

# Simulacija kokilnog lijevanja poklopca od aluminijske legure

---

**Klobučar, Borna**

**Undergraduate thesis / Završni 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:235:159058>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Borna Klobučar**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Borna Klobučar

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Branku Baueru na pomoći tijekom izrade ovog rada. Također zahvaljujem asistentu Karlu Jurkoviću mag. ing. mech. na pomoći pri provedbi eksperimentalnog dijela rada. Posebno zahvaljujem svojoj obitelji na velikoj podršci tijekom studiranja.

Borna Klobučar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Borna Klobučar** JMBAG: **0035232985**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija kokilnog lijevanja poklopca od aluminijske legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Permanent mould casting simulation of aluminium alloy cover**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju kokilnog lijevanja i prikupiti podatke o konstrukciji i izradi kalupa za lijevanje aluminijskih legura.

Za zadani odljevak, poklopac od aluminijske legure, potrebno je konstruirati CAD model s uljevnim sustavom te napraviti simulaciju lijevanja u programskom paketu ProCAST. Analizirati i optimirati parametre lijevanja s obzirom na kvalitetu odljevka.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

Datum predaje rada:

**1. rok:** 20. i 21. 2. 2025.  
**2. rok:** 10. i 11. 7. 2025.  
**3. rok:** 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 24. 2. – 28. 2. 2025.  
**2. rok:** 15. 7. – 18. 7. 2025.  
**3. rok:** 22. 9. – 26. 9. 2025.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK .....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	1
2. KRATKA POVIJEST LJEVARSTVA .....	2
2.1. Bakreno i brončano doba .....	2
2.2. Željezno doba .....	4
2.3. Moderno doba .....	5
2.3.4. Lijevanje aluminijske legure .....	6
3. ALUMINIJ .....	8
3.1. Aluminijske legure .....	10
3.1.1. Al-Si legure .....	11
3.1.2. Al-Mg legure .....	11
3.1.3. Al-Cu legure .....	12
3.2. Oksidacija i uključci u aluminiju .....	12
4. LIJEVANJE U TRAJNI KALUP .....	15
4.1. Kokilni ljevanje .....	17
4.1.1. Izrada i priprema kalupa .....	18
4.1.2. Postupak lijevanja .....	18
4.1.3. Završne faze i obrada odljevka .....	20
5. SIMULACIJA LIJEVANJA .....	21
5.1. Analiza i optimizacija odljevaka .....	21
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	26
6.1. CAD model .....	26
6.2. Simulacija lijevanja i skrućivanja .....	28
6.3. Greške poroznosti .....	33
7. ZAKLJUČAK .....	36
LITERATURA .....	37

## POPIS SLIKA

Slika 2.1	Bakrena figurica žabe [2].....	2
Slika 2.2	Postupak lijevanja brončanih vrata prikazan u egipatskoj grobnici [1] .....	3
Slika 2.3	Prvi odliveni željezni most Iron Bridge u Engleskoj [2] .....	5
Slika 2.4	20 francuskih franaka od aluminija iz doba Napoleona (1857.) [1] .....	6
Slika 3.1	Boksit [6] .....	8
Slika 3.2	Podjela aluminijevih legura [8].....	11
Slika 4.1	Primjeri odljevaka odlivenih gravitacijskim lijevom [9].....	16
Slika 4.2	Shematski prikaz kokilnog lijeva [3].....	17
Slika 4.3	Proizvodni koraci kod kokilnog lijeva: a) nanošenje premaza, b) zatvaranje kokile, c) lijevanje [8] .....	19
Slika 4.4	Kokila s metalnom i s pješčanom jezgrom [8].....	20
Slika 5.1	Lanac ljevačkog procesa [2] .....	22
Slika 5.2	Punjenje i početak hlađenja odljevka [2].....	23
Slika 5.3	Početak skrućivanja i napajanje debelih stijenki odljevka [2] .....	23
Slika 5.4	Usporedba optimizacije eksperimentalne i računalne metode ispitivanja valjanosti procesa lijevanja [12] .....	24
Slika 6.1	Geometrija odljevka s uljevnim sustavom te najvažnije dimenzije .....	26
Slika 6.2	3D model polovice kokile.....	27
Slika 6.3	3D model odljevka .....	27
Slika 6.4	Trokutasta mreža konačnih elemenata odljevka i kokile .....	28
Slika 6.5	Početak lijevanja taline u kalupnu šupljinu .....	29
Slika 6.6	Talina počinje ispunjavati poklopac.....	29
Slika 6.7	Nastavlja se punjenje kalupne šupljine.....	30
Slika 6.8	Početak punjenja pojila.....	30
Slika 6.9	Početak skrućivanja taline .....	31
Slika 6.10	Usmjereno skrućivanje prema pojilima i uljevnom sustavu.....	31
Slika 6.11	Nastavak skrućivanja prema pojilima i uljevnom sustavu .....	32
Slika 6.12	Potpuno skrućivanje većine odljevka .....	32
Slika 6.13	Vrijeme skrućivanja odljevka i uljevnog sustava.....	33
Slika 6.14	Vjerojatnost i mjesta pojave poroznosti .....	34
Slika 6.15	Mjesta pojave poroznosti pri vjerojatnosti većoj od 50% .....	35

## **POPIS TABLICA**

Tablica 3.1 Svojstva čistog aluminija [5] .....	10
Tablica 3.2 Vrste uključaka u Al legurama [7] .....	13



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
$T$	K	temperatura
$t$	°C	temperatura

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisana je kratka povijest ljevarstva prema različitim povijesnim razdobljima. Objasnjena su svojstva aluminijske i njegovih legura, s posebnim naglaskom na njihove industrijske primjene. Također, pojašnjeno je lijevanje u trajne kalupe, kokilni lijev, kalup, postupak lijevanja te primjena samog postupka. Nadalje, opisan je softverski program za računalnu simulaciju lijevanja ProCAST. U eksperimentalnom dijelu rada prikazana je simulacija lijevanja aluminijske legure AlSi12 u kokile te su prikazani rezultati simulacije punjenja kalupa i skrućivanja odljevka. Simulacija je omogućila vizualizaciju procesa te prikaz skrućivanja i mogućnost pojave poroznosti u odljevku.

**Ključne riječi:** aluminij, aluminijske legure, kokilni lijev, simulacija lijevanja

## **SUMMARY**

In this paper, a brief history of foundry practice across various historical periods was described. The properties of aluminum and its alloys were explained, with a particular focus on their industrial applications. Additionally, permanent mould casting process, mould, the casting procedure, and the application of the process were clarified. Furthermore, the ProCAST software program for computer simulation of casting was described. In the experimental part of the paper, a simulation of casting aluminum alloy AlSi12 in a gravity die is presented, along with the results of the simulation of mould filling and solidification of the casting. The simulation provided a visualization of the process and showed the solidification and the possibility of shrinkage porosity occurrence in the casting.

