

# Utjecaj modifikacije eutektika na mikrostrukturu i mehanička svojstva AlSi12 legure

---

Mirić, Alan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:440893>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-24**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Alan Mirić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

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

Student:

Alan Mirić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svom mentoru za svu pomoć pri pisanju diplomskog rada, Ljevaonici Bujan d.o.o. za odrađivanje eksperimentalnog dijela diplomskog rada te svojoj obitelji na podršci.

Alan Mirić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ALAN MIRIĆ**

Mat. br.: 0035201642

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj modifikacije eutektika na mikrostrukturu i mehanička svojstva AISi12 legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of modification of eutectic on microstructure and mechanical properties of AISi12 alloy**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju lijevanja aluminijskih legura i prikupiti podatke o sredstvima za modifikaciju mehanizma rasta eutektika aluminij-silicij. Navesti područja primjene AISi12 legure. Prilikom pripreme taljevine provesti modifikaciju eutektika aluminij-silicij koristeći različite količine sredstva za modifikaciju. Lijevati ispitne uzorke za statički vlačni pokus. Napraviti toplinsku analizu svake taljevine i analizu kemijskog sastava. Provesti metalografska i mehanička ispitivanja, te analizirati rezultate. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
6. svibnja 2021.

Rok predaje rada:  
8. srpnja 2021.

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

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Branko Bauer

Predsjednik Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

|                                                        |      |
|--------------------------------------------------------|------|
| SADRŽAJ .....                                          | I    |
| POPIS SLIKA .....                                      | III  |
| POPIS TABLICA .....                                    | V    |
| POPIS OZNAKA .....                                     | VI   |
| SAŽETAK .....                                          | VII  |
| SUMMARY .....                                          | VIII |
| 1. UVOD.....                                           | 1    |
| 2. OPĆENITO O LIJEVANJU.....                           | 2    |
| 2.1. Podjela lijevanja prema vrsti kalupa .....        | 3    |
| 2.1.1. Lijevanje u pješčane kalupe .....               | 4    |
| 2.1.2. Tlačni lijev.....                               | 5    |
| 2.1.3. Lijevanje u kokile.....                         | 6    |
| 3. ALUMINIJ i Al LEGURE.....                           | 7    |
| 3.1. Legure aluminijske .....                          | 9    |
| 3.1.1. Gnječene aluminijske legure .....               | 9    |
| 3.1.2. Lijevene aluminijske legure .....               | 12   |
| 3.2. Utjecaj legirajućih elemenata.....                | 15   |
| 3.3. AlSi12 legura.....                                | 17   |
| 3.3.1. Primjena AlSi12 legura .....                    | 18   |
| 4. OBRADA TALINE .....                                 | 19   |
| 4.1. Usitnjavanje zrna.....                            | 20   |
| 4.2. Modifikacija eutektika.....                       | 21   |
| 4.2.1. Način rada modifikatora.....                    | 22   |
| 4.2.2. Vrsta modifikatora.....                         | 24   |
| 4.2.2.1. Modifikacija natrijem .....                   | 25   |
| 4.2.3. Utjecaj na rast.....                            | 28   |
| 4.2.4. Utjecaj na poroznost.....                       | 29   |
| 4.2.5. Količina dodavanja modifikatora .....           | 31   |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO .....                           | 33   |
| 5.1. Priprema prije lijevanja .....                    | 35   |
| 5.2. Postupak lijevanja .....                          | 37   |
| 5.2.1. Lijevanje epruveta i uzorka za ispitivanje..... | 37   |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.2. Jednostavna toplinska analiza .....                 | 40 |
| 5.3. Određivanje kemijskog sastava .....                   | 47 |
| 5.4. Priprema uzoraka za statičko vlačno ispitivanje ..... | 50 |
| 5.5. Radiografsko ispitivanje.....                         | 51 |
| 5.6. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.....          | 53 |
| 5.7. Priprema uzoraka za metalografsko ispitivanje .....   | 59 |
| 5.8. Rezultati metalografskog ispitivanja.....             | 62 |
| 6. ZAKLJUČAK.....                                          | 67 |
| LITERATURA.....                                            | 68 |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Postupak lijevanja [2].....                                                                                                     | 2  |
| Slika 2. Pješčani kalup [4].....                                                                                                         | 4  |
| Slika 3. Tlačni lijev [3].....                                                                                                           | 5  |
| Slika 4. Čisti aluminij [9] .....                                                                                                        | 8  |
| Slika 5. Fazni dijagram binarnog aluminij-silicij sustava [8] .....                                                                      | 14 |
| Slika 6. Raspodjela željeznih faza u AlSi12 leguri u ovisnosti od sadržaja Si i Fe pri 0,38 %<br>Mn [14].....                            | 18 |
| Slika 7. Utjecaj veličine zrna na točku koherencije [16].....                                                                            | 21 |
| Slika 8. Utjecaj modifikacije stroncijem na vlačnu čvrstoću Al-Si5Cu3 legure [19] .....                                                  | 22 |
| Slika 9. Rast i oblik igličastog silicija [19] .....                                                                                     | 23 |
| Slika 10. Formacija strukture blizanaca u siliciju [19].....                                                                             | 23 |
| Slika 11. Utjecaj natrija kao modifikatora na vlačnu čvrstoću i istezljivost [24] .....                                                  | 26 |
| Slika 12. Modificirani Al-Si fazni dijagram [24] .....                                                                                   | 27 |
| Slika 13. Mikrostruktura Al-Si legure sa dodatkom 0,01% natrija a) Al-13% Si, b) Al-13% Si-<br>0,01% Na [24] .....                       | 28 |
| Slika 14. Granice topljivosti vodika u čvrstom / tekućem aluminiju [19] .....                                                            | 30 |
| Slika 15. Ljevaonica Bujan d.o.o. ....                                                                                                   | 33 |
| Slika 16. Kalupi a) Kokila za ispitivanje mehaničkih svojstava, b) Kokila za ispitivanje<br>kemijskog sastava, c) Quick-Cup čašica ..... | 34 |
| Slika 17. Novi ingoti legure AlSi12 .....                                                                                                | 35 |
| Slika 18. Peć proizvođača Nabertherm .....                                                                                               | 36 |
| Slika 19. Provjera temperature taline u peći .....                                                                                       | 36 |
| Slika 20. Kokila a) Provjeravanje temperature kokile, b) Postupak lijevanja taline u kokilu .                                            | 38 |
| Slika 21. Odljevak za ispitivanje mehaničkih svojstava s uljevnim sustavom .....                                                         | 39 |
| Slika 22. Odljevak za ispitivanje kemijskog sastava.....                                                                                 | 39 |
| Slika 23. Toplinska analiza, a) Quick-Cup šalice, b) Uređaj za mjerenje brzine hlađenja .....                                            | 41 |
| Slika 24. Krivulja hlađenja bazne taline.....                                                                                            | 42 |
| Slika 25. Usporedba krivulja hlađenja bazne taline i prve modificirane taline.....                                                       | 44 |
| Slika 26. Usporedba krivulja hlađenja bazne taline i druge modificirane taline.....                                                      | 45 |
| Slika 27. Usporedba krivulja hlađenja bazne taline i šeste modificirane taline .....                                                     | 46 |
| Slika 28. Uređaj za kemijsku analizu, Hitachi Foundry-Master .....                                                                       | 47 |



|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 29. Kemijska analiza, a) Uzorak na uređaju, b) Izgled donje strane uzorka nakon analize .....                 | 48 |
| Slika 30. Dimenzije epruveta prema DIN 50125:2009-07 [26] .....                                                     | 50 |
| Slika 31. Obradene epruvete .....                                                                                   | 51 |
| Slika 32. Radiogram epruveta za statičko vlačno ispitivanje.....                                                    | 52 |
| Slika 33. Statičko vlačno ispitivanje, a) Kidalica „EU 40 mod“, b) Senzorsko ticalo.....                            | 53 |
| Slika 34. Statičko vlačno ispitivanje bazne epruvete .....                                                          | 55 |
| Slika 35. Statičko vlačno ispitivanje prve modificirane epruvete .....                                              | 55 |
| Slika 36. Statičko vlačno ispitivanje druge modificirane epruvete .....                                             | 56 |
| Slika 37. Statičko vlačno ispitivanje treće modificirane epruvete .....                                             | 56 |
| Slika 38. Statičko vlačno ispitivanje pete modificirane epruvete .....                                              | 57 |
| Slika 39. Statičko vlačno ispitivanje četvrte modificirane epruvete .....                                           | 57 |
| Slika 40. Statičko vlačno ispitivanje šeste modificirane epruvete .....                                             | 58 |
| Slika 41. Uređaj za brušenje „Mintech 233“ .....                                                                    | 59 |
| Slika 42. Uređaj za poliranje „Struers DAP-V“ .....                                                                 | 60 |
| Slika 43. Metalografsko ispitivanje, a) Prostor za nagrivanje, b) Uzorci spremni za metalografsko ispitivanje ..... | 61 |
| Slika 44. Mikroskop „Olympus GX 51“ .....                                                                           | 62 |

## POPIS TABLICA

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Podjela postupaka lijevanja [3] .....                                    | 3  |
| Tablica 2. Svojstva čistog aluminijsa [8] .....                                     | 7  |
| Tablica 3. Rasponi čvrstoće gnječanih aluminijevih legura [8] .....                 | 12 |
| Tablica 4. Rasponi čvrstoće lijevanih aluminijevih legura [8] .....                 | 13 |
| Tablica 5. Reakcije koje se odvijaju tijekom skrućivanja AlSi12 legure [13] .....   | 17 |
| Tablica 6. Usporedba stroncija i natrija kao modifikatora [19] .....                | 25 |
| Tablica 7. Raspored lijevanja .....                                                 | 33 |
| Tablica 8. Kemijski sastav AlSi12 legure .....                                      | 37 |
| Tablica 9. Kemijski sastav Nukleanta 100 SP [25] .....                              | 40 |
| Tablica 10. Prikaz karakterističnih temperatura sa krivulje hlađenja .....          | 43 |
| Tablica 11. Kemijski sastav bazne taline .....                                      | 48 |
| Tablica 12. Kemijski sastav prve modificirane taline .....                          | 48 |
| Tablica 13. Kemijski sastav druge modificirane taline .....                         | 48 |
| Tablica 14. Kemijski sastav treće modificirane taline .....                         | 49 |
| Tablica 15. Kemijski sastav četvrte modificirane taline .....                       | 49 |
| Tablica 16. Kemijski sastav pete modificirane taline .....                          | 49 |
| Tablica 17. Kemijski sastav šeste modificirane taline .....                         | 49 |
| Tablica 18. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja .....                           | 54 |
| Tablica 19. Dimenzije epruveta prije i nakon ispitivanja .....                      | 54 |
| Tablica 20. Mikrostrukture uzoraka bazne AlSi12 legure i modificiranih legura ..... | 63 |

**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b>  | <b>Jedinica</b>      | <b>Opis</b>                         |
|----------------|----------------------|-------------------------------------|
| T              | °C                   | Temperatura                         |
| m              | kg                   | Masa                                |
| $\rho$         | g/cm <sup>3</sup>    | Gustoća                             |
| V <sub>m</sub> | cm <sup>3</sup> /mol | Molarni volumen                     |
| k              | W/(m K)              | Toplinska vodljivost                |
| Re             | Mpa                  | Granica razvlačenja                 |
| R <sub>m</sub> | Mpa                  | Vlačna čvrstoća                     |
| A              | (%)                  | Istezljivost                        |
| v              | m/s                  | Brzina                              |
| d <sub>0</sub> | mm                   | Promjer epruvete                    |
| d <sub>1</sub> | mm                   | Promjer prema ISO metričkim navojem |
| L <sub>C</sub> | mm                   | Paralelna dužina epruvete           |
| L <sub>t</sub> | mm                   | Ukupna dužina epruvete              |
| U              | V                    | Napon                               |
| I              | A                    | Struja                              |

## SAŽETAK

Lijevanje je jedan od najstarijih procesa oblikovanja metala, a nekada je to bila umjetnost koja se čuvala kao čuvana tajna među obiteljima. Događaji u drugoj polovici prošlog stoljeća podigli su proces ljevanja od umjetnosti do znanosti. Kako bi ostala konkurentna na današnjem tržištu moderna ljevaonica mora u potpunosti iskoristiti sve prilike koje joj pruža moderna tehnologija. Ona omogućava detaljniju, bržu i raniju analizu problema u dizajnu odljevka i uljevnog sustava, omogućujući tako bolje donošenje odluka o poboljšanju samog dizajna i kvalitete. Stoga su troškovi i rizici svedeni na minimum.

U teorijskom dijelu kratko je opisan uvod u ljevanje, objašnjena je svrha pripreme i obrade taline kao i rezultat njihovog utjecaja na svojstva odljevka. Također su objašnjena svojstva aluminijskih legura sa detaljnijim opisom AlSi12 legure.

U drugom dijelu diplomskog rada je proveden eksperiment u Ljevaonici Bujan d.o.o. Istražen je utjecaj modifikacije eutektika AlSi12 legure dodavanjem natrija te je promatrano slabljenje djelovanja natrija s vremenom. Uzorci taline iz peći uzimani su u razmacima približno deset minuta. Napravljena je toplinska analiza svake taline, zatim analiza kemijskog sastava, analiza mikrostrukture i statički vlačni pokus.

Prema dobivenim rezultatima zaključeno je kako je utjecaj natrija nestao 23 minute nakon obrade taline te sukladno tome se vidi nestajanje vlaknastog silicija te ponovna pojava igličastog silicija u mikrostrukтури eutektika.

Ključne riječi: ljevanje, Al-Si legure, eutektik, modifikacija

## SUMMARY

Metal casting is one of the oldest metal shaping processes and it used to be an art that was kept as a secret among families. Events in the second half of past century elevated the casting process from art to science. In order to remain competitive in today's market, modern foundries must take full advantage of all of the opportunities that modern technology has to offer. It enables a more detailed and a faster analysis of design problems, thus enabling better decision-making to improve the design and quality itself. Therefore, costs and risks are minimized.

In this thesis, the influence of modifications of the eutectic of AlSi12 alloy by the addition of sodium was investigated as well as the influence of the cooling rate of the casting on the mechanical and metallurgical properties.

In the second part of the thesis, an experiment in the Ljevaonica Bujan d.o.o. was conducted. The influence of modifications of eutectic AlSi12 alloys by the addition of sodium was investigated and the weakening of sodium action with time was observed. Melting samples from the furnace were taken at intervals of approximately ten minutes. Thermal analysis of each melt was performed, followed by an analysis of chemical composition, microstructure and a static tensile strenght experiment.

According to the obtained results, it was concluded that the influence of sodium disappeared 23 minutes after the melt treatment, and accordingly the disappearance of fibrous silicon and the reappearance of needle silicon in the microstructure of eutectic can be seen.

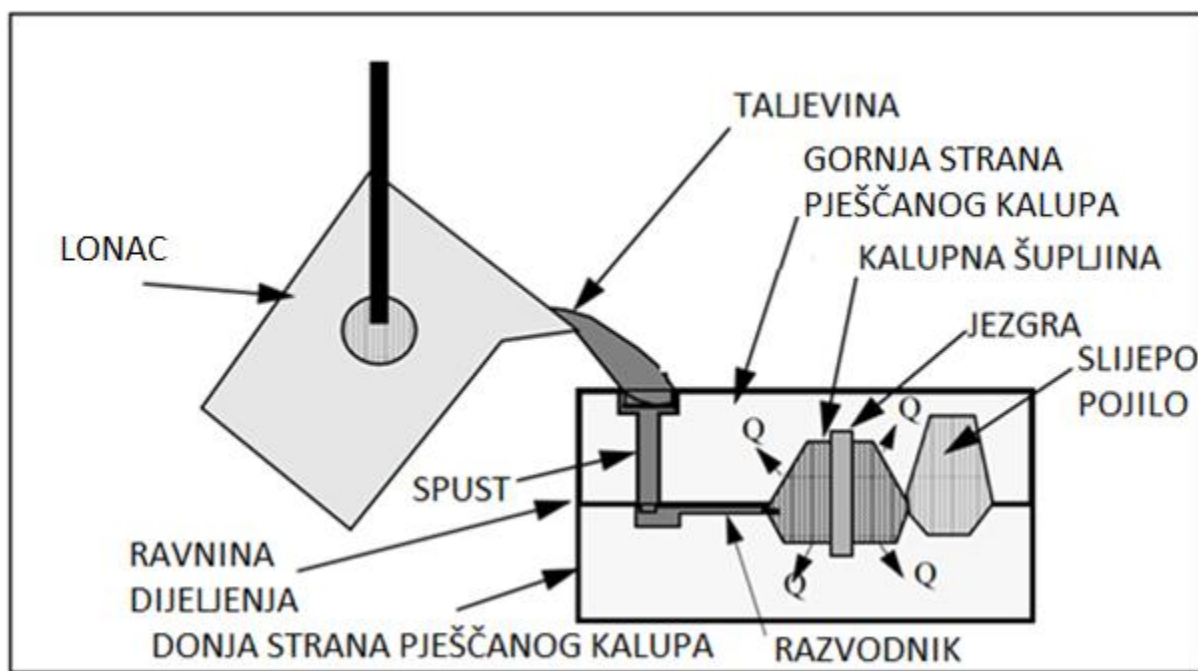
Key words: casting, Al-Si alloys, eutectic, modification

## 1. UVOD

Industrija lijevanja metala proizvodi jednostavne i složene dijelove koji imaju široku namjenu u današnje vrijeme. Gotovo sva proizvedena roba sadrži jednu ili više lijevanih komponenata. Najčešće se koriste u motornim vozilima, opremi za proizvodnju električne energije, industrijskim strojevima, strojevima za naftna postrojenja, poljoprivrednoj opremi, željezničkoj opremi i drugim proizvodima koji su bitni za gospodarski rast i nacionalnu sigurnost [1]. Iako industrija koristi mnogo različitih procesa i metala za lijevanje, osnovni postupak lijevanja uključuje lijevanje rastaljenog metala u kalup koji sadrži kalupnu šupljinu sa željenim oblikom. Najčešći postupak koji se koristi za lijevanje je lijevanje u pješčane kalupe, što čini oko 60 % proizvedenih odljevaka. Sivi i nodularni lijev i dalje čine najveći postotak odljevaka nakon čega slijede aluminij, čelik i bakar. Uz to, otvaraju se i nova tržišta lijevanja magnezija, titana i drugih legura obojenih metala. Tržišta željeznih odljevaka i obojenih metala sve su konkurentnija te kupci stavljaju sve veći naglasak na potražnju visokokvalitetnih, laganih i čvrstih materijala, ali po sve nižim i nižim cijenama. Stoga se ljevačka industrija mora kontinuirano razvijati i poboljšavati želi li ostati konkurentna na današnjem tržištu [1].

## 2. OPĆENITO O LIJEVANJU

Postupak lijevanja metala najjednostavniji je i najizravniji put do poluproizvoda ili proizvoda, a često i najskuplji. Ovaj postupak u svom osnovnom obliku zahtijeva željeni oblik kalupne šupljine i rastaljeni metal za ulijevanje. Ljudi su proizvodili odljevke tisućama godina te se najčešće ulijevalo rastaljeni metal u kalupe izrađene od pijeska. Na slici 1. prikazan je presjek kalupa koji definira osnovne dijelove kalupne šupljine, kao i dio sustava za rukovanje rastaljenim metalom. Proizvodnja rastaljenog metala i kalupa za izradu odljevaka tradicionalan je oblik umjetnosti, izraza ljudske kreativnosti koja se provodi kako za estetske tako i za praktične primjene [2]. Cilj lijevanja metala bio je proizvesti korisne uređaje za svakodnevne potrebe kao i izradu lijepih umjetničkih djela. Drevni je obrtnik koristio tradicije i prenosio naučene vještine kroz generacije, kao i iskustvo za proizvodnju odljevaka. Suvremeni proizvođač industrijskih odljevaka koristi se istim vještinama, ali ih nadopunjuje razumijevanjem temeljnih principa protoka fluida, prijenosa topline, termodinamike i nastanka mikrostrukture [2].



Slika 1. Postupak lijevanja [2]

Ove posljednje inženjerske vještine koriste se za pomoć u dizajniranju uljavnog sustava koji će omogućiti da se metal lijeva bez pora, bez nedostataka, s ispravnim dimenzijama i željenom kombinacijom mehaničkih svojstava kako bi se udovoljilo zahtjevima.

Suvremeni industrijski odljevci proizvode se širokim spektrom postupaka koji su definirani u smislu [1, 2]:

- vrste materijala za kalupnu šupljinu (pijesak, trajni itd.)
- načina lijevanja rastaljenog metala (gravitacija, tlak, vakuum)
- stanja metala (postotak tekućeg metala)
- stanje same kalupne šupljine (zrak, vakuum, plin)

## 2.1. Podjela lijevanja prema vrsti kalupa

Općenito, postupci lijevanja dijele se na postupke lijevanja u jednokratne kalupe te na postupke lijevanja u trajne kalupe, prikazano u tablici 1. Kao što im ime govori, jednokratni kalupi mogu se koristiti samo jednom. Nakon skrućivanja i hlađenja odljevka u kalupu taj se kalup mora razrušiti da bi se odljevak mogao izvaditi. S druge strane, trajni kalupi mogu se upotrijebiti više puta – ovisno o radnom vijeku kalupa i do milijun odljevaka u istom kalupu [3].

