

Mikrostruktura i mehanička svojstva lijevane i 3D ispisane legure AlSi10Mg

Poljak, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:884439>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Poljak

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Ivan Poljak

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru Branku Baueru, na susretljivosti i nesebičnoj pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada. Također se zahvaljujem svim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje koji su mi pomogli na putu da postanem čovjek kakav jesam danas.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, ocu Damiru, majci Jasni, sestri Pauli, djedu Petru, baki Mariji i ujaku Ivanu na potpori i ljubavi koju su mi pružali tijekom studija.

Zahvaljujem se svojim prijateljima, Matiji B., Petri G., Zvonimiru E., Toniju Z., Tomislavu B., Moniki D., Mariju Z. i Petru J., koji su me podržavali tijekom ovog puta. Hvala Vam na svojoj pomoći, smijehu i ljubavi koju ste mi pružili.

Ivan Poljak



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 Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: | 602-14/22-6/1 |
| Ur. broj: | 15-1703-22- |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN POLJAK** Mat. br.: 0195034529

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mikrostruktura i mehanička svojstva lijevane i 3D ispisane legure AlSi10Mg**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Microstructure and mechanical properties of cast and 3D printed AlSi10Mg alloy**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju lijevanja aluminijevih legura u trajne kalupe i tehnologiju 3D ispisa metodom selektivnog laserskog taljenja.

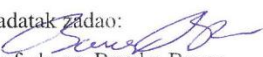
Definirati parametre kokilnog lijeva i 3D ispisa za izradu epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava i mikrostrukture. Analizirati i usporediti dobivene mikrostrukture i mehanička svojstva.

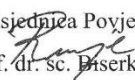
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Branko Bauer

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. LIJEVANJE..... | 3 |
| 2.1. Podjela lijevanja..... | 4 |
| 2.1.1. Lijevanje ingota..... | 4 |
| 2.1.2. Kontinuirani lijev..... | 4 |
| 2.1.3. Lijevanje u kalup..... | 4 |
| 2.2. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa..... | 5 |
| 2.3. Pješčani lijev..... | 8 |
| 2.4. Školjkasti lijev..... | 9 |
| 2.5. Lijevanje u pune kalupe..... | 11 |
| 2.6. Precizni/točni lijev..... | 12 |
| 2.7. Kokilni (gravitacijski) lijev..... | 13 |
| 2.8. Tlačni lijev..... | 14 |
| 3. ALUMINIJ..... | 15 |
| 3.1. Aluminijske legure..... | 18 |
| 3.1.1. Legirni elementi aluminijskih legura..... | 20 |
| 3.2. Gravitacijsko lijevanje aluminijskih legura..... | 22 |
| 3.3. Priprema taljevine AlSi legura..... | 23 |
| 3.4. Skrućivanje AlSi legura..... | 25 |
| 3.5. AlSi10Mg..... | 26 |
| 4. ADITIVNA PROIZVODNJA..... | 31 |
| 4.1. Podjela postupaka aditivne proizvodnje..... | 34 |
| 4.2. Fotopolimerizacija..... | 35 |
| 4.3. Powder Bed Fusion (Spajanje praškastog materijala u slojevima)..... | 37 |
| 5. SELEKTIVNO LASERKO TALJENJE ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA.... | 39 |
| 5.1. Elementarni aluminij..... | 42 |
| 5.2. AlSi10Mg..... | 43 |
| 6. EKSPERIMENTALNI DIO DIPLOMSKOG RADA..... | 51 |
| 6.1. Lijevani AlSi10Mg uzorci..... | 51 |
| 6.2. SLM AlSi10Mg uzorci..... | 53 |
| 6.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće epruveta..... | 55 |
| 6.4. Rezultati vlačnog ispitivanja epruveta..... | 57 |
| 6.5. Prijelomi epruveta..... | 62 |
| 6.6. Mikrostrukture epruveta..... | 64 |
| 6.6.1. Analiza mikrostrukture epruveta..... | 68 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 69 |
| LITERATURA..... | 71 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1 Prikaz svjetske proizvodnje aluminija od 1900.-te godine [1]..... | 1 |
| Slika 2 Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [4] | 6 |
| Slika 3 Prikaz pješanog lijeva [5] | 8 |
| Slika 4 Shematski prikaz lijevanja u pješčane kalupe u ljevaonici [5] | 8 |
| Slika 5 Školjkasti lijev [5]..... | 9 |
| Slika 6 Aluminijski avionski cilindar izrađen školjkasti lijevanjem [8] | 10 |
| Slika 7 Izrada kalupa za lijevanje u puni kalup [4] | 11 |
| Slika 8 Izrada kalupa za precizni lijev [4]..... | 12 |
| Slika 9 Pomični dio kalupa i odljevak [4] | 13 |
| Slika 10 Odljevci od aluminijskih legura rađeni tlačnim lijevanjem [4] | 14 |
| Slika 11 Aluminijska konzola [4]..... | 16 |
| Slika 12 Materijali korišteni za proizvodnju vanjskog dijela Boeinga 787 [15]..... | 17 |
| Slika 13 Aluminijski odljevci manjih masa [6]..... | 17 |
| Slika 14 Aluminijski legirni elementi [18] | 21 |
| Slika 15 Rotacijski uređaj za otplinjavanje [3] | 24 |
| Slika 16 Dijagram stanja i podjela AlSi legura s pripadajućim mikrostrukturama [3] | 25 |
| Slika 17 Pseudo-binarni dijagram AlSiMg [21]..... | 26 |
| Slika 18 Pseudo-binarni graf AlSi7Mg [21] | 27 |
| Slika 19 Mikrostruktura AlSi10Mg legure; optički mikroskop, na rubu epruvete (a) i na sredini epruvete(b); elektronski mikroskop, na rubu epruvete (c) i na sredini epruvete(d) [22] | 28 |
| Slika 20 Mikrostruktura legure AlSi10Mg nakon T6 toplinske obrade [22] | 29 |
| Slika 21 Usporedba tvrdoće dva načina lijevanja po presjecima epruvete [22]..... | 29 |
| Slika 22 Usporedba tvrdoće dva načina lijevanja po presjecima epruvete nakon T6 toplinske obrade [22] | 30 |
| Slika 23 Prvi 3D printani model [24] | 32 |
| Slika 24 Izmjenjivači topline izrađeni tehnologijama aditivne proizvodnje [25] | 33 |
| Slika 25 Podjela postupaka aditivne proizvodnje [26]..... | 34 |
| Slika 26. Izrada tvorevine fotopolimerizacijom [27]..... | 36 |
| Slika 27 Shema PBF postupka [27]..... | 38 |
| Slika 28 Izrada dijelova pomoću SLM tehnologije [29] | 40 |
| Slika 29 Prikaz CT skena pora na AlSi10Mg SLM izratku [28] | 44 |
| Slika 30 Usporedba pora ovisno o brzini skeniranja laserom (a) 250 mm/s, (b) 500 mm/s, (c) 750 mm/s i (d) 1000 mm/s [28]..... | 45 |
| Slika 31 Ovisnost razine poroznosti o brzini i snazi lasera [28] | 46 |
| Slika 32 Usporedba laserske staze ovisna o brzini skeniranja [28]..... | 47 |
| Slika 33 Spajanje ovisno o brzini skeniranja (a) 250 mm/s, (b) 500 mm/s and (c) 750 mm/s [28] | 47 |
| Slika 34 SEM prikaz AlSi10Mg SLM uzorka (a) jedna laserska staza (b) prijelazna i gruba zona (c) središte staze s finom mikrostrukturom; toplinski obrađeno (d) 723 K na 2 h (e) 773 K na 2 h (f) 823 K na 2 h (g) 723 K na 2 h + 453 K na 12 h (h) 773 K na 2 h + 453 K na 12 h (i) 823 K na 2 h + 453 K na 122 h [28] | 48 |
| Slika 35 Tlačno ispitivanje proizvedenog SLM uzorka i toplinski obrađenog SLM uzorka [28] | 49 |
| Slika 36 Peć korištena u eksperimentalnom dijelu rada za taljenja aluminijske legure | 51 |

| | |
|---|----|
| Slika 37 Taljenje aluminijeve legure u peći | 52 |
| Slika 38 Mjerenje temperature taline | 52 |
| Slika 39 Temperatura trajnog kalupa prije ulijevanja | 53 |
| Slika 40 Lijeване epruvete | 53 |
| Slika 41 Laserski 3D printer za metal EOS M 290 | 54 |
| Slika 42 Prašak AlSi10Mg | 54 |
| Slika 43 Epruvete izrađene aditivnom proizvodnjom | 55 |
| Slika 44 Epruveta u kidalici s ekstenziometrom | 56 |
| Slika 45 Dijagram sila - produljenje, uzorak 2, lijevano | 58 |
| Slika 46 Dijagram sila - produljenje, uzorak 1, SLM, homogenizacijsko žarenje | 58 |
| Slika 47 Dijagram sila - produljenje, uzorak 1, SLM bez toplinske obrade | 59 |
| Slika 48 Dijagram sila - produljenje, uzorak 2, SLM, T6 toplinska obrada | 59 |
| Slika 49 Dijagram sila - produljenje, uzorak 2, SLM, EOS T6 toplinska obrada | 60 |
| Slika 50 Grafički prikaz rezultata vlačne čvrstoće | 60 |
| Slika 51 Grafički prikaz rezultata granice razvlačenja | 61 |
| Slika 52 Grafički prikaz rezultata istezljivosti | 61 |
| Slika 53 Prijelom lijeване epruvete 2 | 62 |
| Slika 54 Prijelom SLM homogenizacijski žarene epruvete 1 | 62 |
| Slika 55 Prijelom SLM toplinski neobrađene epruvete 1 | 62 |
| Slika 56 Prijelom SLM T6 toplinski obrađene epruvete 2 | 63 |
| Slika 57 Prijelom SLM EOS T6 toplinski obrađene epruvete 2 | 63 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1 Usporedba postupaka lijevanja po upotrebi lijevačkih legura, masi odljevaka i veličine serije [4] | 6 |
| Tablica 2 Svojstva aluminija [12] | 15 |
| Tablica 3 Nomenklatura lijevanih aluminijevih legura [16] | 19 |
| Tablica 4 Nomenklatura gnječanih aluminijevih legura [16]..... | 19 |
| Tablica 5 Kemijski sastav AlSi10Mg [22] | 28 |
| Tablica 6 Postupci aditivne proizvodnje [26] | 34 |
| Tablica 7 Vlačna svojstva SLM AlSi10Mg uzoraka raznih studija [28] | 50 |
| Tablica 8 Rezultati vlačnog ispitivanja | 57 |
| Tablica 9 Mikrostruktura lijevanih epruveta | 64 |
| Tablica 10 Mikrostruktura SLM homogenizacijski žarenih epruveta..... | 65 |
| Tablica 11 Mikrostruktura SLM T6 toplinski obrađenih epruveta | 66 |
| Tablica 12 Mikrostruktura SLM toplinski neobrađenih epruveta | 67 |
| Tablica 13 Mikrostruktura EOS T6 toplinski obrađenih epruveta | 68 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-------------------|------------------------------------|
| d | mm | Promjer |
| $R_{p0,2}$ | N/mm ² | Konvencionalna granica razvlačenja |
| R_m | N/mm ² | Vlačna čvrstoća |
| F_m | N | Maksimalna sila |
| F_k | N | Lomna sila |
| A | % | Istezljivost |

SAŽETAK

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

U teorijskom dijelu diplomskog rada, navedene su vrste ljevačkih postupaka te karakteristike istih. Nadalje je obrađen aluminij te aluminijske legure, svojstva legura te je postavljen naglasak na gravitacijsko lijevanje aluminijskih legura u trajne kalupe. Pošto se proizvode sve kompleksniji strojni elementi, danas se postupci aditivne proizvodnje sve više koriste. U diplomskom radu obrađene su tehnologije aditivne proizvodnje. U diplomskom radu je obrađena proizvodnja AlSi10Mg dijelova uz pomoć tehnologije selektivnog laserskog taljenja, SLM.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje mikrostrukture i vlačnih svojstava lijevanih uzoraka i 3D ispisanih uzoraka SLM postupkom koji su obrađeni nekim od postupaka toplinske obrade.

Ključne riječi: AlSi10Mg, lijevanje, aditivna proizvodnja, SLM

SUMMARY

This thesis is divided into two parts, theoretical and experimental.

In the theoretical part of the master thesis, the types of casting processes and their characteristics are listed. Furthermore, aluminum and aluminum alloys properties of alloys were discussed. Emphasis was placed on the gravity casting of aluminum alloys in permanent molds. Since machine parts with more and more complex geometries are produced, additive manufacturing processes are used more and more today. The thesis deals with the production of AlSi10Mg parts with the help of selective laser melting (SLM) technology.

In the experimental part of the thesis, testing of the microstructure and tensile properties of cast samples and SLM-printed and heat treated samples was carried out.

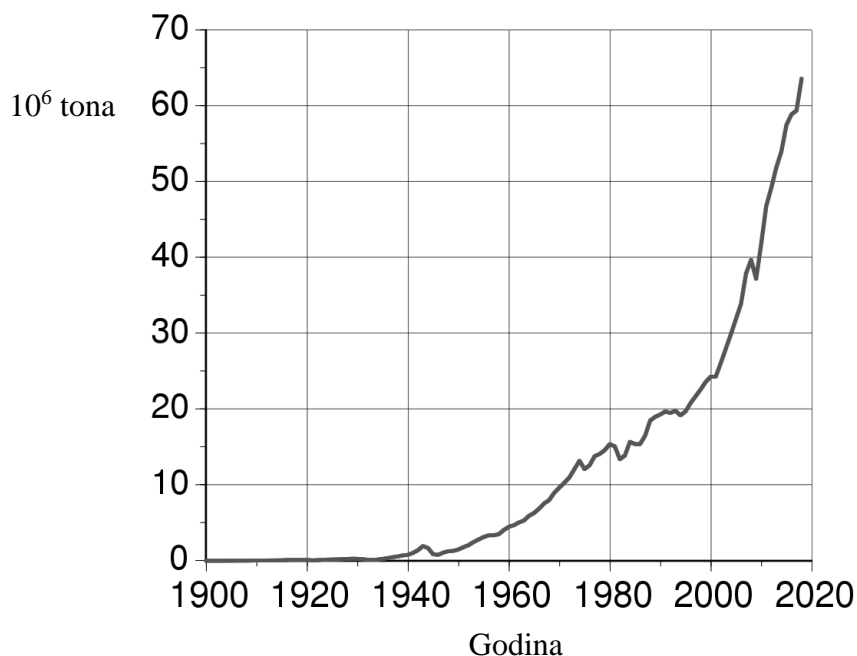
Key words: AlSi10Mg, casting, additive manufacturing, SLM

1. UVOD

Aluminij je jedan od najvažnijih materijala za čovječanstvo. Prvu pojavu aluminija, može se uvidjeti još u 5. stoljeću prije Krista, ali u obliku alauna. Alauni su izomorfni dvostruki sulfati čija je opća formula $M^I M^{III} (SO_4)_2 \times 12 H_2O$. Alauni su se takvi koristili da bi se boja bolje prijanjala na površinu. Pokušaji proizvodnje aluminija sežu još u polovicu 18. stoljeća. Znanstvenik kojemu se pripisuje otkrivanje i opisivanje aluminija je njemački kemičar Friedrich Wöhler. No, metoda kojom se otkrilo postojanje aluminija nije davala veliku količinu aluminija te je aluminij i dalje bio jako rijedak, a premašivala cijenu zlata [1, 2, 3].

Prva veća (industrijska) proizvodna metoda aluminija razvijena je 1886. godine te se naziva Hall-Heroult metoda proizvodnje aluminija, no takva metoda nije proizvodila aluminij zadovoljavajućih svojstava, te se 1889. u proizvodnju aluminija uvodi i Bayerov proces. Danas se moderna proizvodnja aluminijevih legura zasniva na Bayerovom i Hall-Heroultovim procesima [1, 3].

Tijekom 20. stoljeća proizvodnja aluminija je doživjela trend eksponencijalnog rasta, 1900. godine svjetska razina proizvodnje aluminija iznosila je 6800 tona, dok je 2013. iznosila 50 milijuna tona. Prikaz porasta proizvodnje aluminija nalazi se na slici 1 [1, 3].



Slika 1 Prikaz svjetske proizvodnje aluminija od 1900.-te godine [1]

Danas se proizvodnja proizvoda od aluminijevih legura se može odvijati tradicionalnim ljevačkim postupcima kao što su lijevanje u trajne ili jednokratne kalupe, no osim toga tradicionalnog pristupa proizvodnje proizvoda od aluminijevih legura postoji i pristup koji izrađuje metalne proizvode pomoću tehnologija koje su van tradicionalnih metoda klasičnog ljevarstva [1, 3].

2. LIJEVANJE

Tehnologija oblikovanja u kojoj se rastaljeni metal ulijeva u kalup, gdje skrućivanjem u kalupu poprima dimenzije i oblik kalupne šupljine naziva se lijevanje. Time se dobiva proizvod koji se naziva odljevak koji može biti od bilo kojeg metalnog materijala. Lijevanje je tehnologija kojom se čovječanstvo koristi otkada su otkriveni prvi metali, najstariji pronađeni odljevak je od bakra koji je odliven 3200 godina prije nove ere u Mezopotamiji [3, 4].

U trećem tisućljeću prije nove ere započinje lijevanje u bronci, kada je otkriveno da dodavanjem kositra bakru, tijekom procesa lijevanja se dobiva legura veće tvrdoće i snizi se temperatura taljenja [3, 4].

Najstariji odljevak od željezne legure izrađen je u 5. stoljeću prije nove ere u Kini, dok se u Europi željezo tek počelo lijevati oko 1400.-te godine. Prvo su se lijevali cijevi pušaka, metci, spomenici, zvona, cijevi za vodu [3, 4].

U 18. stoljeću dolazi do znatnog napretka u procesu lijevanja, kao što su oprema koja je potrebna za lijevanje i novi talionički agregati. Time započinje i proizvodnja čeličnih odljevaka, čime se mijenja budućnost čovječanstva [3, 4].

Najveći napredak u ljevarstvu u 20. stoljeću postignut je za vrijeme Prvoga i Drugoga svjetskog rata. U tome periodu dolazi do mehanizacije ljevaonica, a nakon tog perioda i automatizacije i robotizacije ljevaonica [3, 4].

Danas, osim fizičkih alata koriste se i simulacijske metode u ljevarskoj industriji. Kako bi se povećala kvaliteta odljevaka i produktivnost ljevaonice, numeričke simulacije lociraju problem i mjesto nastanaka grešaka. Time se uštedi i na otpadu koji nastaje pri proizvodnji [3, 4].

Značajke lijevanja su [3]:

- Široka raznolikost postupaka lijevanja
- Mogućnost izrade odljevaka različitih masa
- Ekonomski prihvatljivo za pojedinačnu i serijsku proizvodnju
- Velika razina produktivnosti
- Mogućnost izrade odljevaka različitih dimenzija

- Lijevanje svih metala

2.1. Podjela lijevanja

Lijevanje je postupak praoblikovanja, odnosno proces kojima se različitim postupcima dobiva kruto tijelo. Nakon toga je potrebno najčešće još neke operacije izvoditi kako bi se dobio gotov proizvod [3, 4].

Lijevanje se dijeli na [4]:

- Lijevanje ingota
- Kontinuirani lijev
- Lijevanje u kalup

2.1.1. Lijevanje ingota

Kao prvi korak u bilo kojoj proizvodnji metalnih proizvoda potrebno je napraviti praproizvod. Ingoti su poluproizvodi koji su namijenjeni za daljnju obradu. Lijevanje ingota je diskontinuirani proces u kojem se stalni metalni kalupi popunjavaju rastaljenim metalom. Nakon završetka ulijevanja, slijedi skrućivanje odvođenjem topline [3, 4].

2.1.2. Kontinuirani lijev

Najveći minus kod lijevanja ingota je taj što je poluproizvod ograničen dimenzijom kalupa i velike količine materijala koje se koriste kao kompenzaciju prilikom smanjenja volumena tijekom hlađenja. Rastaljeni materijal ulazi u bakrenu kokilu koja je hlađena vodom, te nastaje kontinuirana traka ili gredica. Ovo je jedan od najčešćih načina proizvodnje čelika, prednosti u odnosu na lijevanje ingota su [3, 4]:

- Nema gubitka materijala na pojilima
- Povećana produktivnost
- Bolja prilagodba oblika za preoblikovanje

2.1.3. Lijevanje u kalup

Prilikom postupka lijevanja u kalup, rastaljeni materijal se ulijeva u kalupnu šupljinu određenog geometrijskog oblika. Materijal kalupa može biti metalni ili nemetalni. Razlika između ta dva kalupa je što se nakon ulijevanja rastaljenog metala i njegovog skrućivanja, nemetalni kalupi se razruše i odljevak izvadi, a kod metalnog kalupa se kalup otvori [3, 4].

2.2. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa

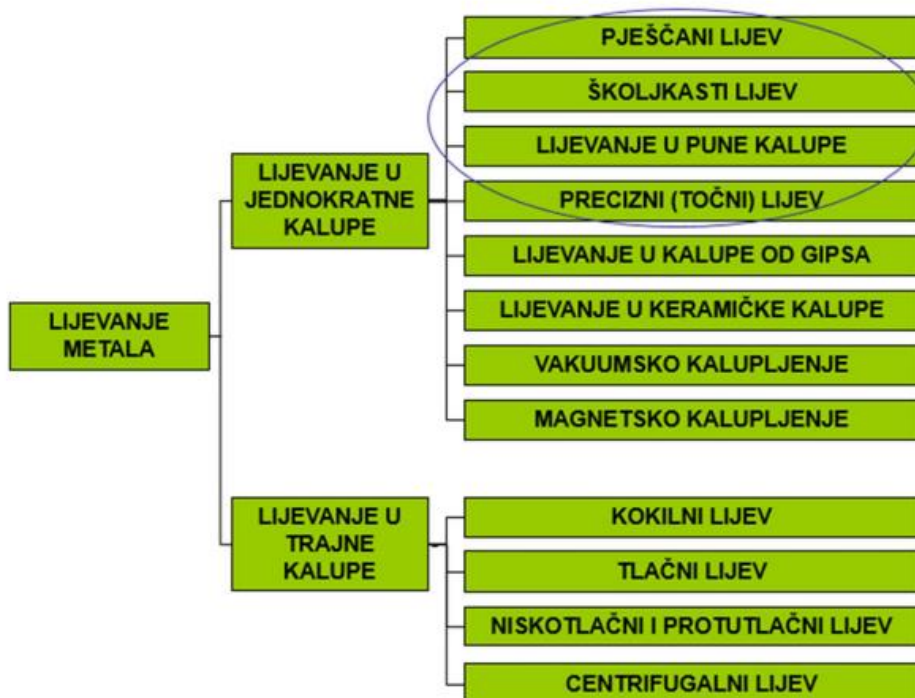
Ovisno o vrsti kalupa postupak lijevanja dijeli se na [4, 5]:

- Lijevanje u jednokratne kalupe
- Lijevanje u trajne kalupe

Kalupi za jednokratno lijevanje, kako im i ime nalaže se koriste jednom te se nakon skrućivanja materijala ruše. Ovim postupkom se mogu lijevati svi metali neovisno o obliku i dimenziji. Ovakav postupak lijevanja je vrlo ekonomičan jer se 95% mase kalupne mješavine može ponovno upotrijebiti. Sastojci kalupne mješavine su osnovni materijal s vezivima i dodacima. Osnovni materijal je pijesak. Najveći minus ovakvog lijevanja je upravo taj što se kalup nanovo mora izrađivati te ovaj način lijevanja nije pogodan za lijevanje velikih serija. No, ovaj tip lijevačkog postupka je i dalje najzastupljeniji [4, 5].

Kalupi za trajno lijevanje ili kokile se izrađuju od materijala koji dobro podnose toplinu, najčešće od sivog lijeva ili alatnih čelika za topli rad. Najveći problem ovakvih kalupa je cijena njihove izrade, potrebno je vrlo precizna obrade kalupne šupljine. Upravo zbog visokog ulaganja u izradu kokila, lijevanje u trajne kalupe se provodi isključivo za velikoserijske ili masovne proizvodnje. Još jedna negativna strana kokila je ta što je potrebno prilikom samog konstruiranja kokile predvidjeti vađenje odljevka iz kokile, što kod pješčanih kalupa nije problem, jer se jednostavno nakon skrućivanja uništi. Vrijeme izrade jednog odljevka je kraće nego kod lijevanja u jednokratne kalupe jer je sam proces vrlo lako automatiziran, a i hlađenje odljevka je brže, što ne samo da ubrzava izradu, već i poboljšava tvrdoću odljevka [4, 5].

Na slici 2 je prikazana podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [4].



Slika 2 Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [4]

U tablici 1 prikazana je usporedba različitih postupaka lijevanja [4].

