# Utjecaj usitnjavanja zrna al legure na svojstva odljevaka

**Vidović, Ivan**

**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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:607574

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

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








SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Ivan Vidović**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Ivan Vidović

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru, dipl.ing. na savjetima, uputstvima i komentarima pri izradi ovog rada. Zahvaljujem asistentici Ines Mance, dipl.ing. i svim ostalim djelatnicima Katedre i Laboratorija za ljevarstvo, Fakulteta strojarstva i brodogradnje na stručnoj pomoći.

Ivan Vidović

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<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

# DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN VIDOVIĆ** Mat. br.: 0035177387

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ USITNJAVANJA ZRNA Al LEGURE NA SVOJSTVA ODLJEVKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **EFFECT OF Al ALLOY GRAIN REFINEMENT ON THE PROPERTIES OF CAST PART**

Opis zadatka:

U radu je potrebno istražiti utjecaj usitnjavanja zrna na mikrostrukturu i mehanička svojstva aluminijskih odljevaka. Navesti primjere upotrebe aluminjskih odljevaka.
Za zadani odljevak potrebno je razraditi tehnologiju lijevanja i konstruirati kalup. Prilikom pripreme taljevine provesti usitnjavanje zrna. Provesti lijevanje odljevaka sa i bez usitnjavanja zrna. Napraviti 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

SADRŽAJ ..... I

POPIS SLIKA ..... IV

POPIS TABLICA ..... IX

POPIS OZNAKA ..... X

SAŽETAK ..... XI

SUMMARY ..... XII

1. UVOD ..... 1

2. OPĆENITO O LJEVARSTVU ..... 3

2.1. Postupci lijevanja ..... 5

3. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE ..... 8

3.1. Aluminij ..... 8

3.2. Aluminijeve legure ..... 10

3.2.1. Al-Si legure ..... 11

3.2.1.1. Dijagram stanja aluminij-silicij ..... 12

3.2.1.2. Podeutektičke legure ..... 13

3.2.1.3. Eutektičke legure ..... 14

3.2.1.4. Nadeutektičke legure ..... 14

4. SKRUĆIVANJE METALA I LEGURA ..... 16

4.1. Nukleacija [3] ..... 18

4.2. Rast kristala ..... 18

4.3. Razvoj dendritne mikrostrukture ..... 19

5. USITNJAVANJE ZRNA KOD LIJEVANJA Al-LEGURA ..... 21

5.1. Usitnjavanje zrna ..... 21
5.1.1. Prednosti usitnjavanja zrna ..... 23
5.1.2. Metode usitnjavanja zrna ..... 25
5.1.2.1. Brzo hlađenje [19] ..... 25
5.1.2.2. Mehaničko miješanje [19] ..... 26
5.1.2.3. Ograničavanje rasta zrna ..... 26
5.1.2.4. Heterogena nukleacija ..... 31
5.1.2.4.1. Tipovi dodataka kod nukleacije [19] ..... 33
5.1.3. Primjena sredstva za usitnjavanje zrna [19] ..... 34
5.1.4. Vrste sredstva za usitnjavanje zrna ..... 37
5.1.4.1. AlTi predlegure ..... 37
5.1.4.2. AlB predlegure ..... 38
5.1.4.3. AlTiB predlegure ..... 38
5.1.4.4. AlTiC predlegure ..... 40
5.1.5. Proces kontrole kod usitnjavanja zrna ..... 40
6. EKSPERIMENTALNI DIO ..... 42
6.1. Simulacija ..... 43
6.2. Kalupljenje ..... 43
6.2.1. Postupak vodeno staklo-$CO_2$ ..... 44
6.2.2. Lijevanje stošca u kalup od svježe kalupne mješavine ..... 48
6.2.3. Lijevanje u kokilu ..... 53
6.3. Lijevanje ..... 55
6.3.1. Legura ..... 55
6.3.2. Priprema taljevine ..... 56

6.3.3. Lijevanje uzoraka od osnovne AlSi12 legure ..... 58

6.3.4. Lijevanje odljevaka od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom ..... 62

6.4. Priprema ispitnih uzoraka ..... 64

6.4.1. Uzorci za metalografska ispitivanja ..... 65

6.4.2. Epruvete za kidalicu ..... 66

6.5. Ispitivanje uzoraka ..... 67

6.5.1. Metalografska ispitivanja ..... 67

6.5.2. Ispitivanja mehaničkih svojstava ..... 68

6.6. Rezultati i analiza ..... 71

6.6.1. Simulacija lijevanja ..... 71

6.6.2. Rezultati metalografskih ispitivanja ..... 78

6.6.3. Rezultati mehaničkih ispitivanja ..... 81

7. ZAKLJUČAK ..... 84

LITERATURA ..... 86

# POPIS SLIKA

Slika 2.1. Lijevanje metala u kalup [4] ..... 3

Slika 2.2. Prikaz učešća u masi stroja u pojedinim granama strojogradnje [1] ..... 4

Slika 2.3. Ovisnost cijene odljevka o veličini serije [5] ..... 5

Slika 2.4. Podjela postupaka lijevanja metala [6] ..... 6

Slika 2.5. Glavni dijelovi kalupa [6] ..... 6

Slika 3.1. Čisti aluminij [9] ..... 8

Slika 3.2. Aluminijski odljevci - blok motora [10], naplatak [11], kućište mjenjačke kutije [12] 9

Slika 3.3. Svjetska proizvodnja aluminija [13] ..... 10

Slika 3.4. Mikrostruktura Al-Si legure s obzirom na udio Si [14] ..... 12

Slika 3.5. Dijagram stanja Al-Si [2] ..... 13

Slika 3.6. Prikaz mrežne sekundarne faze kod dvije podeutektičke legure [14] ..... 13

Slika 3.7. Prikaz raspršene i mrežaste građe sekundarne faze kod dvije eutektičke legure [14] .. 14

Slika 3.8. Prikaz raspršene i mrežaste građe sekundarne faze kod dvije nadeutektičke legure [14] ..... 15

Slika 4.1. Shematski prikaz krivulje hlađenja i skrućivanja čistog metala [12] ..... 16

Slika 4.2. Shematski prikaz krivulje hlađenja i skrućivanja binarne legure [12] ..... 17

Slika 4.3. Shematski prikaz skrućivanja metala: (a) nukleacija kristala u taljevini metala; (b) i (c) rast kristala s napredovanjem skrućivanja; (d) skrućivanje je završeno (vide se pojedine granice zrna) [12] ..... 18

Slika 4.4. Shematski prikaz granične površine kruto/tekuće: (a) atomski gruba (hrapava) ili difuzna granična površina; (b) glatka granična površina [12] ..... 19

Slika 4.5. Shematski prikaz probijanja početnog ravnog fronta u ćelije [16] ..... 20

Slika 4.6. Shematski prikaz grananja dendrita [17] ..... 20

Slika 5.1. Struktura zrna odljevka od 3004 legure ((a) neusitnjena, (b) usitnjena sa 10 ppm B dodanog u obliku AlTiB predlegure) [20] ..... 22

Slika 5.2. Utjecaj titan-bor (Ti-B) cjepiva na Al-Si leguru kao funkciju sadržaja titana i brzine hlađenja (1 – 1,5 ºC/s, 2 – 0,5 ºC/s, 3 – 0,08 ºC/s) [19] ..... 24

Slika 5.3. Mehanička svojstva legure A356 sa usitnjenim i neusitnjenim zrnom [19] ..... 25

Slika 5.4. Utjecaj brzine hlađenja na veličinu zrna [21] ..... 26

Slika 5.5. Konstitucijsko pothlađenje tijekom očvršćivanja legure s sastavom $C_0$, (a) fazni dijagram, (b) sloj obogaćen otopljivim supstancama ispred površine čvrsto/tekuće, (c) stabilno sučelje, (d) nestabilno sučelje [19] ..... 28

Slika 5.6. Utjecaj legirnih dodataka na veličinu zrna kod aluminija [19] ..... 29

Slika 5.7. Veličina zrna kao funkcija parametra ograničenja rasta Q [21] ..... 31

Slika 5.8. Shematski prikaz heterogene nukleacije embrija u obliku odsječka kugle na ravnoj stijenci kalupa [21] ..... 32

Slika 5.9. Shematski prikaz heterogene nukleacije u pukotini stijenke kalupa: (a) kritični nukleus, (b) gornji nukleus ne može izrasti iz pukotine i postati klicom dok donji može [21] ..... 33

Slika 5.10. Shematski prikaz heterogene nukleacije na stranoj čestici radijusa $R^S$ [21] ..... 33

Slika 5.11. Utjecaj temperature lijevanja (a), vremena zadržavanja (b), na veličinu zrna nekoliko ljevačkih legura aluminija [19] ..... 35

Slika 5.12. Usporedba učinkovitosti tri sredstva za usitnjavanje zrna kod aluminija [19] ..... 36

Slika 5.13. Ravnotežni dijagram Al-Ti [21] ..... 37

Slika 5.14. Usporedba učinkovitosti glavnih sredstava za usitnjavanje zrna za aluminijske legure [19] ..... 38

Slika 5.15. Učinkovitost titan-bor sredstva za usitnjavanje zrna na aluminijske legure 356 i 319 [19] ..... 39

Slika 5.16. Rezultat dodavanja 5Ti-1B sredstva za usitnjavanje zrna u Al-7Si leguru. (a) prije, (b) poslije dodavanja [19] ..... 40

Slika 5.17. Shematski prikaz veličina zrna aluminija procijenjen na osnovu toplinske analize [21] .....41

Slika 6.1. Model epruvete .....42

Slika 6.2. Model i dimenzije stošca.....43

Slika 6.3. Kalupnik s modelom .....44

Slika 6.4. Posipavanje modela praškom likapodij.....44

Slika 6.5. Popunjavanje kalupnika kalupnom mješavinom.....45

Slika 6.6. Sabijanje.....45

Slika 6.7. Bušenje odušaka u kalupu.....46

Slika 6.8. Očvršćivanje kalupne mješavine propuhivanjem plinom $CO_2$ .....46

Slika 6.9. Vađenje jednog dijela kalupa iz kalupnika .....47

Slika 6.10. Oba dijela kalupa .....47

Slika 6.11. Gotov kalup.....48

Slika 6.12. Postavljanje modela u kalupnik .....49

Slika 6.13. Posipavanje modela praškom likapodij.....49

Slika 6.14. Nasipavanje modelnog pijeska.....50

Slika 6.15. Nasipavanje dopunskog pijeska .....50

Slika 6.16. Sabijanje.....51

Slika 6.17. Odstranjivanje viška kalupne mješavine.....51

Slika 6.18. Vađenje modela iz kalupa .....52

Slika 6.19. Ručno zaglađivanje rubova .....52

Slika 6.20. Zagrijavanje metalne kokile.....53

Slika 6.21. Mjerenje temperature kokile pomoću pirometra.....54

Slika 6.22. Naštrcavanje premaza od cirkonskog praha po unutrašnjem dijelu kokile.....54

Slika 6.23. Gotova kokila ..... 55

Slika 6.24. Peć za pripremu taljevine ..... 57

Slika 6.25. Punjenje lonca ingotima ..... 58

Slika 6.26. Skidanje troske iz taljevine ..... 58

Slika 6.27. Mjerenje temperature taljevine ..... 59

Slika 6.28. Lijevanje u kalupe izrađene postupkom vodeno staklo-$CO_2$ ..... 59

Slika 6.29. Lijevanje stošca u kalup od svježe kalupne mješavine ..... 60

Slika 6.30. Lijevanje odljevka u metalnu kokilu ..... 60

Slika 6.31. Vađenje odljevka iz kokile ..... 61

Slika 6.32. Istresanje odljevaka ..... 61

Slika 6.33. Odljevci od osnovne AlSi12 legure ..... 62

Slika 6.34. Tanke kriške predlegure AlTi5B1 ..... 62

Slika 6.35. Vaganje predlegure AlTi5B1 na polužnoj vagi ..... 63

Slika 6.36. Mjerenje temperature taljevine nakon obrade ..... 63

Slika 6.37. Odljevci od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom ..... 64

Slika 6.38. Stroj za brušenje „Buehler“ ..... 65

Slika 6.39. Uređaj za poliranje ..... 66

Slika 6.40. Uzorci za metalografska ispitivanja ..... 66

Slika 6.41. Dimenzije epruvete ..... 67

Slika 6.42. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje ..... 67

Slika 6.43. Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“ ..... 68

Slika 6.44. Hidraulička kidalica „VEB WPM“ ..... 69

Slika 6.45. Računalo opremljeno programom „TIRA“ za analizu rezultata ..... 70

Slika 6.46. Početak statičkog vlačnog ispitivanja epruvete ..... 70

Slika 6.47. Lom epruvete ..... 70

Slika 6.48. Ispitane epruvete ..... 71

Slika 6.49. Početak punjenja epruvete ..... 72

Slika 6.50. Završetak punjenja epruvete ..... 72

Slika 6.51. Početak skrućivanja epruvete ..... 73

Slika 6.52. Tijek skrućivanja epruvete ..... 73

Slika 6.53. Završetak skrućivanja epruvete ..... 74

Slika 6.54. Raspored poroznosti po epruveti ..... 74

Slika 6.55. Početak punjenja stošca ..... 75

Slika 6.56. Početak skrućivanja stošca ..... 75

Slika 6.57. Tijek skrućivanja odljevka ..... 76

Slika 6.58. Završetak skrućivanja odljevka ..... 76

Slika 6.59. Raspored poroznosti po odljevku ..... 77

Slika 6.60. Pogled na poroznost iz presjeka ..... 77

Slika 6.61. Mikrostruktura neusitnjenog uzorka - vrh stošca ..... 78

Slika 6.62. Mikrostruktura neusitnjenog uzorka – sredina stošca ..... 78

Slika 6.63. Mikrostruktura neusitnjenog uzorka – baza stošca ..... 79

Slika 6.64. Mikrostruktura usitnjenog uzorka – vrh stošca ..... 79

Slika 6.65. Mikrostruktura usitnjenog uzorka – sredina stošca ..... 80

Slika 6.66. Mikrostruktura usitnjenog uzorka – baza stošca ..... 80

Slika 6.67. Grafički prikaz rezultata vlačne čvrstoće $R_m$ ..... 82

# POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [2] ..... 9

Tablica 5.1. Vrijednost nagiba likvidusa *m* i koeficijent raspodjele *k* (izračunat iz parametara za neke uobičajene otopljene elemente u aluminiju) [21] ..... 30

Tablica 6.1. Mehanička svojstva legure EN 44100 [22] ..... 56

Tablica 6.2. Kemijski sastav legure EN 44100 [22] ..... 56

Tablica 6.3. Rezultati ispitivanja na kidalici ..... 82

# POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---|---|---|
| $T_L$ | K | temperatura likvidusa |
| $T_S$ | K | temperatura solidusa |
| $T_U$ | K | temperatura pothlađenja |
| $T_E$ | K | temperatura eutektika |
| $T_{min}$ | K | najniža temperatura hlađenja |
| $T_p$ | K | temperatura ulijevanja |
| $T_N$ | K | temperatura nukleacije |
| $T_r$ | K | temperatura rekalescencije |
| $\alpha$ | % | primarni kristali mješanci aluminija |
| $\beta$ | % | intermetalni spoj $Al_3Mg_2$ |
| $\theta$ | % | čestice intermetalnog spoja $Al_2Cu$ |
| $T_t$ | K | talište |
| E | $N/mm^2$ | modul elastičnosti |
| $\alpha$ | $10^{-6}/°C$ | koeficijent toplinskog istezanja |
| G | S | električna vodljivost |
| $\delta_{0,2}$ | $N/mm^2$ | granica razvlačenja |
| Rm | $N/mm^2$ | vlačna čvrstoća |
| A | % | istezljivost |
| $\rho$ | $Kg/m^3$ | gustoća |
| $C_0$ | % | sadržaj otopljenog elementa u taljevini |
| $\gamma_{SM}$ | $J/mol^2$ | energija granične površine nukleant/kristal |
| $\gamma_{SL}$ | $J/mol^2$ | energija granične površine taljevina/kristal |
| $\gamma_{ML}$ | $J/mol^2$ | energija granične površine nukleant/taljevina |

# SAŽETAK

U okviru ovog rada opisano je usitnjavanje zrna kod lijevanja aluminijskih legura. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu ukratko je objašnjeno lijevanje i postupci lijevanja, također je opisan aluminij i njegove legure. Prikazan je pregled osnovnih teorija skrućivanja metala i legura, mehanizama nukleacije, odnosno započinjanja procesa skrućivanja te mehanizama rasta kristala. Objašnjen je postupak obrade taljevine usitnjavanjem zrna aluminijskih legura. Ukratko su objašnjene predlegure za usitnjavanje zrna te karakteristike i svojstva njima obrađene taljevine.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitivan je utjecaj usitnjavanja zrna aluminijske legure AlSi12. Cilj je bio utvrditi učinak usitnjavanja zrna predlegurom AlTi5B1 kao i različitih brzina hlađenja na mikrostrukturu i mehanička svojstva navedene legure. U tu svrhu provedeno je lijevanje osnovne AlSi12 legure i AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom. Pripremljeni su uzorci i epruvete te su provedena metalografska i mehanička ispitivanja.

Na temelju dobivenih rezultata pokazalo se da usitnjavanje zrna predlegurom AlTi5B1 povoljno utječe na mikrostrukturu legure, ali dolazi do smanjenja mehaničkih svojstava i istezljivosti.

Ključne riječi: AlSi12 legura, skrućivanje, usitnjavanje zrna, mikrostruktura, mehanička svojstva.

## SUMMARY

Grain refinement of cast aluminum alloy was investigated and described in theoretical and experimental part of this paper.

Theoretical part explains casting, casting processes as well as aluminum and it's alloys. Metal and alloy solidification theories, nucleation and crystal growth mechanisms are reviewed. Grain refinement of liquid metal is explained. Short review of grain refinemet master alloys and their effects on aluminum alloys is presented.

Influence of grain refinement on AlSi12 alloy was investigated within experimental part of this paper. Objective was to determine the influence of AlTi5B1 grain refinement and cooling rates on microstructure and mechanical properties of alloy examined. For this purpose base alloy AlSi12 as well as AlTi5B1 refined AlSi12 alloy were cast. Test specimens for micrography and mechanical testing were examined.

Results showed that AlTi5B1 grain refinement had positive influence on microstructure, but mechanical properties and elongation values were lowered.

Key words: AlSi12 alloy, solidification, grain refinement, microstructure, mechanical properties.

# 1. UVOD

Postupkom lijevanja nastoji se postići što veća kvaliteta proizvoda uz što niže proizvodne troškove. No, lijevanje metala je vrlo kompleksan postupak pa je moguće javljanje nepoželjnih rezultata. Samo neke od varijabli koje utječu na kvalitetu i svojstva odljevaka su kvaliteta uloženih materijala, proces taljenja i obrade taljevine, metalurško stanje i čistoća taljevine, temperatura i brzina lijevanja, uljevni sustav, kao i mnogi drugi utjecaji [1].

Izrada odljevaka u pravilu se sastoji od tri međusobno povezane operacije, a to su taljenje, kalupljenje te ulijevanje taljevine. Nakon hlađenja odljevka u jednokratnom kalupu, slijedi njegovo istresanje iz kalupa, čišćenje, brušenje, završna obrada i kontrola te skladištenje i otprema odljevaka. Za vrijeme ulijevanja, skrućivanja i ohlađivanja, taljevina na kalup djeluje mehanički, kemijski i toplinski. Svako od navedenih djelovanja ima utjecaja na kvalitetu odljevaka pa ih tijekom izrade odljevaka treba svesti na najmanju moguću mjeru [1].

Kao višenamjenski metal aluminij se prvenstveno koristi legiran s drugim elementima. Aluminijske legure karakterizirane su izvrsnim mehaničkim svojstvima, tj. visokom čvrstoćom, manjom masom u odnosu na iste odljevke drugih metala. Osim navedenog, aluminijske legure posjeduju dobru livljivost, otpornost na koroziju, otpornost prema trošenju, zavarljivost i strojnu obradivost. Niska temperatura taljenja i visoka livljivost Al-Si eutektičkih legura i legura sa sastavom u blizini eutektičkog, koje čine 90% proizvodnje odljevaka od aluminijskih legura, omogućuju široku primjenu tih materijala u mnogim industrijskim granama kao npr. u proizvodnji transportnih vozila (automobilska, zrakoplovna industrija, industrija željezničkih vozila), građevinarstvu, strojogradnji, itd. Mehanička svojstva odljevaka, posebno istezanje i žilavost poboljšavaju se raznim postupcima obrade taljevine poput modifikacije i usitnjavanja zrna naknadnom toplinskom obradom [2].

Sredstva za usitnjavanje zrna, odnosno cjepiva, su kemijski dodaci taljevini koji usitnjavaju zrna primarnog aluminija, odnosno mikrostrukturu Al-Si legura. Korištenjem sredstava za usitnjavanje zrna mogu se značajno poboljšati mehanička svojstva, napajanje odljevaka, smanjiti poroznost, a sastav taljevine podeutektičkih Al-Si legura postaje ujednačeniji. Na taj način poboljšava se kvaliteta odljevaka. Sredstvima za usitnjavanje zrna mijenja se usmjereni stubičasti rast kristala u pogodniji oblik kristala [3].

U radu je potrebno istražiti utjecaj usitnjavanja zrna na mikrostrukturu i mehanička svojstva aluminijskih odljevaka. Za zadani odljevak potrebno je razraditi tehnologiju lijevanja i

konstruirati kalup. Prilikom pripreme taljevine provesti usitnjavanje zrna. Provesti lijevanje odljevaka sa i bez usitnjavanja zrna. Eksperimentalni dio ovoga rada proveden je u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Na odljevcima od AlSi12 legure provedena su metalografska ispitivanja i mehanička ispitivanja te su analizirani rezultati.

# 2. OPĆENITO O LJEVARSTVU

Proizvodnja metalnih odljevaka jedan je od najstarijih i najučinkovitijih postupaka oblikovanja proizvoda. Najstariji pronađeni odljevci potječu iz perioda oko 3200 godina prije nove ere. Lijevanje je jedna od tehnologija oblikovanja predmeta od metala kojom se taljevina (rastaljeni metal) oblikuje ulijevanjem u kalupe. Taljevina poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine i zadržava je nakon skrućivanja [1].

Tehnologija lijevanja jedan je od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja proizvoda. Usprkos različitim konkurentnim i novim tehnologijama proizvodnje, velika potražnja za odljevcima, zbog jednostavnosti proizvodnje nastavit će se i dalje. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade istovrsnih proizvoda čine ju iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju zbog visoke produktivnosti i lake mogućnosti izrade replika. Zbog velike proizvodnosti, pogodna je i za automatizaciju, a kako se radi o proizvodnji karakteriziranoj transportom teških predmeta, neophodan preduvjet je mehanizacija iste.



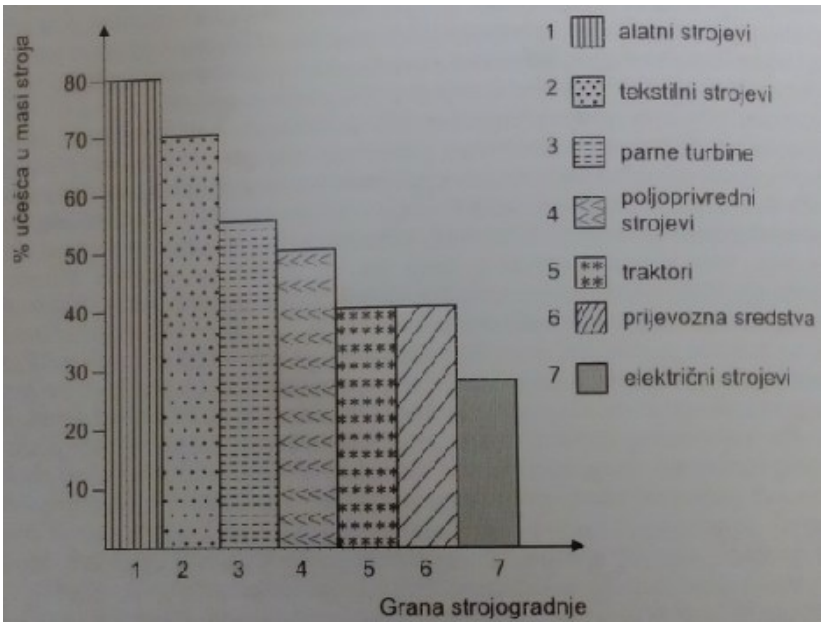
Slika 2.1. Lijevanje metala u kalup [4]

Ona je često jedina tehnologija za izradu vrlo složenih dijelova s unutrašnjim šupljinama (npr. blokova motora i dr.) ili za velika i masivna kućišta strojeva. Oblikovanje se vrši u tekućem stanju, a taljevina kao i sve tekućine, zahtijeva minimalan utrošak energije za promjenu oblika, pogotovo što se kao uljevna sila najčešće koristi gravitacija. Ukupni utrošak energije ipak je znatan jer materijal prethodno treba rastaliti. Budući da utrošena energija ovisi o utrošenoj masi,

a ne o složenosti oblika, iskorištenje energije je povoljnije što je oblik složeniji. Zbog toga je lijevanje nenadomjestiva tehnologija u izradi proizvoda složenog oblika [1].

Ljevarstvo još uvijek spada u rizične tehnologije jer je proces kontinuiran te ga je teško u cijelosti kontrolirati. Posebno su visoki zahtjevi za kvalitetom i točnošću odljevaka te mehaničkim i drugim svojstvima jer se dopušta samo do 5% neispravnih odljevaka. Mehanička i dimenzijska svojstva te drugi posebni zahtjevi u pogledu kvalitete odljevaka, postižu se skrućivanjem taljevine i promjenom agregatnog stanja, dakle još uvijek nedovoljno istraženim procesom, tako da je upravljanje kvalitetom vrlo složeno. To znači da izrada dobrih odljevaka zahtjeva veliko znanje, tim više što se proces formiranja odljevka ne može pratiti vizualno jer taljevina ispunjava zatvoreni kalup [1].

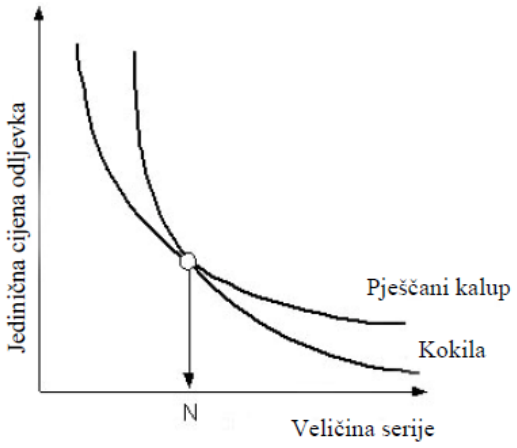
Ljevarstvo danas predstavlja sumu znanja s područja znanstvenih i tehničkih disciplina. Ljevački postupci usavršavani su saznanjima iz područja kemije, fizike, metalurgije, strojarstva, mineralogije, elektrotehnike i metalurgije, što je dovelo do brzog razvoja proizvodnje odljevaka. Najveća primjena odljevaka je u automobilskoj industriji u obliku željeznog lijeva ili aluminijskog lijeva, npr. u jedan automobil ugrađeno je više od 100 odljevaka. Isto tako odljevci se koriste u strojogradnji (slika 2.2.), građevinskoj industriji, medicini, brodogradnji, za željeznička vozila, energetici, zračnoj i svemirskoj industriji, kao i kod lijevanja umjetničkih skulptura [1].




Slika 2.2. Prikaz učešća u masi stroja u pojedinim granama strojogradnje [1]

Na slici 2.2. vidljivo je da je kod alatnih strojeva najveće učešće u masi stroja (80%), a najmanje kod električnih strojeva (30%). Kod traktora i prijevoznih sredstava učešće u masi stroja je (40%), a s obzirom ne velike proizvodne serije, proizvodnja odljevaka za ove grane strojogradnje je značajna.

Izbor tehnologije lijevanja ovisi o nizu parametara kao što su masa odljevka, dimenzije odljevka, vrsta legure korištena za lijevanje, veličina serije odljevaka i dr. Treba odabrati tehnologiju lijevanja odljevaka koja će dati najmanju cijenu jednog odljevka, uvažavajući da se odabranom tehnologijom lijevanja mogu zadovoljiti svi traženi uvjeti kvalitete. Obzirom na potrebe za odljevcima, danas se većina odljevaka lijeva u jednokratne meke pješčane kalupe. Međutim, cijena jednog odljevka između ostalog značajno ovisi o veličini serije, kao što je prikazano na slici 2.3. [5].