Tablica 1. Podjela postupaka lijevanja [3]

| LIJEVANJE U JEDNOKRATNE KALUPE         | LIJEVANJE U STALNE KALUPE |
|----------------------------------------|---------------------------|
| Lijevanje u pijesak ili pješčani lijev | Kokilni lijev             |
| Školjkasti lijev                       | Tlačni lijev              |
| Lijevanje u pune kalupe                | Centrifugalni lijev       |
| Precizni ili točni lijev               | Kontinuirani lijev        |
| Lijevanje u kalupe od gipsa            |                           |
| Lijevanje u keramičke kalupe           |                           |
| Vakuumsko kalupljenje pijeska          |                           |

Kroz povijest i iskustvo pokazalo se kako se aluminij i njegove legure najbolje mogu lijevati na tri načina:

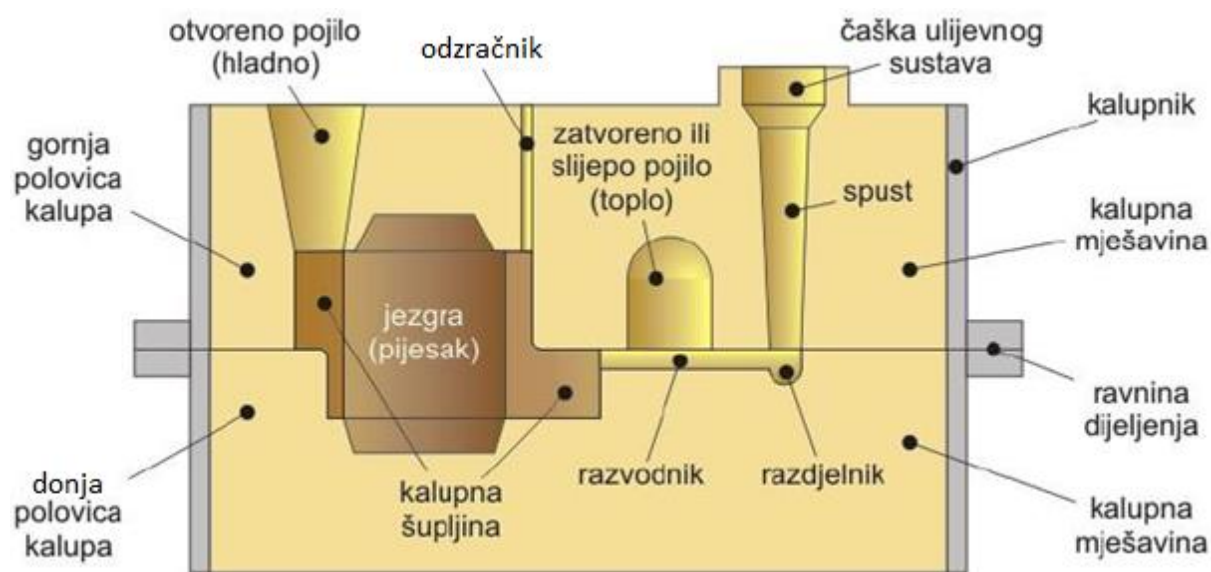
- u pijesak
- u kokilu
- tlačno



### 2.1.1. Lijevanje u pješčane kalupe

Lijevanje u pješčane kalupe čini proizvodnju veće količine odljevaka. Pijesak se koristi u omjeru čak 10 tona pijeska po toni metala ili samo 1/4 tone pijeska po toni metala, ovisno o vrsti i veličini odljevka i korištenom načinu kalupljenja. Većina odljevaka izrađena je u kalupima od svježe kalupne mješavine, kalupima čiji su glavni sastojci pijesak (najčešće kvarcni), vezivo (glina poput bentonita) i voda. Tipična kalupna mješavina može sadržavati 6 % gline i 3 % vode. Zrna pijeska troše se i pretvaraju u prah tijekom njihove upotrebe, stoga je potrebno dodavati novi pijesak i vezivo prilikom regeneracije kalupne mješavine [2, 3].

Prvi korak pri lijevanju u pješčane kalupe je izrada pješčanog kalupa odnosno kalupne šupljine u obliku željenog proizvoda. Nakon toga slijedi lijevanje rastaljenog metala u kalupnu šupljinu te se kalupi uništavaju kako bi se naknadno izvadio skrutnuti odljevak. Na slici 2. prikazan je pješčani kalup.



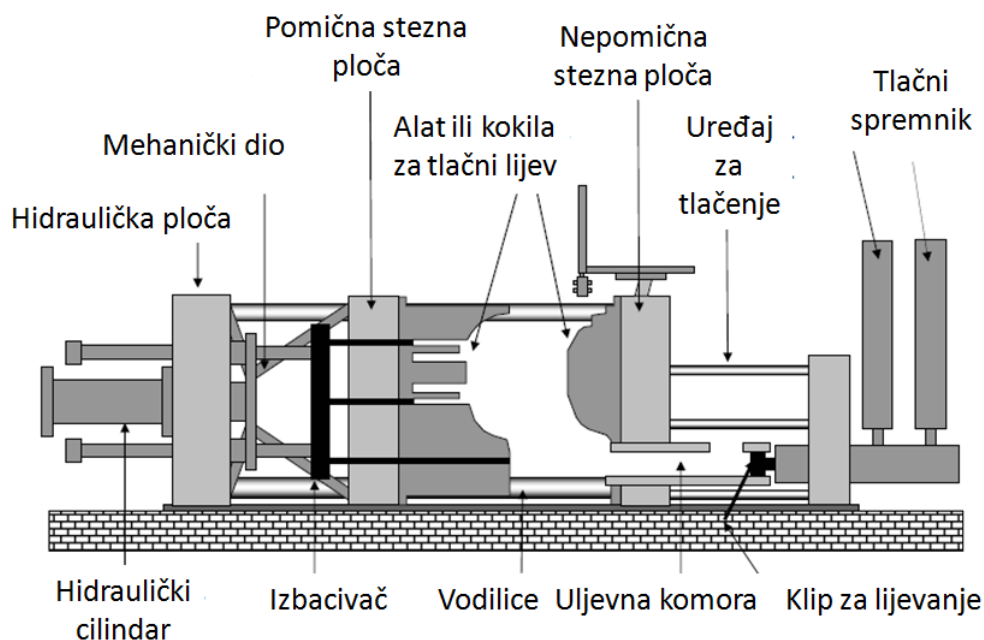
Slika 2. Pješčani kalup [4]

### 2.1.2. Tlačni lijev

Tlačni lijev je postupak kojim se rastaljeni metal ubrizgava pod tlakom u trajni kalup [5]. Velik dio danas izrađenih odljevaka izrađen je postupkom lijevanja u toplokomornim strojevima (uglavnom legure cinka) i postupkom lijevanja u hladnokomornim strojevima (uglavnom legure aluminija). Cjelokupni proces sastoji se od 5 glavnih faza [6]:

- zatvaranje kalupa
- lijevanje
- hlađenje i skrućivanje
- izbacivanje
- krzanje

Kalup se kod tlačnog lijevanja sastoji od dva dijela, tj. od dvije polovice koje se montiraju na stezne ploče stroja za tlačno lijevanje, prikazano na slici 3. Jedna strana kalupa je uljevna, a druga je izbacivačka, tj. pokretna i nepokretna. To omogućuje izbacivanje odljevka iz kalupa nakon lijevanja. Unutar kalupa nalaze se kalupne šupljine koje formiraju oblik odljevka [3, 6].



Slika 3. Tlačni lijev [3]

Za legure s niskim talištem (do razine tališta oko 420 °C) upotrebljavaju se toplokomorni tlačni strojevi s tlačnom komorom potopljenom u talinu. U procesu lijevanja, značajan dio mehanizma za tlačanje je u stalnom kontaktu s rastaljenim metalom, stvarajući time mogućnost otapanja u metal koji se lijeva. Zbog ove tendencije koristi se stroj s toplom komorom isključivo za proizvodnju legura na bazi cinka, a ne aluminijske. Ipak, najveći se dio odljevaka izrađuje lijevanjem u strojevima s hladnom komorom. Tlačni postupak izrade odljevaka omogućuje na njima postizanje dovoljno glatke površine, primjenjiv je za velik broj legura, a omogućuje postizanje i dobrih mehaničkih svojstava odljevaka. Tlačnim postupkom mogu se izrađivati odljevci mase od nekoliko grama do više od 40 kg [6].

Zbog bliskog kontakta između rastaljenog metala i kalupa, odljevci vrlo brzo očvrstnu u odnosu na odljevke u pijesku što često iznosi samo nekoliko sekundi. Kod toplokomornih strojeva, jezgre izrađene od soli topive u vodi povremeno se ubacuju u kalupnu šupljinu prije ubrizgavanja, a zatim se otope u vodi nakon lijevanja. Vrlo složeni odljevci (blokovi motora) mogu se proizvesti ovim postupkom.

### 2.1.3. Lijevanje u kokile

Lijevanje u kokile, postupak je lijevanja metala koji koristi kalupe za višekratnu upotrebu ("trajni kalupi"), obično izrađene od metala. Za punjenje kalupa koristi se gravitacija. Uobičajeni metali za lijevanje su aluminij, magnezij i legure bakra. Ostali materijali uključuju cink i legure olova.

Proces započinje zagrijavanjem kalupa na 150–200 °C kako bi se olakšao protok i smanjila toplinska oštećenja kalupa. Zatim se kalupna šupljina premaže vatrostalnim materijalom što sprječava lijepljenje odljevka na kalup i produljuje vijek trajanja kalupa. Zatim se ugrađuju bilo koje jezgre od pijeska ili metala i kalup se zatvara. Nakon toga se u kalup ulije rastaljeni metal gdje se ubrzo nakon skrućivanja kalup otvara i uklanjanje odljevka. Potom postupak započinje ispočetka, ali prethodno zagrijavanje nije uvijek potrebno ako je toplina iz prethodnog odljevka dovoljna, a vatrostalni premaz bi trebao trajati nekoliko sljedećih lijevanja [7].

Budući da se ovaj postupak može izvoditi na velikoserijskim proizvodnim obradcima, tada se koristi automatizirana oprema za premazivanje kalupa, ulijevanje metala i naknadno uklanjanje odljevka. Metal se ulijeva na najnižoj mogućoj temperaturi kako bi se smanjile pukotine i poroznost. Temperatura lijevanja može se kretati ovisno o materijalu za lijevanje približno 100 °C do 150 °C iznad tališta [4].

### 3. ALUMINIJ I ALI LEGURE

Jedinstvene kombinacije svojstava koje imaju aluminij i njegove legure čine aluminij jednim od najsvestranijih, ekonomičnih i atraktivnih metalnih materijala za širok spektar korištenja - od meke, vrlo duktilne folije za omatanje do najzahtjevnije inženjerske aplikacije. Aluminijske legure su na drugom mjestu nakon čelika u upotrebi kao strukturni metali [8]. Aluminij ima gustoću od samo  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , što je otprilike jedna trećina gustoće čelika ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ). Takva mala gustoća, skupa s velikom čvrstoćom nekih aluminijskih legura, omogućuje projektiranje i izgradnju snažnih, laganih konstrukcija koji su posebno korisne za sve što se kreće – od svemirskih vozila i zrakoplova, kao i sve vrste kopnenih i vodenih vozila. Aluminij se odupire vrsti progresivne oksidacije. Izložena površina aluminijske kombinira se s kisikom da bi nastao inertni film od aluminijskog oksida debeo samo nekoliko nanometara, što blokira daljnju oksidaciju. Ako je zaštitni sloj aluminijske ogreban, odmah će se sam obnoviti. Sam tanki oksidni sloj čvrsto se drži metala i bezbojan je i proziran - nevidljiv golim okom [8]. Prikladno legiran i obrađen, aluminij može odoljeti koroziji vode, soli i drugih čimbenika iz okoliša. Sažetak pojedinih bitnih svojstava čistog aluminijske je prikazan u tablici 2.

Tablica 2. Svojstva čistog aluminijske [8]

| Svojstva                    | Jedinica                 | Vrijednost | Napomena                           |
|-----------------------------|--------------------------|------------|------------------------------------|
| <b>Fizikalna svojstva</b>   |                          |            |                                    |
| Gustoća                     | $\text{kg/m}^3$          | 2698       | na $20^\circ\text{C}$              |
| Molarni volumen             | $\text{cm}^3/\text{mol}$ | 2390       | na $20^\circ\text{C}$              |
| <b>Toplinska svojstva</b>   |                          |            |                                    |
| Temperatura taljenja        | $^\circ\text{C}$         | 660,32     | $< 1013 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$ |
| Temperatura vrenja          | $^\circ\text{C}$         | 2519       | $< 1013 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$ |
| Toplinska vodljivost        | $\text{W/mK}$            | 237        | na $20^\circ\text{C}$              |
| Specifična toplina          | $\text{kJ/kgK}$          | 0,91       | na $20^\circ\text{C}$              |
| <b>Mehanička svojstva</b>   |                          |            |                                    |
| Young-ov modul elastičnosti | GPa                      | 70         | na $20^\circ\text{C}$              |
| Poissonov broj              |                          | 0,33       |                                    |
| Granica razvlačenja         | $\text{N/mm}^2$          | 20... 120  |                                    |
| Vlačna čvrstoća             | $\text{N/mm}^2$          | 40... 180  |                                    |
| Istezljivost                | %                        | 50... 4    |                                    |
| Tvrdoća                     | Vickers (HV)             | 167        |                                    |

Aluminijske površine mogu biti visoko reflektirajuće. Vidljiva svjetlost, toplinske zrake i elektromagnetski valovi se učinkovito reflektiraju, dok eloksirane i tamne eloksirane površine mogu biti upijajuće. Refleksija poliranog aluminijskog u širokom rasponu valnih duljina, dovodi do njegovog odabira za razne dekorativne i funkcionalne koristi [9]. Čisti aluminij, prikazan na slici 4., nije pogodan za nosivu konstrukciju tako da se u građevinarstvu koriste isključivo legure aluminijske.



Slika 4. Čisti aluminij [9]

Aluminij obično pokazuje izvrsnu električnu i toplinsku vodljivost, ali razvijene su i specifične legure s visokim stupnjem električne otpornosti. Te su legure korisne, na primjer, kod velikog okretnog momenta elektromotora. Aluminij se često odabire zbog svoje električne vodljivosti, koja je gotovo dvostruko veća od bakra na ekvivalentnoj težini. Zahtjevi visoke vodljivosti i čvrstoće mogu se ispuniti upotrebom dugovodnog, visokonaponskog ojačanog kabela s čeličnom jezgrom. Toplinska vodljivost aluminijskih legura iznosi oko 50 do 60 % toplinske vodljivosti bakra, a korisna je u izmjenjivačima topline, isparivačima, električno grijanim uređajima i priboru, te kod automobilske glave cilindara i radijatora.

Aluminij je neferomagnetski materijal, svojstvo koje je važno u električnoj industriji i elektroničkoj industriji. Nepiroforan je, što je važno kod primjena koje uključuju rukovanje zapaljivim ili eksplozivnim materijalima. Aluminij je također netoksičan i rutinski se koristi u spremnicima za hranu i piće. Ima atraktivan izgled u svom prirodnom finišu, koji može biti tamniji ili svijetliji i sjajan [10].

Jednostavnost oblikovanja aluminijske legure u bilo koji oblik je jedno od njegovih najvažnijih svojstava. Često se može uspješno natjecati s jeftinijim materijalima s nižim stupnjem obradivosti. Aluminij može biti lijevan bilo kojom metodom koja je poznata lijevačima. Može se valjati na željenu debljinu do folije tanje od papira. Gotovo da nema ograničenja za različite profile u koje se aluminij može istisnuti [10].

### 3.1. Legure aluminijske

Prikladno je aluminijske legure podjeliti na dvije glavne kategorije: gnječene i lijevane. Mnoge legure reagiraju na toplinsku obradu na temelju fazne topivosti. Bilo za lijevane ili gnječene legure, takve legure su opisane kao toplinski obradive. Neke legure za lijevanje u osnovi se ne mogu toplinski obrađivati i koriste se samo u lijevanom stanju [8, 10].

#### 3.1.1. Gnječene aluminijske legure

Aluminijske legure su obično grupirane. Opće karakteristike grupa gnječenih legura opisane su u nastavku [8]:

- 1xxx serija - Aluminij čistoće 99,00% ili više ima mnogo primjena, posebno u električnom i kemijskom polju. Ove vrste aluminijske legure karakterizira izvrsna otpornost na koroziju, visoka toplinska i električna vodljivost, niska mehanička svojstva i izvrsna obradivost [10]. Umjereno povećanje čvrstoće može se postići otvrdnjavanjem hladnom deformacijom. Željezo i silicij glavne su nečistoće.
- 2xxx serija - Bakar je glavni legirajući element u 2xxx seriji legure, često s magnezijem kao sekundarnim dodatkom. Te legure zahtijevaju toplinsku obradu kako bi se postigla optimalna svojstva; u toplinsko obrađenom stanju, mehanička svojstva slična su i ponekad premašuju one od nisko-ugljičnog čelika. U nekim slučajevima i starenje se koristi za daljnje povećanje mehaničkih svojstava [8]. Ova obrada povećava čvrstoću popuštanja, uz prateći gubitak istezljivosti; njegov učinak na vlačnu čvrstoću nije tako velik. Legure u seriji 2xxx nemaju tako dobru otpornost na koroziju kao većina drugih legura aluminijske i pod određenim uvjetima mogu biti podložne intergranularnoj koroziji. Stoga ove legure u obliku lima su obično presvučene aluminijem visoke čistoće, magnezij-silicijevim legurama serije 6xxx ili legurama koje sadrže 1% Zn.

Premaz, obično od 2 do 5 % ukupne debljine sa svake strane, daje galvansku zaštitu jezgre materijala i na taj način uvelike povećava otpornost na koroziju. Legure u seriji 2xxx posebno su pogodne za dijelove i konstrukcije koji zahtjevaju visoke omjere čvrstoće i mase i obično se koriste za izradu kotača za kamione i zrakoplove, dijelove ovjesa za kamione, trupove zrakoplova, konstrukcijske dijelove i one dijelove kojima je potrebna dobra čvrstoća na temperaturama do 150 °C.

- 3xxx serija - Mangan je glavni legirajući element serije 3xxx. Te legure uglavnom nisu toplinski obradive, ali imaju oko 20 % veću čvrstoću od legura serije 1xxx [8]. Jer samo ograničeni postotak mangana (do oko 1,5 %) može se učinkovito dodati aluminiju. Mangan se koristi kao glavni legirni element u samo nekoliko legura. Međutim, jedna od njih, popularna legura 3003, široko se koristi kao legura opće namjene za primjene umjerene čvrstoće koje zahtjevaju dobru obradivost.
- Serija 4xxx - Glavni legirajući element u legurama serije 4xxx je silicij, koji se može dodati u dovoljnim količinama (približno 12%) da izazove značajno snižavanje temperature i vremena taljenja bez stvaranja krhkosti. Zbog toga se Al-Si legure koriste kao žice za zavarivanje i lemljenje aluminija, pri čemu je kraće vrijeme taljenja. Većina legura u ovoj seriji nisu toplinski obradive. Legure koje sadrže značajne količine silicija postanu tamno sive kao ugljen stoga su tražene u arhitektonskim primjenama [8].
- Serija 5xxx - Glavni legirajući element u legurama serije 5xxx je magnezij. Kada se koristi sam kao glavni element za legiranje ili s manganom, rezultat je umjerena do visokokvalitetna legura. Magnezij je znatno učinkovitiji od mangana kao očvršćivač. Oko 0,8 % Mg jednakog je učinka kao 1,25 % Mn i mogu se dodati znatno veće količine. Legure iz ove serije posjeduju dobre karakteristike zavarivanja i dobru otpornost na koroziju u morskim atmosferama [8]. Međutim, treba postaviti određena ograničenja na količinu hladnog očvršćivanja i sigurne radne temperature dopuštene za legure sa više magnezija (preko ~ 3,5 % za radne temperature iznad ~ 65 °C) kako bi se izbjegla osjetljivost na pucanje zbog korozije.

- Serija 6xxx - Legure u seriji 6xxx sadrže silicij i magnezij približno u omjerima potrebnim za stvaranje  $Mg_2Si$ , čineći ih tako toplinski obradivim. Iako ne toliko jako kao i većina legura 2xxx i 7xxx, legure serije 6xxx imaju dobru sposobnost oblikovanja, zavarivanja, obradivosti i otpornosti na koroziju [8].
- Serija 7xxx - Cink je u količini od 1 do 8 % glavni element za legiranje u legurama serije 7xxx, te u sprezi s manjim postotkom magnezija rezultira toplinski obradivim legurama umjerene do vrlo visoke čvrstoće. Obično se dodaju male količine elemenata, poput bakra i kroma [11]. 7xxx serijske legure koriste se u konstrukcijama zrakoplova, mobilnoj opremi i drugim dijelovima s velikim naprezanjem. 7xxx legure veće čvrstoće često se koriste u zahtjevnom okruženju kako bi se iskoristile bolje kombinacije čvrstoće, otpornosti na koroziju i loma žilavost.
- Serija 8xxx – Legure te serije čine širok spektar kemijskih sastava. Na primjer, postižu se poboljšane performanse na povišenim temperaturama uporabom disperzijski ojačanih legura Al-Fe-Ce (npr. 8019) ili legura Al-Fe-V-Si (npr. 8009) izrađene metalurgijom praha.



Rasponi čvrstoće koji se mogu postići raznim razredima gnječenih legura dani su u tablici 3.

Tablica 3. Rasponi čvrstoće gnječenih aluminijevih legura [8]

| KLASA | VRSTA<br>LEGURE          | NAČIN<br>OČVRŠĆIVANJA | VLAČNA<br>ČVRSTOĆA |     |
|-------|--------------------------|-----------------------|--------------------|-----|
|       |                          |                       | N/mm <sup>2</sup>  |     |
|       |                          |                       | min                | max |
| 1xxx  | Al                       | Hladnom deformacijom  | 70                 | 175 |
| 2xxx  | Al-Cu-Mg<br>(1-2.5% Cu)  | Toplinskom obradom    | 170                | 310 |
|       | Al-Cu-Mg-Si<br>(3-6% Cu) |                       | 380                | 520 |
| 3xxx  | Al-Mn-Mg                 | Hladnom deformacijom  | 140                | 280 |
| 4xxx  | Al-Si                    |                       | 105                | 350 |
| 5xxx  | Al-Mg<br>(1-2.5% Mg)     |                       | 140                | 280 |
|       | Al-Mg-Mn<br>(3-6% Mg)    |                       | 280                | 380 |
| 6xxx  | Al-Mg-Si                 | Toplinskom obradom    | 150                | 380 |
| 7xxx  | Al-Zn-Mg                 |                       | 380                | 520 |
|       | Al-Zn-Mg-Cu              |                       | 520                | 620 |
| 8xxx  | Al-Li-Cu-Mg              |                       | 280                | 560 |

Aluminijske legure su ekonomične u mnogim primjenama. Koriste se u automobilskoj industriji, zrakoplovnoj industriji, za građevinske strojeve, za uređaje i konstrukcije, kao posuđe za kuhanje, kao navlake za kućišta za elektroničku opremu, kao posude pod tlakom za kriogene primjene, i za nebrojena druga područja.

### 3.1.2. Lijevane aluminijske legure

Legure za lijevanje aluminija temelje se na istim sustavima legura kao i oni od gnječenih legura aluminija, ojačane su istim mehanizmima, te su slično klasificirane u vrste koje se ne mogu i mogu toplinski obraditi [8, 11, 12]. Glavna razlika je da legure za lijevanje koje se koriste u najvećim količinama sadrže dodatak silicija koji znatno premašuju količine u većini gnječenih legura. Silicij je legirajući element koji doslovno čini komercijalnu održivost mogućeg lijevanja aluminija.