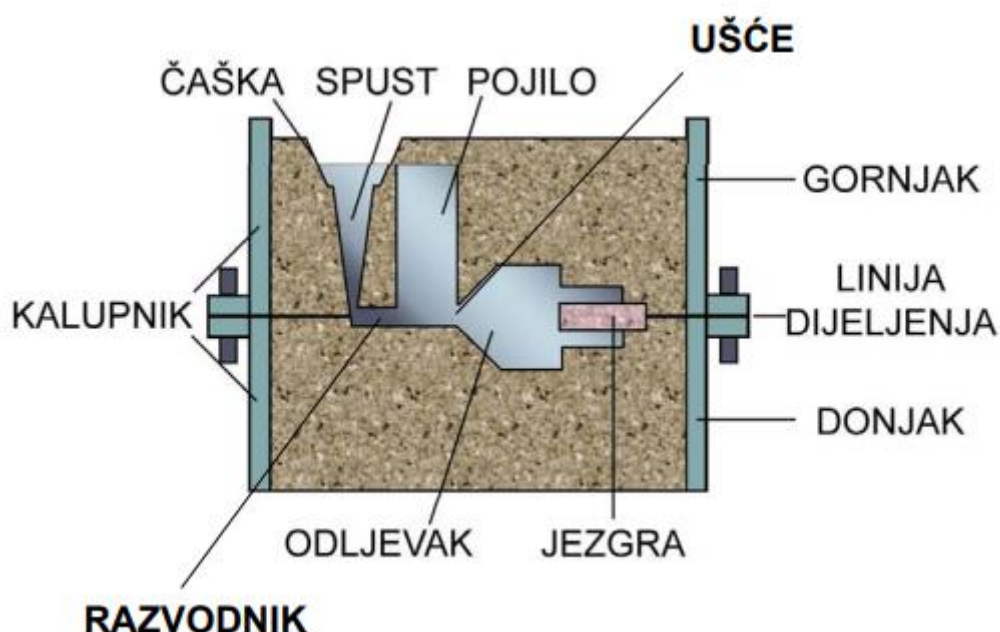
Tablica 1 Usporedba postupaka lijevanja po upotrebi ljevačkih legura, masi odljevaka i veličine serije [4]

| Postupak lijevanja | Ljevačka legura | Masa odljevka | Veličina serije |
|---|---|---|--|
| Pješčani lijev Ručno kalupljenje | sve ljevačke legure (uglavnom sivi lijev, nodularni lijev, čelik, bronca) | sve do preko 100 t (ograničeno jedino kapacitetima taljenja i transporta) | pojedinačni dijelovi, male serije |
| Pješčani lijev Strojno kalupljenje | sve ljevačke legure (uglavnom sivi lijev, nodularni lijev, Al legure) | od 1 kg do nekoliko tona | male i velike serije |
| Školjkasti lijev | sve ljevačke legure (uglavnom sivi lijev, nodularni lijev) | 1 – 150 kg | srednje i velike serije |
| Lijevanje u pune kalupe | sivi lijev, nodularni lijev, čelik, Al legure | < 1 kg do nekoliko tona | pojedinačni dijelovi, male i velike serije |

| | | | |
|--|---|--|--|
| Precizni (točni) lijev | sve lijevačke legure | od 1 g do 100 kg | pojedinačni dijelovi, male i velike serije |
| Gravitacijski kokilni lijev | Al, Mg, Cu, Zn legure | < 1 kg do 100 kg | srednje i velike serije |
| Niskotlačni i protutlačni lijev | Al, Mg, Cu legure | < 1 kg do 70 kg | srednje i velike serije |
| Tlačni lijev | Al, Mg, Cu, Zn, Sn legure i legure za tlačni lijev na bazi Pb | od nekoliko grama do srednje i velike serije | 60 kg, ovisno o leguri |

2.3. Pješčani lijev

Lijevanje u pijesak je danas postupak lijevanja koji je najrašireniji u svijetu. Dimenzije odljevaka su jedino limitirane dimenzijama kalupa. Kalup se sastoji od dva dijela, gornjaka i donjaka. Pri početku lijevanja potrebno je oblikovati kalupnu šupljinu, a to se radi na način da se oko modela sabija vlažna kalupna mješavina. Zatim se oblikuje uljevni sustav, uljevni sustav je sustav kanala kroz koji rastaljeni metal teče u kalupnu šupljinu. Potrebno je još i oblikovati pojilo, pojilo je spremnik rastaljenog metala koji nadoknađuje stezanje materijala tijekom skrućivanja. Prikaz pješčanog lijeva nalazi se na slici 3, a na slici 4 se nalazi shematski prikaz proizvodnog procesa lijevanja u pješčane kalupe u ljevaonici [4, 5, 6].



Slika 3 Prikaz pješčanog lijeva [5]

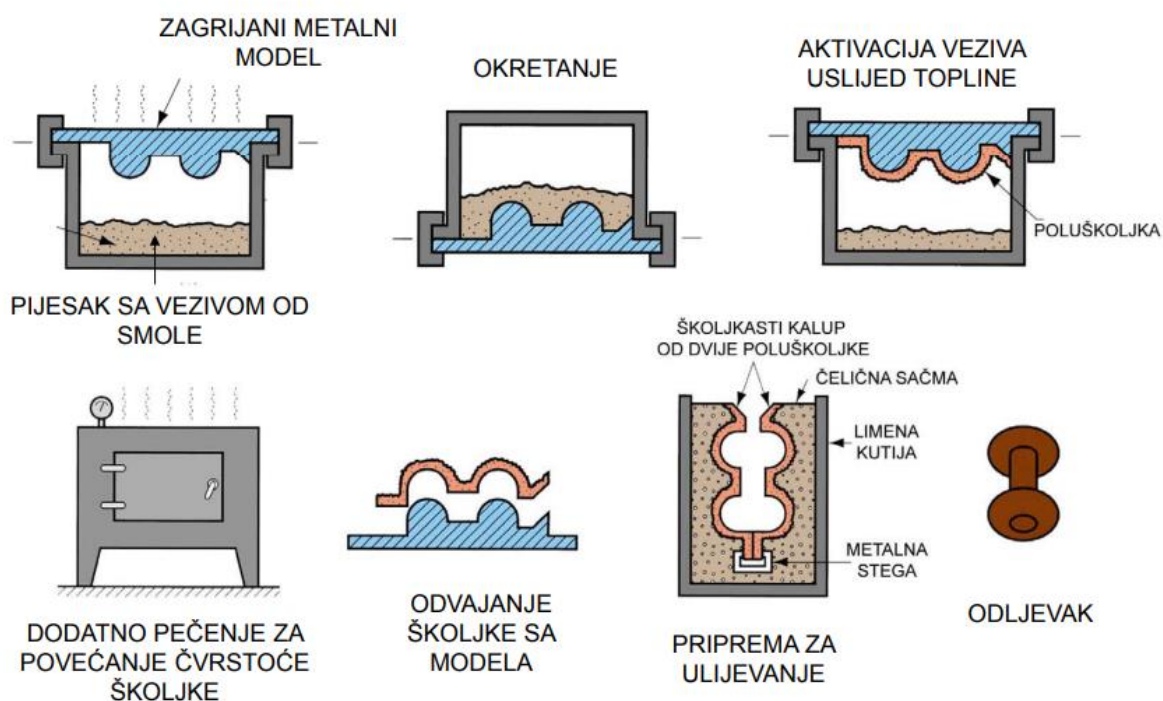


Slika 4 Shematski prikaz lijevanja u pješčane kalupe u ljevaonici [5]

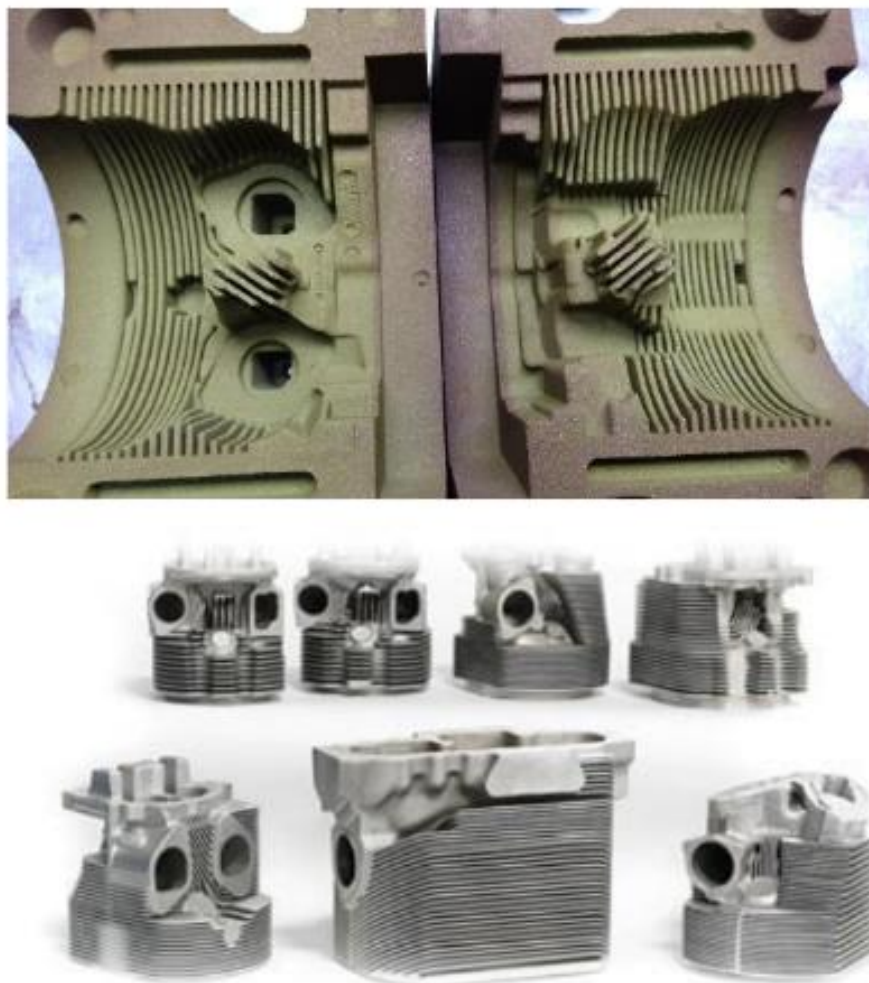
2.4. Školjkasti lijev

Školjkastim lijevom se proizvodi široki asortiman odljevaka. Školjastim lijevom se izrađuju kalupi ili školjke vrlo male debljine (par milimetara). Kalupna mješavina sastoji se od kvarcnog ili cirkonskog pijeska, umjetne smole (formalnedehidne, alkidne ili poliesterske) i maziva. Nabrojane smole se na povišenoj temperaturi očvršćuju. Proces izrade školjkastog lijeva prikazan je na slici 5, a sastoji se od sljedećih koraka [4, 5, 7, 8]:

- Pričvršćivanjem metalnog modela na limenu kutiju koja je punjena kalupnom mješavinom i zagrijavanje istog modela na temperaturu 200 do 230 °C.
- Okretanjem kutije s modelom za 180 °C pri čemu se smola aktivira te se pijesak slijepi uz metalni lijev model te nastaje školjka.
- Slijedi zagrijavanja (pečenje) modela zajedno s školjkom, radi povećanja čvrstoće
- Odvajanjem školjki od modela, spajaju se dvije školjke pomoću metalne stege u kalupniku, zatim se između spojenih školjki i kalupnika postavlja čelična sačma radi učvršćivanja školjki te se ulijeva rastaljeni metal.
- Nakon skrućivanja se kalup razbije te se dobiva odljevak, primjer takvog se nalazi na slici 6



Slika 5 Školjkasti lijev [5]

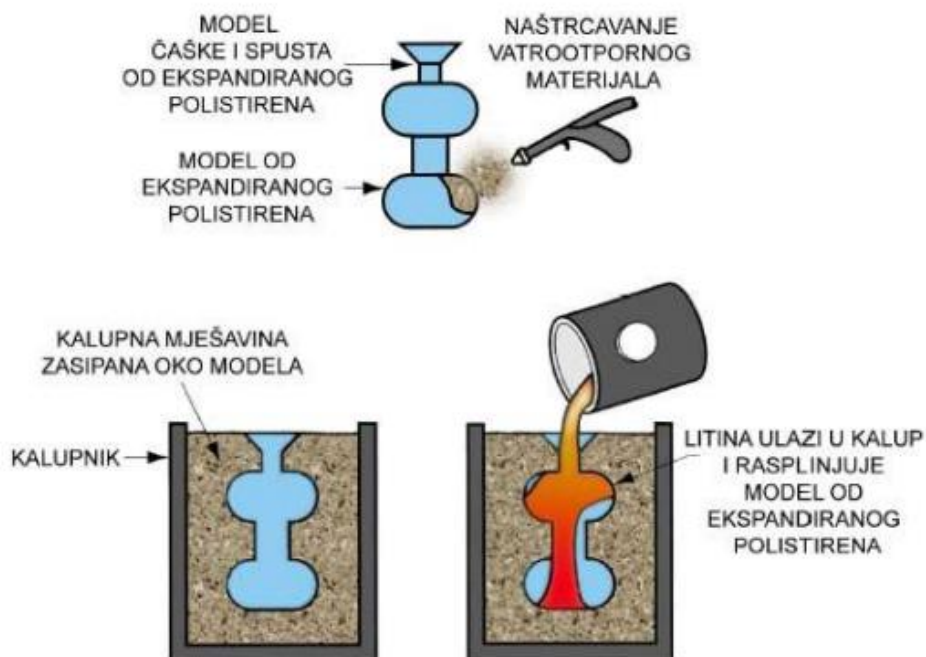


Slika 6 Alumijski avionski cilindar izrađen školjkastim lijevanjem [8]

2.5. Lijevanje u pune kalupe

Kod lijevanja u pune kalupe, model se izrađuje od polistirena koji se postavlja u vlažni pijesak te se model pod utjecajem topline rastaljenog materijala pretvori u plin. Ovakav postupak povoljnije utječe na okoliš jer pijesak ne sadrži veziva. Danas se umjesto vlažnog pijeska koristi suhi kvarcni pijesak bez veziva. Većinom se ovaj oblik lijevanja koristi u automobilske industriji za izradu blokova motora. Pri izradi odljevaka za lijevanje u pune kalupe potrebno je odraditi ove korake, slika 7 [4, 9]:

- Izraditi model i uljevni sustav od polistirena
- Nanesti vatrootporni premaz na model
- Postaviti model u kalupnik te ispuniti ga kvarcnim pijeskom
- Uliti rastaljeni materijal u model
- Nakon skrućivanja materijala, odrezuje se uljevni sustav i čisti se odljevak

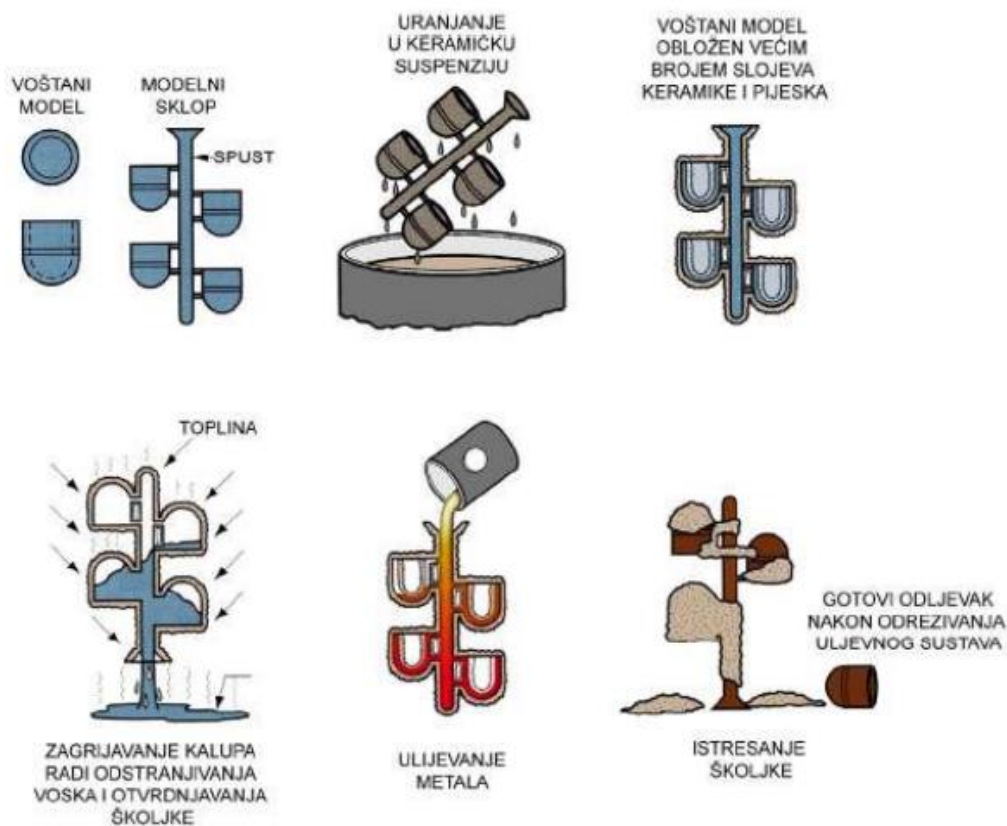


Slika 7 Izrada kalupa za lijevanje u puni kalup [4]

2.6. Precizni/točni lijev

Precizni lijev jedan je od starijih proizvodnih procesa lijevanja, glavna primjena ovakvog postupka lijevanja je što se mogu dobiti vrlo složeni odljevci bez naknadne obrade, danas se uglavnom ovaj tip lijevanja koristi u alatnoj, vojnoj i elektrotehničkoj industriji alata. Odljevci se dobivaju lijevanjem u jednokratne kalupe koji su izrađeni od voštanih modela. No, umjesto voska može se koristiti i PMMA. Nakon izrade modela potrebno je isti obložiti vatrootalnim materijalom kako bi se dobila školjka kalupa. Način na koji se izrađuje kalup za precizni lijev, slika 8 [4]:

- Potrebno je izraditi modele i spojiti ih u grozd
- Model se uranja u keramičku vatrootpornu suspenziju, posipa se pijeskom i suši. Taj se proces ponavlja 5-10 puta
- Kalup se zagrijava kako bi se vosak modela uklonio
- Slijedi ulijevanja rastaljenog materijala i njegovo skrućivanje
- Čišćenje odljevka i odvajanje odljevka s grozda



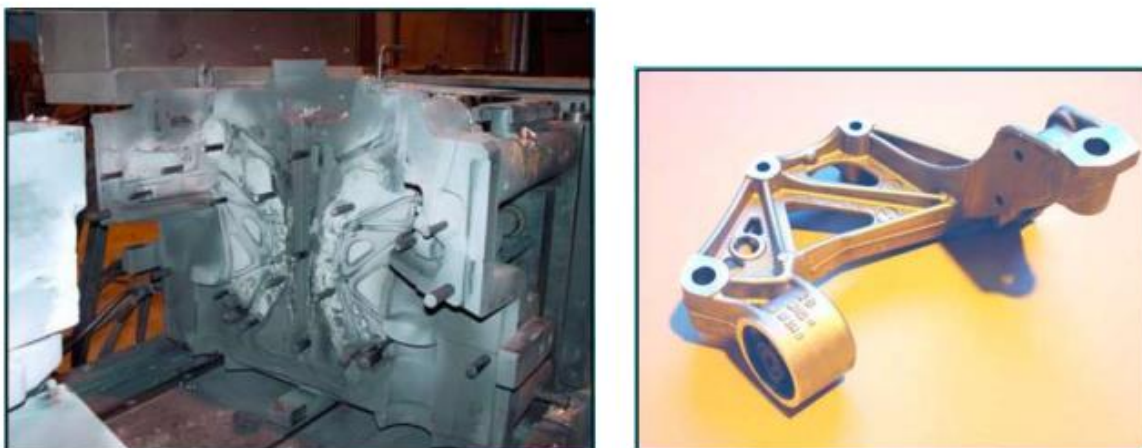
Slika 8 Izrada kalupa za precizni lijev [4]

2.7. Kokilni (gravitacijski) lijev

Kokilni lijev je jedan od postupaka lijevanja u kojem se rastaljeni materijal ulijeva u trajni metalni kalup. Cilj ovakvih kalupa je da se ostvare što točnije dimenzije. U ovakav tip kalupa se najčešće lijevaju neželjezni materijali kao što su aluminij, cink, magnezij i bakar u većim serijama. Proizvodi koji se lijevaju su najčešće dijelovi za automobilsku industriju (klipovi, blokovi motora, zupčanci), kućišta elektromotora i dijelovi za zrakoplovnu industriju. Ovakvo lijevanje može biti ručno ili automatizirano, gdje se kod ručnog lijevaju odljevci manjih dimenzija i jednostavnije geometrije [4, 10].

Prvenstveno kokilni lijev se koristi za kompleksnije odljevke tako da je upotreba automatiziranih strojeva česta. No, zbog visoke cijene izrade kalupa ovakav tip lijevanja se koristi za veće serije kako bi se opravdala cijena izrade kalupa [4, 10].

Kalupi kokilnog lijeva su napravljeni od dva dijela, pokretnog (slika 9) i nepokretnog. Potrebno je još na stroj dodati i izbacivače koji izbacuju odljevak iz kalupa. Za oblikovanje unutrašnjosti odljevaka koriste se metalne ili pješčane jezgre [4, 10].



Slika 9 Pomični dio kalupa i odljevak [4]

2.8. Tlačni lijev

Kod tlačnog lijeva, za razliku od kokilnog lijeva kod kojeg se materijal ulijeva pod utjecajem gravitacije, se materijal uvodi u kalup pod visokim tlakom. Ovakav tip lijevanja se najčešće koristi pri lijevanju aluminijskih, magnezijevih, cinkovih i bakrenih legura. Ovakav tip lijevanja se najviše primjenjuje u većim serijama. Proces lijevanja je najčešće automatiziran upravo zbog je pogodan za velikoserijsku proizvodnju te se ga se upotrebljava najviše u automobilske industriji. Mogu se ljevati odljevci različitih dimenzija i oblika uz dobra svojstva i dimenzijsku točnost. Odljevci koji se ljevaju su blokovi motora, zupčanici, nosači karoserije, kućišta elektromotora, slika 10 [4, 10].



Slika 10 Odljevci od aluminijskih legura rađeni tlačnim lijevanjem [4]

3. ALUMINIJ

8,1% zemljine kore se sastoji upravo od aluminijske i najčešće se nalazi u mineralima kao što su boksit ili kriolit. 2016. godine svjetska proizvodnja aluminijske dosegla je 58,6 milijuna tona godišnje, što je drugi metal po masi godišnje proizvodnje, odmah iza željeza. Aluminij se ekstrahira s Hall- Héroultovim procesom, aluminijski oksid se otapa u rastaljenom kriolitu i onda se elektrolitički reducira u čisti aluminij. Sam aluminij se gotovo u svim slučajevima koristi kao legura, jer sam aluminij nema dobra svojstva [1, 10, 11].

Aluminij bez legiranih elemenata je mekan i veoma duktilan, gustoća aluminijske je oko jednu trećinu one od čelika, što ga čini jednim od lakših inženjerskih materijala. Sam aluminij nema dobra vlačna svojstva, te se najčešće koristi kao aluminijska legura. Jedna od zanimljivosti je da se aluminij može bolje primjenjivati u hladnim sredinama od čelika, razlog tome je što smanjenjem temperature čelik postaje krhak dok aluminij zadržava svoja svojstva [1, 10, 11].

Izlaganjem aluminijske zraku na površini se razvija aluminijski oksid koji štiti materijal od korozije. Sama površina je vrlo reflektivna. Kada se govori o toplinskoj provodljivosti, aluminij ima 3 puta veću toplinsku provodljivost od čelika. Uz bakar, aluminij je jedan od najpoznatijih električnih vodiča, aluminij doseže 61 % električne vodljivosti bakra [10, 11, 12, 13]. U tablica 2 prikazana su svojstva aluminijske.

Tablica 2 Svojstva aluminijske [12]

| Svojstvo | Vrijednost |
|--|------------|
| Atomski broj | 13 |
| Atomska masa, g/mol | 26,98 |
| Valentnost | 3 |
| Kristalna rešetka | FCC |
| Temperatura taljenja, °C | 660,2 |
| Temperatura vrenja, °C | 2480 |
| Koeficijent toplinskog istezanja, 0-100°C, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | 23,5 |
| Gustoća, g/cm ³ | 2,6898 |
| Modul elastičnosti, GPa | 68,3 |
| Poissonov faktor | 0,34 |

Upotreba aluminijske može se primijetiti u različitim industrijama, ali i kućanstvu. Oko 80% mase zrakoplova Boeing 747 jumbo jet čini aluminij. Razlog tome su njegova izvrsna

otpornost prema koroziji, čime aviokompanije mogu uštediti na tretiranju površine. Trenutno ima veliki broj komercijalnih putničkih zrakoplova i lakih letjelica, čiju konstrukciju čini aluminij, iako dosta proizvođača mijenja aluminij u korist kompozita. Trenutno su glavni proizvođači zrakoplova Kina i SAD [14].

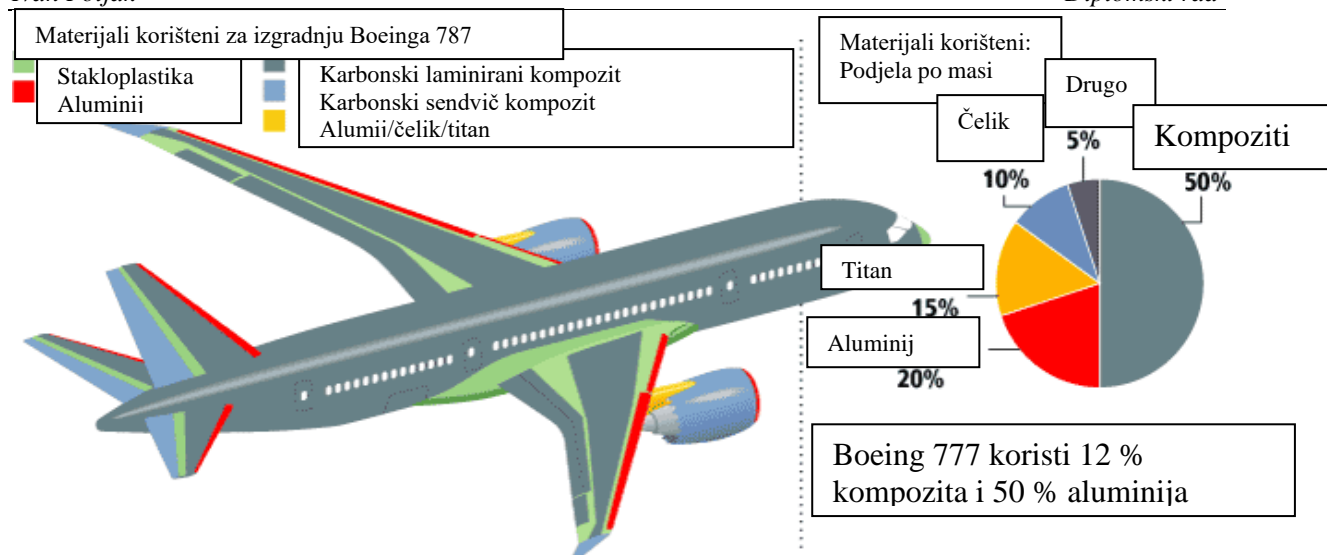
Osim u zrakoplovnoj industriji, velika količina aluminija koristi se i u automobilskoj industriji. O tome govori podatak da se upotreba aluminija između 1991. i 2005. učestvostručila. Zbog porasta cijena energenata i ekoloških zahtjeva aluminij je postao atraktivniji izbor od čelika. Drugi razlog upotrebe aluminija u automobilskoj industriji je zbog vrlo niske gustoće, čime masa automobila se smanjuje [14].