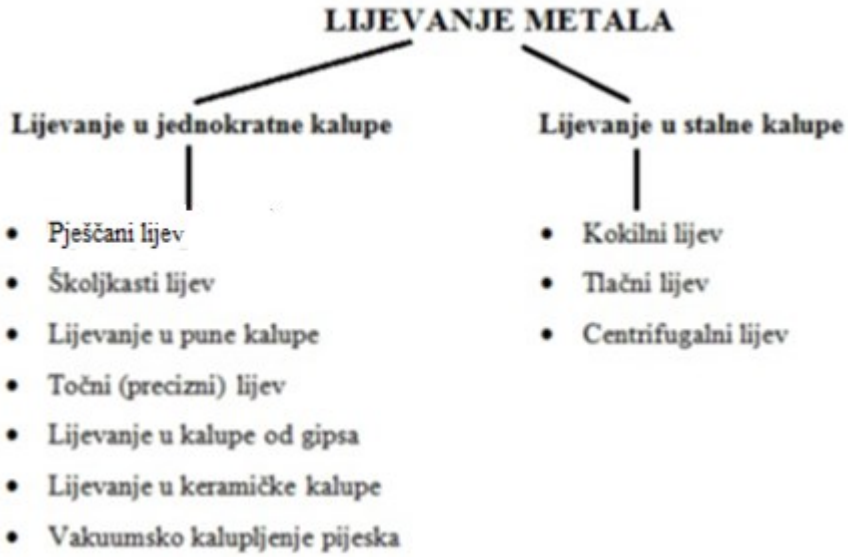



Slika 2.3. Ovisnost cijene odljevka o veličini serije [5]

Na slici 2.3. vidljivo je da je cijena jednog odljevka kod pojedinačne proizvodnje manja pri lijevanju u pješčani kalup od cijene odljevka lijevanog u kokilu. Suprotno vrijedi za serijsku i masovnu proizvodnju. Kao granični broj može se uzeti $N = 500 \ldots 1000$ komada, kada se od lijevanja u meki pješčani kalup prelazi na lijevanje u kokilu.

## 2.1. Postupci lijevanja

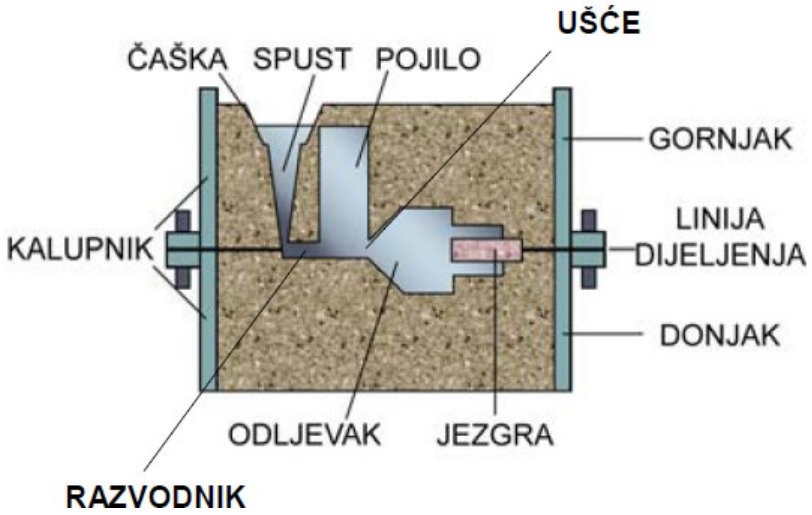
Postupci lijevanja dijele se u dvije skupine, a to su lijevanje u jednokratne kalupe i lijevanje u stalne kalupe (slika 2.4.). Pješčani lijev je primjenjiv za lijevanje gotovo svih materijala pa tako i aluminija.




Slika 2.4. Podjela postupaka lijevanja metala [6]

Nakon lijevanja u jednokratne kalupe, kalup je potrebno uništiti kako bi se izvadio odljevak. Materijali za izradu jednokratnih kalupa su pijesak, gips i slični materijali kojima se dodaju veziva i dodaci. Stalni kalupi (kokile), najčešće se izrađuju od metala ili rijeđe od grafita. Koriste se više puta i isplativiji su u velikoserijskoj proizvodnji. Za manje serije isplativiji su jednokratni kalupi [6].

Kalup služi za određivanje oblika odljevka kako je prikazano na slici 2.5. Vanjski oblik odljevka određuje stijenke kalupne šupljine, dok im unutarnji oblik (ukoliko se zahtjevaju šupljine) određuju umetci koji se nazivaju jezgre.




Slika 2.5. Glavni dijelovi kalupa [6]

Osim izrade i pripreme kalupa, tehnologija izrade odljevaka obuhvaća i operaciju ulijevanja u kalupe, od tog trenutka započinje proces formiranja odljevaka. Pri ulijevanju taljevine u kalup vrlo je važno odabrati pravilnu temperaturu ulijevanja, tehniku te brzinu ulijevanja.

Uljevni sustav je mreža kanala kojima se taljevina dovodi do kalupne šupljine. Potrebno je ispuniti kalupnu šupljinu u što kraćem vremenu, sa što manjim pregrijanjem, što mirnijim strujanjem i uz što manji utrošak materijala. Osnovni dijelovi uljevnog sustava su čaška, spust, razvodnik i ušće.

Pojilo ima funkciju izvora taline kako bi se nadoknadio materijal jer tijekom skrućivanja dolazi do smanjenja volumena. Pojilo treba biti oblikovano tako da skrućuje nakon skrućivanja odljevka [6].

# 3. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE

## 3.1. Aluminij

Aluminij (Al) je najzastupljeniji metal na Zemlji i treći element po udjelu na Zemlji (premašuju ga samo kisik i silicij). Zemljina kora sadrži 8% aluminija, a proizvodi se od komercijalnog boksita u kojem je aluminij zastupljen sa 40 – 60%. Zalihe boksita su neograničene, a kada se komercijalno uporabljivi boksit iscrpi, postoje neiscrpna ležišta aluminijskih silikata u kojima ima 20 – 30% Al. Unatoč slabom početku u davnoj prošlosti, uporaba aluminija je za manje od stoljeća i pol toliko porasla da je postao drugi najkorišteniji metal na svijetu [7].

Čisti aluminij je srebrno-bijeli metal (slika 3.1). Mekan je, krt, žilav te male gustoće (skoro tri puta manja gustoća, nego kod čelika). Otporan je na djelovanje atmosferskih plinova, nekih kiselina i koroziju. Dobar je vodič topline i elektriciteta [8].



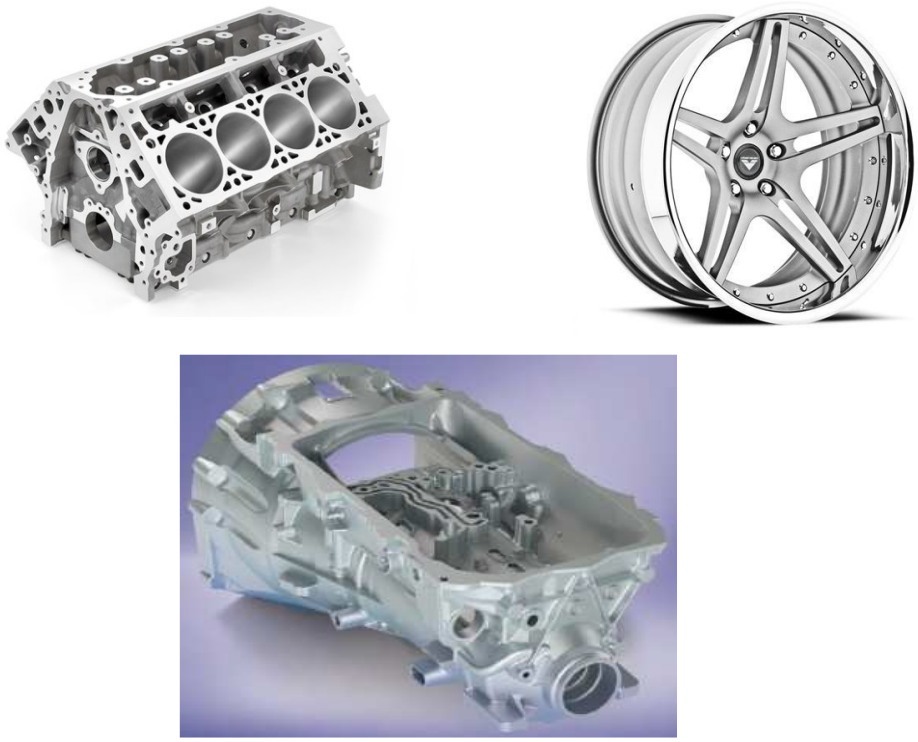
Slika 3.1. Čisti aluminij [9]

Mehanička i druga svojstva aluminija, vidljiva su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [2]

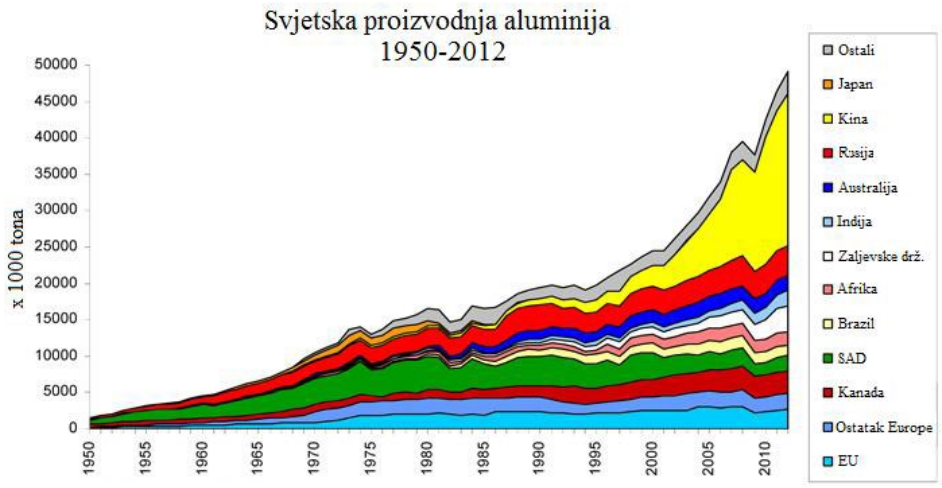
| | | |
|---|---|---|
| Gustoća ($\rho$) | $kg/m^3$ | 2700 |
| Talište ($T_t$) | °C | 660 |
| Modul elastičnosti (E) | $N/mm^2$ | 69000 |
| Toplinska rastezljivost ($\alpha$) | $10^{-6}/K$ | 23,8 |
| Električna vodljivost (G) | S | 36...37,8 |
| Granica razvlačenja ($\delta_{0,2}$) | $N/mm^2$ | 20...120 |
| Vlačna čvrstoća (Rm) | $N/mm^2$ | 40...180 |
| Istezljivost (A) | % | 4...50 |

Aluminij ima široki raspon uporabe zbog svojih dobrih svojstava te su neka od njih vidljiva na slici 3.2.



Slika 3.2. Aluminijski odljevci - blok motora [10], naplatak [11], kućište mjenjačke kutije [12]

Proizvodnja aluminija od 1950. do 2012. godine, raste ili je jednolika u većini svjetskih zemalja kao što je prikazana slikom 3.3.




Slika 3.3. Svjetska proizvodnja aluminija [13]

Čisti aluminij se zbog svojih svojstava kao što su: loša livljivost, niska granica razvlačenja (7-11 MPa) te niske vlačne čvrstoće, 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. Najčešće korištene aluminijske legure su: aluminij-silicij (Al-Si), aluminij-bakar (Al-Cu) i aluminij-magnezij (Al-Mg).

### 3.2. Aluminijeve legure

Legiranje ima za cilj prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstava, ponajprije vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, katkada žilavosti ili livljivosti. Postoje dvije skupine legura aluminija, a to su ljevačke legure i gnječive legure. Ovaj rad osvrće se isključivo na ljevačkim legurama. Aluminiju se radi poboljšanja ljevačkih svojstava dodaje silicij, ali nekada i u manjim količinama bakar ili magnezij. Glavna razlika između ljevačkih i gnječivih legura je u njihovoj livljivosti [2].

Najvažniji legirni elementi su : bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn). Kao dodaci ili primjese (nečistoće) prisutni su u manjoj količini željezo (Fe), krom (Cr) i titan (Ti). Kompleksnije legure nastaju njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak i drugih legirnih elemenata koji poboljšavaju svojstva osnovne legure, kao npr. čvrstoću i tvrdoću, omogućuju toplinsko očvrsnuće, pospješuju usitnjenje zrna, poboljšavaju rezljivost itd. Dodaci za posebne svrhe su nikal (Ni), kobalt (Co), litij (Li), srebro (Ag), vanadij (V), cirkonij (Zr), kositar (Sn) i olovo (Pb). Elementi berilij (Be), bor (B) i natrij (Na) dodaju se u vrlo malim količinama [2].

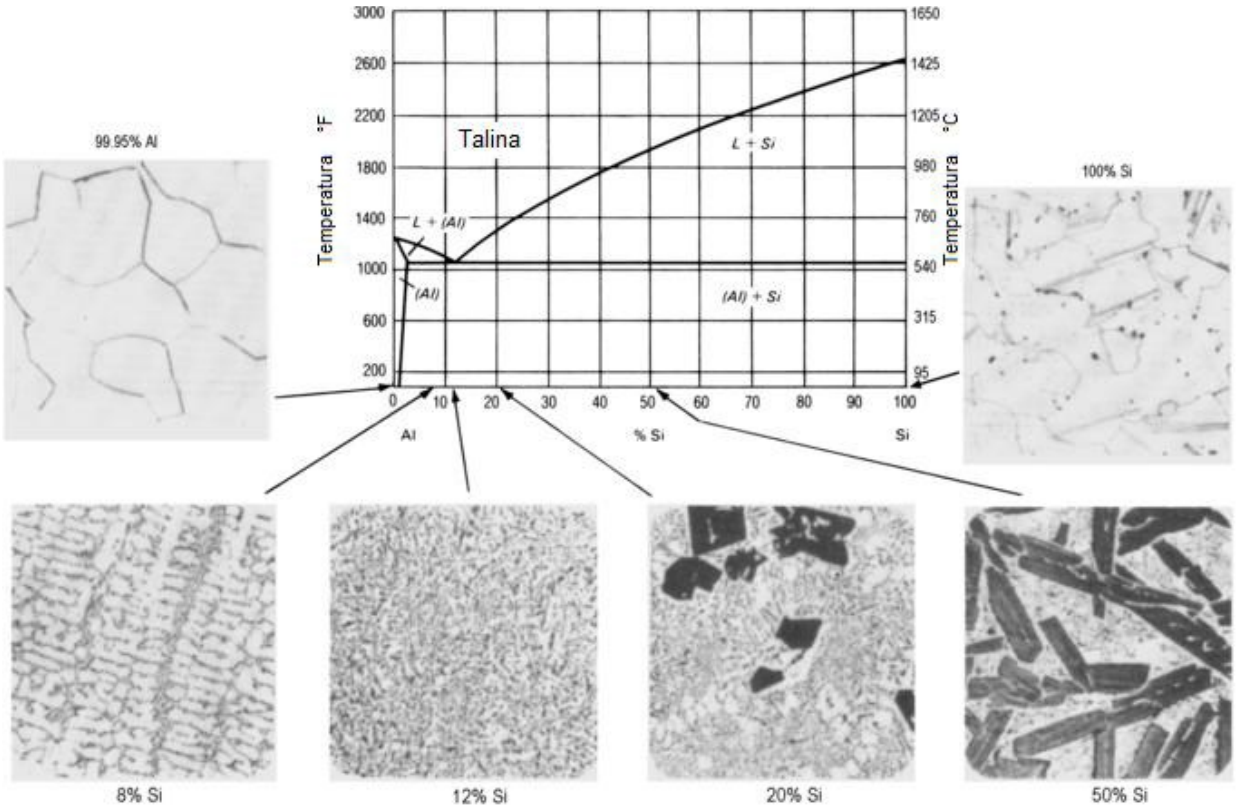
Svi legirni elementi su pri dovoljno visokim temperaturama potpuno topljivi u rastaljenom aluminiju. Topljivost elemenata je ograničena u kristalima mješancima. Neotopljeni elementi stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve. Topljivost legirnih elemenata u aluminiju, kao i udio, veličina, oblik i raspodjela intermetalnih spojeva, određuje fizikalna, kemijska i proizvodna svojstva legura.

Utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu prikazuje se dijagramima stanja. Iz dijagrama stanja vidljiv je tijek skrućivanja, nastajanje faza i topljivost u čvrstom stanju u ovisnosti o temperaturi i sastavu. Dijagrami stanja vrijede za čiste legure u termodinamičkoj ravnoteži. Pri proizvodnji i preradi tehničkih legura ti preduvjeti nisu ispunjeni i zato su moguće razlike između ravnotežnog i stvarnog stanja [2].

### *3.2.1. Al-Si legure*

Al-Si legure imaju izvrsnu livljivost i otpornost prema koroziji, malu čvrstoću i slabo se strojno obrađuju. Imaju malu gustoću i mali koeficijent toplinskog rastezanja. Kod ovih legura, silicij je osnovni element koji doprinosi dobroj livljivosti aluminijevih legura pa su to najrasprostranjenije legure u grupi lijevanih legura, posebno one s 10% do 13% Si i rijetko s manjom količinom bakra. Te su legure približno eutektičkog sastava što ih čini osobito prikladnim za tlačni lijev budući da je njihov interval skrućivanja uzak. Eutektičke legure pogodne su za primjenu u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, a odljevci od ovakvih legura mogu se primjeniti do najviše 200 °C [2].

S obzirom na udio silicija u Al-Si legurama, razlikujemo podeutektičke legure (<12% Si), eutektičke legure (12-13% Si) te nadeutektičke legure (>13% Si) [2]. Promjenom udjela silicija mijenja se i mikrostruktura legure što je vidljivo na slici 3.4.

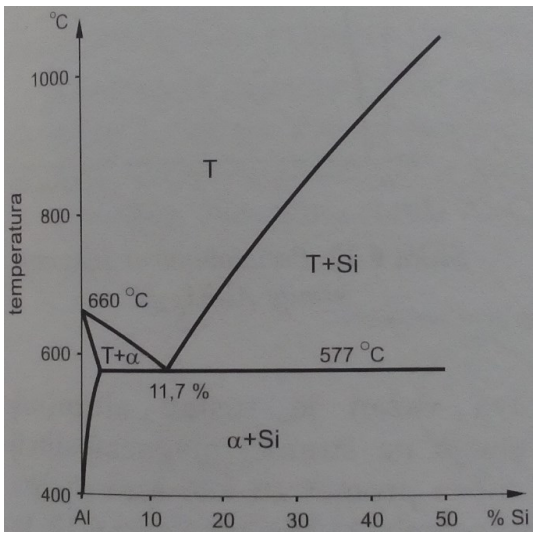



Slika 3.4. Mikrostruktura Al-Si legure s obzirom na udio Si [14]

Na slici 3.4. vidljivo je da povečanjem udjela silicija iznad eutektičkog raste veličina primarnih kristala silicija, zbog čega opada čvrstoća i istezljivost. Krupni kristali silicija otežavaju mehaničku obradu rezanjem, a umanjuju i otpornost na koroziju, ali povećavaju otpornost trošenju.

### *3.2.1.1. Dijagram stanja aluminij-silicij*

Dijagram stanja prikazuje utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu. Dijagram stanja aluminij-silicij je eutektičkog tipa s eutektikom pri 11,7% Si i temperaturi 577 °C (slika 3.5). Pri toj temperaturi se u kristalima mješancima aluminija ($\alpha$) otapa 1,65% Si. Svojstva pretežno ovise o žilavim mješancima aluminija, a manje o krhkom siliciju. To su povoljni preduvjeti za lijevanu leguru, a uz to eutektički sastav omogućuje i dobro popunjavanje kalupa pri lijevanju i daje sitnozrnatu mikrostrukturu.

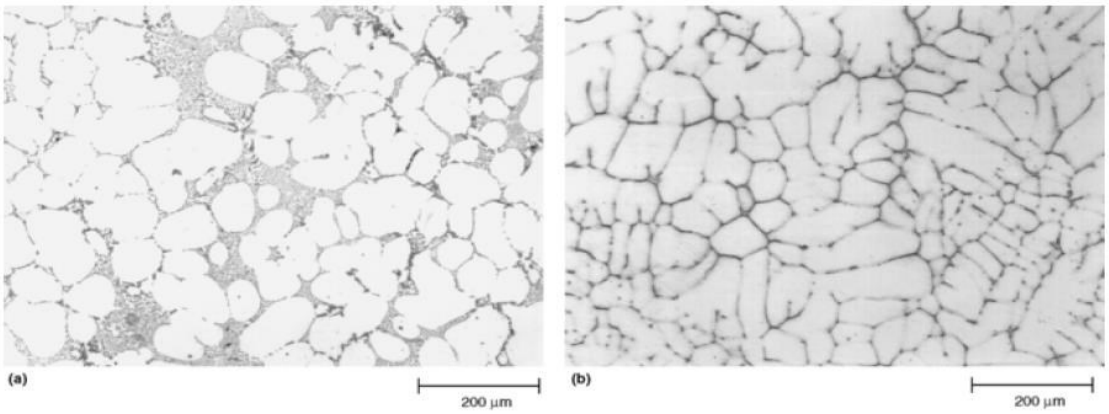



Slika 3.5. Dijagram stanja Al-Si [2]

*3.2.1.2. 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 [15].

Kao što je prikazano na slici 3.6 podeutektičke aluminij-silicij legure imaju mrežnu građu sekundarne faze (siva boja na slici) koja okružuje zrna u čvrstoj otopini aluminija (svijetlije na slici) [14].



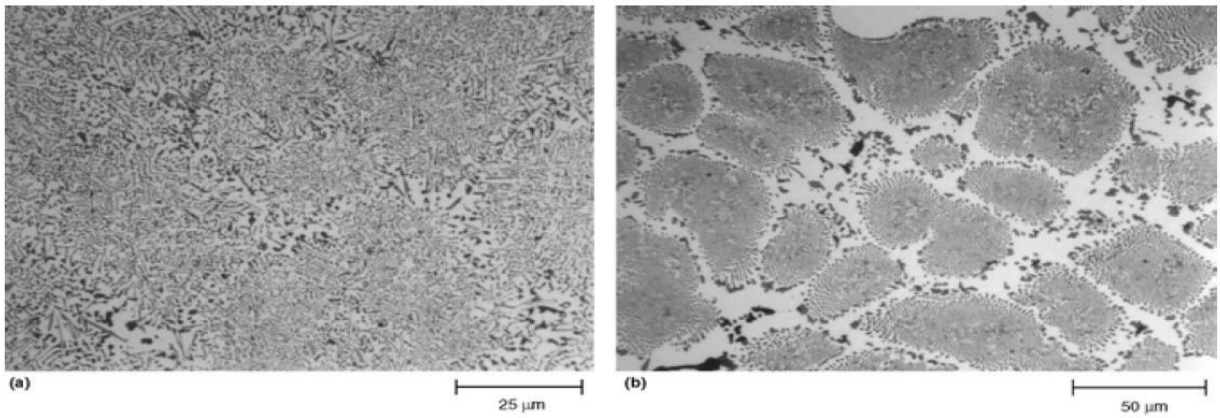

Slika 3.6. Prikaz mrežne sekundarne faze kod dvije podeutektičke legure [14]

Mikrostruktura podeutektičke legure sastoji se od primarno izlučenog $\alpha_{Al}$ i eutektika ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$). 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 aluminija ($\alpha_{Al}$) i eutektika ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$), nego se prilikom skrućivanja javljaju i drugi intermetalni spojevi i faze. Osim toga, i nečistoće utječu na složenost procesa skrućivanja [15].

### *3.2.1.3. Eutektičke legure*

Eutektičke Al-Si legure se primjenjuju za proizvodnju dijelova namijenjenih za rad pri povišenim temperaturama, posebice u automobilskoj industriji za izradu klipova i ventila. Legure za izradu klipova moraju podnositi temperature više i od 350 °C te toplinski umor između sobne temperature i 300 °C. Moraju imati visoku toplinsku vodljivost, povišenu čvrstoću te toplinsku stabilnost [15].

Eutektička se legura sastoji od čistog eutektika ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$). Za razliku od podeutektičkih legura kod eutektičkih legura sekundarna faza može imati mješovitu građu, mrežastu i raspršenu što je vidljivo na slici 3.7 [14].

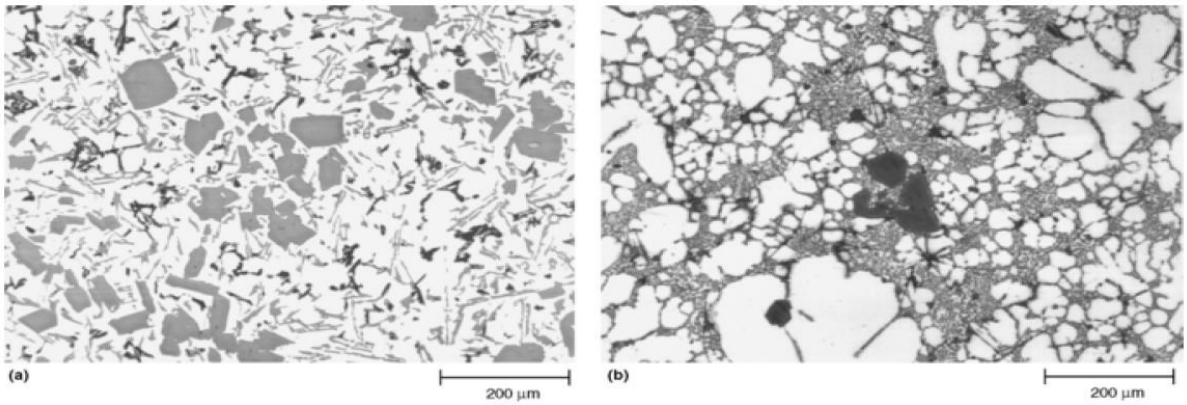



Slika 3.7. Prikaz raspršene i mrežaste građe sekundarne faze kod dvije eutektičke legure [14]

### *3.2.1.4. Nadeutektičke legure*

Al-Si legure s više od 12 mas. % silicija imaju nadeutektičku mikrostrukturu koja se najčešće sastoji od primarne silicijske faze $\beta_{Si}$ 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 [14].

Kao i kod eutektičkih legura kod nadeutektičkih legura sekundarna faza može imati mješovitu građu, mrežastu i raspršenu što je vidljivo na slici 3.8 [14].




Slika 3.8. Prikaz raspršene i mrežaste građe sekundarne faze kod dvije nadeutektičke legure [14]

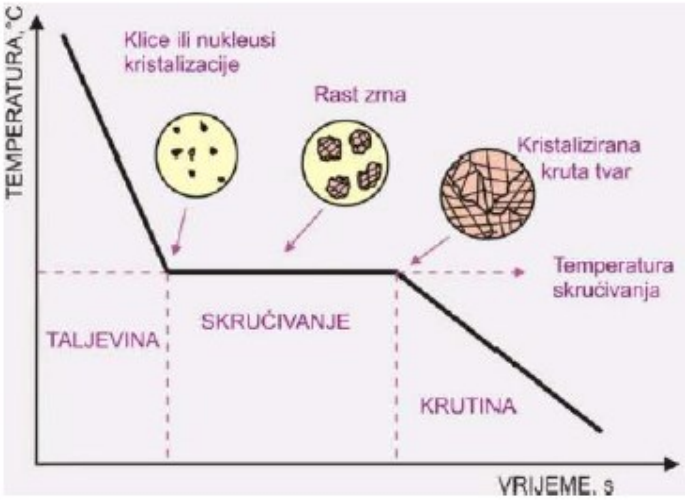
Nadeutektičke Al-Si legure za rad pri povišenim temperaturama najčešće se legiraju magnezijem (Mg), bakrom (Cu) i željezom (Fe). Ovisno o željenim svojstvima određuje se njihov udio u leguri [15].

# 4. SKRUĆIVANJE METALA I LEGURA

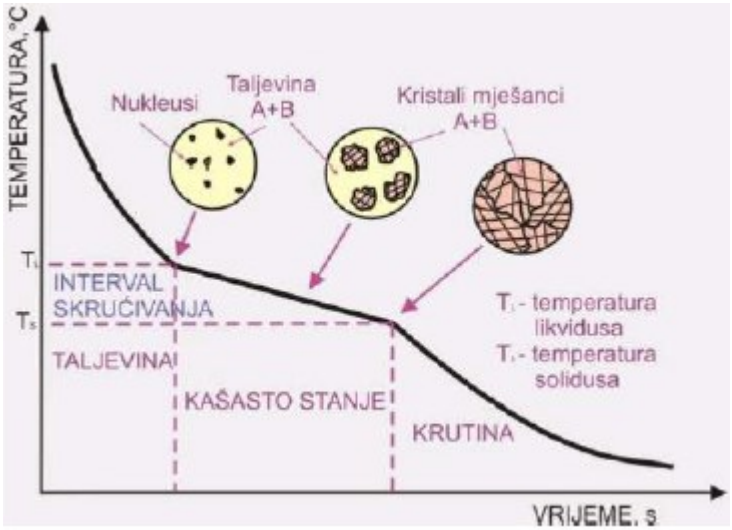
Skrućivanje ili kristalizacija je fazni prijelaz taljevine u krutinu. Uvjeti pri kojima se odvija skrućivanje određuju strukturu, utječu na fizikalna i mehanička svojstva, veličinu i raspored nastalih faza, stupanj segregiranja te određuju postupke daljnje obrade. Do skrućivanja metala ili legura dolazi kada su ispunjeni sljedeći uvjeti:

- pothlađenost taljevine,
- prisustvo klica,
- odvođenje topline iz sustava [12].