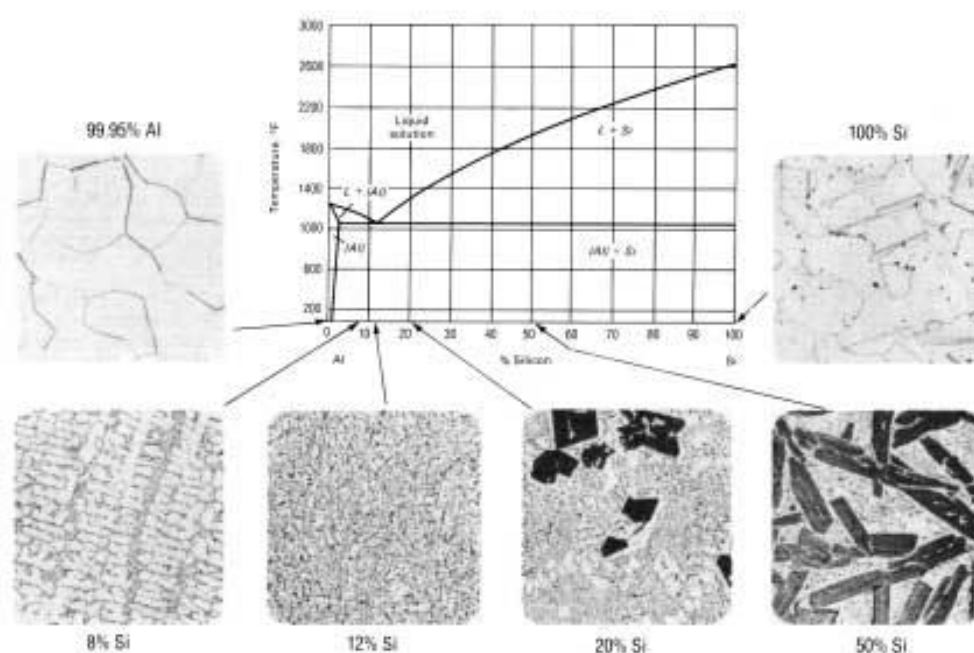
Sadržaj silicija od ~ 4 % do razine eutektika od ~ 12 % smanjuje gubitke otpada, dopušta izradu mnogo složenijih oblika odljevaka s većim varijacijama u području debljine i daje odljevke s višom površinskom i unutarnjom kvalitetom.

Ove prednosti proizlaze iz učinka silicija u povećanju tečljivosti i smanjenju sklonosti toplim pukotinama. Rasponi čvrstoće koji se mogu postići raznim razredima lijevanih legura dani su u tablici 4..

Tablica 4. Rasponi čvrstoće lijevanih aluminijskih legura [8]

| <b>KLASA</b>                                                                 | <b>Vlačna čvrstoća</b>  |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----|
| <b>Toplinski obrađene legure (temperature) – lijevanje u pješčane kalupe</b> | <b>N/mm<sup>2</sup></b> |     |
| Al-Cu (201–206)                                                              | 353                     | 467 |
| Al-Cu-Ni-Mg (242)                                                            | 186                     | 221 |
| Al-Cu-Si (295)                                                               | 110                     | 221 |
| Al-Si-Cu (319)                                                               | 186                     | 248 |
| Al-Si-Cu-Mg (355, 5% Si, 1.25% Cu, 0.5% Mg)                                  | 159                     | 269 |
| Al-Si-Mg (356, 357)                                                          | 159                     | 345 |
| Al-Si-Cu-Mg (390, 17% Si, 4.5% Cu, 0.6% Mg)                                  | 159                     | 276 |
| Al-Zn (712, 713)                                                             | 241                     |     |
| <b>Toplinski neobrađene legure – tlačni lijev</b>                            |                         |     |
| Al-Si (413, 443)                                                             | 228                     | 296 |
| Al-Mg (513, 515, 518)                                                        | 276                     | 310 |
| <b>Toplinski neobrađene legure – lijevanje u kokile</b>                      |                         |     |
| Al-Sn (850, 851, 852)                                                        | 138                     | 221 |

Slika 5. prikazuje cjeloviti fazni dijagram binarnog aluminij-silicij sustava. Ovo je jednostavan eutektički sustav s ograničenom topivošću i osnova je za legure serije 4xxx. Metalografske snimke strukture čistih metala i nekoliko legura pokazuju tipične morfologije. Legure s manje od 12 % Si zovu se podeduktne, one s blizu 12 % Si su eutektičke i one s više od 12 % Si su naditektne. Opće karakteristike serija lijevanih legura opisane su u nastavku [8, 10, 11].



Slika 5. Fazni dijagram binarnog aluminij-silicij sustava [8]

- 2xx.x serija - Skupina 2xx.x aluminij-bakar uključuje sastave sposobne razviti najveću čvrstoću među svim legurama za lijevanje i ove se legure koriste tamo gdje je to pretežno zahtjev. Ove legure sadrže 4 do 6 % Cu i 0,25 do 0,35% Mg, s vrlo restriktivnim ograničenjima nečistoća (željezo i silicij) i u nekim slučajevima sadrže i 0,25 do 0,35 % Mn ili Cr i 0,7 % Ag. Dobar dizajn lijevanja i tehnike lijevanja moraju se upotrijebiti za ostvarivanje punih mehaničkih svojstava i visoke kvalitete za te legure. Legure 2xx.x također imaju najveću čvrstoću i tvrdoću od svih lijevanih legura na povišenim temperaturama (na 300 °C). Potrebna je toplinska obrada za razvoj najveće čvrstoće i duktilnosti i mora se pravilno primjeniti kako bi se osigurala visoka otpornost na napetosnu koroziju [12].
- 3xx.x serija - Legure s najvećom upotrebom su one u 3xx.x skupini, koje osim silicija sadrže magnezij, bakar ili oboje i u određenim slučajevima, dodatke nikla ili berilija. Općenito, spadaju u jednu od tri vrste: Al-Si-Mg, Al-Si-Cu ili Al-Si-Cu-Mg. Sadržaj silicija kreće se od 5 do 22 % [12]. Raspon sadržaja bakra od 0 % do najviše 4,5 %. Većina ove legure imaju nominalni sadržaj magnezija u rasponu od najmanje 0,3 % do ~ 0,6 % za sastave visoke čvrstoće. Legure koje sadrže i bakar i magnezij imaju veće čvrstoće na povišenim temperaturama. Legure s većim udjelom silicija poželjne su za lijevanje. Koeficijent toplinskog rastezanja smanjuje se s povećanjem sadržaja silicija i nikla.

- Serija 4xx.x – Ta serija je na bazi binarnog aluminij-silicij sustava i sadrži od 5 do 12 % Si, nalazi mnoge primjene gdje su potrebne kombinacije umjerene čvrstoće i velike duktilnosti [12].
- Serija 5xx.x - Aluminij-magnezijeve legure u grupi 5xx.x su u osnovi jednofazne binarne legure umjerene do velike čvrstoće i svojstava žilavosti. Visoka otpornost na koroziju, posebno na morsku vodu i morske atmosfere, primarna je prednost odljevaka izrađenih od legura Al-Mg. Najbolja otpornost na koroziju zahtjeva niske nečistoće pa se stoga legure moraju pripremati iz visokokvalitetnih metala. Ove legure su pogodne za zavarene sklopove i često se koriste u arhitekturi kao ukrasi ili za građevinske potrebe [8, 12].
- Serija 7xx.x - 7xx.x legure aluminij-cink-magnezij su značajne zbog njihovih kombinacija dobrih karakteristika završne obrade, dobre opće korozijske otpornosti i sposobnosti razvijanja visoke čvrstoće kroz prirodno starenje bez toplinske obrade.
- Serija 8xx.x - Legure skupine 8xx.x sadrže ~ 6% Sn i male količine bakra i nikla za očvršćavanje. Te su legure razvijene za primjenu na ležajevima.

### 3.2. Utjecaj legirajućih elemenata

Sve komercijalne legure aluminija sadrže željezo i silicij, kao dva ili više elemenata namjerno dodanih primjesa za poboljšanje svojstava.

- Željezo - Gotovo sve legure aluminija sadrže nešto željeza koje je kao nečistoća preostala nakon rafiniranja boksita ili nakon taljenja. Fazni dijagram predviđa da tijekom skrućivanja legure aluminija i željeza koja sadrži nekoliko desetina postotaka željeza, većina željeza ostaje u tekućoj fazi dok eutektik čvrste otopine i čestice intermetalnih spojeva  $Al_3Fe$ , koja ima monoklinsku kristalnu strukturu, se ne skrute. Ovisno o stopi skrućivanja i prisutnosti drugih elemenata poput mangana, mogu nastati sastavne čestice metastabilne ortorombične faze  $Al_6Fe$  umjesto ravnotežne  $Al_3Fe$  [8].

- Silicij - Ovaj je element također sveprisutna nečistoća u komercijalnom aluminiju. Dvije ternarne faze,  $\alpha$ -Al<sub>12</sub>Fe<sub>3</sub>Si i  $\beta$ -Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, nastaju eutektičkom reakcijom. Pri niskom sadržaju silicija, gotovo svo željezo je prisutno kao Al<sub>3</sub>Fe. S povećanjem sadržaja silicija, prvo pojavljuju se  $\alpha$ , a zatim faze  $\beta$ -Al-Fe-Si. U velikim količinama silicij poboljšava sposobnost lijevanja i tečljivost. Silicij se kreće od oko 5 do 20 % u legurama za lijevanje. Nadeutektičke legure koriste se za motorne blokove jer su primarne silicijeve čestice otporne na trošenje. Silicij se namjerno dodaje u neke legure koje sadrže magnezij da osigurava bolje očvršćavanje [8].
- Mangan - Sustav aluminij-mangan osnova je za najstarije legure aluminija. Takve su legure, poznate kao serija 3xxx, najšire korištene gnječene legure zbog svoje izvrsne oblikovljivosti i otpornosti na koroziju. Komercijalne legure aluminija i mangana sadrže željezo i silicij. U legurama koje sadrže bakar, mangan se taloži kao Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> disperzirane čestice. Učinci na čvrstoću su mali, ali disperzirane čestice pomažu u kontroli veličine zrna nakon toplinske obrade [12].
- Magnezij - Sustav aluminij-magnezij osnova je za gnječene 5xxx i lijevane 5xx.x aluminijske legure koje se ne podvrgavaju toplinskoj obradi, koje pružaju izvrsne kombinacije čvrstoće i otpornosti na koroziju [8, 11].
- Bakar - Sustav aluminij-bakar osnova je za kovane 2xxx i lijevane legure 2xx.x, ali i mnoge druge toplinski obradive legure sadrže bakar. U komercijalnim legurama aluminij-bakar, dio bakra kemijski kombinira se s aluminijem i željezom da bi se dobile ili Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe ili  $\alpha$  (Al, Cu, Fe) čestice tijekom skrućivanja. Tijekom toplinske obrade legura aluminija i bakra koje sadrže malo magnezija, Al<sub>2</sub>Cu se izlučuje kao faza koja omogućuje precipitacijsko očvršćivanje [8, 11].
- Cink - Ovaj element daje slabo očvršćivanje, ali precipitat Al-Zn-Mg daje osnovu za gnječene legure 7xxx i lijevane legure 7xx.x. Dvije faze mogu nastati eutektičkom reakcijom u komercijalnim legurama Al-Zn-Mg: MgZn<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub> [12].

### 3.3. AlSi12 legura

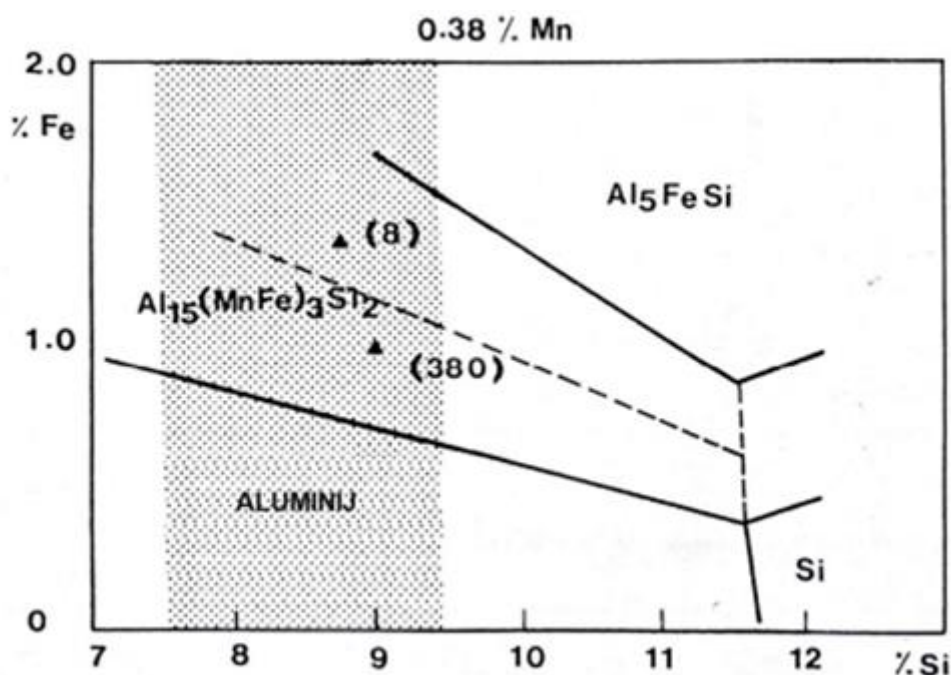
Silumini (legure aluminija sa silicijem) imaju visoka specifična mehanička svojstva i krhki su materijali koji se teško deformiraju. Stoga je traženje načina za znatno poboljšanje strukture silumina i plastičnih svojstava bilo uvijek i bit će relevantan i važan zadatak koji je izravno povezan s izazovom proširivanja područja primjene ovih legura u zrakoplovnoj i automobilske industriji te drugim granama industrije. Veliki (do 100  $\mu\text{m}$ ) primarni kristali silicija i druge suvišne faze mogu nastati u eutektičkom siluminu u uvjetima konvencionalnog uzastopnog lijevanja ingota [13].

AlSi12 legura jedna je od najpopularnijih lijevanih Al-Si legura. Popularna je radi niskog tališta, relativno niskog stezanja, niske cijene, dobre otpornosti na koroziju i velike vlačne čvrstoće s malom specifičnom težinom. U većini slučajeva legure su modificirane kako bi se promijenio oblik i veličina zrna, uglavnom zrna silicija, što smanjuje međufazni razmak eutektika ( $\alpha + \beta$ ) i smanjuje veličinu primarne alfa faze, ali prije svega velike beta faze. AlSi12 legura je također prikladna za visokotlačno lijevanje. Proces skrućivanja AlSi12 legure započinje stvaranjem primarne dendritne mreže. U tablici 5. prikazan je slijed skrućivanja legure koji pokazuje razvoj potencijalnih mikrostrukturnih konstituenata [14].

Tablica 5. Reakcije koje se odvijaju tijekom skrućivanja AlSi12 legure [13]

| Temperatura  | Opis reakcije                                           | Reakcija                                             |
|--------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 571 °C       | Razvoj dendritne mreže                                  | $L > \alpha_{Al}$                                    |
| 571 – 568 °C | Precipitacija visokotemperaturnih željeznih faza        | $L > \alpha_{Al} + Al_5FeSi + Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ |
| 568 – 502 °C | Osnovna eutektička reakcija                             | $L > \alpha_{Al} + \beta_{Si}$                       |
| 568 – 502 °C | Precipitacija sekundarnih eutektičkih faza na osnovi Mg | $L > \alpha_{Al} + Mg_2Si$                           |
| 502 – 488 °C | Precipitacija sekundarnih eutektičkih faza na osnovi Cu | $L > \alpha_{Al} + Al_2Cu + Al_5Mg_8Si_2Cu_2$        |

Na slici 6. prikazan je dijagram koji prikazuje ovisnost sadržaja silicija i željeza uz točan sadržaj mangana čija interakcija i udio definiraju područja za razvoj igličaste  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  faze i kompaktne  $\text{Al}_{15}(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2$  faze.



Slika 6. Raspodjela željeznih faza u AlSi12 leguri u ovisnosti od sadržaja Si i Fe pri 0,38 % Mn [14]

### 3.3.1. Primjena AlSi12 legura

Lijevane legure Al – Si široko se koriste u strojevima i automobilskoj industriji za komponente, posebno s eutektičkim sastavom, za glave motora, klipove i podizače ventila. Pružaju izvrsnu otpornost na koroziju i na trošenje, visoku toplinsku vodljivost, visoku specifičnu krutost i čvrstoću. Materijali koji se koriste za klipove moraju biti u stanju izdržati temperature plina ~350–400 °C i toplinski umor između sobne temperature i 300 °C. Stoga, visoka toplinska vodljivost i visoka temperaturna otpornost bitna je kao i čvrstoća [15].

#### 4. OBRADA TALINE

Mehanička svojstva Al-Si legura ovise o njihovom sastavu, uvjetima skrućivanja, dodanim modifikatorima i temperaturama lijevanja. Da bi se poboljšala mehanička svojstva odljevaka potrebna je modifikacija mikrostrukture, što se postiže obradom taline. Kvaliteta taline, a time i kvaliteta odljevaka podrazumijeva ispravno taljenje i kasniju obradu taline. To podrazumijeva odgovarajući kemijski sastav taline, odgovarajuće temperature taljenja i obradu taline te djelotvornost postupaka obrade taline. Obrada taline sastoji se od [16]:

- Obrade metala postupcima usitnjavanja zrna primarnog aluminija i modifikacije eutektičkog silicija u podeutektičkim legurama te primarnog silicija u nadeutektičkim legurama
- Ostalih postupaka obrade poput otplinjavanja pomoću reaktivnih (Cl, Ar s 5 % Cl, N<sub>2</sub> s 10 % Si, freon, heksakloretoan) i inertnih plinova (N<sub>2</sub> i Ar) u svrhu otklanjanja vodika, obrade taliteljima u svrhu otklanjanja nečistoća unesenih u talinu i oksida legirajućih elemenata te filtracije u svrhu uklanjanja nečistoća i oksidnih filmova

Fina jednakomjerna struktura zrna poboljšava homogenost odljevka i nudi visoku žilavost i čvrstoću, izvrsnu sposobnost oblikovanja, dobru završnu obradu površine te samu obradivost. Ti se dobici mogu u velikoj mjeri izgubiti osim ako je usitnjena legura također modificirana. Komercijalne lijevačke legure Al – Si obično sadrže čak 50 % eutektičke faze Al – Si, koja kristalizira u obliku grubih iglica i pločica sa vrlo nepovoljnim utjecajem na mehanička svojstva. Usitnjavanje zrna postiže se pomoću dodataka Al – Ti – B s viškom Ti. Što se tiče modifikacije eutektičke faze, kemijska obrada je najpopularniji način. Od nekoliko identificiranih elemenata kako bi se osigurala odgovarajuće modifikacije, Na i posebno Sr su široko korišteni [16].

Nepotrebno je reći da su korištene dorade i preinake da bi poboljšali čak i mehanička svojstva. Međutim, to može uključivati neke poteškoće jer B reagira sa Sr i smanjuje učinak modifikacije.

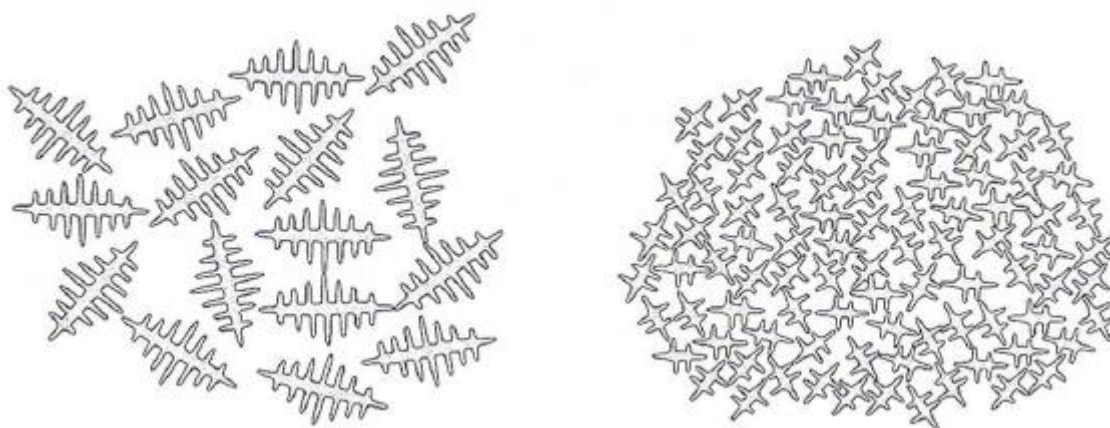


#### 4.1. Usitnjavanje zrna

Prednosti fine i ujednačene veličine zrna su brojne. Mogu se postići poboljšana mehanička svojstva kao što su veća vlačna čvrstoća, povećana duktilnost i otpornost na umor. To također može utjecati na fizikalna svojstva. Manje veličine zrna mogu dovesti do poboljšanog punjenja kalupa. Tako će se usitnjavanjem zrna poboljšati napajanje. Rezultat je smanjena ili bolje raspršena poroznost u odljevku što će također dovesti do poboljšanih mehaničkih svojstava, povećane nepropusnosti i smanjene poroznosti površine. Ovi učinci mogu dovesti do smanjenja otpada, poboljšane postojanosti i pouzdanosti odljevaka, što sve rezultira poboljšanjem profitabilnosti u ljevaonici [16, 17].

Učinak veličine zrna na lijevanje može se najlakše razumjeti detaljnim promatranjem aluminijskog dendrita. Obično se vide u presjeku samo kad se uzorci odljevaka metalografski ispituju, ali to su trodimenzionalne strukture određene složenosti.

Otvoreno razgranata priroda dendrita znači da se oni mogu međusobno povezati i dati određenu čvrstoću odljevku pri relativno malim volumnim udjelima krutine. To se vidi u mjerenjima "koherencije", gdje se miješalica s malim brojem okretaja stavlja u talinu koja skrućuje, a čvrstoća dendritne mreže mjeri se zakretnim momentom potrebnim za pogon motora. S malim izoliranim dendritima malo je otpora miješanju, ali kako dendriti rastu i „ruke“ počinju nailaziti jedne na druge, otpor se povećava. Rezultati u neusitnjenim legurama ukazuju na to da se čvrstoća može stvoriti kad skrutne samo 20 % taline, dok se s usitnjavanjem zrna to može odgoditi na puno veći udio krute faze [17]. Ova ideja shematski se može vidjeti na slici 7., gdje se za velike veličine zrna može dogoditi sudar dendritskih grana pri niskom udjelu krute faze, dok je za male veličine zrna kruti udio mnogo veći. Ovaj rezultat utječe na ponašanje talina tijekom punjenja kalupa i skrućivanja odljevka. Tijekom punjenja kalupa dogodit će se hlađenje taline, što može rezultirati stvaranjem dendrita u odljevku. S velikim dendritima to bi moglo dovesti do problema u punjenju tankih dijelova i obično se prevladava korištenjem pregrijavanja na višu temperaturu lijevanja kako bi se omogućilo veće punjenje kalupa prije nego što se skrutne [18].