Oko 100 milijardi aluminijskih limenki se godišnje upotrijebi u Sjevernoj Americi. Upotreba aluminija u pakiranju proizvoda dosegla je vrhunac 1999. godine, ali od tada primarni materijal za pakiranje su polimeri [14].

Primjeri proizvoda koji sadrže aluminij prikazani su na slikama 11,12 i 13.



Slika 11 Aluminijska konzola [4]



Slika 12 Materijali korišteni za proizvodnju vanjskog dijela Boeinga 787 [15]



Slika 13 Aluminijski odljevci manjih masa [6]

3.1. Aluminijske legure

Aluminijske legure se mogu podijeliti na način dobivanja proizvoda u dvije kategorije [4, 10, 11, 16]:

- Proizvodi dobiveni lijevanjem
- Proizvodi dobiveni mehaničkim oblikovanjem

Razlika je u tome što proizvodi dobiveni lijevanjem, lijevaju u kalupe, a proizvodi dobiveni mehaničkim oblikovanjem se dobivaju na sljedeći način [4, 10, 11, 16]:

- Izrađuje se aluminijski ingot obogaćen nekim od legirajućih elemenata
- Ingot se nakon toga mehanički obrađuje

Neki od postupaka oblikovanja ingota su valjanje, kovanje, ekstrudiranje. Nakon mehaničkog oblikovanja, ponekad slijedi toplinska obrada kako bi se poboljšala svojstva [4, 10, 11, 16].

Nomenklatura prema ISO standardu je sljedećeg formata, kao prefiks za aluminijsku leguru koristi se "Al " nakon čega slijedi potpuni kemijski sastav legure. Ovaj sustav se najčešće koristi u akademске i znanstvene svrhe, dok se u praksi koriste alternativa. Prema ANSI standardu aluminijske legure se označavaju s 4 uzastopna broja. Ovisno o tome je li lijevana ili gnječena. Ukoliko je aluminijska legura lijevana nakon trećeg broja nalazi se točka (npr. 2XX.X), dok se kod gnječenih aluminijskih legura zapis piše bez točke (npr. 2XXX) [4, 10, 11, 16].

Najvažniji legirni elementi aluminijskih legura su: mangan, bakar, silicij, cink i magnezij. U tablici 3 i 4 prikazane su familije aluminijskih legura prema ANSI normi [16].

Tablica 3 Nomenklatura lijevanih aluminijevih legura [16]

| Ime | Sastav (%) | Vlačna čvrstoća, MPa | Granica razvlačenja 0,2 MPa |
|-------|----------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 1XX.X | 99,00% do 99,99% aluminija | 131 – 448 | 28 – 152 |
| 2XX.X | 4% do 4,6% bakra | 131 – 276 | 90 – 345 |
| 3XX.X | 5% do 17% silicija | 117 – 172 | 66 – 172 |
| 4XX.X | 5% do 12% silicija | 117 – 172 | 41 – 48 |
| 5XX.X | 5% do 12% magnezija | 131 – 448 | 62 – 152 |
| 6XX.X | Ne koristi se | | |
| 7XX.X | 6,2% do 7,5% cinka | 207 – 379 | 117 – 310 |

Tablica 4 Nomenklatura gnječanih aluminijevih legura [16]

| Ime | Sastav (%) | Vlačna čvrstoća, MPa | Granica razvlačenja 0,2, MPa |
|-------------|---|----------------------|------------------------------|
| 1XXX serija | 99,00% do 99,99% aluminija | 82 – 166 | 28 – 152 |
| 2XXX serija | 2,2% do 6,8% bakra | 186 – 467 | 76 – 345 |
| 3XXX serija | 0,3% do 1,5% mangana | 110 – 283 | 41 – 248 |
| 4XXX serija | 3,6% do 13,5% silicija 0,1% do 4,7% bakra 0,05% do 1,3% magnezija | 172 – 414 | 45 - 180 |
| 5XXX serija | 0,5% do 5,5% magnezija | 124 – 352 | 41 - 345 |
| 6XXX serija | 0,2% do 1,8% silicija 0,35% do 1,5% magnezija | 124 – 310.3 | 55.2 – 276 |
| 7XXX serija | 0,8% do 8,2% cinka 0,1% do 3,4% magnezija 0,05% do 2,6% bakra | 228 – 572 | 103 - 503 |

3.1.1. Legirni elementi aluminijevih legura

Antimon je prisutan u tragovima u komercijalnim aluminijevim legurama. Antimon ima vrlo malu topivost u čvrstom stanju u aluminiju ($<0,01\%$). Dodaje se aluminij-magnezijevim legurama jer se stvaranjem zaštitnog filma antimonov oksiklorid, povećava otpornost na koroziju u slanoj vodi [17, 18].

Berilij se koristi u aluminijevim legurama koje sadrže magnezij kako bi se smanjila oksidacija na povišenim temperaturama. Do $0,1\%$ Be se koristi u aluminizaciji kupke za čelik za poboljšanje prijanjanja aluminijevog filma i ograničavanje formiranja štetnih željezno-aluminijevih spojeva. Mehanizam zaštita se pripisuje difuziji berilija na površinu i stvaranju zaštitnog sloja. Berilij ne utječe na otpornost aluminija na koroziju [17, 18].

Aluminijevsko-bakrene legure koje sadrže 2 do 10% Cu formiraju važne familije legura. Lijevene i oblikovane deformiranjem aluminijevsko-bakrene mogu se toplinski obrađivati i time se dobiva veća čvrstoća i tvrdoća. Povećanje je maksimalno između 4 i 6% Cu, ovisno o utjecaju drugih prisutnih elemenata [17, 18].

Magnezij je jedan od najvažnijih legirnih elemenata, najveća topivost magnezija u aluminijevim legurama je $17,4\%$, no u praksi ne prelazi preko $5,5\%$. Magnezij se u aluminijevim legurama izlučuje na granicama zrna, čime se smanjuje otpornost na interkristalnu koroziju i napetnosnu koroziju, no povećava se čvrstoća [17, 18].

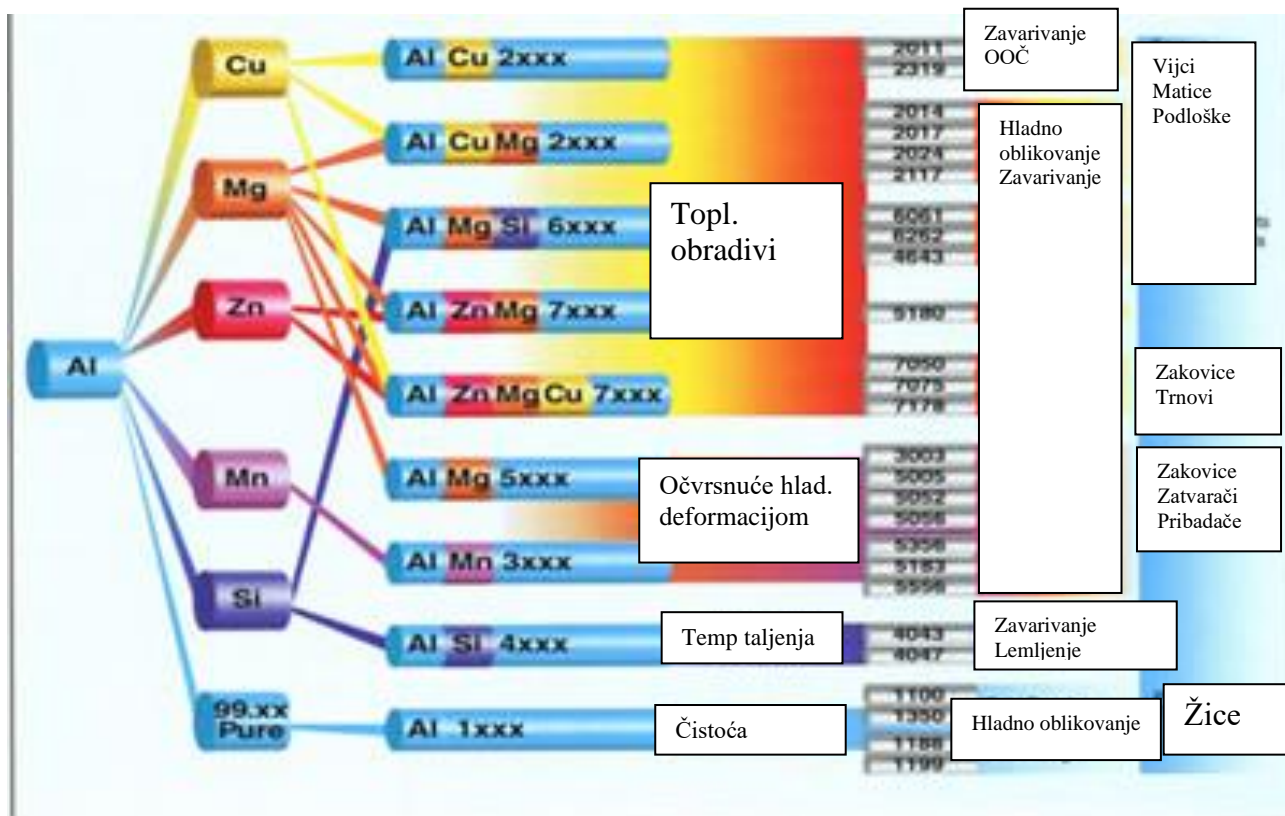
Dodavanje mangana aluminiju donekle povećava čvrstoću i poboljšava hladno očvršćavanje, a da pritom ne smanjuje duktilnost ili otpornost na koroziju. Te serije legura su umjerene čvrstoće te se ne mogu toplinski obrađivati, a zadržavaju čvrstoću na povišenim temperaturama i rijetko se koriste za velike konstrukcijske primjene. Najčešće primjene legura serije 3XXX su posuđe za kuhanje, radijatori, kondenzatori klimatizacijskih uređaja, isparivači, izmjenjivači topline i povezani sustavi cjevovoda [17, 18].

Dodavanjem cinka aluminiju (zajedno s nekim drugim elementima, prvenstveno magnezijem i/ili bakrom) dobivaju se toplinski obradive aluminijevske legure najveće čvrstoće. Cink značajno povećava čvrstoću i omogućuje precipitacijsko očvršćavanje. Neke od ovih legura mogu biti osjetljive na napetnosnu koroziju i zbog toga se obično ne zavaruju taljenjem. Druge legure unutar ove serije često se zavaruju taljenjem s izvrsnim rezultatima. Neke od uobičajenih primjena legura serije 7XXX su zrakoplovstvo, oklopna vozila i okviri bicikala [17, 18].

Dodavanje silicija aluminiju smanjuje temperaturu taljenja i poboljšava tečajivost. Sam silicij u aluminiju proizvodi leguru koja se ne može toplinski obrađivati, međutim, u kombinaciji s magnezijem proizvodi leguru koja se može toplinski obraditi. Posljedično, unutar serije 4XXX postoje i legure koje se mogu toplinski obrađivati i one koje se ne mogu toplinski obrađivati. Dodaci silicija aluminiju obično se koriste za proizvodnju odljevaka. Najčešće primjene legura serije 4XXX su punjene žice za zavarivanje taljenjem i tvrdo lemljenje aluminija [17, 18].

Krom se dodaje aluminiju za kontrolu veličine zrna, kako bi se spriječio rast zrna u aluminij-magnezijevim legurama i kako bi se spriječila rekristalizacija u aluminij-magnezij-siliciju ili aluminij-magnezij-cink legurama tijekom toplinske obrade. Krom će također smanjiti osjetljivost na napetosnu koroziju i poboljšati žilavost [17, 18].

Na slici 14 prikazani su elementi koji su najčešće u sastavu aluminijevih legura



Slika 14 Aluminijevi legirni elementi [18]

3.2. Gravitacijsko lijevanje aluminijevih legura

Gravitacijsko lijevanja aluminijevih legura naširoko se koristi radi mogućnosti dobivanja složenih aluminijskih geometrija i velikih serija. Ovom metodom rastaljena aluminijeva legura se pri djelovanju gravitacijske sile ulijeva u kokile [4, 10, 18].

Negativne strane ovakvog postupka lijevanja su [4, 10, 18]:

- Zarobljeni zračni mjehurići
- Moguća nedolivenost kod tankih stijenki odljevka
- Škart

Najčešće greška je poroznost aluminijevih legura, također dinamička čvrstoća aluminijevih legura jako ovisi o greškama postupaka lijevanja i mikrostrukturi odljevka [4, 10, 18].

Gravitacijskim lijevanjem aluminija, kalupi su izloženi trošenju i koroziji zbog izlaganja površine kalupa rastaljenom metalu, također su izloženi toplinskim naprezanjima i oksidaciji zbog visoke temperature ulijevanja rastaljenog aluminija. Sve to utječe na pojavu grešaka na odljercima. Zbog dugog hlađenja aluminijevih legura u kokilama, odljevci su porozni. Zbog toga je bolje da se prilikom lijevanja aluminijevih legura koristi nisko tlačno lijevanje.

Ovisno o legirnim elementima aluminijevih legura primijećena su sljedeća svojstva odljevaka dobivena gravitacijskim lijevanjem [4, 10, 18]:

- Aluminijeve legure legirane bakrom imaju najveću čvrstoću uz zadovoljavajuću duktilnost
- Aluminijeve legure legirane magnezijem imaju tendenciju da smanjuju livljivost legure jer su odljevci porozniji
- Prisutnost mangana u Al-Si legurama poboljšava mehanička svojstva na povišenim temperaturama, otpornost na dinamička naprezanja i smanjuje stezanje legure tijekom hlađenja.
- Nikal u Al-Si legurama podiže čvrstoću legure i duktilnost, dok prisutnost cinka poboljšava obradljivost legure
- Tragovi kroma u Al-Si legurama poboljšavaju čvrstoću legure na sobnim temperaturama i povišenim temperaturama, ali smanjuju im duktilnost
- Livljivost ovisi o temperaturi ulijevanja i točnom kemijskom sastavu Al-Si-Mg legura

3.3. Priprema taljevine AlSi legura

Aluminijske legure tale se u plinskim i električnim pećima. Uložni materijal uglavnom se sastoji od ingota odgovarajućega kemijskog sastava. Nakon taljenja na određenoj temperaturi slijedi kontrola kemijskog sastava te izlijevanje taljevine u transportne lonce kojima se taljevina otprema dalje na naknadnu obradu [3, 19].

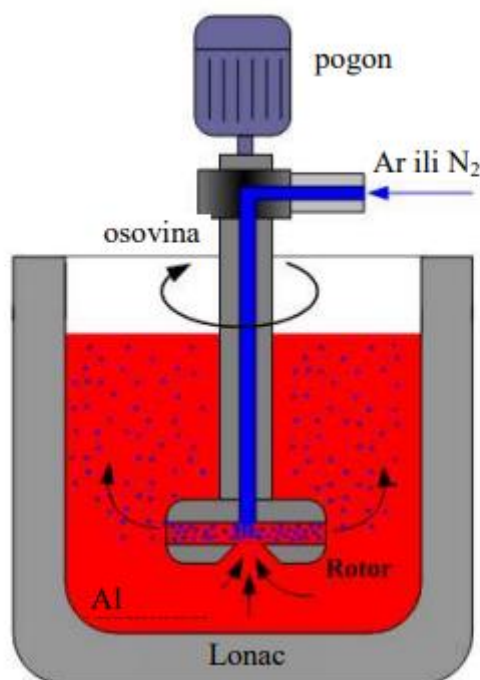
Obrada taljevine sastoji se od [3, 19]:

- obrade metala postupcima usitnjavanja zrna primarnog aluminijskog i modifikacijom eutektičkog silicija u podeutektičkim Al-Si legurama te primarnog silicija u nadeutektičkim legurama
- ostalih postupaka obrade:
 - otplinjavanja pomoću reaktivnih plinova (Cl, Ar s 5 % Cl, N₂ s 10 % Si, freon,) i inertnih plinova poput dušika i argona kako bi se uklonio zaostali vodik iz taljevine
 - obrade taliteljima (sredstva za prekrivanje taljevine, sredstva za pročišćavanje taljevine, sredstva za utroskavanje, sredstva za rafinaciju, sredstva za čišćenje zidova peći) u svrhu uklanjanja nečistoća unesenih u taljevinu i oksida legirajućih elemenata
 - filtriranja radi uklanjanja nečistoća i oksidnih filmova

Zbog toga što su aluminijske legure vrlo osjetljive na apsorpciju vodika kada se nalaze u rastaljenom stanju potrebno je provesti otplinjavanje taljevine. Izvor vodika je vlaga koja se nalazi u prostoru u kojem se provodi proces lijevanja. Vodik čini odljevak poroznim, a to se može uočiti po rupicama na odljevku [3, 19].

Neke od metoda otplinjavanja su [3, 19]:

- otplinjavanje pomoću tableta klora ili dušika
- uvođenjem argona, dušika ili klora na dno lonca
- uvođenjem argona ili dušika u rastaljeni materijal uz pomoć rotacijskog mješača, prikazano na slici 15.



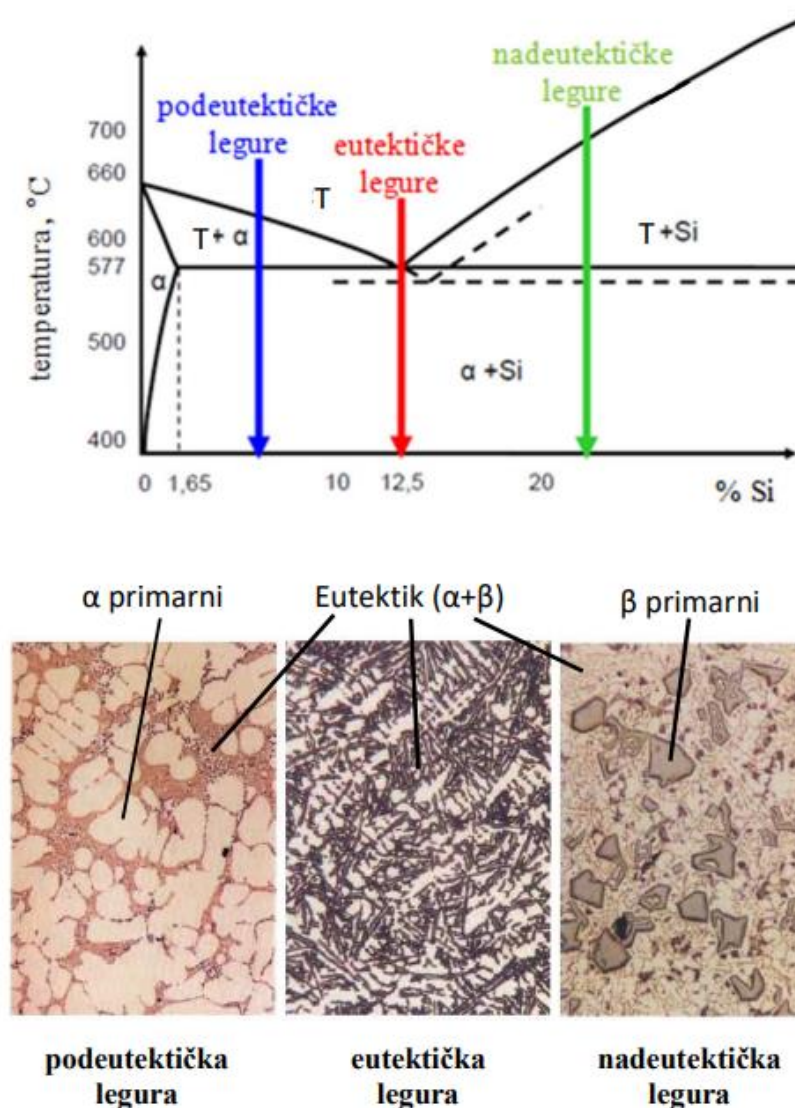
Slika 15 Rotacijski uređaj za otplinjavanje [3]

Usitnjavanjem zrna aluminijskih legura poboljšavaju se mehanička svojstva na visokim temperaturama, osim toga sitnozrnate mikrostrukture poboljšavaju obradivost i oblikovljivost odljevaka. Sitnozrnata mikrostruktura rezultira boljom livljivosti jer se stvara više nukleusa u taljevini koja se skrućuje i smanjuje se osjetljivost na poroznost odljevaka [3, 19].

Sredstva koja se koriste za usitnjavanje su AlTiB, Ti, AlTi, AlTiC. Takva sredstva se koriste u obliku tableta, žica, itd. Osim toga moguće je i lokalno usitniti zrna na način da se na željeno mjesto postavi se hladilo [3, 19].

3.4. Skrućivanje AlSi legura

Dijagram stanja te podjela legura s njihovim mikrostrukturama nalazi se na slici 16.



Slika 16 Dijagram stanja i podjela AlSi legura s pripadajućim mikrostrukturama [3]

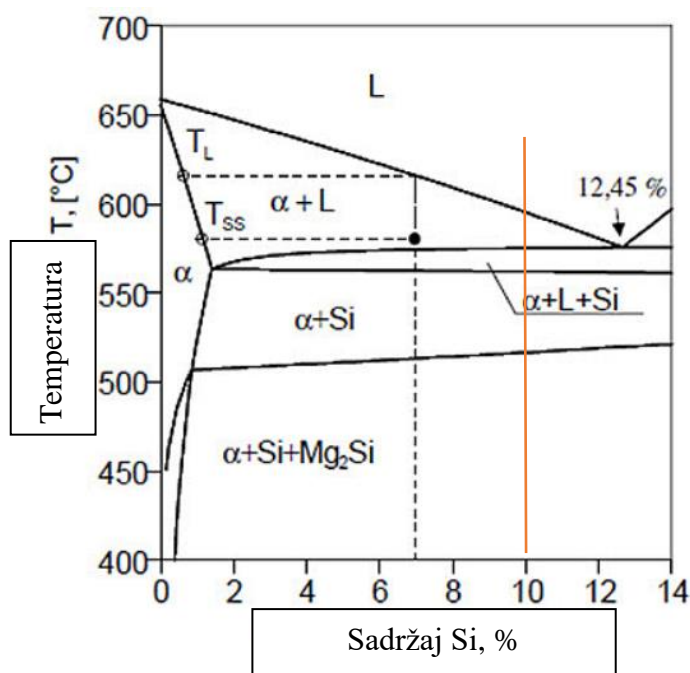
Al-Si legure tvore eutektički sastav s eutektičkom točkom kod masenog udjela silicija od 12,5% i temperature 577 °C. Legure sa sadržajem silicija manjim od 11% su podeutektičke. Ako se sadržaj silicija nalazi u intervalu između 11% i 13% onda su eutektičke, a ako je sadržaj silicija veći od 13 % nazivaju se nadeutektičkim. U strukturi podeutektičkih legura nalazi se primarni aluminij i eutektik, u strukturi eutektičkih legura gotovo samo eutektik, a u nadeutektičkim legurama nalazimo eutektik i primarni silicij. Eutektik se sastoji od α -aluminija i β -silicija. Ovaj eutektik je slabo povezan i nepravilan te raste u obliku eutektičkih kolonija [3, 20].

3.5. AlSi10Mg

Legure Al–Si–Mg, niske gustoće u kombinaciji s dobrim mehaničkim svojstvima, izvrsnom sposobnošću lijevanja i sposobnošću toplinske obrade, posebno su prikladne za proizvodnju velikih strukturnih komponenti kao i tankih dijelova u širokom rasponu primjena uključujući zrakoplovstvo, svemirsku industriju te automobilsku industriju do raznih inženjerskih dijelova. Aluminijske legure Al-Si-Mg sve više se koriste kao karoserije automobila zamjenjujući teže metale temeljem ekonomskog i političkog pritiska koji zahtijeva smanjenje potrošnje goriva i emisije CO₂. U Europi je automobilska industrija povećala prosječnu upotrebu Al legura u osobnim automobilima tijekom posljednjih desetljeća [10, 11, 21].

Među komercijalnim aluminijskim legurama za lijevanje najvažnije su one sa silicijem kao glavnim legirajućim elementom, uglavnom zbog svojih izvrsnih karakteristika lijevanja. Dodaci Si čistom aluminiju daju visoku tečljivost, dobru sposobnost popunjavanja kalupa, nisko skupljanje i dobru otpornost na vruće pukotine. Aluminijske legure koje ne sadrže dodatke bakra koriste se kada je potrebna dobra livljivost i dobra otpornost na koroziju. Magnezij može djelovati kao zamjena za bakar [10, 11, 21].

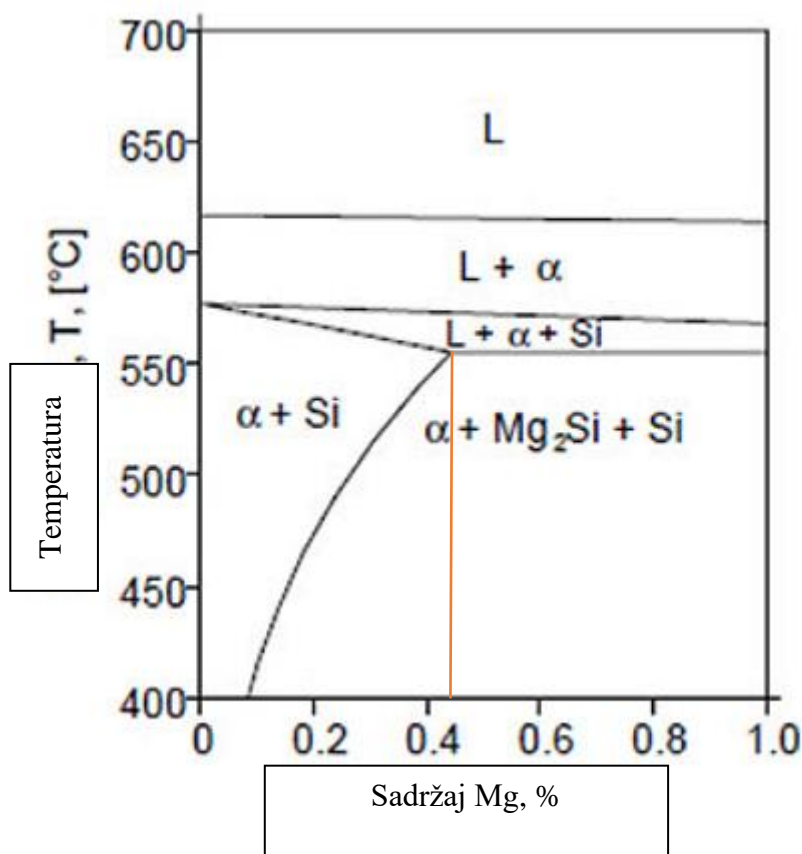
Magnezij i silicij mogu formirati intermetalnu fazu otvrdnjavanja Mg₂Si koja se taloži u α-aluminij matrici i povećava granicu razvlačenja. Slika 17 ilustrira pseudo-binarni dijagram sustava Al-Si-Mg. Temperaturni interval skrućivanja je oko 60°C [10, 11, 21].