Key words: aluminum, aluminum alloys, gravity die casting, casting simulation

## 1. UVOD

Lijevanje je jedan od najstarijih i najvažnijih postupaka u industriji koji omogućuje izradu metalnih predmeta raznih oblika i veličina. Ova tehnologija, koja se koristi već tisućama godina, danas je još uvijek nezamjenjiva u mnogim granama industrije, od automobilske i zrakoplovne industrije do građevinarstva i elektronike. Razvoj modernih metoda lijevanja doveo je do unapređenja proizvodnih procesa, omogućavajući bržu i precizniju izradu metalnih dijelova. Posebno je zanimljivo lijevanje aluminijske i njegovih legura. Aluminij je zbog svoje male gustoće, visoke otpornosti na koroziju, dobre toplinske vodljivosti te mehaničke obradivosti postao vrlo popularan materijal, osobito u automobilskoj industriji, gdje se koristi za izradu dijelova koji moraju biti lagani, a istovremeno čvrsti. Kako bi se postigla optimalna kvaliteta odljevaka, često se koristi metoda kokilnog lijeva. [1], [2]

Kokilni lijev, poznat i kao gravitacijski kokilni lijev, predstavlja tehniku gdje se rastaljeni metal ulijeva u kalup izrađen od čvrstih materijala poput čelika za topli rad ili sivog lijeva. Izrada kokilnih kalupa zahtijeva pažljivo planiranje, jer moraju izdržati visoke temperature i brze promjene toplinskih ciklusa. Ova metoda omogućava serijsku proizvodnju dijelova s visokom točnošću dimenzija i glatkom površinom, što značajno smanjuje potrebu za dodatnom obradom. Kalupi (kokile) mogu se koristiti više puta, što ovu metodu čini ekonomičnom za proizvodnju velikih serija. Kokilni lijev ima mnoge prednosti u usporedbi s tradicionalnim jednokratnim kalupima, uključujući bolja mehanička svojstva odljevaka, veću čvrstoću, manju poroznost i veću brzinu proizvodnje. Također, dizajn kalupa mora biti takav da omogućava brzo i jednostavno vađenje odljevaka, bez oštećenja njegovih površina. Uz to, kalupi su često opremljeni sustavima za hlađenje i ventilaciju kako bi se osigurala ravnomjerna kristalizacija metala, što dodatno povećava kvalitetu gotovih dijelova. [2], [3]

Suvremene tehnologije dovele su do integracije računalnih simulacija u proces lijevanja. Računalna simulacija omogućava predviđanje toka metala unutar kalupa, identificiranje mogućih problema poput poroznosti (usahlina) te optimizaciju svih parametara lijevanja prije same proizvodnje. Na ovaj način, moguće je unaprijed simulirati proces lijevanja, analizirati ponašanje metala pri različitim temperaturama i brzinama te na kraju poboljšati dizajn kalupa. Ova tehnologija ne samo da smanjuje troškove proizvodnje već i značajno povećava kvalitetu konačnih proizvoda. [2]

## 2. KRATKA POVIJEST LJEVARSTVA

Teško je odrediti točan datum početka lijevanja metala, ali može se otprilike odrediti vrijeme korištenja tehnike lijevanja prema povijesnim nalazima različitih predmeta poput figurica, novčića te oružja i alata.

### 2.1. Bakreno i brončano doba

Prvi metal koji su ljudi koristili bio je prirodni bakar, koji su obrađivali udaranjem u tanke listove za izradu jednostavnih alata i ukrasa. Tijekom vremena su otkrili proces taljenja kojim su izdvajali metal iz ruda, čime je započela era metalurgije. Prvi dokazi taljenja bakra dolaze iz istočne Anatolije i sjevernog Iraka, potječući još iz 8200. godine prije Krista. To su bili jednostavni lijevani oblici od bakra. Najstariji lijevani predmeti uključuju bakrenu figuricu žabe iz Mezopotamije (3200. g. pr. Kr.) prikazana na slici 2.1 i olovnu figuricu iz Luxora u Egiptu (3800. g. pr. Kr.). Nova istraživanja pokazuju da su kulture u jugoistočnoj Europi, poput one u današnjoj Rumunjskoj i Bugarskoj, već oko 4500. g. pr. Kr. lijevale bakrene sjekire i alate. [1]



**Slika 2.1** Bakrena figurica žabe [2]

Brončano doba predstavlja jedno od ključnih razdoblja u povijesti čovječanstva, obilježeno razvojem metalurgije i napretkom u obradi metala. Ovo razdoblje započinje oko 3000. godine

prije nove ere na području Bliskog istoka. Prva bronca, legura bakra i arsena, sadržavala je oko 4% arsena, iako su pronađeni predmeti koji su sadržavali čak 12% arsena. Ova legura omogućavala je izradu predmeta sa srebrnastim površinama, što je navelo arheologe da takve artefakte opisuju kao posrebrene. [3]

Jedna od značajnih inovacija tog doba bila je upotreba kositrene bronce. Dodavanje kositra bakru donijelo je brojne prednosti: snižavanje točke taljenja, povećanje čvrstoće i stvaranje glatkih, lakopolirajućih površina odljevaka. Postoje različite teorije o nastanku kositrene bronce, uključujući ideju o "prirodnoj leguri", gdje bi se legura dobila taljenjem miješane rude bakra i kositra. Problematično je, međutim, to što na području Mezopotamije nema lokalnih izvora kositra pa se pretpostavlja da su sirovine uvožene. [3]

Proces lijevanja značajno se unaprijedio u trećem tisućljeću prije nove ere. U to vrijeme razvijena je tehnika lijevanja pomoću dvodijelnih kalupa, što je omogućilo izradu predmeta s dvostranom simetrijom, kao što su sjekire i bodeži. Također, postoje dokazi o korištenju postupka s rastaljivim voštanim modelima za izradu manjih brončanih i srebrnih predmeta. Ovaj proces omogućio je izradu preciznih odljevaka, što svjedoči o naprednim metalurškim vještinama. [3]

Egipćani su dodatno usavršili tehniku lijevanja koje su preuzeli s Bliskog istoka. Njihov doprinos uključuje razvoj postupaka s rastaljivim modelom. Primjer toga može se vidjeti u egipatskim ljevaonicama bronce iz oko 1450. godine prije nove ere. Egipćani su koristili glinene posude za taljenje bronce, dok se zrak upuhivao mjehovima kako bi se postigle potrebne temperature što je prikazano na slici 2.2. Lijevanje se provodilo preko uljevnih čaša koje su bile smještene na vrhu kalupa. [3]



**Slika 2.2 Postupak lijevanja brončanih vrata prikazan u egipatskoj grobnici [1]**

Na Dalekom istoku, Brončano doba započinje oko 2000. godine prije nove ere. Iako nije sasvim jasno je li se metalurgija bronce prvo razvila u Kini ili jugoistočnoj Aziji. Postoje dokazi koji ukazuju na to da su metalurške tehnike mogle doći sa zapada. Međutim, arheološki nalazi iz Kine sugeriraju da je razvoj metalurgije mogao ići i u suprotnom smjeru, od istoka prema zapadu. U Kini su otkrivene složene brončane posude, a novija istraživanja pokazuju da su se izrađivale pomoću višedijelnih keramičkih kalupa, a ne samo postupkom s rastaljivim modelom. [3]

U željeznom dobu, željezo je zamijenilo broncu u vojnoj upotrebi zbog veće čvrstoće, no bronca je ostala cijenjena u umjetnosti i ceremonijama. Tako su Etruščani i Kinezi nastavili koristiti broncu za skulpture i novčiće, dok je prijelaz na željezo obilježio novu eru tehnološkog napretka. [1]

## 2.2. Željezno doba

Prvi poznati željezni predmeti nisu bili ljudske proizvodnje, već su dolazili iz svemira. Meteorsko željezo, koje se sastoji od legure nikla i željeza, koristili su drevni narodi kao dragocjeni materijal. Primjerice, najstariji poznati željezni predmeti potječu iz Egipta oko 3200. g. pr. Kr., gdje su pronađene male perle oblikovane od meteorskog željeza. Te su perle bile pažljivo kovane i izrađene su tehnikom valjanja u tanke niti, što ukazuje na napredno znanje u obradi tvrdog i krhkog meteorskog željeza. [1]

Tijekom brončanog doba, korištenje željeza bilo je ograničeno i uglavnom je dolazilo iz meteorita. Ipak, pojavili su se dokazi o proizvodnji željeza iz zemaljskih ruda. Jedan od najstarijih primjera jest željezni bodež iz grobnice u Anatoliji, koji dolazi iz 2500. g. pr. Kr. Hetiti, narod iz središnje Anatolije, bili su među prvima koji su razvili tehnologiju taljenja željezne rude, čime su započeli proizvodnju oružja i alata od željeza. [1]

Prema znanstvenicima, prijelaz iz brončanog u željezno doba dogodio se oko 1200. g. pr. Kr., kada je proizvodnja željeza postala dominantna tehnologija u metalurgiji. U Mezopotamiji, Sumerani su koristili izraz "AN.BAR", što znači "nebo.vatra", a drevni Egipćani koristili su izraz "biA-n-pt" koji bi značilo "željezo s neba". Ovi izrazi potvrđuju da su drevne civilizacije imale posebnu vezu s meteorskim željezom, smatrajući ga materijalom božanskog porijekla. [1]