Slika 7. Utjecaj veličine zrna na točku koherencije [16]

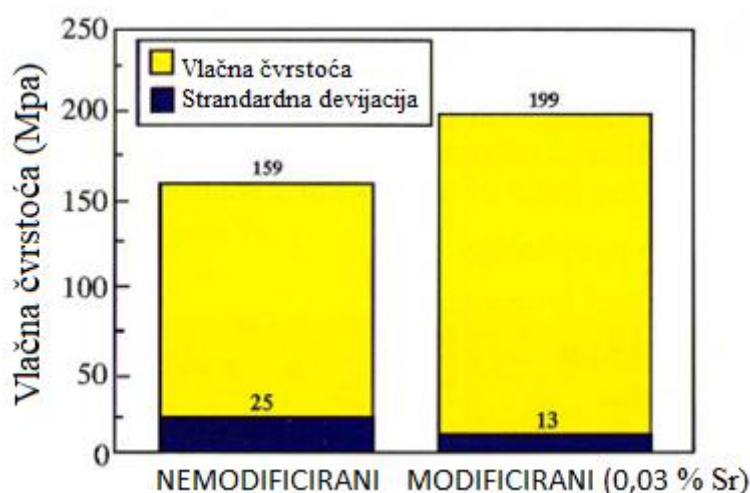
#### 4.2. Modifikacija eutektika

Modifikatori se dodaju aluminij-silicijevim legurama kako bi se smanjile stope otpada i povećala produktivnost [19]:

- Upravljanje morfologijom silicija
- Pобољшanje mehaničkih svojstava
- Pобољшanje obradivosti
- Smanjenje vrućih pukotina
- Smanjivanje vremena toplinske obrade
- Kontrola raspodjele poroznosti
- Pобољшanje punjenja kalupa
- Suzbijanje formiranja primarnog silicija
- Smanjenje lijepljenja na kalup

Neka od ovih svojstava, poput vlačne čvrstoće i obradivosti, mogu se lako povezati s promjenom veličine i morfologije silicija od relativno grubog igličastog do finog vlaknastog oblika koji je pronađen pri modifikaciji. Na primjer, slika 8. prikazuje vlačnu čvrstoću nemodificiranih i modificiranih gravitacijskih odljevaka  $\text{Al-Si}_5\text{Cu}_3$  [19]. Modifikacija nije samo rezultirala povećanjem vlačne čvrstoće, već je i smanjila varijabilnost rezultata što se vidi u manjoj standardnoj devijaciji.

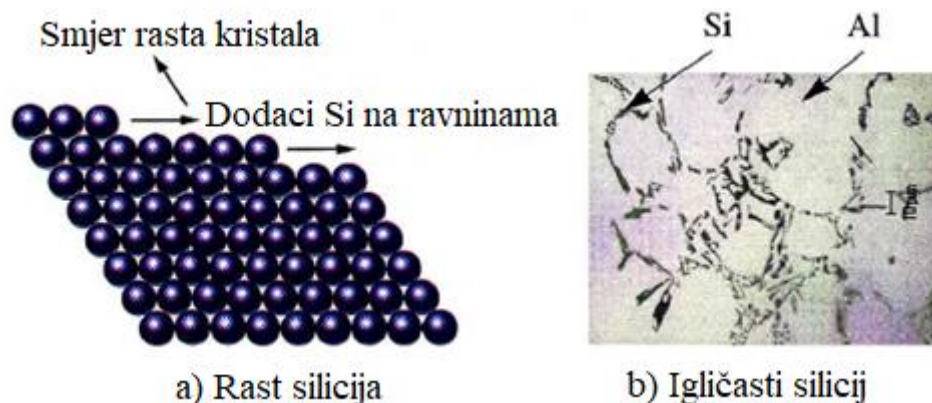
Pri lijevanju modificirane legure, vijek trajanja alata će se produžiti zbog modificiranja faze tvrdog kristalnog silicija. Prednosti modifikacije na drugim svojstvima otvorene su za više rasprava, posebno o učinku na poroznost [20]. Važno je da se promjene u ponašanju skrućivanja koje proizlaze iz modifikacije ili promjene uz različite modifikatore u potpunosti razumiju ako se želi u potpunosti optimizirati postupak lijevanja. To je detaljnije objašnjeno u sljedećim odjeljcima.



Slika 8. Utjecaj modifikacije stroncijem na vlačnu čvrstoću Al-Si5Cu3 legure [19]

#### 4.2.1. Način rada modifikatora

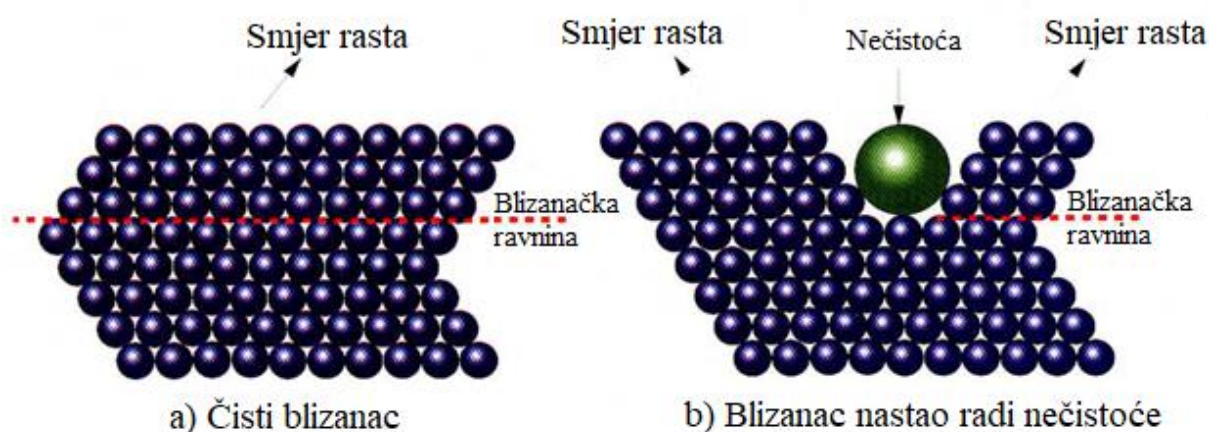
Silicij se skrutne na kristalni način, tvoreći dobro uređenu strukturu dijamantskog tipa. Da bi održao pravilnost svoje strukture, može rasti samo u određenim specifičnim smjerovima. Slika 9. to shematski prikazuje, gdje se atomi silicija dodaju u ravninama preko fronte rasta [20]. Zbog toga se nemodificirani silicij u podeutektičkim i eutektičkim legurama promatra kao ploče s ostrim, kutnim značajkama koje se nazivaju acikularnim (igličastim).



Slika 9. Rast i oblik igličastog silicija [19]

Moguće je da nastanu defekti tijekom ovog rasta kristala, a uobičajeni oblik je promjena orijentacije kristala u ravnini, koja se naziva blizanac prikazan na slici 10.a.. Oni se javljaju prirodno, ali se također mogu inducirati ako se strani atom adsorbira na fronti rasta silicija, narušavajući strukturu prikazanu na slici 10.b..

Blizanci u prirodi obično su malobrojni, pa je njihov učinak na kristalnu strukturu mali [19]. Izlučivanje blizanaca uzrokovano nečistoćama može biti vrlo značajno, s ponavljanim izlučivanjem na frontama rasta što dovodi do kontinuiranog grananja kristala. To rezultira vlaknastom silicijskom mikrostrukturom modificirane legure silicija. Navedena nečistoća je element modifikator dodan leguri. Kao što se shematski može vidjeti na slici, veličina atoma nečistoće bit će glavni faktor u određivanju hoće li ili neće dovesti do stvaranja blizanaca.



Slika 1. Formacija strukture blizanaca u siliciju [19]

Modifikatori su skupina elemenata koji dodavanjem aluminijsilicijevim legurama utječu na rast silicija da bi promijenili njegovu morfologiju iz grubog igličastog oblika u finiji vlaknasti. Najčešći korišteni elementi su natrij i stroncij. Antimon se obično klasificira kao modifikator, iako ga je bolje klasificirati kao usitnjivač silicija jer (zajedno s fosforom) smanjuje veličinu eutektičkog i primarnog silicija poboljšavajući nukleaciju i ne utječe na morfologiju. Ostali elementi za koje je poznato da imaju svojstva modifikacije ili usitnjavanja uključuju kalcij, arsen, litij i sumpor. Ti se elementi općenito ne koriste, zato što zajedno s antimonom, poništavaju učinak natrija i/ili stroncija, imaju štetne učinke na druga svojstva, nisu razvijene učinkovite metode dodavanja ili zato jer imaju značajan učinak na zdravlje [19, 20].

#### **4.2.2. Vrsta modifikatora**

Izbor između natrija ili stroncija određen je mnogim čimbenicima. Tablica 6. daje brzu usporedbu prednosti i nedostataka svake vrste. Natrij je prihvaćen kao snažniji modifikator, ali brzi nestanak učinka, razvoj dima i slaba kontrola dodavanja natrija doveli su do njegove postupne zamjene stroncijem u većini ljevaonica. Modifikacija je teža pri polaganim brzinama hlađenja, na primjer u pijesku. Stoga su potrebne više razine i često se utvrdi da je poželjna upotreba natrija zbog njegove veće učinkovitosti. Slično tome, modifikacija je teža u debelim dijelovima, gdje su brzine hlađenja sporije nego u tankim dijelovima [21]. Upotreba hladila za sprječavanje stvaranja poroznosti u izoliranim debelim dijelovima uobičajena je praksa s modificiranim legurama, a kod legura modificiranih stroncijem osobito je važno da kalup bude pravilno dizajniran kako bi se spriječilo pojavljivanje ovog problema.

Tablica 6. Usporedba stroncija i natrija kao modifikatora [19]

|                                     | <b>Natrij</b>                                      | <b>Stroncij</b>                                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Povratljivost</b>                | Niska, varijabilna i ovisna o radniku              | Visoka i konstantna                                              |
| <b>Vrijeme reakcije</b>             | Odmah                                              | Nakon 10 – 20 min                                                |
| <b>Vrijeme prestanka djelovanja</b> | Brzo (20 – 40 min)                                 | Sporo (više od 2h)                                               |
| <b>Utjecaj na okoliš</b>            | Ispuštanje plina                                   | Čisto i bez ispuštanja plina                                     |
| <b>Premodifikacija</b>              | Moguće radi težine upravljanja količinom dodavanja | Nije moguće                                                      |
| <b>Potencijal</b>                   | Vrlo visok                                         | Visok                                                            |
| <b>Količina dodavanja</b>           | 50 ppm                                             | 250 ppm                                                          |
| <b>Jednostavnost upravljanja</b>    | Zaštititi od vlage                                 | Neosjetljivo na vlagu ako predlegura ima manje od 20 % stroncija |

Konačnim odabirom modifikatora upravljat će mnogi čimbenici o kojima se raspravlja u ovom radu. Međutim, sa sve većom potrebom za optimizacijom procesa, smanjenjem razine otpada, poboljšanjem produktivnosti i pouzdanosti odljevaka, poteškoće u kontroli razine natrija dovele su do toga da je stroncij postao preferirani proizvod. Natrij ipak zadržava prednost pri lijevanju u pješčane kalupe ili u malim ljevaonicama gdje je važan veći potencijal, a da su utjecaji na okoliš minimalni.

#### 4.2.2.1. Modifikacija natrijem

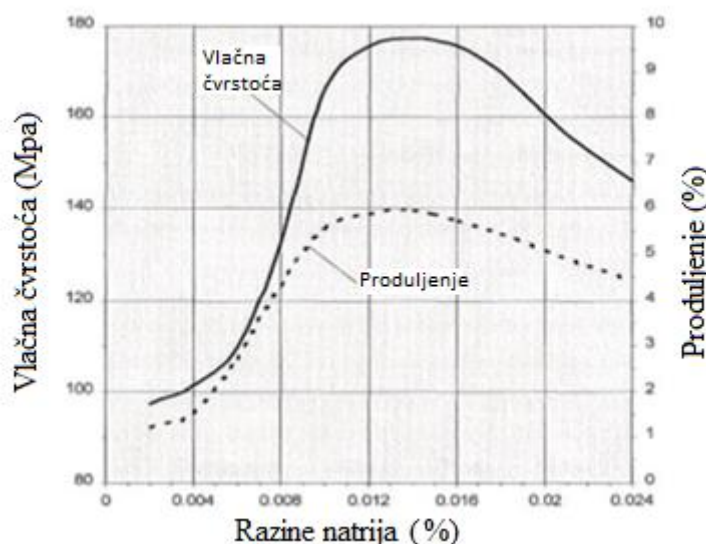
Prvi komercijalni modifikator primjenjen na legure Al-Si bio je Na. Minimalna potrebna razina je obično  $< 0,007 \%$  Na, da bi se izvršila potpuna izmjena mikrostrukture. Prednosti modifikacije s Na uključuju sljedeće [22]:

- učinkovita upotreba dugi niz godina
- mala količina potrebna za modifikaciju
- kratko vrijeme djelovanja
- minimalna površinska agitacija

Međutim, postoji nekoliko nedostataka [22]:

- ima oko 10-50 % iskoristivosti zbog isparljivosti
- ograničenje zbog opasnosti u rukovanju uzrokovane brzom reakcijom s vlagom
- stvaranje debelog oksidnog sloja koji ometa tečljivost
- opasnost od premodifikacije

Modifikacija mikrostrukture Al-Si ovisi o dodanoj količini elementa kao što je Na. Korištenje dodavanja zemnoalkalijskih metala ili alkalijskih metala u malim količinama u legure Al-Si za promjenu njihovih struktura započelo je prije nekoliko godina. Ova izmjena poboljšava mehanička svojstva, podiže vlačnu čvrstoću i povećava duktilnost. Utjecaj na vlačnu čvrstoću i istezljivost prikazan je na slici 11. [23, 24].



Slika 2. Utjecaj natrija kao modifikatora na vlačnu čvrstoću i istezljivost [24]

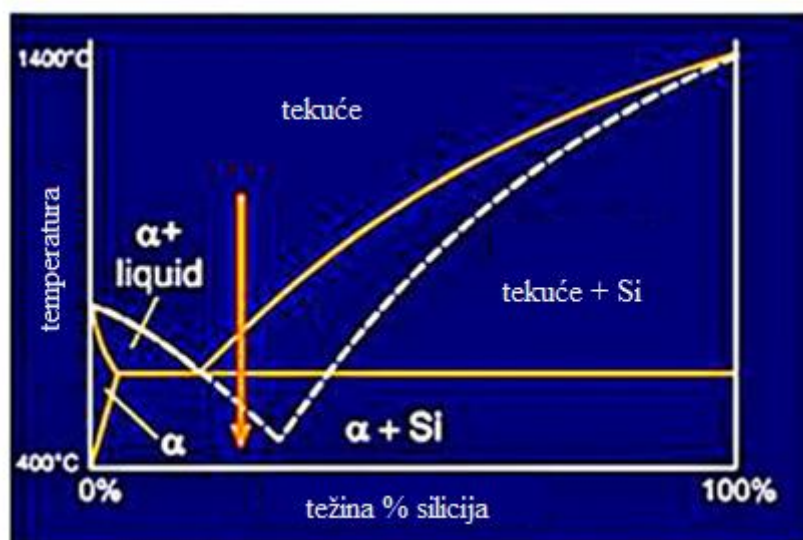
Model rasta ima najširu upotrebu od svih modela zbog pojave međusobne povezanosti Si i u nemodificiranim i u modificiranim strukturama. Zbog toga, kontinuirana nukleacija Si je osporavana. Međutim, u modelu rasta primijećena su dva ograničenja. U Na-modificiranom odljevku zabilježena je značajna promjena mikrostrukture. Dodatak Na malo utječe na ravnotežnu temperaturu likvidusa, ali postoji velika promjena eutektičke temperature vidljiva tijekom toplinske analize lijevanje legure.



U lijevanju Na-modificirane legure zabilježena su dva učinka [24]:

- Prisutnost natrija transformira morfologiju rasta Si iz igličastog oblika u vlaknasti oblik
- Ako je porast temperature u talini malen, Na zaustavlja pojavu nukleacije prije rasta eutektičke fronte. Nedostatak nukleacije prvenstveno objašnjava finiju strukturu i veće pothlađenje kod modificiranih talina

Tragovi fosfora često se nalaze u legurama Al-Si, što uzrokuje stvaranje grubozrnate strukture i aluminij-fosfita ( $\text{AlPO}_3$ ). Aluminij-fosfit ubrzava primarnu kristalizaciju Si koji se pojavljuje u mikrostrukтури u obliku poliedarskih pločica. U modifikaciji Na reagira s fosforom stvarajući natrijev fosfit ( $\text{Na}_3\text{O}_3\text{P}$ ). Faza krute otopine u obliku dendrita kristalizira prije Si faze. Značajne promjene opažaju se u morfologiji Si i razmaku čestica kada se doda 0,01 % Na [23, 24]. Ovaj postupak pretvara leguru koja skrućuje u usitnjeni Al-Si eutektik, a također smanjuje eutektičku temperaturu i pomiče eutektičku točku tamo gdje je veći sadržaj Si. Slika 12. prikazuje modificirani fazni dijagram legure Al-Si.

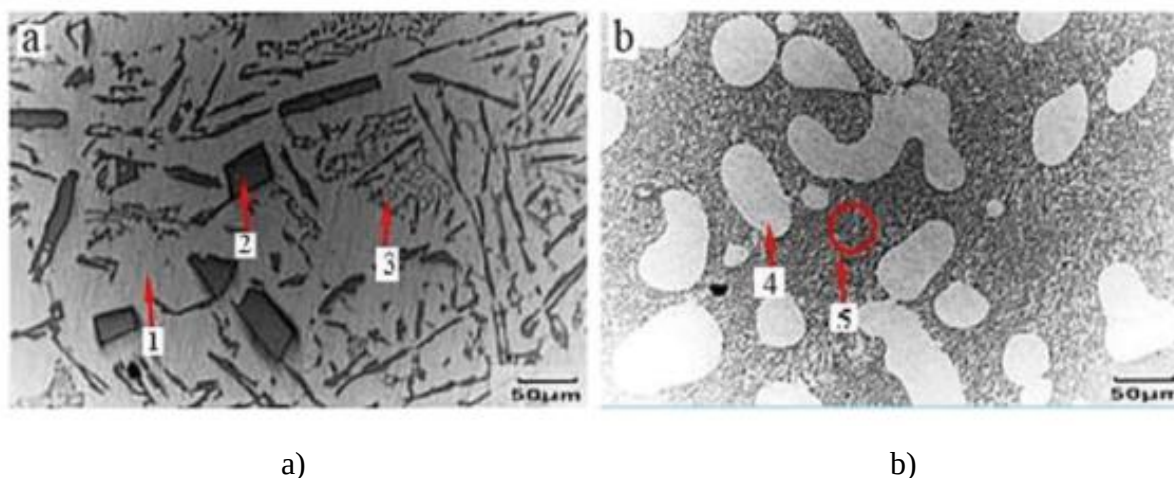


Slika 3. Modificirani Al-Si fazni dijagram [24]

Dodatak Na modificira eutektički rast Si u nepravilan vlaknasti oblik umjesto uobičajenih grubih pahuljica. Sastav legure Al-Si na novoj eutektičkoj točki zbog Na-modifikacije je podeutektički umjesto nadeutektički, što rezultira stvaranjem primarnog  $\alpha$ -Al umjesto Si. Slika 13. prikazuje mikrostrukтуру Al-Si legure sa 0,01 % Na gdje je 1 =  $\alpha$ -Al dendrit, 2 = primarni Si, 3 = igličasti eutektički Si, 4 =  $\alpha$ -Al i 5 = vlaknasti eutektički Si [24].



Dodavanjem male količine 0,01% Na kao nečistoće u leguru Al-Si modificira se njena mikrostruktura i poboljšavaju svojstva.



Slika 4. Mikrostruktura Al-Si legure sa dodatkom 0,01% natrija a) Al-13% Si, b) Al-13% Si-0,01% Na [24]

#### 4.2.3. Utjecaj na rast

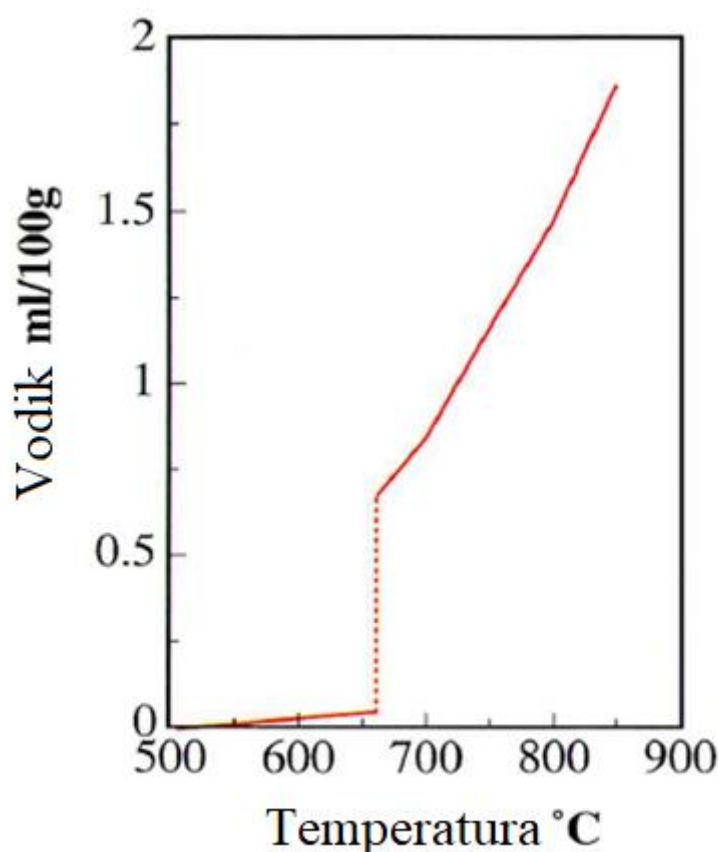
Učinak natrija i stroncija na rast je složen, a određen je različitim čimbenicima kao što su brzina hlađenja, razina dodavanja i sastav legure. Maseno napajanje u odljevcima obično se regulira stupnjem usitnjenja zrna. Eutektičko skrućivanje događa se nakon što aluminijski dendriti nastanu (u najjednostavnijem slučaju) skrućivanjem preostale taline. Budući da dolazi do volumetrijskog stezanja pri skrućivanju, potrebno je da se odljevak napaja kroz dendritnu mrežu (interdendritno napajanje). Međutim, zbog nepravilne prirode mreže, uobičajeno je da se neka područja izoliraju od izvora taline, te se u tim slučajevima stvara mikroporoznost [19]. Metode koje se koriste za kontrolu skupljanja su usitnjavanje zrna da bi se dobili manji i kompaktniji aluminijski dendriti. To može otežati interdendritno napajanje, ali udaljenost napajanja bit će kraća, a poroznost skupljanja puno finija. Uz to, skupljanje se može kontrolirati modifikacijom kako bi se promijenio oblik eutektičke fronte rasta.