Slika 17 Pseudo-binarni dijagram AlSiMg [21]

S druge strane, činjenica je da se granica razvlačenja može povećati povećanjem legiranog Mg. Maksimalna količina magnezija koja se može otopiti u α-aluminiju uz istovremenu

prisutnost Si i Mg_2Si je između 0,45 %, slika 18 i 0,75 % na 555°C. Magnezij koji se ne može otopiti u matrici dostupan je za stvaranje neželjenih intermetalnih spojeva. Nečistoće poput željeza, koje su najštetnije nečistoće za Al-Si-Mg legure, tvore različite intermetalne spojeve sa Si i Mg kao što su $\alpha(Fe_2SiAl_8)$, $\beta(FeSiAl_5)$ i $\pi(FeMg_3Si_6Al_8)$ [10, 11, 21].



Slika 18 Pseudo-binarni graf AlSi7Mg [21]

Među ovom obitelji legura Al-Si-Mg, AlSi10Mg je podeutektička legura koja se može aditivno proizvoditi zbog svog uskog područja skrućivanja koje smanjuje osjetljivost na vruće pukotine tijekom hlađenja. Glavna prednost aditivno proizvedenih aluminijskih legura, u usporedbi s lijevanim materijalom su superiorna mehanička svojstva i svojstva oblikovanja zahvaljujući sitnozrnatoj strukturi (zbog vrlo visoke brzine skrućivanja). Kada je riječ o aditivnoj proizvodnji aluminijskih legura, posebice AlSi10Mg kao legure kojoj se pridaje najviše pažnje, mogu se izraditi složene strukture s otvorenim ćelijama s velikim omjerom čvrstoće težine i prihvatljivom oblikovljivošću. Osim toga, većina lijevanih legura AlSi10Mg mora biti naknadno obrađena kako bi se postigla željena završna obrada površine i konačne dimenzije. Glavni problem proizvodnje s legurama AlSi10Mg su problemi povezani s prahom (npr. visoka refleksija, visoka toplinska vodljivost i niska apsorpcija lasera), nedostaci izazvani procesom (rast zrna, poroznosti, nedostatka spajanja) i zaostalo naprezanja

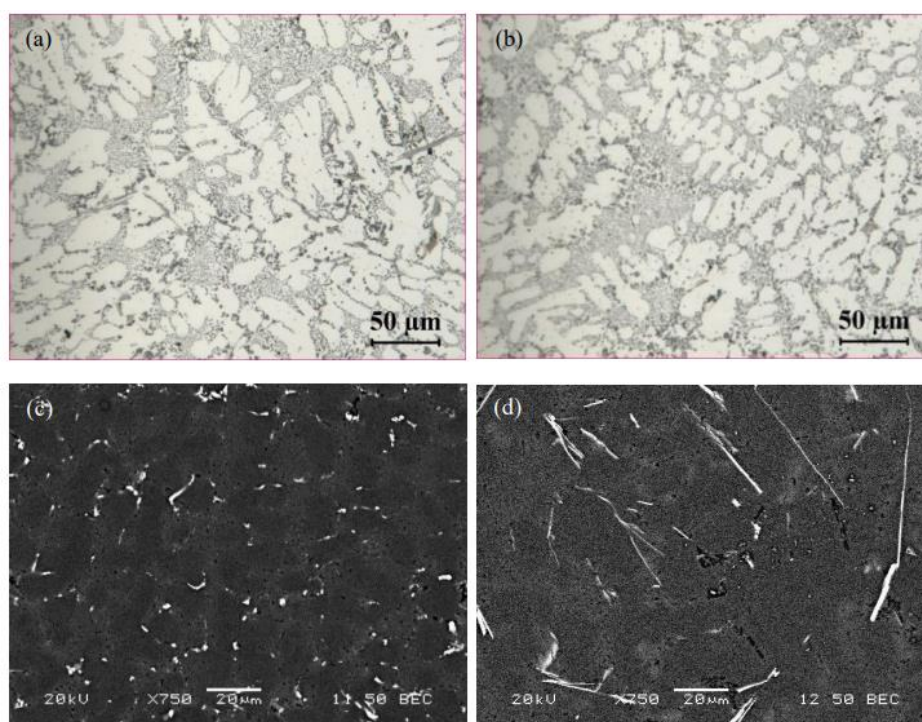
uzrokovanoga oštrim toplinskim gradijentom aditivnih proizvodnih procesa temeljenih na laseru [10, 11, 21].

U tablici 5 prikazan je kemijski sastav AlSi10Mg.

Tablica 5 Kemijski sastav AlSi10Mg [22]

| Element | Al | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti | Ni | Pb | Sn |
|----------------|--------|------|------|------|------|----------|------|------|------|------|------|
| Maseni udio, % | Oko 85 | 9-11 | 0,55 | 0,05 | 0,45 | 0,2-0,45 | 0,10 | 0,15 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

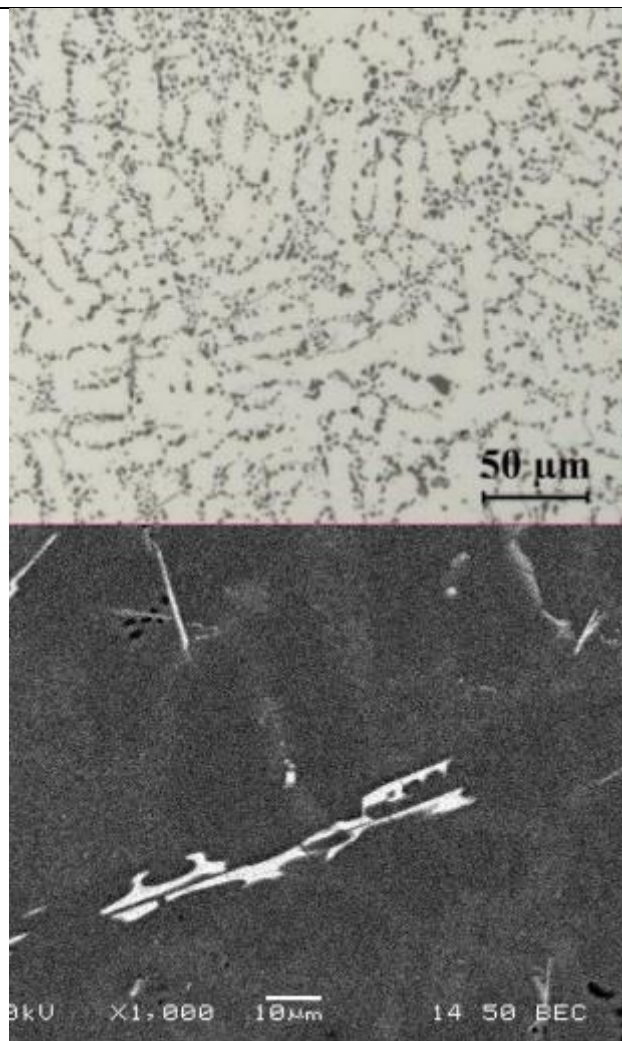
Mikrostruktura lijevanih AlSi10Mg legura ovisi o obradi nakon samog lijevanja odljevka. Na slici 19 nalaze se mikrostrukture navedene legure, nakon lijevanja te na kojima nije provedena nikakva toplinska obrada [22].



Slika 19 Mikrostruktura AlSi10Mg legure; optički mikroskop, na rubu epruvete (a) i na sredini epruvete(b); elektronski mikroskop, na rubu epruvete (c) i na sredini epruvete(d) [22]

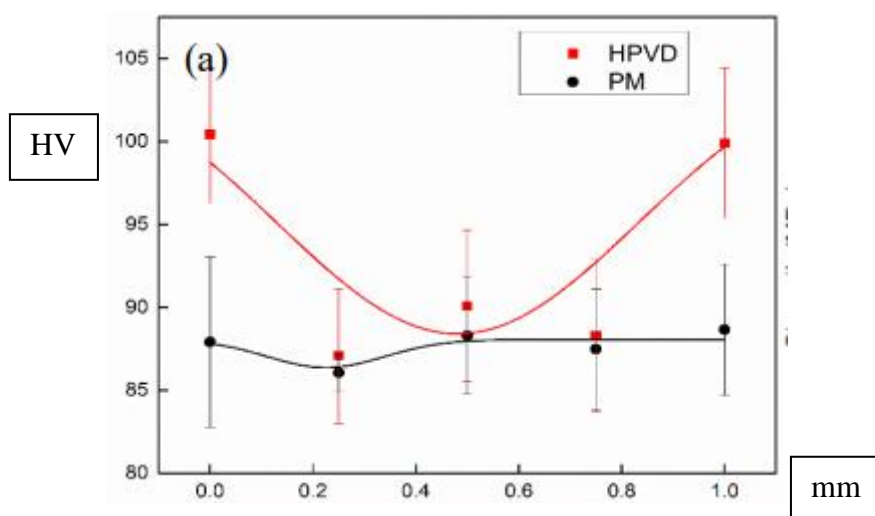
Aluminijski udio prikazan je svijetlim bojama na slikama 19a i 19b, Al-Si eutektik prikazan je sivom bojom dok su čestice primarnog Mg_2Si prikazane tamnom bojom. Na slici 19c i 19d Fe faza prikazana je igličastim i četvrtastim oblicima bijele boje [22].

Na slici 20 prikazana je mikrostruktura nakon T6 toplinske obrade. Al-Si eutektik preuzima oblik kugle, dok se Fe faza nakon toplinske obrade ne mijenja te je i dalje igličastog oblika.



Slika 20 Mikrostruktura legure AlSi10Mg nakon T6 toplinske obrade [22]

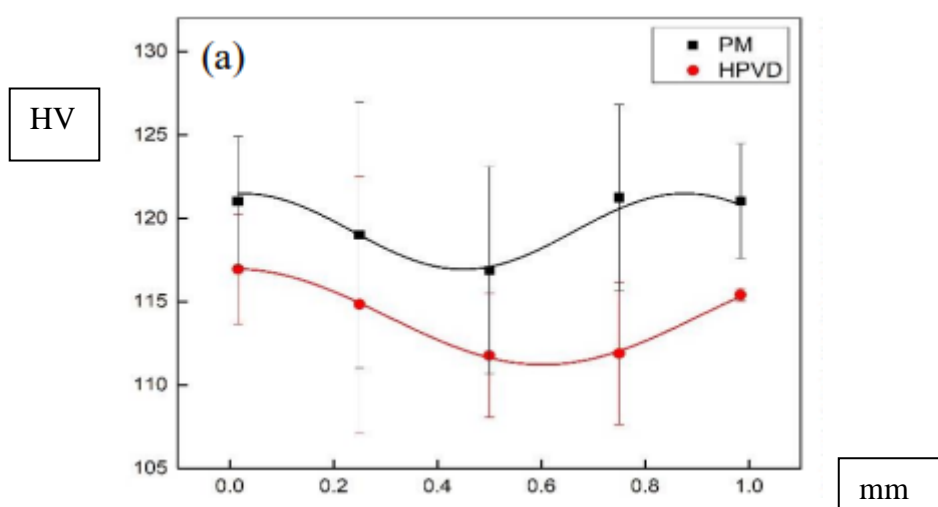
Na slici 21 prikazana je tvrdoća epruvete po presjeku kada se na odljevku ne provodi nikakva toplinska obrada, uspoređuju se odljevci gravitacijski lijevani u kokilu i visokotlačno lijevani u vakumirani kalup.



Slika 21 Usporedba tvrdoće dva načina lijevanja po presjecima epruvete [22]

Tvrdoća u blizini lijevane površine odljevka znatno je veća od one u sredini odljevka (visokotlačni vakumski odljevak, HPVD). Na primjer, tvrdoća je ~ 100 HV u blizini lijevane površine, ali je ~ 90 HV u srednjem dijelu uzorka. U području blizu lijevane površine koncentracija Si i Mg veća je od koncentracije Si i Mg u srednjem dijelu u uzorku HPVD. S druge strane, tvrdoća varira između 85 HV i 88 HV duž presjeka uzorka gravitacijski lijevanog. Varijacija tvrdoće duž poprečnog presjeka uzorka gravitacijski lijevanog je mala. Prosječna tvrdoća u srednjem dijelu HPVD uzorka nešto je veća od one u uzorku gravitacijski lijevanom [22].

Na slici 22 prikazana je tvrdoća po presjecima dvaju uzorka nakon T6 toplinske obrade.



Slika 22 Usporedba tvrdoće dva načina lijevanja po presjecima epruvete nakon T6 toplinske obrade [22]

Tvrdoća u blizini lijevane površine dvaju odljevaka nešto je veća od one u centru odljevaka. Tvrdoća HPVD uzorka varira između 112 HV i 117 HV. U usporedbi s lijevanim stanjem, razlika tvrdoće između površine i središta nakon T6 je manja. S druge strane, tvrdoća uzorka gravitacijski lijevanog varira između 117 HV i 121 HV. Tvrdoća PM uzorka veća je od čvrstoće HPVD uzorka poslije T6 toplinske obrade. Povećanje tvrdoće u PM i HPVD uzorcima iznosi 38%, odnosno 24%, u odnosu na tvrdoću u lijevanom stanju bez toplinske obrade. Drugim riječima, učinak toplinske obrade T6 na povećanje tvrdoće veći je u gravitacijski lijevanom uzorku.

4. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja ili additive manufacturing (AM) je prvi put razvijena 1980-ih kada je čovjek po imenu Charles Hull izumio prvi oblik 3D printanja nazvan stereolitografija (SLA). Bio je to napredak u laserskoj tehnologiji, zajedno s inovacijom gospodina Hulla o materijalima i procesu koji je upotrijebio, što je prvo učinilo ovu konceptualnu metodu stvarnošću. Stereolitografija je sustav u kojem se izvor ultraljubičaste (UV) svjetlosti fokusira prema dolje u UV foto-stvrdnjavajuću tekuću polimernu kupku, gdje se nakon kontakta polimer stvrdne.

Uzorci se mogu printati koristeći ultraljubičasti izvor za polu-stvrdnjavanje polimernog sloja. Nestvrdnuti polimer ostaje unutar kade i pruža potporu dijelu koji se gradi. Nakon što izrada jednog sloja završi, stvrdnuti polimerni sloj se pomiče prema dolje na radnoj ploči u tekućem mediju. Ovaj proces nastavlja se sve dok se dio ne završi na temelju CAD dizajna i ne ukloni iz tekućeg medija. U većini slučajeva potrebno je daljnje stvrdnjavanje prije nego što se dio može dotaknuti [23].

Bilo je to 1983. godine kada je Chuck Hull izumio ovu novu tehnologiju, a kasnije, 1986. osnovao je prvu tvrtku za razvoj i proizvodnju 3D pisača pod nazivom 3D Systems. Hull je također bio prvi koji je smislio način kako bi se omogućilo CAD datotekama da komuniciraju s sustavom kako bi se izgradilo računalno modelirani dijelovi. Takav pothvat nije bio beznačajan. Da bi se to postiglo, 3D CAD model morao se rezati u virtualnom svijetu, a zatim se svaki rez mogao koristiti za izgradnju sloja pomoću 3D pisača. Iako je Chuck Hull patentirao ovu tehnologiju 1986. bilo je potrebno nekoliko godina da 3D Systems lansira prvi sustav stereolitografije. Prvi printani model nalazi se na slici 23 [23, 24].



Slika 23 Prvi 3D printani model [24]

Aditivna proizvodnja (Additive Manufacturing, AM) je tehnologija koja se brzo razvija i integrira u proizvodnju, ali i u naše svakodnevne živote. Njeno pojavljivanje u komercijalnom svijetu označeno je različitim imenima, kao što su trodimenzionalni (3D) ispis, brza izrada prototipova (Rapid Prototyping, RP), slojevita proizvodnja (Layer Manufacturing, LM) ili čvrsta izrada slobodnog oblika (Solid Freeform Fabrication, SFF). Konceptualno, AM je pristup u kojem se 3D dizajni mogu izgraditi izravno iz datoteke računalno potpomognutog dizajna (Computer-Aided Design, CAD) bez ikakvih alata ili matrica specifičnih za dijelove. U ovoj slojevitoj izradi slobodnog oblika, višestruki slojevi izgrađeni su u smjeru XY jedan iznad drugoga kako bi se stvorila Z ili treća dimenzija. Nakon što je dio izgrađen, može se koristiti za konceptualne modele na dodir, testirati za funkcionalne prototipove ili koristiti u praksi. Svakodnevni bi potrošač trebao shvatiti da AM može biti način povezivanja s proizvođačima na novoj razini. AM je mnogo više od procesa koji se može koristiti za izradu personaliziranih novih predmeta ili prototipova. S novim razvojem AM-a, živimo u dobu koje je na pragu industrijalizirane brze proizvodnje koja preuzima značaj kao proces za masovnu proizvodnju proizvoda i čini ekonomski izvedivim dizajniranje i stvaranje novih proizvoda na vrijeme. Kao rezultat toga, proizvodni procesi sektora diljem svijeta prilagodit će se ovim razvojem dok će uključivati novi stil interakcije kupac-proizvođač. AM omogućuje ljudima da doprinesu procesu projektiranja s gotovo bilo koje lokacije i srušit će barijere lokalnog inženjeringa i pojaviti se na globalnoj razini. Baš kao što nam je internet dao mogućnost širenja i pristupa informacijama s bilo koje lokacije, digitalno projektiranje i CAD dali su ljudima mogućnost izrade, mijenjanja i kritike dizajna s bilo kojeg mjesta. Uz AM, ti se dizajni mogu izraditi i testirati s gotovo bilo koje lokacije uz vrlo malo vremena. Mogućnosti

AM strojeva postale su sofisticirane do točke u kojoj je razmišljanje o dizajnu i izradi modela u CAD-u ograničenje umjesto proizvodnosti proizvoda. Kako nova generacija odrasta s CAD tehnologijom i upotreba AM strojeva raste, proces dizajniranja proizvoda sazrijevati će od toga da ga kreira odabrana grupa inženjera do toga da ga kreiraju potrošač i tvrtka zajedno, s tim da se konačni proizvod može pravodobno proizvesti bilo gdje u svijetu [23].

Koliko kompleksne geometrije se mogu proizvesti prikazano je na slici 24.



Slika 24 Izmjenjivači topline izrađeni tehnologijama aditivne proizvodnje [25]

4.1. Podjela postupaka aditivne proizvodnje

Aditivnim postupcima proizvodnje mogu se izrađivati proizvodi od raznih materijala kao što su metali, polimeri i keramika. Postupci aditivne proizvodnje dijele se prema obliku i agregatnom stanju materijala koji se koristi. Podjela je sljedeća, slika 25 [26]:

- Materijali u krutom stanju
- Materijali u kapljevitom stanju
- Materijali u obliku praha



Slika 25 Podjela postupaka aditivne proizvodnje [26]

Postupci aditivne proizvodnje nalaze se u tablici 6.

Tablica 6 Postupci aditivne proizvodnje [26]

| Postupak | Materijal |
|---|--|
| Stereolitografija – SLA | Fotoosjetljiva polimerna smola |
| PolyJet | Fotoosjetljiva polimerna smola |
| Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom – DLP | Fotoosjetljiva polimerna smola |
| Selektivno lasersko srašćivanje – SLS | polimeri (ABS, PC, PA, PS, PMMA), ojačani polimeri, polimeri s punilima, keramika, metali |
| Izravno lasersko srašćivanje metala – DMLS | Čelici legirani s Ni, Cr, Mo, Si, V, nehrđajući čelici, maraging čelici, kobalt-krom legure (CoCrMo), niklove legure (NiCr22Mo9Nb), titanove legure (Ti6-Al4-V) i aluminijske legure (AlSi10Mg) |
| Posredno lasersko srašćivanje metala – IMLS | Nehrđajući čelici, bakar i njegove legure, aluminij i njegove legure |

| | |
|--|---|
| Selektivno lasersko taljenje (SLM) | Nehrđajući čelici, visokolegirani čelici, legure aluminijska, titanove legure (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, NiTi, TiB) i čisti titan, kobalt-krom legure, Inconel legure, legure bakra, legure nikla i aluminijska (Cu-Ni-Al) |
| 3D tiskanje – 3DP | Polimeri, keramika, škrob, gips, metali |
| Taložno očvršćivanje – FDM | Plastomeri (ABS, PE-HD, PE-LD, PP, PC, PLA), keramika |
| Proizvodnja laminiranih objekata – LOM | Polimeri u obliku folija (PVC), papir, metalne ploče i folije, kompoziti s epoksidnom matricom i staklenim ojačavalima |
| Izravno taloženje metala – LENS | Nehrđajući čelici, alatni čelik, legure nikla, legure titana |
| Izravno taloženje metalnog praha – DMD | Legure nikla, kobalta, titana, mangana, kroma |
| Taljene pomoću snopa elektrona – EBM | Titan i njegove legure, volfram, niobij, tantal, platina, paladij, cirkonij, iridij, nikal, legure nikla |

4.2. Fotopolimerizacija

Tehnologija fotopolimerizacije 3D ispisa obuhvaća nekoliko različitih procesa koji se oslanjaju na istu osnovnu strategiju: tekući fotopolimer koji se nalazi u spremniku selektivno se stvrdnjava pomoću izvora topline. Sloj po sloj, 3D fizički objekt se gradi do kraja [26, 27].

Postoji više vrsta uređaja za stvrdnjavanje uz najstariju tehniku koja se temelji na laserima. DLP svjetla, pa čak i LCD zasloni sada su popularan način fotopolimerizacije materijala s obzirom na njihovu nisku cijenu i vrlo visoku rezoluciju. Jedna od prednosti ovih dviju tehnika u usporedbi s laserima je njihova sposobnost istovremenog stvrdnjavanja cijelog sloja smole, dok laser mora postupno osvjetljavati cijelu površinu tako što ju iscertava [26, 27].

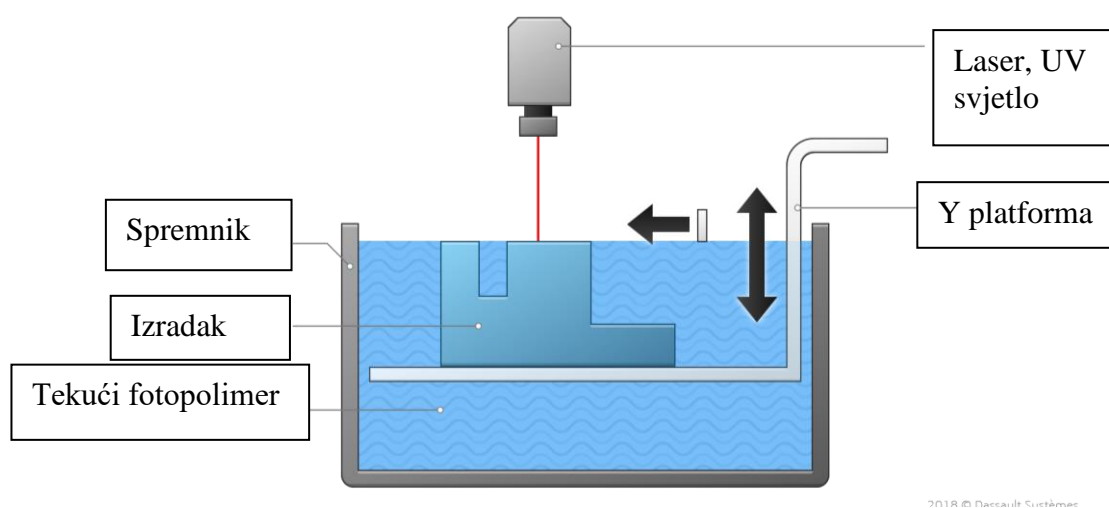
Najpopularnije tehnologije fotopolimerizacije 3D ispisa uključuju sljedeće [26, 27]:

- Stereolitografija (SLA) - SLA je također poznat kao SL, optička izrada, fotosolidifikacija ili ispis smolom. Tijekom procesa proizvodnje SL-a, koncentrirani snop ultraljubičastog svjetla ili lasera fokusira se na površinu posude ispunjene

tekućim fotopolimerom. Zraka ili laser se fokusiraju, stvarajući svaki sloj željenog 3D objekta pomoću unakrsnog povezivanja ili degradacije polimera.

- Digitalna obrada svjetla (DLP) - Za proces DLP 3D ispisa, zaslon digitalnog projektor koristi se za bljeskanje jedne slike svakog sloja na cijeloj platformi odjednom. Budući da je projektor digitalni zaslon, slika svakog sloja sastoji se od kvadratnih piksela, što rezultira slojem formiranim od malih pravokutnih kockica koje se nazivaju vokseli. DLP može postići brže vrijeme ispisa za neke dijelove, budući da je svaki cijeli sloj izložen odjednom, umjesto da se izvlači laserom.

Fotopolimerizacija se uspješno primjenjuje u medicinskom modeliranju, što omogućuje izradu preciznih 3D modela različitih anatomskih tvorevina, na temelju podataka dobivenih računalnim snimkama. Visoka razlučivost ove tehnike također je čini idealnom za sve vrste izrade prototipova, kao i za masovnu proizvodnju. Postupci polimerizacije izvrsni su za proizvodnju dijelova s finim detaljima i glatkom površinom. To ih čini idealnima za nakit i mnoge stomatološke i medicinske primjene. Razvoj materijala također je omogućio tisak kalupa za injekcijsko ubrizgavanje u maloj količini. Glavna ograničenja za polimerizaciju u spremniku su veličina građe i čvrstoća dijela. Na slici 26. prikazan je proces izrade tvorevina fotopolimerizacijom [26, 27].