Prijelaz iz tekućeg u kruto stanje popraćen je oslobađanjem latentne topline skrućivanja. Latentna toplina skrućivanja je količina topline koja se oslobodi kada tvar, odnosno taljevina promijeni svoje agregatno stanje iz kapljevitog u kruto, pri konstantnoj temperaturi. Tijekom ovog procesa potrebno je odvesti toplinu. Ona se odvodi zračenjem, kondukcijom i konvekcijom. Brzina skrućivanja proporcionalna je brzini odvođenja topline. Na slici 4.1. shematski je prikazana krivulja hlađenja i skrućivanja čistog metala, a na slici 4.2. krivulja hlađenja i skrućivanja binarne legure. Na obje slike uočava se zastoj na krivulji hlađenja, koji predstavlja latentnu toplinu skrućivanja. Razlog tome nalazi se u činjenici da se skrućivanje binarnih legura odvija u temperaturnom intervalu $T_L$ - $T_S$, ($T_L$-temperatura likvidusa, $T_S$-temperatura solidusa), dok kod skrućivanja čistih metala skrućivanje započinje i završava na istoj temperaturi. Nakon što sva taljevina prijeđe u kruto stanje više se ne razvija latentna toplina [12].




Slika 4.1. Shematski prikaz krivulje hlađenja i skrućivanja čistog metala [12]

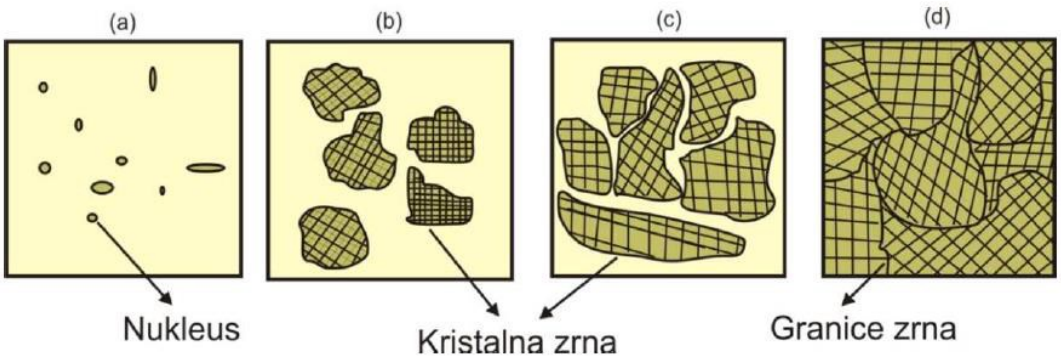



Slika 4.2. Shematski prikaz krivulje hlađenja i skrućivanja binarne legure [12]

Skrućivanje se odvija u dvije faze:

- prvo se odvija nukleacija (fizikalni proces stvaranja nove faze u materijalu),
- zatim rast kristala (transport atoma iz taljevine na graničnu površinu kruto/tekuće) [12].

Na slici 4.3. prikazan je tijek skrućivanja. Uočava se da prvo nastaju klice iz kojih se razvijaju kristalna zrna. Različito orijentirana kristalna zrna (orijentacija ovisi o smjeru odvođenja topline i o kristalnoj strukturi metala) vežu se jedna na druga. Kristali rastu sve dok se ne sudare, nakon čega se njihov rast nastavlja, između njih javljaju se nepravilne granične površine koje se nazivaju granicama zrna. Proces skrućivanja je završen kada nestane taljevine. Izuzetak kod skrućivanja je rast monokristala, gdje se rast omogućava samo jednom zrnu. Postupci proizvodnje monokristala strogo su kontrolirani. Proizvodi dobiveni na ovaj način imaju specijalna svojstva koja nije moguće postići kod skrućivanja polikristaličnih metala (metala s velikim brojem zrna) [12].




Slika 4.3. Shematski prikaz skrućivanja metala: (a) nukleacija kristala u taljevini metala; (b) i (c) rast kristala s napredovanjem skrućivanja; (d) skrućivanje je završeno (vide se pojedine granice zrna) [12]

### 4.1. Nukleacija [3]

Transformacija tekuće-kruto započinje stvaranjem klica. Proces nastanka klica naziva se nukleacija. Nukleacija je početna faza procesa skrućivanja. Klica je nova faza u rastaljenom metalu koja je odvojena graničnom površinom od ostatka taljevine. Klice nastaju iz embrija. Embriji su nakupine atoma u taljevini koje nastaju zbog toplinskog gibanja i preraspodjele atoma. Nukleacija započinje na temperaturama nižim od temperature skrućivanja, zbog toga što je energija krutine manja od energije taljevine na nekoj od postojećih međupovršina kao što su stijenke kalupa ili krute čestice nečistoća ili uključaka u materijalu. Stvaraju se kruti nukleusi unutar rastaljenog metala, odnosno mali dio taljevine se skrutne.

Nukleacija je važan proces i određuje primarnu strukturu, veličinu zrna i prostornu raspodjelu novonastalih faza. Prema načinu stvaranja nukleusa razlikujemo tri vrste nukleacije:

- homogena nukleacija (klice nastaju iz vlastitih grupa atoma i nužno je veliko pothlađenje taljevine),
- heterogena nukleacija (klice su strane čestice),
- dinamička nukleacija (poseban primjer heterogene nukleacije, gdje je nukleacija olakšana u pothlađenim taljevinama kavitacijom odnosno mehaničkim utjecajima).

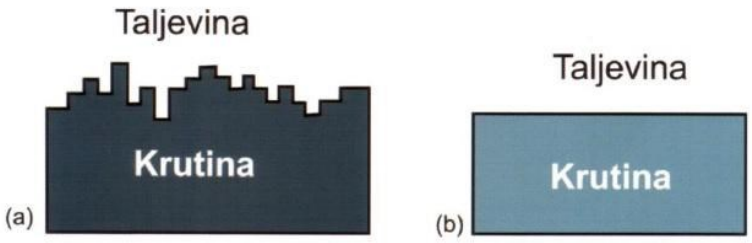
### 4.2. Rast kristala

Daljnjim 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 rešetci koja nastaje na međufaznoj granici kruto/tekuće i o temperaturi.

Kristalne rešetke koje nisu gusto slagane lakše rastu nego gusto slagane kristalne rešetke, jer je pričvršćivanje atoma na graničnu površinu kruto/tekuće olakšano zbog prisustva većeg broja ulegnuća i izbočina (stepenica), slika 4.4. Dva su čimbenika bitna za rast kristala, struktura granične površine i kinetika priključenja atoma na graničnu površinu kruto/tekuće (difuzija, prijenos mase i topline).

Postoje dvije vrste međufazne granične površine kruto/tekuće, kako je prikazano slikom 4.4.:

- hrapava ili difuzna granična površina kruto/tekuće,
- glatka granična površina kruto/tekuće [12].

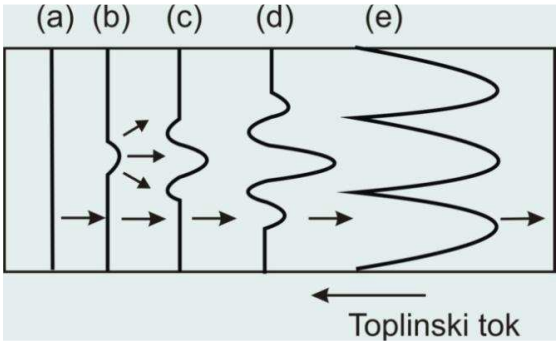



Slika 4.4. Shematski prikaz granične površine kruto/tekuće: (a) atomski gruba (hrapava) ili difuzna granična površina; (b) glatka granična površina [12]

### 4.3. 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 pothlađivanje 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) [16].

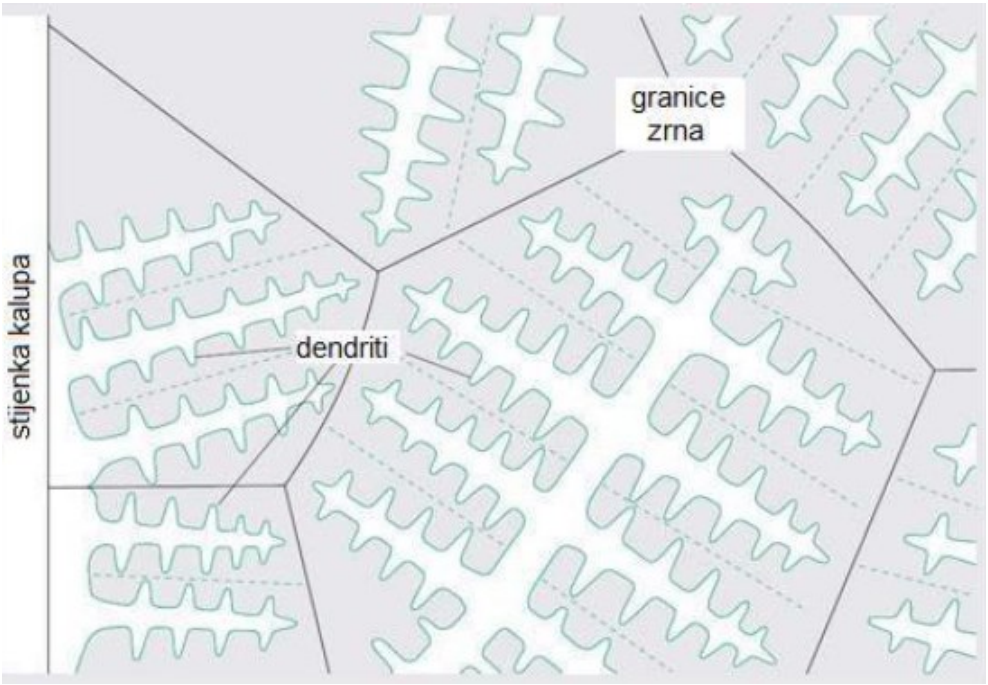
Slika 4.5 prikazuje nastanak ćelijaste strukture. Smanjenjem temperaturnog gradijenta ispod kritične vrijednosti ispred početne granične površine, dolazi do nastanka ćelijaste strukture.




Slika 4.5. Shematski prikaz probijanja početnog ravnog fronta u ćelije [16]

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.

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 taljevina brzo hladi dendriti brže rastu te se dobiju finije grane. Shematski prikaz grananja dendrita vidljiv je na slici 4.6.




Slika 4.6. Shematski prikaz grananja dendrita [17]

# 5. USITNJAVANJE ZRNA KOD LIJEVANJA Al-LEGURA

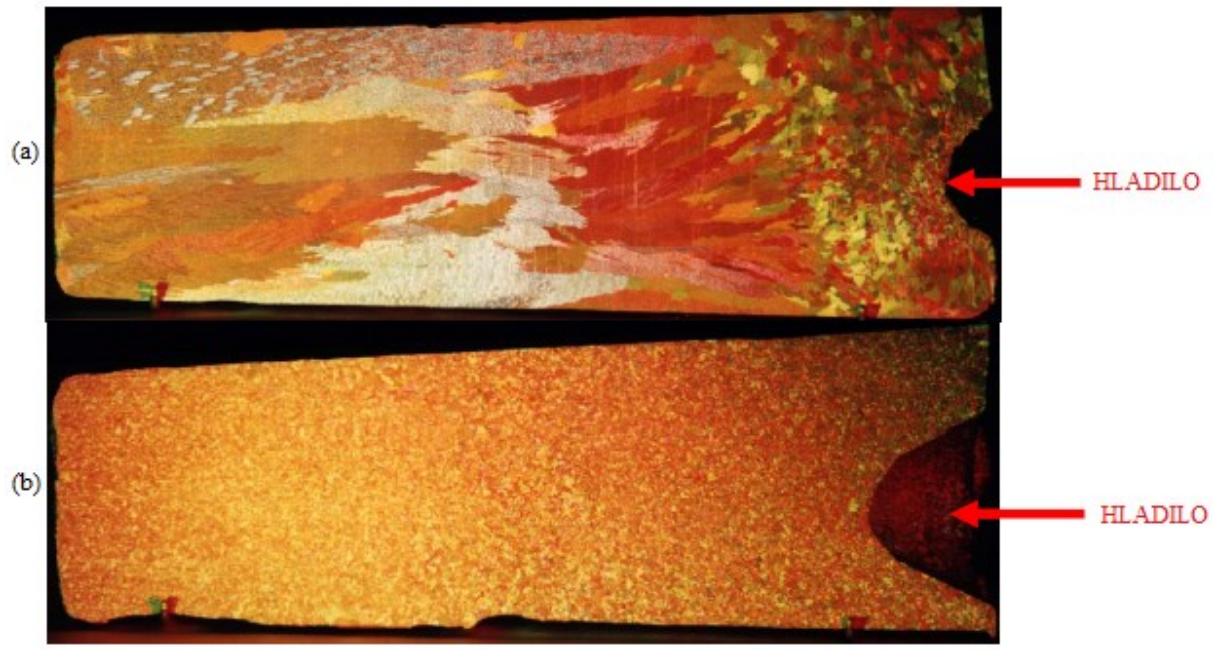
U ljevarskoj je industriji stalna potreba povećanja produktivnosti, smanjenja škarta, poboljšanja radnih uvjeta i smanjenja emisija u okoliš. Zbog toga se od ljevaoničkih dobavljača sve više traži da im proizvodi budu čistiji i djelotvorniji i da ljevaonicama daju što više tehničkih informacija, kako bi od dobavljenih proizvoda ostvarili maksimalne koristi.

Obrada taljevine je važan aspekt u osiguravanju kakvoće u ljevaonici. Obrada taljevine sastoji se od obrade metala postupcima usitnjavanja zrna primarnog aluminija i modifikacijom eutektičkog silicija u podeutektičkim legurama, primarnog silicija u nadeutektičkim legurama te ostalih postupaka obrade. Mnogo je postupaka kojima se aluminijska taljevina nastoji učiniti pogodnom za lijevanje. Za proizvodnju proizvoda dobre kakvoće bitni su postupci legiranja, prevođenja nečistoća u trosku, uklanjanja troske, pročišćavanja i otplinjavanja taljevine i sl. [18].

## 5.1. Usitnjavanje zrna

Usitnjavanje zrna je postupak koji je široko primjenjiv u komercijalnoj proizvodnji svih trgovačkih aluminijskih odljevaka, bili oni kovani ili lijevani. Premda mnoge legure sadržavaju legirne elemente koji pružaju sitnozrnatu mikrostrukturu i kao posljedicu imaju specifična svojstva, kod drugih legura posebno onih koje sadržavaju silicij, nije lako razviti fina sitna zrna bez pomoći legirnih elemenata. Struktura lijevanih proizvoda sastoji se od grubih i usmjerenih stubičastih zrna. Poželjna struktura lijevanih proizvoda sastoji se od finih sitnih zrna. Cilj postupka usitnjavanja zrna je postizanje sitnozrnate i ujednačene strukture [19].

Slika 5.1 prikazuje neusitnjenu te usitnjenu strukturu 3004 legure s dodatkom 10 ppm bora u obliku Al5Ti1B predlegure. Legura 3004 ima oznaku prema ANSI standardima (*American National Standards Institute*). Takva struktura poboljšava kvalitetu i svojstva odljevaka. Poboljšavaju se mehanička svojstva, strojna obradivost i napajanje u odljevcima, povećava se otpornost na tople pukotine i ujednačava se sastav i poroznost [20].




Slika 5.1. Struktura zrna odljevka od 3004 legure ((a) neusitnjena, (b) usitnjena sa 10 ppm B dodanog u obliku AlTiB predlegure) [20]

U industrijskoj je proizvodnji najpopularnija metoda usitnjavanja zrna upotreba sredstva za usitnjavanje zrna, čiji konstituenti djeluju kao podloge za stvaranje nukleusa prema mehanizmu heterogene nukleacije. Iako je metoda heterogene nukleacije jednostavna i učinkovita, postoje i dodatne mehaničke metode poput promješavanja pomoću inertnih plinova, ultrazvučnih vibracija te elektromagnetskog miješanja. Sitnozrnata struktura može se postići i brzim hlađenjem koje osigurava visok stupanj pothlađenja (veći stupanj pothlađenja povećava brzinu nukleacije odnosno djelotvornost nukleusa). U literaturi se usitnjavanje zrna sredstvima za usitnjavanje zrna naziva cijepljenjem, dok se sredstva za usitnjavanje zrna nazivaju cjepivima ili predlegurama [3].

Na formiranje zrna utječu [3]:

- pogodne podloge na kojima se odvija heterogena nukleacija,
- dovoljno pothlađenje da bi nastali nukleus preživio i nastavio rasti (brzo hlađenje ili konstitucijsko pothlađenje).

Sredstva za usitnjavanje zrna (predlegure) koje se dodaju u taljevinu stvaraju podloge na kojima se odvija heterogena nukleacija prema jednoj ili više teorija objašnjenih u nastavku. Da bi podloge bile djelotvorne moraju imati mali kut močenja, odnosno malu napetost površine, mora ih biti dovoljno te moraju imati malo neslaganje rešetke s fazom koja nukleira. Djelotvornost sredstava za usitnjavanje zrna gleda se kroz djelotvornost pretvaranja grubozrnate u sitnozrnatu

strukturu. Djelotvorno je ono sredstvo za usitnjavanje zrna koje može smanjiti veličinu zrna aluminija ispod 220 μm [3].

Predlegure bi trebale imati sljedeća svojstva [3]:

- veće temperature taljenja od temperature taljenja taljevine osnovne legure,
- dovoljan broj jednoliko raspoređenih nukleusa,
- nukleus treba biti veći od neke kritične veličine da bi preživio,
- omogućavaju usitnjavanje zrna već kod malih pothlađenja.

### *5.1.1. Prednosti usitnjavanja zrna*

Usitnjavanje zrna se masovno koristi u komercijalnoj proizvodnji skoro svih aluminijskih legura. To je neophodan korak u obradi taljevine većine lijevanih odljevaka zbog [19]:

- poboljšanja mehaničkih svojstava i svojstava pri povišenim temperaturama. Usitnjavanjem zrna često se poboljšavaju svojstva debelostjenih odljevaka zbog kompaktnosti i sitnozrnatosti mikrostrukture;
- sitnozrnatosti mikrostrukture koja je rezultat poboljšanja oblikovljivosti i obradivosti. Postupci završne obrade kao što su poliranje i eloksiranje su lakši i uspješniji sa finijom strukturom zrna u odljevku;
- bolje livljivosti koja rezultira iz sitnozrnate mikrostrukture koja se osigurava stvaranjem više nukleusa u skrućujućoj taljevini. Poroznost uslijed skupljanja pri skrućivanju i vruće pukotine obično se smanjuju. Bolje karakteristike napajanja obično znače povećanje kvalitete odljevka;
- bolje kontrole i mogućnosti toplinske obrade s finijom strukturom zrna zbog veće homogenosti primarne strukture.

Usitnjavanje zrna postiže se učinkovitom heterogenom nukleacijom primarne $\alpha_{Al}$ faze. To se u praksi najčešće postiže dodavanjem kemijskih aditiva da bi se osigurao potreban broj centara heterogene nukleacije. Drugi faktori koji utječu na konačnu veličinu zrna su sastav legure, brzina hlađenja, temperaturni gradijent u taljevini i način lijevanja. Komercijalno dostupni kemijski aditivi su obični u obliku aluminijskih predlegura.

Za podeutektičke legure smatra se da su kompoziti sastavljeni od dendritnih vlakana koji mogu očvrsnuti toplinskom obradom i eutektičke metalne osnove koja može očvrsnuti modifikacijom. Mehanička svojstva takvih kompozita ovise o volumnom udjelu vlakna i njihovom razmaku. Mehanička svojstva Al-Si legura često se izražavaju indeksom kvalitete Q:

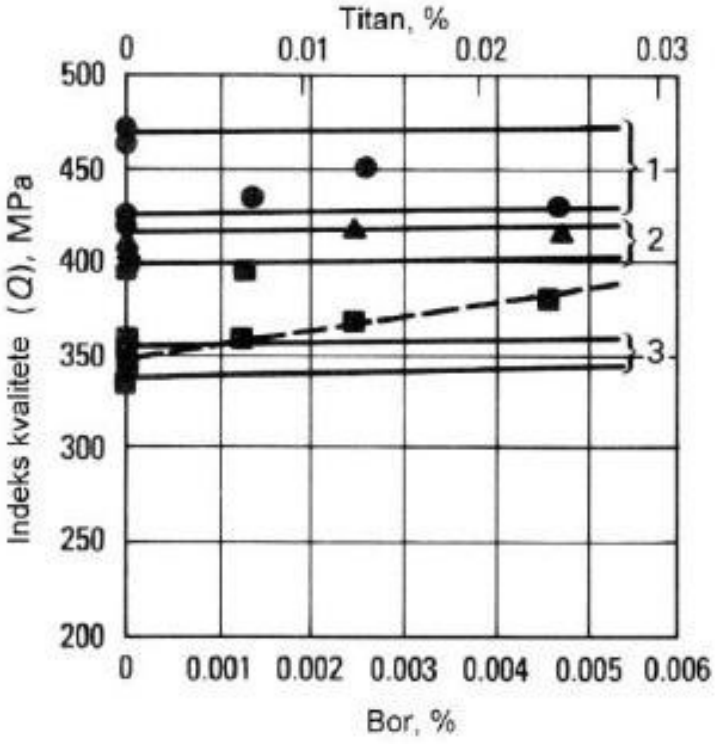
$$Q = R_m + 150\ logA \tag{5.1}$$

gdje su:

$R_m$ - vlačna čvrstoća [N/mm$^2$]

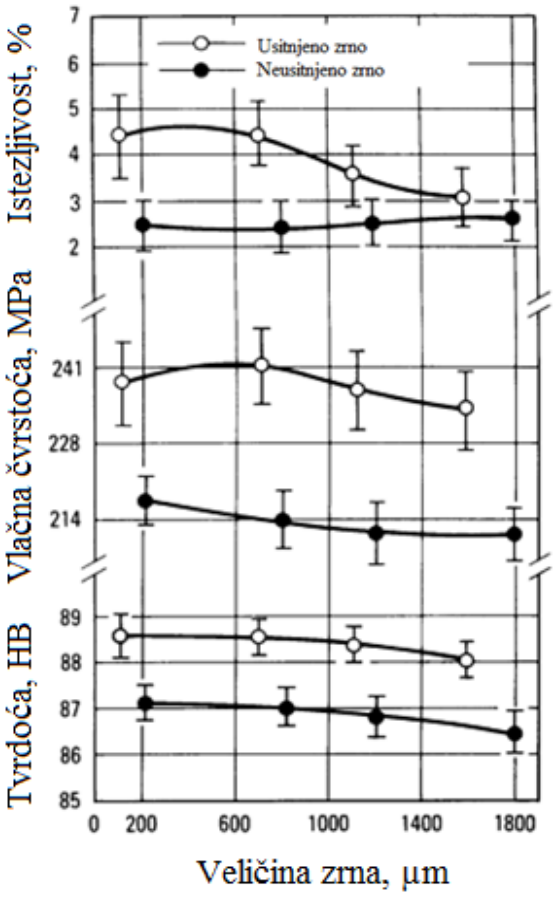
$A$ - istezljivost [%].

Slika 5.2 prikazuje utjecaj brzine hlađenja, razmaka dendritnih grana i cijepljenje na Q vrijednost. Pokazalo se da je usitnjavanje zrna djelotvorno samo pri najmanjim brzinama hlađenja.




Slika 5.2. Utjecaj titan-bor (Ti-B) cjepiva na Al-Si leguru kao funkciju sadržaja titana i brzine hlađenja (1 – 1,5 ºC/s, 2 – 0,5 ºC/s, 3 – 0,08 ºC/s) [19]

Slika 5.3 prikazuje povećanje tvrdoće, vlačne čvrstoće i istezljivosti sa usitnjavanjem zrna za leguru A356. Legura A356 ima oznaku prema ANSI standardima (*American National Standards Institute*).




Slika 5.3. Mehanička svojstva legure A356 sa usitnjenim i neusitnjenim zrnom [19]

### *5.1.2. Metode usitnjavanja zrna*

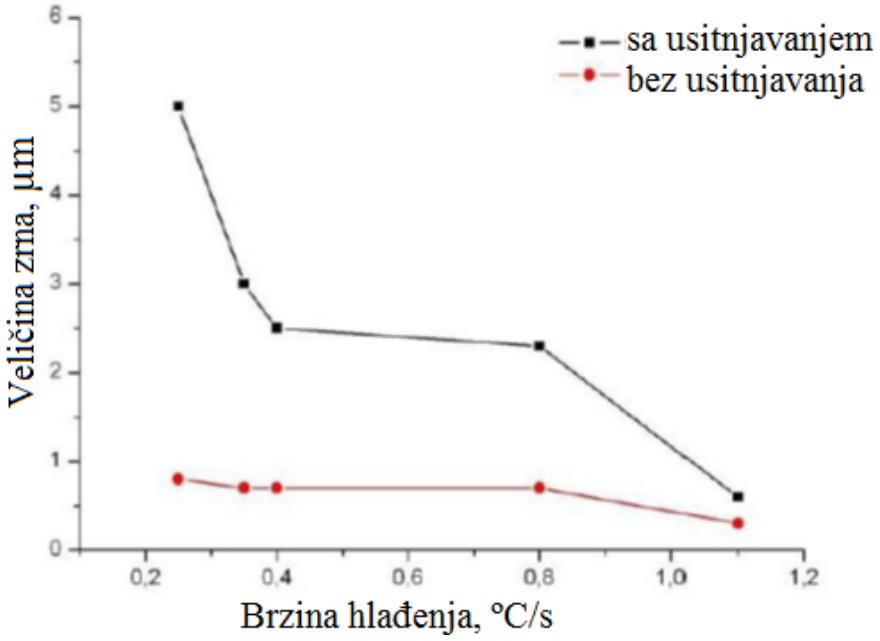
Nekoliko metoda se primjenjuje za usitnjavanje zrna, a to su [19]:

- brzo hlađenje,
- mehaničko miješanje,
- ograničavanje rasta zrna i
- heterogena nukleacija.

#### *5.1.2.1. Brzo hlađenje [19]*

Brzo hlađenje proizvodi finiju strukturu zrna u većini aluminijskih legura. Ovaj mehanizam može uključivati smanjenje rasta zrna, smanjenje kritične veličine nukleusa, aktiviranje dodatnih nukleusa, povećanje nukleacijskih mjesta, homogenost nukleacije i rekristalizaciju. Brzo hlađenje ima značajan efekt na druge aspekte lijevane strukture koji utječu na svojstva, kao smanjenje razmaka dendritnih grana, povećanje topljivosti u krutom stanju, smanjenje

segregacija i pojavljivanje metastabilnih faza. Na slici 5.4 vidi se utjecaj brzine hlađenja na veličinu zrna.




Slika 5.4. Utjecaj brzine hlađenja na veličinu zrna [21]

*5.1.2.2. Mehaničko miješanje [19]*

Mehaničko miješanje može se postiči ručnim ili elektromagnetnim miješanjem, propuhivanjem plinom ili ultrazvučnom vibracijom. Ovakvo gibanje u rastaljenom metalu izazvano ovim tehnikama najvjerojatnije lomi ili savija rastuće dendritne grane. Količina dobivenog usitnjavanja obično raste s povećanjem uložene mehaničke energije u taljenje do neke određene točke. Iako ova metoda ima određene prednosti poput smanjenja segregacija što rezultira visokom cijenom, potrebnom dodatnom obradom te složenošću opreme, ona se isključuje iz masovnog korištenja u praksi.

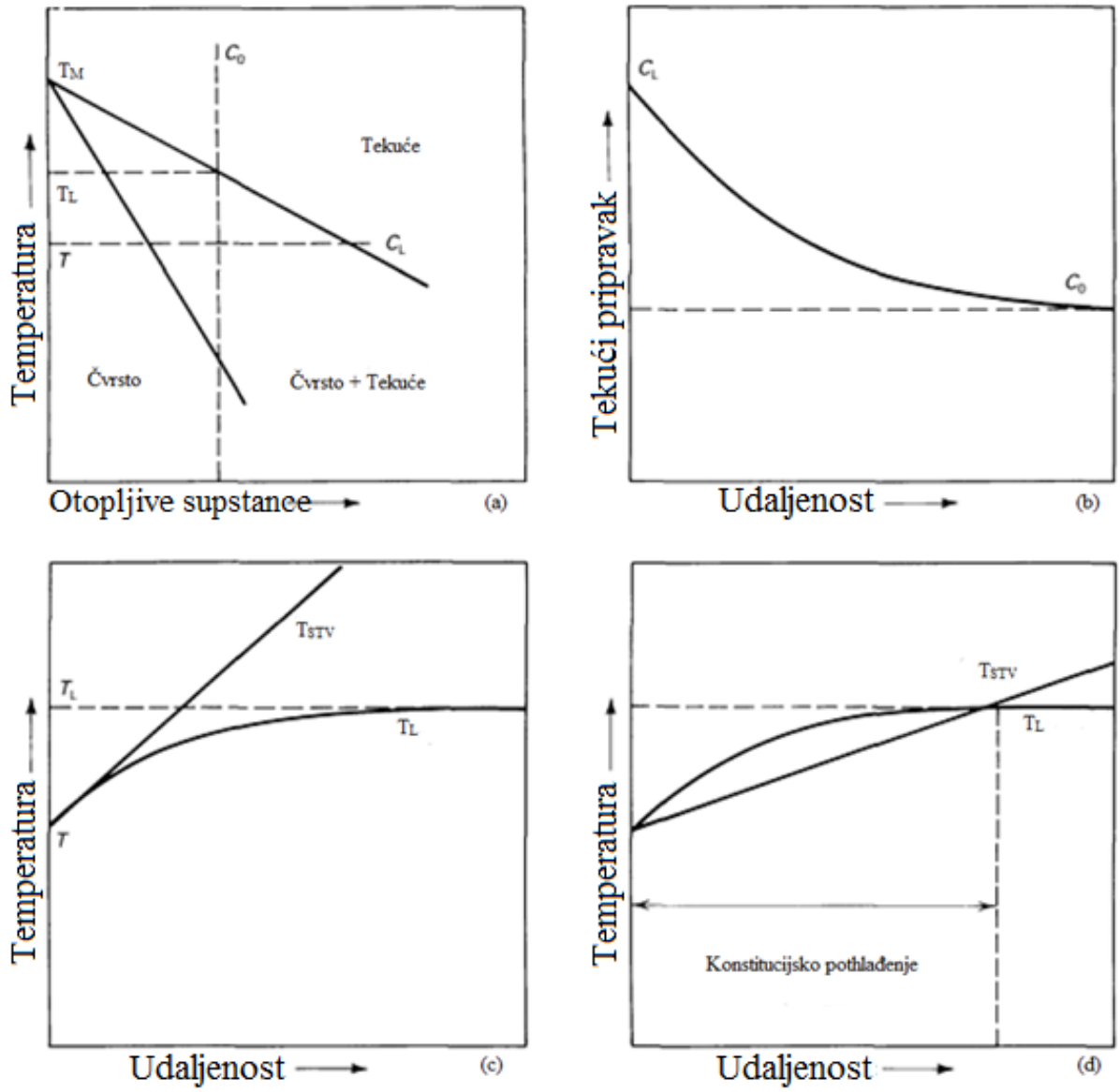
*5.1.2.3. Ograničavanje rasta zrna*

Ograničavanjem rasta zrna poboljšava se usitnjavanje zrna. Dodaci za ograničavanje rasta zrna često su legirni elementi ili otopljene tvari u legirnom sustavu u kojem se pothlađenje može odvijati za vrijeme očvršćavanja [19].

