nosi sa sobom. Najznačajnije nuspojave modifikacije aluminijskih legura su smanjenje tečljivosti taljevine te pojava vodika u taljevini koji uzrokuje poroznost.

U radu je vidljivo da se unatoč modifikaciji može dogoditi da mehanička svojstva legure ostanu nepromijenjena. Razlog tome je nepotpuna modifikacija koja je vidljiva nakon obavljene metalografske analize. Također modifikacija sama, bez otplinjavanja taljevine ne poboljšava mehanička svojstva aluminijske legure zbog pojave vodika u taljevini.

Eksperimentalni dio rada je pokazao da se poboljšanje mehaničkih svojstava aluminijske legure postiže ne samo dodavanjem modifikatora, već i povećanjem brzine hlađenja, što je vidljivo nakon obavljenog statičkog vlačnog ispitivanja.

Kako bi se postigla optimalna kombinacija mehaničkih svojstava odljevaka za određeni sustav lijevanja potrebno je poznavanje mehanizama modifikacije te kontrola neželjenih pratećih djelovanja modifikacije.

LITERATURA:

- [1] Bauer, B., Mihalic, I.: *Osnove tehnologije lijevanja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [2] Unkić, F., Cvijić, N., Terzić, K., Cengel P.: *Mehanizam modifikacije Al-Si eutektika*, Ljevarstvo 39 (1997) 4, Zagreb, 1997., 105-113
- [3] Budić, I., Bonačić Mandinić, Z.: *Osnove tehnologije kalupljenja, jednokratni kalupi 1 dio*, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2001.
- [4] Grupa autora: *ASM handbook volume 15: Casting*, ASM International, 1998., 354-359, 1622-1694
- [5] Grupa autora: *ASM handbook volume 9: Metallography and Microstructures 2004*, ASM International, 2004., 107-115, 711-751
- [6] Unkić, F.: *Utjecaj Fe i Mn na mikrostrukturu i mehanička svojstva modificirane eutektičke Al-Si legure*, Strojstvo 40, 1998., 107-112
- [7] Dostupno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>, (20.4.2016.)
- [8] Grupa autora: *ASM handbook volume 2: Properties and Selection: Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, 1990., 17-39, 3139-3150
- [9] Dostupno na: <http://images-of-elements.com>, 20.4.2016.
- [10] Medved, J., Kores, S., Vončina, M., Mrvar, P.: *Utjecaj dodatka cerija na skrućivanje Al-Si slitina*, Ljevarstvo 52 (2010) 3-4, Zagreb, 2010., 85-89
- [11] Mihalic, I., Mance, I., Kramer, I., Bauer, B.: *Aluminijske legure za rad na povišenim temperaturama*, Ljevarstvo 53 (2011) 2, Zagreb, 2011., 43-48
- [12] Zdenka, Zovko Brodarac: *Pregled utjecaja brzog hlađenja na modifikaciju eutektičkog silicija u Al-Si slitinama*, Ljevarstvo 45 (2003) 1, Zagreb, 2003., 23-28
- [13] Dostupno na: http://repositorij.fsb.hr/2030/1/21_11_2012_IVAN_MARASOVIC-DIPLOMSKI_RAD.pdf (20.4.2016.)

- [14] Dostupno na :http://repozitorij.fsb.hr/2097/1/11_01_2013_Diplomski_rad-Jerko_Vlahovic.pdf (20.4.2016.)
- [15] Ramesh, A., Mr. Arunlan, V., Dr. Nagarajan, N.M.: *Studies on Aluminium-Silicon Eutectic Alloy Casting and Design Approach of its Gating System*, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Volume:5 Issue:7, 2014., 193-199
- [16] Boone, G. W., Carver, R. F., Seese, R. G.: *Usitnjavanje zrna i modificiranje podeutektičnih AlSi slitina*, Ljevarstvo 40 (1998) 3, Zagreb, 1998., 71-74
- [17] Davis, J.R.: *Aluminium and aluminium alloys*, ASM International, 1993
- [18] Cook, R., Spooner, S.J.: *Obrada taline predslitinom u aluminijskoj ljevarskoj industriji*, Ljevarstvo 39 (1997) 4, Zagreb, 1997., 91-96
- [19] Dostupno na: http://sales.riotintoaluminium.com/document_get.aspx?id=149, (20.4.2016.)
- [20] Nouruzi Khorsani, A.: *Otplinjavanje može negativno utjecati na gubitak stroncija i bora*, Ljevarstvo 40(1998) 1, Zagreb, 1998., 11-13
- [21] Loper, JR., C.R.: *Fluidnost Al-Si ljevarskih slitina*, Ljevarstvo 36 (1994) 4, Zagreb 1994., 93-97
- [21] Europska norma EN 1706, ožujak 2010.
- [22] Simodal 77, Tehnički list proizvoda – NE metalurgija
- [23] Franz M., Ćorić D.: *Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstva materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008./09.
- [24] Norma DIN-50125-2004, srpanj 2004.