Slika 26. Izrada tvorevine fotopolimerizacijom [27]

4.3. Powder Bed Fusion (Spajanje praškastog materijala u slojevima)

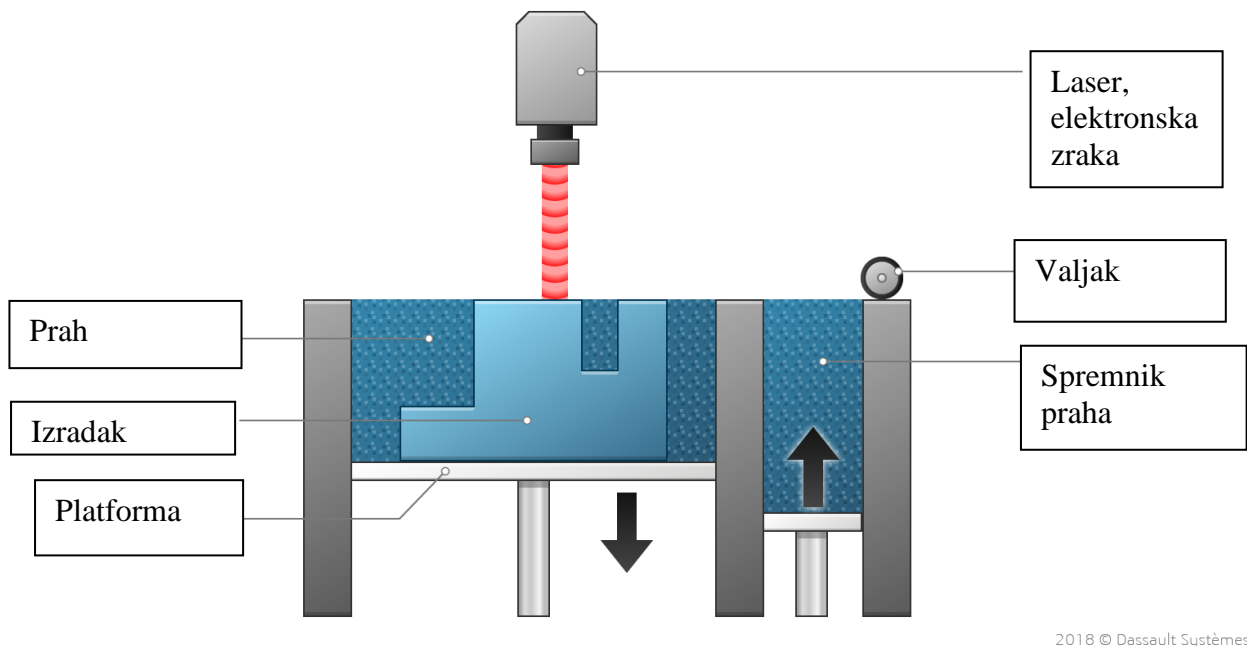
Tehnologija 3D ispisa Powder Bed Fusion (PBF) stvara proizvode s preciznošću. Ova tehnika 3D ispisa omogućuje proizvodnju širokog niza geometrijski složenih proizvoda korištenjem izvora topline, uglavnom laserskih ili elektronskih zraka, za spajanje čestica praha sloj po sloj, čime se stvara čvrsti dio. Proizvođači mogu imati koristi od značajne slobode dizajna s obzirom na to da PBF predstavlja nekoliko održivih tehnologija i materijala [26, 27].

Različite metode spajanja praha uključuju [26, 27]:

- Selektivno lasersko sinteriranje (SLS) - Tehnologija SLS 3D ispisa nastala je kasnih 1980-ih na Sveučilištu Texas u Austinu. Tijekom godina ova je tehnologija doživjela značajan napredak. U osnovi, proces koristi lasere za sinteriranje ili spajanje materijala u prahu sloj po sloj kako bi se stvorila čvrsta struktura. Konačni proizvod, obavijen prahom u prahu, zatim se čisti četkama i zrakom pod pritiskom. Glavni materijali koji se koriste u procesu SLS 3D ispisa uključuju poliamid (najlone), aluminid (mješavina sivog aluminijskog praha i poliamida) i materijale slične gumi. Najloni su jaki i izdržljivi, ali imaju određenu fleksibilnost, što ih čini izvrsnim za prijanjanje, držače, kopče i opruge.
- Selektivno lasersko taljenje (SLM), koje se naziva i izravno lasersko sinteriranje metala (DMLS). Isti tehnički princip koristi se za proizvodnju dijelova za selektivno lasersko taljenje (SLM) i izravno lasersko sinteriranje metala (DMLS), ali se koristi isključivo za proizvodnju metalnih dijelova. SLM postiže potpuno taljenje praha tako da se jednokomponentni metali, poput aluminijski, mogu koristiti za izradu laganih, jakih rezervnih dijelova i prototipova. DMLS sinterira prahove i ograničen je na legure, uključujući legure na bazi titana. Ove metode zahtijevaju dodatnu podršku za kompenzaciju visokog zaostalog naprezanja i ograničavanje pojave deformacija. Primjene uključuju industriju nakita i zubarske industrije, rezervne dijelove i prototipove.
- Electron Beam Melting (EBM) - EBM tehnologija 3D ispisa postiže spajanje upotrebom visokoenergetskog elektronskog snopa i proizvodi manje zaostalog

napreznja što rezultira manjim deformacijama. Koristi manje energije i može proizvesti slojeve brže od SLS-a. Ova je metoda najkorisnija u industrijama visoke vrijednosti kao što su zrakoplovstvo i obrana, motorni sportovi i medicinska protetika.

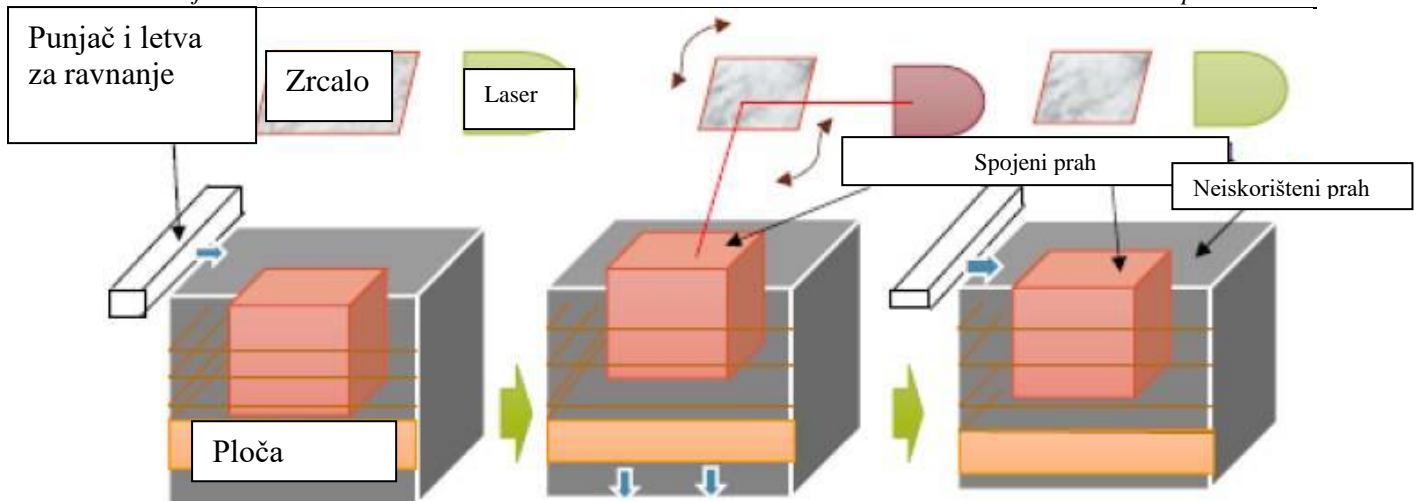
Na slici 27 prikazana je shema postupaka PBF-a.



Slika 27 Shema PBF postupka [27]

5. SELEKTIVNO LASERKO TALJENJE ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

Selektivno lasersko taljenje (SLM) jedan je od aditivnih proizvodnih postupaka koji spadaju u kategoriju procesa spajanja u sloju praha. Ovu su tehniku razvili Fockele i Schwarze iz Stereolithographtechnik GmbH zajedno s Meinersom, Wissenbachom i Andresom iz ILT Fraunhofer, Aachen 1994. za proizvodnju trodimenzionalnih metalnih komponenti od metalnog praha. Patent za ovu tehnologiju je prvi put prijavljen 1997. godine Njemačkom uredu za patente i trgovačke marke, koji je zatim službeno prihvaćen i objavljen 1998. Ovaj proces spajanja u sloju praha koristi lasersku zraku visokog intenziteta kao izvor energije za selektivno taljenje metalnog praha, što je diktirano podacima trodimenzionalnog računalno potpomognutog dizajna (CAD). Proizvodnja komponenti ovim postupkom može se podijeliti u dva važna koraka, naime (1) računski dio i (2) stvarni slijed proizvodnje. Dijelovi se općenito proizvode na ploči izrađenoj od istih/sličnih materijala. Nakon proizvodnje dijela, on se mora odvojiti od ploče, a za jednostavno uklanjanje, između osnovne ploče i stvarne komponente dizajnirane su šuplje strukture koje se nazivaju "potporne strukture". Različiti koraci uključeni u proizvodnju komponenti SLM postupkom prikazani su na slici 28. Prvi korak uključuje stvaranje 3D CAD modela koji točno nalikuje dijelu koji se proizvodi. 3D CAD model stvarne komponente unosi se u pisač, zajedno s podacima za potporne strukture, a to je tada poznato kao apsolutni podaci (podaci o dijelu + podaci o potpornim strukturama). Budući da laser treba informacije o dijelu na bazi sloj po sloj, apsolutni CAD podaci dijele se na slojeve. Ovi razrezani podaci (2D informacije po slojevima) mogu se zatim koristiti za izradu dijela pomoću SLM-a. Drugi korak u SLM procesu uključuje izradu samog dijela. Tanak sloj praha nanosi se na osnovnu ploču ili preko prethodno razbacanog sloja praha pomoću posebno dizajniranog utovarivača. Punjač se zatim udaljava od putanje lasera i laserska zraka se aktivira. Laserska zraka selektivno tali sloj praha kako je diktirano 3D CAD podacima. Platforma se zatim spušta za iznos jednak debljini sloja, koja je unaprijed definirana na temelju drugih parametara procesa i praha koji se obrađuje. Zatim se nanosi sljedeći sloj praha i proces se nastavlja dok se ne izradi cijeli dio, slika 28. Nakon završetka procesa ploča se zajedno s izrađenim dijelom se izvadi iz radne komore i razdvoji od izrađenog dijela. Parametri procesa kao što su snaga lasera, brzina laserskog skeniranja, udaljenost šrafure, stil šrafure, debljina sloja, veličina čestica praha i fizikalna svojstva praha određuju gustoću izrađenog dijela [28, 29, 30].



Slika 28 Izrada dijelova pomoću SLM tehnologije [29]

SLM proces ima mogućnost izrade dijelova bez upotrebe kalupa ili alata, što može pomoći u skraćivanju ciklusa dizajna i proizvodnje, može rezultirati uštedom vremena proizvodnje, a time i troškova. Štoviše, SLM proces omogućuje ponovnu upotrebu praha metala/legure na učinkovit način, budući da nudi mogućnost prosijavanja i recikliranja/ponovne uporabe praha. Sposobnost recikliranja je važna prednost SLM procesa jer to dovodi do minimalnog otpada materijala i SLM se stoga smatra ekološki prihvatljivim procesom. Utvrđeno je da se prahovi mogu koristiti između 12 i 14 puta nakon recikliranja, bez značajnih promjena u svojstvima praha kao i dijelova. SLM proces zahtijeva manje sirovina za proizvodnju komponenti koje mogu imati dodatnu funkcionalnost, lagane strukture za smanjenje težine i egzotične dizajne za optimalne performanse. Stoga se smatra da SLM omogućuje znatno smanjenje emisija goriva, što procesu daje izvanrednu ekološku učinkovitost, što ga čini zelenom tehnologijom za budućnost. SLM proces je već izvršio značajan utjecaj u proizvodnom, automobilskom, zrakoplovnom, farmaceutskom, elektroničkom i sportskom sektoru zbog njegove sposobnosti proizvodnje širokog spektra materijala (metala, legura, kompozita) bez bilo kakvih teoretskih ograničenja [28, 29, 30].

Iako SLM proces ima nekoliko prednosti da se smatra tehnologijom za budućnost, postoje određeni nedostaci kao što su loša kvaliteta površine, povremeno dugo vrijeme proizvodnje, točnost dimenzija i svojstva materijala (neke legure pokazuju nepoželjnu krhkost za industrijske primjene). Kako bi se prevladali ovi problemi, mogu se provesti naknadne obrade kao što su poliranje uključujući elektropoliranje, toplinske obrade, površinsko brušenje, infiltracija u peći itd. Provedeno je opsežno istraživanje kako bi se pronašla ravnoteža između procesa i parametara materijala koji se mogu koristiti za dobivanje finije površine, ali sa smanjenim vremenom proizvodnje uzimajući u obzir zahtijevana mehanička svojstva.

Troškovi instalacije i stroja igraju ključnu ulogu jer su troškovi stroja prilično visoki. Osim toga, troškovi sirovina su također visoki, kada je u pitanju proizvodnja aditiva na bazi praha. Uglavnom su bili potrebni prahovi raspršeni plinom, što uvećava cijenu proizvodnje. Međutim, ovaj trošak praha može se neznatno prevladati korištenjem elementarnog praha umjesto prethodno legiranog praha. S druge strane, korištenje elementarnih prahova dovest će do drugih problema poput segregacije. Međutim, svojstva praha, procesni parametri i svojstva same legure igraju značajnu ulogu u izradi metalnih komponenti korištenjem SLM-a [28, 29, 30].

Svojstva praha igraju značajnu ulogu tijekom izrade komponente postupkom SLM. Različita fizikalna svojstva praha kao što su talište, gustoća, latentna toplina taljenja, toplinska vodljivost i toplinski kapacitet određuju entalpiju taljenja dijelova proizvedenih SLM-om. Količina energije koja je potrebna za potpuno taljenje jedinice mase praha definirana je kao entalpija taljenja. Entalpija taljenja dalje određuje toplinsku ravnotežu sustava, koja određuje karakteristike taline. Jedan od važnih čimbenika koji određuju toplinsku ravnotežu sustava je toplinska vodljivost. Elementi/legure s visokom toplinskom vodljivošću trebaju veću energiju kako bi imali stabilnu talinu. Količina unutarnjih naprezanja koja se unose u SLM-proizvedeni dio tijekom procesa skrućivanja ovisi o koeficijentu toplinskog širenja, a gore navedena svojstva su unutarnja svojstva sustava metal/legura, koja se ne mogu značajno promijeniti [28, 29, 30].

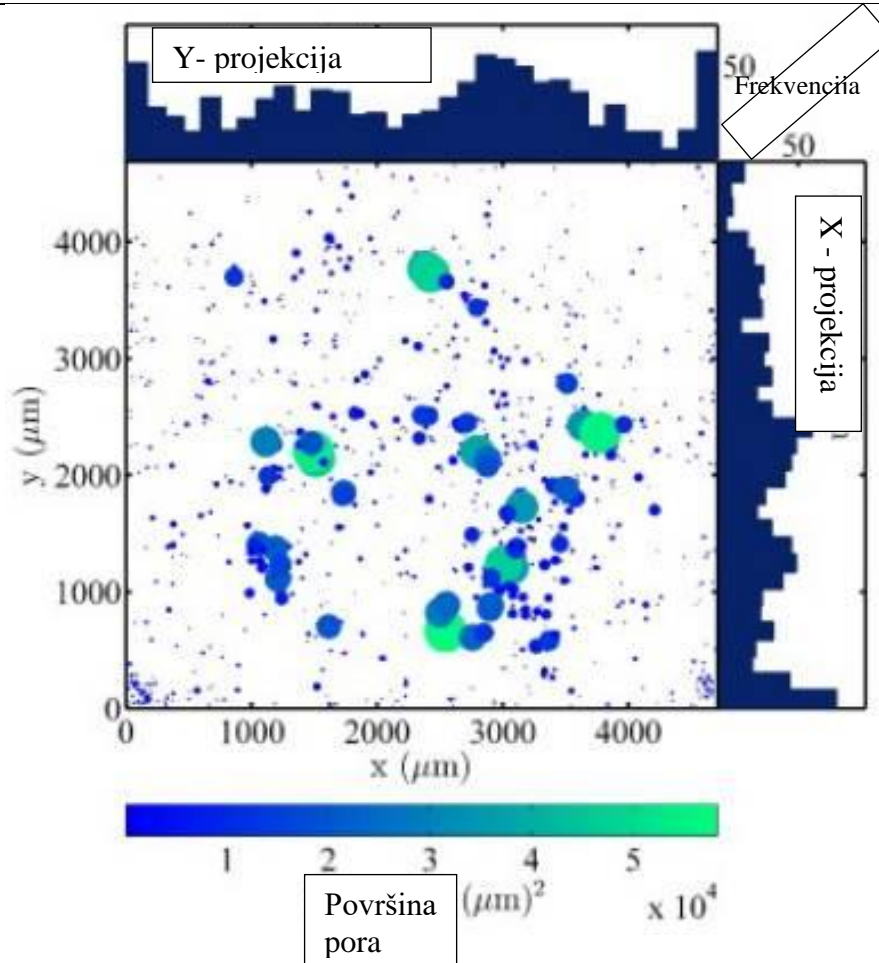
Međutim, čimbenici poput raspodjele veličine čestica, koja je matematička funkcija, mogu se mijenjati ovisno o zahtjevima. Raspodjela veličine čestica definira relativni broj čestica po masi, prisutnih u različitim rasponima veličina. Ovo je jedno od važnih svojstava praha, koje određuje sipkost praha. Omjer većih i manjih čestica u prahu ima snažan utjecaj na njegovu sipkost. Čestice imaju tendenciju lijepljenja ili aglomeracije jedna s drugom ako raspodjela veličine čestica praha sadrži veliki udio vrlo finih čestica, što utječe na protočnost praha. To se može objasniti u smislu izraženih van der Waalsovih sila koje djeluju na male čestice i koje negativno utječu na ravnomjerno taloženje slojeva praha. S druge strane, visok volumni udio finijih čestica pomaže smanjiti energiju potrebnu za taljenje i smanjuje debljinu sloja. Ovo pomaže u daljnjem smanjenju unosa energije potrebne za proces proizvodnje (ili se može smanjiti količina energije ili se može povećati brzina laserskog skeniranja, što povećava brzinu procesa proizvodnje). Konzistencija taline može se poboljšati u određenoj mjeri uvođenjem čestica praha s uskom raspodjelom veličine, međutim to može imati štetne učinke na gustoću pakiranja praha [28, 29, 30].

5.1. Elementarni aluminij

Aluminij je metal koji se najviše troši u svijetu za inženjerske primjene. Ima jedinstvenu kombinaciju atraktivnih svojstava kao što su mala gustoća, visoka specifična čvrstoća i otpornost na koroziju, što ga čini idealnim materijalom za korištenje u bezbrojnim konstrukcijskim primjenama. Rastuća primjena aluminija izrazito je vidljiva u proizvodnji automobilskih dijelova, pakiranju hrane i pića, proizvodnji obrambene i zrakoplovne opreme, prijenosu električne energije itd. Proizvodi od čistog aluminija mogu se lako proizvesti i konvencionalnim postupcima kao što su lijevanje i metalurgija praha; međutim, izrada pomoću SLM-a posebno je teška. Razlog tome je oksidacija, visoka refleksija laserske zrake itd. Aluminij komercijalne čistoće pokazuje mnogo veću toplinsku vodljivost u usporedbi sa svojim legurama zbog odsutnosti drugih legiranih elemenata koji smanjuju vodljivost, zbog čega je izrada SLM-om zahtjevnija. Nepravilnosti kao što su nepravilno oblikovane plinske pore i fine čestice oksida prevladavaju u dijelovima od čistog aluminija proizvedenim SLM-om. Na relativnu gustoću dijelova SLM-a značajno utječe gustoća energije upadne laserske zrake. Preniska gustoća ulazne energije dovodi do prisutnosti neotopljenih čestica praha i pora nepravilnog oblika, dok previsoka gustoća ulazne energije rezultira obilnim kuglastim plinskim porama zbog prskanja rastaljenih i skrutnutih metala. Plin zarobljen u porama dolazi od mješavine Ar/N₂, koja se koristi tijekom procesa ili od zaostalih plinova poput vodika prisutnog u prahu. SLM dijelovi obično također sadrže velike količine finih čestica oksida (manje od 0,3 μm) u aluminijskoj matrici, koje bi mogle nastati od već postojećih oksida na površini atomiziranog praha. Oksidi na česticama praha mogu se razbiti u mnogo manje čestice zbog brzog potiska laserske zrake visoke energije, što može dovesti do velikih toplinskih naprezanja u oksidima. Međutim, proizvodnja čistog Al pomoću SLM-a nije od velikog interesa zbog loših mehaničkih svojstava čistog Al i poteškoća u obradi SLM-om. Stoga, dijelovi od čistog aluminija nisu od velikog interesa [28].

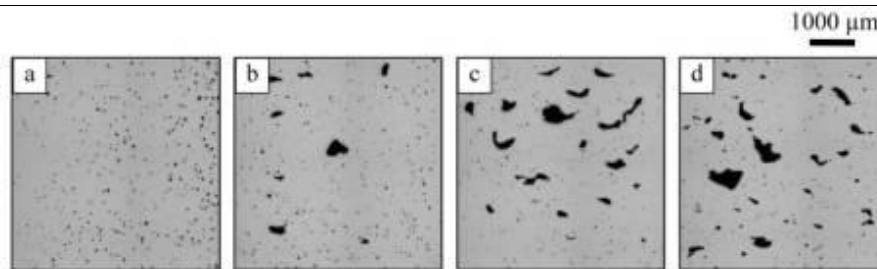
5.2. AlSi10Mg

Legure 6XXX najčešće su korištene legure aluminija koje se mogu lijevati i zavarivati te pokazuju dobru otpornost na koroziju. Jedna od istaknutih legura u obitelji 6XXX je AlSi10Mg, koja se široko koristi za automobilske komponente. AlSi10Mg može podnijeti značajna mehanička opterećenja i smatra se alternativom titanu u slučaju lakih dijelova (kada nisu izloženi pretjeranom zamoru). AlSi10Mg se može podvrgnuti raznim operacijama naknadne obrade kao što su strojna obrada, erozija iskrenjem, zavarivanje, premazivanje itd. Štoviše, legure AlSi10Mg imaju dobru tečljivost taline i malo skupljanje, što je povoljno za lijevanje. Budući da AlSi10Mg ima dobru sposobnost lijevanja i zavarivanja, preferira se za selektivno lasersko taljenje. Stoga je AlSi10Mg vjerojatno jedna od najčešće korištenih Al-legura za aditivnu proizvodnju, posebno za SLM obradu. Osim legure AlSi10Mg, nekoliko sastava koji pripadaju obitelji 6XXX također je proučavano korištenjem SLM procesa, npr. legura AlSi7Mg. Budući da je AlSi10Mg jedna od istaknutih legura za SLM, njeni optimalni procesni parametri danas su lako dostupni i kvalificirani su za proizvodnju industrijskih komponenti. Utjecaj na svojstva izrađenih komponenti imaju: brzina laserskog skeniranja, strategija skeniranja (orijentacija skeniranja), debljine sloja, taljenja s jednim laserom ili više lasera, granični uvjet taline, količina defokusiranja i gustoća energije (kombinacija snage lasera i brzine laserskog skeniranja). Na slici 29. prikazan je CT sken površine izratka [28, 29, 30].



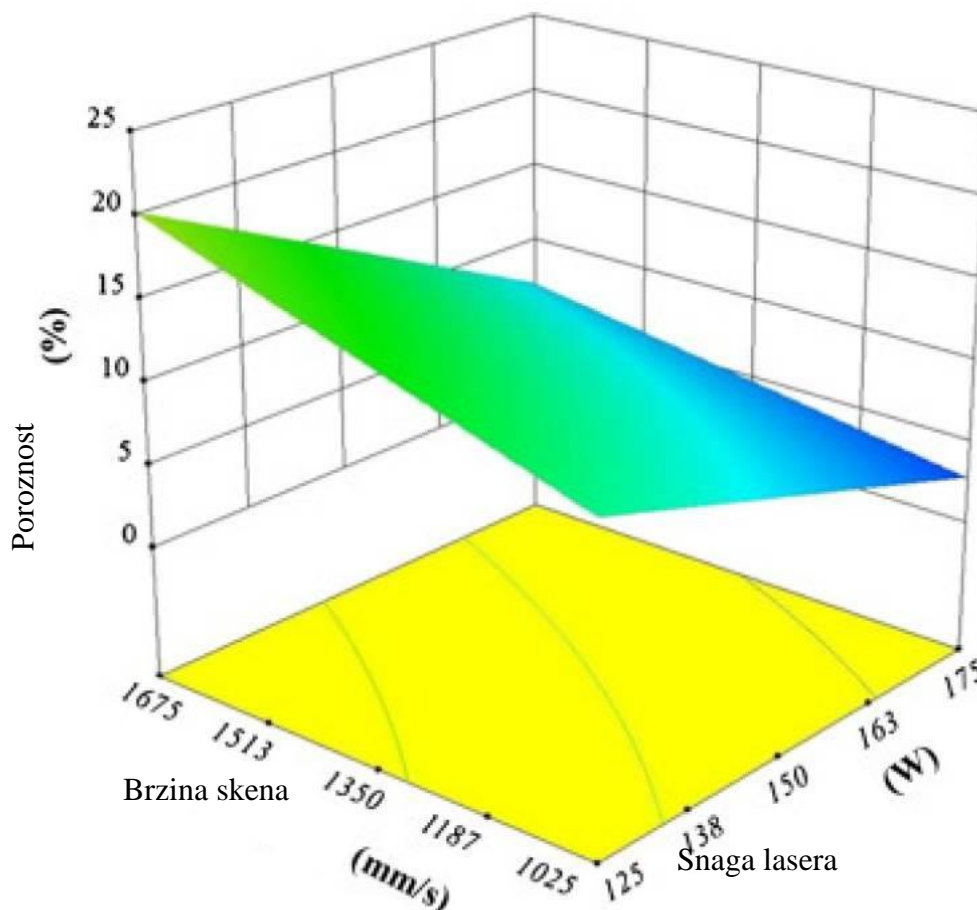
Slika 29 Prikaz CT skena pora na AlSi10Mg SLM izratku [28]

Mala brzina laserskog skeniranja dovodi do stvaranja brojnih metalurških pora kuglastog oblika. Kada se brzina laserskog skeniranja postupno povećava, dolazi do prijelaza iz metalurških u pore uslijed ključanice. Taj se prijelaz opaža pri približno 500 mm/s. Pri brzem skeniranju dominira poroznost ključanice, slika 30. Iako dva skupa uzoraka mogu imati sličnu količinu poroznosti, treba uzeti u obzir vrstu poroznosti kako bi se izvršile odgovarajuće promjene parametara procesa jer pore ključanice u potpunosti ovise o parametrima procesa. Pri velikim brzinama laserskog skeniranja, talina postaje kapilarno nestabilna, što potiče prskanje taline što dovodi do pojave prskotina. Prskotine su nakupine skrnutih kapljica na površini SLM dijelova. Ova pojava se često viđa na legurama koje sadrže magnezij [28, 29, 30].