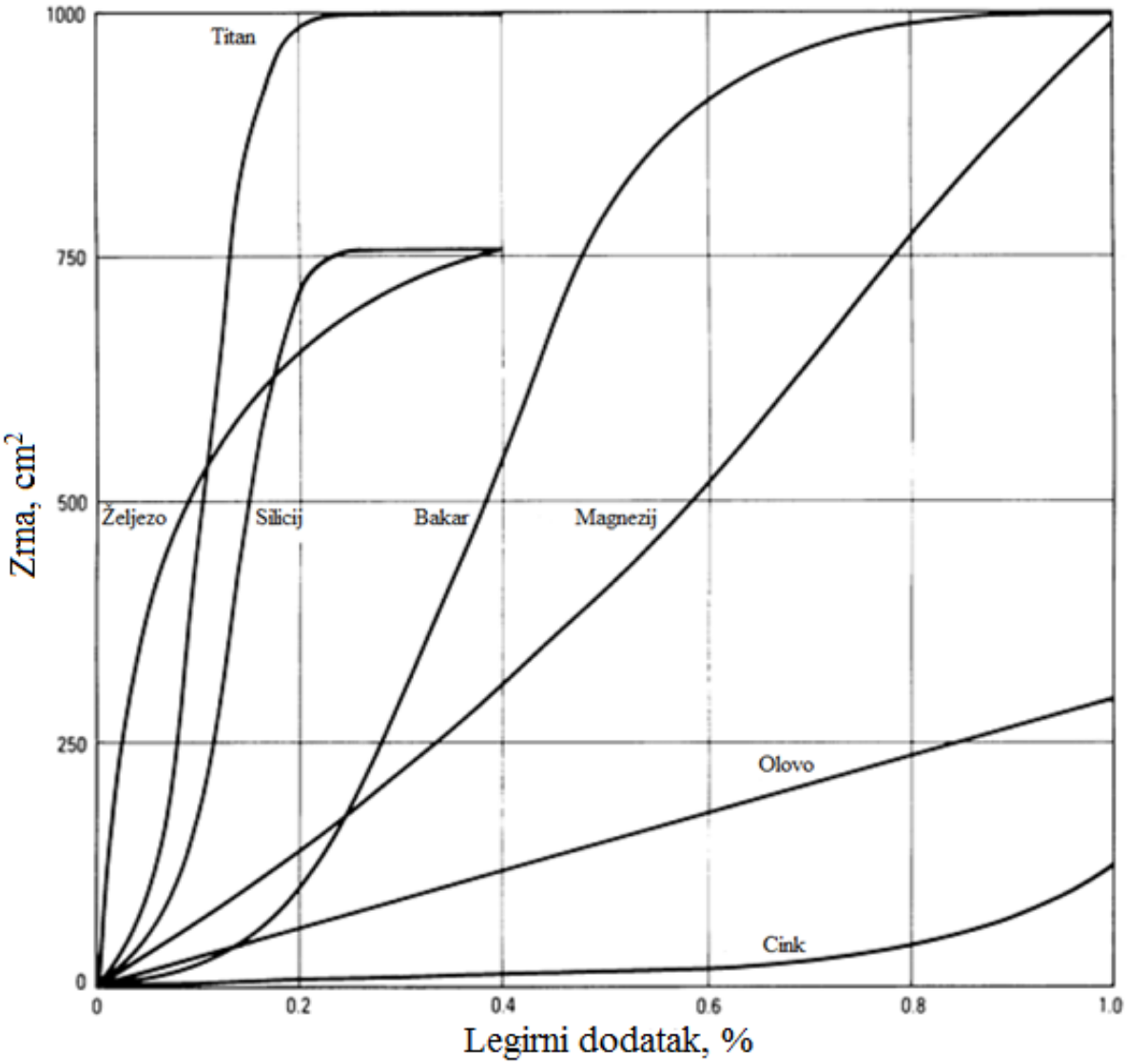
Ispred granične površine kruto/tekuće dolazi do pothlađenja koje je uzrokovano ograničavanjem rasta zrna. Rast granične površine kruto/tekuće kontroliran je pothlađenjem te difuzijom i

odbacivanjem otopljenog elementa ispred granične površine kruto/tekuće. Na pothlađenje taljevine utječe konstitucija taljevine (otopljeni elementi), toplinski režim, brzina hlađenja i površinska napetost (zakrivljenost). U industrijskoj proizvodnji najveći utjecaj na pothlađenje ima konstitucija taljevine pa se tako i pothlađenje naziva konstitucijskim pothlađenjem. Konstitucijsko pothlađenje omogućuje aktiviranje pogodnih nukleusa u difuznom sloju i prikazuje važnost svoje uloge pri preživljavanju nastalih kristala. Ispred granične površine kruto/tekuće nakon aktivacije nukleusa i nastanka kristala, područje oko nukleusa i kristala postaje bogato otopljenim elementom. Skrućivanje, odnosno nastanak novih kristala, tada se zaustavlja te ponovno započinje. Pri takvom skrućivanju odvija se difuzija pri različitim koncetracijama između krute i tekuće faze. Pothlađenje je pokretačka snaga skrućivanja, a otopljeni element osigurava potrebno pothlađenje [21].

Slika 5.5 prikazuje ovu pojavu u binarno faznom dijagramu. U tom dijagramu dok legure u sastavu $C_0$ (sadržaj otopljenog elementa u taljevini) skrućuju, otopljive supstance koncentriraju se u tekućini ispred rastućeg čvrstog tijela. Kao posljedica toga, tu je zona u kojoj je stvarna temperatura niža od ravnotežne temperature smrzavanja. To je pothlađena zona u kojoj obogaćene ili prezasićene supstance olakšavaju nukleaciju i smanjuju veličinu zrna. Niža eutektička temperatura i manja količina potrebnih otopljivih elemenata znači učinkovitije usitnjavanje zrna. Bakrene legure s relativno malom količinom otopljivih elemenata koji uzrokuju ovu pojavu, imaju potpuno usitnjeno zrno samo legiranjem. Aluminijske legure imaju slično ponašanje kao i bakrene legure kad se dodaju otopljive supstance (slika 5.6), ali se kod njih primjenjuju i dodatne metode za usitnjavanje zrna [19].




Slika 5.5. Konstitucijsko pothlađenje tijekom očvršćivanja legure s sastavom $C_0$, (a) fazni dijagram, (b) sloj obogaćen otopljivim supstancama ispred površine čvrsto/tekuće, (c) stabilno sučelje, (d) nestabilno sučelje [19]




Slika 5.6. Utjecaj legirnih dodataka na veličinu zrna kod aluminija [19]

Ograničavanje rasta zrna opisuje se sa parametrom Q za binarnu leguru jednadžbom 5.2:

$$Q = m\,(k\text{-}1)\,C_0, \tag{5.2}$$

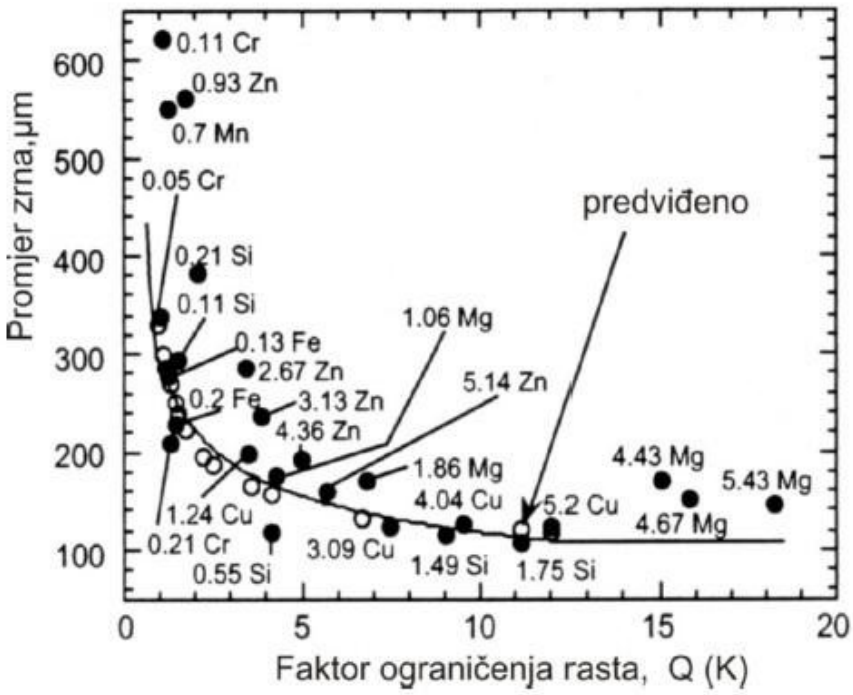
gdje je $m$ nagib likvidusa, $k$ koeficijent raspodjele i $C_0$ sadržaj otopljenog elementa u taljevini.

Parametar ograničenja rasta zrna je kvantificirani oblik utjecaja pothlađenja i otopljenog elementa na veličinu zrna. Tablica 5.1 daje pregled utjecaja pojedinih otopljenih elemenata na veličinu zrna preko iznosa $m\,(k\text{-}1)$, koji određuje učinak ograničenja otopljenog elementa za danu količinu otopljenog elementa. Iz tablice 5.1 vidljivo je da je titan element koji ima najveći utjecaj na veličinu zrna, odnosno usitnjavanje zrna [21].

Tablica 5.1. Vrijednost nagiba likvidusa *m* i koeficijent raspodjele *k* (izračunat iz parametara za neke uobičajene otopljene elemente u aluminiju) [21]

| Otopljeni element | *m* *(K mas %$^{-1}$)* | *k* | *m (k-1)* *(K mas %$^{-1}$)* |
|---|---|---|---|
| Cr | 2,6 | 1,75 | 1,9 |
| Cu | -2,5 | 0,145 | 2,1 |
| Fe | -2,925 | 0,03 | 2,4 |
| Mg | -5,84 | 0,48 | 3 |
| Mn | -1,2 | 0,62 | 4,6 |
| Ni | -3,5 | 0,004 | 3,5 |
| Si | -6,62 | 0,12 | 5,8 |
| Ti | 25,63 | 7 | 154 |
| Zn | -1,65 | 0,43 | 0,9 |
| Zr | 4,5 | 2,5 | 6,8 |

Slika 5.7 pokazuje ovisnost izmjerene veličine (promjera zrna) otopljenih elemenata s parametrom ograničenja rasta pri određenom dodatku predlegura u taljevinu i određenim brzinama hlađenja. Veličina zrna smanjuje se porastom parametra ograničenja zrna do određene granice, nakon čega ostaje otprilike konstantna.




Slika 5.7. Veličina zrna kao funkcija parametra ograničenja rasta Q [21]

Kada u taljevini postoji više od jednog otopljenog elementa, ukupni se parametar ograničenja rasta zrna Q, može dobiti zbrajanjem vrijednosti Q pojedinih elemenata, pod uvjetom da elementi ne reagiraju jedni s drugima. Ako otopljeni elementi reagiraju jedni s drugima stvarajući kompleksne spojeve, tada su ukupna količina otopljenog elementa i parametar ograničenja rasta smanjeni. Ova pojava naziva se trovanjem (npr. cirkonij u taljevini reagira sa željezom i titanom stvarajući kompleksne spojeve te smanjuje njihov sadržaj u taljevini, a time i parametar ograničenja rasta Q) [21].

*5.1.2.4. Heterogena nukleacija*

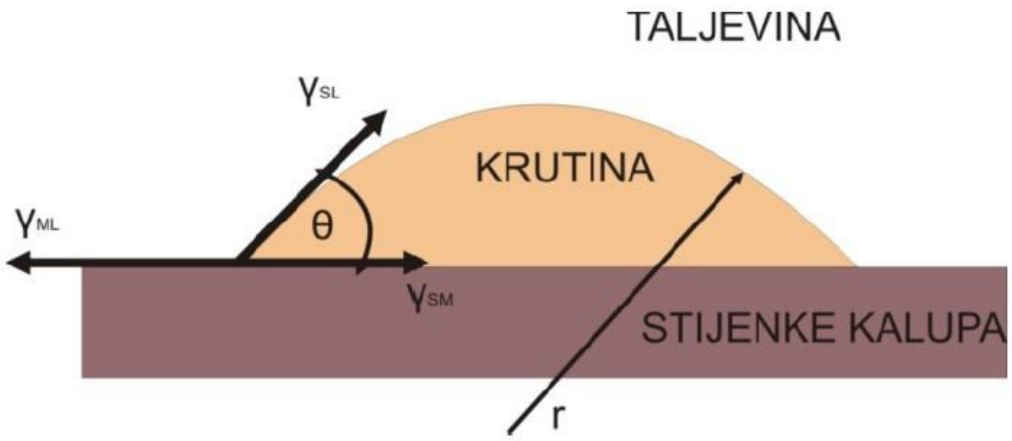
U realnim uvjetima nukleacija se odvija mehanizmom heterogene nukleacije. Za heterogenu nukleaciju potrebno je vrlo malo pothlađenje, od svega nekoliko stupnjeva. Nukleacijska mjesta su stjenke kalupa ili strane čestice u taljevini (nečistoće, oksidni filmovi). Heterogena nukleacija je najteži kinetički put do formiranja kristala zbog relativno velike aktivacijske barijere za razvoj nukleusa ($\Delta G_{cr}$). Za prevladati tu barijeru koristi se pothlađenje od samo nekoliko stupnjeva ili manje te se to primjenjuje kod većine odljevaka. Ovakvo ponašanje odnosi se na heterogenu nukleaciju u kojoj strana tijela (čestice) djeluju na promicanje kristalizacije snižavanjem aktivacijske barijere. Zbog toga je potrebna samo jedna nukleacija za smrzavanje volumena tekućine te je velika vjerojatnost pronalaženja heterogene nukleacije u dodiru s rasutom

tekućinom. Procijenjeno je da čak u primjeru visoke čistoće tekućeg metala postoji koncentracija nukleacijskih čestica veličine $10^{12}$ $m^{-3}$ [19].

Na slici 5.8 prikazan je jednostavan način reduciranja energije granične površine, gdje se nukleus formira u kontaktu sa ravnim stijenkama kalupa. Embrij ima oblik odsječka kugle sa kutom močenja $\theta$, dok su naprezanja na graničnoj površini $\gamma_{ML}$, $\gamma_{SM}$ te $\gamma_{SL}$ uravnotežena u ravnini stijenke kalupa, što omogućava minimaliziranje ukupne energije granične površine za prikazani volumen. Ovaj odnos može se prikazati jednadžbom (5.3) koja ujedno definira i kut močenja $\theta$:

$$\cos\theta = (\gamma_{ML} - \gamma_{SM}) / \gamma_{SL}, \tag{5.3}$$

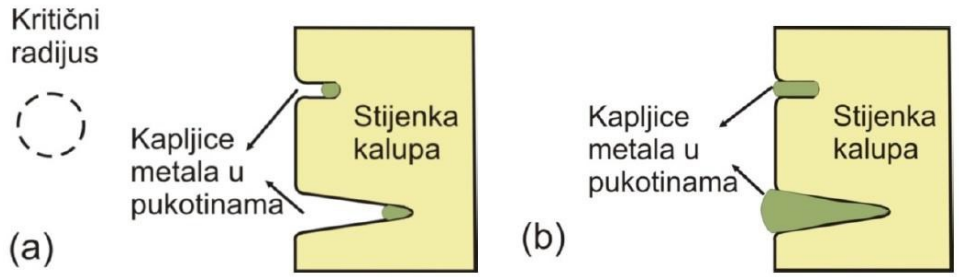
gdje je $\gamma_{SM}$ energija granične površine nukleant/kristal, $\gamma_{SL}$ energija granične površine taljevina/kristal, $\gamma_{ML}$ energija granične površine nukleant/taljevina, θ kut močenja (kut između krute podloge i krutog embrijskog kristala). Kut močenja pokazatelj je sposobnosti klice da se razvija na površini nukleanta [21].




Slika 5.8. Shematski prikaz heterogene nukleacije embrija u obliku odsječka kugle na ravnoj stijenci kalupa [21]

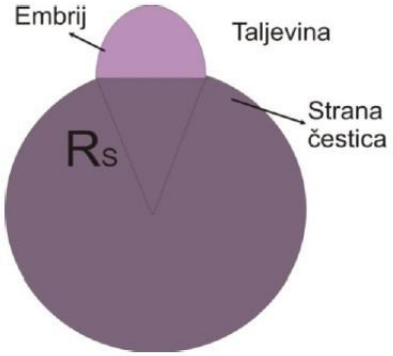
Slika 5.8 prikazuje primjer kada je kut močenja θ = 90º. Kada se kut kvašenja približava 0º, razvija se potpuno kvašenje. Kada se kut kvašenja približava 180º, nema kvašenja.

Na slici 5.9 (a) vidljivo je da, iako je kut močenja vrlo velik, kritični volumen može biti vrlo mali. Proizlazi da do nukleacije može doći i pri manjim pothlađenjima iako je kut močenja velik.




Slika 5.9. Shematski prikaz heterogene nukleacije u pukotini stijenke kalupa: (a) kritični nukleus, (b) gornji nukleus ne može izrasti iz pukotine i postati klicom dok donji može [21]

Kod proizvodnje odljevaka u taljevinu se dodaju sredstva za usitnjavanje zrna (cijepiva). Ona poboljšavaju mikrostrukturu i mehanička svojstva. Sredstva za usitnjavanje zrna mogu stvarati neki kruti spoj s taljevinom i tada novonastali spoj djeluje kao podloga za heterogenu nukleaciju. Na slici 5.10 shematski je prikazana heterogena nukleacija na stranoj čestici.




Slika 5.10. Shematski prikaz heterogene nukleacije na stranoj čestici radijusa $R^S$ [21]

*5.1.2.4.1. Tipovi dodataka kod nukleacije [19]*

Do sada najčešća metoda kod postizanja sitnog zrna kod aluminija je primjena posebnih nukleacijskoh dodataka, kao npr. soli ili predlegure. Sredstva za usitnjavanje zrna poput titana, bora i cirkonija dodaju se aluminijskim taljevinama pojedinačno ili u kombinaciji u jako malim količinama da ne bi promijenili osnovni sastav taljevine. Ovi dodaci napravljeni su kao soli (često u obliku tableta) ili kao predlegure s aluminijem u obliku sačme, šipke ili ingota. Ugljik može biti djelotvorno sredstvo za usitnjavanje zrna u prisutnosti karbida za formiranje elemenata kao što je titan. Sredstva za usitnjavanje zrna mogu biti uvedena kao soli koje reagiraju s taljevinom, kao npr.:

- $3K_2TiF_6 + 4Al \ ===> 3Ti + 4AlF_3 + 6KF$
- $2KBF_4 + 3Al \ ===> AlB_2 + 2AlF_3 + 2KF$
- $3K_2TiF_6 + 6KBF_4 + 10Al \ ===> 3TiB_2 + 10AlF_3 + 12KF.$

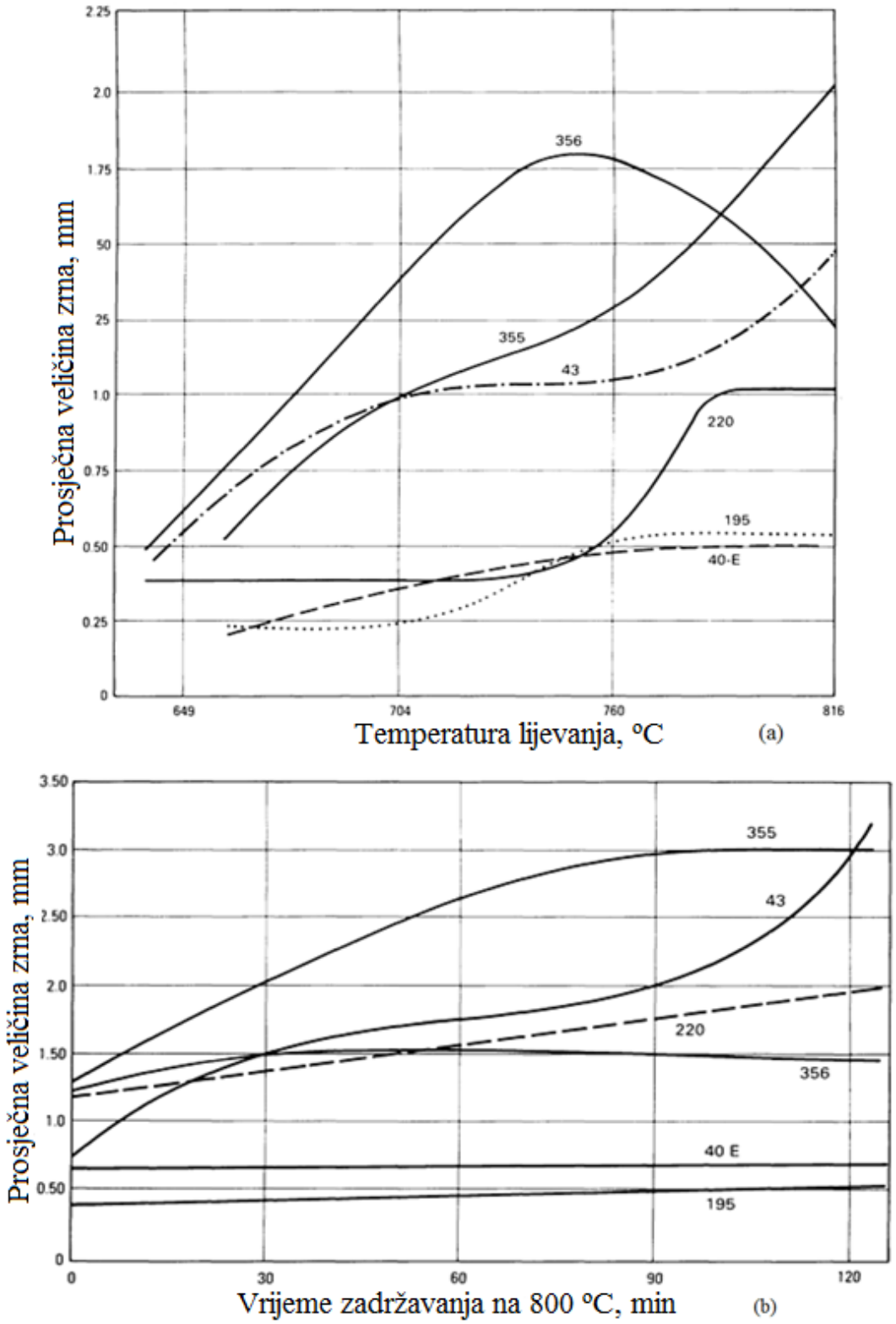
Neki tokovi soli mogu sadržavati ugljik za povećanje ugljične tvorevine jer karbidi također služe kao djelotvorna nukleacijska zrna. Danas je poznato da intermetalni spojevi nastali iz titana i aluminija (npr. $TiAl_3$) imaju značajnu ulogu kao sredstva za nukleaciju zrna.

Glavne predlegure su aluminijske legure s određenom količinom titana i/ili bora. Glavne predlegure obično se proizvode u indukcijskim pećima te se izliju kao ingoti, šipke ili sačma. Aluminijsko-titanske predlegure sadržavaju samo 3 do 10 % titana zbog njegove relativno visoke točke taljenja čak i na ovoj niskoj razini. Teško je kontrolirati gravitacijsko odvajanje i pri tako niskoj koncentraciji. Kada se dodaje bor u ove legure, dodaje se u jednako niskim količinama (0,5 do 3%) zato što titanovi diboridi imaju čak i višu sklonost ka odvajanju zbog njihove više relativne gustoće u odnosu na tekući aluminij.

### *5.1.3. Primjena sredstva za usitnjavanje zrna [19]*

Prvi problem koji se javlja kada se razmatra djelovanje sredstva za usitnjavanje zrna je određivanje potrebnog stupnja usitnjenja zrna koji ovisi o primjeni odljevka. Zatim treba odabrati odgovarajući sastav sredstva za usitnjavanje zrna od onih koji su na raspolaganju. Faktori koji se uzimaju u obzir kod odabira sredstva za usitnjavanje su specifikacije, ekonomičnost, svojstva i utjecaj titana i bora na ostatak sastava te završna upotreba proizvoda.

U ljevaoničkoj primjeni, sredstvao za usitnjavanje zrna obično se dodaje u peć putem solnih tableta ili predlegura. Sposobnosti sredstva za usitnjavanje umanjene su postupcima otplinjavanja ili kod predugog držanja. Ovaj gubitak sposobnosti usitnjavanja je zbog nagomilavanja nukleacijskih čestica, otapanja pri povišenim temperaturama te formiranja kompleksnih spojeva s ostalim legirnim elementima. Stoga je bitno da se sredstvo za usitnjavanje doda neposredno prije lijevanja. Količina koja se dodaje je 0,05 – 0,15% Ti, 0,04% B ili 0,01–0,08% Ti + 0,003% B. Povećana temperatura lijevanja i vrijeme zadržavanja rezultira grubljom veličinom zrna za većinu tipova dodataka, kao što je vidljivo na slici 5.11 (a) i 5.11 (b). Legure na slici 5.11 imaju oznaku prema ANSI standardima (*American National Standards Institute*).



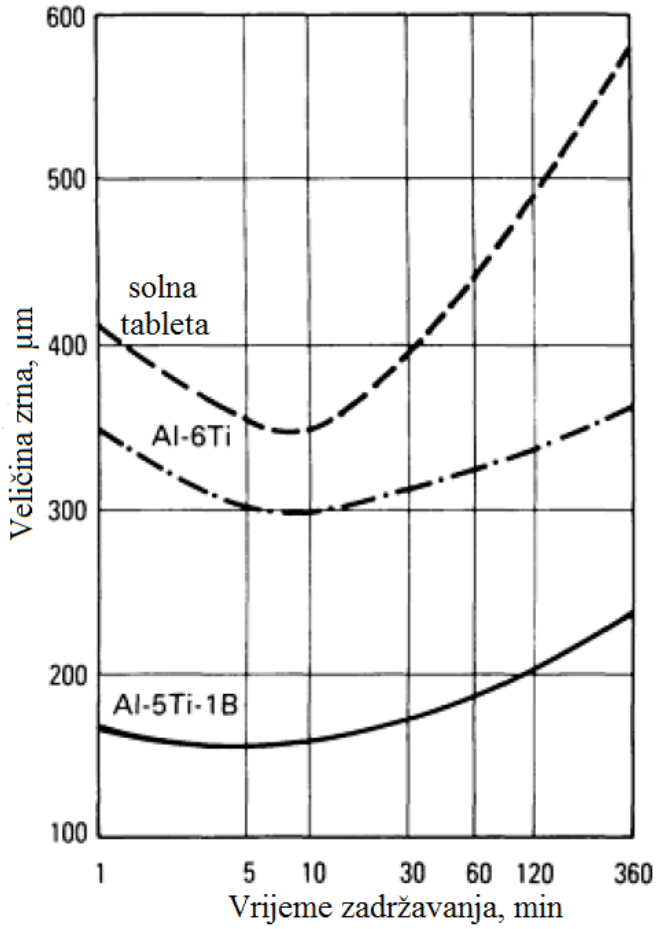

Slika 5.11. Utjecaj temperature lijevanja (a), vremena zadržavanja (b), na veličinu zrna nekoliko ljevačkih legura aluminija [19]

U proizvodnji ljevačkih ingota ili aluminijskih ljevačkih oblika, sredstva za usitnjavanje zrna izrađena su s predlegurama ili kao dodaci u obliku šipke ili briketa (9 do 10 mm u promjeru). U tradicionalnoj metodi taljenja, predlegura se doda 30 minuta prije lijevanja kako bi se osiguralo

dovoljo vremena za otapanje i skručivanje. Potencijalni problemi uključuju neodgovarajuće miješanje u punom punjenju te taloženje i nagomilavanje težih čestica titanova diborida.

