

# Primjena aditivne proizvodnje za izradu rešetkastih pramodela za klasične postupke lijevanja metala

---

**Fraj-Sladoljev, Roman**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*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:235:571727>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-21**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Roman Fraj-Sladoljev**

Zagreb, 2025. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Roman Fraj-Sladoljev

Zagreb, 2025. godina.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Ani Pilipović na vrlo zanimljivoj temi te pristupačnosti, strpljenju i predanosti prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se asistentu Bruni Krajačiću na neizmjernom trudu, strpljenju i uloženom vremenu te udijeljenom znanju i mnogobrojnim savjetima.

Zahvaljujem se tvrtki Izit d.o.o. koja je omogućila primjenu softvera nTopology bez kojeg ovaj rad ne bi bio moguć.

Zahvaljujem se Dori što me podnosi sve ove godine i uvijek je tu uz mene.

Za kraj se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci i strpljenu tijekom ovog kratkog studiranja.

Roman Fraj-Sladoljev





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
 Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
 mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Roman Fraj-Sladoljev** JMBAG: 0035217158

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena aditivne proizvodnje za izradu rešetkastih pramodela za klasične postupke lijevanja metala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of additive manufacturing in production of lattice patterns for classical metal casting**

Opis zadatka:

Aditivna proizvodnja je postupak izrade tvorevina komplicirane geometrije u kratkom vremenu na temelju 3D CAD modela. U novije vrijeme pokazala se kao odličan način za izradu pramodela, jezgri i kalupa za lijevanje uz niske troškove, veću učinkovitost i točnost. CNC obrada je najčešći način izrade pramodela za lijevanje, ali taj postupak ima ograničenje kad je riječ o kompliciranim geometrijama (npr. izrada rešetkaste strukture, topološki optimirane strukture, tankih stijenki, unutarnjih kanala, itd.).

Sukladno tome u radu je potrebno opisati postupke lijevanja metala koji za izradu kalupne šupljine primjenjuju pramodele koji se izrađuju aditivnom proizvodnjom, opisati moguće materijale za izradu pramodela aditivnom proizvodnjom i navesti njihova svojstva. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je modelirati različite rešetkaste (čelijaste) strukture u softveru *nTop*. Nadalje potrebno je izabrati rešetkastu strukturu koja se može izraditi na dostupnim 3D pisačima te koja može poslužiti za dobivanje kalupne šupljine u kalupima za lijevanje metala. Nakon izrade pramodela, potrebno je izraditi kalup s tim pramodelom i napraviti postupak lijevanja metala u taj kalup.

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

Zadatak zadan:

28. studeni 2024.

Datum predaje rada:

30. siječnja 2025.

Predviđeni datumi obrane:

6., 7. i 10. veljače 2025.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović

Ana Pilipović

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Ivica Garašić

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
2. LIJEVANJE METALA .....	2
<b>2.1. Povijest lijevanja metala .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Postupci lijevanja metala .....</b>	<b>5</b>
2.2.1. Pješčani lijev .....	8
2.2.2. Školjkasti lijev .....	10
2.2.3. Točni (precizni) lijev .....	11
3. PRAMODEL .....	15
<b>3.1. Čelijasta struktura .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2. Metode izrade pramodela .....</b>	<b>16</b>
3.2.1. Posredna metoda .....	16
3.2.2. Izravna metoda .....	17
<b>3.3. Aditivna proizvodnja .....</b>	<b>23</b>
3.3.1. Taložno očvršćivanje (FDM) .....	24
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	26
<b>4.1. Pregled struktura .....</b>	<b>26</b>
4.1.1. Norma za ispitivanje ćelijastih struktura .....	32
<b>4.2. Zahtjevi ljevačkog postupka .....</b>	<b>33</b>
<b>4.3. Izrada pramodela .....</b>	<b>33</b>
<b>4.4. Kalupljenje .....</b>	<b>37</b>
4.4.1. Točni lijev s gipsanim kalupom .....	37
4.4.2. Točni lijev s keramičkom školjkom .....	42
4.4.2.1. Keramička suspenzija na bazi natrijevog silikata .....	42
4.4.2.2. Keramička suspenzija na bazi koloidne silike .....	46

<b>4.5. Izgaranje pramodela i žarenje kalupa .....</b>	<b>52</b>
<b>4.6. Lijevanje metala.....</b>	<b>53</b>
<b>4.7. Vađenje odljevaka iz kalupa i čišćenje .....</b>	<b>59</b>
<b>4.8. Rezultati.....</b>	<b>61</b>
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>64</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>65</b>

**POPIS SLIKA**

Slika 2.1. Dijagram toka industrijskog procesa lijevanja školjkastim lijevom [24] .....	2
Slika 2.2. Brončana vrata dvorske kapele Karla Velikog u Aachenu [29] .....	4
Slika 2.3. Kalup kod pješčanog lijeva [34] .....	9
Slika 2.4. Shema proizvodnje pješčanog lijeva [34] .....	10
Slika 2.5. Shema proizvodnje školjkastog lijeva [36] .....	11
Slika 2.6. Shema proizvodnje točnog lijeva [33] .....	13
Slika 3.1. Postupak izrade silikonskog matičnog kalupa [33] .....	17
Slika 3.2. Izgaranje polimera [47] .....	21
Slika 3.3. Dijagram istezljivost – temperatura za ispitivane polimere i keramičku školjku točnog lijeva na zraku [47] .....	22
Slika 3.4. Shema postupka taložnog očvršćivanja [66] .....	24
Slika 4.1. Ispitna tijela štapnih struktura uz pravokutno mapiranje .....	28
Slika 4.2. Ispitna tijela ćelijastih struktura uz pravokutno mapiranje .....	28
Slika 4.3. Potporna struktura u obliku plašta prije odstranjivanja s ispitnog tijela .....	29
Slika 4.4. Mapiranje ćelija .....	30
Slika 4.5. Usporedba pravokutno i cilindrično mapiranih ćelijastih ispitnih tijela .....	31
Slika 4.6. Presjek ćelijaste strukture SplitP .....	32
Slika 4.7. Modeli u pripremi za 3D ispis taložnim očvršćivanjem .....	34
Slika 4.8. Pripremljeni modeli za 3D ispis taložnim očvršćivanjem .....	35
Slika 4.9. Presjek strukture u razini prvog sloja gornje cilindrične ploče .....	36
Slika 4.10. Detalj koncentričnog uzorka .....	36
Slika 4.11. Pramodeli izrađeni postupkom FDM u <i>Polycast</i> materijalu .....	37
Slika 4.12. Pramodel žiroidne strukture za gipsani kalup .....	38
Slika 4.13. Sastojci kalupne mješavine gipsanog kalupa u omjerima .....	39
Slika 4.14. Staklena vlakna za ojačavanje gipsanog kalupa .....	39
Slika 4.15. Uranjanje pramodela u kalupnu mješavinu .....	40
Slika 4.16. Vješanje pramodela za kalupljenje .....	40
Slika 4.17. Gipsani kalup nakon inicijalnog stvrdnjavanja .....	41
Slika 4.18. Gipsani kalup nakon sušenja .....	42
Slika 4.19. Uranjanje pramodela u keramičku suspenziju na bazi natrijevog silikata .....	43

Slika 4.20. Posipavanje pramodela vatrostalnim agregatom .....	43
Slika 4.21. Uranjanje pramodela u kloridnu kupku .....	44
Slika 4.22. Sušenje keramičke školjke u peći .....	45
Slika 4.23. Osušena školjka proizvedena keramičkom suspenzijom na bazi natrijevog silikata .....	46
Slika 4.24. Pramodeli dijamantne, splitP i lidinoidne strukture .....	47
Slika 4.25. Uranjanje pramodela u keramičku suspenziju na bazi koloidne silike.....	48
Slika 4.26. Pramodel splitP strukture posipan agregatom .....	49
Slika 4.27. Sušenje keramičkih školjki na bazi koloidne silike.....	50
Slika 4.28. Osušene, nežarene keramičke školjke na bazi koloidne silike premazane završnim slojem suspenzije .....	51
Slika 4.29. Izgaranje pramodela i žarenje keramičkih školjki .....	52
Slika 4.30. Izgaranje pramodela u gipsanom kalupu .....	53
Slika 4.31. Taljenje cinkove legure ZAMAK 410 u plinskoj peći .....	54
Slika 4.32. Lijevanje legure u gipsani kalup.....	55
Slika 4.33. Lijevanje legure u keramičku školjku na bazi natrijevog silikata .....	55
Slika 4.34. Lijevanje legure u keramičku školjku na bazi koloide silike .....	56
Slika 4.35. Postupak lijevanja.....	56
Slika 4.36. Rezultat lijevanja u gipsani kalup.....	57
Slika 4.37. Rezultat lijevanja u keramičku školjku na bazi natrijevog silikata .....	58
Slika 4.38. Rezultat lijevanja u keramičku školjku na bazi koloidne silike .....	58
Slika 4.39. Razbijanje keramičke školjke .....	59
Slika 4.40. Odljevak žiroidne strukture nakon grubog odstranjivanja keramičke školjke .....	60
Slika 4.41. Odljevci lidinoidne, splitP i dijamantne strukture nakon grubog odstranjivanja keramičke školjke .....	60
Slika 4.42. Odljevci nakon čišćenja vodenim mlazom .....	61
Slika 4.43. Površine odljevaka a) žiroidne, b) lidinoidne, c) splitP i d) dijamantne strukture	62

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Veza između uzroka i greške [33] .....	6
Tablica 3.1. Fizikalna svojstva [50] .....	18
Tablica 3.2. Kemijska postojanost [50] .....	19
Tablica 3.3. Toplinska svojstva [50] .....	19
Tablica 3.4. Mehanička svojstva [50] .....	19
Tablica 3.5. Preporučeni parametri za ispis [50] .....	20
Tablica 3.6. Koeficijenti toplinskog rastezanja za ispitivane polimere i keramičku školjku pri različitim temperaturnim intervalima [47] .....	22

## **POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
+		česti uzrok ljevačke greške
*		rjeđi uzrok ljevačke greške

**POPIS KRATICA**

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
ABS	akrilonitril-butadien-stiren (eng. <i>acrylonitrile butadiene styrene</i> )
DMLS	izravno srašćivanje metala s pomoću lasera (eng. <i>Direct Metal Laser Sintering</i> )
EBM	taljenje elektronskim snopom (eng. <i>Electron Beam Melting</i> )
FDM	taložno očvrščivanje (eng. <i>Fused Deposition Modeling</i> )
SLM	selektivno lasersko taljenje (eng. <i>Selective Laser Melting</i> )
SLS	selektivno lasersko srašćivanje (eng. <i>Selective Laser Sintering</i> )
MME	taložno očvrščivanje (eng. <i>Fused Deposition Modeling</i> )
PET-G	Poli(etilen-tereftalat) modificiran glikolom (eng. <i>polyethylene terephthalate glycol</i> )
PLA	polilaktična kiselina (eng. <i>polylactic acid</i> )



## SAŽETAK

Ovim diplomskim radom potvrdila se mogućnost primjene aditivne tehnologije, odnosno postupka taložnog očvršćivanja (FDM) za izradu odljevaka složenih ćelijastih struktura. Analizirani su parametri i izvedivost svakog koraka procesa, od modeliranja pramodela do završnog lijevanja metala u izrađeni kalup. Struktura pramodela modelirana je u softveru *nTopology*, dodatni elementi u softveru *Solidworks* te optimiranje modela za izradu postupkom FDM u programu za pripremu *Orcaslicer*. Ovakvim pristupom omogućila se kontrola svakog koraka izrade pramodela te njegovo optimiranje. Povoljna svojstva materijala *Polycast*, uz optimiranje postupka osigurali su izradu složenih geometrija uz minimalnu potrebu za potpornim strukturama. Eksperimentalno su testirana tri pristupa kalupljenju: gipsani kalup te keramičke školjke na bazi natrijevog silikata i koloidne silike. Gipsani kalup, iako ekonomičan i prikladan za lijevanje legura s nižim talištem kao što je cinkova legura ZAMAK 410, nije se pokazao pogodnim. Veća postojanost pri visokim temperaturama keramičkih školjki omogućila je uspješnu provedbu postupka žarenja, izgaranja pramodela te lijevanja.

Ključne riječi: ćelijasta struktura, keramička školjka, *Polycast*, taložno očvršćivanje, točni lijev, cinkova legura

## SUMMARY

This thesis confirmed the potential application of additive manufacturing, specifically the Fused Deposition Modeling (FDM) process, for the production of metal castings with complex cellular structures. The parameters and feasibility of each step in the process were analyzed, from modeling the pattern to the final metal casting in the produced mold. The structure of the pattern was modeled in the *nTopology* software, additional elements were designed in *SolidWorks*, and the model was optimized for FDM production in the preparation program *Orcaslicer*. This approach enabled control over every step of the pattern production and its optimization. The favorable properties of the *Polycast* material, combined with process optimization, ensured the creation of complex geometries with minimal need for support structures. Three approaches to molding were experimentally tested: plaster molds and ceramic shells based on sodium silicate and colloidal silica. While the plaster mold proved economical and suitable for casting low-melting-point alloys such as the zinc alloy ZAMAK 410, it was found to be unsuitable for this application. The higher temperature resistance of ceramic shells allowed for the successful execution of the burnout process, sintering of the ceramic shell and casting.

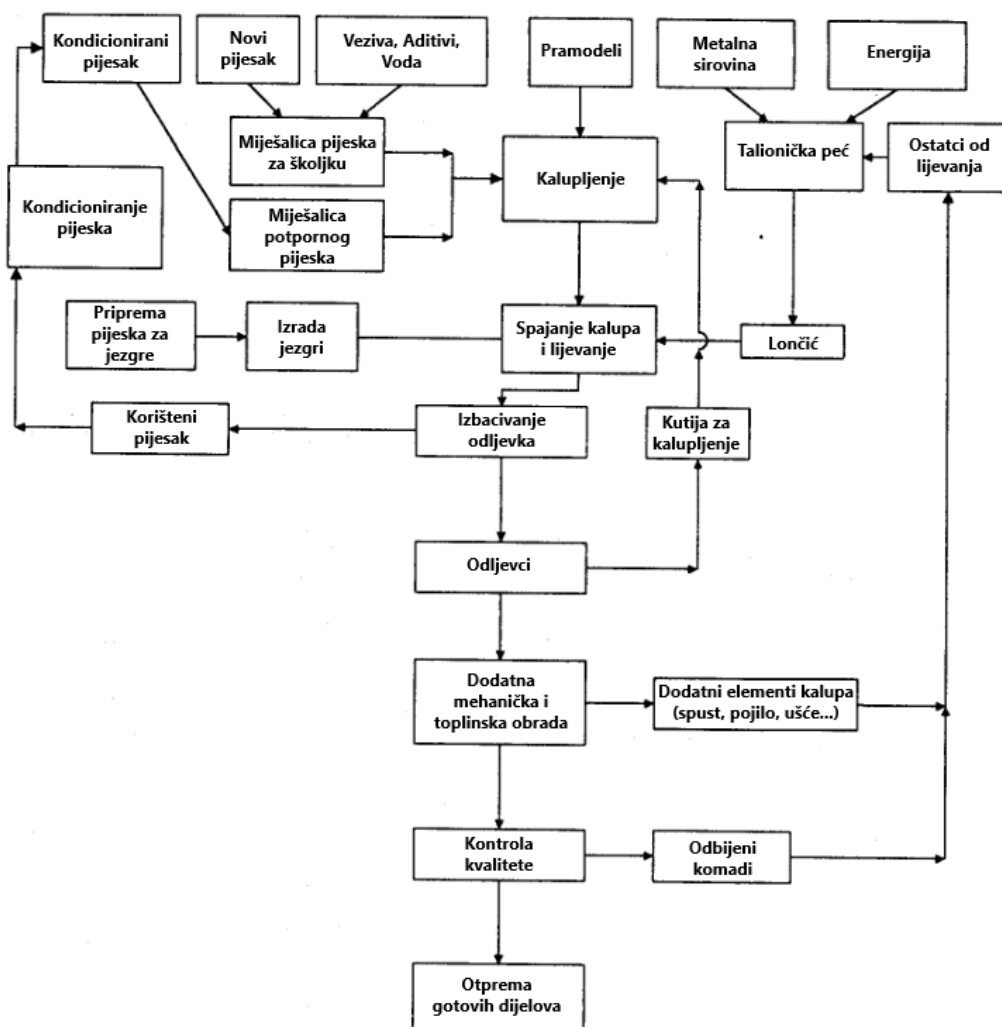
Key words: lattice structure, ceramic shell, *Polycast*, fused deposition modeling, investment casting, zinc alloy

## 1. UVOD

Razvojem aditivnih postupaka javlja se mogućnost njihove primjene za izradu pramodela čime se za male i srednje serije nastoji zamijeniti dugotrajni i skupi postupak njihove izrade. S obzirom da se postupcima aditivne proizvodnje mogu izrađivati metalni izradci, potrebno je usporediti svojstva metalnih predmeta izrađenih lijevanjem i aditivnom proizvodnjom. Aditivnom proizvodnjom mogu se proizvesti tankostjene strukture (~0,24 – 0,80 mm [1, 3]) čijim se međusobnim umreživanjem u ćelije stvara struktura koju karakteriziraju vrlo mala specifična masa, visoka krutost, visoka poroznost, visoka čvrstoća i visoka apsorpcija energije. [4, 5] Unatoč dobrim svojstvima i značajnom napretku postupaka aditivne proizvodnje poput selektivnog laserskog srašćivanja (eng. *Direct Metal Laser Sintering – DMLS*), selektivnog laserskog taljenja (eng. *Selective Laser Melting – SLM*) i taljenja elektronskim snopom (eng. *Electron Beam Melting – EBM*) pri izradi metalnih ćelijastih struktura, ovakvi izradci mogu imati i niz nedostataka. A. Du Plessis et al. [6] i C. Qiu et al. [7] pokazali su postojanje dimenzijskih odstupanja te poteškoće u konzistentnom postizanju željene mikrostrukture. Također je poznato da metalni izradci izrađeni aditivnom proizvodnjom mogu imati makro nepravilnosti poput: nesrašćenog praha (loša povezanost slojeva), mrežaste poroznosti, delaminacije i deformacije. [8-13] Kod ovih postupaka dolazi do ekstremnih temperaturnih varijacija pri taljenju i skrućivanju materijala [14] što uzrokuje nastajanje zrna s različitim morfologijama kao što su lamelarna, ekvialsijalna, stupasta i dendritična (eng. *dendritic*), te anizotropnost ovisna o orijentaciji pri izradi. [3, 10, 15, 16] Heterogenost strukture dodatno može biti naglašena cikličnom rekristalizacijom tijekom polaganja naknadnih slojeva. [9] Za razliku od aditivne proizvodnje metala, njihovo lijevanje omogućuje izvrsnu kontrolu mikrostrukture [17-19] i dimenzijske točnosti [20-21]. U svom radu, C. Yang et al. su predstavili primjenu nove tehnologije centrifugalnog točnog lijeva koja je pokazala odlično popunjavanje tankostjenih struktura. [22] Većina poteškoća povezanih s lijevanjem ćelijskih struktura proizlazi iz problema s proizvodnjom kalupa. [23] Izradom polimernih pramodela aditivnom proizvodnjom zaobilaze se mnogi od tih problema.