Kina je bila prva civilizacija koja je sustavno razvila tehnologiju lijevanja željeza, počevši već od 8. stoljeća pr. Kr. kineski metalurzi su usavršili tehnike lijevanja koristeći pješčani kalup te su izgradili prve visoke peći koje su omogućile proizvodnju sirovog željeza. Najstariji poznati lijevani predmeti iz Kine uključuju posude i plugove, a kasnije su izrađivani složeni kipovi i umjetnički predmeti od lijevanog željeza. [1]

Dok su Kinezi bili pioniri u proizvodnji lijevanog željeza, Europljani su tek mnogo kasnije razvili ovu tehnologiju, otprilike 2000 godina kasnije. Tek su u srednjem vijeku Europljani počeli koristiti visoke peći. Na prijelazu iz 14. stoljeća, u Njemačkoj i Švedskoj razvijene su peći na vodeni pogon, što je omogućilo veću proizvodnju željeza. [1]

### 2.3. Moderno doba

Početak 19. stoljeća započela je industrijska revolucija, donoseći napredne tehnike u proizvodnji željeza i čelika. Razvoj novih strojeva, poput parnih batova i industrijskih peći, omogućio je masovnu proizvodnju željeznih i čeličnih predmeta. U to vrijeme, željezo je korišteno za gradnju željezničkih pruga, mostova poput poznatog Iron Bridge u Engleskoj (slika 2.3), te za proizvodnju strojeva i alata. [1]



**Slika 2.3 Prvi odliveni željezni most Iron Bridge u Engleskoj [2]**



Otkrićem aluminija u 19. stoljeću, metalurgija je ušla u novo doba. Isprva skuplji od zlata, aluminij je postao pristupačan zahvaljujući otkriću elektrolitičke metode rafiniranja. Aluminij se ubrzo pokazao kao ključni materijal u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji zbog svoje čvrstoće i male mase. Slika 2.4 prikazuje novac izrađen od aluminija 1857. g. [1]



**Slika 2.4 20 francuskih franaka od aluminija iz doba Napoleona (1857.) [1]**

#### **2.3.4. Lijevanje aluminija**

Tlačni lijev je tehnologija koja je nastala početkom 1820-ih godina kao odgovor na rastuću potrebu za velikim količinama lijevanih slova za tisak. Ova metoda je omogućila bržu proizvodnju i preciznije lijevanje, što je bilo od velike važnosti za tiskarsku industriju koja je tada bila u fazi brzog razvoja. Početni oblik ove tehnologije bio je potpuno mehanički, pri čemu su radnici koristili ručne ručice za ubrizgavanje metala u metalne kalupe. Kako su zahtjevi za proizvodnjom rasli, tehnologija se ubrzano razvijala, uključujući uvođenje pneumatskih i hidrauličnih sustava koji su dodatno poboljšali učinkovitost i preciznost procesa. Tlačni lijev omogućio je ne samo brzu i preciznu proizvodnju slova za tisak, već je i ubrzao proizvodnju drugih proizvoda. Do sredine 19. stoljeća, ova tehnologija je postala glavna u industriji proizvodnje dijelova za bicikle, fonografe i druge potrošačke proizvode. U tom periodu, lijevači su već uspješno proizvodili aluminij i druge metale s niskom temperaturom taljenja, a proces je postao znatno automatiziran, što je dodatno smanjilo troškove proizvodnje i povećalo obujam proizvodnje. [4]

---

Unatoč tome što je tlačno lijevanje postalo izuzetno uspješno u proizvodnji odljevaka od metala koji imaju relativno nisku temperaturu taljenja poput aluminijsa, napredak u lijevanju aluminijsa bio je ograničen do razvoja procesa s hladnom komorom u 1920-ima. Aluminij, zbog svojih specifičnih fizikalnih svojstava, zahtijevao je posebne metode lijevanja koje su bile razvijene tek s pojavom ove nove tehnologije, koja je omogućila učinkovitije lijevanje aluminijsa pod visokim pritiscima. Danas aluminij može biti lijevan gotovo svim postojećim metodama, a tlačno lijevanje je i dalje jedna od najvažnijih tehnika. Osim toga, koriste se i druge metode lijevanja aluminijsa, uključujući kokilni lijev, lijevanje u pijesak s vezivima od gline i vode, lijevanje u pune kalupe, lijevanje u kalupe od gipsa. Svaka od ovih metoda ima svoje specifične prednosti, ovisno o vrsti proizvoda koji se želi proizvesti. [4]

### 3. ALUMINIJ

Aluminij je lagan, srebrno-bijeli i sjajan metal koji je mekan, ali pokazuje dobru plastičnost pa se može kovati, valjati i izvlačiti u tanke niti. Iako spada u grupu neplemenitih metala, aluminij se izdvaja svojom iznimnom otpornošću na koroziju. Ta otpornost nastaje zahvaljujući tankom oksidnom sloju koji nastaje na njegovoj površini, čime se sprječava daljnja oksidacija. Osim što je dobar vodič električne struje i topline, aluminij je i siguran za upotrebu jer nije otrovan. Pri sobnoj temperaturi reagira s lužinama, stvarajući aluminatne soli. [5]

Aluminij je široko rasprostranjen element u Zemljinoj kori, a aluminijevi spojevi mogu se izvući iz različitih minerala. Najvažniji izvor za industrijsku proizvodnju aluminija je boksit (slika 3.1), koji mora sadržavati visok postotak aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i nizak postotak silicijevog oksida ( $\text{SiO}_2$ ). Boksit se sastoji od minerala poput bemita i dijaspora, uz prisutnost silicijevih i željezovih oksida. Da bi se boksit pretvorio u čisti aluminijev oksid (glinicu), potrebno je očistiti rudu od primjesa, a najčešće se koristi Bayerov postupak. [5]



**Slika 3.1 Boksit [6]**

Bayerov postupak uključuje razgradnju fino samljevene rude u autoklavu uz pomoć natrijeve lužine, pri visokoj temperaturi i tlaku. Ovaj proces dovodi do stvaranja aluminijevog hidroksida, koji se zatim žarenjem pretvara u glinicu. Nakon toga, glinica se podvrgava elektrolizi u kriolitnom rastaljenju kako bi se dobio aluminij. Elektroliza se provodi u elektrolitičkim kupkama s grafitnim elektrodama, gdje se aluminij taloži na katodi, dok se na anodi oslobađa ugljični dioksid. Međutim, Bayerov postupak ima određene nedostatke, kao što je gubitak aluminija i natrijeve lužine zbog prisutnosti silicija u boksitu. Zbog toga je važno da boksit sadrži što manje silicija. Aluminij dobiven elektrolizom obično sadrži primjese drugih metala, kao što su titan, bakar, cink i najviše silicij. Daljnje pročišćavanje aluminija provodi se u indukcijskim pećima ili elektrolitičkom rafinacijom kako bi se dobio visokokvalitetni aluminij. [5]

Reciklaža aluminija i njezin utjecaj na analize životnog ciklusa sve više postaju važni faktori pri odabiru materijala. Iako proizvodnja aluminija zahtijeva puno energije, njegova reciklaža iz otpada troši samo oko 5% energije potrebne za prvobitnu proizvodnju. Ova energetska učinkovitost čini reciklažu aluminija ekološki i ekonomski isplativom. Aluminij je vrlo otporan na koroziju, što pomaže u očuvanju vrijednosti metala tijekom reciklaže. Svi oblici aluminija, bilo stari otpad (na kraju životnog ciklusa) ili novi otpad (npr. strugotine, otpadni dijelovi), mogu se učinkovito reciklirati, s visokim stopama oporavka koje obično premašuju 90%. [4]