Metoda dodavanja predlegure u obliku šipke s žicom u taljevinu, dopušta nižu brzinu dodavanja, ali se oslanja na upotrebu predlegure s kraćim otapanjem ili vremenom skručivanja. Ovisno o smjeru lijevanja i vrsti korištenog filtera, dostupno vrijeme između dodavanja sredstva za usitnjavanje i skručivanja varira od 0,5 do 10 minuta. Stoga, dostupno vrijeme skručivanja (određeno duljinom i brzinom protoka) i ostvarena učinkovitost često će diktirati koju vrstu sredstva za usitnjavanje zrna dodati.

Slika 5.12 prikazuje učinkovitost tri vrste sredstva za usitnjavanje zrna. Iz slike je vidljivo da se dodavanjem Al-5Ti-1B postiže najbolja zrnatost strukture te je potrebno najkraće vrijeme zadržavanja.



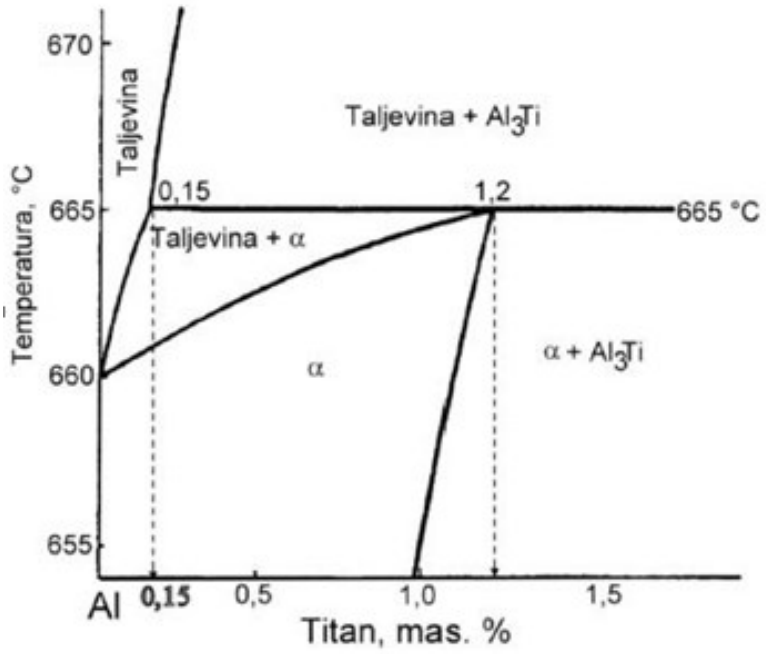

Slika 5.12. Usporedba učinkovitosti tri sredstva za usitnjavanje zrna kod aluminija [19]

### *5.1.4. Vrste sredstva za usitnjavanje zrna*

#### *5.1.4.1. AlTi predlegure*

U ljevačkim legurama s 7% Si za usitnjavanje zrna najčešće se koriste aluminijsko-titanske predlegure. Razina dodatka od 0,1 do 0,25% Ti obično osigurava adekvatno usitnjavanje zrna. AlTi predlegure dodaju se u taljevinu nekoliko minuta prije lijevanja te se sastoje od $Al_3Ti$ čestica uronjenih u metalnu osnovu primarnog α aluminija. Postotak titana u predlegurama kreće se od 5 – 10%. Veći sadržaj titana u taljevini, spriječava otapanje $Al_3Ti$ čestica [19].

U Al-Ti ravnotežnom dijagramu na slici 5.13, uočava se da titan povećava točku taljenja čistog aluminija sa 660,1 ºC na 665 ºC. Povećanje točke taljenja ima važan učinak na nukleaciju i rast krutih zrna aluminija. Na veličinu $Al_3Ti$ čestica i slabljenje AlTi predlegura utječe sadržaj titana u taljevini, temperatura taljenja metala, vrsta legure te distribucija $Al_3Ti$ čestica [21].

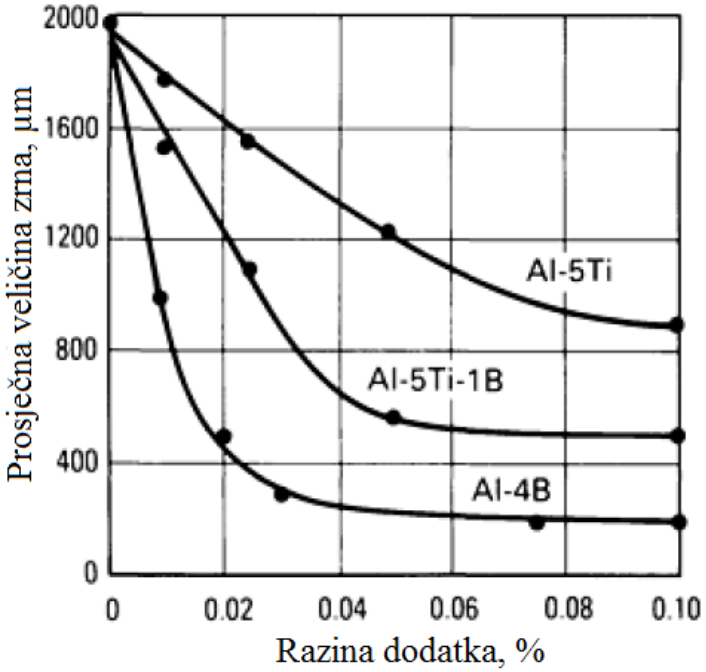



Slika 5.13. Ravnotežni dijagram Al-Ti [21]

S većim sadržajem silicija djelotvornost $Al_3Ti$ nukleacijskih čestica može biti umanjena zbog taloženja smjese silicij-titan. Kao posljedica toga, potrebna je veća količina titana za postizanje odgovarajuće zrnatosti legure.

*5.1.4.2. AlB predlegure*

Aluminij-bor predlegura koja sadrži $AlB_2$ čestice je izvrsno sredstvo za usitnjavanje zrna. Unatoč uspješnom korištenju titana kao sredstva za usitnjavanje zrna, ustanovljeno je da bor sam može biti učinkovitije sredstvo od titana u aluminijsko-silicijskim legurama. Bor je skuplji od titana te se zbog toga u glavnim legurama koristi i titan i bor. Slika 5.14 prikazuje usporedbu veličine zrna postignute s dodacima bora, titana i smjese titan-bor [19].



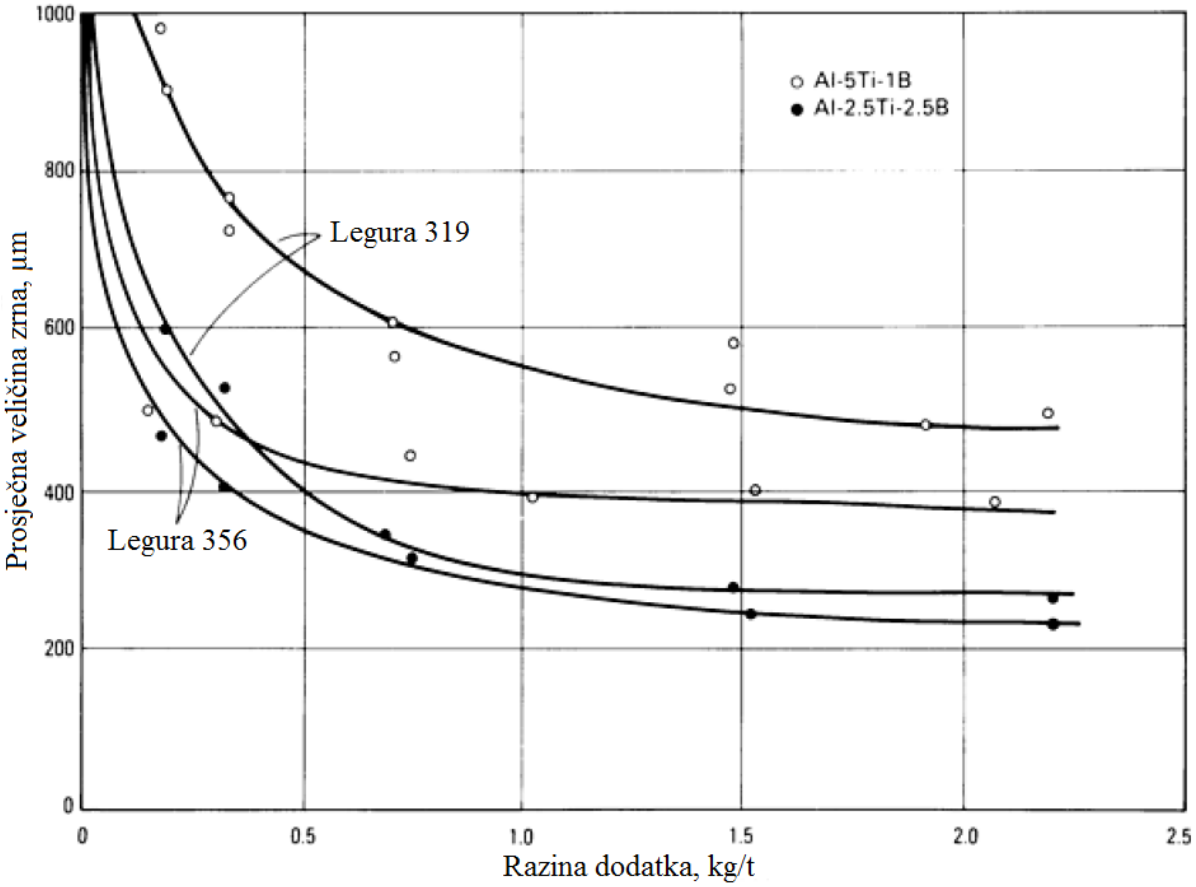

Slika 5.14. Usporedba učinkovitosti glavnih sredstava za usitnjavanje zrna za aluminijske legure [19]

*5.1.4.3. AlTiB predlegure*

Utvrđeno je da zajednički dodatak titana i bora uspješnije usitnjava zrna taljevine. Na učinkovitost ovih predlegura veliki utjecaj ima Ti/B omjer i mikrostruktura (morfologija, veličina i distribucija $Al_3Ti$ čestica). Ti/B omjer kreće se od 1:1 do 5:1. U AlTiB predlegurama postotak titana kreće se od 2-10%, a postotak bora 0,1-3%.

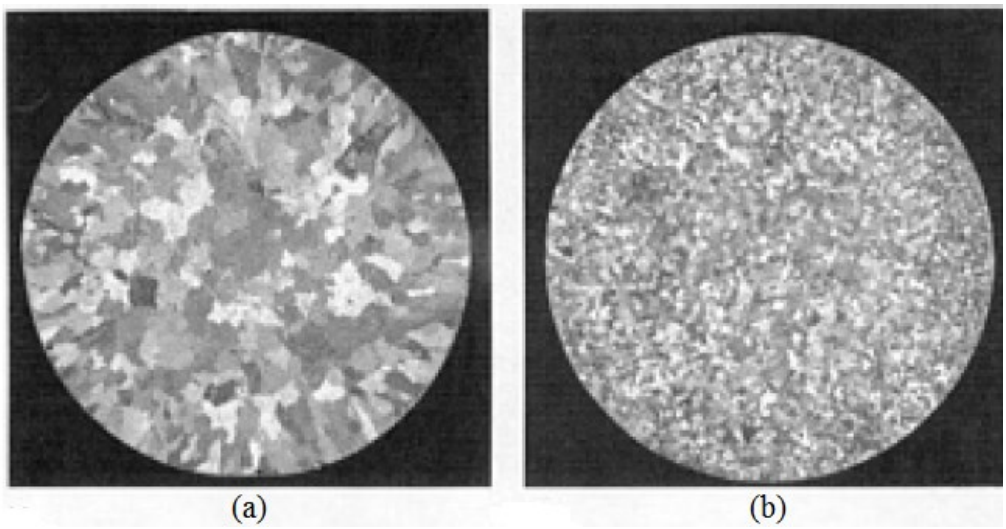
Kod korištenja aluminij-bor sredstva za usitnjavanje zrna, glavni konstituent usitnjavanja je $AlB_2$ čestica, koja se poboljšava s većim otopljenim sadržajem silicija. Međutim, $AlB_2$ će se otopiti i reagirati s preostalim titanom u $TiB_2$ koji se može nakupiti na dnu peći. Ako se to dogodi, sposobnost sredstva za usitnjavanje zrna se gubi [19].

Slika 5.15 prikazuje učinkovitost Al-2,5Ti-2,5B legure na legure 356 i 319 u odnosu na Al-5Ti-1B leguru. Legure na slici 5.15 imaju oznaku prema ANSI standardima (*American National Standards Institute*).




Slika 5.15. Učinkovitost titan-bor sredstva za usitnjavanje zrna na aluminijske legure 356 i 319 [19]

Slika 5.16 prikazuje usporedbu adekvatno usitnjenog zrna Al-7Si legure prije i poslje dodatka sredstva za usitnjavanje zrna.



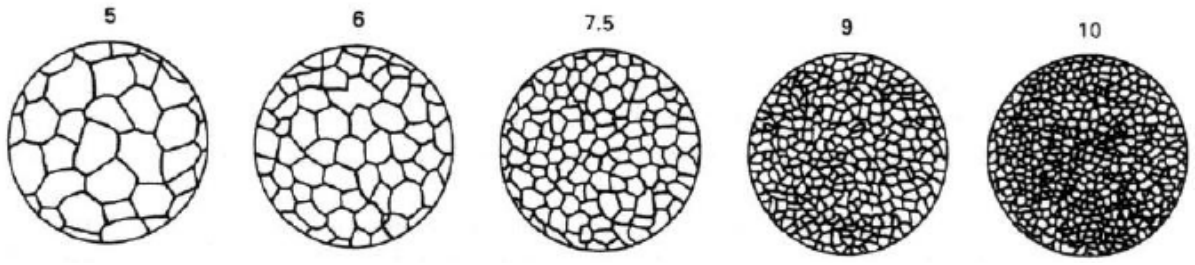

Slika 5.16. Rezultat dodavanja 5Ti-1B sredstva za usitnjavanje zrna u Al-7Si leguru. (a) prije, (b) poslije dodavanja [19]

*5.1.4.4. AlTiC predlegure*

AlTiC predlegure su razvijene kao alternativa AlTiB predlegurama na temelju industrijskih zahtjeva za povećanom čistoćom i smanjenjem grešaka kod kritičnih proizvoda (folija). Pokazuju manju sklonost trovanju s Zr i Cr u AlSi legurama. Mehanizmi nukleacije na TiC česticama nisu razjašnjeni, ali pretpostavlja se da do nukleacije dolazi direktno na TiC česticama. Odsustvo trovanja može se objasniti nepostojanjem $Al_3Ti$ sloja. Koriste se kod proizvodnje odljevaka s niskim temperaturama lijevanja i sporim hlađenjem, zbog svoje osjetljivosti na veće temperature (TiC se otapa na višim temperaturama) [21].

### *5.1.5. Proces kontrole kod usitnjavanja zrna*

Toplinska analiza postala je neizostavna metoda kontrole učinkovitosti usitnjavanja zrna. Omogućava korelaciju promjena na krivuljama hlađenja s veličinom zrna. Tako se s dužim vremenom pothlađenja pri likvidus temperturi ($T_L$), snižava nukleacijski potencijal i veće su dimenzije zrna. Slika 5.17 upućuje na korelaciju veličine zrna s različitim sredstvima za usitnjavanje zrna [21].



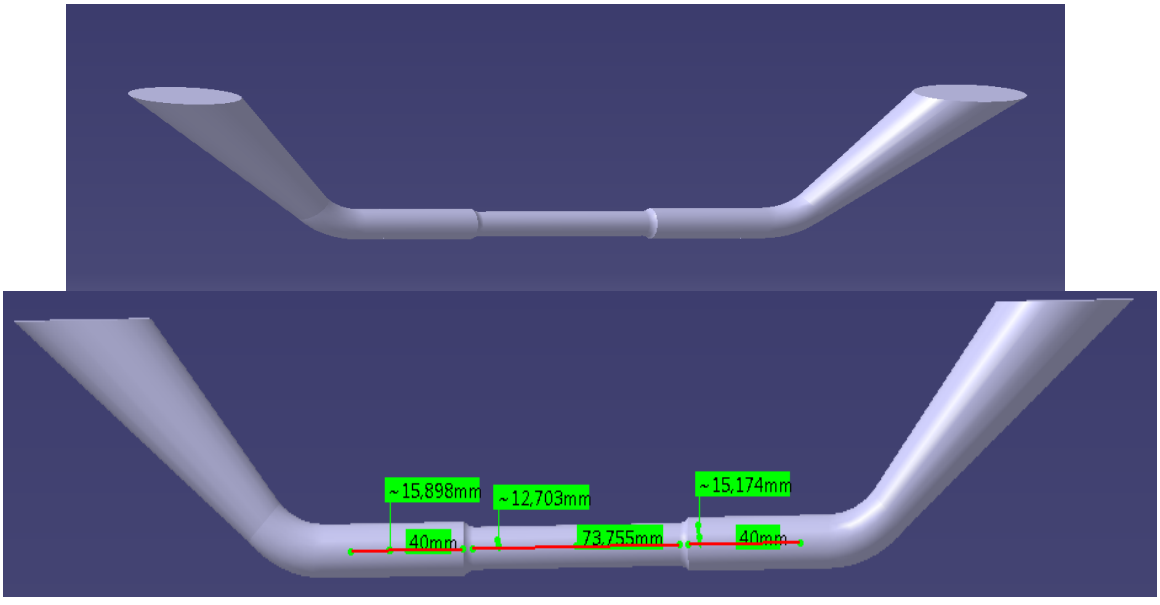

Slika 5.17. Shematski prikaz veličina zrna aluminija procijenjen na osnovu toplinske analize [21]

# 6. EKSPERIMENTALNI DIO

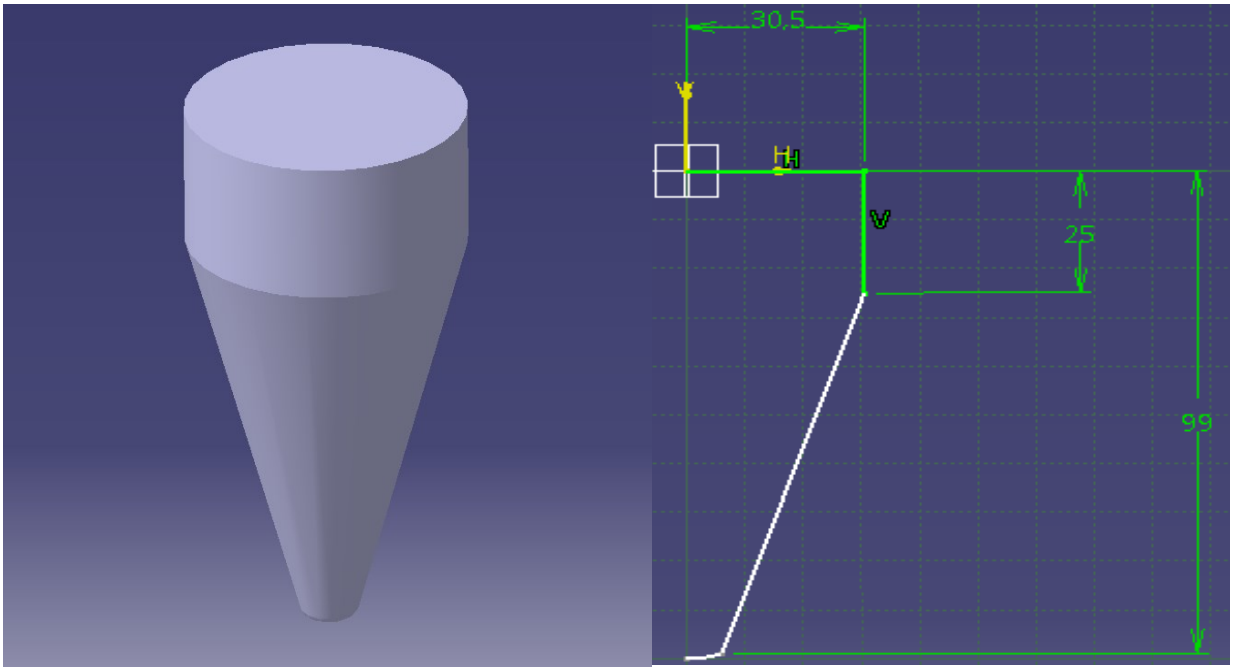
U eksperimentalnom dijelu rada ispitivan je utjecaj usitnjavanja zrna aluminijske legure AlSi12. Cilj je bio utvrditi učinak usitnjavanja zrna predlegurom AlTi5B1 kao i različitih brzina hlađenja na mikrostrukturu i mehanička svojstva navedene legure. U svrhu dobivanja rezultata utjecaja usitnjavanja zrna, odliveno je 10 odljevaka od legure AlSi12 i to osam epruveta i dva stošca kako bi se odredio utjecaj različitih brzina hlađenja. Pet odljevaka je od osnovne AlSi12 legure, a ostalih pet je od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom. Odlivene su četiri epruvete u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-$CO_2$, četiri epruvete u kokilu te dva stošca u kalup od svježe kalupne mješavine. Epruvete su jednakih dimenzija $d_0$ = 12 mm i $L_0$ = 60 mm, gdje je $d_0$ početni promjer epruvete (mm), a $L_0$ početna mjerna duljina epruvete (mm). U eksperimentu se ispitivao utjecaj brzine hlađenja na razvoj mikrostrukture na način da su se odrezala tri uzorka od svakog stošca i to na različitim visinama. Na vrhu stošca je hlađenje najbrže, dok je na bazi stošca hlađenje najsporije.

Na odljevcima su provedena metalografska ispitivanja na optičkom mikroskopu te statička vlačna ispitivaja na kidalici.

Na slici 6.1 i 6.2 prikazani su modeli epruvete i stošca.




Slika 6.1. Model epruvete




Slika 6.2. Model i dimenzije stošca

Sva lijevanja i ispitivanja provedena su na opremi za lijevanje i ispitivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Laboratoriju za ljevarstvo, Laboratoriju za materijalografska ispitivanja te Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.

### 6.1. Simulacija

Simulacija je napravljena u programskom paketu QuikCAST za ulijevanje taljevine u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-$CO_2$ i lijevanje stošca u kalup od svježe kalupne mješavine. Simulacija je provedena za leguru AlSi12 koja je također korištena i u procesu lijevanja. Simulacija se provodi prije procesa lijevanja kako bi se vidio tijek lijevanja, proces skrućivanja, poroznost te kako bi se smanjile i izbjegle greške u odljevku.

### 6.2. Kalupljenje

Epruvete su lijevane korištenjem dva postupka lijevanja: lijevanje u kokile te postupkom vodeno staklo-$CO_2$, stožac je lijevan u pješčani kalup.

### *6.2.1. Postupak vodeno staklo-$CO_2$*

Jednokratni $CO_2$ kalup izrađuje se u više koraka koji su prikazani na slikama 6.3 – 6.11. Na postolje s modelom stavlja se kalupnik (slika 6.3) te se model posipa praškom likapodij zbog lakšeg odvajanja $CO_2$ kalupa od modela (slika 6.4).



Slika 6.3. Kalupnik s modelom



Slika 6.4. Posipavanje modela praškom likapodij

Nakon toga, kalupnik se popunjava kalupnom mješavinom koja se sastoji od kvarcnog pijeska i anorganskog veziva vodenog stakla (natrijev silikat), a priprema se u mješalici (slika 6.5) te slijedi sabijanje (slika 6.6).



Slika 6.5. Popunjavanje kalupnika kalupnom mješavinom



Slika 6.6. Sabijanje

Nakon sabijanja kalupne mješavine, u kalupu se izbuše odušci kako bi plinovi kod lijevanja mogli izaći van (slika 6.7) te slijedi očvršćivanje kalupne mješavine propuhivanjem plinom $CO_2$

(slika 6.8). Kad se ne bi omogućio izlazak plinova iz kalupne šupljine, plinovi bi prodrli u odljevak te bi došlo do poroznosti.

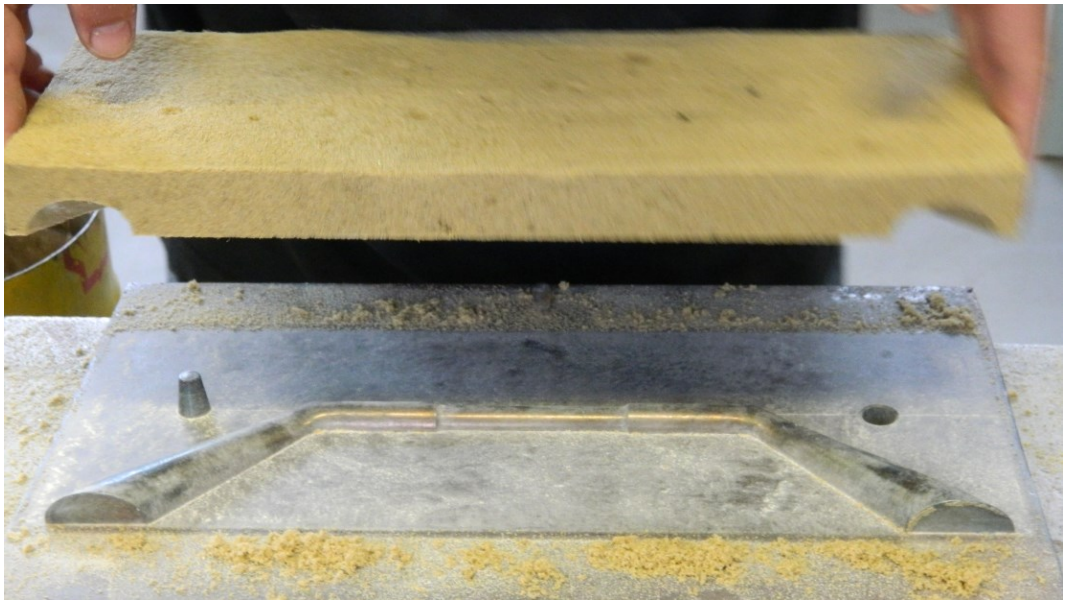


Slika 6.7. Bušenje odušaka u kalupu



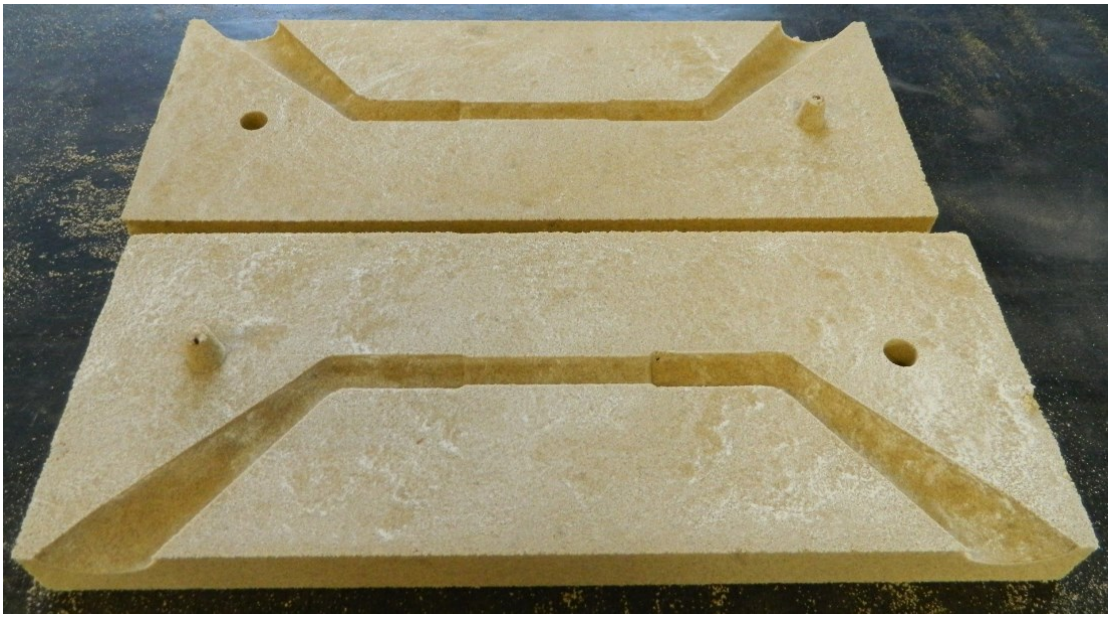
Slika 6.8. Očvršćivanje kalupne mješavine propuhivanjem plinom $CO_2$

S time je gotova jedna strana kalupa koja se vadi iz kalupnika (slika 6.9) te se na isti način radi i druga strana.