## 2. LIJEVANJE METALA

Lijevanje metala jedan je od najstarijih postupaka koji se primjenjuju za proizvodnju metalnih dijelova gdje se metalne tvorevine oblikuju taljenjem metalne sirovine, ulijevanjem u oblikovanu kalupnu šupljinu te stvrđnjavanjem unutar nje. Postupak lijevanja uključuje osnovne operacije poput izrade pramodela, kalupljenja, taljenja metala, ulijevanja rastaljenog metala u kalupe, hlađenja, vađenja odljevaka iz kalupa, mehaničke obrade, toplinske obrade te kontrole kvalitete. Dijagram toka procesa na slici 2.1 prikazuje proces kalupljenja i lijevanja kod školjkastog lijeva što je jedna od osnovnih metoda kalupljenja i lijevanja metala razvijenog za rješavanje nedostataka jednokratnih pješčanih kalupa koji su u upotrebi od začetka lijevanja metala. [24]



Slika 2.1. Dijagram toka industrijskog procesa lijevanja školjkastim lijevom [24]

## 2.1. Povijest lijevanja metala

Lijevanje metala je složeni proces koji datira iz početaka starog vijeka te se značajno razvio tijekom tisućljeća. Prve pojave lijevanja metala smještaju se oko 4000. godine prije Krista. Među prvim metalima koji su se lijevali nalaze se zlato i bakar. Ti metali upotrebljavani su zbog svoje lake obradivosti i relativno niskog tališta. Najstariji poznati odljevak je bakrena žaba iz Mezopotamije, koja datira oko 3200. godine prije Krista. Kako su civilizacije i tehnologija napredovali, ljudi su provodili eksperimente s dostupnim metalima te su otkrivene legure. Prva legura stvorena od strane čovjeka dobivena je miješanjem bakra i kositra te je nastalo ono što mi danas zovemo bronca. Bronca je ubrzo postala najpoželjniji materijal za lijevanje praktičnih tvorevina zbog povoljnijih svojstava naspram čistog zlata i bakra. Do 2800. godine prije Krista stari Egipat usavršio je procese lijevanja metala, koji su imali ključnu ulogu u njihovom usponu tijekom brončanog doba. U početku, kalupi za lijevanje izrađivani su u kamenu, no u Kini tijekom dinastije Shang (oko 1600.–1046. godina prije Krista) otkriveno je lijevanje u pijesku što je omogućilo izradu predmeta složenijih oblika. Kasnije, oko 500. godine prije Krista, dinastija Zhou razvila je lijevano željezo koje se u početku prvenstveno primjenjivalo za poljoprivredne alate. [25-28]

Srednji vijek označio je značajan napredak u lijevanju metala, a posebice u Europi. Tijekom vladavine Karla Velikog u 7. stoljeću oživjelo je lijevanje bronce, što je rezultiralo monumentalnim djelima poput masivnih brončanih vrata za Palatinsku kapelu Karla Velikog u Aachenu (slika 2.2). Izgradnja mnogobrojnih crkvi i katedrala tijekom ovog razdoblja dodatno je potaknula razvoj lijevanja zbog čega je došlo do unaprjeđenja postupaka taljenja i izrade kalupa, transformirajući time lijevanje metala iz umjetničkog zanata u tehnološki proces. [27]



Slika 2.2. Brončana vrata dvorske kapele Karla Velikog u Aachenu [29]

Industrijska revolucija u 18. stoljeću donijela je značajne napretke u tehnologiji lijevanja metala, a posebice željeza. Iako se željezo talilo i lijevalo još u antičko doba, sve do industrijske revolucije gotovo je isključivo bilo moguće dobiti samo sirovo željezo. Sirovo željezo ima visok udio ugljika (3,5 % do 4,5 %) i nečistoća, što mu daje visoku tvrdoću, ali istovremeno uzrokuje i visoku krhkost. Zbog tih svojstava sirovo željezo bilo je neprikladno za većinu primjena, pa se željezo najčešće obrađivalo kovanjem. Iako postoje primjeri primjene sirovog željeza u srednjem vijeku, takvo željezo bilo je niske kvalitete, a mjesta njegove primjene dodatno su ojačavana drugim materijalima. Jedan od ranih primjera su cijevi u dvorcu Dillenburg u Njemačkoj, izrađene od sirovog željeza sredinom 15. stoljeća, koje predstavljaju najraniji poznati primjer takvih cijevi. U 18. stoljeću René Antoine Ferchault de Réaumur

razvija kupolnu peć, tzv. kupolku, koja je u upotrebi i danas. Takva peć omogućila je smanjenje udjela ugljika i nečistoća u sirovom željezu, čime se dobivalo duktilnije željezo poznato kao lijevano željezo. Postizanju viših temperatura u pećima potrebnih za lijevano željezo pridonio je Abraham Darby, koji je bio pionir u primjeni koksa kao goriva pri taljenju željeza. Nadalje, A.G. Eckhardt 1809. godine patentira centrifugalno lijevanje, omogućujući ujednačenje odljeve primjenom centrifugalne sile tijekom procesa lijevanja. Prvi komercijalni stroj za izradu kalupa uveden je 1837. godine, čime su pojednostavljene metode proizvodnje i omogućena masovna proizvodnja metalnih dijelova ključnih za industrije poput željeznica i brodogradnje. Ljevaonice su postale ključne za razvoj vojne tehnologije tijekom sukoba poput Američkog građanskog rata te Prvog i Drugog svjetskog rata, proizvodeći sve od ratnih brodova i tenkova do komponenti za zrakoplove. [27, 30, 31]

U 20. stoljeću nastavljen je napredak uvođenjem električnih i elektroindukcijskih peći. Razvoj novih postupaka lijevanja poput školjkastog i tlačnog lijeva te napredak postojećih poput točnog (preciznog) lijeva utjecao je na porast kvalitete i veću dimenzijsku točnost odljevaka. Danas je lijevanje metala industrija vrijedna 33 milijarde dolara samo u Sjedinjenim Državama te zapošljava oko 200 000 ljudi u približno 1900 ljevaonica. Moderne ljevaonice primjenjuju najnovije tehnologije poput aditivnih postupaka i računalno potpomognutog dizajna kako bi optimirale proizvodnju. [26, 32]

## 2.2. Postupci lijevanja metala

Lijevanje metala svestran je proizvodni proces koji se primjenjuje za izradu komponenti ulijevanjem rastaljenog metala u kalupe gdje se hladi i očvršćuje u željeni oblik. Postupci poput pješčanog, školjkastog, tlačnog i točnog lijeva omogućuju proizvodnju dijelova različitih veličina i složenosti geometrije. Međutim, nepravilno izvođenje postupka može rezultirati nizom grešaka. Ljevačke greške koje se često pojavljuju u postupcima lijevanja metala navedene su ispod. Ovisno o postupku lijevanja, razlikuje se vjerojatnost pojave određenih grešaka, odnosno nisu sve greške jednako učestale kod svih postupaka. Zbog velikog broja mogućih grešaka potrebno je pažljivo razmatranje njihova uzroka. Veza između uzroka i greške je složena te greška može biti rezultat više uzroka koji djelujući zajedno uzrokuju grešku. Veza uzrok-greška prikazana je u tablici 2.1 gdje “+“ označava češći uzrok, a “\*” rjeđi uzrok.

Ljevačke greške [33]:

- srh.
- srhaste metalne izrasline
- naplav pijeska
- kuglice
- mjehuravost
- izbodenost
- usahline
- napukline i pukotine
- hladni zavar
- neželjena hrapava površina
- udubljenja
- uleknuća
- kraste
- nepotpuno ispunjavanje kalupne šupljine
- uključine troske
- uključine pijeska
- zamaknuće jezgre.

Tablica 2.1. Veza između uzroka i greške [33]

	Uzrok										Greška											
	k. Ostalo	j. Ulijevanje	i. Način taljenja	h. Sastav litine	g. Kalupljenje	f. Jezgre	e. Kalupna mješavina	d. Ulijevni sustav	c. Kalupnik	b. Model	a. Konstrukcija											
	*	+	+	*	+	+	+	*	+		*										Mjehuravost	
	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*											Površinske greške
		*			*	*	+	+		*												Greške sačmarenja





Tablica 2.1. Veza između uzroka i greške - nastavak

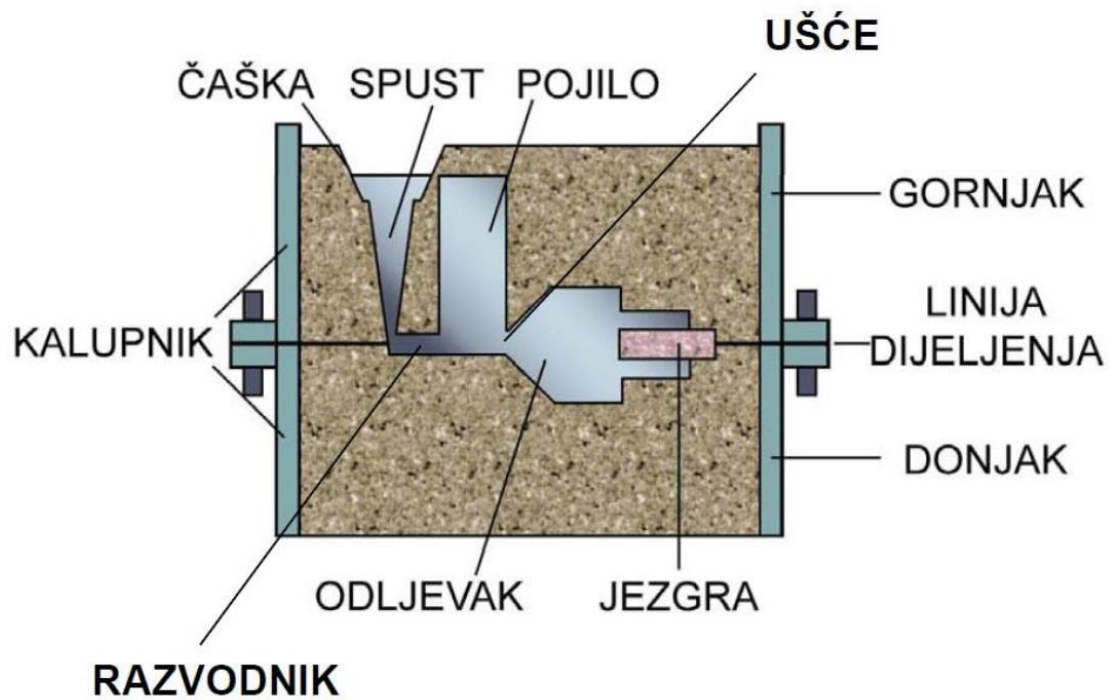
	Uzrok										Greška	
	k. Ostalo	j. Ulijevanje	i. Način taljenja	h. Sastav litine	g. Kalupljenje	f. Jezgre	e. Kalupna mješavina	d. Ulijevni sustav	c. Kalupnik	b. Model	a. Konstrukcija	
					+		+	*	*	*		Odlupljivanje od kalupnika
					*	*			*	*		Neispravna jezgra
	*	*			*	*	*	*	*	*		Iscurio kalup
	*									*		Lom odljevka
		*	*	*								Inverzno otvrdnuće
		*										Nedoljevenost
			*	*								Grafit
	*											Neispravna epruveta

U nastavku će biti opisani samo neki od postupaka lijevanja gdje će težište biti na postupcima s jednokratnim kalupima.

### 2.2.1. Pješčani lijev

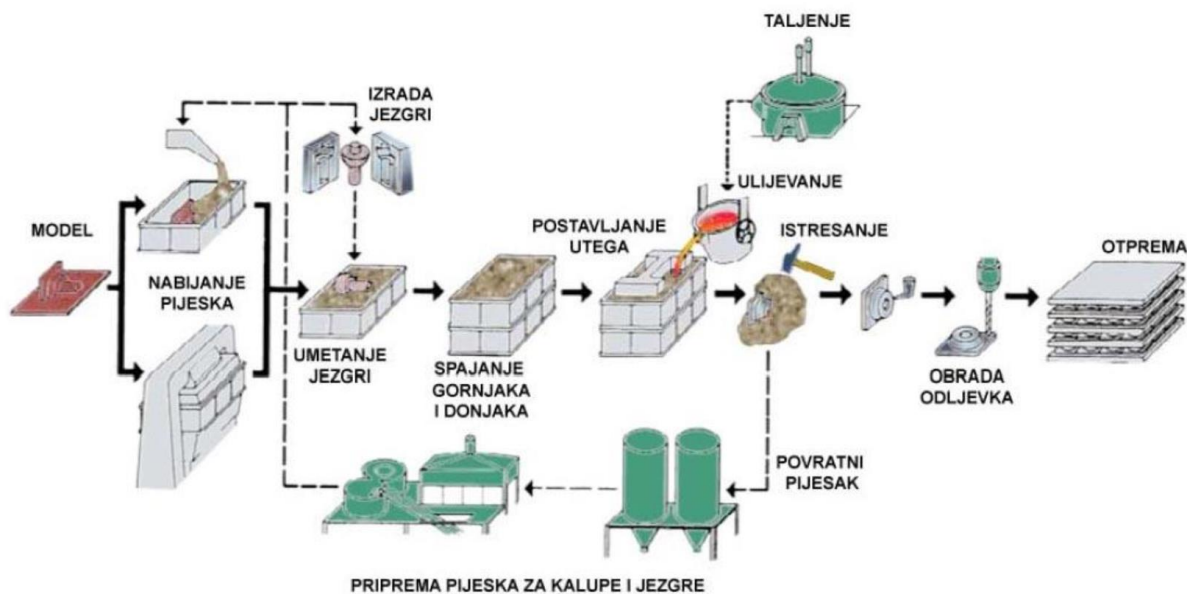
Lijevanje pomoću jednokratnih pješčanih kalupa jedan je od najraširenijih i najkorištenijih postupaka lijevanja zbog svoje svestranosti, mogućnosti izrade odljevaka različitih dimenzija te veličine serija od jednog komada do milijunskih serija. Kalupi se izrađuju miješanjem pijeska s vodom i vezivom koje je uglavnom bentonit, odnosno glina. Maseni udio pijeska u mješavini iznosi 85 %, udio gline je između 4 % i 10 %, a udio vode između 2 % i 5 %. U mješavinu se također mogu dodati i aditivi koji služe za povećanje čvrstoće i/ili propusnosti. Često korišteni aditivi su različiti oblici ugljena poput antracita ili koksa te oni čine vrlo mali udio kalupne mješavine no ključni su za sprječavanje oksidacije metala pri hlađenju. Kod lijevanja željeza i njegovih legura, takvi aditivi su posebno važni. Kalup se najčešće sastoji od

dva dijela, a formira se nabijanjem/sabijanjem pijeska oko modela. Pri kalupljenju se uz model mora oblikovati i uljevni sustav (slika 2.3) koji se općenito sastoji od čaške, spusta, razvodnika, pojila i ušća. [34, 35]



Slika 2.3. Kalup kod pješčanog lijeva [34]

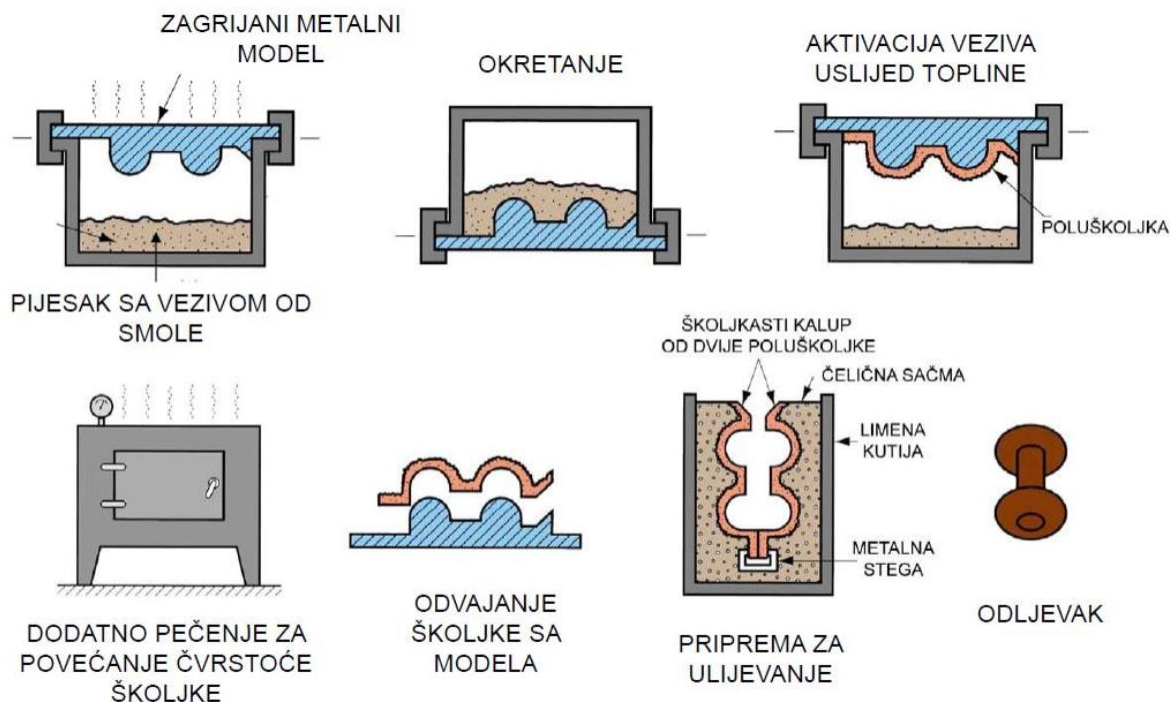
Shema proizvodnje pješčanog lijeva prikazana je na slici 2.4.