Mnogi zahtjevi za lijevanje kompatibilni su s legurama iz recikliranog aluminija pa se aluminijski odljevci često proizvode od recikliranog metala, čime se smanjuju troškovi proizvodnje ingota u odnosu na primarni metal. Korištenje recikliranog aluminija donosi brojne koristi poput očuvanja sirovina, smanjenja potrošnje energije u proizvodnji i uslugama te smanjenja onečišćenja i troškova zaštite okoliša. Kada se sve ove karakteristike uključe u analizu životnog ciklusa proizvoda, prednost aluminija u odnosu na konkurentne materijale postaje očita. Reciklaža aluminija ne samo da štedi energiju i materijale, nego doprinosi i ekološkim i ekonomskim ciljevima, čineći aluminij održivim i konkurentnim izborom u mnogim industrijama. [4]

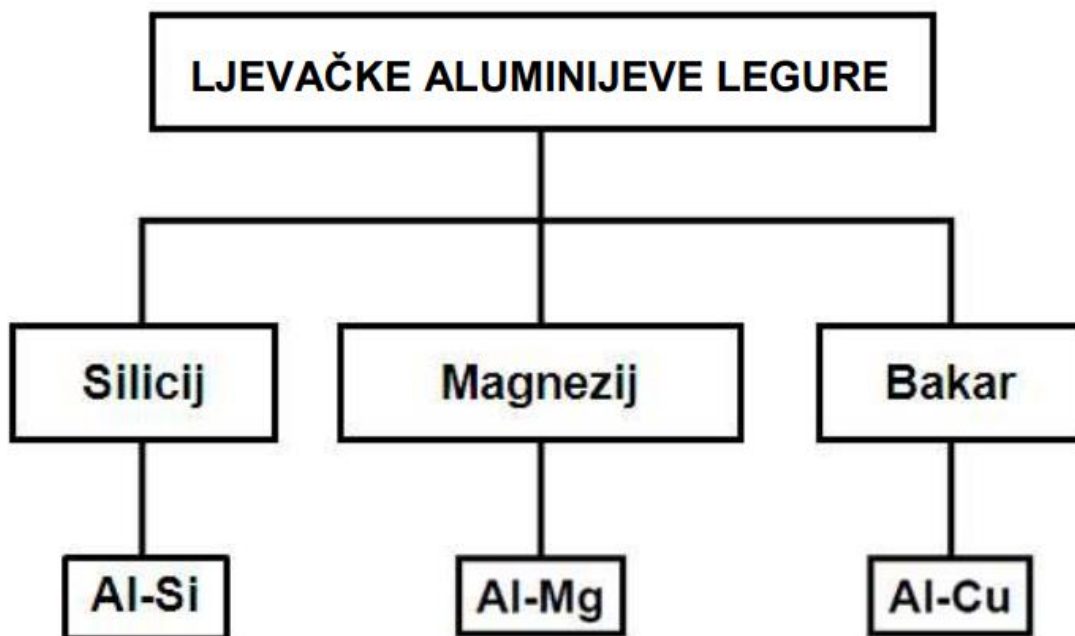
Tablica 3.1 Svojstva čistog aluminija [5]

Svojstvo	Jedinica	Vrijednost
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	2700
Vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	35...200
Granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>	20...160
Tvrdoća po Brinellu	HB	20...35
Talište	°C	660
Vrelište	°C	2470
Talište aluminijevog oksida (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	°C	2060

Aluminij kao tehnički materijal je tijekom posljednjih nekoliko desetljeća doživio značajan rast i primjenu u industriji zahvaljujući njegovim povoljnim karakteristikama prikazanim u tablici 3.1 kao što su niska temperatura taljenja i mala gustoća u odnosu na druge metale. Ove osobine čine aluminijske legure izuzetno atraktivnima za različite industrijske primjene, uključujući automobilski i zrakoplovni sektor, gdje je smanjenje mase ključno za poboljšanje učinkovitosti. Unatoč njihovim očitim prednostima, industrija lijevanja aluminija suočila se s nizom neočekivanih problema. Jedna od glavnih pretpostavki o aluminijским legurama bila je njihova lakoća lijevanja u usporedbi s tradicionalnim materijalima poput lijevanog željeza. Zbog njihove niske temperature taljenja, aluminijeve legure smatrane su jednostavnima za lijevanje. No, ovaj optimizam ubrzo je doveo do problema. Pokušaji obrade aluminijских legura istim tehnikama koje se koriste za lijevanje željeza rezultirali su ozbiljnim problemima u kvaliteti odljevaka. [7]

### 3.1. Aluminijeve legure

Kako bi se poboljšala svojstva aluminija kao tehničkog materijala, legira se odgovarajućim legirnim elementima. Postoji širok spektar elemenata kojim se aluminij može legirati, ali najvažniji su silicij, magnezij i bakar (slika 3.2). [8]



Slika 3.2 Podjela aluminijevih legura [8]

### 3.1.1. Al-Si legure

Aluminijsko-silicijske (Al-Si) legure čine osnovnu grupu industrijski važnih inženjerskih legura koje se široko koriste u lijevanju i proizvodnji konstrukcijskih dijelova. Trenutačno, 90 % globalne proizvodnje aluminijskih odljevaka temelji se na Al-Si legurama. Ove legure, koje se odlikuju visokom otpornošću na koroziju i dobrom obradivošću, igraju važnu ulogu u mnogim industrijskim sektorima, uključujući automobilski i zrakoplovni sektor. [2], [7]

### 3.1.2. Al-Mg legure

Osim Al-Si legura, postoje i druge značajne serije aluminijskih legura koje se široko koriste u industriji. Jedna od tih serija su Al-Mg legure, koje se odlikuju visokom otpornošću na koroziju i značajnim mehaničkim svojstvima. Al-Mg legure s udjelima magnezija do oko 10% obično se koriste u primjenama koje zahtijevaju otpornost na koroziju. Međutim, ove legure imaju svoje nedostatke. Na primjer, AlMg10 legura, koja je najjača u seriji, bila je predmet zabrinutosti zbog svoje sklonosti pucanju nakon određenog vremena u eksploataciji, osobito pri radu na povišenim temperaturama. Iako su strahovi od gubitka duktilnosti možda

bili pretjerani, činjenica je da dugotrajno izlaganje visokim temperaturama može uzrokovati precipitaciju čestica kao što je  $Mg_5Al_8$ , što može smanjiti duktilnost legure. [7]

### 3.1.3. Al-Cu legure

Druga značajna serija aluminijevih legura je Al-Cu. Ove legure sadrže do 5% bakra, a poznate su po svojoj visokoj čvrstoći i duktilnosti nakon toplinske obrade. Ove legure imaju nisku otpornost na koroziju i lošu livljivost, koja se dodatno smanjuje s povećanjem udjela bakra. Veliki nedostatak tih legura je i sklonost stvaranju toplih pukotina tijekom skrućivanja, posebno pri lijevanju u kokile. Za postizanje učinkovitog usitnjenja zrna, potrebno je dodati titan. [7], [8]

## 3.2. Oksidacija i uključci u aluminiju

Jedan od ključnih problema koji se javio tijekom procesa lijevanja aluminijskih legura bio je stvaranje površinskog oksida. Tijekom lijevanja, površina rastaljenog aluminija brzo oksidira, što dovodi do stvaranja oksidnih slojeva. Ako se ti slojevi ne uklone pravilno, mogu biti zarobljeni unutar odljevka, stvarajući takozvane bifilmove. Ovi bifilmovi predstavljaju slaba mjesta unutar materijala, koja mogu uzrokovati pojavu pukotina i loma tijekom korištenja gotovih proizvoda. [7]