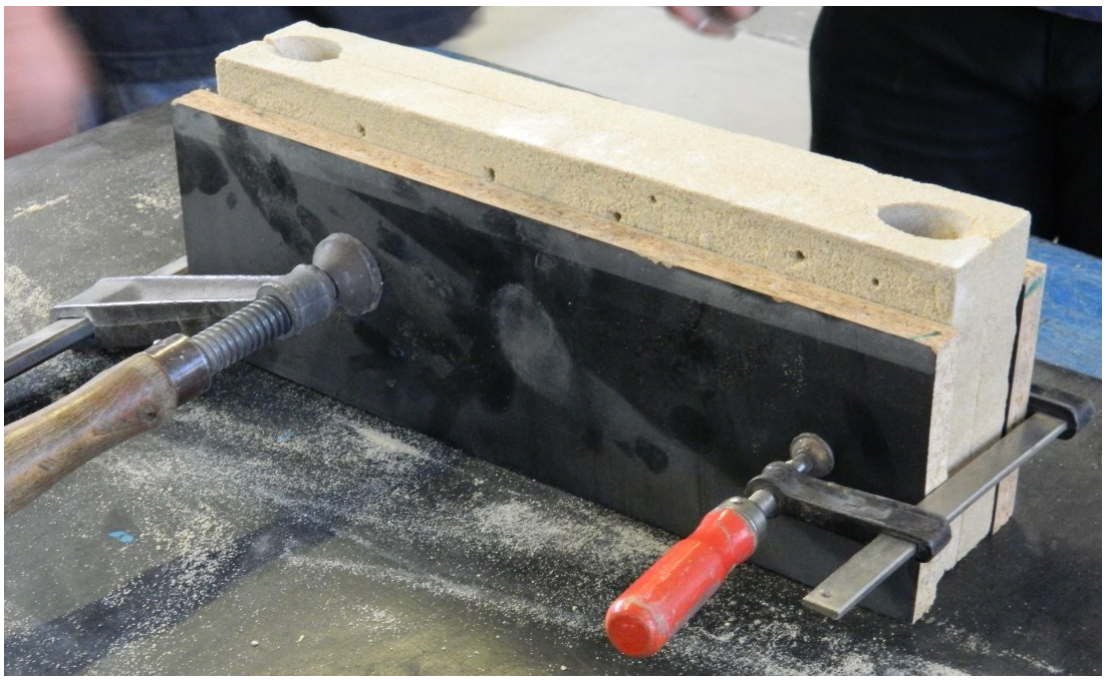


Slika 6.9. Vađenje jednog dijela kalupa iz kalupnika

Nakon izrade drugog dijela kalupa (slika 6.10), polovice kalupa se spajaju i učvršćuju stegama te je kalup spreman za lijevanje (slika 6.11).



Slika 6.10. Oba dijela kalupa

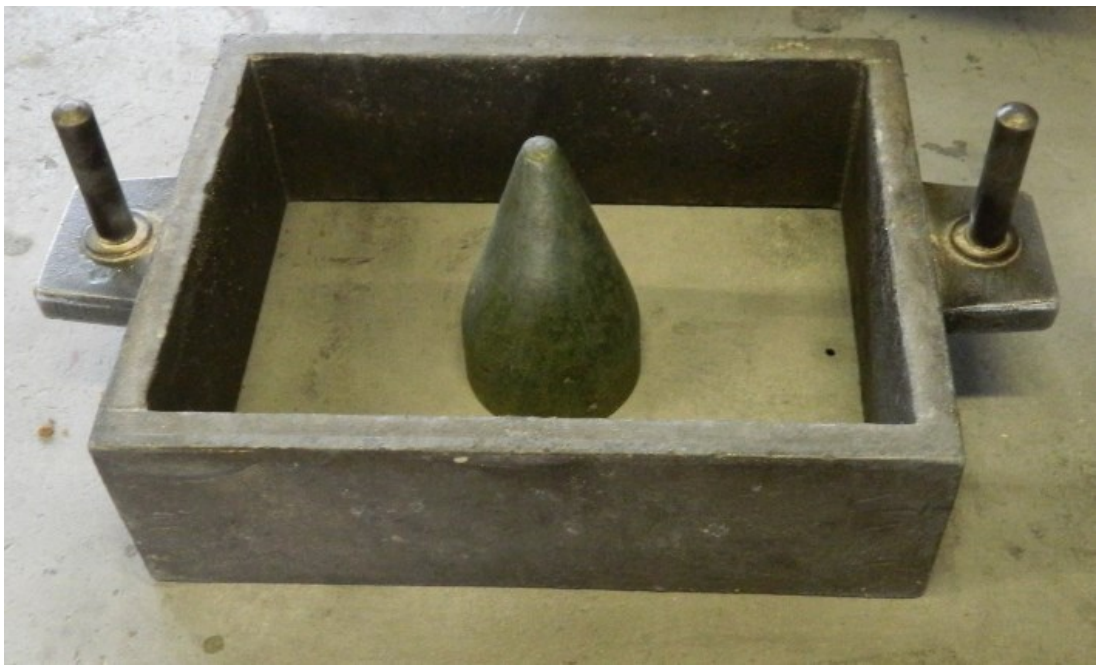


Slika 6.11. Gotov kalup

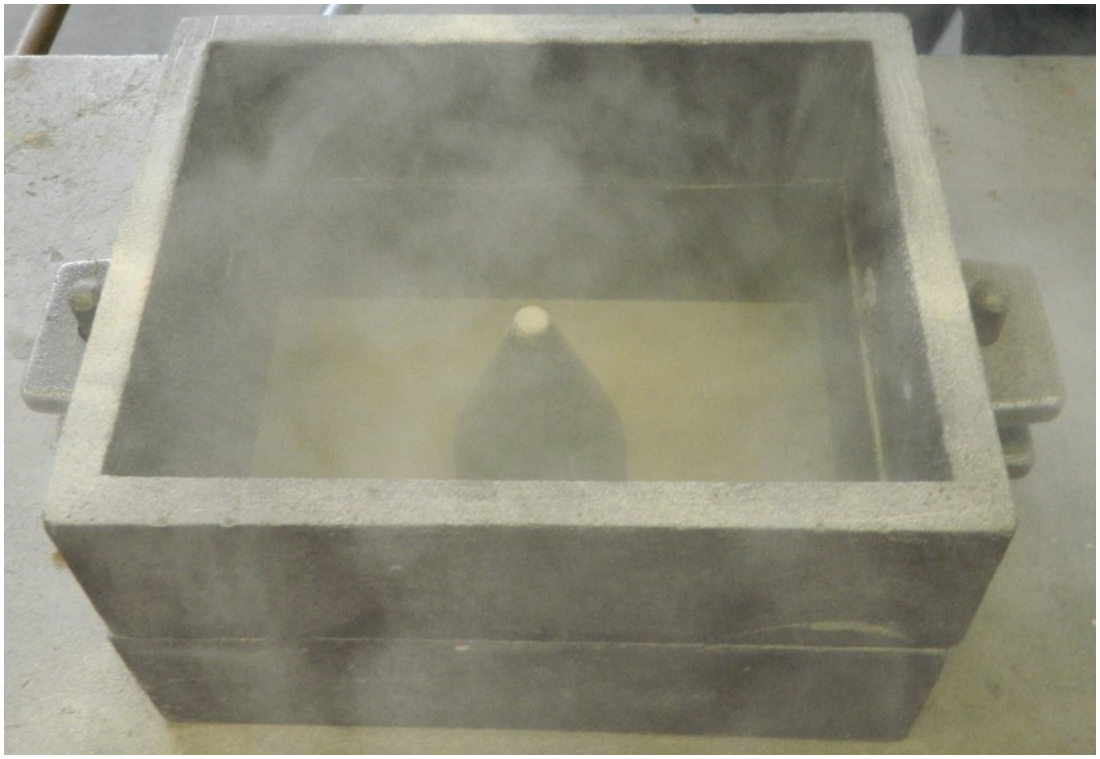
Na isti način rade se još tri $CO_2$ kalupa (ukupno četiri).

### *6.2.2. Lijevanje stošca u kalup od svježe kalupne mješavine*

Jednokratni kalup od svježe kalupne mješavine za lijevanje stošca izrađen je u nekoliko koraka koji su prikazani slikama 6.12 – 6.19. Kalupna mješavina sastoji se od modelnog i dopunskog pijeska koji su pomiješani sa glinom i vodom. Kalupna šupljina u kalupu oblikuje se korištenjem modela koji odgovara obliku odljevka. Najprije se u kalupnik stavlja model (slika 6.12) te se model posipa praškom likapodij zbog lakšeg vađenja modela (slika 6.13).



Slika 6.12. Postavljanje modela u kalupnik



Slika 6.13. Posipavanje modela praškom likapodij

Nakon toga kalupnik se popunjava modelnim pijeskom (slika 6.14), a zatim dopunskim pijeskom (slika 6.15) te slijedi sabijanje (slika 6.16).



Slika 6.14. Nasipavanje modelnog pijeska



Slika 6.15. Nasipavanje dopunskog pijeska



Slika 6.16. Sabijanje

Nakon sabijanja slijedi odstranjivanje viška kalupne mješavine (slika 6.17).



Slika 6.17. Odstranjivanje viška kalupne mješavine

Nakon toga, kalupnik se okreće, model se vadi iz kalupa (slika 6.18) te se ručno zaglađuju rubovi (slika 6.19).



Slika 6.18. Vađenje modela iz kalupa



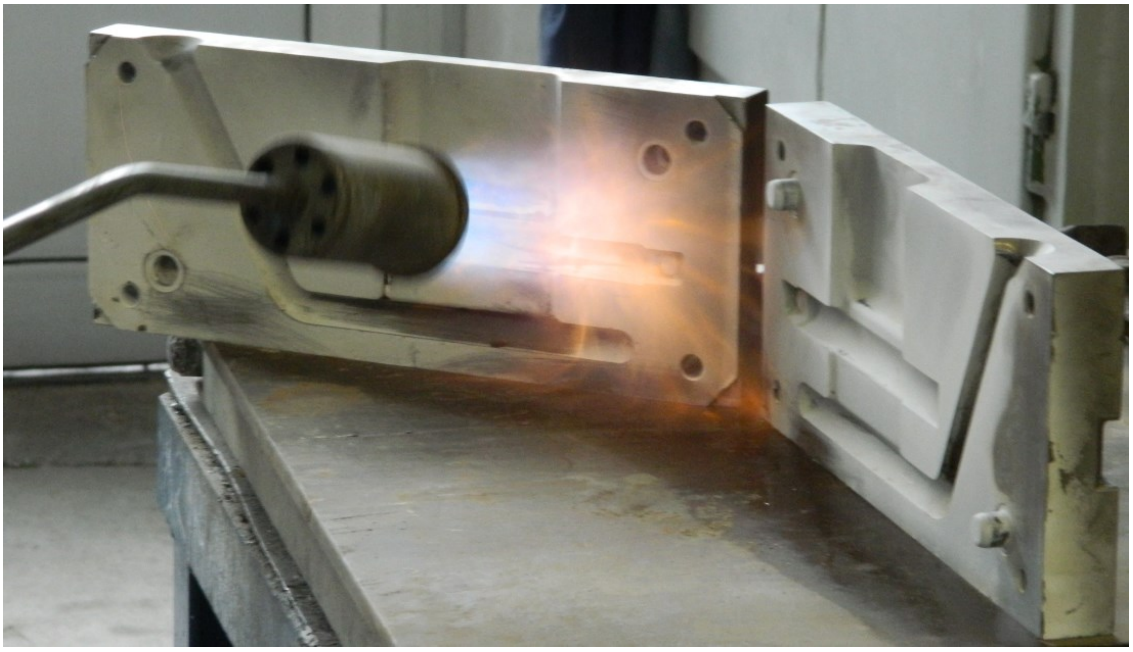
Slika 6.19. Ručno zaglađivanje rubova

Istim postupkom izrađen je još jedan kalup (ukupno dva).

Preostala četiri odljevka izrađena su u metalnoj kokili.

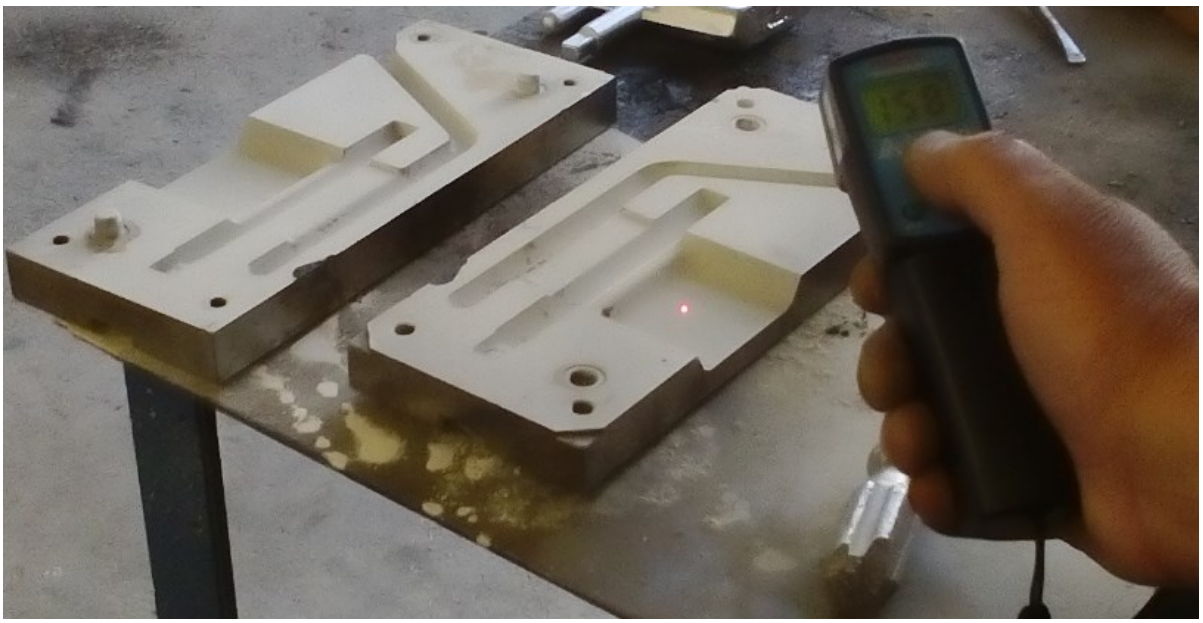
### *6.2.3. Lijevanje u kokilu*

Prvi korak u izradi odljevka u kokili je zagrijavanje metalne kokile na temperaturu iznad 100 ºC (slika 6.20).



Slika 6.20. Zagrijavanje metalne kokile

Temperatura je izmjerena pomoću laserskog pirometra (slika 6.21). Nakon zagrijavanja kokile na odgovarajuću temperaturu, slijedi naštrcavanje premaza od cirkonskog praha po unutrašnjem dijelu kokile. Premaz se nanosi kako ne bi došlo do međusobne reakcije između metalne kokile i rastaljenog metala. Cirkonski premaz je vatrootporan te se nanosi zbog lakšeg vađenja odljevka iz kokile (slika 6.22).

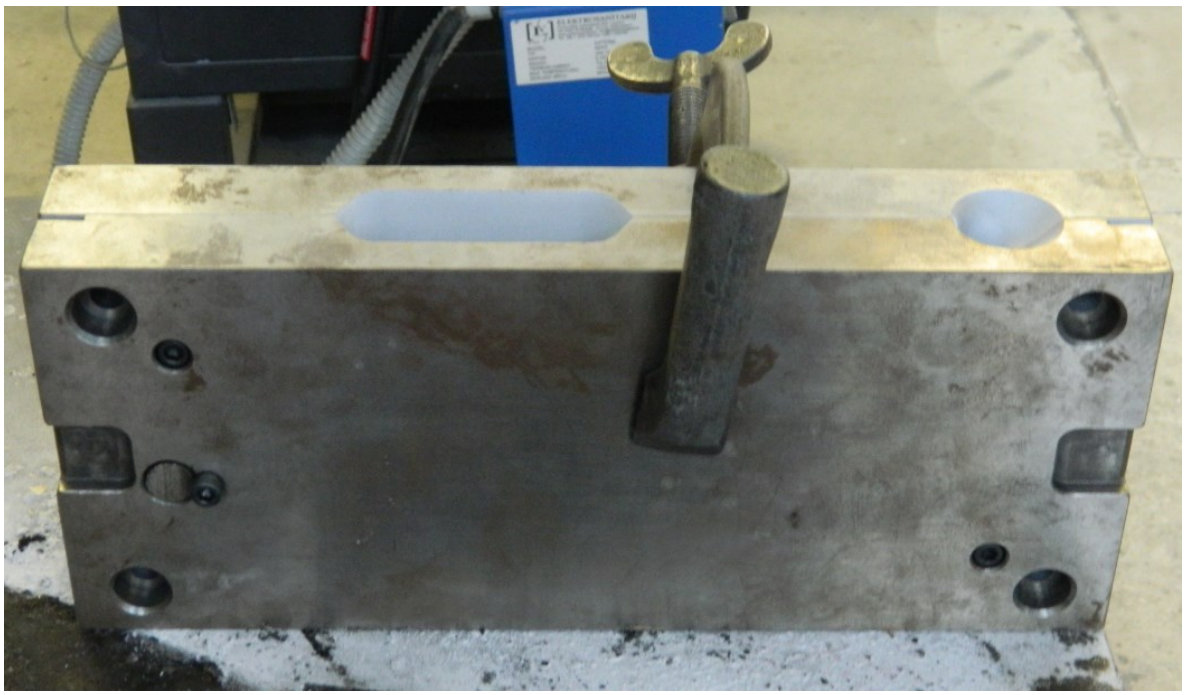


Slika 6.21. Mjerenje temperature kokile pomoću pirometra



Slika 6.22. Naštrcavanje premaza od cirkonskog praha po unutrašnjem dijelu kokile

Sljedeći korak je spajanje kokile, stezanje pomoću stege te je nakon toga, kokila spremna za lijevanje (slika 6.23).



Slika 6.23. Gotova kokila

Nakon lijevanja prvog odljevka, isti postupak ponovio se još tri puta (ukupno četiri odljevka).

## 6.3. Lijevanje

Lijevanje je izvršeno u dva navrata zbog nedovoljnog kapaciteta peći. U jednom navratu odliveni su odljevci od osnovne AlSi12 legure i to četiri epruvete te jedan stožac. U drugom navratu odliveni su odljevci od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom.

### *6.3.1. Legura*

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

Tablica 6.1. Mehanička svojstva legure EN 44100 [22]

| | 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 pijesak | 150 | 70 | 4 | 50 |

Tablica 6.2. Kemijski sastav legure EN 44100 [22]

| | 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. Priprema taljevine*

Za pripremu taljevine korištena je nagibna elektrootporna peć tvrtke „Elektrosanitarij“. Kapacitet peći je 5 kg te je prikazana na slici 6.24.



Slika 6.24. Peć za pripremu taljevine

Odljevci su izmodelirani u računalnom programu za 3D modeliranje Catia V5R20 kako bi se proračunala približna masa odljevaka, a na temelju toga odredila potrebna masa materijala za taljenje u peći. Na temelju postavljanja parametara gustoće za AlSi12 leguru (2700 kg/m$^3$), izračunata je ukupna masa materijala potrebna za izradu odljevaka i iznosi 7 kg (2 x 3,5 kg), tako da se jednim kapacitetom lonca može odliti pola odljevaka. To je ukupna masa za 10 odljevaka, od kojih je pet od osnovne AlSi12 legure, a pet od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom.

Nakon punjenja lonca sa izrezanim ingotima (slika 6.25), potrebno je oko dva sata kako bi se materijal rastalio.



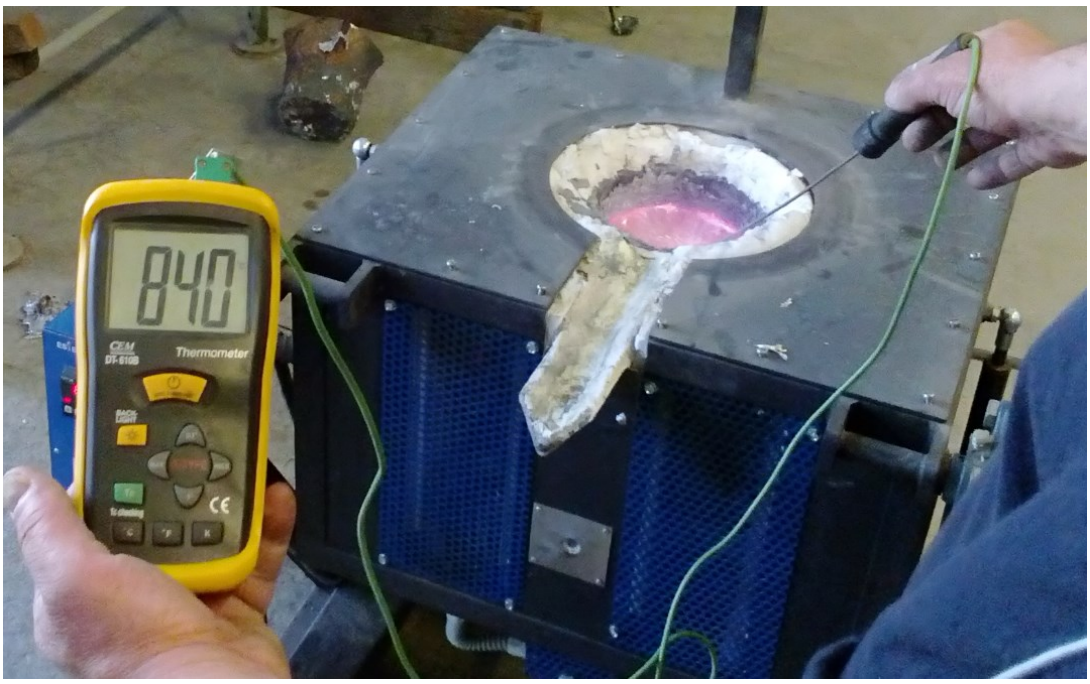
Slika 6.25. Punjenje lonca ingotima

### *6.3.3. Lijevanje uzoraka od osnovne AlSi12 legure*

Priprema lijevanja odljevaka od osnovne AlSi12 legure provodi se u nekoliko koraka. Kad je taljevina spremna za lijevanje, sa vrha taljevine pokupi se troska (slika 6.26). Uređajem za mjerenje temperature (pirometar), izmjerena je temperatura taljevine od 840 ºC u loncu peći (slika 6.27). Temperatura taljevine, odnosno temperatura u čaši za lijevanje je 764 ºC.



Slika 6.26. Skidanje troske iz taljevine



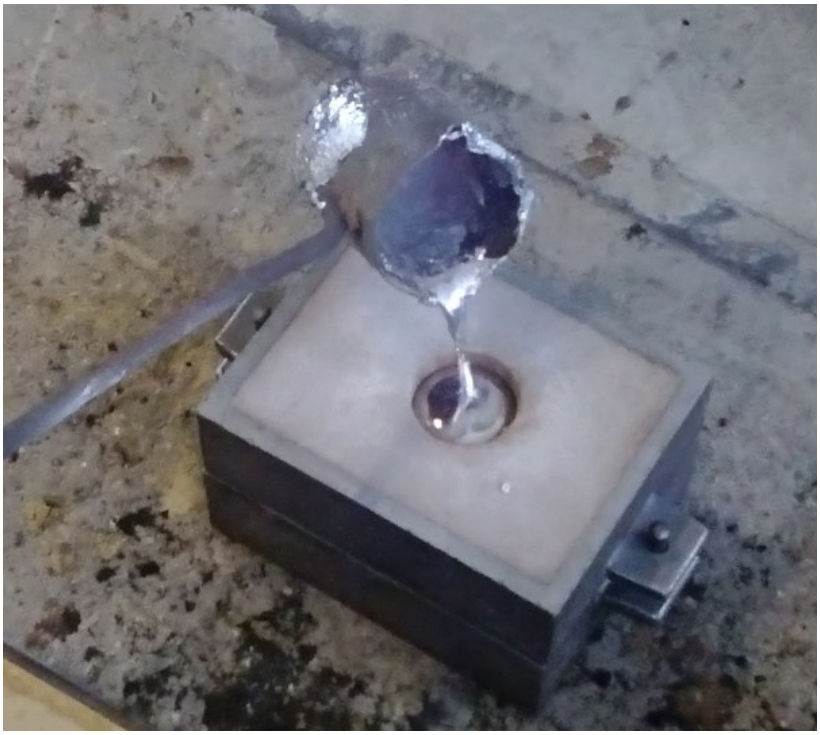

Slika 6.27. Mjerenje temperature taljevine

Nakon toga, slijedi lijevanje koje je prikazano na slikama 6.28 – 6.30. Na slici 6.28 prikazano je lijevanje u kalupe izrađene postupkom vodeno staklo-$CO_2$.



Slika 6.28. Lijevanje u kalupe izrađene postupkom vodeno staklo-$CO_2$

Na slici 6.29 prikazano je lijevanje stošca u kalup od svježe kalupne mješavine, a na slici 6.30 prikazano je lijevanje odljevka u metalnu kokilu.

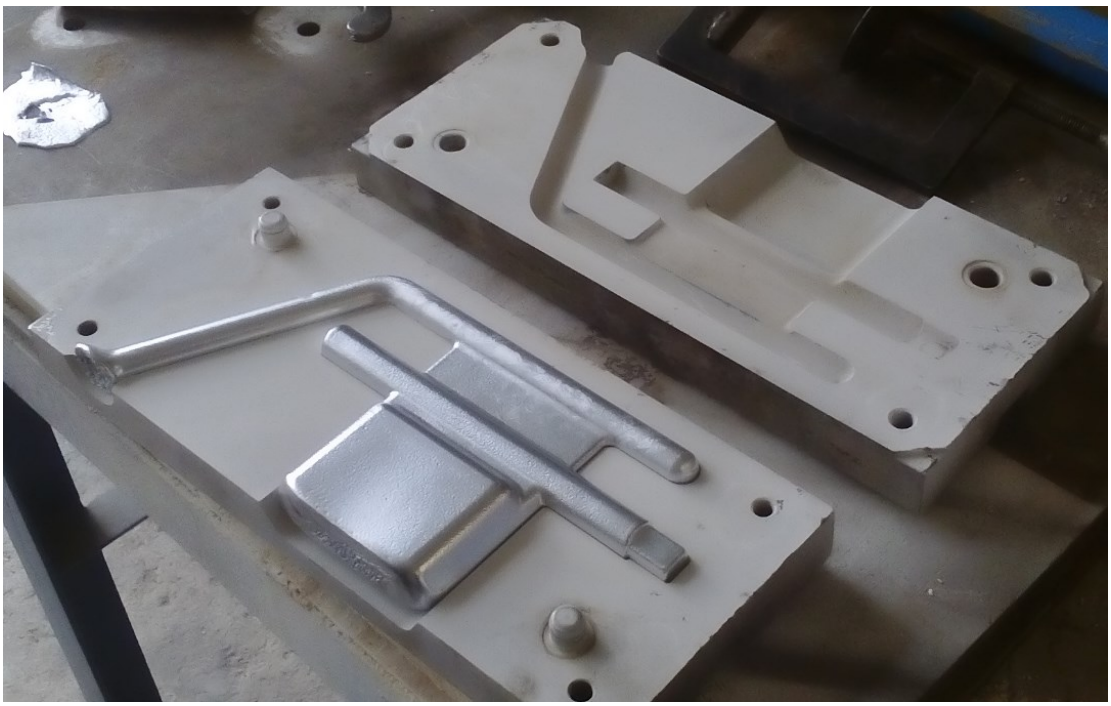


Slika 6.29. Lijevanje stošca u kalup od svježe kalupne mješavine



Slika 6.30. Lijevanje odljevka u metalnu kokilu

Nakon lijevanja slijedi vađenje i istresanje odljevaka (slika 6.31 i 6.32).



Slika 6.31. Vađenje odljevka iz kokile



Slika 6.32. Istresanje odljevaka

Na slici 6.33 vide se odljevci od osnovne AlSi12 legure.



Slika 6.33. Odljevci od osnovne AlSi12 legure

### *6.3.4. Lijevanje odljevaka od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom*

Prije lijevanja u preostale kalupe i kokile, potrebno je pripremiti taljevinu dodavanjem predlegure AlTi5B1. Za leguru AlSi12 dodaje se 4 kg/t predlegure AlTi5B1. Na masu od 3,5 kg taljevine, dodaje se 14 g predlegure AlTi5B1. Potrebna količina predlegure narezana je na tanke kriške kako bi se mogla ravnomjero staviti u taljevinu (slika 6.34) te izvagana na polužnoj vagi s gramskim utezima (slika 6.35).

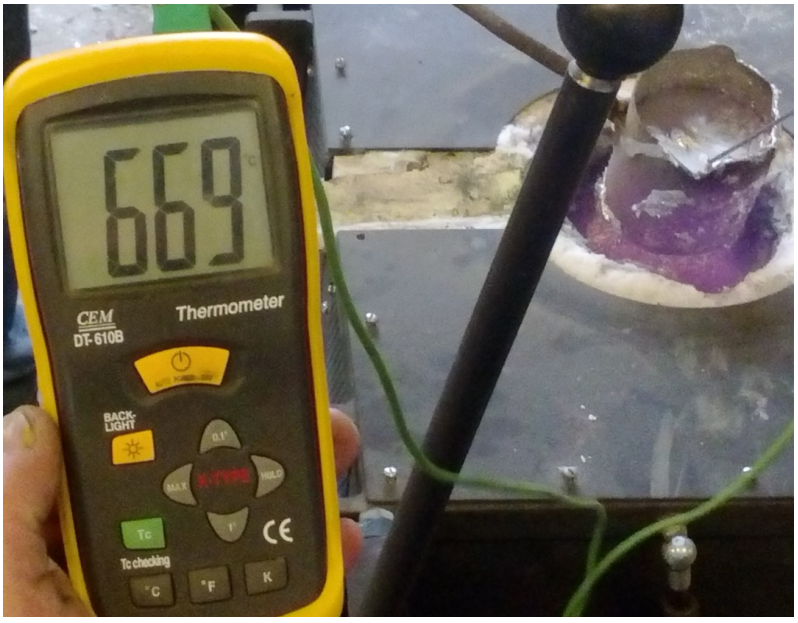


Slika 6.34. Tanke kriške predlegure AlTi5B1




Slika 6.35. Vaganje predlegure AlTi5B1 na polužnoj vagi

Kriške predlegure AlTi5B1, dodaju se u taljevinu temperature 730 ºC do 750 ºC, 5 – 10 minuta prije lijevanja uz povremeno miješanje taljevine. Uređajem za mjerenje temperature, izmjerena je temperatura taljevine nakon obrade od 669 ºC (slika 6.36).