U talini modificiranoj natrijem eutektička fronta rasta tipično je ravna, što omogućuje usmjereno skrućivanje kroz dendritnu mrežu. Kod modifikacije stroncijem, međutim, fronta rasta je nepravilnija, što daje mogućnost zaostajanja tekućih područja i dovodi do pojave mikroporoznosti [20].

Oblik rasta fronte u talinama modificiranim natrijem i stroncijem reguliran je omjerom  $G/v$ , gdje je  $G$  gradijent temperature u talini ispred rasta fronte, a  $v$  brzina rasta fronte. Pri visokim  $G/v$  fronte su ravnije, pri niskim  $G/v$  formira se nepravilna fronta, a pri vrlo niskim  $G/v$  moguće je dobiti eutektičko formiranje ispred fronte rasta što uzrokuje veću poroznost. Promjena  $G/v$  utječe na stroncij više nego na natrij, pa stoga mogu nastati problemi pri promjeni modifikatora. Vrijednost  $G/v$  nije konstantna u lijevanju; ona varira kako s vremenom tako i s položajem. U tankim dijelovima gradijenti temperature bit će visoki; tako će  $G/v$  biti visoka, a poroznost niska. U debljim dijelovima  $G$  bit će mali; tako će  $G/v$  biti nizak, a poroznost može biti velika. Da bi se riješio problem, potrebno je ili promijeniti  $G/v$  povećanjem hlađenja (smanjenjem prevlake kalupa, smanjenjem temperature lijevanja), povećanjem dodavanja modifikatora, dodavanjem usitnjivača zrna ili poboljšati napajanje tekućim metalom [19 - 21].

#### **4.2.4. Utjecaj na poroznost**

Kontinuirana je rasprava o ulozi modifikatora u stvaranju poroznosti. Sigurna je činjenica da modifikacija utječe na poroznost. U nekim je slučajevima to povoljno, ali u drugim nije. Poroznost je uzrokovana visokom razinom plina (vodika) u talini ili nekontroliranim skupljanjem odljevka. Otopljeni vodik oslobađa se skrućivanjem zbog njegove manje topivosti u krutini u odnosu na tekući aluminij prikazano na slici 14.. Obično se uklanja inertnim plinovima (dušik, argon) ili aktivnim (klorom). Međutim, u nekim su slučajevima poželjne visoke razine vodika kako bi se suprotstavilo skupljanju zbog skrućivanja u odljevcima s lošijim sustavima napajanja. U modificiranim odljevcima mogu se koristiti postupci otplinjavanja inertnim plinom, ali moraju se izbjegavati metode otplinjavanja aktivnim plinom, jer će dovesti do brzog gubitka elemenata modifikatora [19].



Slika 5. Granice topljivosti vodika u čvrstom / tekućem aluminiju [19]

Uobičajena značajka modificiranih legura je povećanje poroznosti povezano s izoliranim debelim dijelovima ili zadebljanjima (kutovi ili rebra). To je obično povezano s lošim dizajnom odljevka ili promjenom natrija sa stroncijem za modifikaciju. Brojni su izvještaji o stronciju koji dovodi do povećane plinske poroznosti u odljercima, no postoje i izvještaji koji dokazuju da to nije slučaj.

Jedna od uloga modifikatora je kontrolirati raspršenost poroznosti u odljevku, bilo da je uzrokovana plinom ili skupljanjem. U prethodnom je odjeljku prikazano kako modifikatori utječu na rast poroznosti. Ako je dio izoliran odnosno bez napajanja, to će rezultirati koncentriranjem poroznosti u zadnjim područjima skrućivanja, na primjer u debljim dijelovima. U tim je slučajevima važnije pokušati raspršiti poroznost kroz cijeli odljevak [19].

Mehanizam preraspodjele poroznosti nije još precizno shvaćen. Povećani interval skrućivanja modificiranih legura zbog smanjene eutektičke temperature dovest će do većih poluskrućnutih područja u odljevku. To dovodi do duljih putova napajanja i mogućnosti da se oni prerano skrute, što rezultira manjom poroznošću u pojilima i većom u odljevku. Postoje i argumenti za lakšu nukleaciju pora zbog smanjene površinske napetosti modificiranih odljevaka. Ako se pore lakše stvaraju, one će se pojaviti ranije tijekom skrućivanja, a time će biti brojnije, manje i bolje raspršene u odljevku [21].

#### **4.2.5. Količina dodavanja modifikatora**

Količina modifikatora koji se dodaje ne ovisi samo o stupnju potrebne modifikacije, već i o sadržaju silicija u leguri, brzini hlađenja, debljini presjeka, načinu lijevanja, vremenu zadržavanja, temperaturi i vrsti korištenog modifikatora. Oznaka tipičnih razina dodavanja stroncija dana je u tablici 4.1.. Općenito je utvrđeno da su dodaci od 0,02 do 0,03 % stroncija prikladni za većinu primjena. Dodatak natrija trebao bi biti u rasponu od 0,005 do 0,02 % u talini. Moraju se izbjegavati veći dodaci natrija jer može doći do prekomjerne modifikacije, što uzrokuje smanjenje mehaničkih svojstava. Precizna kontrola razine natrija otežana je zbog visoke reaktivnosti. Iskoristivost može biti varijabilana i obično niska oko 20 %.

Općenito, veće razine silicija zahtijevaju veće dodavanje modifikatora zbog povećanog volumena stvorenog eutektika. Međutim, ako je samo potrebno prevladati stvaranje acikularnog (igličastog) silicija, dodatak 0,01% stroncija može biti dovoljan, ovisno o početnim razinama nečistoća u talini. Na primjer, ako su prisutne značajne razine fosfora ili antimona, bit će potreban dodatni modifikator.

Ako se taline drže dulje vrijeme ili na višim temperaturama (800 °C ili više) tada će blijedenje (slabljenje učinka) postati značajno. Kada se koristi natrij, može se napraviti ponovna obrada svakih 20 minuta, dok se uz korištenje stroncija mogu postići vremena od 2 sata bez ponovne obrade.

U mnogim je slučajevima moguća upotreba unaprijed modificiranog ingota sa stroncijem. Međutim, gubitak modifikatora dogodit će se ponovnim taljenjem, što će zahtijevati ili nadopunu u ljevaonici ili specifikaciju viših razina modifikatora od dobavljača ingota. Gubici stroncija oksidacijom mogu doseći i 50 % pri ponovnom taljenju, ovisno o korištenom postupku taljenja. Gubici natrija bili bi znatno veći, pa se tako rijetko koristi natrijem prethodno modificirani ingot.

Budući da natrij i stroncij pri zadržavanju blijede u rastaljenom aluminiju, preporučuje se dodavanje što je kasnije moguće. Oba modifikatora također će reagirati s taliteljima koji sadrže fluor ili klorid. Ako se nakon dodavanja modifikatora koriste talitelji, trebaju biti nisko fluoridni ili nisko kloridni. Dodacima predlegure koja sadrži stroncij bit će potrebno nekoliko minuta da se rastale, ovisno o obliku dodavanja.

Prema tome, ako se punjenje iz peći za taljenje izvodi pomoću lonaca, moguće je dodati stroncij u lonac za prenošenje taline [20]. Prilikom punjenja će se rastaliti i temeljito umiješati. To se ne preporučuje ako se postupci ubacivanja talitelja rotacijskim mješačem provode u loncu, u tom slučaju dodavanje modifikatora treba izvršiti kasno u rasporedu, kada je ubacivanje talitelja završeno.

Ako se provode postupci ponovnog otplinjavanja (pomoću tableta), treba uzeti u obzir da će oni također težiti uklanjanju modifikatora iz taline. Stroncij se također može dodati u talinu u peći u bilo kojem trenutku, iako se preporučuje da se talina u peći dobro promiješa nekoliko minuta nakon dodavanja. Treba biti oprezan pri korištenju poroznih predlegura stroncij-aluminij (ingoti, pločice) jer one mogu plutati na površini taline aluminijske i dovesti do niske i promjenjive iskoristivosti zbog oksidacije stroncija. U tim je slučajevima poželjno uroniti predleguru. Jednom obrađena talina trebala bi biti upotrebljiva do 2 sata, ovisno o korištenoj temperaturi držanja.

Budući da se natrij brzo gubi iz taline, njegovo se dodavanje rijetko provodi u loncima za prijenos, ali se najčešće izvodi u peći za držanje temperature taline. Natrij, bilo kapsuliran ili omotan folijom, treba uroniti na dno peći; tipično se istodobno dodaje i talitelj. Reakcija je snažna s razvojem jakih dimova. Kada se reakcija završi i uklone nastali oksidi s površine, metal treba lijevati što je prije moguće. Ako se drži dulje od 20 minuta, vjerojatno će biti potrebno ponovno dodavanje natrija [19-21].

Legure se mogu kupiti i predmodificirane natrijem ili stroncijem. To može uštedjeti obradu taline u ljevaonici u nekim primjenama. Međutim, ovisno o korištenom postupku lijevanja, značajne količine modifikatora izgubit će se ponovnim lijevanjem (obično 50 % za stroncij, još više za natrij). To je slučaj i s internim modificiranim kružnim materijalom koji se ponovno tali. Mogle bi biti koristi od upotrebe unaprijed modificiranog ingota, posebno ako je jedini cilj spriječiti stvaranje acikularnog silicija, jer se neki dio modifikatora ipak zadrži u talini. Da bi se postigla potpuno modificirana struktura, gotovo sigurno će trebati dodati dodatni modifikator ili koristiti predmodificirane ingote s vrlo visokom razinom modifikatora [19-21].

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ispitan je utjecaj tehnološke obrade taline modifikacijom na metaluršku kvalitetu, razvoj mikrostrukture i mehanička svojstva AlSi12 legure. Legura AlSi12 je eutektičkog sastava, a u tvrtki Ljevaonica Bujan d.o.o., prikazana na slici 15., koristi se za lijevanje tlačne opreme (filteri za plin). Uz to su specijalizirani i za odljevke koji zahtjevaju daljnju toplinsku obradu.



Slika 6. Ljevaonica Bujan d.o.o.

U tu svrhu obrađena je talina u loncu peći te su izvršena lijevanja uzoraka približno svakih 10 minuta koja su zapisana u tablici 7..

Tablica 7. Raspored lijevanja

| Broj taline | Modificirana | Vrijeme nakon dodavanja nukleanta i natrija u talinu [min] | Vrijeme [sati:min] | Temperatura taline u peći [°C] |
|-------------|--------------|------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| 1.          | NE           | 0                                                          | 07:42              | 764                            |
| 2.          | DA           | 10                                                         | 07:52              | 720                            |
| 3.          |              | 23                                                         | 08:05              | 775                            |
| 4.          |              | 32                                                         | 08:14              | 765                            |
| 5.          |              | 46                                                         | 08:28              | 710                            |
| 6.          |              | 56                                                         | 08:38              | 760                            |
| 7.          |              | 73                                                         | 08:55              | 780                            |

U peći se nalazilo 200 kg metalnog uloška legure AlSi12, 150 kg novih ingota i 50 kg kružnog materijala. Dodano je 200 g Nucleanta 100 SP za usitnjavanje i 50 g čistog natrija za modifikaciju. Talina je odlivena 7 puta.



Prvo se lijevalo u čašicu za određivanje krivulje hlađenja, odnosno toplinsku analizu taline, zatim u kokilu za određivanje mehaničkih svojstava i na kraju u kokilu za ispitivanje kemijskog sastava vidljivo na slici 16..



a)



b)



c)

Slika 7. Kalupi a) Kokila za ispitivanje mehaničkih svojstava, b) Kokila za ispitivanje kemijskog sastava, c) Quick-Cup čšaica

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

### 5.1. Priprema prije lijevanja

Prije lijevanja definirana je količina metalnog uloška koja se stavlja u peć kako bi se znala dodati točna količina Nukleanta 100 SP i natrija radi modifikacije. Novi ingoti koji su korišteni u eksperimentu, prikazani su na slici 17.. Masa kompletne palete prije sastavljanja šarže materijala iznosi 830,5 kg.



Slika 8. Novi ingoti legure AlSi12



Sama peć je od proizvođača Nabertherm, te se bazna talina u njoj može vidjeti na slici 18.. Temperatura taline u peći kontrolirana je prije svakog lijevanja pomoću kontaktnog pirometra i prije početka prvog lijevanja iznosila je 764 °C kao što je vidljivo na slici 19.



Slika 9. Peć proizvođača Nabertherm



Slika 19. Provjera temperature taline u peći

Također je prije prvog lijevanja, te kasnije, bilo potrebno predgrijati kokilu kako ne bi došlo do prebrzog hlađenja po stijenkama te stvaranja pora u odljevku. Nakon svih potrebnih priprema, zadnja stvar koju je bilo potrebno napraviti je skinuti okside odnosno trosku sa površine taline te početi sa lijevanjem.

## 5.2. Postupak lijevanja

Za potrebe eksperimentalnog dijela kao bazna talina korištena je predmodificirana AlSi12 legura sa 76 ppm natrija (novi ingot). Kemijski sastav navedene legure nalazi se u tablici 8.. Proces lijevanja se odvijao u Ljevaonici Bujan d.o.o. gdje se odmah vršila i kemijska analiza odljevaka. Prvo je lijevana bazna talina, a nakon toga je napravljena obrada taline u peći i lijevano je 6 modificirana uzorka.

Tablica 8. Kemijski sastav AlSi12 legure

| Element | Udio [%] |
|---------|----------|
| Si      | 12,0311  |
| Fe      | 0,1526   |
| Cu      | 0,0048   |
| Mn      | 0,1729   |
| Mg      | 0,0242   |
| Zn      | 0,0159   |
| Ti      | 0,1117   |
| Na      | 0,0076   |
| Ostalo  | 0,0591   |
| Al      | Ostatak  |

### 5.2.1. Lijevanje epruveta i uzorka za ispitivanje

Radi ispitivanja kemijskog sastava i mehaničkih svojstava odlivene su epruvete i uzorak u dvodjelnu kokilu izrađenu od čelika za topli rad H11. Kokila se svaki put provjeravala sa bezkontaktnim pirometrom te je grijana plamenikom na temperaturu od približno 190 °C prije lijevanja.

Sama kokila je bila pritegnuta pomoću stega kako bi se izbjeglo izlijevanje taline iz same kokile. Iz nje su dobiveni odljevci za izradu epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava. Na slici 20.a je prikazan postupak provjeravanja temperature kokile bezkontaktnim pirometrom, dok je na slici 20.b prikazan proces lijevanja taline u dvodijelnu kokilu. Talina je prenesena od peći do kokile pomoću uljevnog lonca.



a)



b)

Slika 10. Kokila a) Provjeravanje temperature kokile, b) Postupak lijevanja taline u kokilu

Nakon svakog lijevanja taline, čekalo se približno 10 minuta kako bi se talina skrutila da bi se skrutnuti odljevak mogao izbaciti iz kokile van. Prvo lijevanje bazne taline je započelo u 7:42, te su napravljena tri odljevaka. Prvi kalup je Quick-Cup čašica u kojoj se nalazi termopar i direktno je spojena sa uređajem preko kojega se može računalno generirati krivulja hlađenja i prema njoj se može pratiti određena stanja skrućivanja to jest u kojoj fazi se odljevak nalazi. Drugi kalup je kokila za ispitivanje mehaničkih svojstava, a dobiveni odljevak prikazan je na slici 21., dok je treći kalup namijenjen uzorku za ispitivanje kemijskog sastava taline i prikazan je na slici 22.. Prvo ispitivanje je provedeno na baznoj talini legure AlSi12 .





Slika 11. Odljevak za ispitivanje mehaničkih svojstava s uljevnim sustavom



Slika 12. Odljevak za ispitivanje kemijskog sastava

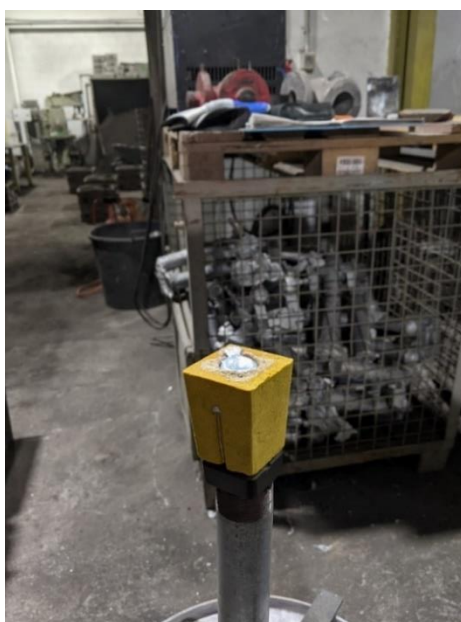
Nakon uspješno provedenog lijevanja baznih odljevaka krenuli smo sa modificiranjem bazne taline sa 200 g Nucleanta 100 SP za usitnjavanje i 50 g čistog natrija. Čisti natrij kao i nukleant 100 SP su u obliku tableta koje se samo dodaju u peć direktno u baznu talinu. Lijevanje prve modificirane taline krenulo je u 7:52. Temperatura taline u peći je iznosila 764 °C, te su odmah vidljive promjene u leguri prema krivulji hlađenja i toplinskoj analizi. Kemijski sastav Nucleanta 100 SP prikazan je u tablici 9..

Tablica 9. Kemijski sastav Nukleanta 100 SP [25]

| Element                    | %      |
|----------------------------|--------|
| <b>Titan</b>               | 56,3   |
| <b>Bor</b>                 | 4      |
| <b>Oksidi, Fe, KCl, KF</b> | Ostalo |

### 5.2.2. Jednostavna toplinska analiza

Jednostavna toplinska analiza TA je također rađena u Ljevaonici Bujan d.o.o. te se njome snima krivulja hlađenja. Sama TA se primjenjuje za kontrolu kvalitete taline dugi niz godina. Preko nje se može vidjeti kako talina skrućuje, te sam način i uvid u nastajanje mikrostrukture. Time se provjerava da li će talina zadovoljiti određene zahtjeve koji su traženi od tog specifičnog tipa legure. Sama toplinska analiza je u srži jednostavan postupak barem što se tiče prikaza traženih podataka. Praćenjem krivulja hlađenja može se vidjeti na kojoj je temperaturi došlo do stvaranja određene faze. Uvidom u tijek skrućivanja može se pretpostaviti kakva će biti svojstva lijevane legure, ovisno o tome je li podeutektičkog, eutektičkog ili nadeutektičkog sastava. Ulijevanjem bazne taline u Quik-Cup čašicu, prikazanu na slici 23.a, spojenu na računalo, putem softwera pratila se ovisnost temperature o vremenu. Uređaj za mjerenje prikazan je na slici 23.b. Isti postupak je ponovljen 6 puta s obrađenom talinom te su rezultati uspoređeni.



a)



b)

Slika 13. Toplinska analiza, a) Quick-Cup šalica, b) Uređaj za mjerenje brzine hlađenja

Samu toplinsku analizu najbolje je opisati redom kojim su i lijevani uzorci, jer tako možemo najefikasnije pratiti promjene koje se dešavaju sa talinom tijekom stajanja u loncu peći nakon što smo dodali sredstva za obradu u baznu talinu. Prema ovome kompjuterskom programu mjerenja toplinske analize idealna vrijednost nukleacijskog potencijala i modifikacije eutektika iznosi 10, ali vrijednost koja je iznad 6 je već prihvatljiva. Ako je modifikacija eutektika iznad 10 znači da smo talinu premodificirali, te je onda potrebno pričekati nekoliko minuta da djelovanje natrija oslabi i ponoviti isto mjerenje. Krivulja hlađenja baze taline se nalazi na slici 24..





Slika 14. Krivulja hlađenja bazne taline

Najbitniji podaci koje trebamo za usporedbu su  $T_p$ ,  $T_{Lmin}$ ,  $T_{Lmax}$ ,  $Re_k$ ,  $T_{Emin}$  i  $T_{Emax}$ , gdje je  $T_p$  temperatura lijevanja,  $T_{Lmin}$  početna temperatura stvaranja likvidusa dok je  $T_{Lmax}$  maksimalna i krajnja temperatura stvaranja likvidusa,  $Re_k$  označava relaksaciju te  $T_{Emin}$  početnu temperaturu stvaranja eutektika dok  $T_{Emax}$  označava krajnju tj, završnu temperaturu stvaranja eutektika.

U tablici 10. možemo vidjeti očitane sve karakteristične temperature za svih 7 lijevanja.