Aluminij je vrlo važan materijal u industriji, ali tijekom njegove obrade često se pojavljuju problemi s oksidacijom i uključcima (tablica 3.2). Oksidacija aluminija je proces u kojem aluminij reagira s kisikom iz zraka i formira oksidnu prevlaku. Ovaj proces počinje odmah kada aluminij dođe u kontakt sa zrakom. Brzina oksidacije raste kada je aluminij u tekućem stanju, pri visokim temperaturama i tijekom dužeg vremena izlaganja. Kada se aluminij tali ili obrađuje, na njegovoj površini nastaje oksidni film koji može biti različite debljine. Iako taj film djeluje zaštitno u početku, ako se metal miješa ili dolazi u kontakt s drugim materijalima tijekom obrade, oksid može ponovno nastati, čineći metal manje kvalitetnim. Mnogi oblici oksida aluminija poput alfa- ili gama-aluminijevog oksida također mogu otežati svoje uklanjanje iz metala, jer imaju sličnu gustoću kao čisti aluminij. Zbog toga se smanjuje učinkovitost tehnike gravitacijske separacije koja se temelji na odvajanju komponenata iz taline samom gravitacijom, gdje će komponente s većom gustoćom biti odvojene na dnu taline i obrnuto. [4]

Tablica 3.2 Vrste uključaka u Al legurama [7]

Vrsta uključaka	Formula	Mogući izvor
<b>Bor-karbidi</b>	$Al_4B_4C$	Obrada borom
<b>Titanov borid</b>	$TiB_2$	Usitnjavanje zrna
<b>Kloridi</b>	$NaCl, KCl, MgCl_2$	Otplinjavanje klorom
<b>Alfa-aluminijev oksid</b>	$\alpha-Al_2O_3$	Unošenje nakon taljenja na visokim temperaturama
<b>Gama-aluminijev oksid</b>	$\gamma-Al_2O_3$	Unošenje tijekom lijevanja
<b>Magnezijev oksid</b>	$MgO$	Legure s višim sadržajem Mg
<b>Spinel</b>	$MgOAl_2O_3$	Legure s umjerenim sadržajem Mg

Oksidi u aluminijским legurama nastaju isključivo kada kisik reagira s površinom metala, a ne zbog kisika otopljenog unutar aluminijskog metala, jer je topljivost kisika u aluminiju vrlo mala. Iako kisik nije otopljen u aluminiju, mehaničke smetnje tijekom obrade mogu "uvući" kisik u metal, čime se povećava stvaranje oksida. U početku nastali oksidni filmovi su vrlo tanki i amorfni, što znači da nemaju jasno definiranu kristalnu strukturu. Ovaj film brzo prelazi u kristalnu formu, poznatu kao gama-aluminijev oksid, koji usporava daljnju oksidaciju. Međutim, kako vrijeme odmiče, gama-aluminijev oksid se može pretvoriti u alfa-aluminijev oksid, koji nije tako učinkovit u zaštiti metala i omogućava bržu oksidaciju. [7]

Jedan od načina kako se smanjuje prisutnost oksida i uključaka je korištenje različitih metoda za filtriranje i uklanjanje čestica iz aluminijskog metala. To uključuje upotrebu plinova poput argona i dušika za otplinjavanje tekućeg aluminijskog metala, čime se smanjuje sadržaj plinova i čestica. Također, za uklanjanje uključaka koriste se filtri, a pravilno odabrane vrste filtra poput sita, mreža, čelične vune ili porozne pjene mogu značajno poboljšati kvalitetu aluminijskog metala, pod uvjetom da ne ograničavaju protok metala. [4]

Ove metode pomažu u smanjenju količine oksida i drugih štetnih čestica koje mogu utjecati na konačne proizvode. Uz to, važnu ulogu u ponašanju oksidnog filma imaju legirajući



elementi poput magnezija, berilija i stroncija, koji mogu mijenjati svojstva oksida na aluminiju. Na primjer, aluminijske legure koje sadrže magnezij mogu formirati spinel oksid ( $\text{Al}_2\text{MgO}_4$ ), koji raste brže nego obični oksid i može ubrzati oksidacijske procese. [7]

Kada se aluminij legira s magnezijem, oksidni filmovi koji nastaju na njegovoj površini mogu biti različite debljine, ovisno o količini magnezija. U početku, filmovi aluminijevog oksida mogu biti tanki i glatki, dok viši udio magnezija može uzrokovati stvaranje debljih i naboranih filmova. Spinel oksid, koji nastaje u legurama bogatim magnezijem, raste brže nego standardni oksidi. Ovi filmovi se stvaraju jer tekući aluminij može prolaziti kroz kapilarne kanale u oksidnom filmu, omogućujući da svježi aluminij dođe u kontakt s površinom oksida i time ubrza rast oksidnog sloja. Osim magnezija, drugi legirajući elementi poput berilija također mogu pozitivno utjecati na svojstva oksidnog filma. Berilij u malim koncentracijama može poboljšati zaštitu od oksidacije i smanjiti gubitke oksida, što poboljšava kvalitetu aluminijskih odljevaka i drugih proizvoda. [7]

Legirajući elementi, poput magnezija i berilija, omogućuju proizvodnju aluminijskih legura s boljim svojstvima. U nekim slučajevima, kao kod legura sa stroncijem ili natrijem, ova kombinacija pomaže poboljšati mikrostrukturu metala i njegovu duktilnost, što je važno za industrijsku primjenu. U industriji, posebno u procesima poput kontinuiranog lijevanja, gdje se kontrolira visoka kvaliteta aluminijskih odljevaka, ove promjene u oksidnim svojstvima pomažu u smanjenju oksidacije i proizvodnji kvalitetnijih proizvoda. [4]

#### 4. LIJEVANJE U TRAJNI KALUP

Lijevanje u trajni kalup predstavlja jedan od značajnih postupaka u proizvodnji odljevaka, osobito kada je riječ o odljevcima od neželjeznih legura. Ovaj postupak najčešće uključuje aluminijske, magnezijske, cinkove te bakrove legure, iako se ponekad koriste i legure na bazi željeza. Trajni kalupi, poznati i kao kokile, izrađuju se od legiranih čelika za topli rad ili od sivog lijeva, pri čemu se kalupi mogu izraditi s vertikalnom ili horizontalnom diobenom ravninom. Šupljine kalupa, koje određuju konačni oblik odljevka, precizno se izrađuju strojnom obradom. Često se šupljina sastoji od više segmenata postavljenih u zajednički nosač, što omogućava jednostavnu zamjenu oštećenih dijelova i produljuje radni vijek kalupa. [3]

Zbog složenosti i visoke cijene materijala, trajni kalupi zahtijevaju značajnu investiciju. Unatoč visokim početnim troškovima, ovi kalupi mogu biti izuzetno isplativi u velikoserijskoj proizvodnji jer omogućuju proizvodnju više od 100 000 odljevaka u jednom kalupu. To čini ovaj postupak ekonomičnim izborom za velike serije jednakih dijelova, gdje je dosljednost ključna u kvaliteti. [3]

Osim osnovnog kalupa, u trajnim kalupima se mogu koristiti i različite vrste jezgri kako bi se postigli željeni unutarnji oblici odljevaka. Jezgre mogu biti izrađene od čelika, sivog lijeva, pijeska ili gipsa, ovisno o specifičnom postupku lijevanja. Metalne jezgre mogu biti pokretne ili nepokretne. Nepokretne jezgre moraju biti postavljene okomito na diobenu ravninu kalupa kako bi se omogućilo lako uklanjanje odljevka. U slučaju složenijih oblika, gdje jezgre nisu okomite na diobenu ravninu, koriste se pokretne jezgre koje se uklanjaju prije vađenja odljevka iz kalupa. [3]

Jedan od problema u ovom postupku je reakcija taline s trajnim kalupom, što može uzrokovati lijepljenje ili zavarivanje dijelova odljevka za kalup. Ovo može otežati uklanjanje odljevka te uzrokovati oštećenja kalupa. Da bi se spriječile ove poteškoće, na površinu kalupa nanosi se odgovarajući premaz koji olakšava oslobađanje odljevka i štiti kalup. [3]

U usporedbi s lijevanjem u jednokratne pješčane kalupe, trajni kalupi omogućuju proizvodnju odljevaka složenih oblika s uskim dimenzijskim tolerancijama, glatkom površinom i poboljšanim mehaničkim svojstvima. Međutim, zbog visokih troškova izrade kalupa, ovaj postupak je opravdan samo za velikoserijsku proizvodnju. Također, lijevanje u trajni kalup ima svoja ograničenja kada je riječ o veličini odljevaka, jer nije pogodno za proizvodnju vrlo

velikih dijelova. Način proizvodnje također određuje stupanj automatizacije procesa. Postupkom se može ručno upravljati ili potpuno automatizirati, pri čemu visoko automatizirani postupci omogućuju velike proizvodne stope te proizvode dijelove s dosljednim dimenzionalnim karakteristikama i svojstvima. [3], [4]

Postupci lijevanja u trajni kalup mogu se svrstati u tri glavne skupine, ovisno o načinu unošenja taline u kalupnu šupljinu:

1. Gravitacijsko lijevanje (kokilni lijev) - gdje se talina ulijeva u kalup isključivo pod utjecajem gravitacije.
2. Niskotlačno lijevanje - pri kojem se koristi niski tlak za usmjeravanje taline u kalup, što omogućava veću kontrolu nad punjenjem kalupa i smanjuje poroznost odljevaka.
3. Visokotlačno lijevanje - gdje se talina ubrizgava u kalup pod visokim tlakom, omogućavajući izradu tankih stijenki i kompleksnih oblika uz visoku proizvodnu brzinu.