Slika 2.4. Shema proizvodnje pješanog lijeva [34]

### 2.2.2. Školjkasti lijev

Školjkasti lijev je postupak lijevanja metala koji se primjenjuje za proizvodnju predmeta složene geometrije s izvrsnom kvalitetom površine te visokom dimenzijskom točnošću. Ovaj postupak je sličan pješanom lijevu, no u odnosu na tradicionalni masivni kalup od pijeska koji se primjenjuje za pješčani lijev, kod školjkastog lijeva se formira tanka očvrstnuta ljuska od pijeska i smole. Postupak je prikazan na slici 2.5 te započinje zagrijavanjem prethodno izrađenog metalnog modela koji odgovara obliku željenog odljevka. Model je ključna komponenta u ovom postupku lijevanja jer određuje konačni oblik i dimenzije odljevka. Modeli se obično izrađuju od metala, a najčešće željeza ili čelika zbog visokih temperatura prisutnih tijekom postupka. Osim navedenog, još se primjenjuje i aluminij te grafit. Kada model dostigne temperaturu potrebnu za aktivaciju termoreaktivne smole po njemu se posipa ili puše mješavina sačinjena od finog kvarcnog pijeska i smole (obično fenolna smola). Model se zatim hladi te zbog djelomičnog stvrdnjavanja smole koja djeluje kao vezivo između zrnaca pijeska dolazi do nastajanja poluškoljke oko modela. Školjka je obično debljine oko 10 mm do 15 mm te se najčešće sastoji od dviju poluškoljki. Formiranjem obje poluškoljke, one se stavljaju u peć gdje se daljnjim zagrijavanjem potpuno stvrdnjavaju te postižu rasteznu čvrstoću od 2,4 MPa do 3,1 MPa. Proces lijevanja je dalje isti kao i kod pješanog lijeva. Za razliku od školjki, modeli su ponovno upotrebljivi te mogu izdržati tisuće ciklusa kalupljenja što ovom postupku omogućuje primjenu kod velikoserijske proizvodnje. [36-39]



Slika 2.5. Shema proizvodnje školjkastog lijeva [36]

G. Casalino et al. pokazali su da izrada modela za ovaj postupak i nije nužna. Koristeći se postupkom selektivnog laserskog srašćivanja (eng. *Selective Laser Sintering - SLS*), izradili su školjku izravnim putem bez prethodno izrađenog modela. Umjesto mješavine kvarcnog pijeska i smole, primjenili su pijesak prekriven tankim slojem fenolne smole. Pod utjecajem CO<sub>2</sub> lasera u slojevima, dolazi do srašćivanja zrnaca pijeska tvoreći zelenac. Naknadnim zagrijavanjem zelenca u peći, formira se školjka spremna za lijevanje. Isti postupak može se primijeniti i za izradu jezgri. [40]

Osim postupka SLS, mogu se primijeniti i drugi aditivni postupci poput rada M. Upadhyay et al. gdje je primjenjen postupak 3D ispisa veziva na materijalu (eng. *Binder Jetting*) za izradu školjke. Reguliranjem parametara postupka moguća je precizna kontrola permeabilnosti što osigurava prolazak plinova prilikom lijevanja. [41]

### 2.2.3. Točni (precizni) lijev

Općenito govoreći, lijevanje se sastoji od tri međusobno povezana koraka: taljenje, kalupljenje te istresanje i čišćenje odljevaka. Točni lijev, još nazivan i precizni lijev, dobiva se ulijevanjem litine u kalupe izrađene jednokratnim modelima. U postupku točnog lijeva i modeli i kalupi su

jednokratno upotrebljivi. Konvencionalni pristup lijevanju metala postupkom točnog lijeva obuhvaća slijedeće korake te dva moguća načina vođenja postupka – A i B (slika 2.6) [33]:

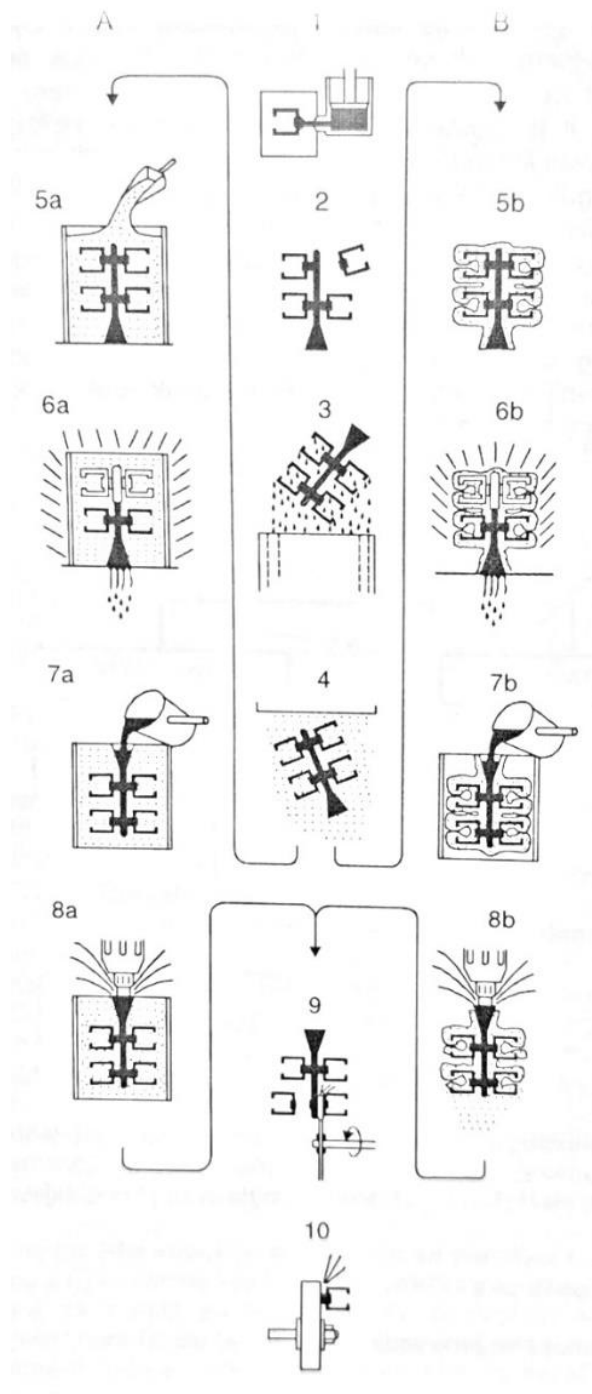
1. ubrizgavanje voštanog modela u metalni alat
2. izrada voštanog grozda
3. uranjanje voštanog grozda u keramičku suspenzije, te njeno ocjeđivanje s voštanog grozda
4. posipavanje voštanog grozda pijeskom.

Točni lijev u kalupu:

- 5a. ulaganje voštanog grozda u kalup i zasipavanje pijeskom
- 6a. zagrijavanje kalupa radi odstranjivanja voska
- 7a. ulijevanje metala
- 8a. razbijanje kalupa.

Točni lijev u školjci:

- 5b. izrada keramičke školjke nanošenjem većeg broja slojeva veziva i pijeska
- 6b. zagrijavanje školjke radi odstranjivanja voska i daljnje zagrijavanje kada školjka keramizira pri visokoj temperaturi ( $\approx 800$  °C) te postaje spremna za ulijevanje metala
- 7b. ulijevanje metala
- 8b. istresanje školjke
9. odrezivanje odljevaka od uljevnih sustava
10. brušenje ostataka uljevnog sustava.



Slika 2.6. Shema proizvodnje točnog lijeva [33]

Postupkom točnog lijeva izrađuju se dijelovi kompliciranih oblika, čija bi izrada drugim postupcima bila otežana ili čak nemoguća te neekonomična. Odljevci su kvalitetne površine i točnih dimenzija. Ovaj postupak pogodan je za odljevke manjih dimenzija te mase od nekoliko grama do dvadesetak kilograma. Ljevačke greške su učestalije kod točnog lijeva iz razloga što

je za svaki odljevak potrebno prvo izraditi jednokratno upotrebljivi model koji je također odljevak te kod kojeg također može doći do nastajanja istih grešaka kao i kod lijevanja taljevine. [33]



### 3. PRAMODEL

Prije samog procesa lijevanja kod tradicionalnih postupaka potrebno je izraditi pramodel. Kada je u pitanju pješčani lijev, ne postoji ograničenje kod izbora aditivnog postupka i materijala za njegovu izradu jer pramodel ne treba zadovoljiti posebne zahtjeve. Najvažniji zahtjev je kvaliteta površina gdje što je kvaliteta površine pramodela veća, veća će biti i kvaliteta površine odljevka. U eksperimentalnom dijelu ovog rada primijeniti će se točni lijev te će zbog toga ovo poglavlje biti orijentirano na izradi pramodela za navedeni postupak lijevanja. Također, s obzirom da pramodel za točni lijev mora zadovoljiti dalje navedene zahtjeve, sve metode koje su primjenjive za izradu pramodela za taj postupak primjenjive su i za pješčani lijev. Pramodeli za točni lijev mogu biti taljivi ili isparljivi. Taljivi modeli izrađuju se od voska (tekući, kašasti ili gusti) ili ostalih polimera. Najčešće primijenjeni polimer je polistiren, no upotrebljavaju se i druge vrste plastomera uključujući i polietilen. Isparljivi se izrađuju od žive te se cijeli postupak do ulijevanja metala provodi ispod ledišta žive, obično pri temperaturi  $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili nižoj. [33] Postupci aditivne proizvodnje mogu se primijeniti zajedno s tradicionalnim postupcima izrade pramodela ili ih u potpunosti zamijeniti.

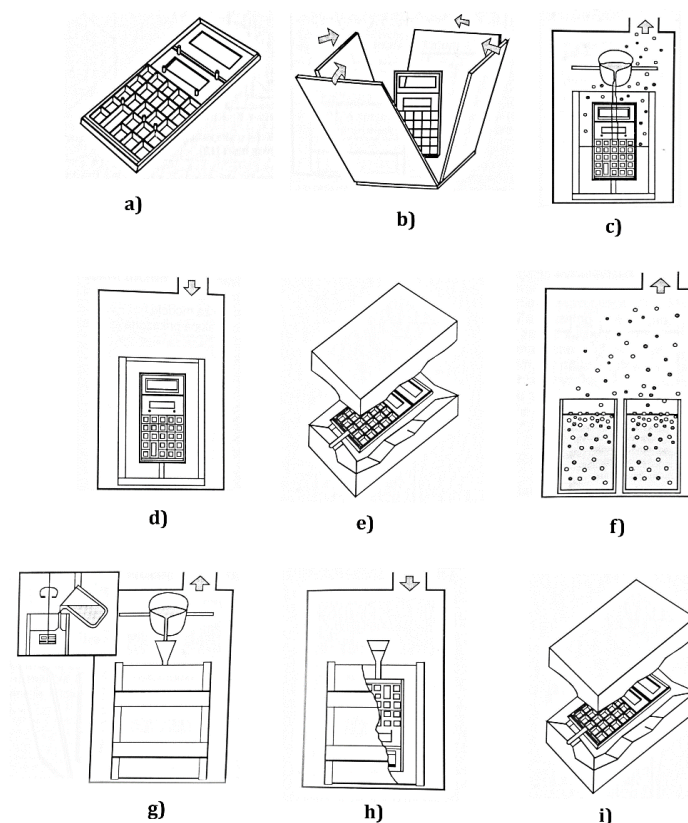
#### 3.1. Čelijasta struktura

Metalne tvorevine čelijastih struktura spajaju povoljna svojstva čelijaste strukture kao što su niska gustoća (mala masa), visoka apsorpcija energije i visoki kapacitet prigušenja s karakteristikama metala kao što su visoka žilavost i čvrstoća. Ciljane primjene za čelijaste strukture uključuju strukture za izmjenu topline između čvrstog tijela i fluida, katalizatore i elektrode, materijale za mehaničku apsorpciju energije ili kosture za rekonstrukciju kostiju koji pružaju privremenu mehaničku potporu uz koju kost može rasti. Kao rezultat svestrane primjene, postoji značajan istraživački napor u razvoju ovakvih metalnih struktura. [42-44] Istraživanje F. Gallien et al. [45] pokazuje da je u podtlaku moguće lijevanje struktura debljine 1 mm s Al-12%Si legurom (silumin). Struktura se sastoji od naslaganih oktaedara u dvjema horizontalnim ravninama te vertikalnoj ravnini koji se spajaju u vrhovima. Pojedine ćelije, odnosno oktaedri sačinjeni su od štapova promjera  $\varnothing$  1 mm. Dimenzije pojedine ćelije veličine su 6 mm u sve tri ravnine. V. H. Carneiro et al. [46] uspješno su s legurom aluminija A356 s dodatkom Al5Ti1B (0,05 g – 0,2 % wt) i Al10Sr (0,07 g – 0,3 % wt) lijevali strukture promjera  $\varnothing$  0,6 mm, također u podtlaku. S. Körber et al. [47] lijevanjem niklove superlegure MAR M247LC postigli su debljinu stijenke od čak 0,4 mm.

## 3.2. Metode izrade pramodela

### 3.2.1. Posredna metoda

Za izradu lijevanog matičnog kalupa tradicionalnom metodom pramodel je moguće izraditi nekim od polimernih postupaka aditivne proizvodnje poput taložnog očvršćivanja (eng. *Fused Deposition Modeling – FDM*) ili stereolitografije (eng. *stereolithography*). Najčešće upotrebljavani materijal za ovu vrstu matičnih kalupa je silikon. Postupak izrade kalupa prikazan je na slici 3.1. Proces započinje modeliranjem 3D model pomoću CAD (eng. *Computer Aided Design*) programa ili skeniranja te nakon toga slijedi njegova izrada 3D ispisom. Izrađeni pramodel (a) se stavlja u kutiju koja može biti izrađena od drva ili polimera (b). Kutija se zatim postavlja u komoru iz koje se izvlači zrak te se provodi ulijevanje silikonske mase u podtlačnoj komori (c). Po ulijevanju silikonske mase dolazi do polimerizacije te umreživanja. Pramodel ostane “zarobljen“ u silikonskoj masi (d). Nakon što se dovrši polimerizacija, matični kalup se razreže i otvara te se iz njega vadi predmodel (e). Nakon vađenja, kalup se vraća u komoru i boja (f). Bojom se određuje tvrdoća matičnog kalupa. Slijedi izvlačenje zraka iz komore podtlačnom pumpom, kontrola mješavine materijala i ulijevanje materijala u podtlačnoj komori (g). Općenito se mogu ulijevati vosak, poliuretan, metali nižeg tališta, itd. Po završetku ulijevanja zrak se pušta u komoru te se odljevak hladi (h). Nakon hlađenja matični silikonski kalup se otvara te djelomičnim savijanjem dijela kalupa vadi se dobiveni odljevak (i). Kalup se može ponovno iskoristiti ponavljanjem koraka g, h i i. [33] Također, moguća je i izrada matičnog kalupa iz više dijelova te tada nije potrebno rezanje kalupa za vađenje predmodela.



Slika 3.1. Postupak izrade silikonskog matičnog kalupa [33]

### 3.2.2. Izravna metoda

Pramodel se izrađuje aditivnom proizvodnjom u materijalu poput voska koji se onda izravno može primijeniti za točni lijev. U točnom lijevu taj pramodel se upotrebljava samo jednom jer u samom postupku lijevanja se model rastali ili izgori. Kao i kod posredne metode, najprije je potreban CAD model. Više različitih aditivnih postupaka ovdje je primjenjivo. U svom radu M. Vaezi et al. [48] uspoređivali su mogućnost primjene aditivne proizvodnje u izravnoj i posrednoj metodi za izradu turbinskih lopatica, te analizirali prednosti koje pružaju nad konvencionalnom metodom. Za izradu pramodela primjenili su postupak MJM (eng. *Multijet Modelling*). U postupku dolazi do selektivnog naštrcavanja kapljica rastaljenog voska koje se potom hlade, prelaze u kruto stanje te stvaraju jednokratni voštani model. Predmodel potreban za lijevanje silikonskog matičnog kalupa izrađen je postupkom očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP) (eng. *Digital Light Processing*). Fotoosjetljiva polimerna smola reagira na selektivno zračenje projektora te dolazi do polimerizacije i

očvršćivanja. Oba postupka pokazala su dobru dimenzijsku točnost. Stoga su oba primjenjiva za izradu pramodela te smanjenje vremena i troškova kod maloserijske proizvodnje. Maksimalna devijacija lijevanog odljevka izravnom izradom voštanog pramodela iznosi - 0,111 mm dok kod posredne metode iznosi +0,298 mm. Sukladno tome, iako su obje metode primjenjive, izravna izrada MJM postupkom pokazuje veću dimenzijsku točnost. [48]

Kod izbora polimera za točni lijev, vrlo je bitno znati njegova svojstva. Primarno toplinsku rastezljivost te čistoću izgaranja. Na tržištu su dostupni materijali za aditivnu proizvodnju prilagođeni za točni lijev, no moguće je upotrijebiti i nenamjenske plastomere poput polilaktične kiseline (eng. *Polylactic acid – PLA*) s dobrim rezultatima što pokazuju istraživanja V. H. Carneiro et al. [46] i F. Gallien et al. [45] U radu S. Körber et al. [47] uspoređivana su četiri materijala za točni lijev – tri fotoosjetljive smole i jedan plastomer. Fotoosjetljive smole pogodne za izradu pramodela za točni lijev sastoje se od akrilnog estera s manjim dodacima fotoinicijatora, sredstva za umreživanje i stabilizatora. Točne koncentracije proizvođači čuvaju kao poslovnu tajnu. Smola *Castable Blend (CR)* tvrtke *Fun To Do* dizajnirana je za podtlačni točni lijev bronce, bakra, kositra ili željeza (*Fun To Do*, 2020). Do 20 % (maseni) voska dodano je smolama *3DSR Cast (CWR\_1)* tvrtke *Kudo 3D* i *WaxCast (CWR\_2)* tvrtke *MakerJuice Labs*. Objе smole izvorno su razvijene za izradu nakita i za primjenu u stomatologiji (*Fun To Do* i *MakerJuice Labs*, 2020). U ovom radu primjenjen je plastomer *PolyCast (PVB)* tvrtke *Polymaker* u obliku žice/filamenta . Prema podacima proizvođača *Polycast* se sastoji od poli(vinil-butirala) posebno prilagođenog za točni lijev. Sadrži aditive koji prilikom izgaranja pramodela potpomažu potpuno isparavanje. Preostali pepelni ostatak obično je manji od 0,003 % početne mase. [49] Svojstva *Polycasta* navedena su u tablicama 3.1, 3.2, 3.3 i 3.4 [50]

Tablica 3.1. Fizikalna svojstva [50]

Svojstvo	Metoda ispitivanja	Vrijednost
<b>Gustoća</b>	ISO1183, GB/T1033	1,1 g/cm <sup>3</sup> pri 21,5 °C
<b>Indeks taljenja</b>	260 °C, 2,16 kg	6,6 - 6,7 g/10 min

Tablica 3.2. Kemijska postojanost [50]

Svojstvo	Metoda ispitivanja
Utjecaj slabih kiselina	Nije postojano
Utjecaj jakih kiselina	Nije postojano
Utjecaj slabih lužina	Nije postojano
Utjecaj jakih lužina	Nije postojano

Tablica 3.3. Toplinska svojstva [50]

Svojstvo	Metoda ispitivanja	Vrijednost
Staklište	DSC, 10 °C/min	70 °C
Razgradište	TGA, 20 °C/min	260 °C
Temperatura omekšavanja	ISO 306, GB/T 1633	67 °C
Postojanost oblika pri zagrijavanju	ISO 75 1,8 MPa	52,7 °C
Postojanost oblika pri zagrijavanju	ISO 75 0,45 MPa	66,5 °C

Tablica 3.4. Mehanička svojstva [50]

Svojstvo	Metoda ispitivanja	Vrijednost
Youngov modul (X-Y)	ISO 527, GB/T 1040	1745 ± 151 MPa
Youngov modul (Z)	ISO 527, GB/T 1040	N/A
Rastezna čvrstoća (X-Y)	ISO 527, GB/T 1040	35,7 ± 1,7 MPa
Rastezna čvrstoća (Z)	ISO 527, GB/T 1040	N/A
Prekidna deformacija (prekidno istezanje) (X-Y)	ISO 527, GB/T 1040	5,8 ± 0,9 %
Prekidna deformacija (prekidno istezanje) (Z)	ISO 527, GB/T 1040	N/A
Modul savijanja (X-Y)	ISO 178, GB/T 9341	1198 ± 173 MPa
Modul savijanja (Z)	ISO 178, GB/T 9341	N/A
Savojna čvrstoća (X-Y)	ISO 178, GB/T 9341	60,2 ± 1,6 MPa
Savojna čvrstoća (Z)	ISO 178, GB/T 9341	N/A