Tablica 10. Prikaz karakterističnih temperatura sa krivulje hlađenja

| <b>Talina</b>         | <b><math>T_P</math> [°C]</b> | <b><math>T_{Lmin}</math> [°C]</b> | <b><math>T_{Lmax}</math> [°C]</b> | <b><math>T_{Emin}</math> [°C]</b> | <b><math>T_{Emax}</math> [°C]</b> |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Bazna</b>          | 683,48                       | 568,67                            | 571,76                            | 570,99                            | 572,25                            |
| <b>Modificirana 1</b> | 634,62                       | 560,3                             | 560,3                             | 560,1                             | 560,11                            |
| <b>Modificirana 2</b> | 716,53                       | 576,86                            | 576,93                            | 570,33                            | 570,46                            |
| <b>Modificirana 3</b> | 713,33                       | 578,37                            | 579,76                            | 571,58                            | 573,02                            |
| <b>Modificirani 4</b> | 600,28                       | 560,44                            | 564,55                            | 564,19                            | 564,19                            |
| <b>Modificirana 5</b> | 721,58                       | 577,23                            | 577,92                            | 571,05                            | 572,97                            |
| <b>Modificirana 6</b> | 692,17                       | 568,32                            | 570,41                            | 570,41                            | 570,44                            |

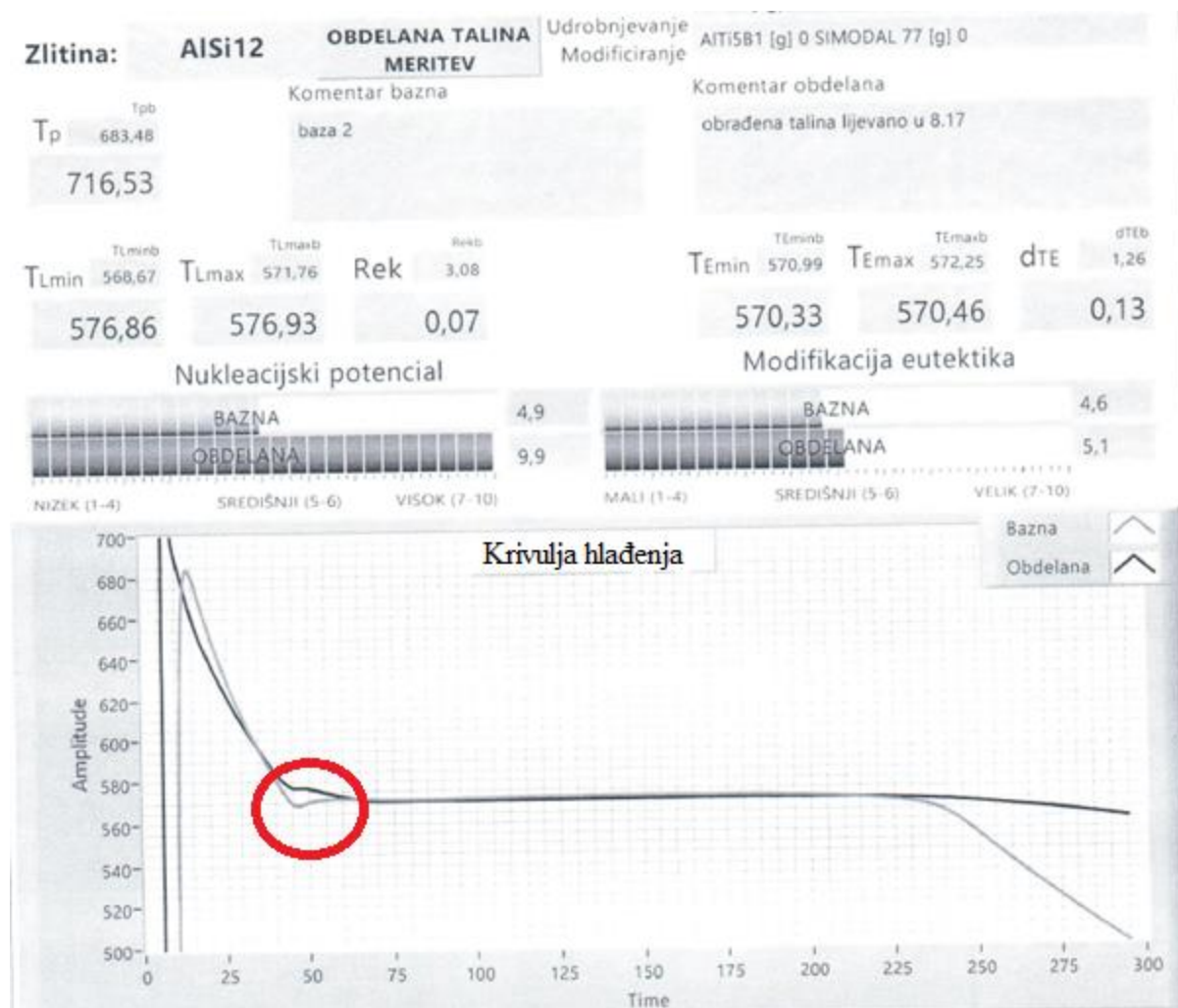
Temperatura lijevanja bazne taline u Quik-Cup čašicu je iznosila 683,48 °C. Temperatura likvidusa  $T_{Lmin}$  i  $T_{Lmax}$  je iznosila između 568,67 °C i 571,76 °C, te na toj temperaturi počinje skrućivanje. Sam eutektik se počinje formirati tek kod temperature  $T_{Emin}$ . Isti princip vrijedi i za ostale taline.





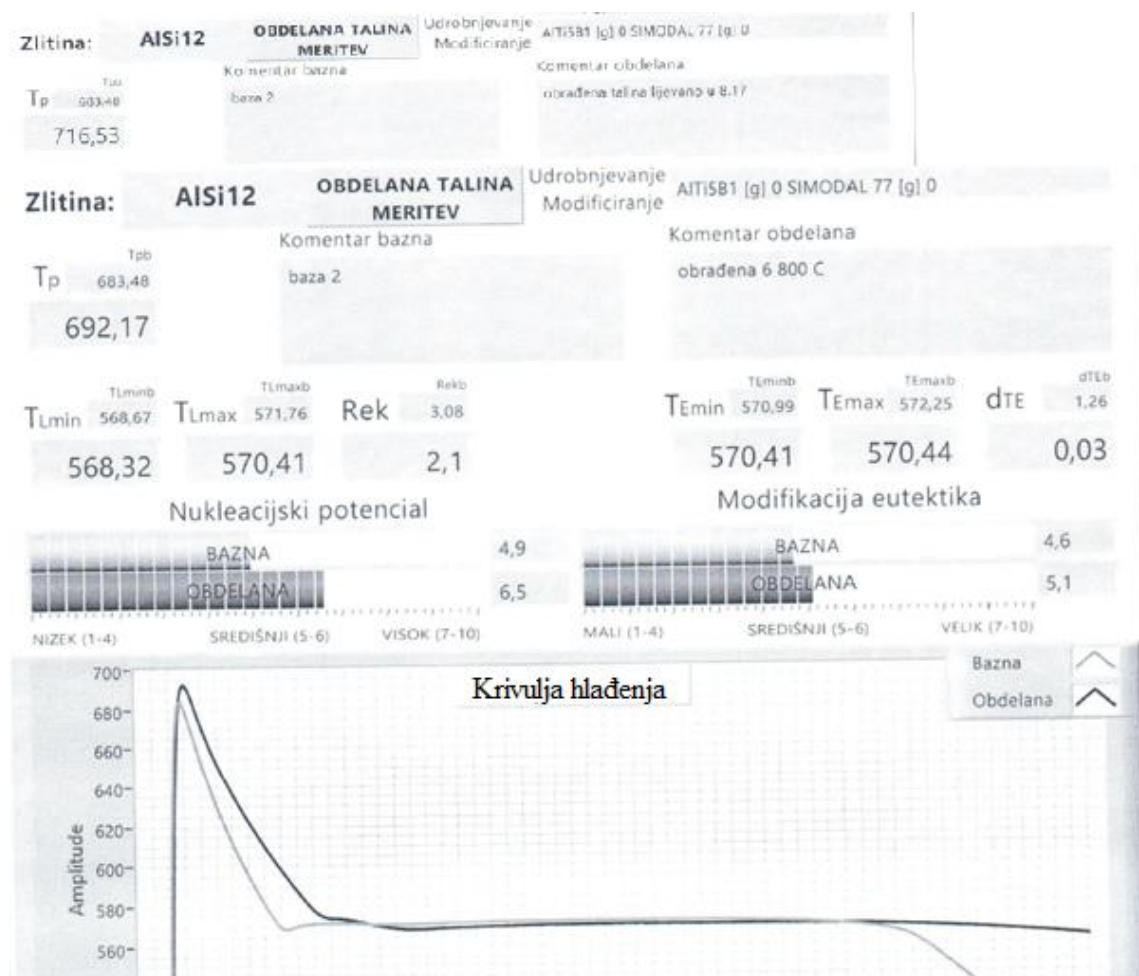
Slika 15. Usporedba krivulja hlađenja bazne taline i prve modificirane taline

Prema slici 25. možemo vidjeti usporedbe krivulja hlađenja bazne taline i prve modificirane taline lijevane 10 minuta nakon modifikacije na kojima možemo primjetiti rezultat uspješne modifikacije. To se vidi po iznosu eutektičke temperature koja je približno 10 °C niža nego kod bazne taline. Nukleacijski potencijal i modifikacija eutektika su u prihvatljivom vrijednostnom spektru tako da se te vrijednosti mogu uzeti kao mjerodavne.



Slika 16. Usporedba krivulja hlađenja bazne taline i druge modificirane taline

Na slici 26. možemo vidjeti usporedbu bazne taline i druge modificirane taline po kojoj se može zaključiti lošija modifikacija nego prema prvoj usporedbi. Temperatura druge modificirane taline prilikom ulijevanja u Quik-Cup čašicu iznosila je 716,53 °C. Temperatura likvidusa kod obrađene taline iznosi 576 °C. Skrućivanje napreduje formiranjem eutektika pri  $T_{Emin}$  570,99 °C baznu talinu, dok kod obrađene formiranje eutektika počinje pri  $T_{Emin}$  570,33 °C. Rezultat pokazuje malu razliku eutektičkih temperatura, što znači da je djelovanje natrija kao modifikatora oslabilo 23 minute nakon dodavanja.



Slika 17. Usporedba krivulja hlađenja bazne taline i šeste modificirane taline

Na slici 27. možemo vidjeti usporedbu bazne taline i šeste modificirane taline. Temperatura modificirane taline prilikom ulijevanja u Quik-Cup čašicu iznosila je 692,17 °C. Temperatura likvidusa kod obrađene taline  $T_{Lmin}$  iznosi 568,32 °C, a  $T_{Lmax}$  iznosi 570,41 °C. Skrućivanje napreduje formiranjem eutektika pri 570,99 °C za baznu talinu, dok kod obrađene formiranje eutektika počinje pri 570,41 °C. Rezultat pokazuje malu razliku eutektičkih temperatura, što znači da je djelovanje natrija kao modifikatora potpuno oslabilo 73 minute nakon dodavanja. Kod svih se usporedba primjetilo kako je oblik krivulja hlađenja kod bazne i svih modificiranih krivulja hlađenja isti, ali su različite karakteristične temperature ovisno o temperature lijevanja i vremenu stajanja taline u peći nakon modifikacije. Natrij je kod prve modificirane taline značajno spustio eutektičku temperaturu, koja je 23 minute nakon dodavanja ponovno narasla na približno jednake vrijednosti kao kod nemodificirane taline. To znači da ga više nije bilo u talini.

### 5.3. Određivanje kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava provedena je u laboratoriju Ljevaonice Bujan na spektrometru. Donji dio uzorka je pobrušen i očišćen od eventualnih nečistoća radi točnijeg mjerenja. Inertizacija prostora oko uzorka prije same analize kemijskog sastava je rađeno sa argonom, te je isto napravljeno svaki puta prije ponovnog mjerenja. Uređaj Hitachi Foundry-Master sa kojim je vršena kemijska analiza je prikazan na slici 28.. Uzorak za analizu kemijskog sastava lijevan je jednom za baznu talinu i jednom za svaku modificiranu (ukupno 7 uzorka) i na svakom uzorku provedena su tri mjerenja kemijskog sastava iz kojih je izračunat prosjek. Na slici 29.a prikazan je uzorak na uređaju, a na slici 29.b izgled donje strane nakon ispitivanja.

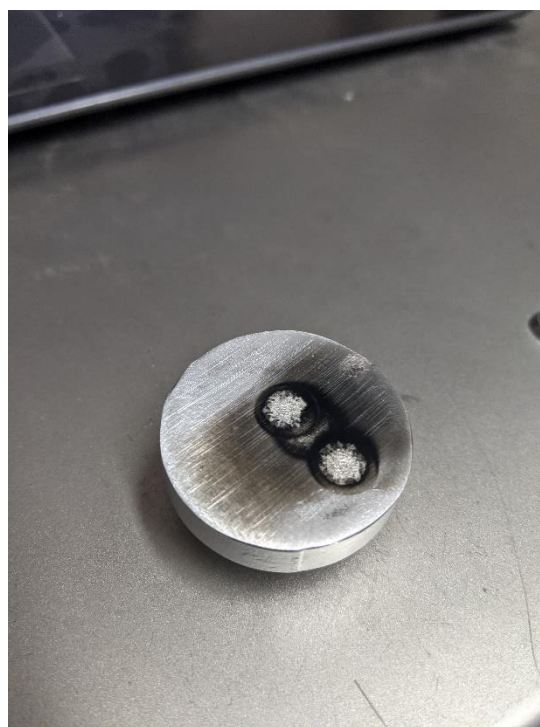


Slika 18. Uređaj za kemijsku analizu, Hitachi Foundry-Master





a)



b)

Slika 29. Kemijska analiza, a) Uzorak na uređaju, b) Izgled donje strane uzorka nakon analize

U tablicama 11. do 17. možemo vidjeti prosječne vrijednosti kemijskog sastava za svaku talinu.

Tablica 11. Kemijski sastav bazne taline

| Al<br>[%] | Si<br>[%] | Fe<br>[%] | Cu<br>[%] | Mn<br>[%] | Mg<br>[%] | Cr<br>[%] | Zn<br>[%] | Ti<br>[%] | Sr<br>[%] | Na<br>[%] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 87,59     | 11,9      | 0,117     | 0,0053    | 0,169     | 0,0172    | 0,0021    | 0,0102    | 0,140     | 0,0005    | 0,0031    |

Tablica 12. Kemijski sastav prve modificirane taline

| Al<br>[%] | Si<br>[%] | Fe<br>[%] | Cu<br>[%] | Mn<br>[%] | Mg<br>[%] | Cr<br>[%] | Zn<br>[%] | Ti<br>[%] | Sr<br>[%] | Na<br>[%] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 87,29     | 12,1      | 0,130     | 0,0055    | 0,162     | 0,0164    | 0,0015    | 0,0102    | 0,211     | 0,0005    | 0,0216    |

Tablica 13. Kemijski sastav druge modificirane taline

| Al<br>[%] | Si<br>[%] | Fe<br>[%] | Cu<br>[%] | Mn<br>[%] | Mg<br>[%] | Cr<br>[%] | Zn<br>[%] | Ti<br>[%] | Sr<br>[%] | Na<br>[%] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 87,28     | 12,1      | 0,119     | 0,0058    | 0,159     | 0,0217    | 0,0018    | 0,0113    | 0,227     | 0,0005    | 0,0159    |

Tablica 14. Kemijski sastav treće modificirane taline

| Al<br>[%] | Si<br>[%] | Fe<br>[%] | Cu<br>[%] | Mn<br>[%] | Mg<br>[%] | Cr<br>[%] | Zn<br>[%] | Ti<br>[%] | Sr<br>[%] | Na<br>[%] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 87,58     | 11,8      | 0,115     | 0,0055    | 0,166     | 0,0178    | 0,0019    | 0,0106    | 0,0218    | 0,0005    | 0,0048    |

Tablica 15. Kemijski sastav četvrte modificirane taline

| Al<br>[%] | Si<br>[%] | Fe<br>[%] | Cu<br>[%] | Mn<br>[%] | Mg<br>[%] | Cr<br>[%] | Zn<br>[%] | Ti<br>[%] | Sr<br>[%] | Na<br>[%] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 87,56     | 11,8      | 0,120     | 0,0054    | 0,164     | 0,0178    | 0,0014    | 0,0104    | 0,226     | 0,0005    | 0,0058    |

Tablica 16. Kemijski sastav pete modificirane taline

| Al<br>[%] | Si<br>[%] | Fe<br>[%] | Cu<br>[%] | Mn<br>[%] | Mg<br>[%] | Cr<br>[%] | Zn<br>[%] | Ti<br>[%] | Sr<br>[%] | Na<br>[%] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 87,85     | 11,7      | 0,122     | 0,0054    | 0,166     | 0,0169    | 0,0017    | 0,0102    | 0,230     | 0,0005    | 0,0046    |

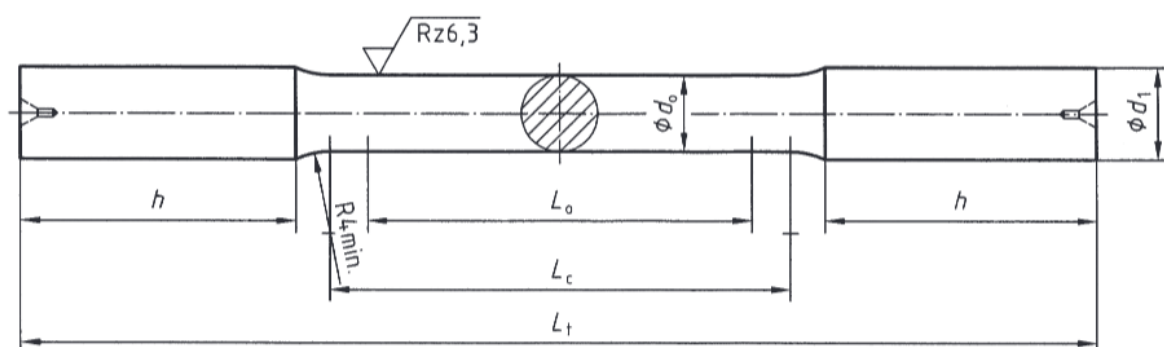
Tablica 17. Kemijski sastav šeste modificirane taline

| Al<br>[%] | Si<br>[%] | Fe<br>[%] | Cu<br>[%] | Mn<br>[%] | Mg<br>[%] | Cr<br>[%] | Zn<br>[%] | Ti<br>[%] | Sr<br>[%] | Na<br>[%] |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 87,81     | 11,6      | 0,112     | 0,0055    | 0,168     | 0,0134    | 0,0017    | 0,0103    | 0,219     | 0,0005    | 0,0006    |

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je obradom taline povišen sadržaj titana i natrija u ispitivanoj aluminijskoj leguri. Titan je postigao konstantu u modificiranim odljevcima koja se kretala između 0,211 % i 0,230 % dok je natrij postigao svoj maksimum u prvom modificiranom odljevku nakon dodavanja čistog natrija te je u kasnijim odljevcima pokazivao sve manju prisutnost jer natrij za razliku od stroncija dosta brzo izađe iz taline van.

#### 5.4. Priprema uzoraka za statičko vlačno ispitivanje

Nakon lijevanja epruveta, iste su strojno obrađene i pripremljene za statičko vlačno ispitivanje. Epruvete su tokarene i obrađene u tvrtki Jedinstvo Krapina d.o.o., kako bi ispitivanje imalo sve potrebne predispozicije da bude važeće. Obrada uzoraka je odrađena prema DIN 50125:2009-07 prikazano na slici 30.. Postupak priprema epruvete krenuo je od odrezivanja uljevnog sustava i pojila te je ostatak kasnije obrađen na tokarilici.



Slika 19. Dimenzije epruveta prema DIN 50125:2009-07 [26]

Prema slici 30. možemo vidjeti nekoliko dimenzija koji su nam bitne prije nego što se može krenuti u samu obradu epruvete:

$d_0$  – promjer epruvete

$d_1$  – promjer ISO metričkog navoja

$L_C$  - paralelna dužina ( $L_C \geq L_0 + d_0$ )

$L_t$  – ukupna dužina epruvete

Za naše mjerenje vrijednosti dimenzija su iznosile:

$$d_0 = 12 \text{ mm}$$

$$d_1 = \text{M18}$$

$$L_C = 72 \text{ mm}$$

$$L_t = 116 \text{ mm}$$

$$L_0 = 60 \text{ mm}$$

Slika 31. prikazuje obrađene epruvete spremne za statičko vlačno ispitivanje, na ploči za radiografsko ispitivanje.



Slika 20. Odrađene epruvete

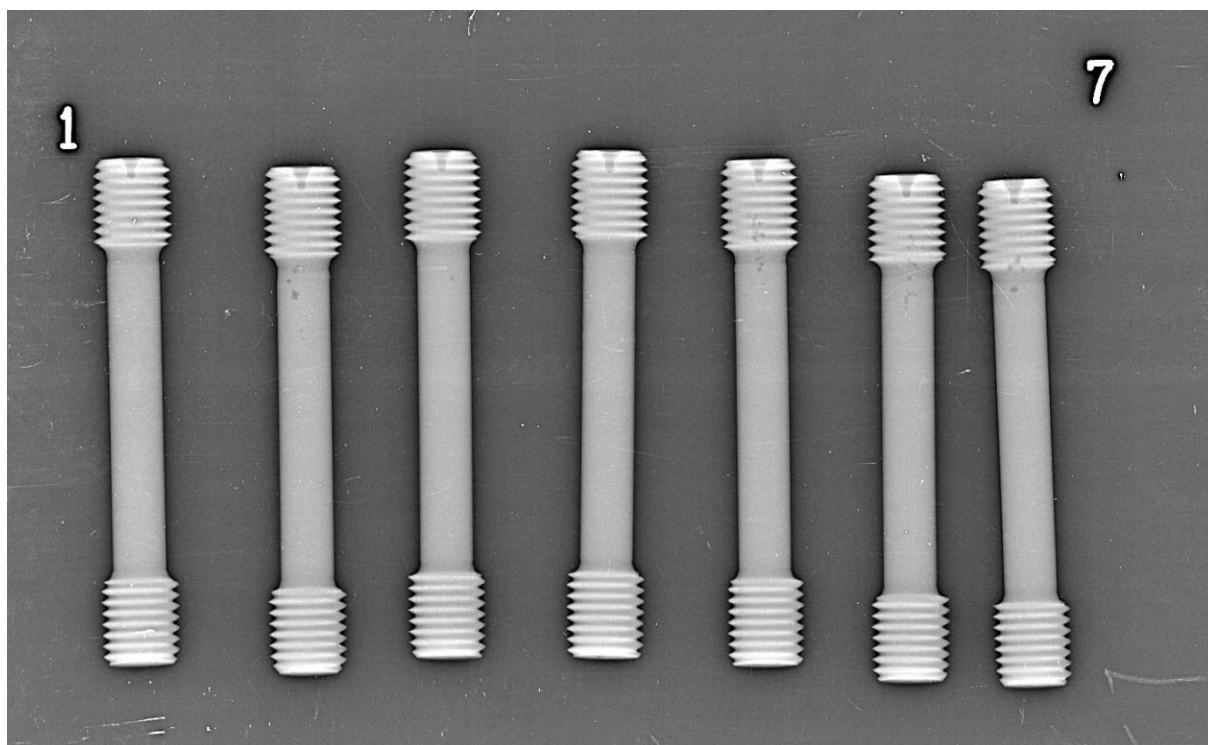
### 5.5. Radiografsko ispitivanje

Odrađene epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava radiografski su ispitane kako bi vidjeli da li postoji prisutnost raznih poroznosti u epruvetama, jer ako ih kojim slučajem ima moramo toga biti svjesni zato što mogu utjecati na zadnji dio eksperimenta, a to je statičko vlačno ispitivanje uzoraka.

Slika 32. prikazuje radiogram epruveta za statičko vlačno ispitivanje, pri čemu su:

- 1- epruveta bazne taline
- 2-7 -epruvete modificirane taline





Slika 21. Radiogram epruveta za statičko vlačno ispitivanje

Za izvođenje ovog mjerenja korišteni su sljedeći parametri i oprema:

Parametri snimanja:

Napon - 125 kV

Struja - 3 mA

Film fokus udaljenost - 700 mm

Vrijeme – 90 sek

Parametri skeniranja:

Napon lasera - 15 V

Napon fotomultiplikatora - 5.25 V

Rezolucija skeniranja - 50  $\mu$ m

Korištena oprema:

RTG uređaj - Balteau 300 D

Skener - VMI 5100

Slikovna ploča - Kodak industrex flex Blue

Radiogram je pokazao da u nekim uzorcima ima prisutnih poroznosti, što može utjecati na daljnje statičko vlačno ispitivanje.