**Slika 4.1 Primjeri odljevaka odlivenih gravitacijskim lijevanjem [9]**

Veličine odljevaka mogu varirati od manje od jednog kilograma do više stotina kilograma. Slika 4.1 prikazuje različite odljevke odlivene primjenom kokilnog lijeva. Površinska završna obrada obično se kreće od 3,8 do 10 mikrometara. Osnovne linearne tolerancije iznose oko 10 mm po metru, dok minimalne debljine stijenki iznose oko 2,5 mm. [4]



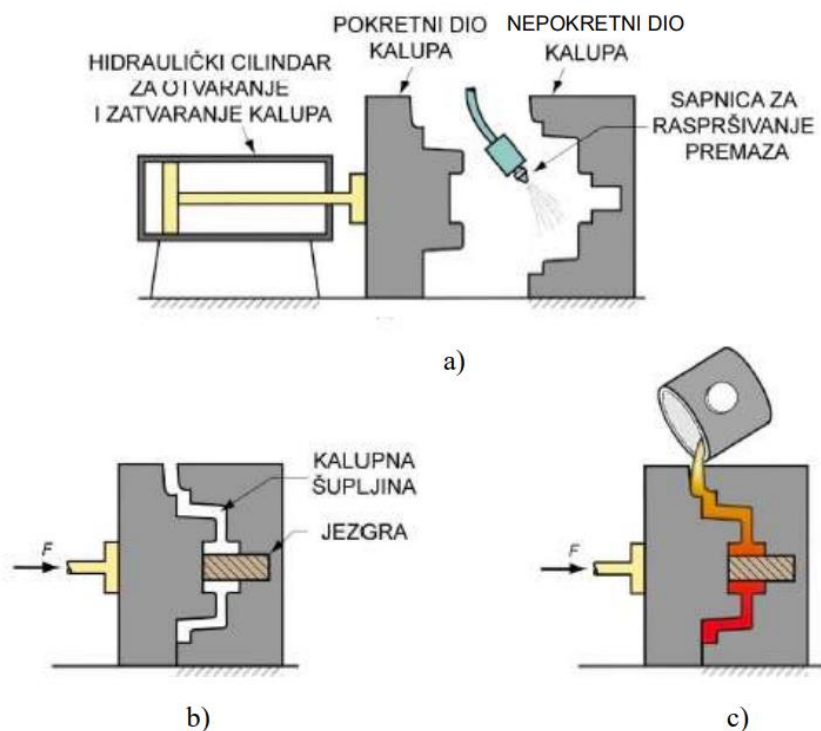
#### **4.1.1. Izrada i priprema kalupa**

Kalupi koji se koriste u gravitacijskom lijevanju najčešće su izrađeni od legiranih čelika za topli rad, osobito kada je riječ o velikoserijskoj proizvodnji, dok se za manje serije ponekad koriste kalupi od sivog lijeva. Tipični kalupi sastoje se od dvije polovice, pokretni i nepokretni dio, koje se međusobno spajaju, formirajući vertikalnu diobenu ravninu. Ovakva konstrukcija omogućava dug radni vijek kalupa, osobito u uvjetima kada se lijevanje provodi gravitacijom, bez dodatnog pritiska. Prije početka samog lijevanja, kalup se priprema i zagrijava na temperaturu između 205 i 370 °C, ovisno o vrsti legure koja se koristi. Ova priprema uključuje nanošenje keramičkih premaza na površinu kalupa, čime se postiže nekoliko ključnih funkcija: zaštita kalupa od kemijskih reakcija s talinom, kontrola toka taline, poboljšanje prijenosa topline i kvalitete površine odljevka te olakšavanje uklanjanja odljevaka iz kalupa (slika 4.3 a)). Na metalne jezgre se također nanosi premaz. Premazi koji se nanose na kalup mogu biti izolacijski ili mazivi, a ponekad se koristi i kombinacija obje vrste kako bi se postigla optimalna zaštita i glatkoća odljevaka. Izolacijski premazi se nanose prvi, a potom premaz koji djeluje kao mazivo. Također se može upotrijebiti jedan premaz nastao miješanjem prethodno navedenih premaza. Sastav premaza obično uključuje mješavinu vatrostalnih materijala poput aluminijevog oksida ( $Al_2O_3$ ), grafita, željeznog oksida i kvarca, uz dodatak veziva kao što je natrijev silikat te voda. [3]

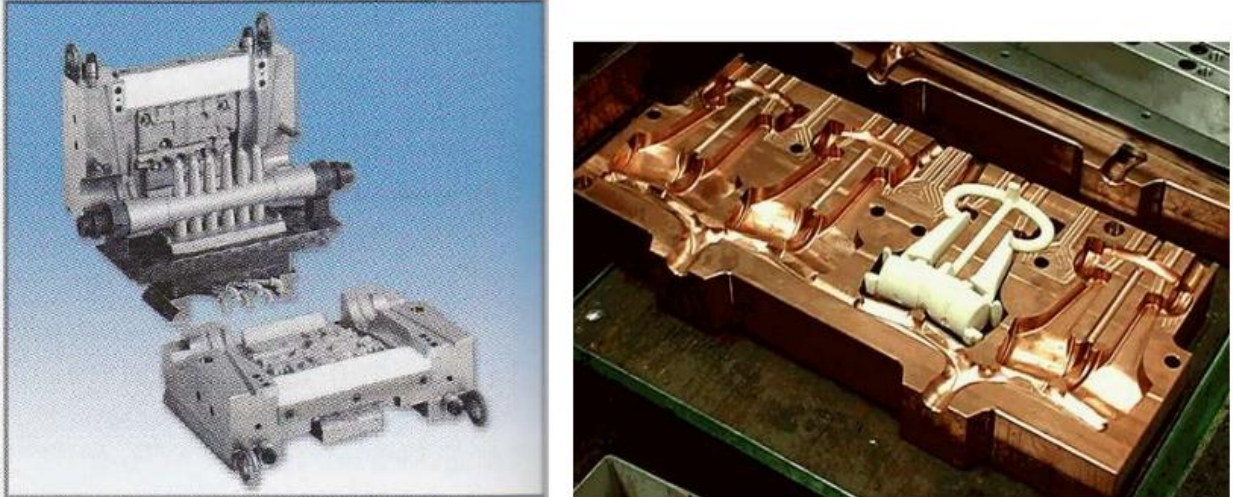
#### **4.1.2. Postupak lijevanja**

Nakon pripreme kalupa ulažu se jezgre, koje oblikuju unutrašnjost odljevka (slika 4.4). Nakon što je kalup pripremljen i zagrijan, zatvara se te se prelazi na sam proces lijevanja. Kalup se sastoji od pokretnog i nepokretnog dijela, koji se mora pažljivo poravnati i zatvoriti kako bi se spriječilo otvaranje tijekom lijevanja (slika 4.3 b)). Rastaljeni metal ulijeva se u kalup kroz uljevni sustav (4.3 c)), koji se sastoji od čaše, spusta, razvodnika i ušća. Sustav omogućava ravnomjerno ispunjavanje svih dijelova kalupne šupljine, a u slučaju da kalup ima više šupljina, omogućava proizvodnju više odljevaka u jednom lijevanju. Ventilacijski otvori omogućavaju izlaz plinova kako bi se spriječilo stvaranje poroznosti unutar odljevka. Nakon što se kalup ispunji, postupak lijevanja se zaustavlja, a talina se ostavlja da se skrutne. Vrijeme skrućivanja ovisi o vrsti legure, debljini stijenki odljevka i radnoj temperaturi kalupa. Temperatura kalupa mora biti precizno kontrolirana kako bi se osiguralo pravilno tečenje i