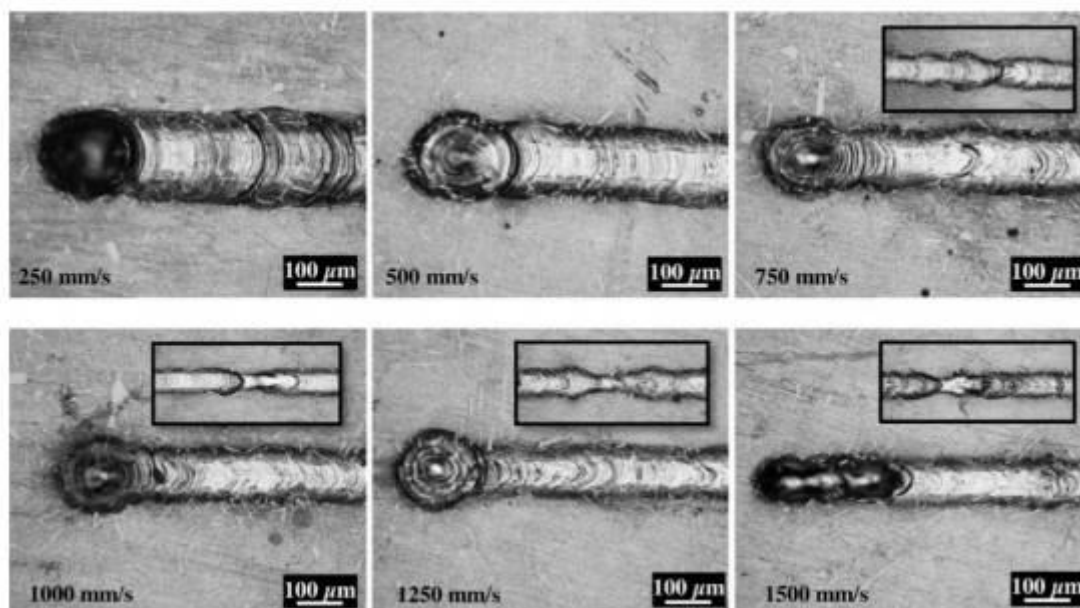
Slika 30 Usporedba pora ovisno o brzini skeniranja laserom (a) 250 mm/s, (b) 500 mm/s, (c) 750 mm/s i (d) 1000 mm/s [28]

Prskotine i pore ključanice postaju sve izraženije s povećanjem brzine laserskog skeniranja. Za razliku od pora ključanice, fenomen prskotina može se lako uočiti s gornje površine uzoraka. Strategija dvostrukog skeniranja (iako je potrebno dosta vremena za izradu dijelova) može pomoći u uklanjanju pora ključanice. Međutim, prekomjerna energija koja se dovodi u sloj praha dovodi do skupljanja vodika i stoga stvaranja metalurških pora u legurama AlSi10Mg. Uočeno je da skupljanje vodika nije jedini razlog koji može dovesti do vodikovih/metalurških pora. Čestice praha mogu imati vlagu na svojoj površini koja djeluje kao dominantni izvor vodika, ali se može smanjiti bilo izotermnim sušenjem čestica praha u peći (vanjski proces) ili sušenjem praha prije nego što se otopi pomoću lasera niske snage. Do rasta vodikovih pora dolazi kada količina vodika u talini prijeđe maksimalnu granicu topljivosti vodika u rastaljenom aluminiju i to je difuzijski proces. Povećanjem brzine skeniranja i korištenjem neosušenog praha povećava se gustoća vodikovih pora (ili, drugim riječima, razina poroznosti) u uzorcima AlSi10Mg. Model površine koji predviđa poroznost s obzirom na laserske parametre (lasersku snagu i brzinu laserskog skeniranja) prikazan je na slici 31. Ovaj dijagram sugerira da su i smanjenje snage lasera i povećanje brzine laserskog skeniranja štetni jer imaju tendenciju povećanja razine poroznosti. Snaga lasera ima značajniji utjecaj na stvaranje poroznosti nego brzina laserskog skeniranja. Niske gustoće energije (niska snaga lasera i velike brzine skeniranja) rezultiraju smanjenom širinom taline, a na taj način i stvaranjem poroznosti zbog nepotpune konsolidacije čestica praha [28, 29, 30].

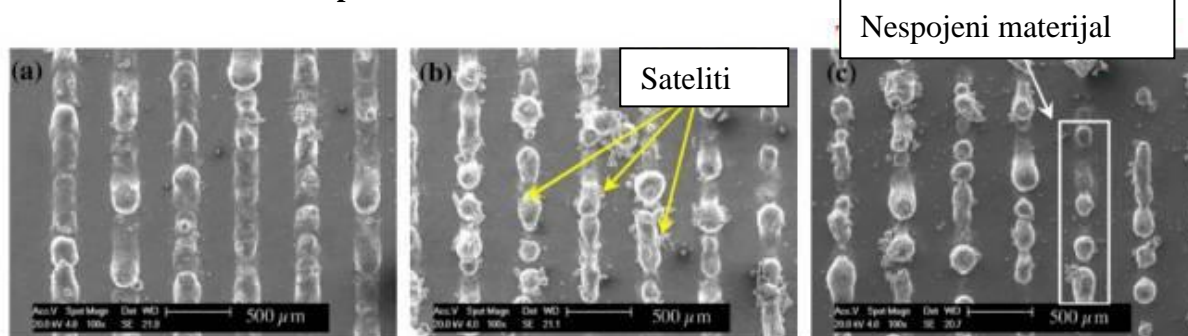


Slika 31 Ovisnost razine poroznosti o brzini i snazi lasera [28]

Očito je da se dimenzije laserske staze smanjuju s povećanjem brzine laserskog skeniranja i obrnuto. Razlog za istraživanje laserskih staza je taj što se formiranje nepravilnosti može lako uočiti i može dati naznake ponašanju materijala. Na primjer, neki bazeni taline imaju stožasti umjesto cilindričnog oblika, slika 32, što sugerira moguće stvaranje pora ključanice u izratku (što ukazuje na relativno veliku brzinu laserskog skeniranja). Predlaže se da se rezultati ili trend opaženi iz laserske staze ne mogu uzeti kao jedini kriterij za izračunavanje parametara procesa; međutim, mogu se koristiti kao vodič za rad s parametrima procesa. Laserske pojedinačne staze proizvedene brzinom laserskog skeniranja od 250 mm/s ne pokazuju mnogo diskontinuiteta. Kada se brzina laserskog skeniranja poveća na 500 mm/s i 750 mm/s, volumen diskontinuiteta se povećava i uočava se potpuna nepovezanost unutar staza. Neka područja pokazuju samo niz kapljica, što sugerira da bazen taline vodi samo minimalnu energiju do etalnog praha, čime se smanjuje dubina taljenja, slika 33 [28, 29, 30].



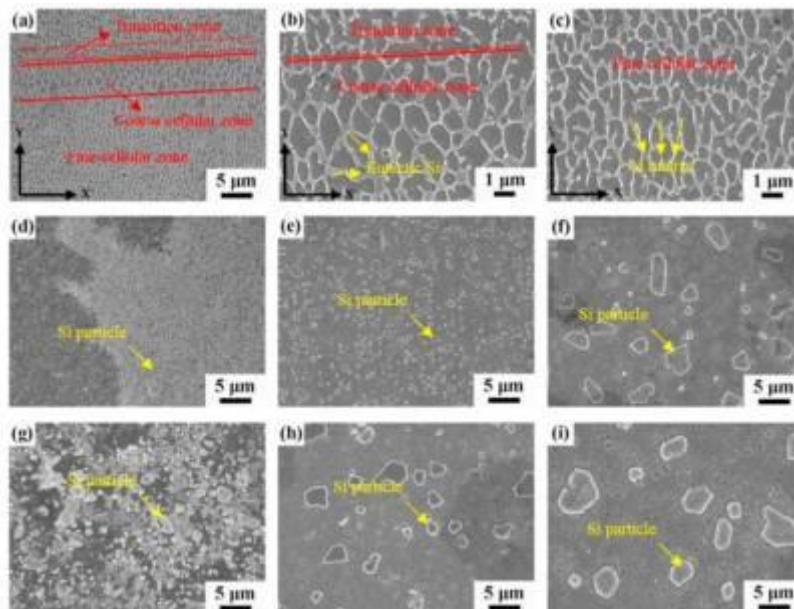
Slika 32 Usporedba laserske staze ovisna o brzini skeniranja [28]



Slika 33 Spajanje ovisno o brzini skeniranja (a) 250 mm/s, (b) 500 mm/s and (c) 750 mm/s [28]

Razmak između dvije laserske zrake pri skeniranju je također vrlo bitan parametar. Pokazali su da se uočavaju dovoljna preklapanja kada je staza manja od 150 μm . Kada se razmak između dvije staze poveća na 200 μm ili više, uočavaju se praznine/nedostatak preklapanja između susjednih staza. Može se pretpostaviti da se veći razmaci lasera mogu koristiti za ubrzanje procesa izrade kada se koristi mala debljina sloja. Optimalna udaljenost lasera poboljšava ne samo preklapanje između susjednih staza već i preklapanje unutar sloja ovisno o obliku laserske zrake. S druge strane, manji razmak između lasera povećava vrijeme izrade. Smanjena brzina hlađenja omogućuje stvaranje kontinuiranog i homogenog sloja [28, 29, 30]. SLM uzorci od AlSi10Mg legure pokazuju jedinstvenu mikrostrukturu koja se sastoji od dendritskih kristala $\alpha\text{-Al}$ okruženih eutektikom Al i Si precipitata slika 34. Mikrostruktura AlSi10Mg SLM uzoraka vrlo je slična onoj AlSi12 SLM uzoraka. Pokazano je da se mikrostruktura sa kristalnom morfologijom (ali tri različite veličine) primijećena preko staze taline može formirati zbog razlika u temperaturi. Različite morfologije su gruba zona,

prijelazna zona i fina zona. Gruba zona i prijelazna zona odgovaraju granici staze laserskog taljenja ili preklapanju staze, gdje se područje dvaput tali. Također je pokazano da se α -Al, Si i Mg₂Si faze formiraju u SLM uzorcima AlSi10Mg, što je utvrđeno iz XRD uzoraka [28, 29, 30].

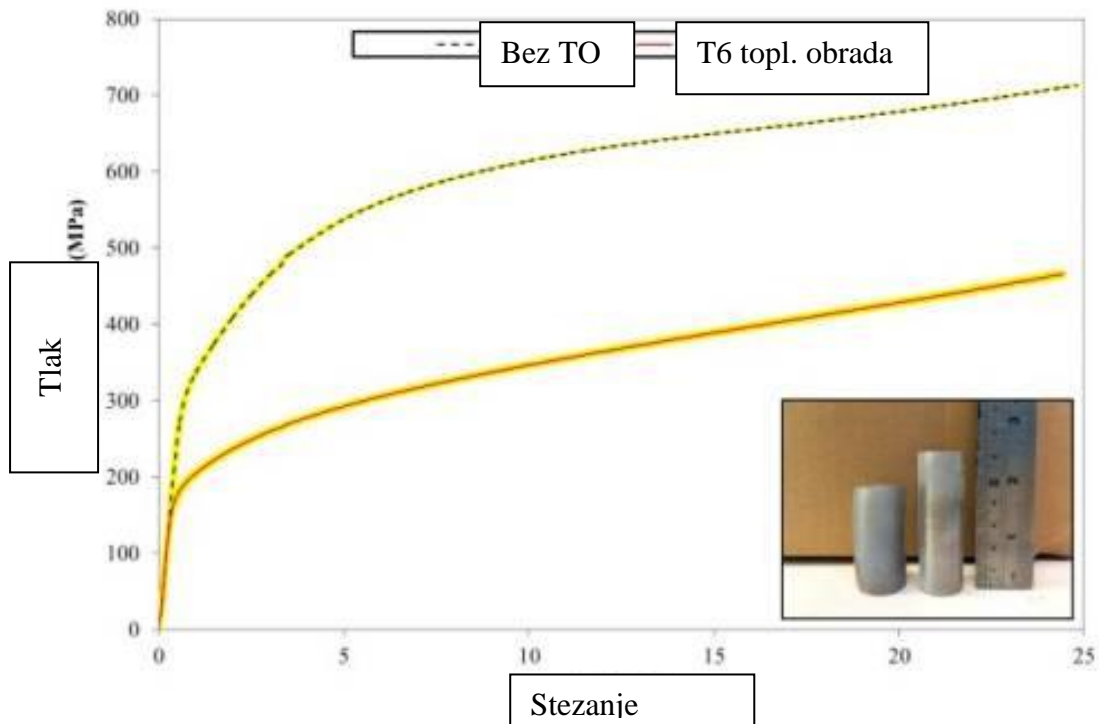


Slika 34 SEM prikaz AlSi10Mg SLM uzorka (a) jedna laserska staza (b) prijelazna i gruba zona (c) središte staze s finom mikrostrukturom; toplinski obrađeno (d) 723 K na 2 h (e) 773 K na 2 h (f) 823 K na 2 h (g) 723 K na 2 h + 453 K na 12 h (h) 773 K na 2 h + 453 K na 12 h (i) 823 K na 2 h + 453 K na 122 h [28]

Mehanička svojstva AlSi10Mg SLM uzorka detaljno su proučavana na različitim skalama (nano, mikro i makro razina). Pokazano je da je tvrdoća u bazenu taline ujednačena (varijacije tvrdoće su unutar granica eksperimentalne pogreške) za razliku od lijevanog uzorka, gdje tvrdoća varira između 70 i 80 HV. Takva prostorna ujednačenost tvrdoće posljedica je fine mikrostrukture s jednolikim raspodjelom Si. Treba napomenuti da materijal omekšava nakon tretmana žarenjem i iznos tvrdoće pada. Vickersova tvrdoća također je izmjerena za AlSi10Mg legure, gdje su SLM izrađeni uzorci pokazali tvrdoću od 125-130 HV, a tvrdoća pada gotovo na 100 HV nakon toplinskog tretmana. Tvrdoća pada između 30 i 80 HV ovisno o uvjetima žarenja i nikada ne doseže izvornu tvrdoću proizvedenog SLM stanja čak ni nakon tretmana precipitacijskim očvršćivanjem. Rezultati tvrdoće za AlSi10Mg leguru na različitim mjestima otkrivaju da je mikrostruktura lokalno jednolika u pripremljenim SLM uzorcima. Međutim, materijal se omekšava žarenjem i nije moguće vratiti tvrdoću izvornog SLM uzorka.[28, 29, 30].

Tlačno naprezanje uzorka AlSi10Mg u proizvedenom i u stanju nakon žarenja, prikazano je na slici 35. Uzorci pokazuju tipičan bačvasti oblik, slika 35, kao što je uobičajeno za legure na

bazi Al, gdje se uočava prisutnost heterogene deformacije. AlSi10Mg SLM uzorci imaju u proizvedenom stanju granicu tlačanja od 371 ± 2 MPa i krajnju čvrstoću (pri 25% deformacije) od 714 ± 1 MPa, dok žareni uzorak pokazuje pad u tlačnoj i krajnjoj čvrstoći kao što je prikazano na slici 35. Unatoč tome, tlačna čvrstoća SLM uzoraka sa i bez žarenja bila je viša nego kod lijevanog uzorka. Tablica 7 prikazuje tlačna svojstva SLM AlSi10Mg uzoraka proizvedenih sa i bez žarenja prema izvješćima različitih skupina [28, 29, 30].



Slika 35 Tlačno ispitivanje proizvedenog SLM uzorka i toplinski obrađenog SLM uzorka [28]

Tablica 7 Vlačna svojstva SLM AlSi10Mg uzoraka raznih studija [28]

| Proces | Stanje/toplinska obrada | Granica razvlačenja, MPa | Vlačna čvrstoća, MPa | Istezljivost, % |
|--------|-------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------|
| SLM | - | 208 | 368 | 4 |
| SLM | Horizontalna izvedba | 227 | 358 | 4 |
| SLM | Vertikalna izvedba | 172 | 289 | 3 |
| SLM | Kut građenja 0° | - | 420 | - |
| SLM | Kut građenja 45° | - | 405 | - |
| SLM | Kut građenja 90° | - | 360 | - |
| SLM | T4 | 119 | 212 | 12 |
| SLM | T6 | 210 | 269 | 10 |
| SLM | T6 | 187 ± 3 | 197 ± 4 | 20 ± 1 |
| SLM | T6 | 239 ± 2 | 292 ± 4 | 4 ± 1 |

Vlačna svojstva pripremljenih uzoraka SLM AlSi10Mg pokazuju varijacije u granici razvlačenja između 170 i 240 MPa, vlačnoj čvrstoći između 290 i 430 MPa i istežljivosti između 3 i 20%, ovisno o parametrima obrade i smjeru gradnje. Rezultati su rasipani, tj. neke studije otkrivaju minimalne promjene vlačnih svojstava bez obzira na smjer građenja, dok druge pokazuju značajan utjecaj smjera građenja na vlačna svojstva. Stoga se u ovom trenutku ne mogu izvući definitivni zaključci o ovisnosti vlačnih svojstava o smjeru građenja. Istezljivost se povećava kod toplinski obrađenih uzoraka, a čvrstoća uzoraka znatno opada zbog pogrubljivanja mikrostrukture. Konvencionalno ponašanje SLM uzoraka, gdje čvrstoća materijala opada s žarenjem i ne uspijeva se vratiti čak ni nakon precipitacijskog očvršćivanja, također je uočeno u ovom slučaju. Na sličan način to vrijedi i za rezultate tvrdoće [28, 29, 30].

6. EKSPERIMENTALNI DIO DIPLOMSKOG RADA

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada provedeno je ispitivanje i usporedba vlačnih svojstava lijevanih i SLM-om izrađenih uzoraka.

Ispitivanja su provedena na AlSi10Mg uzorcima prema normi HRN EN ISO 6892-1 na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Nakon provedenog vlačnog ispitivanja uzoraka, na prelomljenim uzorcima snimljeni su prijelomi uzoraka te njihova mikrostruktura.

6.1. Lijevani AlSi10Mg uzorci

Lijevani uzorci izrađeni su u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Materijal za lijevanje rastaljen je u peći izrađenoj od strane tvrtke "ELEKTROSANITARIJ". Maksimalna temperatura koju peć može dostići je 1100 °C. Peć je prikazana na slici 36, a proces taljenja aluminijske legure na slici 37.

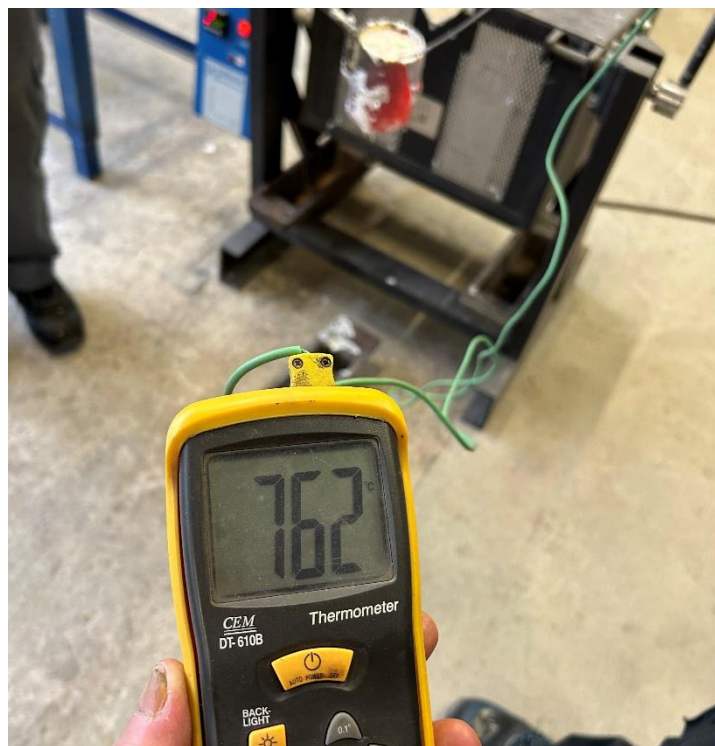


Slika 36 Peć korištena u eksperimentalnom dijelu rada za taljenja aluminijske legure



Slika 37 Taljenje aluminijske legure u peći

Temperatura taline aluminijske legure izmjerena je te iznosi 762 °C, što je prikazano na slici 38.



Slika 38 Mjerenje temperature taline

Rastaljena aluminijeva legura se ulijeva u trajni kalup koji se prije ulijevanja predgrijavao.

Temperatura na koju je kalup predgrijan je 163 °C, slika 39.



Slika 39 Temperatura trajnog kalupa prije ulijevanja

Slijedi ulijevanje rastaljene aluminijeve legure, te njeno skrućivanje unutar kalupa. Na slici 40 prikazane su 3 epruvete koje će se koristiti u eksperimentu.



Slika 40 Lijevane epruvete

6.2. SLM AlSi10Mg uzorci

SLM AlSi10Mg epruvete izrađene su na razvojno-edukacijskom centru za metalnu industriju – Metalska jezgra Čakovec. Epruvete su izrađene na laserskom printeru za metal EOS M 290 sljedećih specifikacija (slika 41):

- radni volumen (ŠxDxV): 250 mm x 250 mm x 325 mm
- vrsta lasera: Yb laser 400 W
- brzina laserske zrake u prolazu: 7 m/s
- promjer fokusa: 100 μm

Debljina sloja gradnje u smjeru Z osi su za aluminij AlSi10Mg 30 μm do 60 μm , za alatni čelik MS1 20 μm do 50 μm , za nehrđajući čelik 316L 40 μm



Slika 41 Laserski 3D printer za metal EOS M 290

Materijal koji se koristio za printanje epruvete je AlSi10Mg u praškastom obliku, slika 42.



Slika 42 Prašak AlSi10Mg

Izrađeno je 12 epruveta postupkom SLM-a na 3D printeru EOS M290. Debljina AlSi10Mg sloja iznosi 0,060mm, print je izveden u horizontalnom položaju. 3 epruvete koje nisu toplinske obrađene, 3 epruvete su obrađene homogenizacijskim žarenjem, 3 epruvete su

toplinski obrađene postupkom T6, dok su posljednje 3 epruvete obrađene postupkom T6, ali propisanim od strane proizvođača printera EOS-a. T6 toplinska obrada se provela na temperaturi od 530 °C u trajanju od 6 sati, nakon čega je uslijedilo gašenje i umjetno starenje u trajanju od 4 sata pri temperaturi od 160 °C te je uslijedilo hlađenje na zraku. EOS T6 toplinska obrada se provela na temperaturi od 530 °C u trajanju od 30 minuta, nakon čega je uslijedilo gašenje i umjetno starenje u trajanju od 6 sata pri temperaturi od 165 °C te je uslijedilo hlađenje na zraku. Epruvete koje su bile samo homogenizacijski žarene su obrađene na temperaturi od 530 °C u trajanju od 6 sati. Na slici 43 prikazane su epruvete izrađene postupkom aditivne proizvodnje u vodoravnom položaju.



Slika 43 Epruvete izrađene aditivnom proizvodnjom

6.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće epruveta

Ispitivanje vlačne čvrstoće epruveta napravljeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava u Zagrebu. Brzina ispitivanja iznosila je 3 mm/min. Na slici 44 prikazana je epruveta u kidalici s ekstenziometrom.