## 5.6. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Za statičko vlačno ispitivanje korištena je kidalica „EU 40 mod“ mjernog područja do 400 kN proizvođača Werkstoffprüfmaschinen. Radi točnijeg mjerenja koristilo se i senzorsko ticalo koje je direktno bilo prikvačeno na epruvetu tijekom ispitivanja i mjerilo je produljenje. Epruveta je bila spojena preko navojne čahure na kidalicu te je brzina ispitivanja kod svih uzoraka bila 350 N/s. Prije svakog ispitivanja provelo se prednaprezanje epruvete od 2 kN nakon čega se spojilo ticalo te se krenulo sa ispitivanjem. Radi sigurnosti od preranog pucanja, ticalo je bilo spojeno do produljenja epruvete od 0,17 mm nakon čega je skinuto te je daljnje produljenje bilo mjereno preko senzora u samoj kidalici. Postupak je bio u skladu s normom HR EN ISO 6892-1/2. Kidalica te ticalo su prikazani na slici 33.ab.



a)



b)

Slika 22. Statičko vlačno ispitivanje, a) Kidalica „EU 40 mod“, b) Senzorsko ticalo

U tablici 18. prikazani su rezultati statičkog vlačnog ispitivanja sedam epruveta, 6 od obrađene taline i jedna od bazne taline.

Tablica 18. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

| LIJEVANJE              | $F_m$ [kN] | $F_b$ [kN] | $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------------|------------|------------|----------------------------|---------------------------------|
| <b>Bazna talina</b>    |            |            |                            |                                 |
| <b>1.</b>              | 21,78      | 21,76      | 190,33                     | 95,44                           |
| <b>Obrađena talina</b> |            |            |                            |                                 |
| <b>2.</b>              | 22,81      | 22,78      | 196,09                     | 96,51                           |
| <b>3.</b>              | 21,97      | 21,97      | 190,15                     | 96,07                           |
| <b>4.</b>              | 19,33      | 19,33      | 167,52                     | 101,59                          |
| <b>5.</b>              | 19,93      | 19,93      | 171,64                     | 92,39                           |
| <b>6.</b>              | 19,74      | 19,74      | 171,67                     | 89,49                           |
| <b>7.</b>              | 20,59      | 20,59      | 180,84                     | 96,95                           |

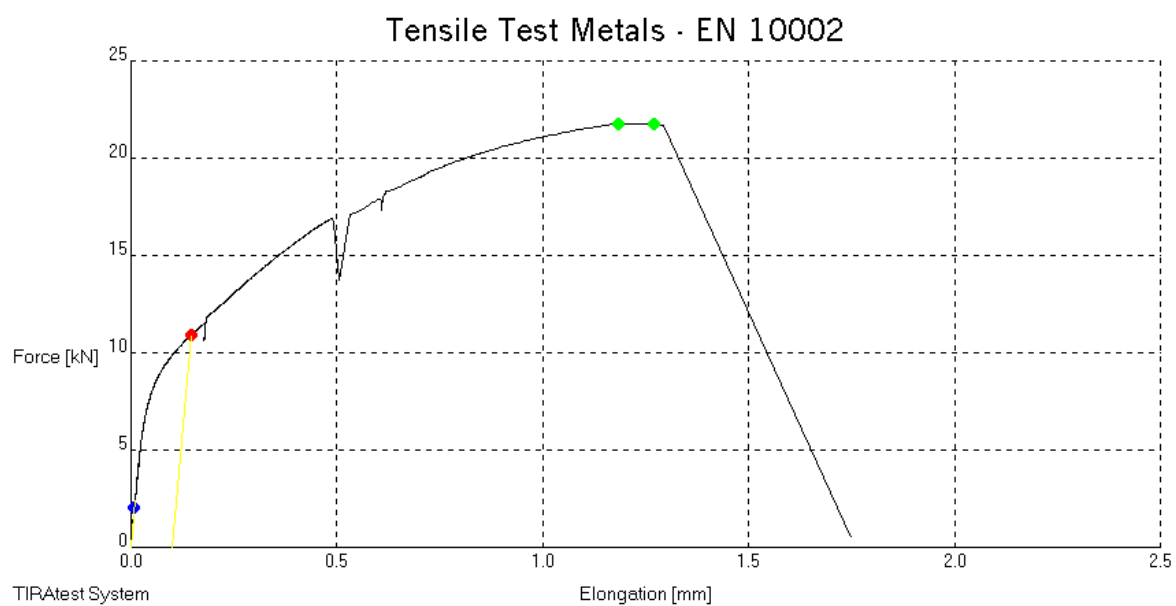
Na svim epruvetama je na srednjem dijelu zabilježen dio od 60 mm ( $L_0$ ) koji je kasnije mjeren kako bi dobili produljenje te usporedili sa rezultatima senzora. U tablici 19. prikazani su rezultati produljenja epruveta te suženja nakon statičkog vlačnog ispitivanja. Produljenje epruvete (A) je izračunato prema formuli:

$$A = [(L_u - L_0) / L_0] \times 100 \quad (1)$$

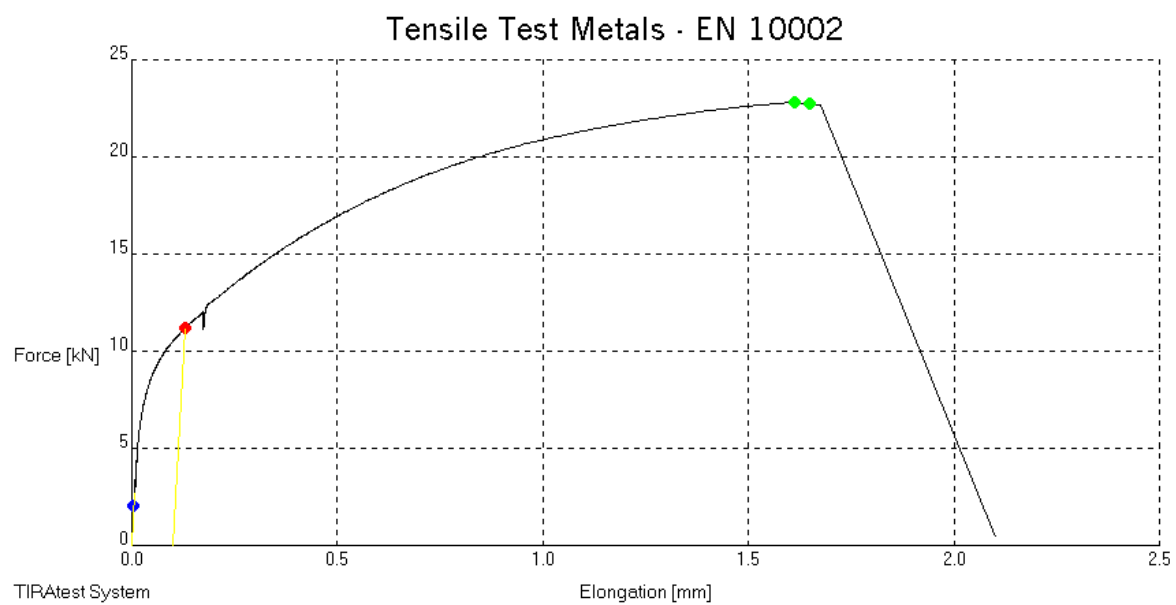
Tablica 19. Dimenzije epruveta prije i nakon ispitivanja

| LIJEVANJE              | $D_o$ [mm] | $D_u$ [mm] | $L_o$ [mm] | $L_u$ [mm] | A [%] |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| <b>Bazna talina</b>    |            |            |            |            |       |
| <b>1.</b>              | 12,07      | 11,66      | 60         | 62,88      | 4,8   |
| <b>Obrađena talina</b> |            |            |            |            |       |
| <b>2.</b>              | 12,17      | 11,57      | 60         | 63,88      | 6,46  |
| <b>3.</b>              | 12,13      | 11,69      |            | 63,98      | 6,63  |
| <b>4.</b>              | 12,12      | 11,84      |            | 61,14      | 1,9   |
| <b>5.</b>              | 12,16      | 11,81      |            | 61,90      | 3,16  |
| <b>6.</b>              | 12,10      | 11,82      |            | 62,02      | 3,36  |
| <b>7.</b>              | 12,04      | 11,71      |            | 62,88      | 4,8   |

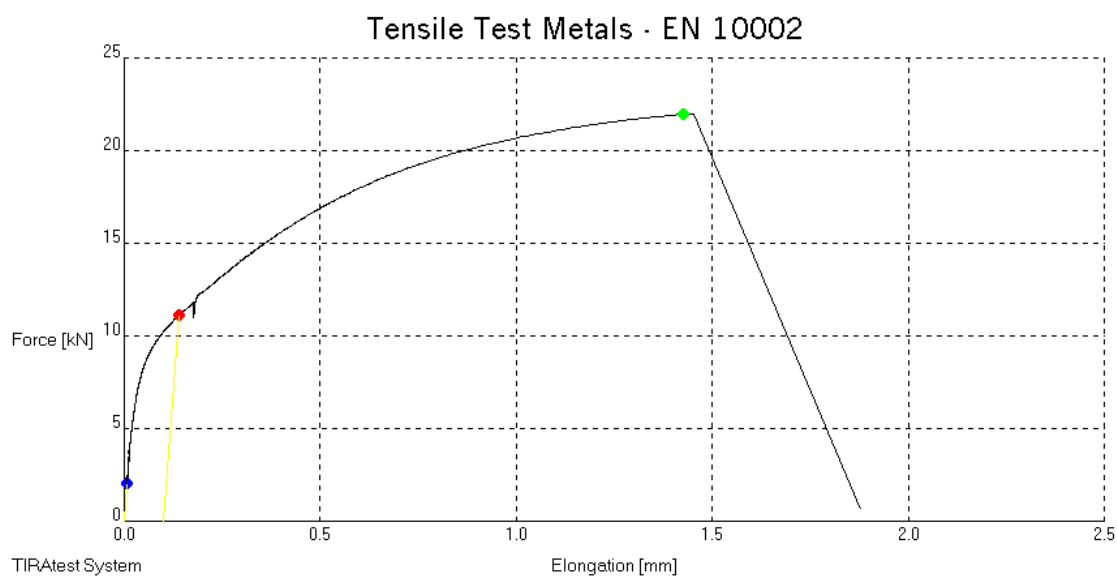
Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja dan je na slikama 34. do 40..



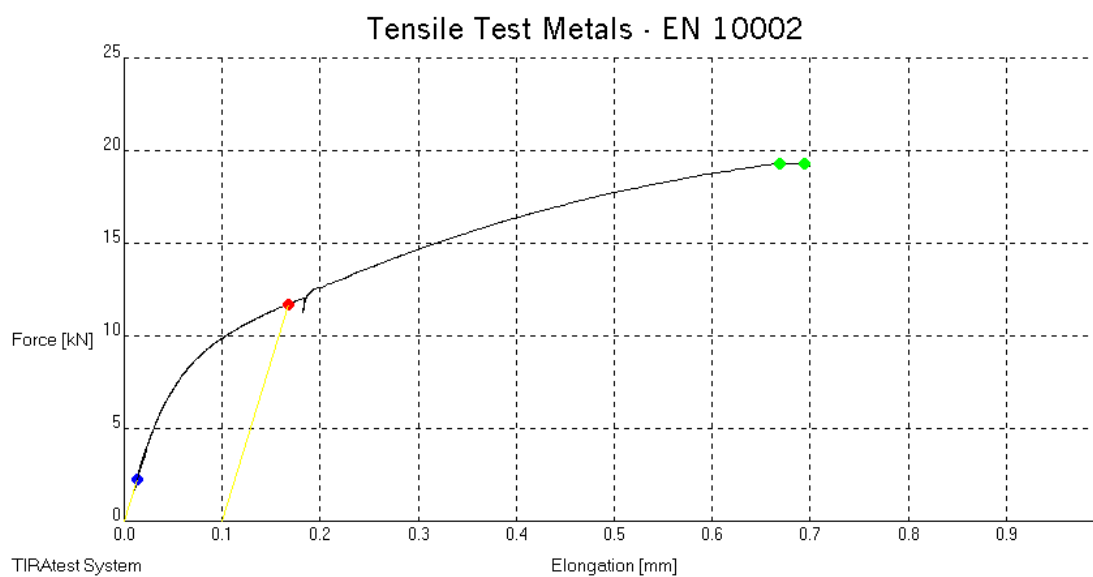
Slika 23. Statičko vlačno ispitivanje bazne epruvete



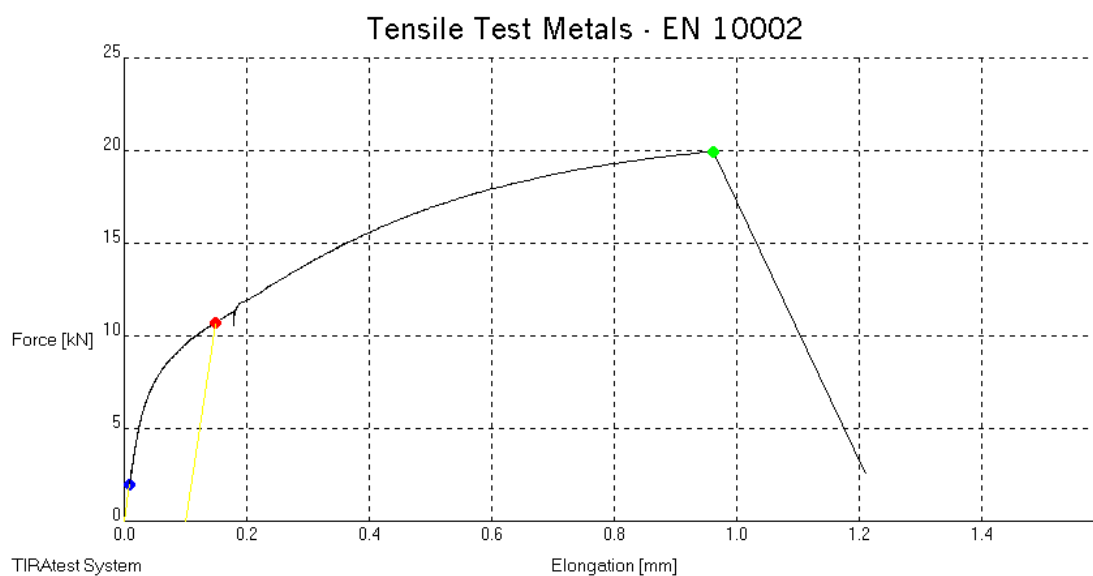
Slika 24. Statičko vlačno ispitivanje prve modificirane epruvete



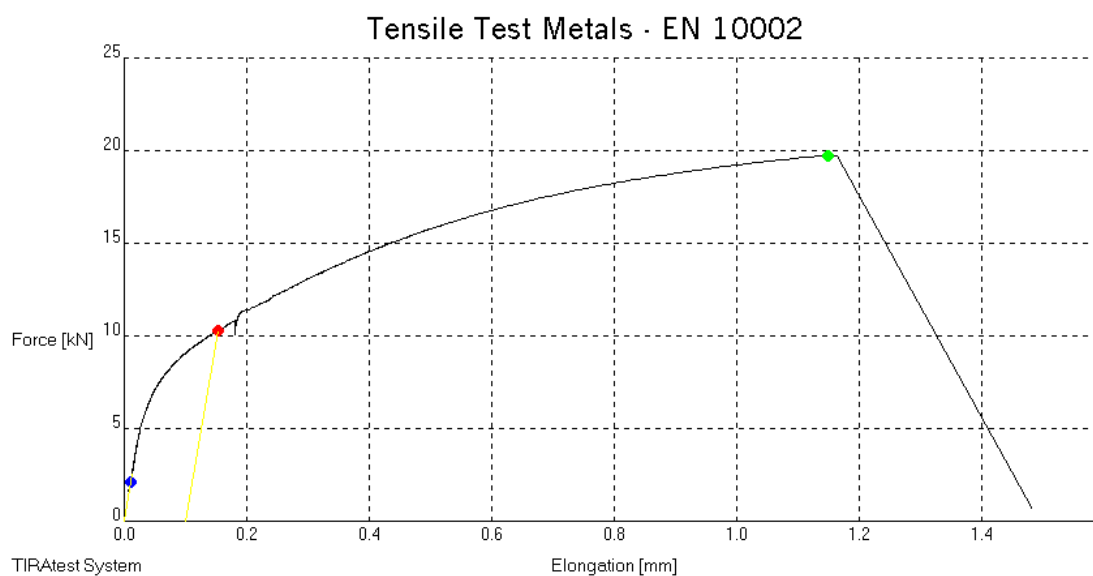
Slika 25. Statičko vlačno ispitivanje druge modificirane epruvete



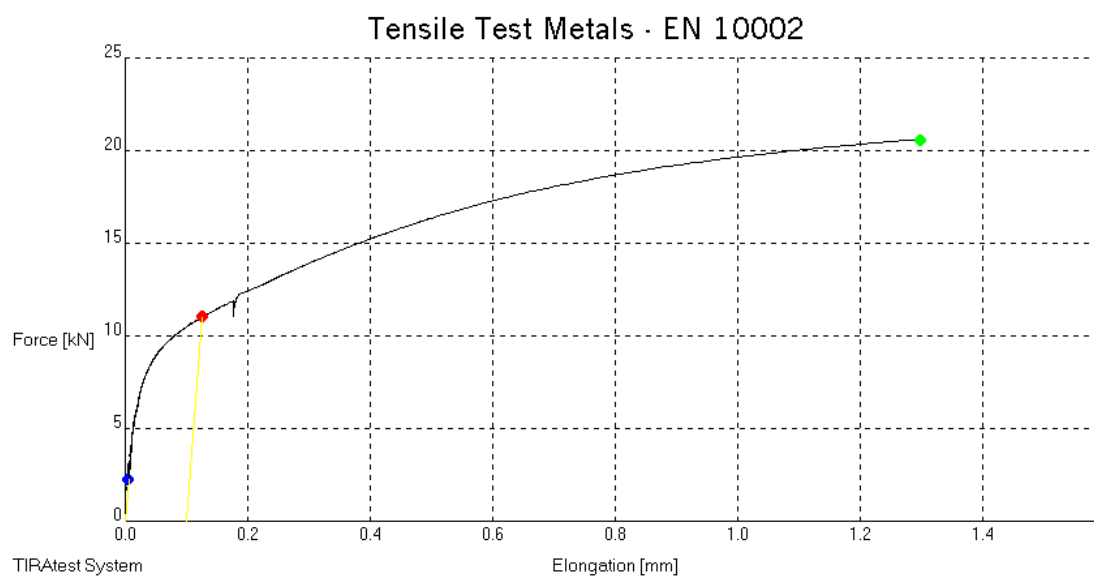
Slika 26. Statičko vlačno ispitivanje treće modificirane epruvete



Slika 28. Statičko vlačno ispitivanje četvrte modificirane epruvete



Slika 27. Statičko vlačno ispitivanje pete modificirane epruvete



Slika 29. Statičko vlačno ispitivanje šeste modificirane epruvete

Iz rezultata se vidi kako samo prva modificirana epruveta ima bolja mehanička svojstva, tj. veću vlačnu čvrstoću i veću istezljivost od bazne. To je u skladu sa rezultatima toplinske analize. Prva i druga modificirana epruveta su jedine koje nisu puknule van područja ispitivanja.



### 5.7. Priprema uzoraka za metalografsko ispitivanje

Od svakog odljevka iz Quik-Cup čašice za toplinsku analizu odrezan je mali dio koji je kasnije pripremljen kao uzorak za metalografsko ispitivanje. Pripremljeno je 7 uzoraka, a ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prvi korak pri pripremi uzoraka je bilo brušenje. Brušenje je rađeno na uređaju „Mintech 233“ prikazanom na slici 41.. Krenulo se od grubljeg brusnog papira te se išlo prema finijem pri okretajima od 300 o/min. Kao sredstvo hlađenja i podmazivanja koristila se voda.



Slika 30. Uređaj za brušenje „Mintech 233“

Nakon brušenja slijedilo je poliranje. Poliranje je izvedeno na uređaju „Struers DAP-V“ pri broju okretaja od 150 o/min te se za razliku kod brušenja koristio lubrikant kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje. U prvom koraku polirano je u vremenskom periodu od 2 min gdje je korištena dijamantna pasta za poliranje dok je u drugom koraku korištena tekućina „Silica“ za poliranje. Na slici 42. je prikazan uređaj za poliranje.



Slika 31. Uređaj za poliranje „Struers DAP-V“

Zadnji korak pri obradi uzoraka je nagrivanje uzoraka u Kellerovom reagensu u trajanju od 10 sekundi. Nakon toga uzorci su stavljeni u destiliranu vodu da se prekinu kemijske reakcije. Slika 43.a prikazuje prostor gdje je napravljeno nagrivanje dok slika 43.b prikazuje uzorke spremne za metalografsko ispitivanje.



a)



b)

Slika 32. Metalografsko ispitivanje, a) Prostor za nagrivanje, b) Uzorci spremni za metalografsko ispitivanje

### 5.8. Rezultati metalografskog ispitivanja

Nakon pripreme uzoraka za metalografsko ispitivanje, svi uzorci su pregledani svjetlosnim mikroskopom „Olympus GX 51“ koji ima mogućnost povećavanja do 1000x, prikazan na slici 44..