skrućivanje metala. Npr. aluminijske legure zahtijevaju temperaturu kalupa od 150 do 300 °C, dok bakrene legure zahtijevaju nešto niže temperature, od 120 do 260 °C. Previsoka radna temperatura može usporiti proces skrućivanja i negativno utjecati na mehanička svojstva odljevka, dok preniska temperatura može otežati pravilno ispunjavanje kalupa, što može rezultirati greškama poput hladnih zavara i nepotpunih odljevaka. [3], [8]



**Slika 4.3** Proizvodni koraci kod kokilnog lijeva: a) nanošenje premaza, b) zatvaranje kokile, c) lijevanje [8]



**Slika 4.4 Kokila s metalnom i s pješčanom jezgrom [8]**

#### **4.1.3. Završne faze i obrada odljevka**

Kada se odljevak skrutne, kalup se otvara, a metalne jezgre se uklanjaju mehanički. Ako su korištene jednokratne jezgre, one ostaju unutar odljevka i zajedno s njim se vade iz kalupa. Jednokratne jezgre se istresaju pomoću vibracija (*Cold Box* jezgra) ili se zagrijavaju na povišenu temperaturu gdje dolazi do raspada veziva te jezgra postaje sipka i lako se istrese iz kalupa (školjkasta jezgra). Nakon vađenja odljevka pomoću izbacivača, prvo se odvaja uljevni sustav i pojila, a zatim se uklanjaju srhovi s linije dijeljenja kalupa te ostale nepravilnosti. Odljevak se može dodatno obrađivati kako bi se postigla završna kvaliteta i oblik. [3], [8]

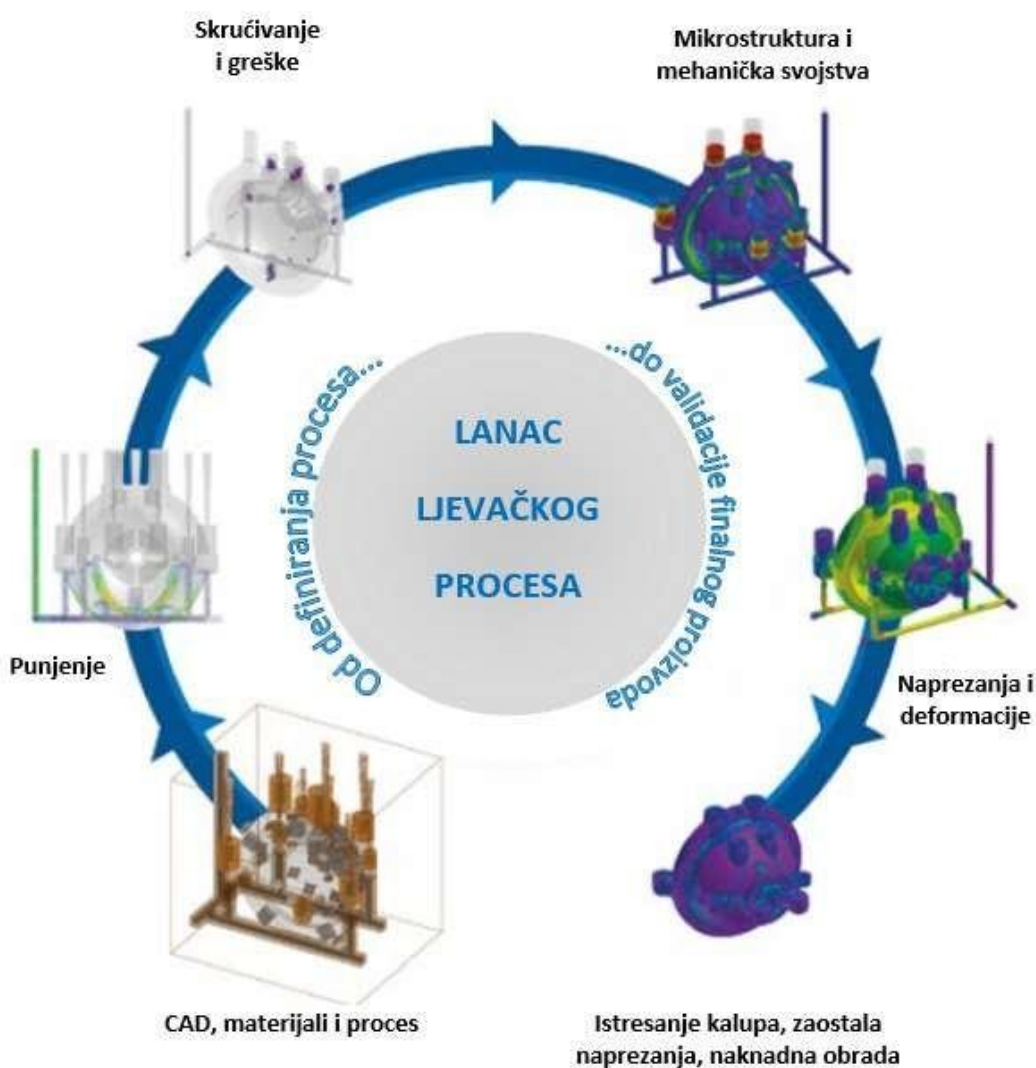
## 5. SIMULACIJA LIJEVANJA

U industriji lijevanja, važna je preciznost u svakom koraku proizvodnog procesa kako bi se osigurala kvaliteta konačnih komponenata. Od dijagnosticiranja problema u samom procesu lijevanja do optimizacije metoda i dizajna odljevaka, simulacija predstavlja dobar alat za poboljšanje efikasnosti i smanjenje troškova. Jedan od najnaprednijih alata za ovu vrstu optimizacije je ProCAST, softver koji omogućava simulaciju i analizu kritičnih uvjeta lijevanja, s ciljem otkrivanja grešaka kao što su hladni zavari i poroznost. Ovaj softver ne samo da omogućava poboljšanje kvalitete odljevaka, nego i optimizaciju cijelog procesa lijevanja, što dovodi do veće konkurentnosti u industriji lijevanja. [11]

### 5.1. Analiza i optimizacija odljevaka

Simulacijski programi za lijevanje, kao što su ProCAST, AutoCAST, MAGMASoft i SOLIDCast, koriste se za analizu različitih čimbenika koji utječu na kvalitetu odljevaka, uključujući geometriju odljevka, materijale i specifičnosti postupka lijevanja. Ovi programi omogućuju dizajnerima da modeliraju i optimiziraju različite dijelove proizvodnog procesa, od dizajniranja kalupa do razmatranja toplinsko-fizikalnih svojstava materijala. U simulaciji, geometrija odljevka, kao i raspored u kalupu, značajno utječu na protok metala i proces skrućivanja. Svojstva kalupa i jezgre također utječu na proces simulacije. Različite varijante prijenosa topline i turbulentno strujanje rastaljenog metala mogu značajno utjecati na kvalitetu odljevka, a simulacija pomaže predvidjeti potencijalne probleme poput oksidacije, erozije kalupa i poroznosti. Slika 5.1 prikazuje postupak korištenja simulacijskog programa za lijevanje. [2], [12]