Tablica 3.4. Mehanička svojstva - nastavak

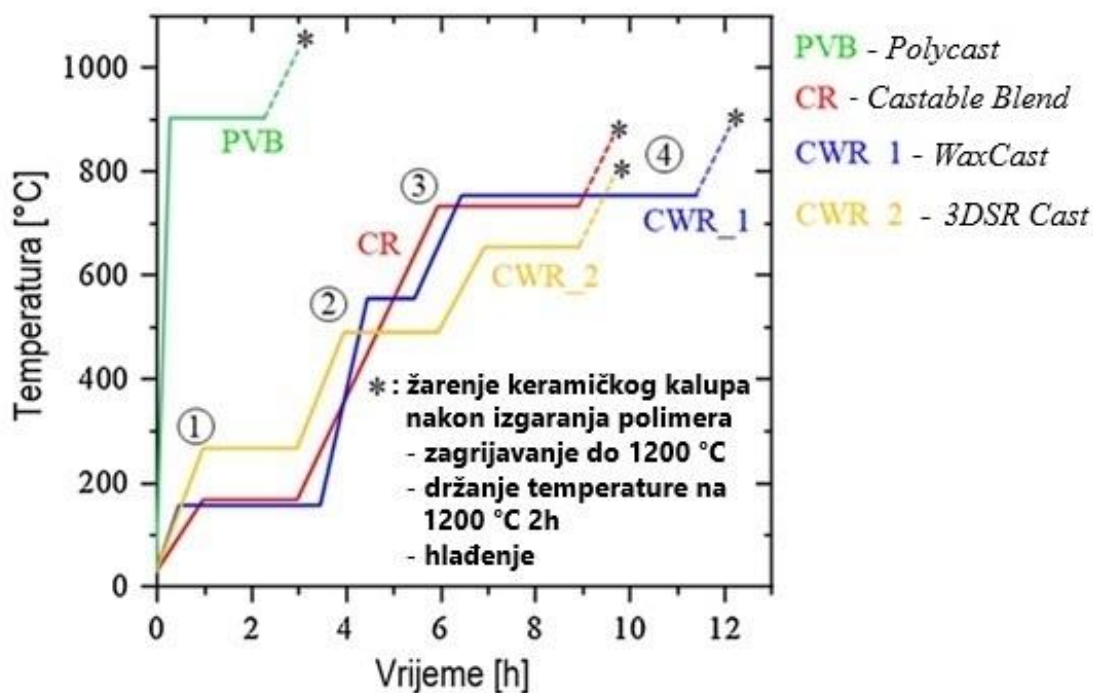
Svojstvo	Metoda ispitivanja	Vrijednost
Savojna žilavost (X-Y)	ISO 179, GB/T 1043	9,6 ± 0,9 kJ/m <sup>2</sup>
Savojna žilavost (Z)	ISO 179, GB/T 1043	N/A

Preporučena svojstva za ispis navedena su u tablici 3.5. [50]

Tablica 3.5. Preporučeni parametri za ispis [50]

Parametar	
Temperatura mlaznice	190 – 220 °C
Materijal podloge	<i>BuildTak</i> , staklo, samoljepljiva papirnata traka
Premaz podloge	Ljepilo
Temperatura podloge	25 – 70 °C
Hladenje	Da
Temperatura ispisa	40 – 60 °C
Vrijednost retrakcije	1 mm
Temperatura okoline	Sobna temperatura
Mogući kut ispisa	60°
Preporučeni potporni materijal	<i>PolyDissolve SI</i>

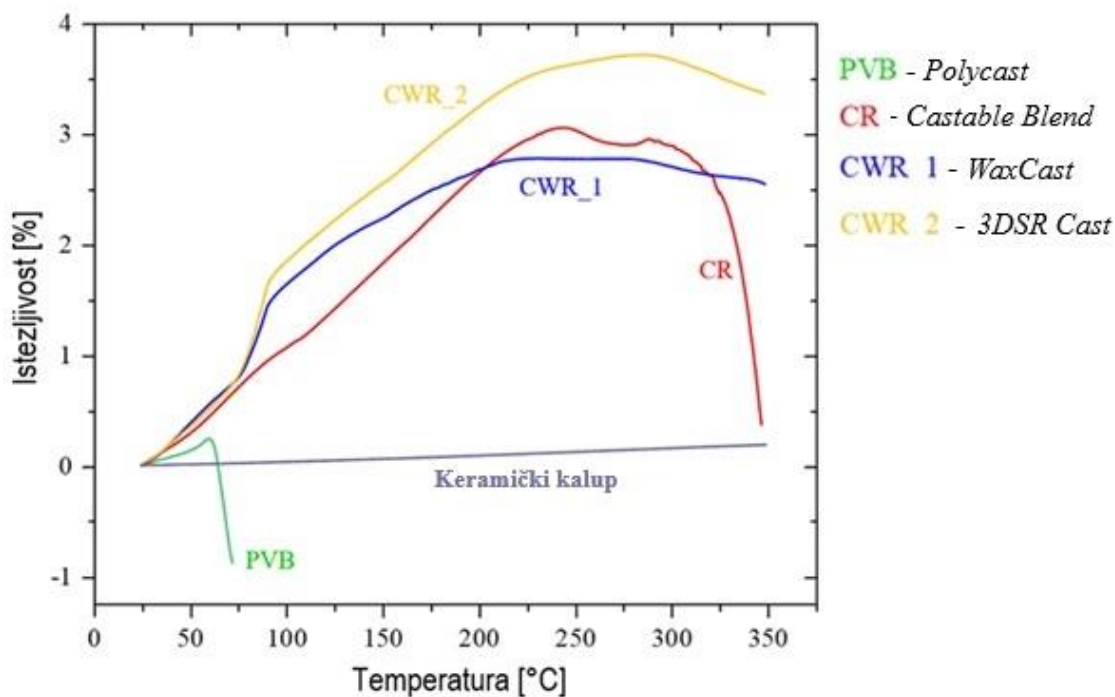
Sukladno slici 3.2, *Polycast* zahtjeva značajno kraće vrijeme izgaranja u usporedbi s fotoosjetljivim smolama, no zato se izgaranje mora odvijati pri višim temperaturama.



Slika 3.2. Izgaranje polimera [47]

Pramodeli izrađeni postupkom DLP s fotoosjetljivim smolama imaju jako glatku površinu zbog čega su estetski prihvatljiviji. *Castable Blend* i *3DSR Cast* imaju više od dva puta više hrapavost površine od konvencionalno proizvedenih voštanih pramodela, no hrapavost površine *WaxCast* smole gotovo je jednaka konvencionalno proizvedenim voštanim pramodelima. Hrapavost površine *Polycasta* pramodela nakon ispisa vrlo je visoka, no moguće je zaglađivanje izopropilnim alkoholom. Nakon zaglađivanja hrapavost se smanjuje za više od 90 % početne vrijednost te može biti čak i manja od konvencionalnih voštanih pramodela. Izgaranje svih fotoosjetljivih smola uzrokovalo je nastanak pukotina u keramičkoj školjci točnog lijeva već pri 150 °C. Do pucanja je došlo zbog znatno višeg toplinskog rastezanja u usporedbi s keramičkom školjkom koje je dodatno naglašeno zbog nedostatka faze omekšanja prije dostizanja temperature raspada i plinova koji nastaju prilikom izgaranja te rade pritisak na keramičku školjku. Suprotno smolama, *Polycasta* ima nisku toplinsku rastezljivost te omekša već pri 60 °C, što je samo 50 % više od konvencionalnih voštanih pramodela. Zbog male razlike u toplinskoj rastezljivosti između *Polycasta* i keramičke školjke koja je jednaka već pri 65 °C školjka ne trpi naprezanja te ne dolazi do njenog pucanja. Istezanje pri različitim temperaturama svih ispitivanih materijala prikazano je na slici 3.3, dok je toplinska

rastezljivost dana u tablici 3.6. Toplinska rastezljivost je izračunata sukladno dijagramu istežljivost – temperatura sa slike 3.3.



Slika 3.3. Dijagram istežljivost – temperatura za ispitivane polimere i keramičku školjku točnog lijeva na zraku [47]

Tablica 3.6. Koeficijenti toplinskog rastezanja za ispitivane polimere i keramičku školjku pri različitim temperaturnim intervalima [47]

Materijal	Koeficijent toplinskog rastezanja u temperaturnim intervalima [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]				
	20-50 °C	50-60 °C	60-75 °C	75-90 °C	90-225 °C
CR	156				
CWR_1	170		460		98
CWR_2	160		590		140
PVB	52	130	Mekšanje PVB dovodi do negativnog toplinskog rastezanja		
Keramička školjka	6				



### 3.3. Aditivna proizvodnja

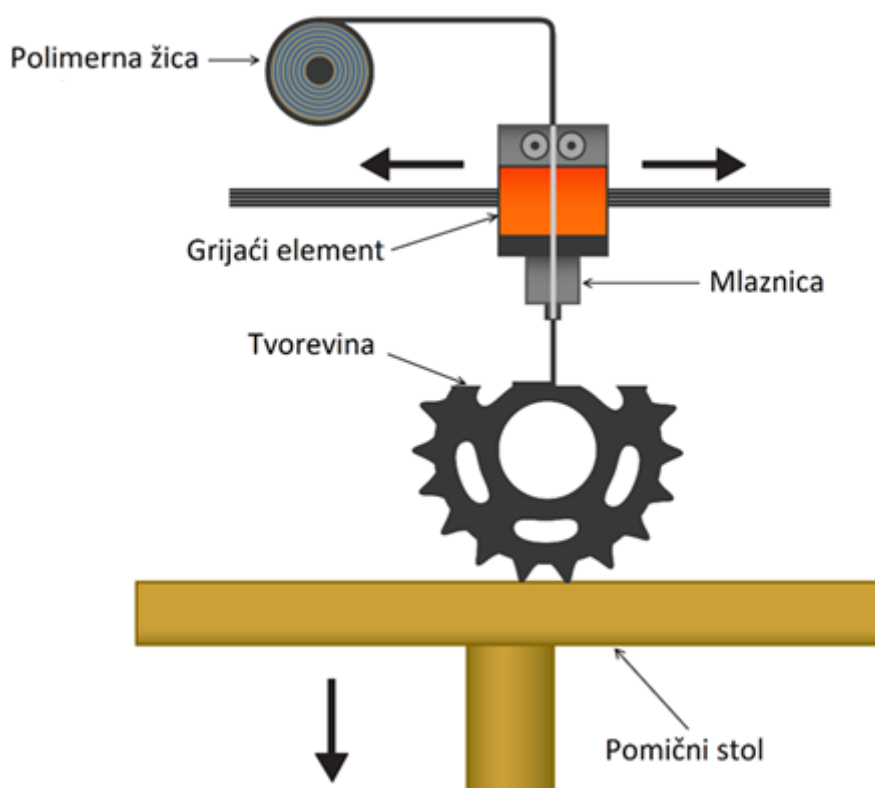
Proizvodnja složenih metalnih ćelijskih tvorevina zahtjevnija je i skuplja. Međutim, sve veća prisutnost te kvaliteta postupaka aditivne proizvodnje otvara potpuno nove mogućnosti proizvodnje. Optimiranje ćelijskih struktura za aditivnu proizvodnju postalo je novo područje istraživanja posljednjih desetljeća. [51, 52] Za proizvodnju ćelijskih struktura mogu se primijeniti razni postupci aditivne proizvodnje metala, npr. selektivno lasersko sinteriranje [DMLS], selektivno lasersko taljenje (SLM) [53], taljenje elektronskim snopom (EBM) [54] i ekstrudiranje metalnih materijala (eng. *Metal Material Extrusion - MME*). [55] A. Nazir et al. [56] daju detaljni pregled aditivne proizvodnje za izradu ćelijskih struktura. Iako su postupci aditivne proizvodnje već vrlo napredni, još uvijek postoje izazovi poput konzistentne ponovljivosti, dimenzijske točnosti, kvalitete površine te optimiranja potpornih struktura. Ciljano upravljanje procesom ključno je za kasnija materijalna i strukturna svojstva. [57] Za bolje razumijevanje i optimiranje postupaka aditivne proizvodnje primjenjuju se simulacije. [58, 59]

Mehanička svojstva ćelijastih struktura, posebno tlačna čvrstoća i pritiski modul ovise o faktorima kao što su: topologija ćelije, struktura, uvjeti opterećenja i relativna gustoća ćelijaste strukture u odnosu na gustoću tvorevina pune strukture. [60] Na mehanička svojstva posebice utječe oblik naprezanja kod opterećenja gdje primarno može doći do rastezanja ili savijanja elemenata strukture. [61] Očekivano naprezanje može se pretpostaviti razmatranjem stupnja povezanosti elemenata i pridruženih stupnjeva slobode prisutnih u ćeliji rešetke. [62] Kako bi se osigurala robusna izrada ćelijaste strukture, potrebno je eksperimentalno odrediti minimalno ostvarivu debljinu stijenke i kut nagiba elemenata ćelije koji se mogu proizvesti bez potrebe za potpornim strukturama. Za Ti64 leguru koja se upotrebljava u postupku SLM poznata je uspješna izrada elemenata ćelije promjera 0,2 mm [54]. S. Van Bael et al. [63] uspjeli su proizvesti elemente ćelijaste strukture veličine 0,1 mm, a L. Hao et al. [64] navode da su mogući elementi veličine 0,05 mm. Razlike između CAD modela i stvarne geometrije u smislu dimenzijske točnosti i kvalitete površine, S. VanBael et al. [63] i G. Pyka et al. [65] pokazali su pomoću Micro-CT snimanja i optičke inspekcije te ga odredili kao funkciju kuta elemenata ćelije. [63, 65]

Pramodel od materijala Polycast moguće je izraditi postupkom taložnog očvršćivanja te će se u nastavku dati kratki opis postupka.

### 3.3.1. Taložno očvršćivanje (FDM)

Taložno očvršćivanje je široko rasprostranjen aditivni postupak koji za osnovni materijal primjenjuje polimernu žicu, odnosno filament. Polimerna žica se pomoću mehanizma za dobavu provodi do mlaznice koja se nalazi na pomičnoj glavi. Glava obično ima dva stupnja slobode gibanja u dvjema različitim konfiguracijama: X-Y ili X-Z. Ispod glave nalazi se radna podloga s jednim stupnjem slobode gibanja koja se ovisno o konfiguraciji giba po Z osi, odnosno Y osi. Polimerna žica prije mlaznice prolazi kroz grijač u kojem omekšava te u takvom omekšanom stanju prolazi kroz mlaznicu. Glava 3D pisaa slijedi upute napravljene u programu za pripremu (npr. *Prusaslicer*, *Cura*, *Orcaslicer*) zapisane u obliku G naredbi, odnosno G-koda. U programu se 3D model reže na slojeve u smjeru Z osi te se omekšani materijal polaže sloj po sloj gdje nedugo nakon izlaska iz mlaznice očvršćuje. Shema postupka prikazana je na slici 3.4.



Slika 3.4. Shema postupka taložnog očvršćivanja [66]

Kod nekih 3D pisača mogu se primijeniti višestruke glave i/ili mlaznice kako bi se postupak ubrzao ili omogućio ispis više različitih materijala ili boja istovremeno. Kod takvih strojeva često se osnovni materijal upotrebljava u kombinaciji s potpornim materijalom koji je topiv u vodi ili nekom otapalu. Tvorevine načinjene ovim postupkom zbog većih visina slojeva (obično 0,1 mm do 0,3 mm) imaju tzv. stepenasti izgled koji mu daje hrapavu površine. U slučaju mehaničkih ili estetskih zahtjeva, tvorevine se mogu naknadno obrađivati. Neki od najčešće upotrebljivanih materijala su polilaktična kiselina (PLA), akrilonitril-butadien-stiren (ABS) te poli(etilen-tereftalat) modificiran glikolom (PET-G). Također, postoje i polimerne žice ojačane vlaknima kao što su ugljična i staklena. [67]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu istražena je mogućnost primjene aditivne proizvodnje u izradi pramodela za klasične postupke lijevanja metala. Aditivna proizvodnja donosi inovativne mogućnosti u proizvodnim procesima omogućujući izradu složenih geometrijskih oblika koji su teško izvedivi ili potpuno neizvedivi konvencionalnim postupcima. Naglasak je stavljen na istraživanje štapnih i ćelijastih struktura jer takve strukture imaju značajan potencijal u smanjenju troškova proizvodnje i poboljšanju svojstava proizvoda te mogućnost prilagodbe dizajna specifičnim zahtjevima. Ispitane su mogućnosti praktične primjene ćelijastih struktura u ljevačkim procesima. Ćelijaste strukture pružaju značajne prednosti poput optimiranja mase i svojstava proizvoda, smanjenja potrošnje materijala te učinkovitije raspodjele opterećenja. Naime, upravljanjem gustoćom rešetke omogućuje se fleksibilnost dizajna gdje se na mjestima izloženim višim opterećenjima gustoća može povećati, dok se na manje opterećenim mjestima može smanjiti. Takav pristup doprinosi smanjenju ukupne mase tvorevina te istovremeno osigurava povoljna mehanička svojstva.

### 4.1. Pregled struktura

3D CAD modeli štapnih i ćelijastih struktura izrađeni su pomoću programa za topološko optimiranje *nTopology*. Provedena je analiza štapnih i ćelijastih struktura koje nudi program s ciljem utvrđivanja njihove proizvodljivosti za postupak taložnog očvršćivanja (eng. *Fused Deposition Modeling - FDM*). Analiza je usmjerena na potrebu za potpornim strukturama, odnosno smanjivanjem istih ili njihovo potpuno uklanjanje čime bi se značajno ubrzala proizvodnja, smanjio utrošak materijala te vrijeme potrebno za naknadnu obradu koja uključuje postupke čišćenja te mehaničku obradu. Također, osim potpornih struktura te upravljanja njima koje nudi program za pripremu modela za postupak taložnog očvršćivanja *Orcaslicer*, ispitano je i rješenje s ručno modeliranim potpornim strukturama u obliku plašta kako bi se procijenio njihov doprinos kvalitetnijem ispisu struktura s nagibom manjim od  $45^\circ$  u odnosu na radnu podlogu za koje je poznato da su problematične kod ispisa bez potpornih struktura. Potporni plašt izrađen je u CAD programu *Solidworks*.

Pregled štapnih struktura:

- Truncated octahedron
- Diamond

- Iso truss
- Kelvin cell
- Plošno centrirana kubična rešetka (eng. *Face-centered cubic – FCC*)
- Prostorno centrirana kubična rešetka (eng. *Body-centered cubic – BCC*)
- Oktet
- Fluorit.