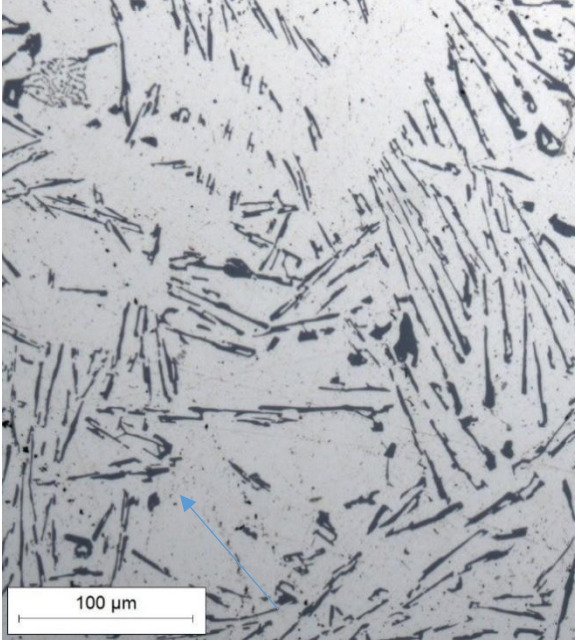
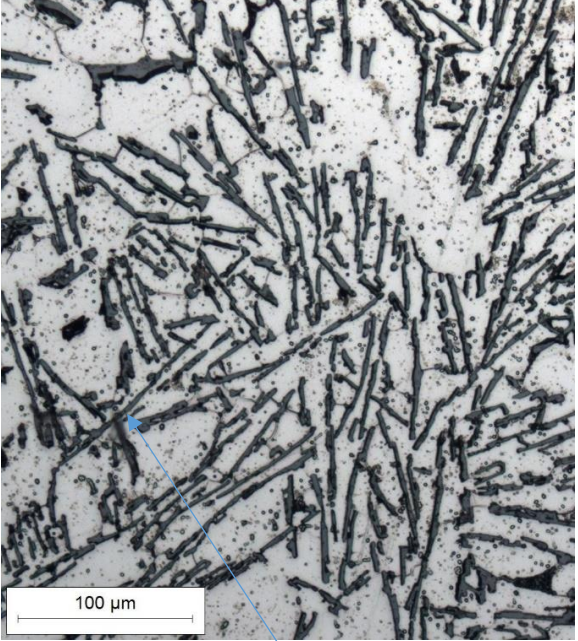
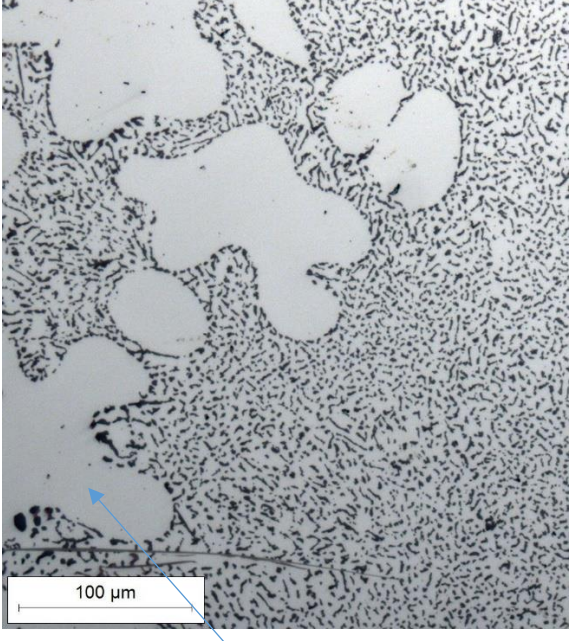
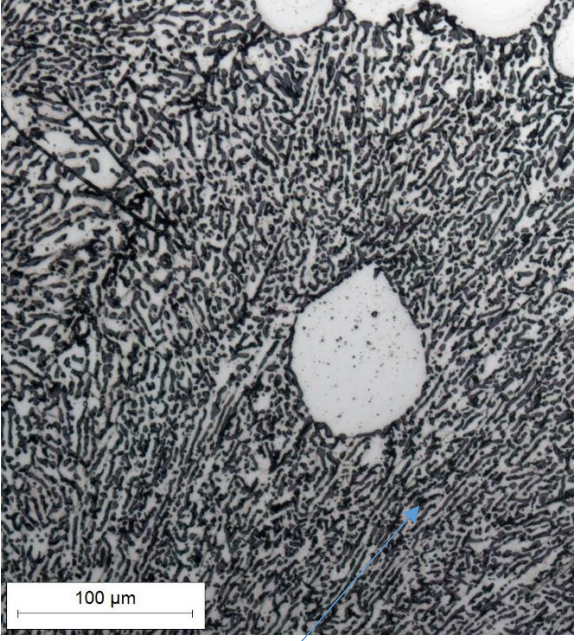


Slika 33. Mikroskop „Olympus GX 51“

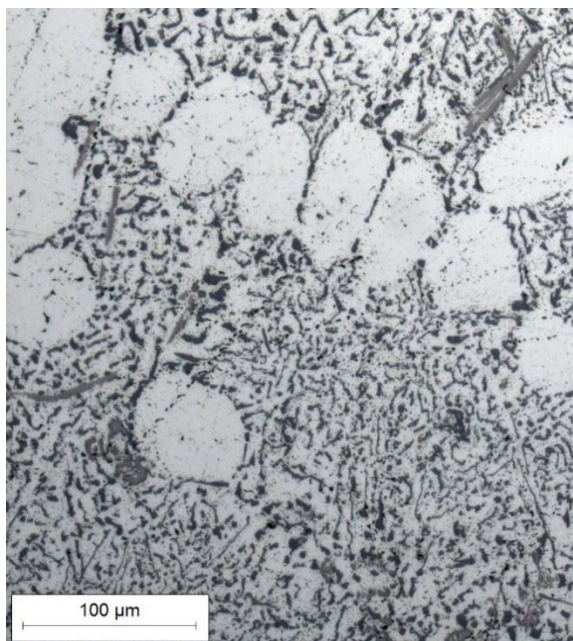
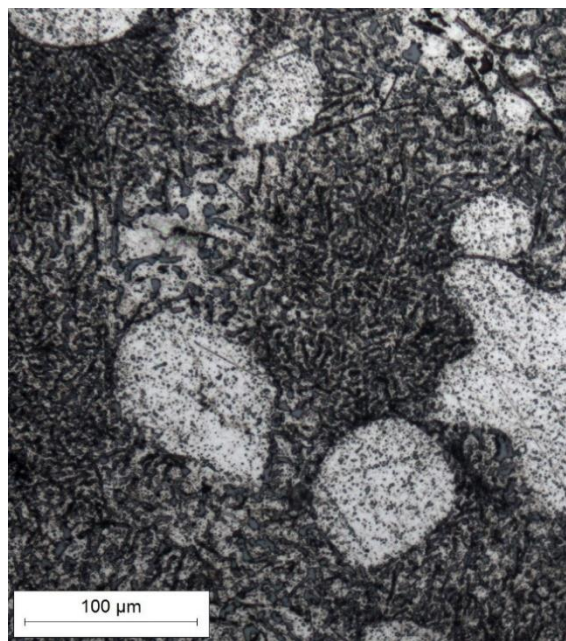
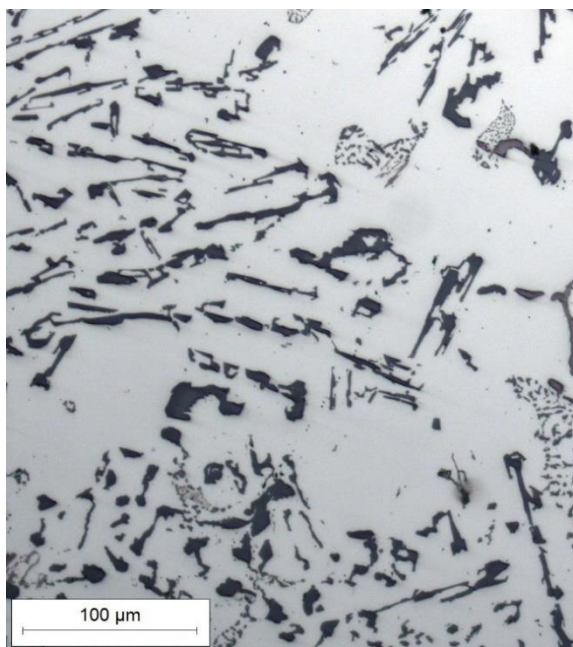
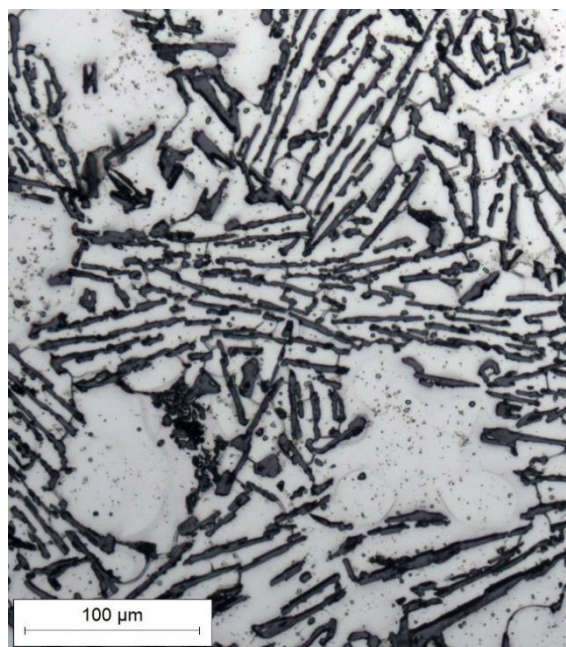


Mikrostrukture uzoraka bazne AlSi12 legure i modificiranih legura prikazane su u tablici 20..

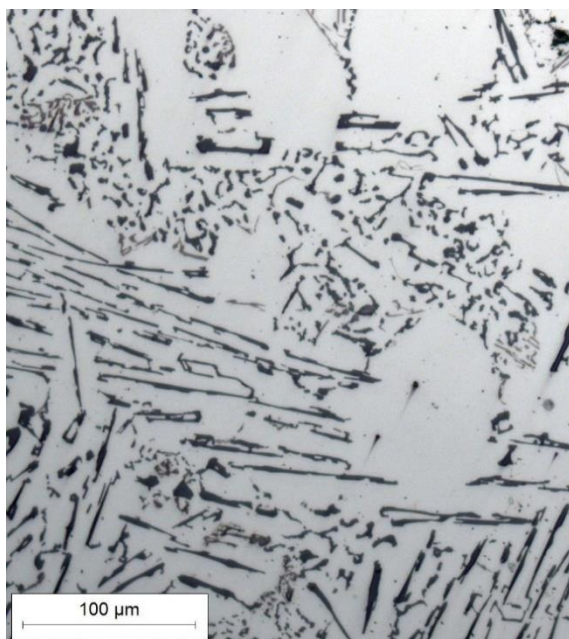
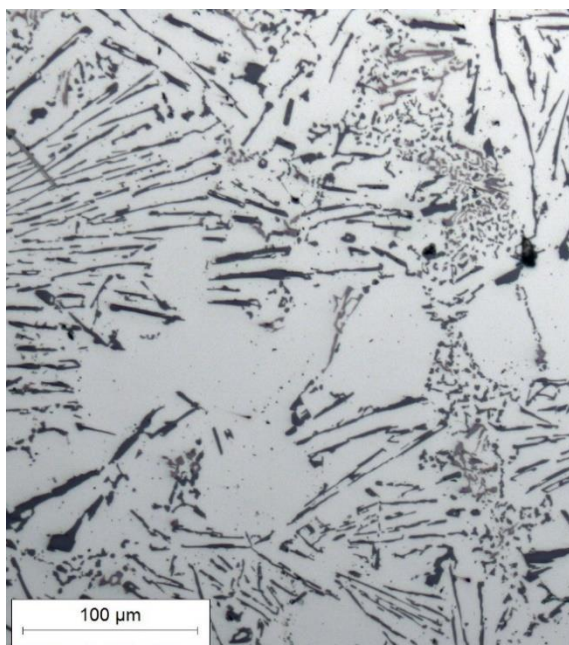
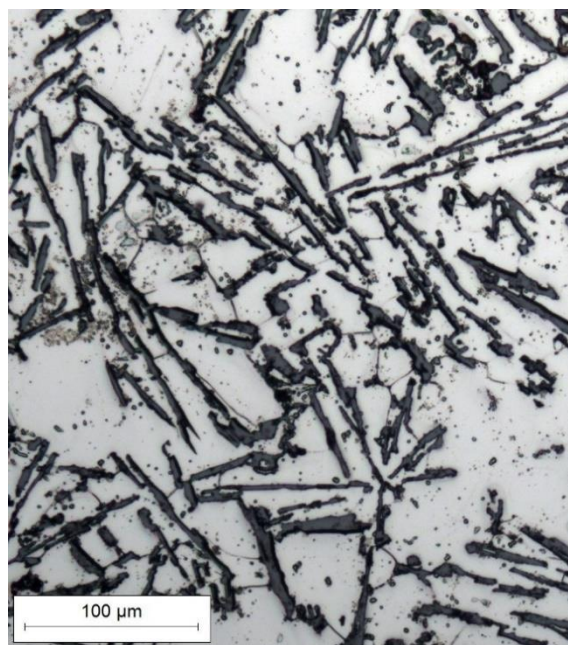
Tablica 20. Mikrostrukture uzoraka bazne AlSi12 legure i modificiranih legura

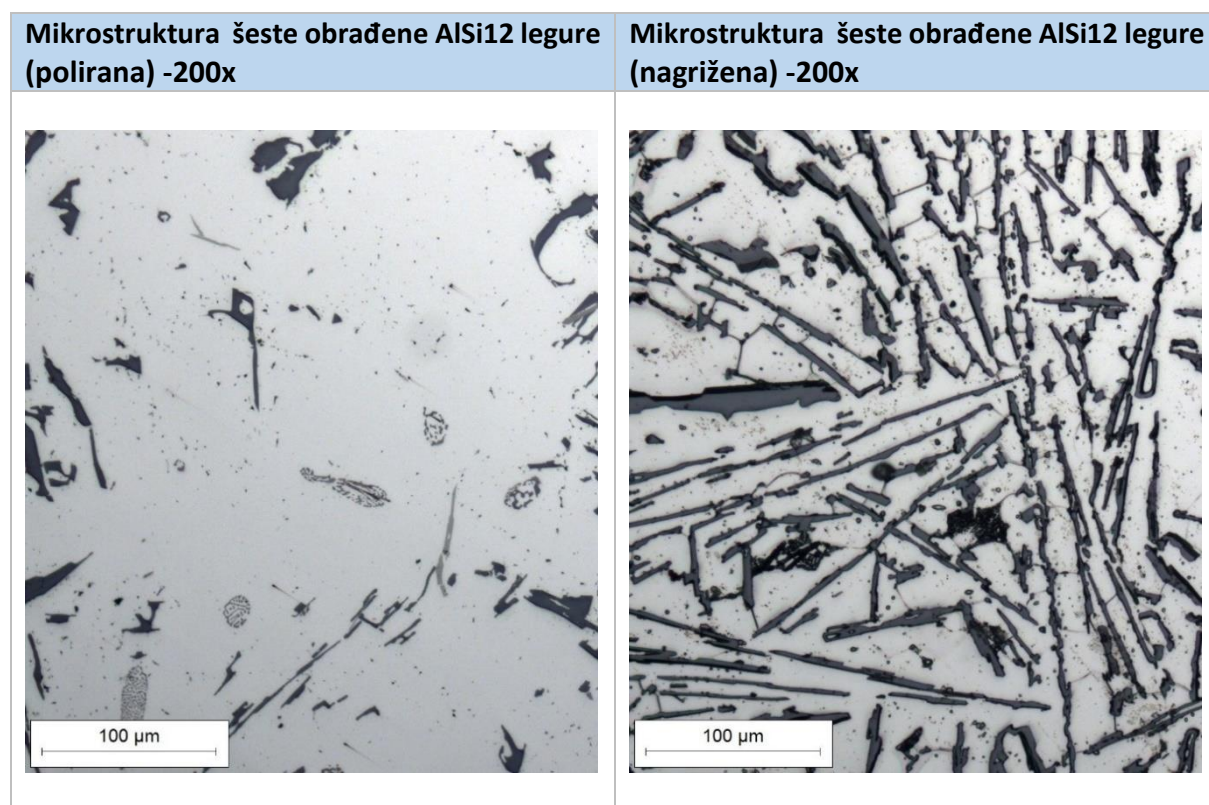
| Mikrostruktura uzoraka bazne AlSi12 legure (polirana) -200x                                                                                | Mikrostruktura uzoraka bazne AlSi12 legure (nagrižena) – 200x                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p data-bbox="357 1131 580 1167">Primarni aluminij</p>  |  <p data-bbox="1102 1131 1273 1167">Igličasti silicij</p> |
| Mikrostruktura prve obrađene AlSi12 legure (polirana) -200x                                                                                | Mikrostruktura prve obrađene AlSi12 legure (nagrižena) -200x                                                                                 |
|  <p data-bbox="336 1977 560 2013">Primarni aluminij</p> |  <p data-bbox="970 1977 1161 2013">Vlaknasti silicij</p> |



**Mikrostruktura druge obrađene AlSi12 legure (polirana) -200x****Mikrostruktura druge obrađene AlSi12 legure (nagrižena) -200x****Mikrostruktura treće obrađene AlSi12 legure (polirana) -200x****Mikrostruktura treće obrađene AlSi12 legure (nagrižena) -200x**



**Mikrostruktura četvrte obrađene AlSi12 legure (polirana) -200x****Mikrostruktura četvrte obrađene AlSi12 legure (nagrižena) -200x****Mikrostruktura pete obrađene AlSi12 legure (polirana) -200x****Mikrostruktura pete obrađene AlSi12 legure (nagrižena) -200x**



Na svim slikama se jasno primjećuje siva podloga koja predstavlja primarni aluminij, dok se eutektički silicij može vidjeti u obliku iglica (nemodificirani) i vlakana (modificirani). Važno je primjetiti da je u prvom uzorku modificirane AlSi12 legure mikrostruktura značajno drugačija tj. silicij je u uzorku bazne legure grub i igličasti, dok je u prvom modificiranom uzorku sitniji i vlaknast. S vremenom držanja taline u peći djelovanje natrija blijedi, što se može uočiti već kod drugog modificiranog uzorka lijevanog nakon 23 minute, gdje je silicij pogrubio u odnosu na prvi modificirani uzorak lijevan nakon 10 minuta. Na daljnjim uzorcima već nakon 32 minute vidimo ponovo grubi igličasti silicij u mikrostrukturi eutektika. Kako natrij izlazi iz taline prilikom držanja u peći, tako mikrostruktura postaje sve manje i manje modificirana..



---

## 6. ZAKLJUČAK

Uz željezne lijevove, aluminijske legure su među najkorištenijim legurama radi svojih dobrih tehnoloških i mehaničkih svojstava od kojih se najčešće upotrebljavana AlSi legura.

U eksperimentalnom dijelu diplomskog zadatka je ispitana modifikacija AlSi12 legure dodavanjem natrija, te slabljenje modifikacije s vremenom držanja taline u peći u intervalu 73 minute nakon obrade taline. Talina je obrađena s Nukleantom 100 SP i čistim natrijem. Uzorci taline iz peći uzimani su u razmacima približno deset minuta. Napravljena je toplinska analiza svake taline, zatim analiza kemijskog sastava, analiza mikrostrukture i statički vlačni pokus.

Toplinska analiza pokazala je 10 °C nižu eutektičku temperaturu kod modificirane legure. Analiza kemijskog sastava pokazala je povećani udio natrija nakon obrade taline i pad udjela natrija s vremenom držanja taline u peći. Mehanička svojstva najbolja su kod modificirane taline. Utjecaj natrija prestao je 23 minute nakon obrade taline na što ukazuje nestajanje vlaknastog silicija te ponovna pojava igličastog silicija u mikrostrukтури eutektika.

Rezultati provedenih analiza pokazali su najbolju modifikaciju 10 minuta nakon obrade taline. Već 23 minute nakon obrade, djelovanje natrija je oslabilo, što znači da je lijevanje potrebno provesti unutar 10 do 15 minuta nakon modifikacije.

## LITERATURA

- [1] Lewis, R. W., Ravindran, K.: *Finite element simulation of metal casting*, Institute for Numerical Methods in Engineering, University of Wales, 2000.
- [2] Rundman, K. B.: *Metal casting*, Dept. of Materials Science and Engineering Michigan Tech. University, 2013.
- [3] Bauer, B., Pokopce Mihalic, I.: *Osnove tehnologije lijevanja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [4] Dunđer, M., Kolumbić, Z.: *Strojarska tehnologija 1*, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet, Odsjek za politehniku, 2010.
- [5] Opalić, M.: *Tehnologično oblikovanje – lijevanje*, Arhitektonski fakultet, 2006.
- [6] Hurst, S.: *Metal casting*, Intermediate technology publications, 1996.
- [7] Degarmo, E. P., Black, J. T., Kohser, R. A.: *Materials and Processes in Manufacturing* (9th ed.), Wiley, 2003.
- [8] Davis, J. R.: *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM Specialty Handbook, ASM International®, Ohio 1993.
- [9] URL: <https://images-of-elements.com/aluminium.php>, (04.06.2021.)
- [10] Bäckcrud, L., Chai, G., Tamminen, J.: *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys, Volume 2, Foundry Alloys*, Department of Structural Chemistry, Arrhenius laboratory, University of Stockhlom, 1990.
- [11] Davis, J. R.: *Molten Aluminum Processing and Casting*, ASM Specialty Handbook, ASM International®, Ohio, 2002.
- [12] Kaufman, J. G., Rooy, E. L.: *Aluminium Alloy Casting Properties, Processes and Applications*, ASM International Materials Park, Ohio, 2005.
- [13] Lipinski, T.: *Mechanical properties of AlSi12 alloy with aluminium bronze*, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland, 2017.
- [14] Michna S., Lukac I., Ocenasek V., Koreny R., Drapala J., Schneider H., Miskufova A.: *Encyclopaedia of aluminium*, Adin s.r.o. Presov 2005.
- [15] Barnhisel, R., Bertsch, M. P.: *Aluminum*, University of Kentucky, Lexington, 1982.
- [16] Cook, R.: *Grain refinement of aluminum-silicon foundry alloys*, London & Scandinavian Metallurgical CO, Limited, 1998.

- [17] Birol, Y.: *Interaction of grain refinement with B and modification with Sr in aluminium foundry*, Article in Materials Science and Technology, 2012.
- [18] Greer, A. L., Cooper, P. S., Meredith, M. W., Schneider, W., Schumacher, P., Spittle, J. A., Tronche, A.: *Advanced Engineering Materials*, Wiley, 2003.
- [19] Cook, R.: *Modification of aluminum-silicon foundry alloys*, London & Scandinavian Metallurgical CO, Limited, 1998.
- [20] Faraji, M., Katgerman, L.: *Microstructural analysis of modification and grain refinement in a hypoeutectic Al–Si alloy*, Article in International Journal of Cast Metals Research, 2009.
- [21] Qiyang, L., Qingchun, L., Qifu, L.: *Modification of Al-Si Alloys with Sodium*, The 2nd Department of Mechanical Engineering, South China University of Technology, 1991.
- [22] Ho, C. R., Cantor, B.: *Modification of Hypoeutectic Al-Si alloys*, Oxford Centre for Advanced Materials and Composites, Department of Materials, University of Oxford 1995.
- [23] Heusler, L., Schneider, W.: *Influence of alloying elements on the thermal analysis results of Al–Si cast alloys*, VAW Aluminium AG, Research and Development Cast Shop Technology, Journal of Light Metals 2, 2002.
- [24] Ebhota, W. S., Jen, T. C.: *Effects of Modification Techniques on Mechanical Properties of Al-Si Cast Alloys*, IntechOpen, 2017.
- [25] Pavšič, A.: *Optimizacija dodatka udrobnjevalca nucleant 100 sp v zlitini AlSi10Mg*, Diplomski rad, Sveučilište u Ljubljani, Prirodoslovno-tehnički fakultet, Odjel za Materijale i Metalurgiju, 2020.
- [26] DIN 50125:2009-07: Testing of metallic materials – Tensile test pieces, 2009.