Slika 6.36. Mjerenje temperature taljevine nakon obrade

Slijedi lijevanje i vađenje odljevaka na isti način kao što je prikazano na slikama 6.28 – 6.32. Odljevak iz kokile vadi se na način da se kokila rastvori, dok se kalup izrađen postupkom vodeno staklo-$CO_2$ razbije. Na slici 6.37 prikazani su odljevci od AlSi12 legure usitnjene AlTi5B1 predlegurom i time je završena faza lijevanja.



Slika 6.37. Odljevci od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom

### 6.4. Priprema ispitnih uzoraka

Nakon lijevanja, odljevci su naknadno strojno obrađeni (rezanje uljevnog sustava, obrada odvajanjem čestica na alatnim strojevima s definiranom geometrijom alata - tokarenje) kako bi se pripremili za metalografska i statička vlačna ispitivanja. Epruvete dobivene lijevanjem u kokilu, tokarene su na potrebnu dimenziju i oblik kako bi bile jednake epruvetama dobivenim lijevanjem u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-$CO_2$. Pripremljeno je osam epruveta za statičko vlačno ispitivanje i šest uzoraka za metalografska ispitivanja. Sve epruvete su jednakih dimenzija, $d_0$ = 12 mm i $L_0$ = 60 mm. Uzorci su napraviljeni od dva stošca. Stožac je istokaren na Ø30 te je od svakog stošca napravljeno tri uzorka visine 10 mm. Uzorci su rezani na različitim visinama stošca kako bi se vidio utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu, a te visine mjerene od vrha stošca su 20 mm, 40 mm i 60 mm. Epruvete i uzorci izrađeni su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za alatne strojeve.

### *6.4.1. Uzorci za metalografska ispitivanja*

Prije metalografske analize pripremljeno je 6 uzoraka dimenzija Ø30 x 10 mm. Postupak pripreme uzoraka sastoji se od rezanja, brušenja te poliranja. Nakon rezanja na zadane dimenzije, uzorci su brušeni. Brušenje je provedeno vodootpornim brusnim papirima sa zrnima od silicij karbida. Brušenje se provodi na uređaju „Phoenix alpha“, grinder – polisher proizvođača „Buehler“, prikazanom na slici 6.38. Korištene gradacije brusnog papira su P320, P600, P1200, P2500, P4000. Nakon svake izmjene brusnog papira, uzorci su zakretani za 90º zbog uklanjanja prijašnjih tragova brušenja. Na svakoj gradaciji, uzorak je brušen na 300 o/min pod mlazom vode zbog hlađenja uzorka.



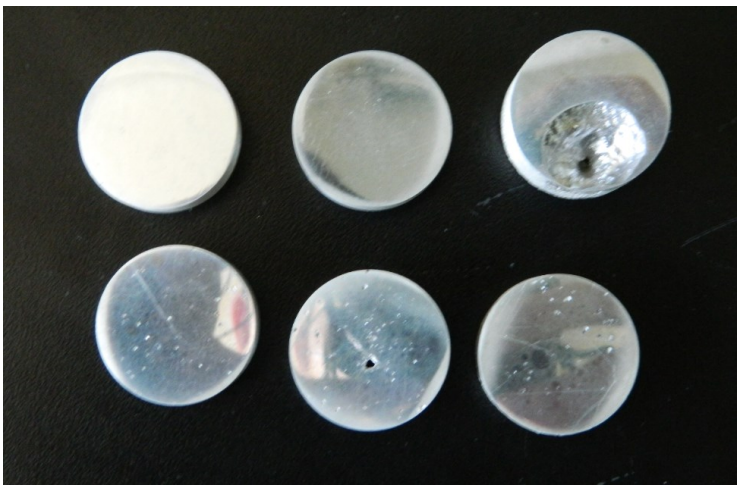
Slika 6.38. Stroj za brušenje „Buehler“

Nakon brušenja uzorci su polirani dijamantnom pastom „Buehler 3 MICRON“ zbog stvaranja glatke površine bez grešaka (defekata) za ispitivanje mikrostrukture legure AlSi12 pod mikroskopom. Za poliranje je korištena tkanina za poliranje „MD-DAC“, kao hlađenje je korišten lubrikant „MetaDi Fluid Buehler“, a nakon toga polirano je „MD-MOL“ tkaninom uz korištenje lubrikanta „MasterMet 2“. Poliranje je provedeno na uređaju za poliranje „Struers DAP-V“ pri brzini 150 o/min; prikazanom na slici 6.39.



Slika 6.39. Uređaj za poliranje

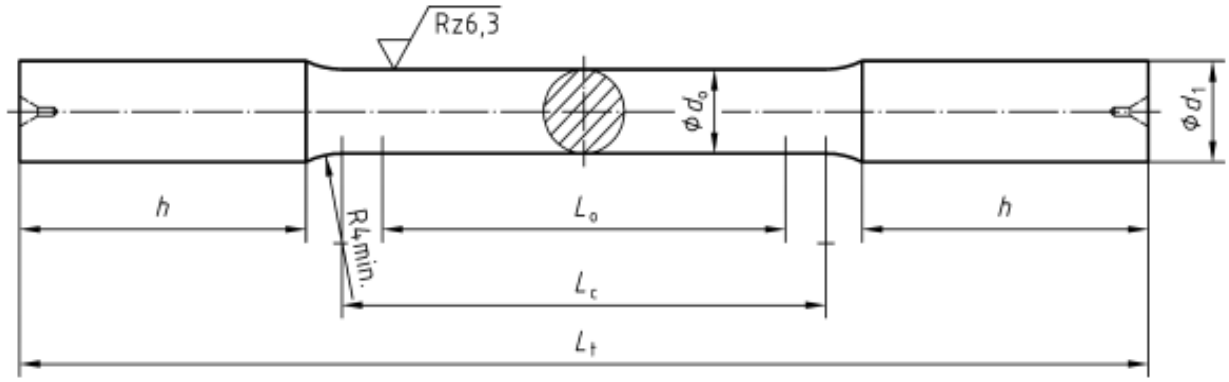
Kako bi se vidjela mikrostruktura potrebno je još nagrizati uzorke u kiselini „Keller's Reagent“ u trajanju od jedne minute. Nakon nagrizanja, uzorci su isprani u destiliranoj vodi kako bi se površina očistila od nečistoća i zaustavila kemijska reakcija kiseline s uzorkom.. Na slici 6.40 prikazani su pripremljeni uzorci.



Slika 6.40. Uzorci za metalografska ispitivanja

### *6.4.2. Epruvete za kidalicu*

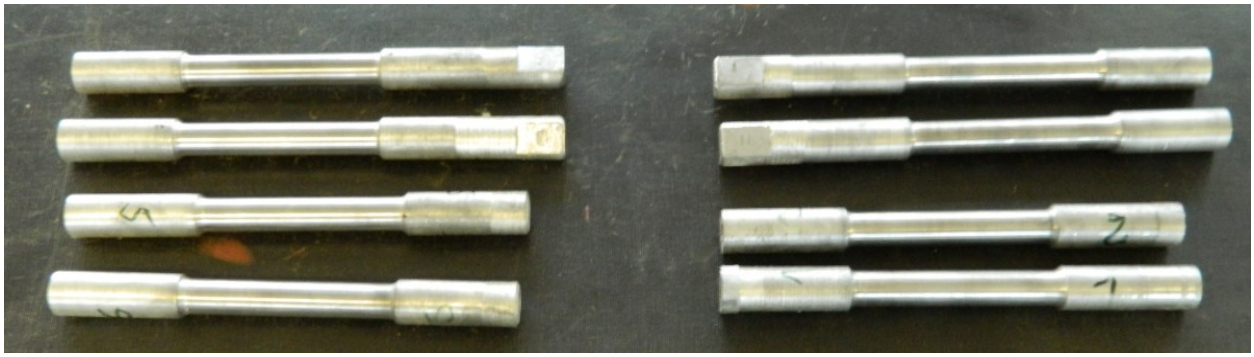
Epruvete za mehanička ispitivanja na kidalici, izrađene su strojnom obradom na potrebne dimenzije. Na slici 6.41 prikazane su dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje.




Slika 6.41. Dimenzije epruvete

gdje je: $d_0$=12 mm, $L_0$=60 mm, $d_1$=15 mm, h=40 mm, $L_c$=72, $L_t$=160 mm.

Na slici 6.42 prikazane su epruvete za statičko vlačno ispitivanje.



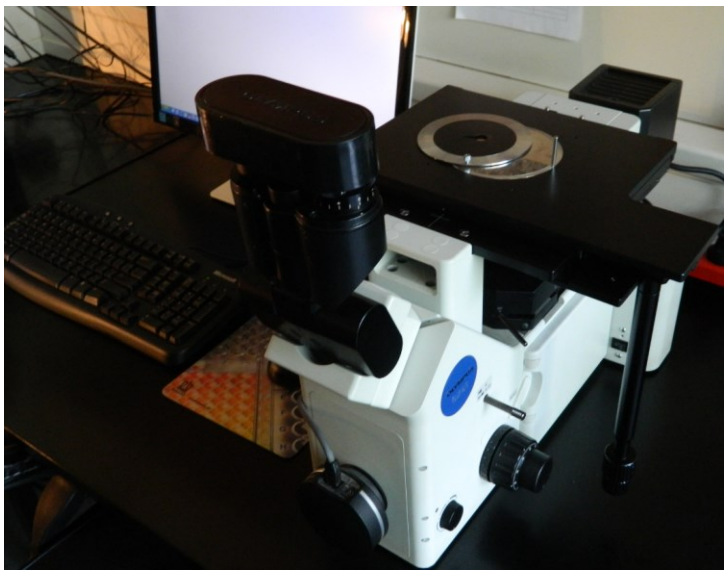
Slika 6.42. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje

## 6.5. Ispitivanje uzoraka

Epruvete su ispitivane na kidalici dok su uzorci od stožaca metalografski ispitivani.

### *6.5.1. Metalografska ispitivanja*

Metalografska ispitivanja provedena su u Laboratoriju za materijalografska ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za metalografsko ispitivanje pripremljenih uzoraka korišten je svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“ s mogućnošću povećanja 50x do 1000x. Na slici 6.43 prikazan je svjetlosni mikroskop.



Slika 6.43. Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“

### *6.5.2. Ispitivanja mehaničkih svojstava*

Statička vlačna ispitivanja provedena su u Laboratoriju za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanja su provedena na hidrauličkoj kidalici „VEB WPM“ nazivne sile 400 kN, prikazanoj na slici 6.44. Kidalica je povezana sa računalom koji je opremljen programom „TIRA“.

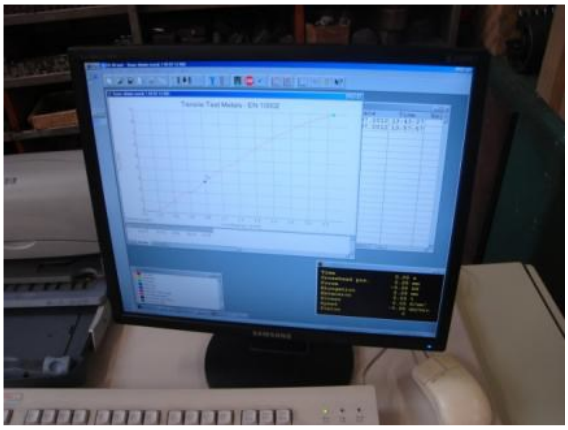


Slika 6.44. Hidraulička kidalica „VEB WPM“

Statičkim vlačnim pokusom ispitane su četiri epruvete izrađene od osnovne AlSi12 legure te četiri epruvete izrađene od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom. Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava. Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima (epruvetama) okruglog poprečnog presjeka.

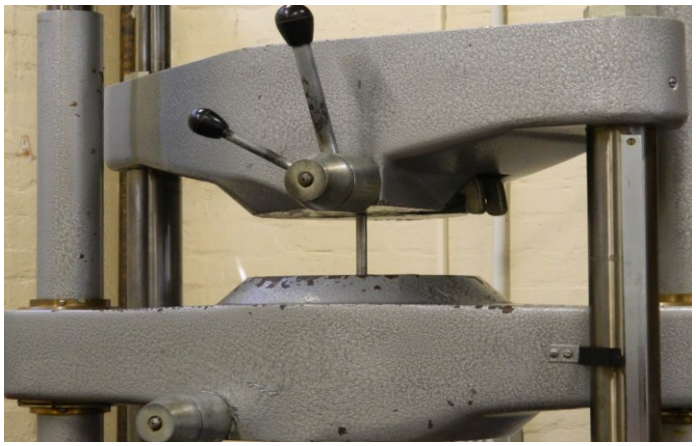
Za svaku epruvetu određena su sljedeća mehanička svojstva: maksimalna sila - $F_m$ [kN], naprezanje kod maksimalne sile koje se zove vlačna ili rastezna čvrstoća - $R_m$ [N/mm$^2$] i konačna sila pri kojoj dolazi do loma epruvete - $F_b$ [kN]. Određena je još površina početnog presjeka epruvete - $S_o$ [mm$^2$], a računski je određen iznos istezljivost - A [%]. Vrijednost $S_0$ potrebna je zbog utvrđivanja svojstava kojima se opisuje deformabilnost materijala. $F_m$ je maksimalna sila nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz smanjenje sile sve do loma epruvete. Nakon dostignutog naprezanja Rm, deformacija epruvete nije više jednolika po čitavom ispitnom dijelu, već se lokalizira na jednom mjestu.

Na slici 6.45 prikazano je računalo opremljeno programom „TIRA“ za analizu rezultata.



Slika 6.45. Računalo opremljeno programom „TIRA“ za analizu rezultata

Na slici 6.46 prikazan je početak statičkog vlačnog ispitivanja epruvete, a na slici 6.47 završetak, tj. lom epruvete.



Slika 6.46. Početak statičkog vlačnog ispitivanja epruvete



Slika 6.47. Lom epruvete

Na slici 6.48 prikazane su sve epruvete nakon statičkog vlačnog ispitivanja.



Slika 6.48. Ispitane epruvete

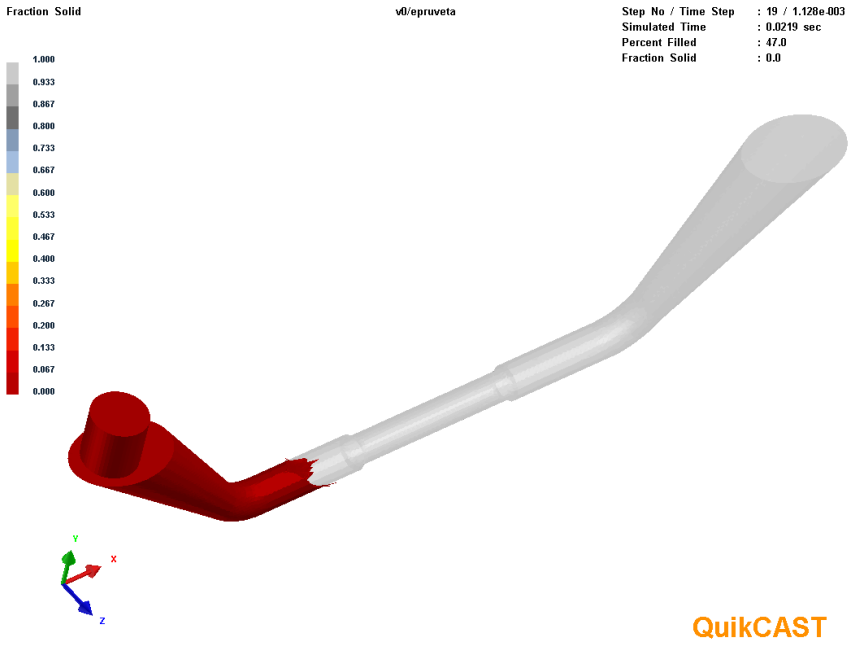
## 6.6. Rezultati i analiza

### *6.6.1. Simulacija lijevanja*

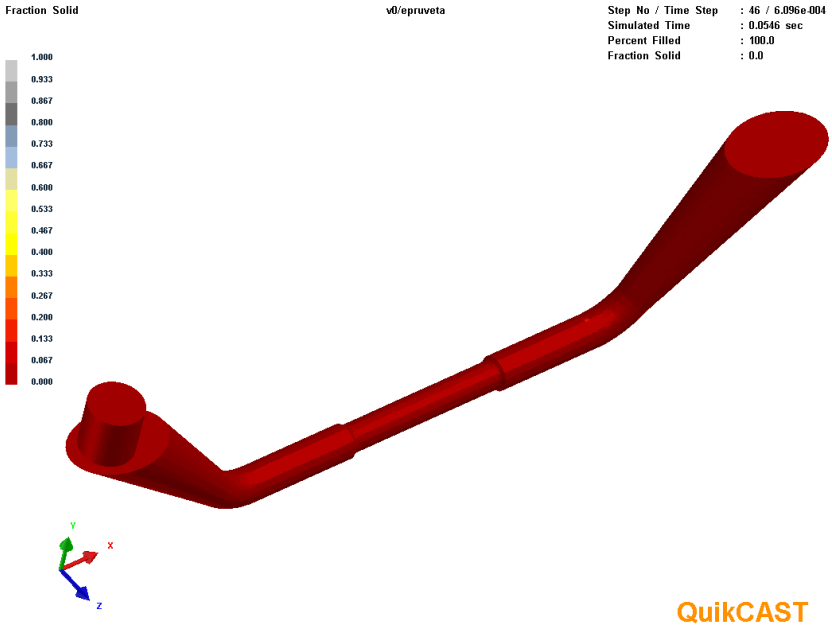
Izrada simulacije provedena je uz pomoć softvera QuikCAST te započinje učitavanjem STL datoteke i postavljanjem parametara ulijevanja. Cilj računalne simulacije je unaprijed dobivanje podataka i informacija o vremenu lijevanja i skrućivanja, vjerojatnosti nastajanja deformacija, usahlina, poroznosti i nedolivenosti te je moguće vizualizirati tijek punjenja i skrućivanja odljevka. Na slikama 6.49 – 6.54 prikazani su rezultati simulacije za tijek punjenja i skrućivanja te poroznost odljevaka (epruvete).

Današnjim metodama simulacija ulijevanja i skrućivanja moguće je ostvariti znatne uštede jer se greška otkriva na virtualnom modelu još u fazi tehnološke razrade te ju je moguće izbjeći pravilnim preoblikovanjem uljevnog sustava ili modela.

Na slici 6.49 prikazan je početak punjenja epruvete, a na slici 6.50 završetak punjenja epruvete. Procijenjeno vrijeme punjenja cijele epruvete je 0,0546 sekundi.




Slika 6.49. Početak punjenja epruvete

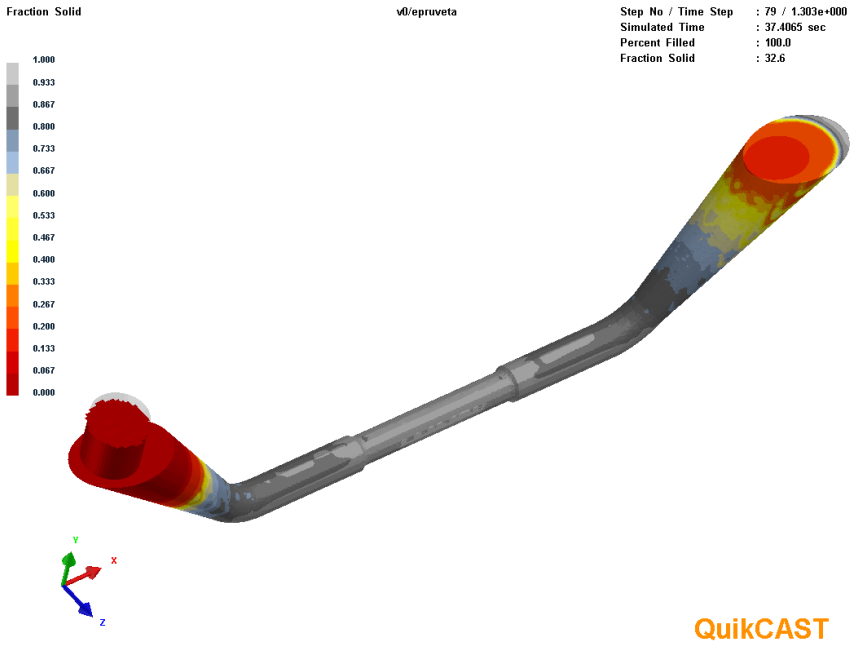



Slika 6.50. Završetak punjenja epruvete

Na slici 6.51 prikazan je početak skrućivanja epruvete. Na epruveti prvo skrućuje najtanji dio zato što u njemu ima najmanje taljevine te se najbrže hladi kao što je prikazano na slici 6.52.

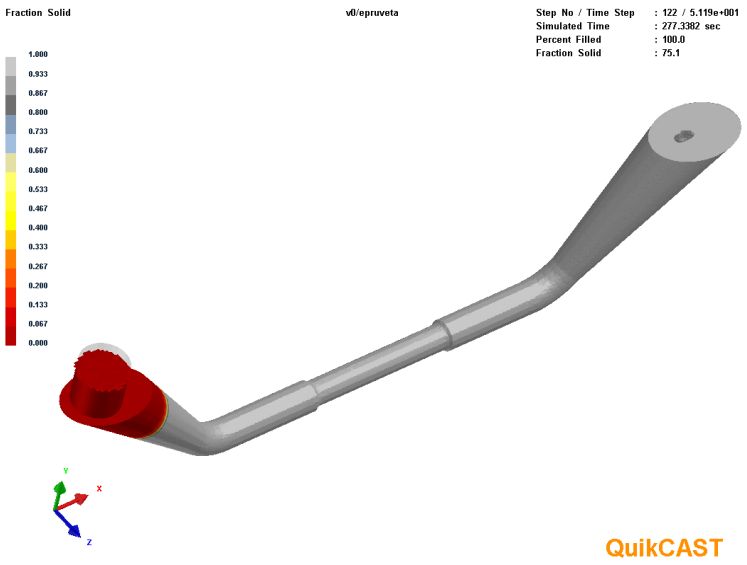



Slika 6.51. Početak skrućivanja epruvete



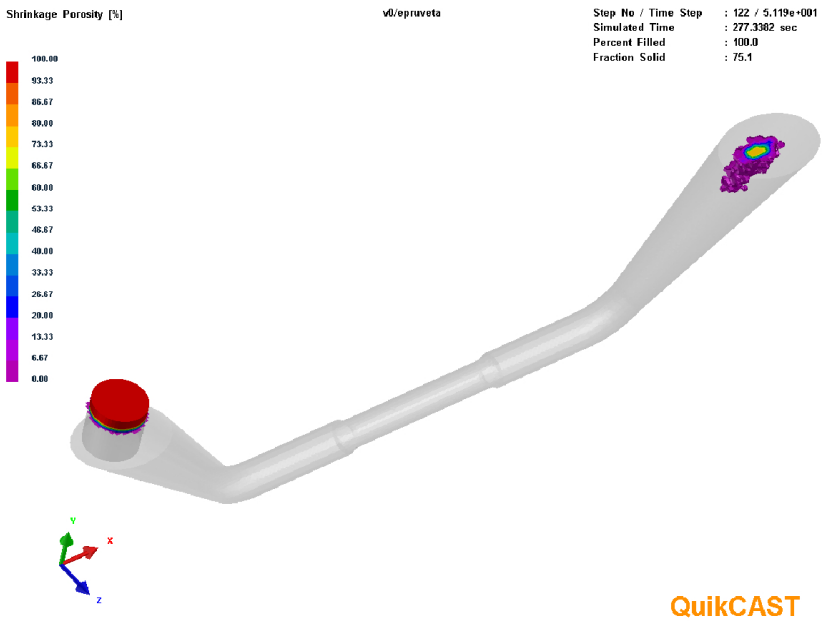

Slika 6.52. Tijek skrućivanja epruvete

Slika 6.53 prikazuje završetak skrućivanja epruvete te se na slici vidi da pojilo zadnje skrućuje. Pojila su zone na kojima odljevak zadnji skrućuje. Na tim mjestima postoji mogućnost pojave usahlina, što je ujedno i jedna od svrha pojila. Također se vidi da zadnje skrućuje pojilo gdje je ulaz taljevine. Procijenjeno vrijeme skrućivanja epruvete je 322,47 sekundi.



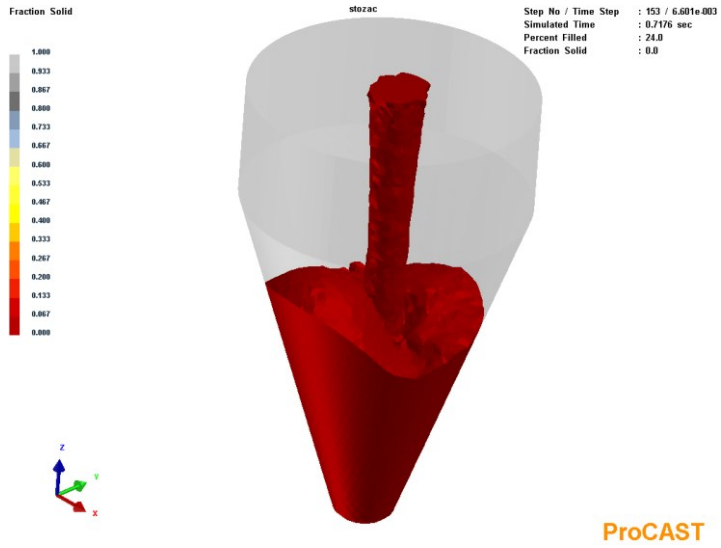

Slika 6.53. Završetak skrućivanja epruvete

Slika 6.54 prikazuje raspored poroznosti po epruveti. Na slici se vidi mogućnost nastajanja poroznosti, ali samo unutar pojila što je dobro. Ako je pojilo za vrijeme skupljanja u tekućem stanju i prilikom skrućivanja je nadoknadilo smanjenje volumena, znači da je ispunilo svoju funkciju. Za kompenzaciju smanjenja volumena odljevka prilikom hlađenja i skrućivanja dodaju se pojila, u kojima treba ostati manjak volumena metala odnosno poroznost, kako odljevak ne bi sadržavao usahline i poroznosti.



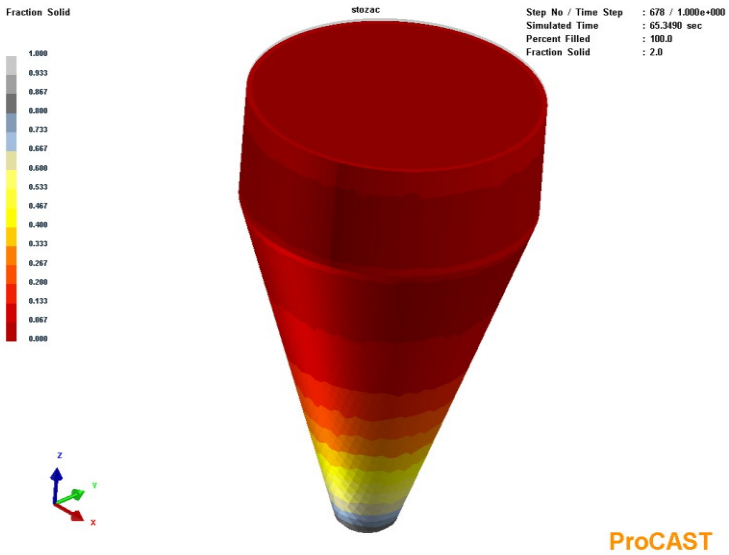

Slika 6.54. Raspored poroznosti po epruveti

Na slikama 6.55 – 6.60 prikazani su rezultati simulacije za tijek punjenja i skrućivanja stošca i mjesta s najvećom vjerojatnošću nastanka poroznosti. Slika 6.55 prikazuje početak punjenja stošca. Procijenjeno vrijeme punjenja stošca je 3,3 sekunde.