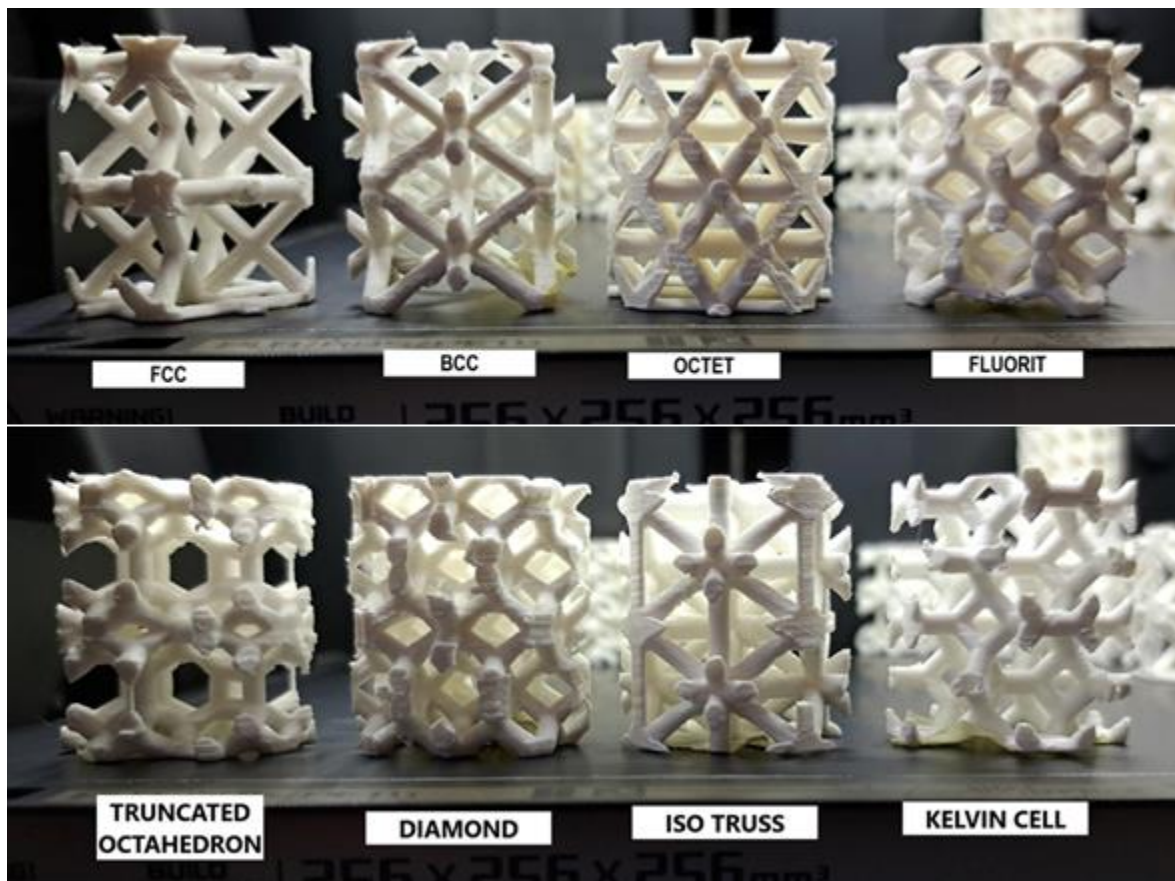
Pregled ćelijastih struktura:

- Gyroid
- Diamond
- Lidinoid
- SplitP.

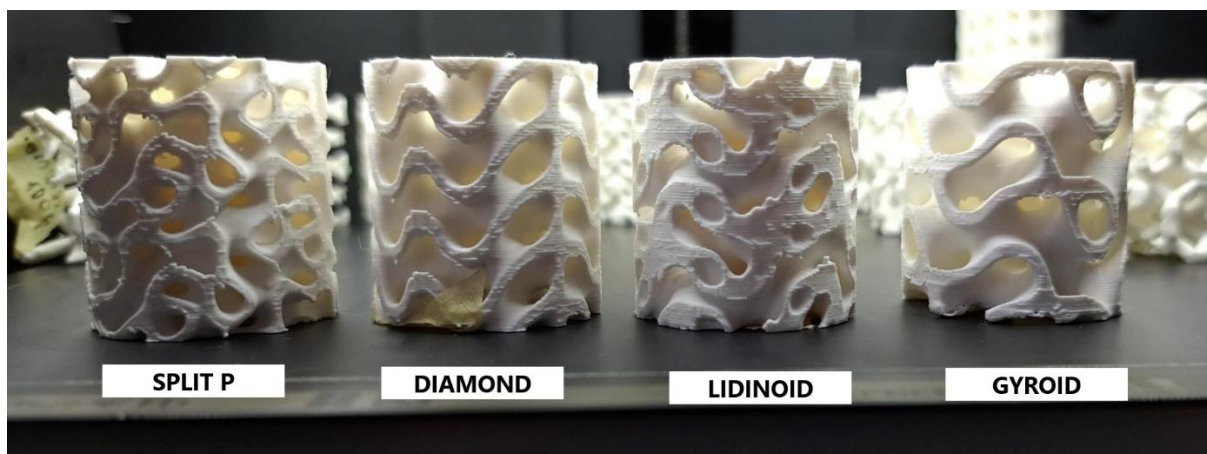
Izrađena su ispitna tijela svih navedenih struktura te su oblik i dimenzije ispitnih tijela određeni sukladno normi ISO 13314:2011 koja definira veličinu ispitnog tijela u odnosu na dimenzije pojedinih ćelija. [68] Zbog usklađenosti ispitnih tijela s normom, u daljnjem istraživanju biti će moguće provesti ispitivanje mehaničkih svojstava struktura. Ispitna tijela izrađena su u obliku cilindra promjera 32 mm i visine 35 mm, s veličinom ćelije  $20 \times 20 \times 20$  mm te debljinom stijenke od 2 mm. S obzirom na ranije navedena povoljna svojstva kojaima materijal *Polycast*, za ispitivanje u eksperimentalnom dijelu ovoga rada primijeniti će se upravo on te postupak taložnog očvršćivanja. Ranija ispitivanja materijala pokazala su slično ponašanje polilaktične kiseline i *Polycasta*, odnosno podjednaku kvalitetu ispisa, stoga je za ispitivanje struktura primjenjen PLA tvrtke *Azurefilm* čija je cijena općenito po kilogramu tri do četiri puta manja od *Polycasta*. Izrađena ispitna tijela prikazana su na slikama slici 4.1 i slici 4.2.

Za 3D ispis su primjenjene standardne postavke, odnosno visina sloja 0,2 mm, debljina stijenke 0,8 mm odnosno dvije konture te ispuna 15 %. Strukture čija se primjena za postupke lijevanja u ovom radu istražuje zbog povoljnih mehaničkih svojstava primjenjuju se upravo kod postupka taložnog očvršćivanja kao ispuna tvorevine. Iz iskustva je poznato da žiroidna struktura kao vrsta ispuna (vrsta unutrašnjosti izrađene tvorevine) pokazuje dobru anizotropnost svojstava, stoga je ona upotrebljena kod 3D ispisa svih ispitnih tijela navedenih u eksperimentalnom dijelu radu, odnosno poglavlju 4. Temperatura prerade ispitnih tijela na

3D pisaču *Bambu Lab P1S* bila je 230 °C što je iskustveni podatak dobiven kalibracijom materijala proizvođača.



Slika 4.1. Ispitna tijela štapnih struktura uz pravokutno mapiranje



Slika 4.2. Ispitna tijela ćelijastih struktura uz pravokutno mapiranje

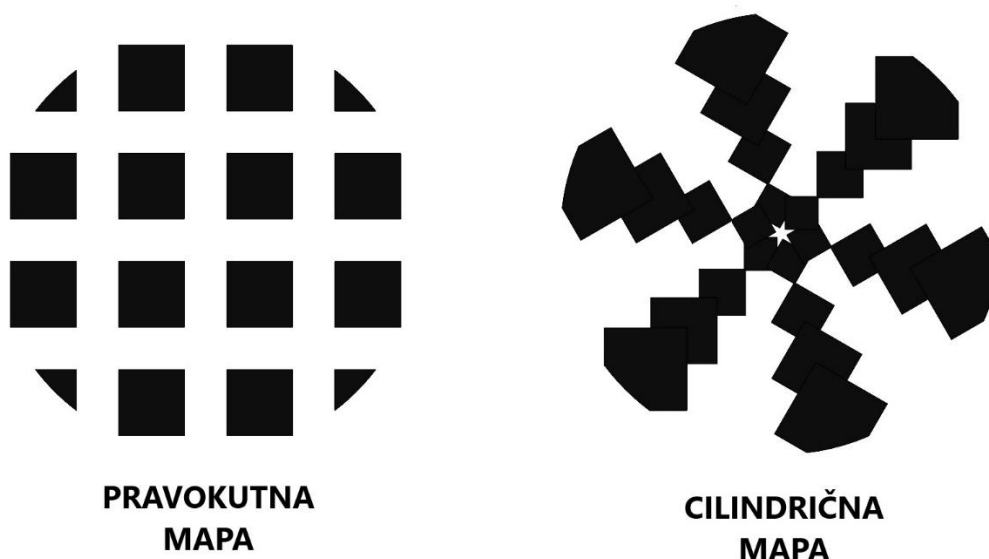
Provedena ispitivanja pokazala su da štapne strukture imaju značajne poteškoće pri izradi bez potpornih struktura što je rezultiralo grubom i nepotpuno formiranom geometrijom. Nadalje, potporne strukture generirane u programu za pripremu modela za 3D ispis pokazale su značajno poboljšanje u usporedbi s 3D ispisom bez potpornih struktura, no kod geometrije su još uvijek vidljivi značajni nedostaci što je posebno vidljivo na mjestima s vrlo oštrim kutovima u odnosu na radnu podlogu. Ručno konstruirane potporne strukture u obliku plašta prikazane na slici 4.3 pokazale su djelomičan uspjeh u usporedbi s dobivenim sa slike 4.1. S obzirom na navedene nedostatke, ćelijaste strukture pokazale su se kao pouzdaniji izbor za daljnja ispitivanja, jer su pružile stabilniju geometriju tijekom procesa izrade i smanjenje deformacija.



Slika 4.3. Potporna struktura u obliku plašta prije odstranjivanja s ispitnog tijela



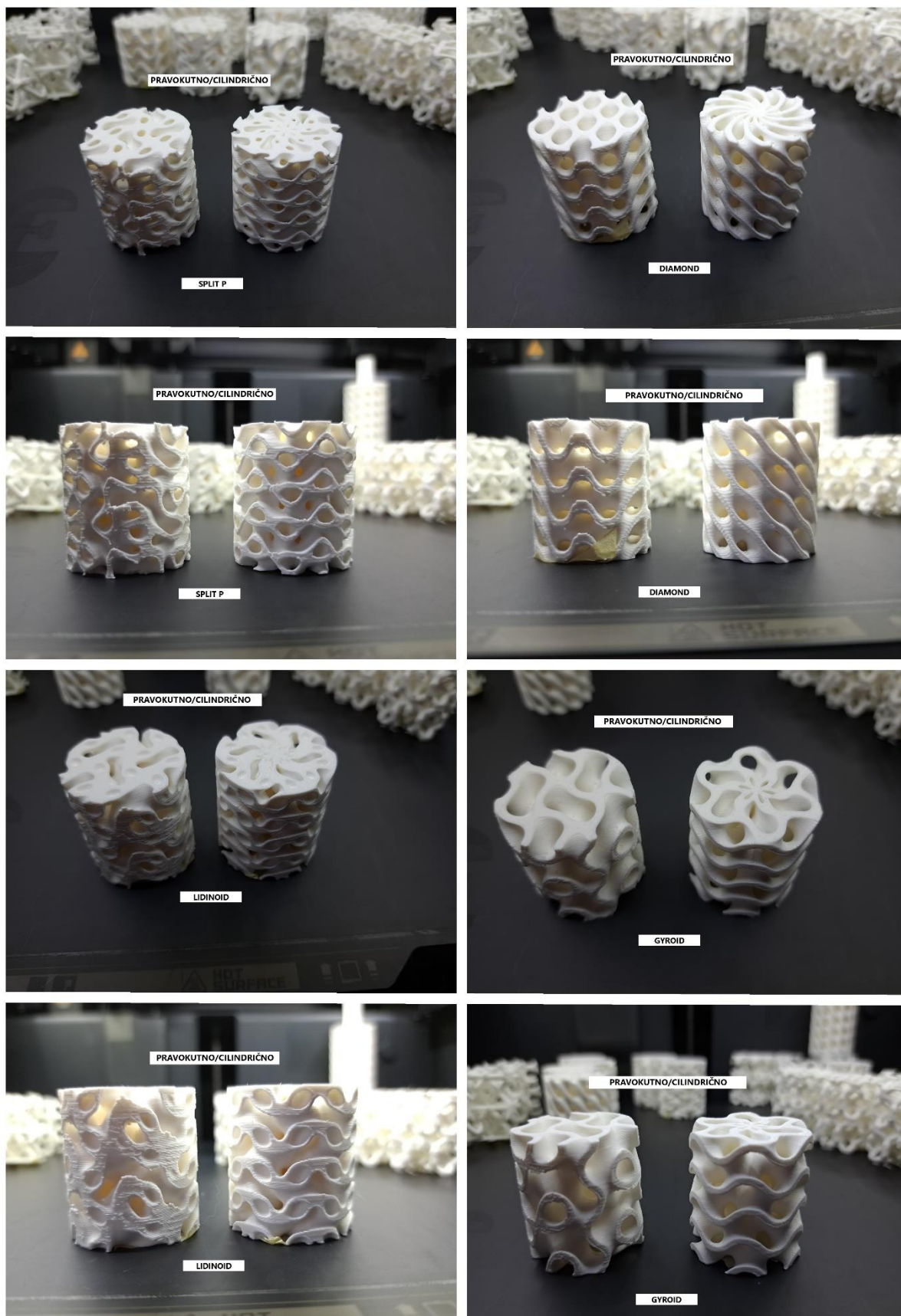
Sljedeći korak istraživanja struktura bio je analiza različitih načina mapiranja ćelija unutar ispitnog tijela. Ćelije mogu biti raspoređene pravokutno ili cilindrično, pri čemu svaki od pristupa ima svoje prednosti i nedostatke koji utječu na konačna svojstva ispitnog tijela. Sheme dvaju načina mapiranja prikazane su na slici 4.4. U pravokutnom rasporedu ćelije se raspoređuju u x, y i z pravcima sukladno kartezijevom koordinatnom sustavu dok cilindrični raspored odgovara cilindričnom koordinatnom sustavu gdje se ćelije mapiraju iz ishodišta prema obodu kružnice te u z osi. Za ovo ispitivanje, gdje su ispitna tijela oblika cilindra, cilindrično mapiranje je bolji izbor jer omogućuje ravnomjerniju raspodjelu ćelija u volumenu ispitnog tijela. Kod pravokutnog rasporeda dolazi do rezanja ćelija na plaštu cilindra vidljivog na slici 4.4 zbog čega ta mjesta nemaju jednaku mehaničku čvrstoću kao ostatak ispitnog tijela te će njegovo ispitivanje dati slabije rezultate te narušiti njihovu vjerodostojnost. Cilindrično mapiranje dakle osigurava pravilan raspored ćelija po plaštu te podjednaka svojstva na njegovom promjeru. S obzirom na navedene prednosti za cilindrična ispitna tijela, odabrano je cilindrično mapiranje. Važno je napomenuti da način mapiranja ćelija utječe na postupak lijevanja metala te je stoga potrebno sagledati i ljevačke zahtjeve navedene u poglavlju 4.2.



Slika 4.4. Mapiranje ćelija

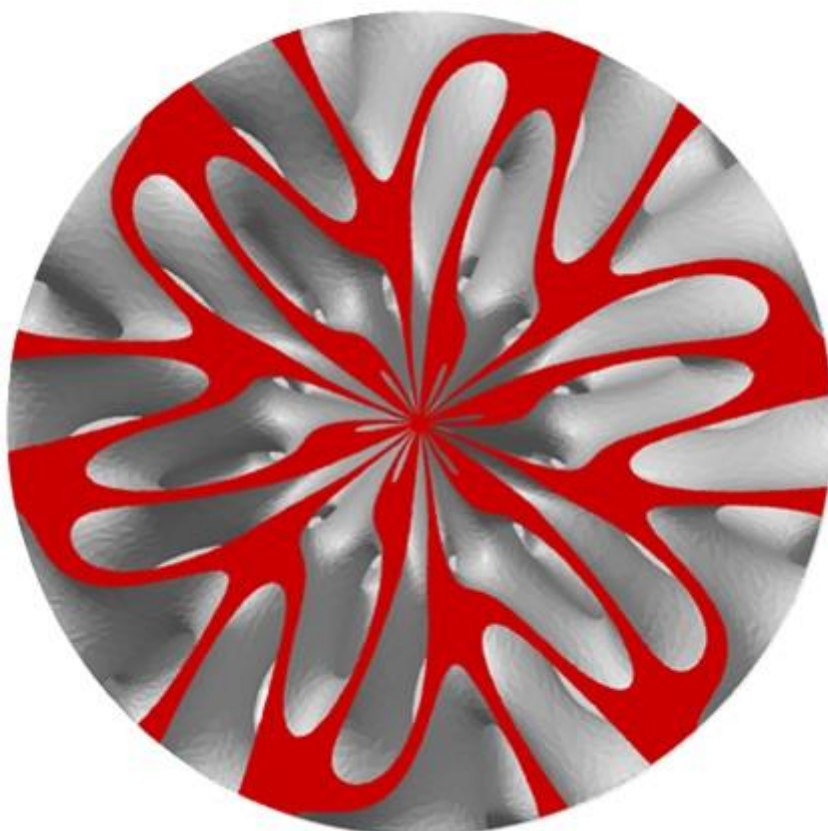
Ćelijasta ispitna tijela cilindrično i pravokutno mapiranih ćelija prikazana su na slici 4.5.





Slika 4.5. Usporedba pravokutno i cilindrično mapiranih ćelijastih ispitnih tijela  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Cilindrično mapiranje uzrokuje nejednoliku debljinu stijenke gdje je ona tanja u središnjem dijelu cilindričnog ispitnog tijela zbog tzv. rasta ćelija. Ćelije propagiraju iz ishodišne z osi te se u teoriji debljina stijenke u njoj približava 0 mm. To naravno nije tako u stvarnosti, no debljina stijenke u određenom dijelu središta cilindra svakako je manja od minimalno definirane u programu *nTopology*. Također, kod određenih ćelijastih struktura pojavljuju se i šupljine vrlo malih dimenzija koje je problematično kalupiti. Navedene nepravilnosti, koje su vidljive na slici 4.6, ne pojavljuju se kod pravokutnog mapiranja ćelija.