Slika 44 Epruveta u kidalici s ekstenziometrom

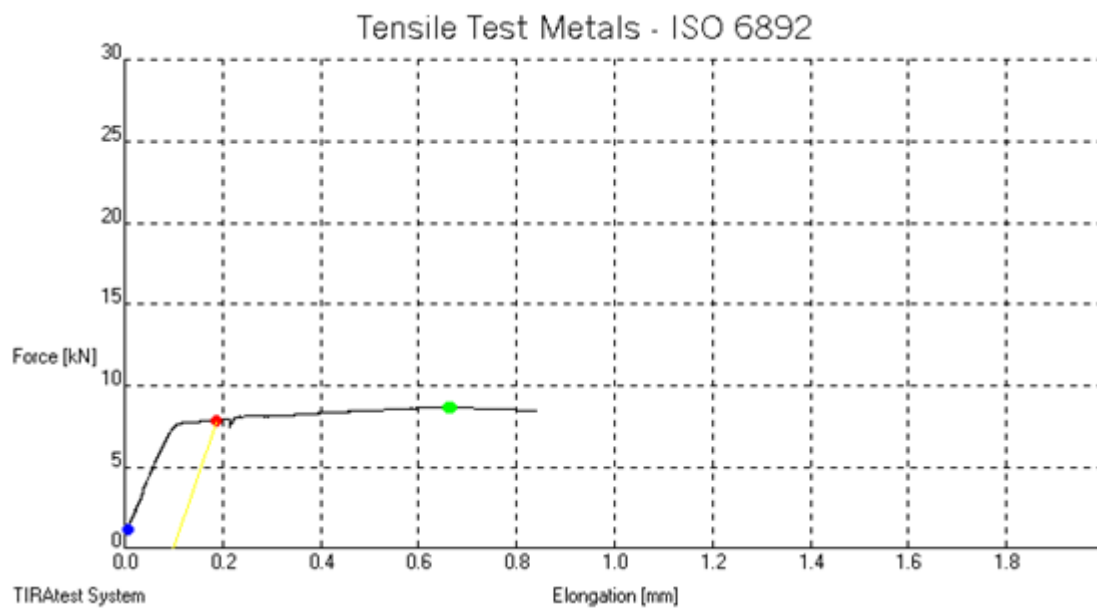
6.4. Rezultati vlačnog ispitivanja epruveta

Rezultati ispitivanja (tablica 8):

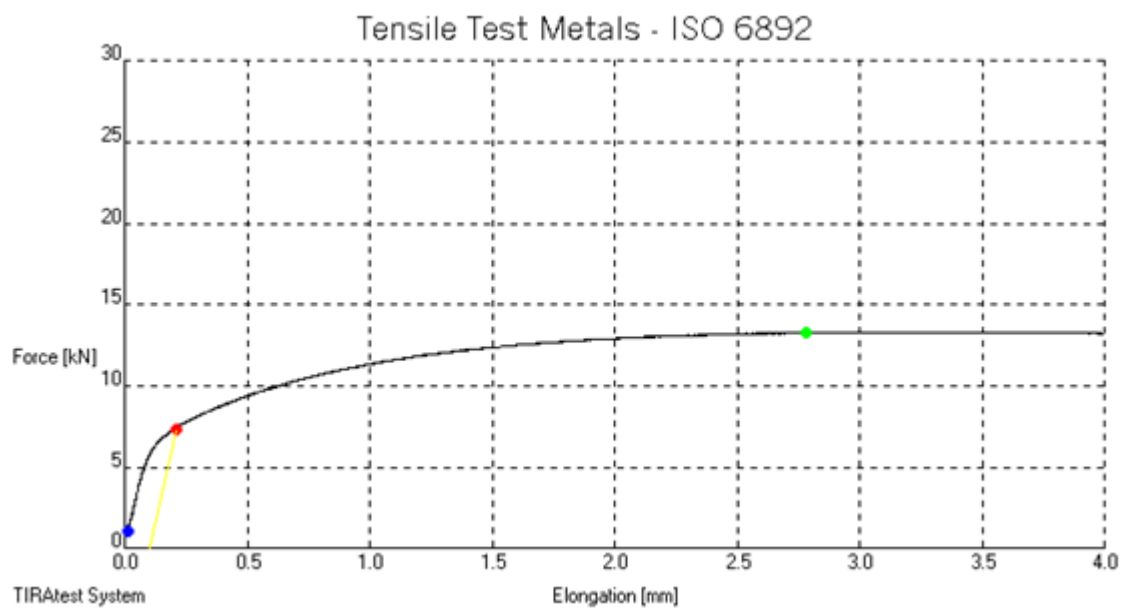
Tablica 8 Rezultati vlačnog ispitivanja

| Stanje | Uzorak | d , mm | $R_{p0,2}$, N/mm ² | R_m , N/mm ² | F_m , kN | F_k , kN | Istezljivost (A), % |
|-------------------------------|--------|----------|--------------------------------|---------------------------|------------|------------|---------------------|
| Lijevano | 1 | 7,96 | 100,81 | 171,63 | 8,58 | 8,58 | 4,3 |
| | 2 | 7,96 | 157,16 | 174,37 | 8,68 | 8,62 | 5,28 |
| | 3 | 7,97 | 92,97 | 94,72 | 4,73 | 4,52 | 1,44 |
| SLM, bez toplinske obrade | 1 | 8,01 | 263,86 | 437,02 | 22,02 | 22,01 | 6,68 |
| | 2 | 8,04 | 292,63 | 395,58 | 20,08 | 20,08 | 9,0 |
| | 3 | 8,03 | 265,24 | 426,06 | 21,59 | 21,52 | 6,52 |
| SLM, homogenizacijsko žarenje | 1 | 7,96 | 147,54 | 266,55 | 13,26 | 12,71 | 17,46 |
| | 2 | 7,96 | 146,40 | 264,83 | 13,18 | 12,67 | 18,96 |
| | 3 | 7,98 | 144,85 | 264,43 | 13,23 | 13,04 | 16,1 |
| SLM, T6 | 1 | 8,00 | 248,44 | 313,42 | 15,75 | 15,29 | 10,4 |
| | 2 | 7,98 | 261,81 | 319,0 | 15,95 | 15,72 | 9,86 |
| | 3 | 7,99 | 249,58 | 307,48 | 15,42 | 15,21 | 9,14 |
| SLM, EOS T6 | 1 | 8,00 | 289,24 | 332,55 | 16,72 | 15,51 | 9,18 |
| | 2 | 8,01 | 294,74 | 338,24 | 17,04 | 16,04 | 8,9 |
| | 3 | 8,02 | 281,82 | 334,41 | 16,89 | 16,18 | 9,02 |

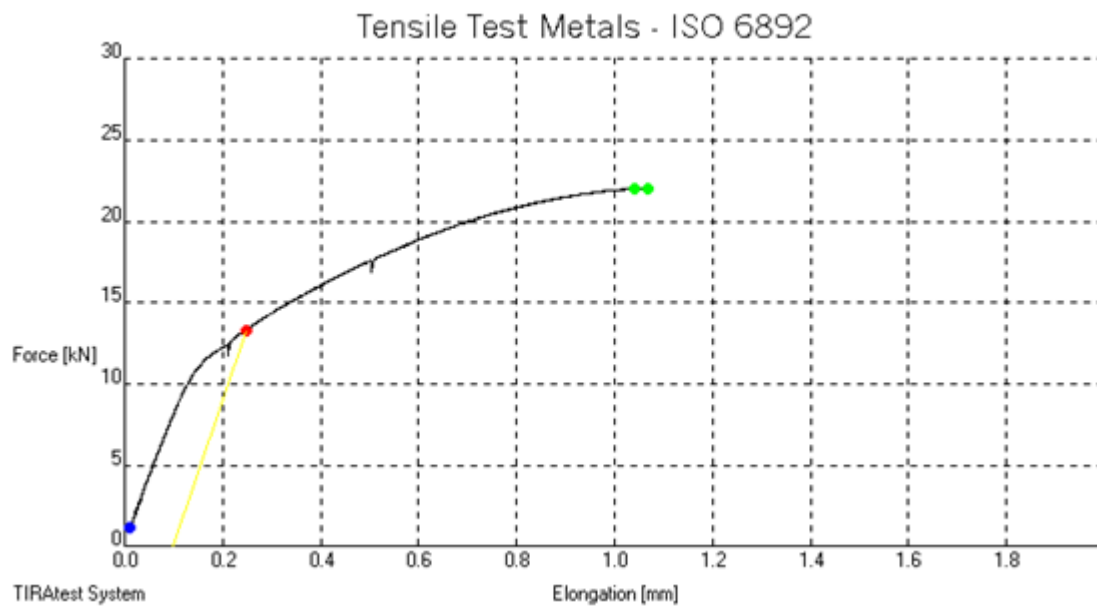
Iz tablice 8 može se uočiti kako uzorci koji su izrađeni postupkom SLM-a imaju veću granicu razvlačenja i veću vlačnu čvrstoću od lijevanih uzoraka. Također mehanička svojstva se mijenjaju ukoliko se epruvete toplinski obrade. Homogenizacijskim žarenjem se postiže eliminacija kristalnih segregacija [31]. U usporedbi T6 toplinske obrade i toplinske obrade T6 koju preporuča EOS, epruvete obrađene toplinskim postupkom koji preporuča EOS imaju bolja svojstva vlačne čvrstoće za približno 10%. Na slikama 45 do 49 prikazani su dijagrami sila – produljenje ispitivanih epruveta.



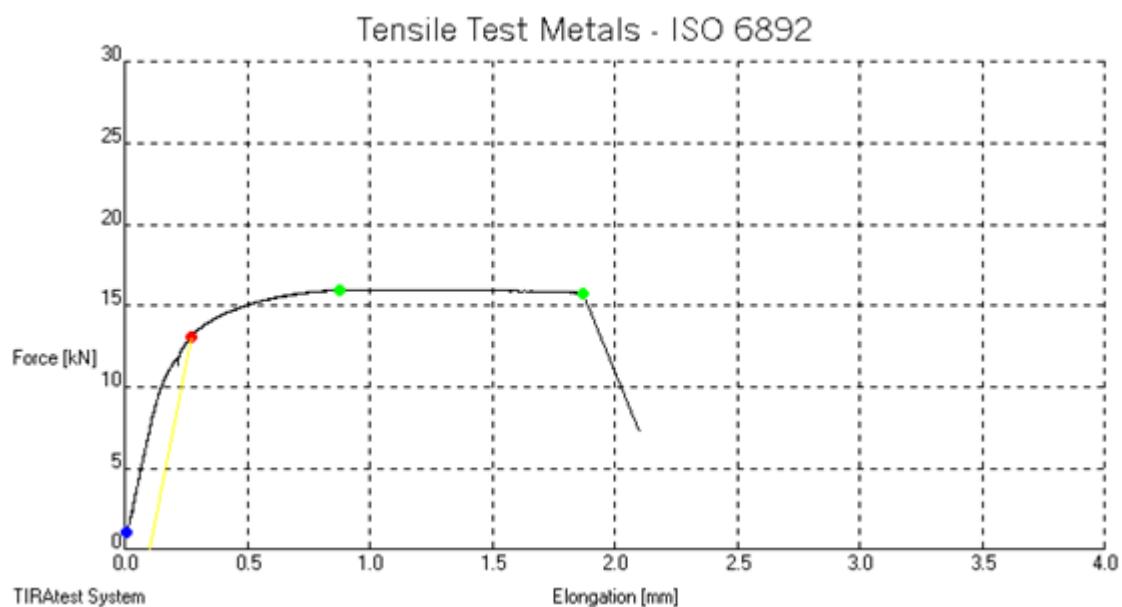
Slika 45 Dijagram sila - produljenje, uzorak 2, lijevano



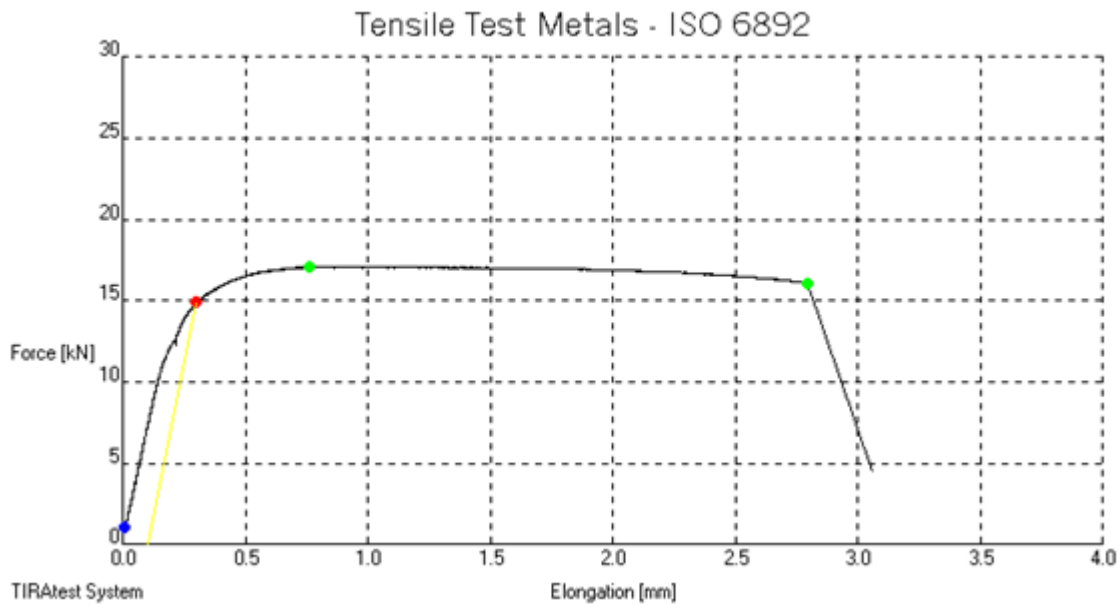
Slika 46 Dijagram sila - produljenje, uzorak 1, SLM, homogenizacijsko žarenje



Slika 47 Dijagram sila - produljenje, uzorak 1, SLM bez toplinske obrade

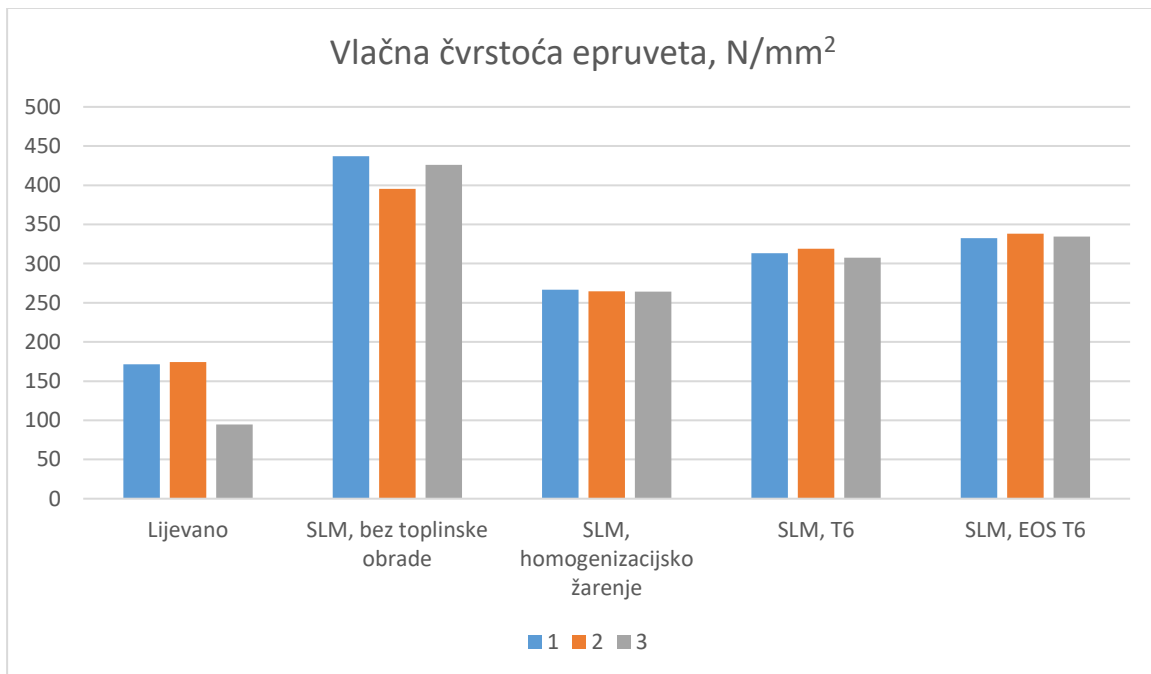


Slika 48 Dijagram sila - produljenje, uzorak 2, SLM, T6 toplinska obrada



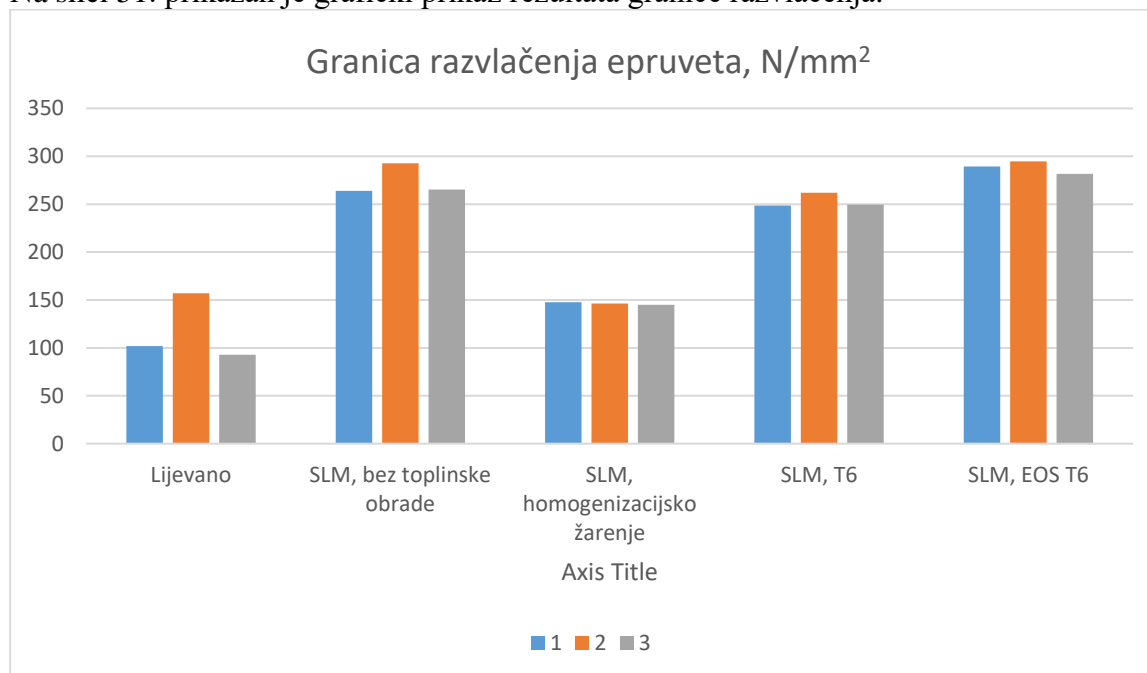
Slika 49 Dijagram sila - produljenje, uzorak 2, SLM, EOS T6 toplinska obrada

Na slici 50. prikazan je grafički prikaz rezultata vlačne čvrstoće.



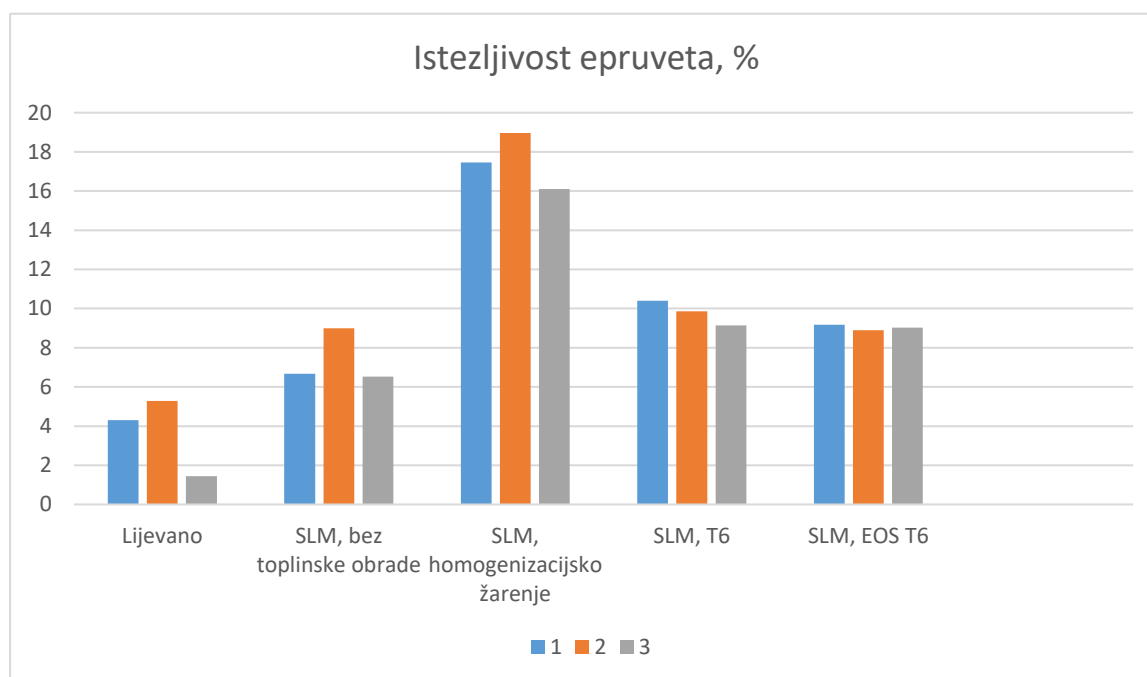
Slika 50 Grafički prikaz rezultata vlačne čvrstoće

Na slici 51. prikazan je grafički prikaz rezultata granice razvlačenja.



Slika 51 Grafički prikaz rezultata granice razvlačenja

Na slici 52. prikazan je grafički prikaz rezultata istežljivosti.

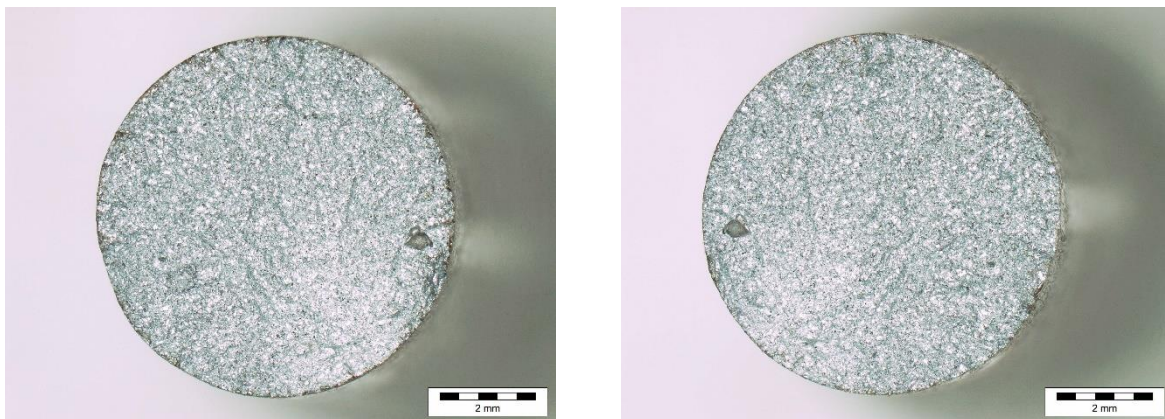


Slika 52 Grafički prikaz rezultata istežljivosti

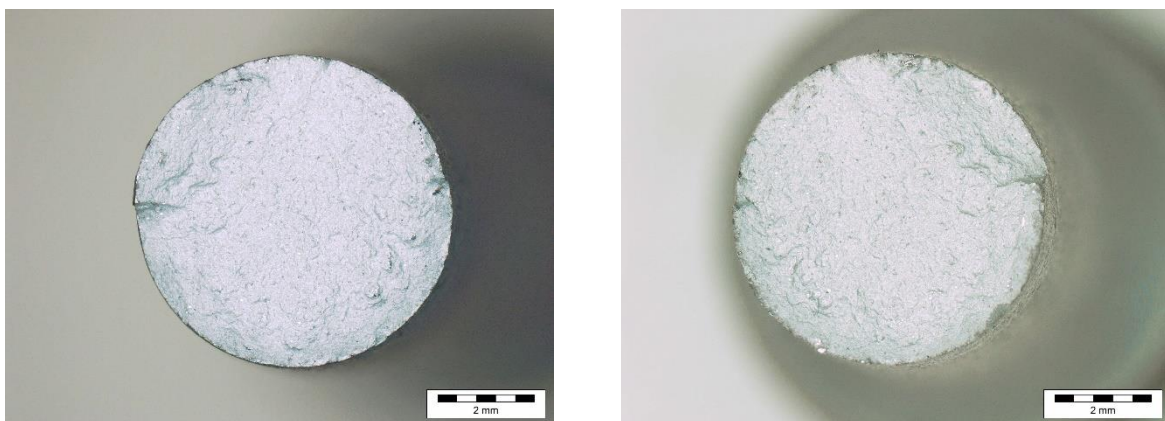
Uspoređujući rezultate iz tablice 7 i rezultate dobivene iz eksperimentalnog dijela rada može se zaključiti da su rezultati logični. Granica razvlačenja T6 toplinski obrađene epruvete iz tablice 7 manja je od granice razvlačenja epruveta koji su na isti način toplinski obrađene iz tablice 8, no istežljivost iste te epruvete je veća nego one iz tablice 8. Kao i za granicu razvlačenja isto vrijedi i za vlačnu čvrstoću.

6.5. Prijelomi epruveta

Pokidane epruvete su analizirane na Naravoslovnotehničkom fakultetu u Ljubljani, na odjelu za ljevarstvo. Kao što se može primijetiti iz slika 53-57 prijeloma, epruvete s najnepovoljnijim mehaničkim svojstvima imaju najveću razinu poroznosti, a to su epruvete lijevana 2, SLM homogenizacijski žarena epruveta 1, SLM toplinski neobrađena epruveta 1, SLM toplinski obrađena epruveta 2 i SLM EOS T6 toplinski obrađena epruveta 2.