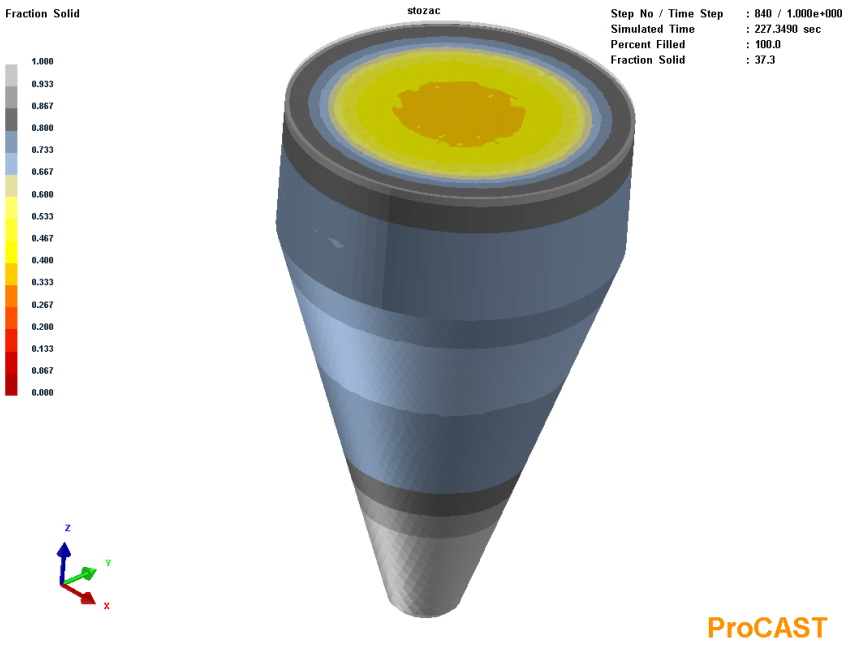



Slika 6.55. Početak punjenja stošca

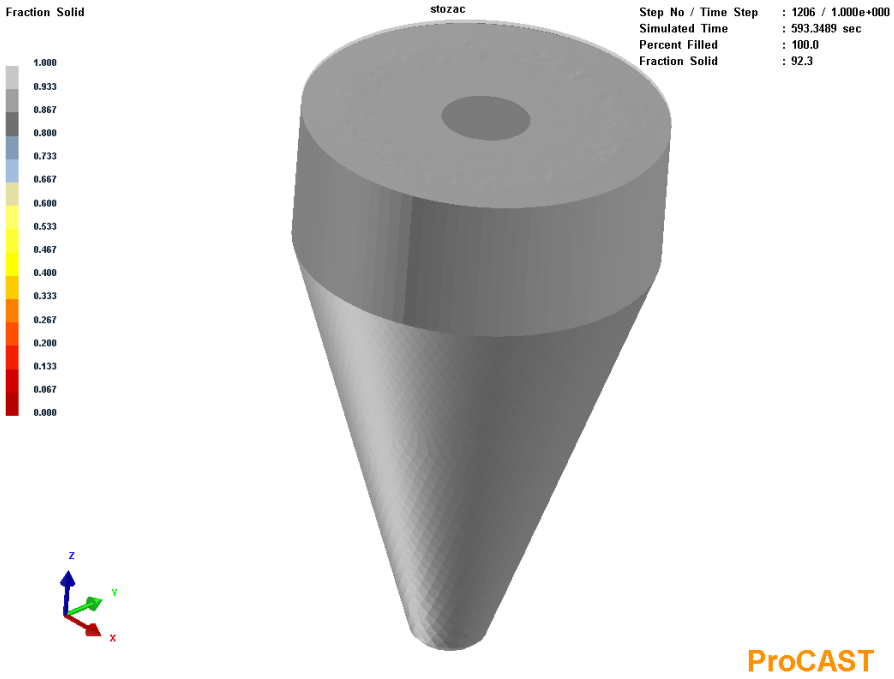
Slika 6.56 prikazuje početak skrućivanja stošca. Prvo skrućuje vrh stošca jer ima najmanje taljevine i najveću brzinu hlađenja.




Slika 6.56. Početak skrućivanja stošca



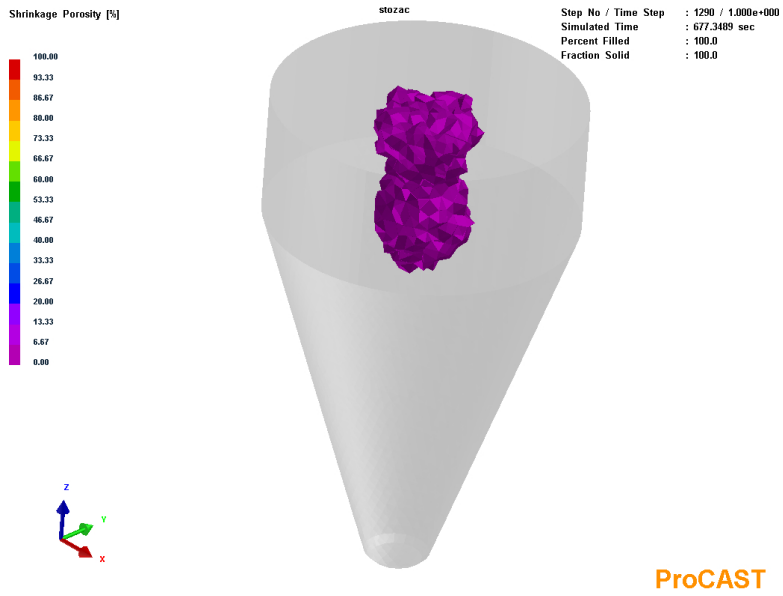

Slika 6.57. Tijek skrućivanja odljevka



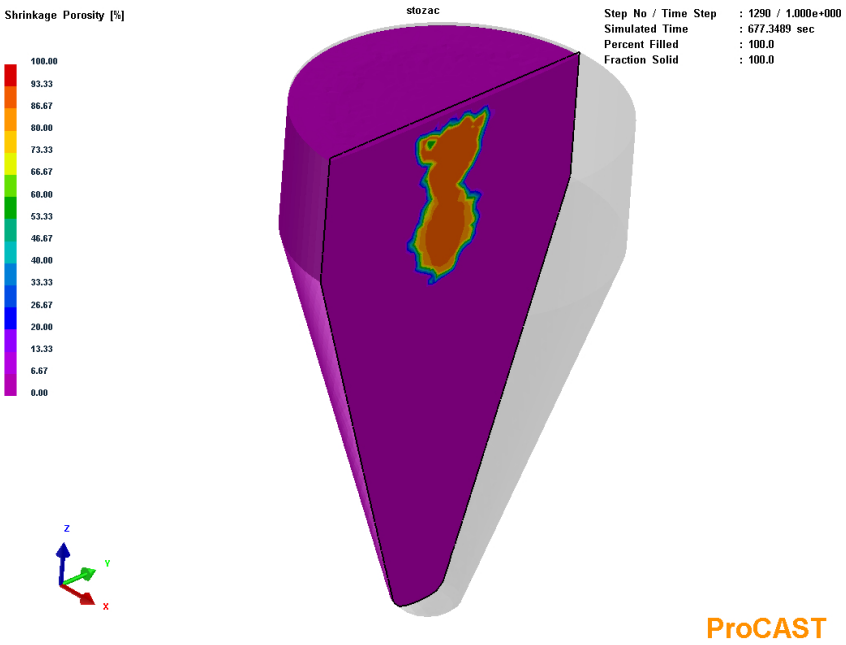

Slika 6.58. Završetak skrućivanja odljevka

Baza stošca zadnja skrućuje jer ima najviše materijala i najmanju brzinu hlađenja (slika 6.57). Procijenjeno vrijeme skrućivanja stošca je 677,35 sekundi.

Na slikama 6.59 i 6.60 vidi se mogućnost nastajanja poroznosti, ali samo unutar baze stošca koja ima funkciju pojila.




Slika 6.59. Raspored poroznosti po odljevku

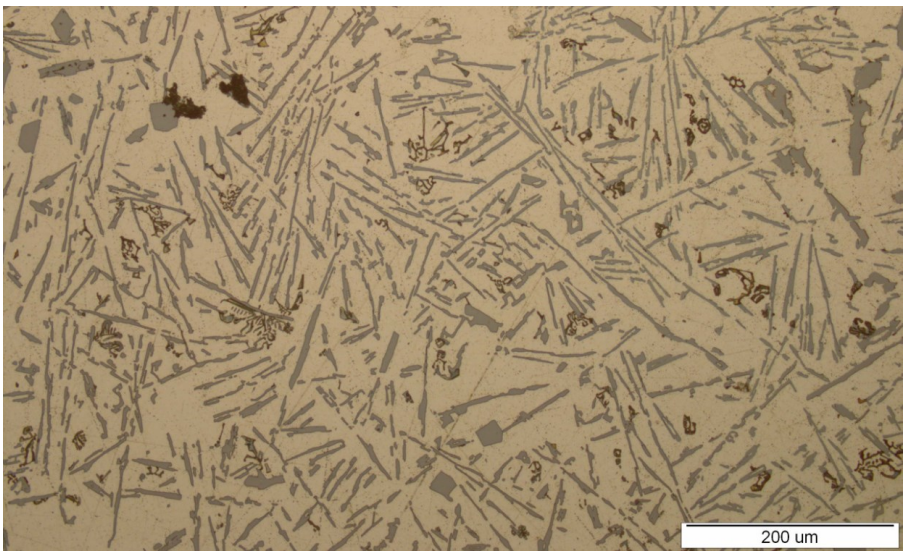



Slika 6.60. Pogled na poroznost iz presjeka

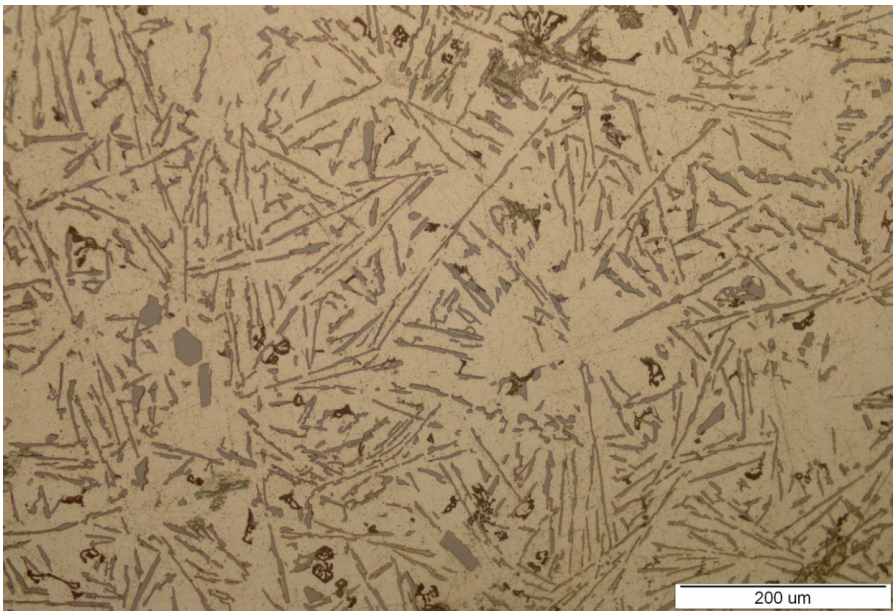
Stožac se lijevao kako bi se od njega napravili uzorci za metalografska ispitivanja. Uzorci su rezani na različitim visinama stošca zbog različite brzine hlađenja kako bi se vidio utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu.

### *6.6.2. Rezultati metalografskih ispitivanja*

Rezultati mikrostrukture uzoraka os osnovne AlSi12 legure prikazani su na slikama 6.61 – 6.63. Na slici 6.61 prikazana je mikrostruktura uzorka od vrha stošca gdje je najveća brzina hlađenja, dok slika 6.62 prikazuje mikrostrukturu uzorka od sredine stošca.

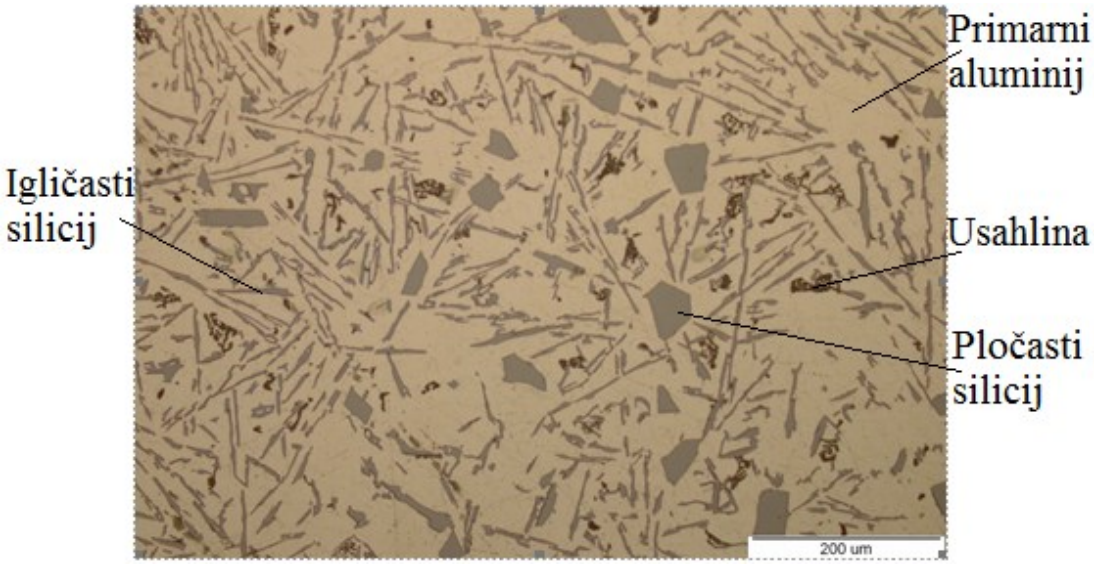



Slika 6.61. Mikrostruktura neusitnjenog uzorka - vrh stošca




Slika 6.62. Mikrostruktura neusitnjenog uzorka – sredina stošca

Slika 6.63 prikazuje mikrostrukturu uzorka od baze stošca gdje je najmanja brzina hlađenja. Ta mikrostruktura se razlikuje od mikrostrukture prikazane slikom 6.61 i 6.62 zbog sporog hlađenja tog dijela stošca. Ima veće pločice silicija, a igličasti silicij je rijeđe raspoređen.



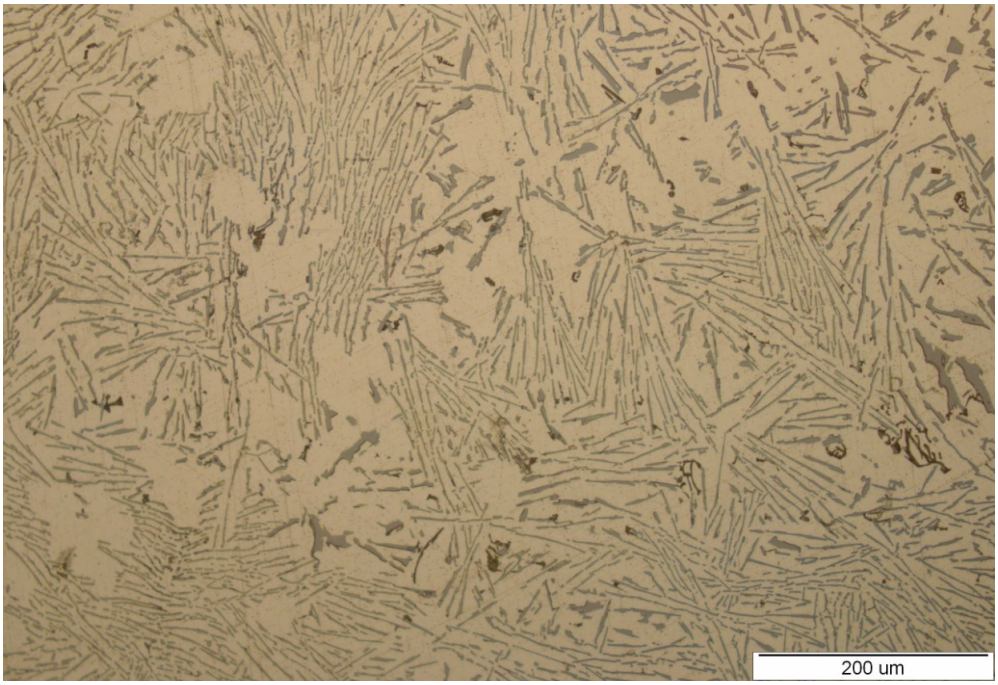

Slika 6.63. Mikrostruktura neusitnjenog uzorka – baza stošca

Rezultati mikrostrukture uzoraka od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom, prikazani su na slikama 6.64 – 6.66. Slika 6.65 prikazuje mikrostrukturu uzorka od vrha stošca.

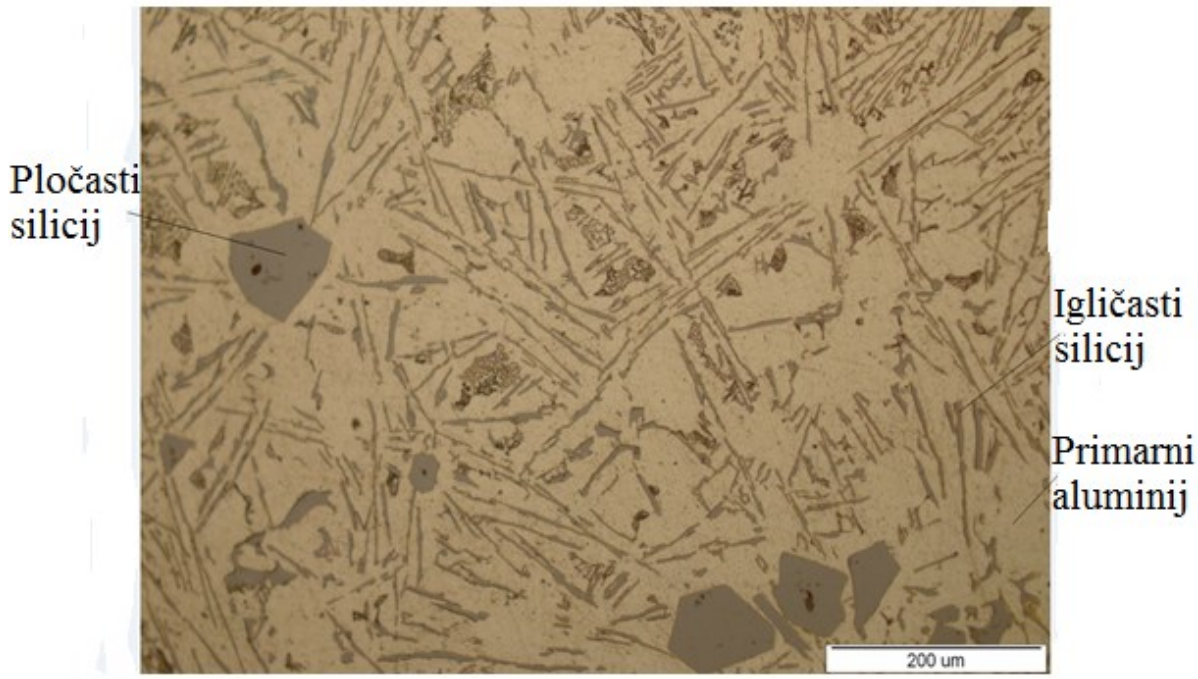



Slika 6.64. Mikrostruktura usitnjenog uzorka – vrh stošca

Slika 6.65 prikazuje mikrostrukturu uzorka od sredine stošca dok slika 6.66 prikazuje mikrostrukturu od baze stošca.




Slika 6.65. Mikrostruktura usitnjenog uzorka – sredina stošca




Slika 6.66. Mikrostruktura usitnjenog uzorka – baza stošca

Svijetlo siva podloga na prethodnim slikama predstavlja primarni aluminij. Silicij je u obliku iglica i pločica te je na slici sive boje. Pločasti i igličasti silicij prisutan je u morfologiji osnovne AlSi12 legure, pogotovo kod uzorka od kraja stošca, gdje je sporije hlađenje (slika 6.63). I kod uzorka od kraja stošca od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom, pojavljuje se pločasti silicij (slika 6.66). Bržim hlađenjem eutektički silicij je usitnjen i ujednačenije raspoređen (slika 6.61 i 6.64). Bržim hlađenjem dobije se finija, sitnozrnata mikrostruktura (slika 6.64).

Na slikama je vidljivo da se kod odljevaka od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom, mikrostruktura promijenila iz grubih igličastih zrna u vlaknasti oblik gusto raspoređen.

### *6.6.3. Rezultati mehaničkih ispitivanja*

Provedbom statičkog vlačnog pokusa na epruvetama za mehanička ispitivanja dobiveni su rezultati prikazani tablicom 6.3. pomoću računalnog programa „TIRA“ za svaku ispitanu epruvetu očitani su parametri $F_b$ [kN], $S_0$ [$mm^2$], $R_m$ [$N/mm^2$], $F_m$ [kN]. Istezljivost A [%] računata je sljedećim izrazom:

$$A = [(L_u - L_0) / L_0] \times 100 \quad (6.1)$$

gdje je:

A – istezljivost [%],

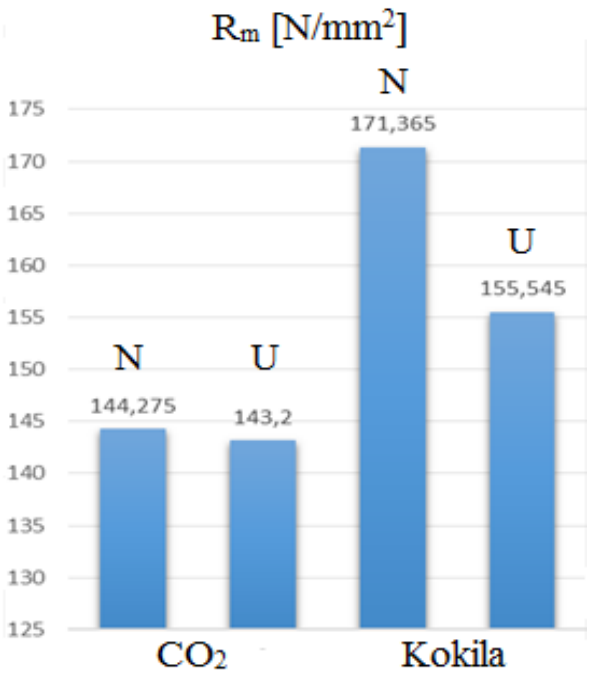
$L_0$ – početna mjerna duljina epruvete [mm],

$L_u$ – duljina epruvete nakon pucanja [mm].

Tablica 6.3. Rezultati ispitivanja na kidalici

| | $F_b$ [kN] | $S_0$ [$mm^2$] | $R_m$ [$N/mm^2$] | $F_m$ [kN] | duljina | promjer | A [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Neusitnjeno | | | | | | | |
| $CO_2$ | 16,205 | 112,815 | 144,275 | 16,262 | 61,44 | 11,785 | 2,4 |
| kokila | 19,315 | 112,72 | 171,365 | 19,316 | 62,40 | 12,275 | 4 |
| Usitnjeno | | | | | | | |
| $CO_2$ | 16,145 | 112,72 | 143,20 | 16,142 | 61,10 | 11,815 | 1,833 |
| kokila | 17,59 | 113,10 | 155,545 | 17,591 | 61,35 | 11,83 | 2,25 |

Slika 6.67 grafički prikazuje rezultate vlačne čvrstoće $R_m$ za epruvete lijevane u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-$CO_2$ i lijevane u kokilu. Također je napravljena usporedba rezultata za osnovnu AlSi12 leguru (slovo N u grafičkom prikazu) i AlSi12 leguru obrađenu AlTi5B1 predlegurom (slovo U u grafičkom prikazu).




Slika 6.67. Grafički prikaz rezultata vlačne čvrstoće $R_m$

Vrijednosti vlačne čvrstoće za osnovnu AlSi12 leguru veće su od vrijednosti za leguru obrađenu AlTi5B1 predlegurom. Također, vrijednosti vlačne čvrstoće za epruvete lijevane u kokilu veće su od vrijednosti za epruvete lijevane u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-$CO_2$. razlika tih vrijednosti nije velika tako da se može zaključiti da ne postoji velika razlika između epruveta od osnovne AlSi12 legure i epruveta od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom. Mogući razlog nižih vrijednosti rezultata za vlačnu čvrstoću kod AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom je taj što nije provedena i modifikacija taljevine jer legure sa 12% Si zahtijevaju modifikaciju. Još jedan od mogućih razloga je nejednolika kvaliteta obrade ispitnih epruveta.

# 7. ZAKLJUČAK

Usitnjavanje zrna je postupak koji je široko primjenjiv u proizvodnji gotovo svih aluminijskih legura. Najpopularnija metoda usitnjavanja zrna je upotreba sredstva za usitnjavanje zrna. Usitnjavanje zrna je neophodan korak u obradi taljevine zbog poboljšavanja mehaničkih svojstava i sitnozrnatosti mikrostrukture. AlTi5B1 predlegura je dobro sredstvo za usitnjavanje zrna jer zajednički dodatak titana i bora uspješnije usitnjava zrna taljevine.

U radu je ispitan utjecaj usitnjavanja zrna i brzine hlađenja na mikrostrukturu i mehanička svojstva aluminijskih odljevaka. Usitnjavanje zrna provedeno je na leguri AlSi12 pomoću AlTi5B1 predlegure.

Na temelju rezultata računalne simulacije lijevanja utvrđeno je da epruvete dobivene lijevanjem u kalup izrađen postupkom vodeno staklo-$CO_2$ ne sadrže poroznost unutar odljevka, nego samo unutar pojila. Simulacija lijevanja stošca u kalup od svježe kalupne mješavine pokazala je nastajanje poroznosti u bazi stošca, što se i potvrdilo samim lijevanjem.

Metalografska ispitivanja pokazalu su da usitnjavanje zrna AlTi5B1 predlegurom povoljno utječe na mikrostrukturu AlSi12 legure. Usitnjavanjem zrna dolazi do promjene pločastog i grubog igličastog silicija u sitni igličasti oblik. Bržim hlađenjem kod AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom, također se postiže sitnija struktura i finija raspodjela silicija. I kod osnovne AlSi12 legure, bržim hlađenjem postiže se bolja mikrostruktura sa manje pločastog i igličastog silicija koji je tvrd i krhak i koji pogoršava mehanička svojstva.

Na temelju mehničkog ispitivanja statičkim vlačnim pokusom, utvrđeno je da epruvete od osnovne AlSi12 legure imaju veće vrijednosti mehaničkih svojstava ($F_b$, $S_0$, $R_m$, $F_m$) i istezljivosti. Vrijednosti mehaničkih svojstava i istezljivosti epruveta od AlSi12 legure obrađene AlTi5B1 predlegurom, nisu očekivane. Mogući uzrok nižih vrijednosti je nejednaka kvaliteta obrade ispitnih epruveta što se vidilo tijekom statičkog vlačnog pokusa. Kod nekoliko ispitnih

epruveta, lom se dogodio izvan zahtijevanog područja, odnosno područja $L_0$, tako da dobiveni rezultati u tim slučajevima nisu mjerodavni.

# LITERATURA


1. Budić, I., Bonačić Mandinić, Z.: *Osnove tehnologije kalupljenja, jednokratni kalupi I dio*, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2001., 5
2. Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009., 172-190
3. Dekanić, B.: *Utjecaj obrade taljevine na tijek skrućivanja i mikrostrukturna svojstva odljevaka od AlSi10Mg legure*, Diplomski rad, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2008.
4. Dostupno na: http://www.hrvatski-fokus.hr/index.php/gospodarstvo/6567-nova-faza-pokretanja-proizvodnje-u-splitskoj-zeljezari, (31.11.2015.)
5. Budić, I., Bonačić Mandinić, Z.: *Osnove tehnologije kalupljenja*, jednokratni kalupi II dio, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2004.
6. Dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/15_02_2010__11943_ljevarstvo-proiz-post-2009.pdf, (30.11.2015.)
7. Galić, M.: *Proizvodnja metalnih odljevaka*, Priručnik, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 2008., 441-564
8. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Aluminij, (15.12.2015.)
9. Dostupno na: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Aluminium-4.jpg, (15.12.2015.)
10. Dostupno na: http://www.autonet.hr/blok-motora, (1.12. 2015.)
11. Dostupno na: https://www.tuningworld.com.au/gallery/tag/vorsteiner/page/18/, (19.01.2016.)
12. Bauer, B., Mihalic, I.: *Osnove tehnologije lijevanja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012., 7
13. Dostupno na: http://www.european-aluminium.eu/production-primary-aluminium-production-evolution-worldwide/, (1.12.2015.)
14. Grupa autora: ASM Handbook Volume 9: *Metallography and Microstructures 2004*, ASM International, 2004., 107-115, 711-751
15. Mihalic, I., Mance, I., Kramer, I., Bauer, B.: *Aluminijske legure za rad na povišenim temperaturama*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska
16. Marasović, I.: *Određivanje sklonosti toplim pukotinama aluminijskih legura metodom lijevanja prstena*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
17. Vlahović, J.: *Livljivost Al-Si12 legure*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

18. Cook, R., Spooner, S. J.: *Obrada taline predslitinom u aluminijskoj ljevarskoj industriji*, Glasilo hrvatskog udruženja za ljevarstvo, Ljevarstvo 39 (1997) 4, Zagreb, 1997., 91-96
19. Grupa autora: ASM Handbook Volume 15: *Casting*, ASM International, 1988., 1038-1049
20. American Foundry Society: AFS Transaction: *Grain Refinement of Aluminum Casting Alloys*, Schaumburg, IL USA, 2007.
21. Bečirović, T.: *Utjecaj usitnjavanja zrna na mehanička svojstva aluminijskog odljevka*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
22. Europska Norma EN 1706:2010: Aluminij i aluminijeve legure – odljevci – kemijski sastav i mehanička svojstva, ožujak 2010.