Slika 4.6. Presjek ćelijaste strukture SplitP

#### **4.1.1. Norma za ispitivanje ćelijastih struktura**

Ispitivanje tlačnih svojstava metalnih tvorevina ćelijastih struktura provodi se prema normi ISO 13314:2011. Ova norma definira oblik i dimenzije ispitnih tijela sukladno parametrima pojedine ćelije. [68] Ovu normu primijenili su u svom radu F. Gallien et al. za lijevanje aluminijskih ćelijastih struktura u kalup načinjen od kuhinjske soli. [45]

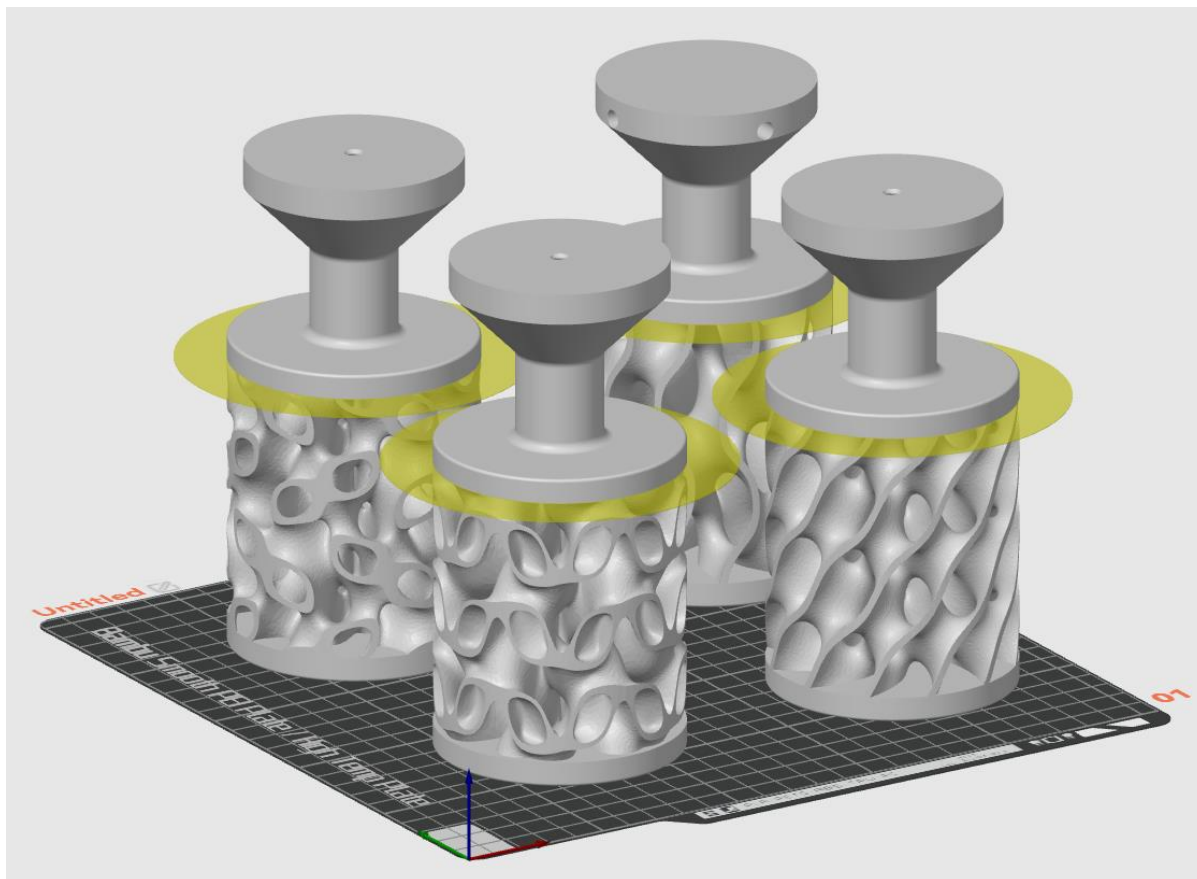
## 4.2. Zahtjevi lijevačkog postupka

Zbog složenosti struktura, za lijevanje je odabran postupak točnog lijeva. Točni lijev omogućuje kalupljenje složene geometrije kakva je prisutna na ispitnim tijelima. Tijekom modeliranja struktura uzeti su u obzir konstruktivni zahtjevi ovog postupka. Jedan od najvažnijih zahtjeva je debljina stijenke koja ne smije biti manja od 3 mm kako bi se postiglo potpuno ispunjavanje kalupa taljevinom te izbjegla pojava grešaka poput poroznosti, hladnog zavara ili napuklina i pukotina tijekom postupka lijevanja. Radovi poput F. Gallien et al., V. H. Carneiro et al. te S. Körber et al. [45-47] pokazuju da je kod manjih struktura moguće lijevanje i tanje stijenke no za to F. Gallien et al. i H. Carneiro et al. primjenjuju podtlak. Osim toga, šuplji prostor unutar ćelija trebao bi biti dovoljno velik kako bi se osiguralo nesmetano strujanje zraka unutar kalupa što je ključno za potpuno i pravilno sušenje keramičke školjke te sprječavanje nastajanja zarobljenih mjehurića zraka koji bi mogli negativno utjecati na kvalitetu odljevka.

## 4.3. Izrada pramodela

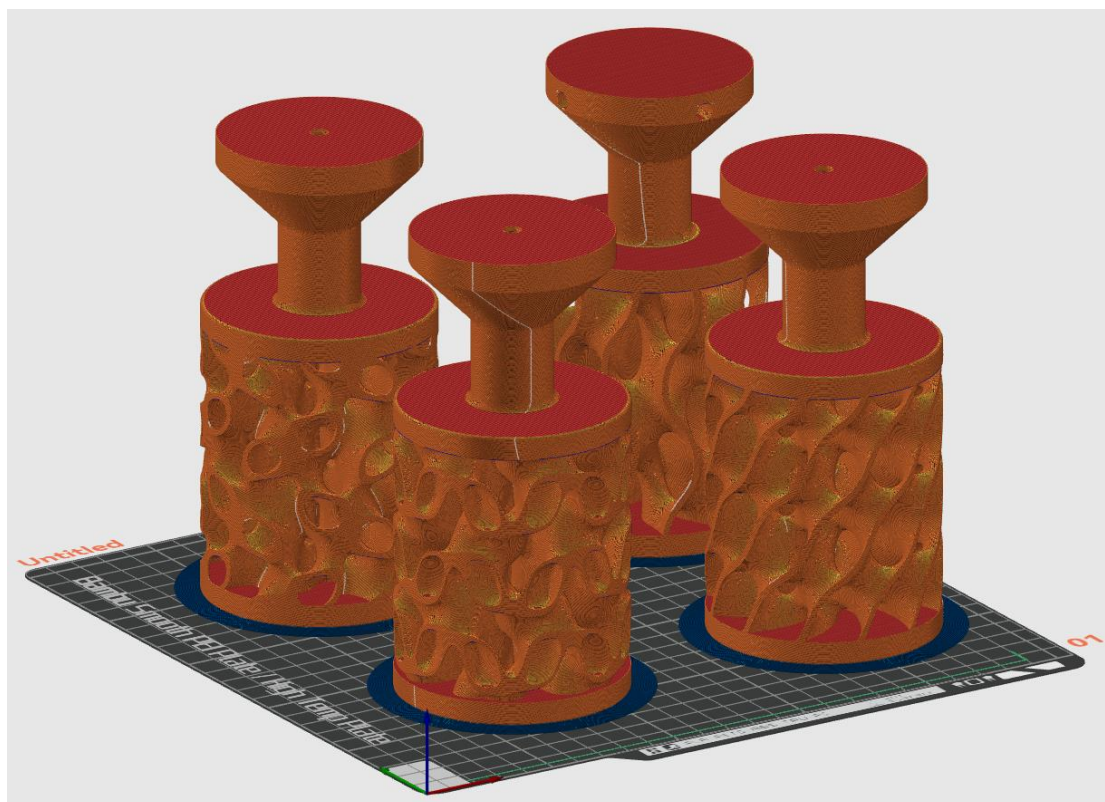
Slijedeći zahtjeve točnog lijeva iz poglavlja 4.2., u programu *nTopology* konstruirane su ćelijaste strukture s cilindrično mapiranim ćelijama. Sukladno ranijoj analizi u poglavlju 4.1., ovakav raspored ćelija osigurava dobru prilagodbu ćelija obliku ispitnog tijela te doprinosi ravnomjernijem rasporedu naprezanja unutar strukture, čime se postižu bolja mehanička svojstva. Po pravilima norme ISO 13314:2011 koja definira oblik i dimenzije ispitnih tijela, ispitna tijela izrađena su u obliku cilindra promjera 80 mm te visine 87,5 mm. Ćelije su dimenzija  $40 \times 40$  mm (polumjer 40 mm te visina 40 mm), dok je debljina stijenke minimalno 3 mm kako bi se zadovoljili zahtjevi točnog lijeva. U CAD programu *Solidworks* konstruiran je uljevni sustav koji se sastoji od pojila i spusta. Uljevni sustav omogućuje ulijevanje taljevine, njezin prolaz do kalupne šupljine uz pravilan tok te djeluje kao spremnik prilikom skupljanja odljevka kod hlađenja. Pojilo istovremeno djeluje kao spremnik i uljevna čaška promjera  $\varnothing 70$  mm na gornjem dijelu i visine 30 mm, dok je spust promjera  $\varnothing 28$  mm te visine 30 mm. Pravilno dimenzionirani uljevni sustav osigurava pravilan i nesmetan protok taljevine. Kako bi se dodatno poboljšalo popunjavanje kalupne šupljine taljevinom, na gornju i donju stranu cilindričnih uzoraka pridružene su cilindrične ploče promjera  $\varnothing 80$  mm te debljine 8 mm. Ove ploče omogućuju ravnomjernu raspodjelu toka taljevine po svim stijenkama strukture što smanjuje rizik od nastanka praznina i/ili drugih grešaka.

Ispitna tijela, odnosno pramodeli pripremljeni su za 3D ispis taložnim očvršćivanjem u već spomenutom programu za pripremu *Orcaslicer* (slike 4.7 i 4.8).



Slika 4.7. Modeli u pripremi za 3D ispis taložnim očvršćivanjem

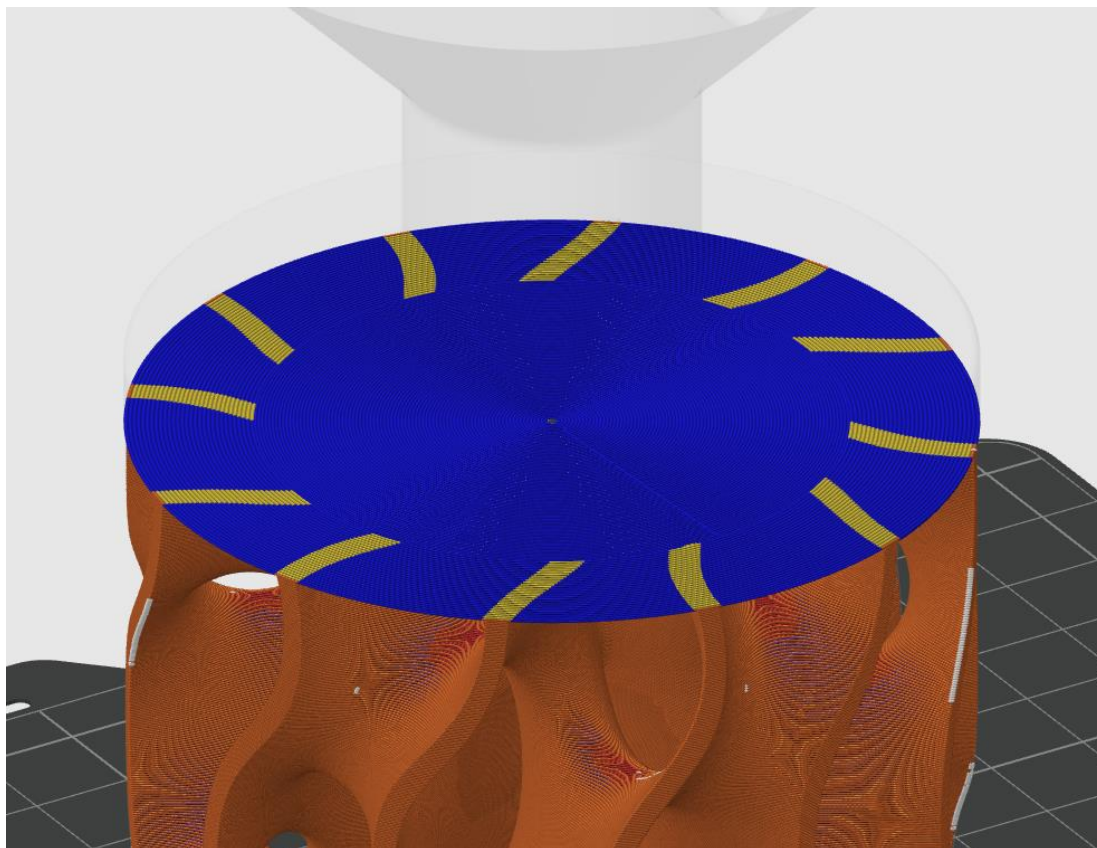




Slika 4.8. Pripremljeni modeli za 3D ispis taložnim očvršćivanjem

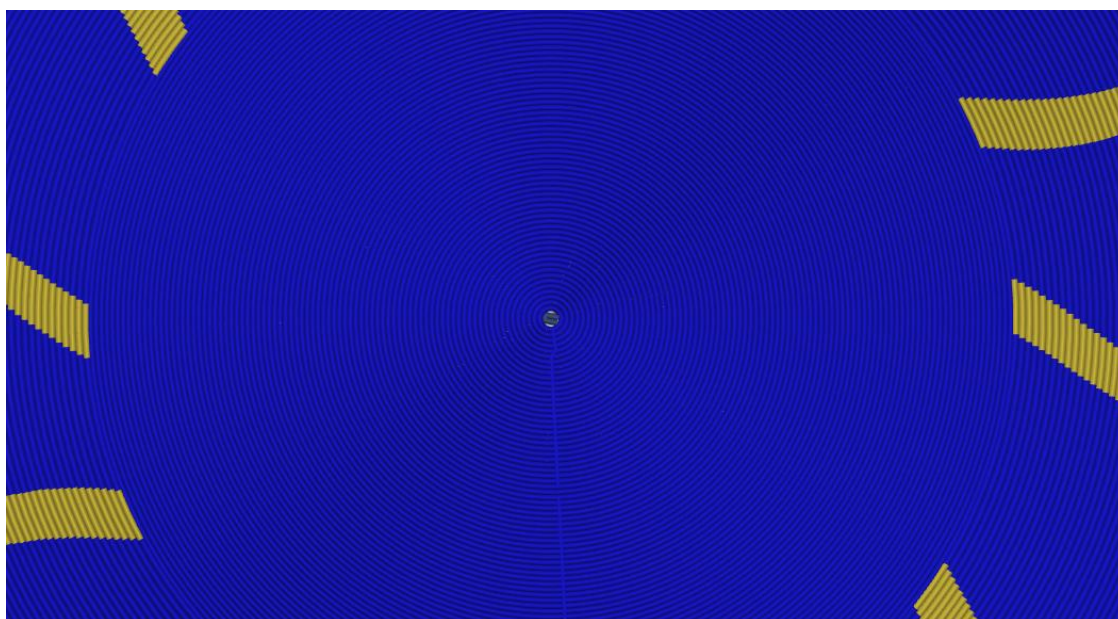
Za izradu pramodela upotrebljen je plastomerni materijal *Polycast*, odnosno PVB. Ukupno je izrađeno šest pramodela od kojih tri žiroidne strukture, te po jedan dijamantne, lidinoidne i splitP. Ukupno je primjenjenotri postupka točnog lijeva koja se razlikuju po vrsti primjenjenog kalupa te je žiroidna struktura odabrana kao mjerilo za sva tri postupka zbog toga što najbolje zadovoljava zahtjeve ljevačkog postupka. U odnosu na druge ćelijaste strukture navedene u ovom radu, žiroidna struktura za istu veličinu ćelije ima šupljine najvećeg volumena što osim ranije navedenih prednosti pozitivno utječe na prekrivanje cijele površine pramodela kalupnom mješavinom, odnosno gipsom ili keramičkom suspenzijom prilikom kalupljenja.

Svi pramodeli izrađeni su na 3D pisaču bez potpornih struktura, što je omogućilo cilindrično mapiranje. Problematično mjesto takvog pristupa prvi je sloj gornje cilindrične plohe. Kako bi se taj sloj mogao izraditi bez potporne strukture potreban je cilindrični uzorak gdje glava stroja polaže materijal u koncentričnim krugovima te tako omogućuje da položeni materijal ima potporu, odnosno “da ne visi u zraku“. Na slici 4.9 prikazan je presjek navedenog sloja.



Slika 4.9. Presjek strukture u razini prvog sloja gornje cilindrične ploče

Slika 4.10 prikazuje približeni detalj cilindričnog uzorka.



Slika 4.10. Detalj koncentričnog uzorka

Žuto su označena mjesta gdje se nalaze strukture ispod sloja, odnosno gdje polagani materijal ima potporu, a plavo mjesta koja se nalaze “u zraku“. Kod ovakve primjene bitno je osigurati da polaganje materijala u tom sloju kreće na mjestu gdje ima potporu, odnosno na mjestu označenom žutom bojom. Blijedo žuti prstenovi vidljivi na slici 4.7 su modifikatori koji ovo omogućuju.

Parametri primijenjeni za pojedine pramodele navedeni su u poglavlju 4.4, a izrađeni pramodele prikazani su na slici 4.11.



Slika 4.11. Pramodele izrađeni postupkom FDM u *Polycast* materijalu

## 4.4. Kalupljenje

### 4.4.1. *Točni lijev s gipsanim kalupom*

S obzirom da se za lijevanje upotrebljava cinkova legura s relativno niskim talištem, osim konvencionalnog točnog lijeva moguće je primijeniti i njegovu podvrstu s gipsanim kalupom. Ovaj postupak proveden je s pramodelom žiroidne strukture prikazanim na slici 4.12.





Slika 4.12. Pramodel žiroidne strukture za gipsani kalup

Parametri postupka taložnog očvršćivanja primijenjeni za pramodel:

- visina sloja 0,2 mm
- debljina stijenke 0,8 mm (2 zida)
- ispunjena 10 %.

Masa pramodela iznosi 131 g.

Mješavina upotrebljena za kalupljenje sastoji se od vode, gipsa i taljenog kvarca u volumnom omjeru 1,1 : 1 : 1,5 te talka kao aditiva čiji volumni udio u mješavini iznosi oko 1,5 %. Sastojci, prikazani na slici 4.13 dodaju se u miješalicu tim redoslijedom kako bi se spriječilo grudanje mješavine. Taljeni kvarc je punilo s vatrostalnim svojstvima koji gipsanom kalupu daje postojanost pri temperaturama do 1200 °C nakon sušenja. [69] Talk djeluje kao lubrikant te omogućuje lakše otpuštanje kalupa od stijenke odljevka. Također, upotrebljen kao premaz, povećava otpornost kalupa na stvaranje pukotina. [70] Kako bi se ojačao kalup u posudu za kalupljenje se na obodu umeću staklena vlakna (slika 4.14) ili čelična žica koji djeluju kao armatura. Zbog kompleksne ćelijaste strukture s velikim brojem šupljina važno je prilikom



kalupljenja pramodel najprije uroniti (slika 4.15) u kalupnu mješavinu kako zrak ne bi ostao zarobljen u unutrašnjosti pramodela. Zatim se pramodel može objesiti u posudu (slika 4.16) na način da ne dodiruje stijenke te se ulijeva ostatak kalupne mješavine (slika 4.17).