Slika 53 Prijelom lijevane epruvete 2



Slika 54 Prijelom SLM homogenizacijski žarene epruvete 1



Slika 55 Prijelom SLM toplinski neobrađene epruvete 1



Slika 56 Prijelom SLM T6 toplinski obrađene epruvete 2

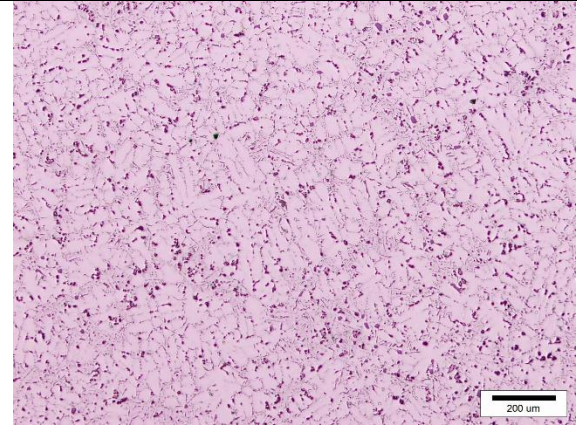
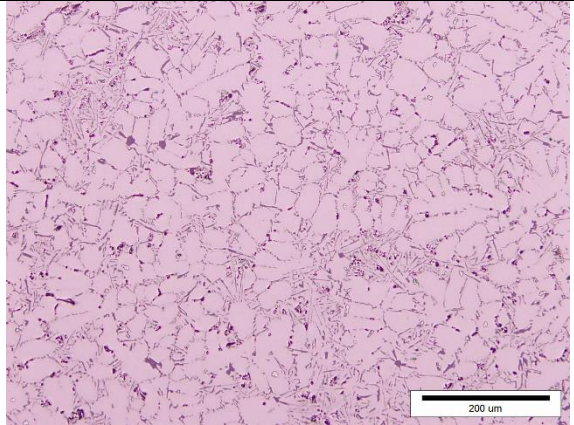
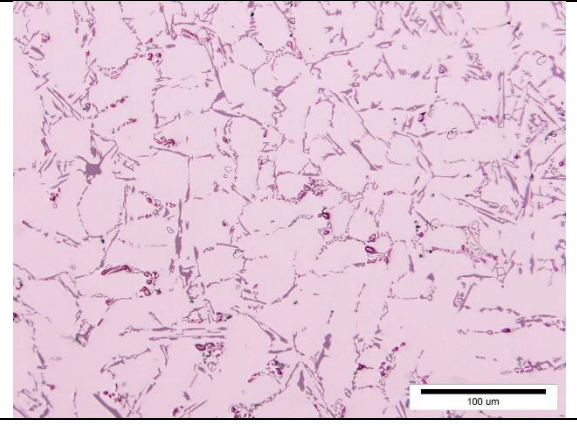
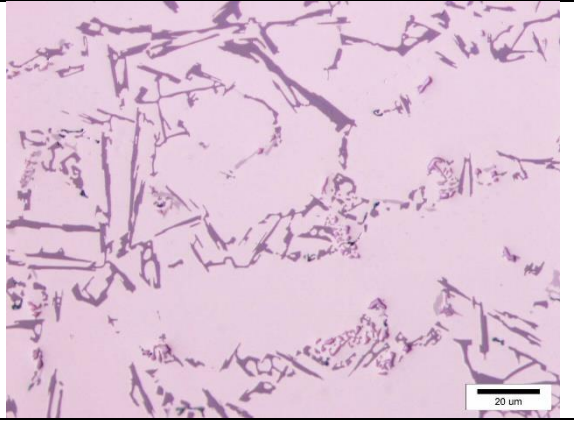
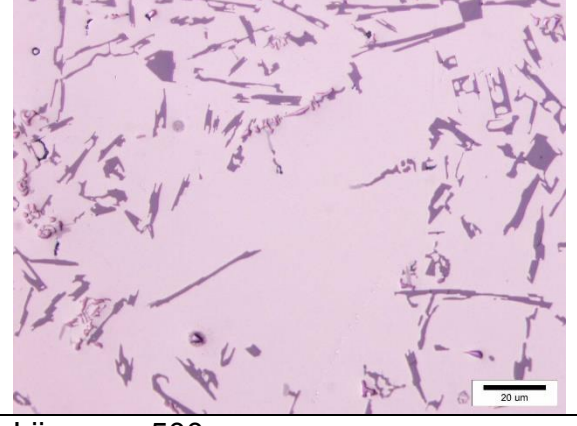
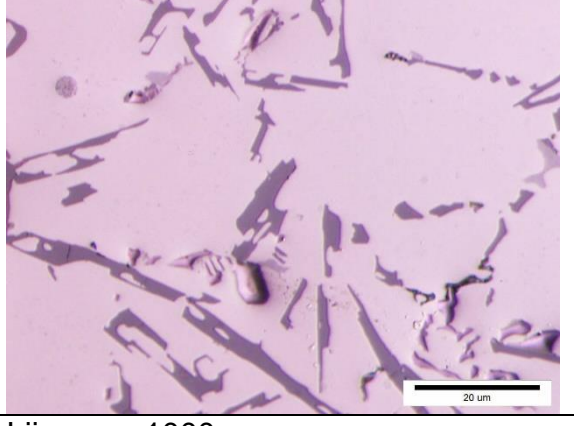


Slika 57 Prijelom SLM EOS T6 toplinski obrađene epruvete 2

6.6. Mikrostrukture epruveta

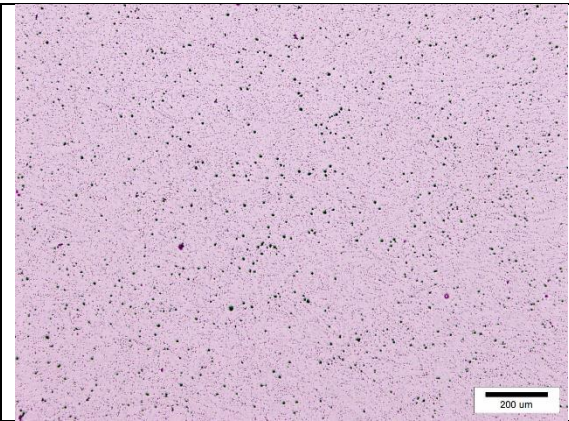
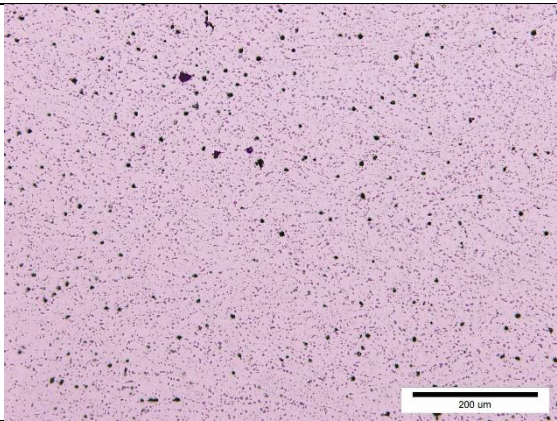
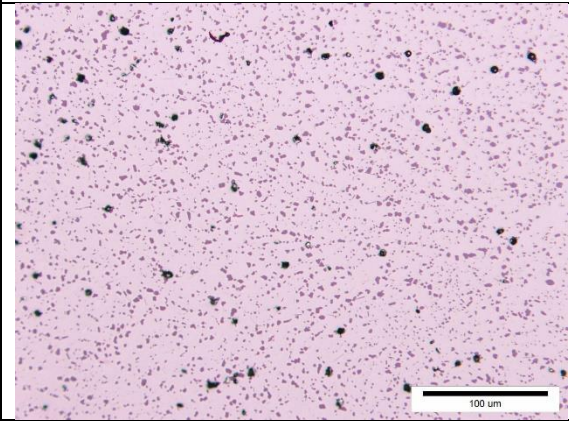
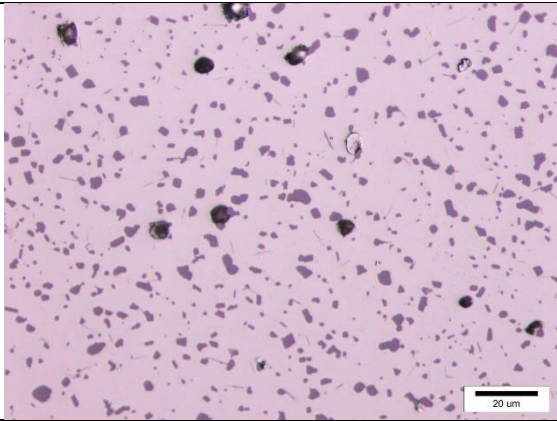
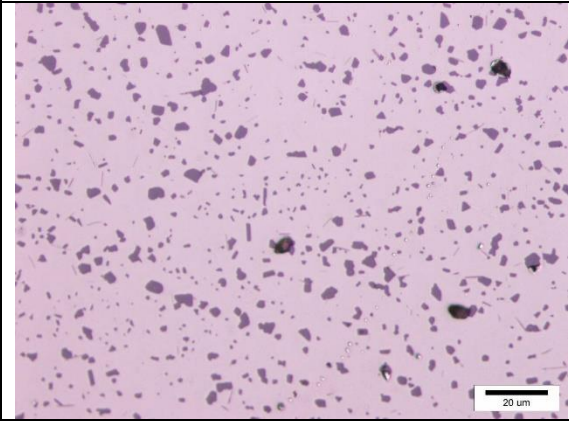
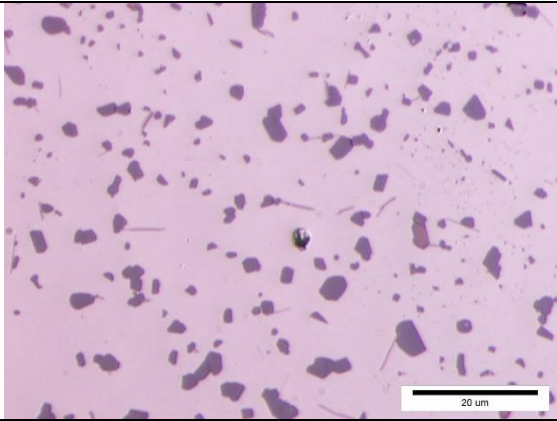
Mikrostrukture epruveta analizirane su na Naravoslovnotehničkom fakultetu u Ljubljani kao i prijelomi epruveta. U tablici 9 prikazane su mikrostrukture lijevanih epruveta.

Tablica 9 Mikrostruktura lijevanih epruveta

| | |
|---|--|
|  |  |
| Lijevano, 50x | Lijevano, 100x |
|  |  |
| Lijevano, 200x | Lijevano, 500x |
|  |  |
| Lijevano, 500x | Lijevano, 1000x |

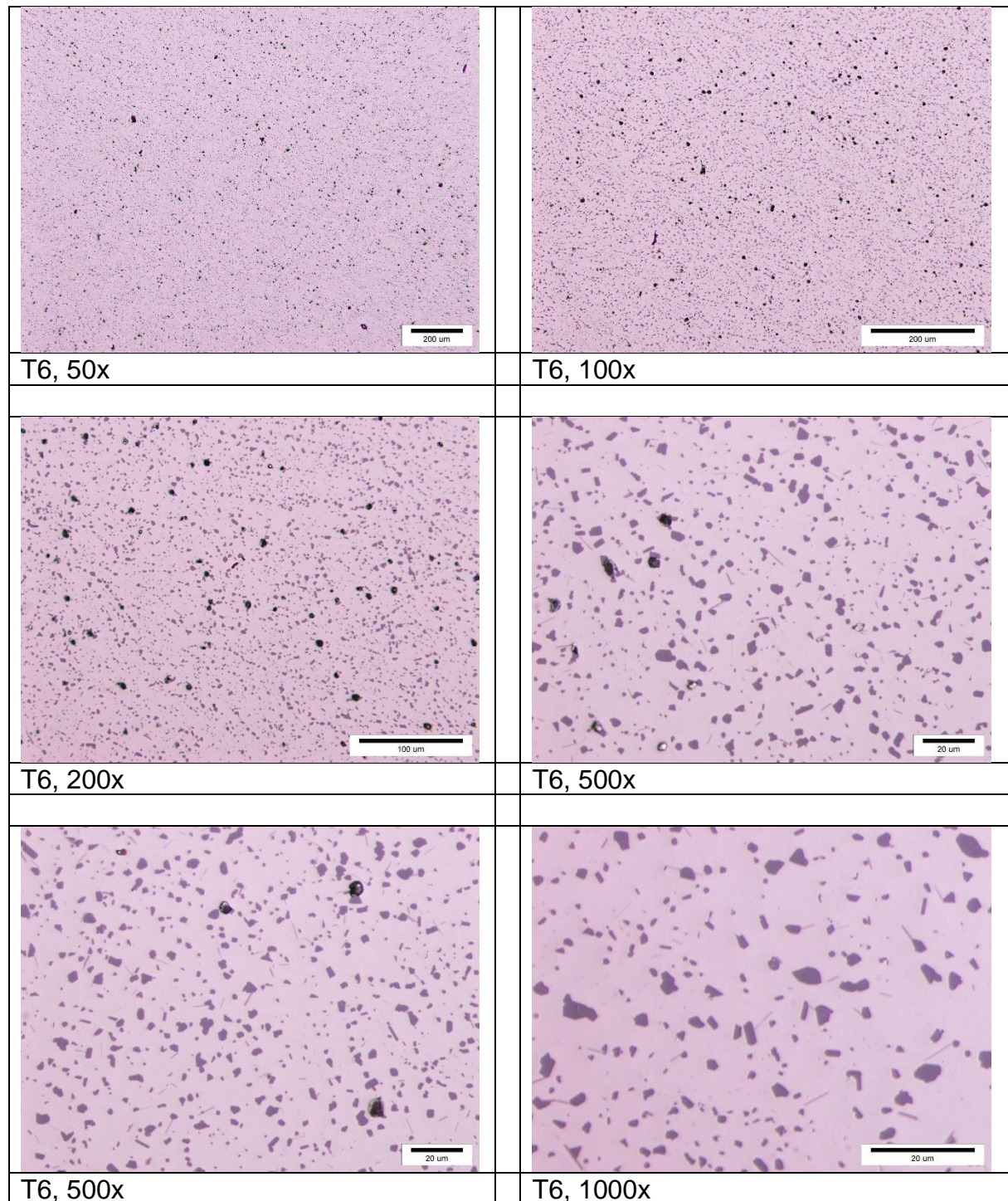
U tablici 10 prikazane su mikrostrukture SLM homogenizacijski žarenih epruveta.

Tablica 10 Mikrostruktura SLM homogenizacijski žarenih epruveta

| | |
|---|--|
|  |  |
| HOM, 50x | HOM, 100x |
|  |  |
| HOM, 200x | HOM, 500x |
|  |  |
| HOM, 500x | HOM, 1000x |

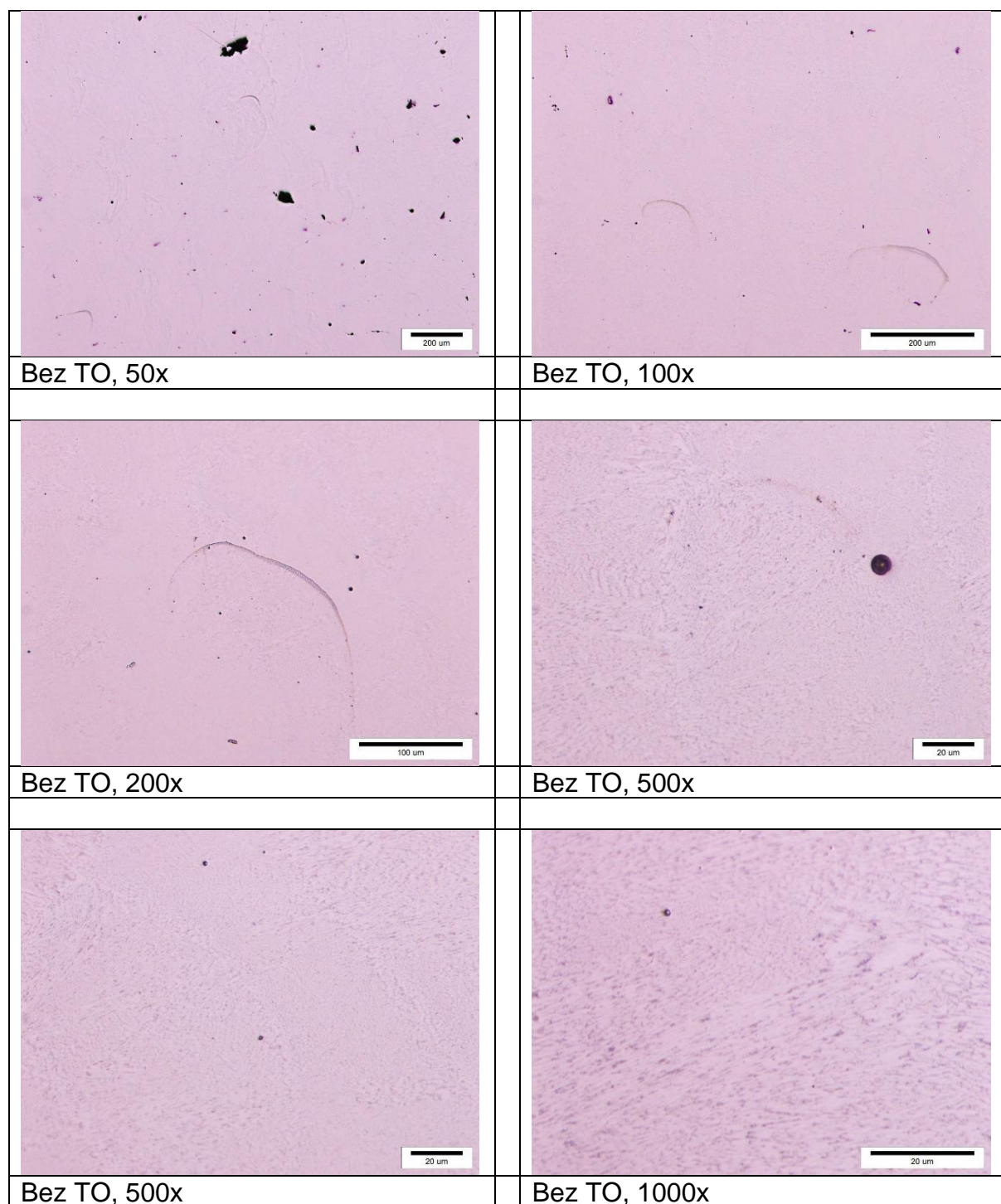
U tablici 11 prikazane su mikrostrukture SLM T6 toplinski obrađenih epruveta.

Tablica 11 Mikrostruktura SLM T6 toplinski obrađenih epruveta



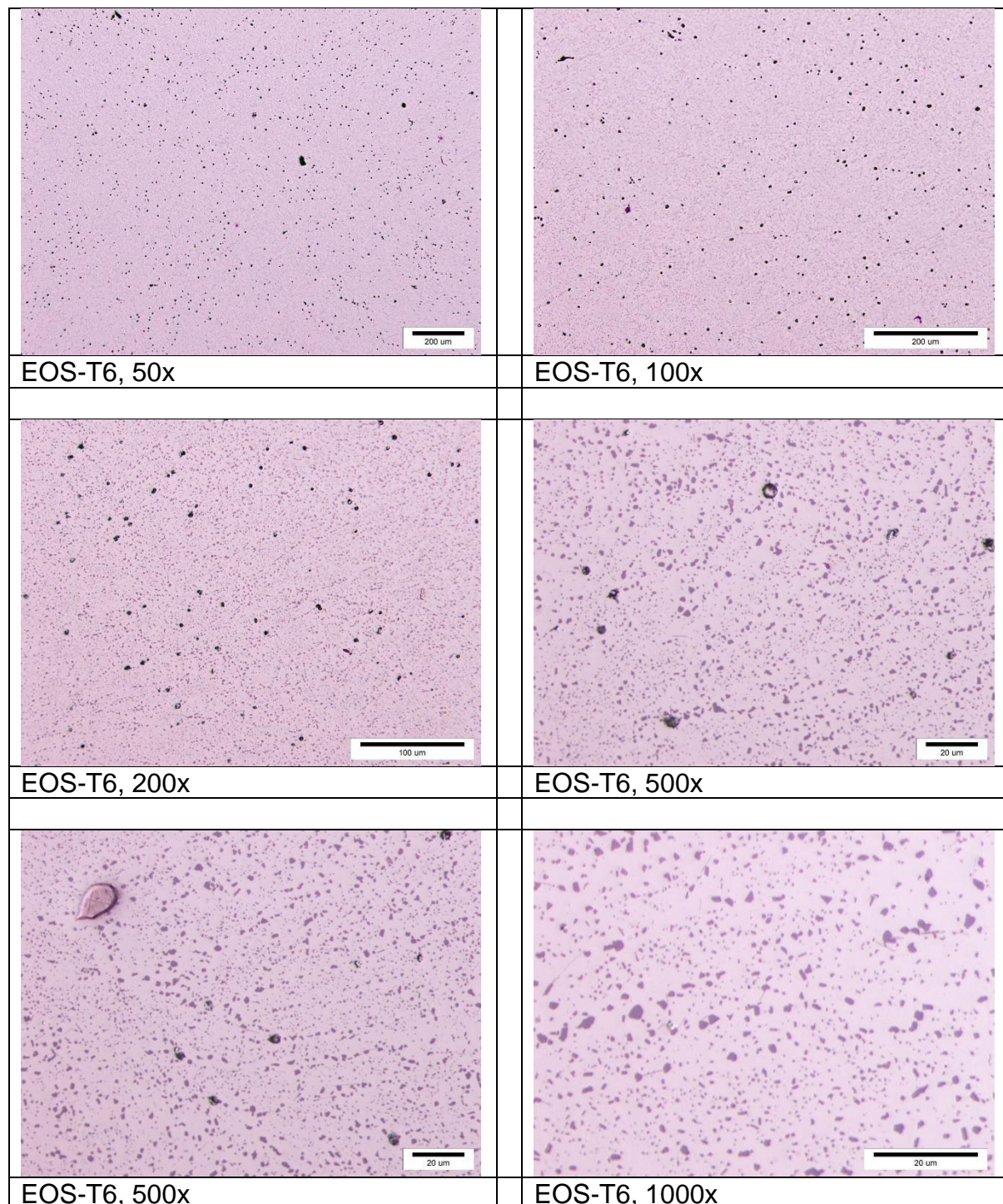
U tablici 12 prikazane su mikrostrukture SLM toplinski neobrađenih epruveta.

Tablica 12 Mikrostruktura SLM toplinski neobrađenih epruveta



U tablici 13 prikazane su mikrostrukture EOS T6 toplinski obrađenih epruveta.

Tablica 13 Mikrostruktura EOS T6 toplinski obrađenih epruveta



6.6.1. Analiza mikrostrukture epruveta

Iz mikrostrukture u tablicama 9-13 može se zaključiti da mikrostruktura lijevanih AlSi10Mg epruveta sadrži velike alfa Al dendrite. Zbog fine mikrostrukture i fino raspoređene Si faze SLM izrađenih epruveta tvrdoća im je veća nego lijevanih, a i vlačna svojstva su im bolja. Toplinskom obradom T6 Si poprima kuglaste oblike

7. ZAKLJUČAK

Zbog dobrih svojstva, aluminij i njegove legure se primjenjuju u raznim industrijama, najviše radi jako male gustoće što čini vrlo pogodnim materijalom za automobilsku i avio industriju. Zbog jako dobre korozijske postojanosti moguće ih je primjenjivati u vrlo agresivnim okolinama. Kako elementarni aluminij ne ispunjava potrebna svojstva koja se zahtijevaju od modernih materijala, koriste se aluminijske legure. Ovisno o kemijskom sastavu aluminijskih legura, mogu se vrlo povoljno mijenjati i svojstva materijala.

Prilikom izrade proizvoda od AlSi10Mg, mogu se birati razni postupci s kojim će se doći do zahtijevanog proizvoda. Jedan od postupaka je lijevanje. U ovom radu se stavlja naglasak na gravitacijsko lijevanje navedene legure u trajne kalupe. Najveća prednost lijevanja aluminijskih legura u trajne kalupe je velika proizvodnost ukoliko se proces automatizira i niska cijena po lijevanom proizvodu. No, valja uzeti u obzir da najčešće je to proizvod kojeg je naknadno potrebno obraditi nekom od tehnologija odvajanja čestica. Jedan od minusa, je upravo što onog trenutka kada se talina ulije u kalup je taj što je vrlo teško kontrolirati proces skrućivanja. Tu se dolazi do problema poroznosti koji narušava mehanička svojstva odljevaka.

Selektivnim laserskim taljenjem moguće je dobiti različite kompleksne geometrije izradaka. To je ujedno i glavna prednost nad tradicionalnim pristupom u proizvodnji. U usporedbi s lijevanjem, AlSi10Mg proizvodi izrađeni SLM tehnologijom daju bolja svojstva, osobito u pogledu poroznosti. Poroznost SLM izrađenih proizvoda najviše ovisi o parametrima vođenja procesa. Glavni nedostatak ovakvog tipa proizvodnje je cijena samog stroja, ali i materijala jer ukoliko materijal koji se koristi ima neki nedostatak, svojstva se vrlo narušavaju.

U diplomskom radu izvršen je eksperiment čiji je cilj usporediti vlačna svojstva epruveta lijevanih od AlSi10Mg i SLM izrađenih epruveta. Ispitivanje je provedeno na 15 epruveta, od kojih su 3 lijevane u trajnom kalupu, 3 su izrađene SLM postupkom, 3 su izrađene SLM postupkom te je provedeno homogenizacijsko žarenje, 3 su izrađene SLM postupkom te su toplinski obrađene postupkom T6 i posljednje 3 su izrađene SLM postupkom i toplinski su obrađene postupkom EOS T6.

Nakon provedenog ispitivanja utvrđeno je:

- Lijewane epruvete imaju lošija mehanička svojstva od SLM izrađenih epruveta.
- Toplinskom obradom se vlačna čvrstoća SLM epruveta smanjuje, a istežljivost raste.
- EOS T6 toplinskom obradom ne postižu se značajno bolja vlačna svojstva od tradicionalne T6 toplinske obrade.

LITERATURA

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>, pristupljeno kolovoz 2022.
- [2] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Alauni>, pristupljeno kolovoz 2022.
- [3] Branko Bauer, Ivana Mihalic Pokopec, Ljevarstvo, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [4] Branko Bauer, Ivana Mihalic Pokopec, Osnove tehnologije lijevanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [5] Branko Bauer, Ljevarstvo, nastavna literatura, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Sand_casting, pristupljeno kolovoz 2022.
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Loam_molding, pristupljeno kolovoz 2022.
- [8] David Weiss, Advances in the Sand Casting of Aluminium Alloys, Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Full-mold_casting, pristupljeno kolovoz 2022.
- [10] Roger Lumley, Fundamentals of aluminium metallurgy, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, UK, Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [11] George E. Totten, D. Scott MacKenzie, Handbook of Aluminum, New York, Marcel Dekker, 2003.
- [12] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>, pristupljeno kolovoz 2022.
- [13] https://www.anixter.com/en_au/resources/literature/wire-wisdom/copper-vs-aluminum-conductors.html?timeout=true, pristupljeno kolovoz 2022.
- [14] Subodh K. Das, Weimin Yin, The Worldwide Aluminum Economy: The Current State of the Industry, JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, Pittsburgh, 2007.
- [15] Manan Kasabwala, Aaditya Ajaykumar Patel, A Study on Fibre Optics Sensors and its Application in Structural Health Monitoring of Aerospace Systems, Carleton University, 2019.
- [16] <https://matmatch.com/learn/material/cast-wrought-aluminium>, pristupljeno rujan 2022.
- [17] Joseph R. Davis, Alloying: Understanding the Basics, ASM International, Materials Park, Ohio, 2001.

- [18] <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/qa/How-and-why-alloying-elements-are-added-to-aluminum.cfm>, pristupljeno rujna 2022.
- [19] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [20] ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures 2004, ASM International, 2004.
- [21] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=348>, pristupljeno rujna 2022.
- [22] Z. Zhang, M.-Y. Liu, F. Breton, X.-G. Chen, Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg permanent mould and high pressure vacuum die casting, Canadian Institute of Mining, Metallurgy & Petroleum, Saguenay, 2018.
- [23] Amit Bandyopadhyay Susmita Bose, Additive Manufacturing, CRC Press, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, 2020.
- [24] <https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/261-stereolithography.pdf>, pristupljeno rujna 2022.
- [25] <https://all3dp.com/1/better-heat-exchangers-with-additive-manufacturing/>, pristupljeno rujna 2022.
- [26] Mladen Šercer, Damir Godec, Ana Pilipović, Aditivne tehnologije za mala i srednje velika poduzeća, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [27] <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>, pristupljeno studeni 2022.
- [28] Emrah Celik, Additive Manufacturing, De Gruyter, University of Miami, SAD, 2020.
- [29] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7602471/>, pristupljeno studeni 2022.
- [30] David Fisher, Additive Manufacturing of Metals, Material Research Forum LLC, Millersville, SAD, 2020.
- [31] Mladen Stupnišek, Franjo Cajner, Osnove toplinske obradbe metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.