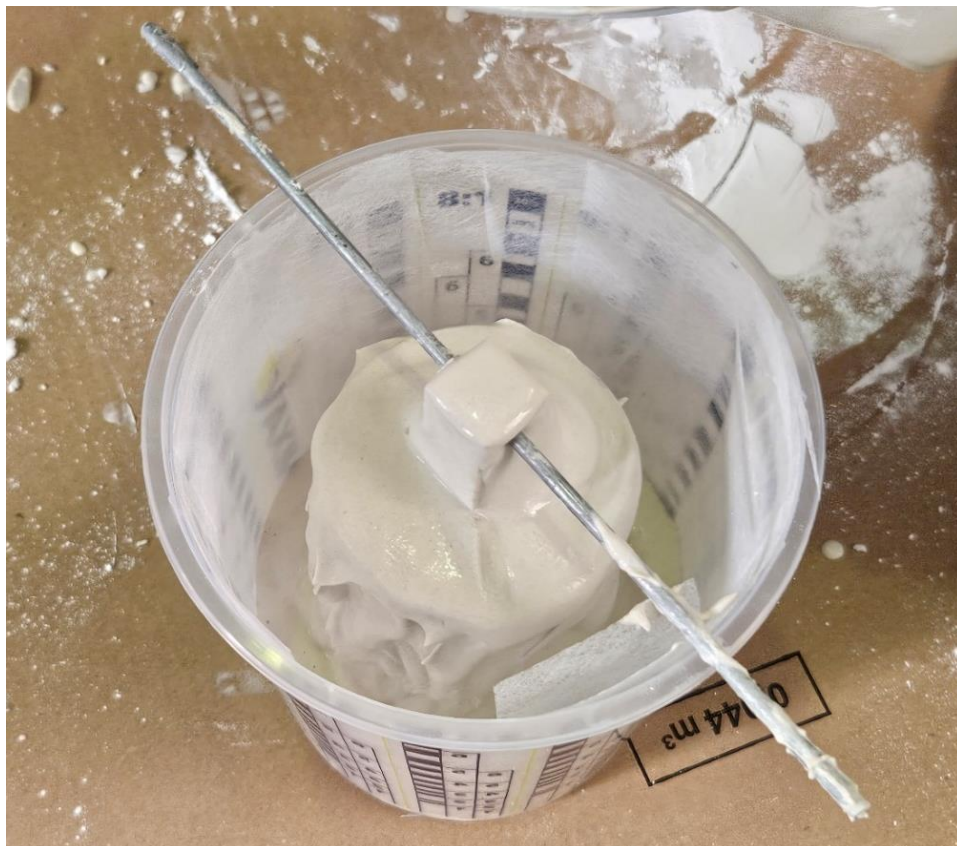
Slika 4.13. Sastojci kalupne mješavine gipsanog kalupa u omjerima



Slika 4.14. Staklena vlakna za ojačavanje gipsanog kalupa



Slika 4.15. Uranjanje pramodela u kalupnu mješavinu



Slika 4.16. Vješanje pramodela za kalupljenje



Slika 4.17. Gipsani kalup nakon inicijalnog stvrdnjavanja

Po očvršćivanju, kalup se vadi iz posude te stavlja u peć s regulacijom temperature na sušenje. Sušenje je nužno kako bi se iz kalupa isparila vlaga, odnosno voda u obliku vodene pare izašla iz njega. U slučaju nedovoljnog sušenja, prilikom izgaranja može doći do pucanja kalupa. Sušenje se provodi kroz duži period gdje se temperatura postepeno povisuje na sljedeći način:

1. 24 h pri 100 °C
2. 72 h pri 200 °C
3. 24 h pri 300 °C.

Gipsani kalup nakon sušenja prikazan je na slici 4.18.





Slika 4.18. Gipsani kalup nakon sušenja

#### **4.4.2. Točni lijev s keramičkom školjkom**

##### **4.4.2.1. Keramička suspenzija na bazi natrijevog silikata**

U ovom slučaju primijenjena je keramička suspenzija na bazi natrijevog silikata. Takva keramička suspenzija očvršćuje prvo kemijski (sintezom), a potom i fizikalno (sušenjem). Keramički kalup izrađuje se sljedećim redoslijedom: uranjanje pramodela u tenzid, uranjanje u keramičku suspenziju (slika 4.19), nanošenje određenog vatrostalnog agregata (slika 4.20), uranjanje u kloridnu kupku (slika 4.21) te sušenje. Postupak se ponavlja dok se ne postigne željena debljina kalupa.



Slika 4.19. Uranjanje pramodela u keramičku suspenziju na bazi natrijevog silikata



Slika 4.20. Posipavanje pramodela vatrostalnim agregatom



Slika 4.21. Uranjanje pramodela u kloridnu kupku

Veličina zrna agregata razlikuje se ovisno o sloju gdje je prvi sloj najfinije granulacije, a posljednji najgrublje. Keramička suspenzija izrađena je od vodene otopine natrijevog silikata (koncentracije 30 %) te kvarcnog praha granulacije 120 mesh (što odgovara granulaciji od 0,125 mm), u masenom omjeru 1:1. Kloridna kupka izrađena je kao vodena otopina amonijevog klorida (koncentracije 20 %). Za posip je upotrijebljen kvarcni pijesak različitih granulacija. Kalup je izrađen sa četiri sloja posipa te završnim slojem suspenzije. Između slojeva postav je sušen u peći s cirkulacijom zraka zagrijanoj pri 30 °C tijekom 24 sata (slika 4.22).





Slika 4.22. Sušenje keramičke školjke u peći

Za prva dva sloja posipa upotrebljen je kvarcni pijesak granulacije 20/50 mesh (što odgovara granulaciji od 0,297 mm do 0,841 mm), dok je za druga dva sloja posipa upotrebljen kvarcni pijesak granulacije 10/20 mesh (što odgovara granulaciji od 0,841 mm do 2 mm). Veći mesh broj označava finiji pijesak, odnosno zrna manje veličine. Završni sloj suspenzije djeluje kao premaz te sprječava ljuštenje pijeska s vanjske strane školjke.

Osušena, nežarena keramička školjka prikazana je na slici 4.23.



Slika 4.23. Osušena školjka proizvedena keramičkom suspenzijom na bazi natrijevog silikata

Postupak je proveden s pramodelom žiroidne strukture 3D ispisani sa sljedećim parametrima:

- visina sloja 0,2 mm
- debljina stijenke 0,4 mm (1 zid)
- ispunjena 10 %.

Masa pramodela žiroidne strukture proizvedenog postupkom FDM iznosi 98 g.

#### 4.4.2.2. Keramička suspenzija na bazi koloidne silike

Za razliku od prijašnjih postupaka gdje je primijenjena jedna struktura, kod provođenja ovog postupka primijenjena su tri pramodela različitih ćelijastih struktura prikazanih na slici 4.24.





Slika 4.24. Pramodeli dijamantne, splitP i lidinoidne strukture

Dijamantna, lidinoidna te splitP struktura zbog svoje geometrije imaju šupljine manjih dimenzija za istu veličinu ćelije u usporedbi sa žiroidnom strukturom što otežava potpuno prekrivanje stijenke pramodela suspenzijom. Upotrijebljena je gotova keramička suspenzija *Remasol JUS DIP* proizvođača REMET na bazi koloidne silike. Takva keramička suspenzija očvršćuje isključivo fizikalno (sušenjem). Keramički kalup izrađuje se sljedećim redoslijedom: uranjanje pramodela u keramičku suspenziju (slika 4.25), nanošenje određenog vatrostalnog agregata (slika 4.26) te sušenje. Postupak se ponavlja dok se ne dobije željena debljina kalupa.



Slika 4.25. Uranjanje pramodela u keramičku suspenziju na bazi koloidne silike

Prilikom uranjanja pramodela u suspenziju, nužno je postepeno i polagano provođenje postupka kako bi zrak pravovremeno izašao iz svih šupljina.



Slika 4.26. Pramodel splitP strukture posipan agregatom

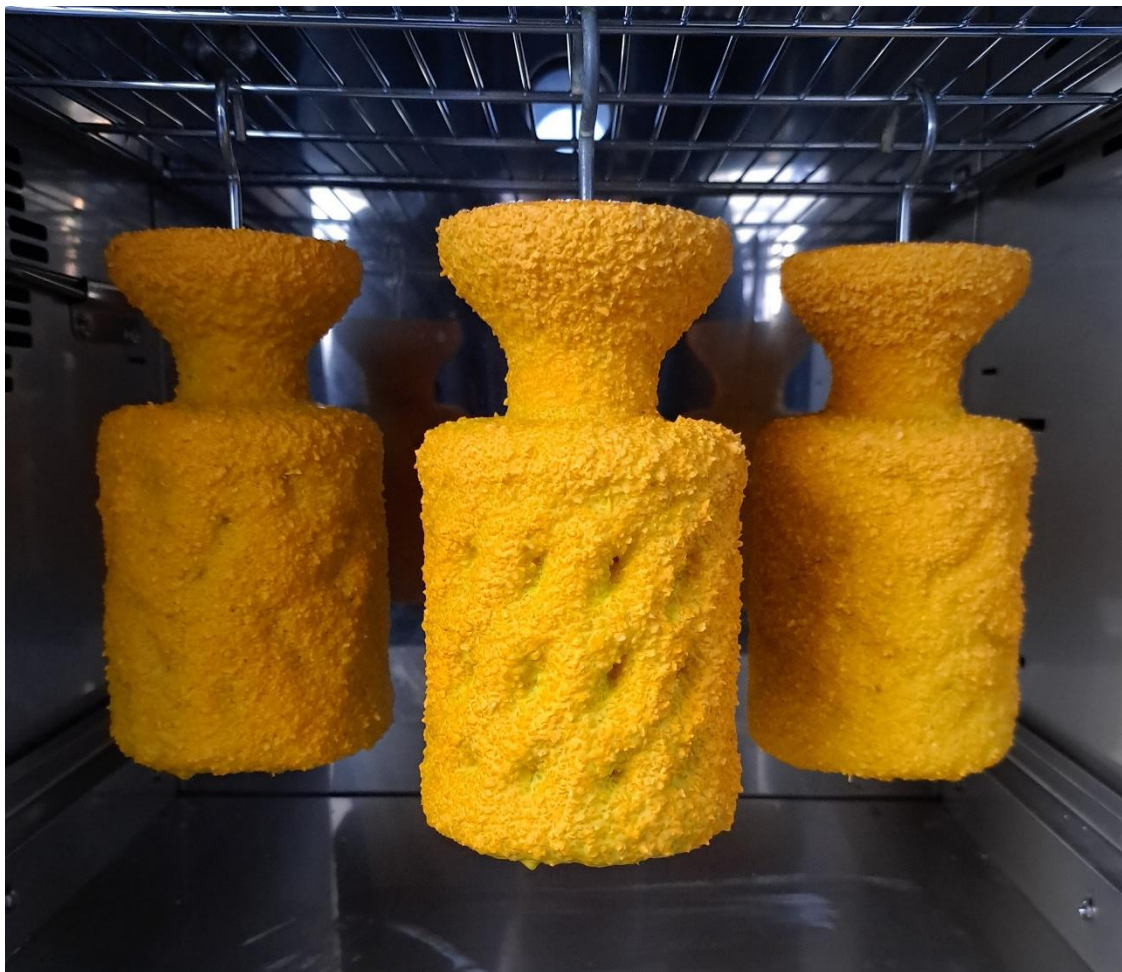
Točan sastav suspenzije je poslovna tajna, no općenito se radi o keramičkoj suspenziji na bazi koloidne silike. Za posip je upotrebljen kvarcni i šamotni pijesak različitih granulacija. Kalup je izrađen s četiri sloja posipa te završnim slojem suspenzije. Između svakog sloja, provedeno je sušenje u peći s cirkulacijom zraka zagrijanoj pri 30 °C tijekom perioda od 24 sata (slika 4.27). Keramička suspenzija ovog proizvođača prilikom sušenja mijenja boju iz žute u narančasto smeđu te služi kao indikator.





Slika 4.27. Sušenje keramičkih školjki na bazi koloidne silike

Za prvi sloj posipa upotrjebljen je šamotni pijesak granulacije 30/60 mesh (što odgovara granulaciji od 0,25 mm do 0,595 mm), za drugi sloj posipa šamotni pijesak granulacije 16/30 mesh (što odgovara granulaciji od 0,595 mm do 1,19 mm), te za treći i četvrti sloj posipa kvarcni pijesak granulacije 10/20 mesh (što odgovara granulaciji od 0,841 mm do 2 mm). Osušene, nežarene keramičke školjke prikazane su na slici 4.28.



Slika 4.28. Osušene, nežarene keramičke školjke na bazi koloidne silike premazane završnim slojem suspenzije

Kod ovog postupka za 3D ispis svih triju pramodela primijenjeni su sljedeći parametri:

- visina sloja 0,2 mm
- debljina stjenke 1,2 mm (3 zida)
- ispuna 15 %.

Mase proizvedenih pramodela dijamantne, lidinoidne te splitP strukture su redom 170 g, 212 g i 182 g. Razlika u masi dobar je pokazatelj veličine i broja šupljina unutar ćelija struktura gdje su masa i veličina ćelija obrnuto proporcionalne. Broj šupljina je smanjenjem njihovih veličina veći zbog jednake debljine stijenke kod svih struktura. Iako to naravno ovisi o geometriji, općenito se može reći da je kod izradaka izrađenih postupkom FDM, a pogotovo tankostjenih izradaka, većina mase sadržana u stijenci, odnosno zidovima.



#### 4.5. Izgaranje pramodela i žarenje kalupa

Sukladno uputi proizvođača *Polymaker*, navedenoj u tehničkom listu materijala *Polycast*, svi kalupi žareni su u plinskoj peći prikazanoj na slikama 4.29 i 4.30 60 minuta pri temperaturi od približno 1000 °C. [50] Pri žarenju kalupa istovremeno dolazi do izgaranja pramodela te je rezultat ovog postupka očvrsnuti kalup s praznom kalupnom šupljinom. Gipsani kalup nije potrebno žariti, no navedeno vrijeme i temperatura propisani su za izgaranje materijala *Polycast*, stoga je gipsani kalup podvrgnut istom procesu.



Slika 4.29. Izgaranje pramodela i žarenje keramičkih školjki





Slika 4.30. Izgaranje pramodela u gipsanom kalupu

#### 4.6. Lijevanje metala

Za lijevanje odljevaka upotrijebljena je cinkova legura ZAMAK 410 čiji sastav je 95 % cink, 3,8 % do 4,2 % aluminijski, 0,7 % do 1,1 % bakar te 0,0035 % do 0,06 % magnezij. Legura je taljena u grafitnom lončiću u istoj peći primijenjenoj za izgaranje, odnosno žarenje (slika 4.31). Talište cinka je pri 419,53 °C, dok je vrelište pri 907 °C kada nastaju pare cinkova oksida koje su opasne za zdravlje ljudi. [71, 72] S obzirom da temperatura peći prelazi vrelište cinka, legura je taljena oko 10 minuta te u trenutku kada je sva legura prešla iz čvrstog u tekuće stanje lončić je izvađen iz peći.



Slika 4.31. Taljenje cinkove legure ZAMAK 410 u plinskoj peći

Legura je lijevana u tople kalupe. Lijevanje u gipsani kalup prikazano je na slici 4.32, dok je lijevanje u keramičke školjke prikazano na slikama 4.33, 4.34 i 4.35.





Slika 4.32. Lijevanje legure u gipsani kalup



Slika 4.33. Lijevanje legure u keramičku školjku na bazi natrijevog silikata





Slika 4.34. Lijevanje legure u keramičku školjku na bazi koloide silike



Slika 4.35. Postupak lijevanja



Rezultati lijevanja u sve kalupe, odnosno odljevci u kalupima prikazani su na slikama 4.36, 4.37 i 4.38.



Slika 4.36. Rezultat lijevanja u gipsani kalup

Tijekom žarenja gipsani kalup je puknuo, te sami postupak lijevanja nije uspio (slika 4.36).



Slika 4.37. Rezultat lijevanja u keramičku školjku na bazi natrijevog silikata



Slika 4.38. Rezultat lijevanja u keramičku školjku na bazi koloidne silike



#### 4.7. Vađenje odljevaka iz kalupa i čišćenje

Kako bi se odljevak mogao izvaditi iz kalupa, kalup je potrebno razbiti, odnosno odstraniti keramičku školjku. Nakon hlađenja odljevaka na temperaturu oko 100 °C keramičke školjke kratko se uranjaju u vodu nakon čega slijedi njihovo razbijanje prikazano na slici 4.39 pomoću ručnog alata.



Slika 4.39. Razbijanje keramičke školjke

Nakon grubog odstranjivanja školjke odljevci prikazani na slikama 4.40 i 4.41 dodatno su potopljeni u vodu sobne temperature na kratko vrijeme te strojno očišćeni vodenim mlazom bez abraziva.



Slika 4.40. Odljevak žiroidne strukture nakon grubog odstranjivanja keramičke školjke



Slika 4.41. Odljevci lidinoidne, splitP i dijamantne strukture nakon grubog odstranjivanja keramičke školjke



Odljevci nakon čišćenja vodenim mlazom prikazani su na slici 4.42.



Slika 4.42. Odljevci nakon čišćenja vodenim mlazom

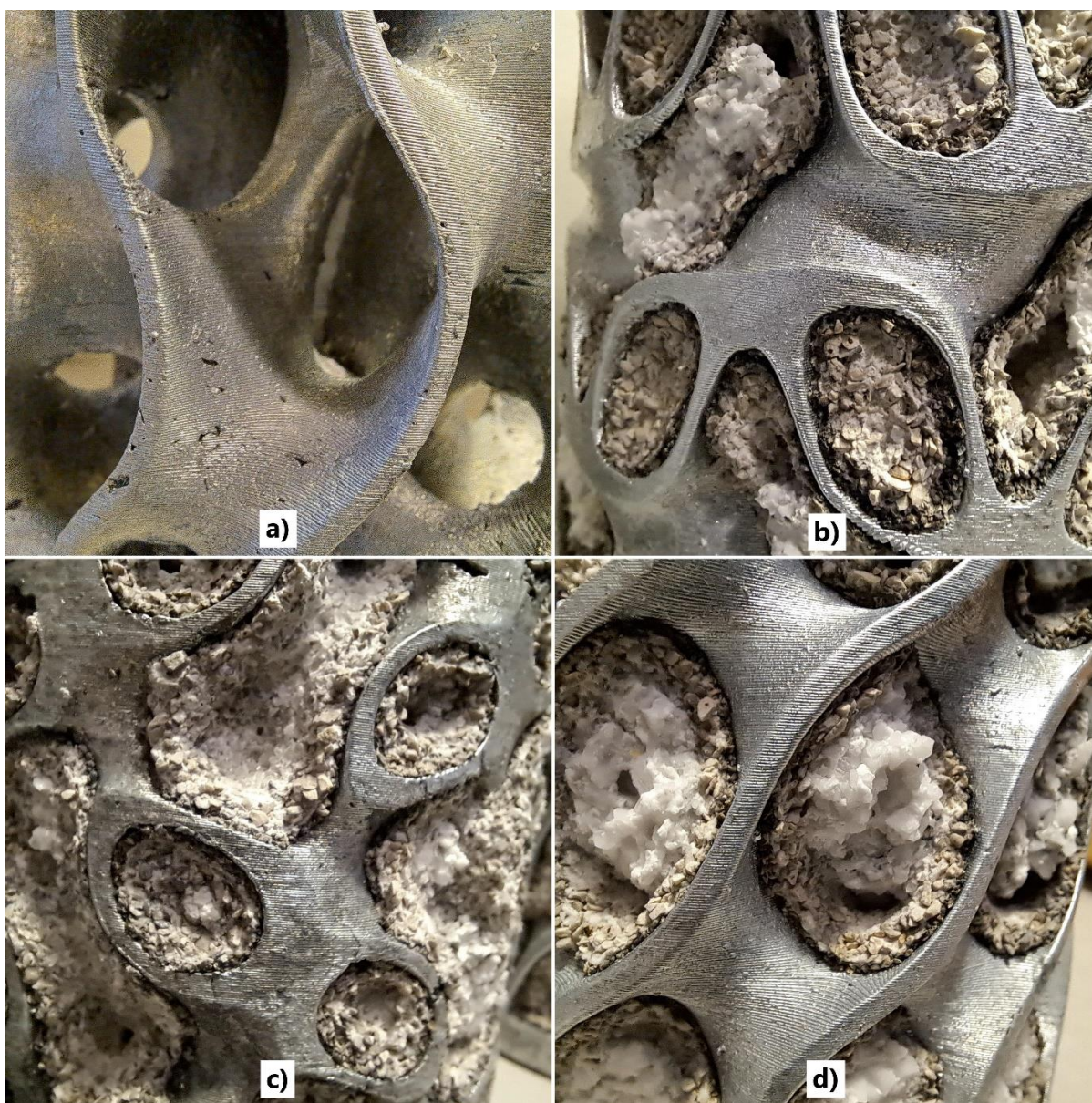
#### 4.8. Rezultati

Prilikom postupka žarenja gipsanog kalupa, na njemu su se formirale manje pukotine koje su se prilikom vađenja kalupa iz peći dodatno proširile, što je tijekom lijevanja dovelo do curenja taljevine. Slične pukotine nisu uočene kod keramičkih školjki. Nastanak pukotina kod gipsanog kalupa može se pripisati visokoj i neravnomjernoj temperaturi unutar plinske peći. Neravnomjerno zagrijavanje rezultiralo je naprezanjem te naknadnim pucanjem kalupa.

Vizualnom analizom površine odljevaka prikazanih na slici 4.43, utvrđeno je da odljevci lidinoidne, splitP i dijamantne strukture pokazuju nešto višu kvalitetu površine u usporedbi s ostalim strukturama. Na površini žiroidne strukture vidljive su nesavršenosti uzrokovane tijekom faze izrade keramičke školjke. Zbog debljine stijenke pramodela od samo 0,4 mm (što odgovara jednom sloju zida), na površini pramodela ostao je veliki broj poroznosti koje nisu vidljive golim okom no uzrokovale su prodiranje keramičke suspenzije kroz stijenku u unutrašnjost pramodela. Cilj smanjenja debljine stijenke kod žiroidne strukture bio je smanjiti količinu materijala pramodela potrebnog za izgaranje. S druge strane, deblje stijenke kod ostalih struktura dovele su do većeg nakupljanja pepela u unutrašnjosti keramičke školjke, ali to nije značajno utjecalo na kvalitetu odljevaka. Keramička školjka za točni lijev ima poroznu



strukturu, što doprinosi izlasku plinova prilikom izgaranja pramodela. Zaključuje se da je moguće i preporučljivo primijeniti pramodel s debljom stijenkom. Pri čišćenju školjki, uočene su razlike između keramičkih školjki na bazi natrijevog silikata i onih na bazi koloidne silike. Vodeni mlaz uspješno je uklonio većinu ostataka školjke na bazi natrijevog silikata, no većinu školjke na bazi koloidne silike, posebice u unutrašnjosti strukture odljevka, nije bilo moguće ukloniti ovim postupkom. Zbog toga se preporučuje dodatno čišćenje, primjerice sačmarenjem ili pjeskarenjem.



Slika 4.43. Površine odljevaka a) žiroidne, b) lidinoidne, c) splitP i d) dijamantne strukture



Unatoč sličnosti u kvaliteti površine, keramička školjka na bazi natrijevog silikata pokazala se boljim izborom za lijevanje ovakvih struktura zbog jednostavnijeg čišćenja. Vizualnim pregledom potvrđeno je vrlo dobro ispunjavanje kalupne šupljine, no bez dodatnih nerazornih i/ili razornih ispitivanja nije moguće komentirati potpunu popunjenost unutrašnjosti strukture.

## 5. ZAKLJUČAK

Provedeni eksperimenti u ovom radu te analiza istih pokazali su mogućnost primjene pramodela izrađenih aditivnim postupcima u postupku točnog lijeva za lijevanje složenih ćelijastih struktura. Upotreba *Polycast* materijala, različitih pristupa mapiranja ćelija te optimiranje modela za izradu bez potpornih struktura pokazali su pozitivan učinak na provedbu postupka. Nadalje, cilindrično mapiranje omogućilo je ravnomjernu raspodjelu ćelija u cilindričnim ispitnim tijelima. U kontekstu kalupljenja, istraživanje je pokazalo neprilagođenost gipsanih kalupa za ovu primjenu. Iako ekonomična opcija za lijevanje legura nižeg tališta, zbog potrebnog visokotemperaturnog izgaranja pramodela, gipsani kalupi pokazali su se neprimjenjivim za ovaj postupak. Treba napomenuti da je za potpuno isključenje takvih kalupa potrebno provesti postupak s peći s regulacijom temperature. U odnosu na gipsane kalupe, keramičke školjke na bazi natrijevog silikata i koloidne silike pružaju višu postojanost pri visokim temperaturama te dobru kvalitetu površine. Primijenjeni postupci lijevanja s cinkovom legurom ZAMAK 410 pokazali su dobru popunjenost kalupa bez značajnih grešaka. Rad naglašava potencijal primjene postupaka aditivnih tehnologija za izradu pramodela te primjenu tehnologija za izradu ćelijastih struktura visoke kvalitete. Rezultati istraživanja pružaju temelj za daljnja istraživanja, potvrđujući da odabir materijala pramodela, metode kalupljenja te oblik strukture imaju značajan utjecaj na kvalitetu metalnih odljevaka. Nadalje, istraživanjem se otvara put za provedbu ispitivanja mehaničkih svojstva (npr. pritisnih svojstava) odljevaka ćelijastih struktura u usporedbi s izradcima dobivenim postupcima aditivne proizvodnje metala, usporedbe dimenzija i geometrije 3D CAD modela s izrađenim metalnim odljencima te ispitivanje popunjenosti samog odljevka.

**LITERATURA**

- [1] A. G. Demir, Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thinwalled structures, *Optics and Lasers in Engineering*, 100, 9–17, 2018.
- [2] Y. Ibrahim, Z. Li, C. M. Davies, C. Maharaj, J. P. Dear, P. A. Hooper, Acoustic resonance testing of additive manufactured lattice structures, *Additive Manufacturing*, 24, 566–576, 2018.
- [3] D. J. McGregor, S. Tawfick, W. P. King, Automated metrology and geometric analysis of additively manufactured lattice structures, *Additive Manufacturing*, 28, 535–545, 2019.
- [4] N. Cohen, R. M. McMeeking, M. R. Begley, Modeling the non-linear elastic response of periodic lattice materials, *Mechanics of Materials*, 129, 2019.
- [5] O. D. Neikov, Powders for Porous Powder Metallurgy Technology, *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders, Technologies and Applications*, 212-223, 2009.
- [6] A. Du Plessis, D. P. Kouprianoff, I. Yadroitsava, I. Yadroitsev, Mechanical Properties and In Situ Deformation Imaging of Microlattices Manufactured by Laser Based Powder Bed Fusion, *Materials*, 11, 1663, 2018.
- [7] C. Qiu, S. Yue, N. J. E. Adkins, M. Ward, H. Hassanin, P. D. Lee, P. J. Withers, M. M. Attallah, Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 628, 188–197, 2015.
- [8] B. M. West, N. E. Capps, J. S. Urban, J. D. Pribe, T. J. Hartwig, T. D. Lunn, B. Brown, D. A. Bristow, R. G. Landers, E. C. Kinzel, Modal analysis of metal additive manufactured parts, *Manufacturing Letters*, 13, 30–33, 2017.
- [9] Y. Kok, X. P. Tan, P. Wang, M. L. S. Nai, N. H. Loh, E. Liu, S. B. Tor, Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review, *Materials & Design*, 139, 565–586, 2018.
- [10] X. Li, W. Tan, Numerical investigation of effects of nucleation mechanisms on grain structure in metal additive manufacturing, *Computational Materials Science*, 153, 159–169, 2018.
- [11] D. S. Shim, J. Y. Seo, H. S. Yoon, K. Y. Lee, W. J. Oh, Additive manufacturing of porous metals using laser melting of Ti6Al4V powder with a foaming agent, *Materials Research Express*, 5, 86518, 2018.

- [12] A. D. Dressler, E. W. Jost, J. C. Miers, D. G. Moore, C. C. Seepersad, B. L. Boyce, Heterogeneities dominate mechanical performance of additively manufactured metal lattice struts, *Additive Manufacturing*, 28, 692–703, 2019.
- [13] L. S. Santos, S. K. Gupta, H. A. Bruck, Simulation of buckling of internal features during selective laser sintering of metals, *Additive Manufacturing*, 23, 235–245, 2018.
- [14] A. G. Demir, Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures, *Optics and Lasers in Engineering*, 100, 9–17, 2018.
- [15] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, Additive manufacturing of metals, *Acta Materialia*, 117, 371–392, 2016.
- [16] O. Zinovieva, A. Zinoviev, V. Ploshikhin, Three-dimensional modeling of the microstructure evolution during metal additive manufacturing, *Computational Materials Science*, 141, 207–220, 2018.
- [17] V. H. Carneiro, H. Puga, J. Meireles, Heat treatment as a route to tailor the yield-damping properties in A356 alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 729, 1–8, 2018.
- [18] V. H. Carneiro, H. Puga, Solution Treatment Enhances Both Static and Damping Properties of Al–Si–Mg alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49, 5942–5945, 2018.
- [19] H. Puga, V. H. Carneiro, J. Barbosa, D. Soares, Effect of grain and secondary phase morphologies in the mechanical and damping behavior of Al7075 alloys, *Metals and Materials International*, 22, 863–871, 2016.
- [20] Y. Tang, W. K. Tan, J. Y. H. Fuh, H. T. Loh, Y. S. Wong, S. C. H. Thian, L. Lu, Micro-mould fabrication for a micro-gear via vacuum casting, *Seventh Asian and Pacific Population Conference*, 334–339, 2007.
- [21] Y. Xue, W. Wang, F. Han, Enhanced compressive mechanical properties of aluminum based auxetic lattice structures filled with polymers, *Composites Part B: Engineering*, 171, 183–191, 2019.
- [22] C. Yang, B. Li, M. Ren, H. Fu, Micro precision casting based on investment casting for micro structures with high aspect ratio, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, 521–525, 2009.
- [23] D. Snelling, C. Williams, A. Druschitz, Mechanical and Material Properties of Castings produced via 3d printed molds, *Additive Manufacturing*, 27, 199–207, 2019.
- [24] Ramana Rao T.V., *Metal casting, Principles and Practice*, New Delhi, 2003.
- [25] <https://www.metaltex.com/blog/history-of-metal-casting/>, 21.12.2024.

- [26] <https://www.castingsource.com/column/2019/08/16/revisiting-metalcastings-fascinating-history>, 21.12.2024.
- [27] <https://benchmarkabrasives.com/blogs/metal-working/history-and-evolution-of-metal-casting>, 21.12.2024.
- [28] [https://niroumand.iut.ac.ir/sites/niroumand.iut.ac.ir/files/files\\_course/timeline\\_of\\_casting\\_technology.pdf](https://niroumand.iut.ac.ir/sites/niroumand.iut.ac.ir/files/files_course/timeline_of_casting_technology.pdf)
- [29] [https://en.wikipedia.org/wiki/Palace\\_of\\_Aachen](https://en.wikipedia.org/wiki/Palace_of_Aachen), 21.12.2024.
- [30] <https://bernierinc.com/brief-history-metal-casting/>, 21.12.2024.
- [31] <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803100407390>, 21.12.2024.
- [32] <https://www.afsbirmingham.com/timeline-of-casting.html>, 21.12.2024.
- [33] I. Budić, Z. Bonačić Mandinić, *Osnove tehnologije kalupljenja: Jednokratni kalupi II. Dio*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2004.
- [34] D. Kutleša, *Prezentacija: Lijevanje, Studij dizajna*, 2020-21.
- [35] S. Dalquist, T. Gutowski, *Life cycle analysis of conventional manufacturing techniques: Sand casting*, 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2004.
- [36] B. Bauer, *Ljevarstvo: Proizvodni postupci*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [37] M. Iqbal, S. Patel, G. Vidyarthi, *Shell Mold Casting Manufacture of Complex Parts with Thin Sections*, International journal of engineering sciences & research technology, 2014.
- [38] S. Jones, C. Yuan, *Advances in shell moulding for investment casting*, Journal of Materials Processing Technology 135, 258–265, 2003.
- [39] J. Ivković, *Izrada alata za školjkasti lijev*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [40] G. Casalino, L.A.C. De Filippis, A. Ludovico, *A technical note on the mechanical and physical characterization of selective laser sintered sand for rapid casting*, Journal of Materials Processing Technology 166, 1–8, 2005.
- [41] M. Upadhyay, T. Sivarupan, M. El Mansori, *3D printing for rapid sand casting—A review*, Journal of Manufacturing Processes 29, 211–220, 2017.
- [42] J. Banhart, *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*, Progress in Materials Science, 46 (6), 559–632, 2001.

- [43] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, *Metal Foams*, Butterworth-Heinemann, Burlington, 2000.
- [44] R. Goodall, A. Mortensen, *Porous Metals*, *Physical Metallurgy*, 2399–2595, 2014.
- [45] F. Gallien, V. Gass, A. Mortensen, Investment casting of periodic aluminum cellular structures using slurry-cast table salt moulds, *Materials & Design*, 215, 2022.
- [46] V. H. Carneiro, S. D. Rawson, H. Puga, J. Meireles, P. J. Withers, Additive manufacturing assisted investment casting: A low-cost method to fabricate periodic metallic cellular lattices, *Additive Manufacturing*, 33, 2020.
- [47] S. Körber, R. Völkl, U. Glatze, 3D printed polymer positive models for the investment casting of extremely thin-walled single crystals, *Journal of Materials Processing Technology*, 293, 2021.
- [48] M. Vaezi, D. Safaeian, Investment Casting of Gas Turbine Blade by Used of Rapid Technologies, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3), 2979-2988, 2009.
- [49] <https://polymaker.com/product/polycast/>, 3.1.2025.
- [50] Polycast Technical Data Sheet, 2024.
- [51] T. A. Schaedler, W. B. Carter, Architected cellular materials, *Annual Review of Materials Research*, 46, 187–210, 2016.
- [52] D. W. Rosen, Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures, *Computer-Aided Design and Applications*, 4(5), 585–594, 2007.
- [53] M. Leary, M. Mazur, J. Elambasseril, M. McMillan, T. Chirent, Y. Sun, M. Qian, M. Easton, M. Brandt, Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures, *Materials & Design*, 98, 344–57, 2016.
- [54] P. Heinl, A. Rottmair, C. Körner, R. F. Singer, Cellular titanium by selective electron beam melting, *Advanced Energy Materials*, 9(5), 2007.
- [55] M. K. Ravari, M. Kadkhodaei, M. Badrossamay, R. Rezaei, Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling, *International Journal of Mechanical Sciences*, 88, 154–61, 2014.
- [56] A. Nazir, K. M. Abate, A. Kumar, J. Y. Jeng, A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9), 3489–510, 2019.
- [57] T. Scharowsky, V. Juechter, R. F. Singer, C. Körner, Influence of the scanning strategy on the microstructure and mechanical properties in selective electron beam melting of Ti–6Al–4V. *Advanced Energy Materials*, 17(11), 1573–8, 2015.



- [58] M. Markl, C. Körner, Multiscale modeling of powder bed-based additive manufacturing, *Annual Review of Materials Research*, 46, 93–123, 2016.
- [59] C. Meier, S. L. Fuchs, N. Much, J. Nitzler, R. W. Penny, P. M. Praegla, S. D. Proell, Y. Sun, R. Weissbach, M. Schreter, N. E. Hodge, A. John Hart, W. A. Wall, Physics-based modeling and predictive simulation of powder bed fusion additive manufacturing across length scales, *GAMM-Mitt*, 44(3), e202100014, 2021.
- [60] L. J. Gibson, M. F. Ashby, *Cellular solids: structure and properties*, Cambridge university press, 1997.
- [61] M. F. Ashby, D. Cebon, Materials selection in mechanical design, *Le Journal de Physique IV*, 3(C7), C7-1, 1993.
- [62] S. Xu, J. Shen, S. Zhou, X. Huang, Design of lattice structures with controlled anisotropy, *Materials & Design*, 93, 443-447, 2016.
- [63] S. Van Bael, G. Kerckhofs, M. Moesen, G. Pyka, J. Schrooten, J. P. Kruth, Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures, *Materials Science and Engineering: A*, 528(24), 7423-7431, 2011.
- [64] L. Hao, D. Raymond, Design and additive manufacturing of cellular lattice structures, *The International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP)*, Leiria, Portugal, 2011.
- [65] G. Pyka, G. Kerckhofs, I. Papantoniou, M. Speirs, Surface Roughness and Morphology Customization of Additive Manufactured Open Porous Ti6Al4V Structures, *Materials*, 6(10), 4737-4757, 2013.
- [66] Roman Fraj-Sladoljev, *Selektivno lasersko srašćivanje i taljenje metala*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [67] D. Acierno, A. Patti, Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties—An Overview, *Materials* 16(24):7664, 2023.
- [68] ISO 13314:2011, Mechanical testing of metals — Ductility testing — Compression test for porous and cellular metals, 2011.
- [69] B. Pisarek, M. Pawlak, Selection of the temperature of casting the bronzes to plaster moulds, *Archives of Foundry Engineering* 9(4), 203-208, 2009.
- [70] U. Nwaogu, N. S. Tiedje, Foundry Coating Technology: A Review, *Materials Sciences and Applications* 02(08), 2011.

[71] A. Grgić, Svojstva i primjena cinka i njegovih legura, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.

[72] <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2796768/>, 18.1.2025.