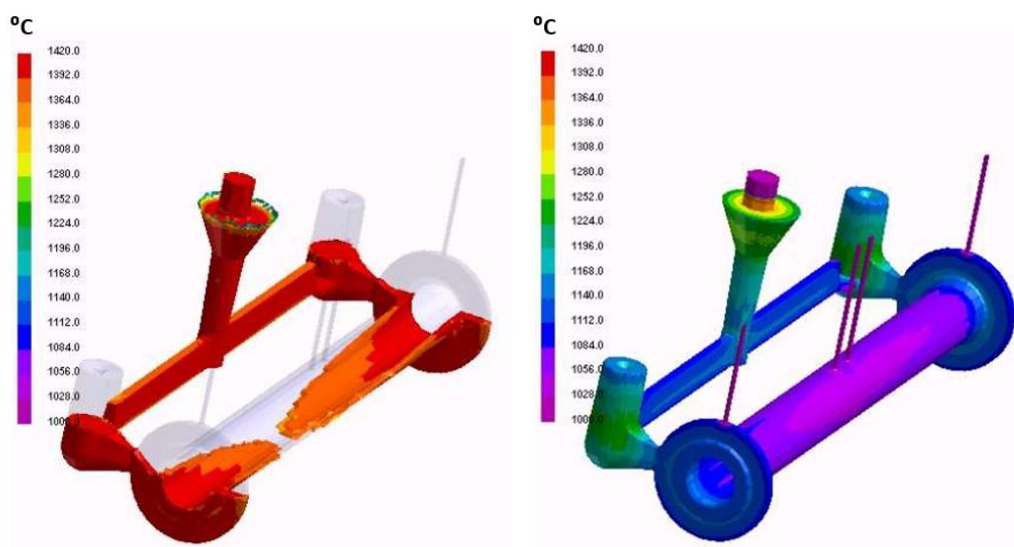
**Slika 5.1 Lanac ljevačkog procesa [2]**

Jedan od problema u procesu lijevanja je nastanak hladnih zavara koji se pojavljuju kada rastaljeni metal ne ispuni u potpunosti kalup zbog preuranjenog skrućivanja različitih tokova taline pri njihovom susretu. Hladni zavari mogu značajno smanjiti čvrstoću konačnih proizvoda. Korištenjem simulacijskog alata, konstruktori mogu analizirati pad temperature metala tijekom punjenja i identificirati točke u kojima bi moglo doći do nedolivenosti i hladnih zavara. Takva simulacija omogućava brzu procjenu problema i testiranje rješenja bez potrebe za skupim fizičkim testiranjima, što vodi ka značajnim uštedama i smanjenju rizika od grešaka u proizvodnji. [1]

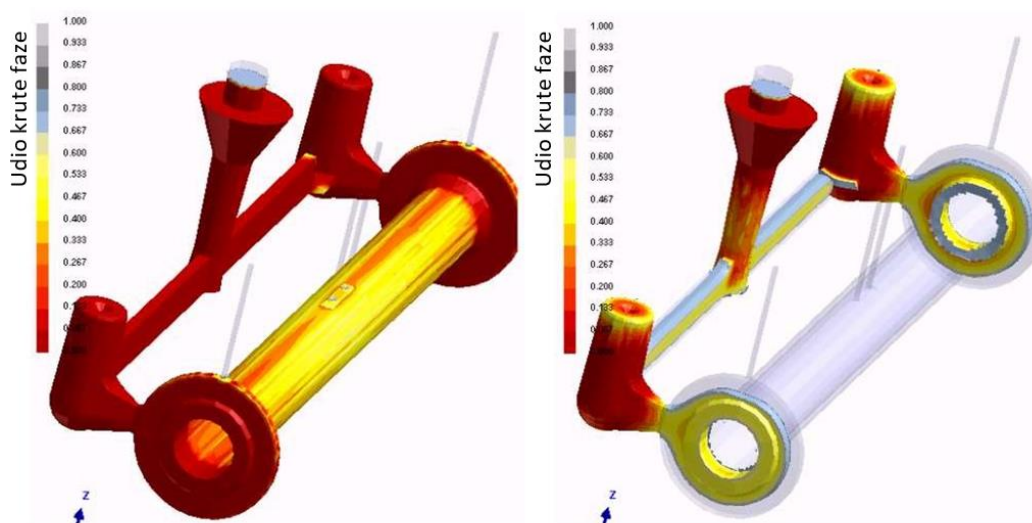
Simulacija se također koristi i u analizi mikrostrukture odljevaka. Precizna simulacija može predvidjeti vrste faza, volumenske udjele tih faza, te veličinu i oblik zrna, čime se poboljšavaju mehanička svojstva odljevaka. Ovaj proces modeliranja temelji se na fizici

poroznosti, gdje se ne uzimaju u obzir samo problemi uzrokovani skupljanjem, nego i plinska poroznost, što omogućuje precizno predviđanje i kontrolu kvalitete. [11]

Slika 5.2 prikazuje proces punjenja odljevka, pri čemu se odljevak hladi od središta prema rubovima, odnosno od tanjih dijelova stijenki prema debljima. Na završetku animacije, prikazanoj na slici 5.3, pojila ostaju u tekućem stanju (prikazana crvenom bojom), a proces skrućivanja odvija se prema planu – od tankih dijelova preko debljih dijelova prema pojilima. Takav uljevni sustav i sustav napajanja omogućuju lijevanje bez rizika od pojave poroznosti zbog skupljanja ili nastanka usahlina. [2]



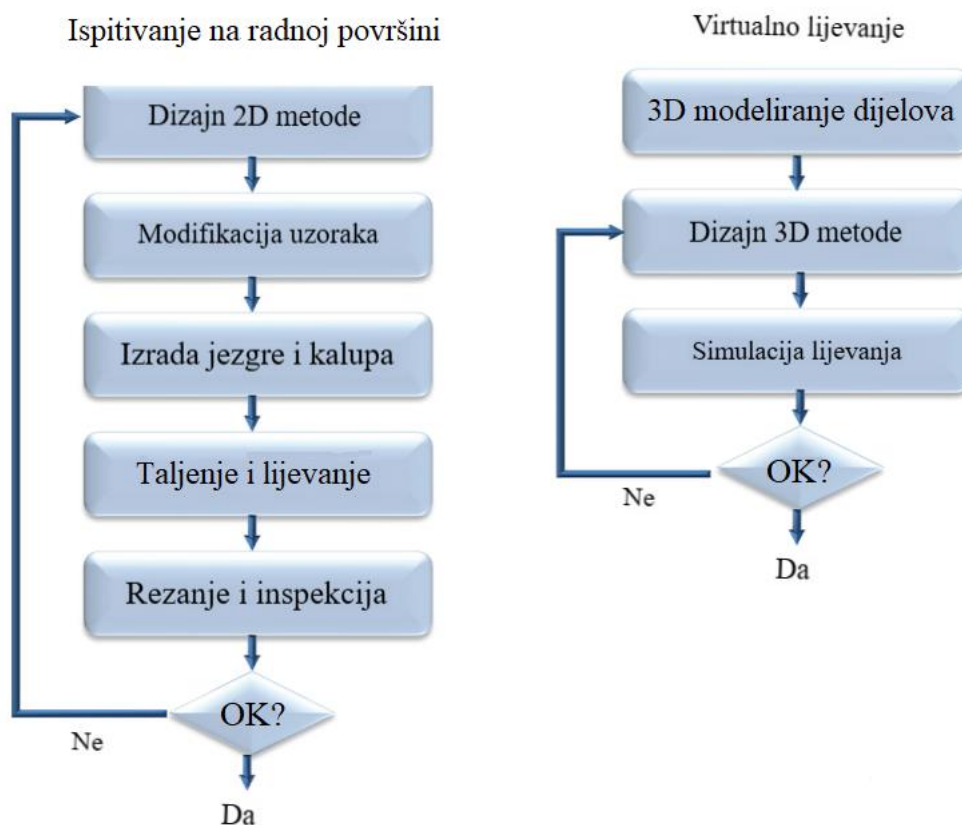
Slika 5.2 Punjenje i početak hlađenja odljevka [2]



Slika 5.3 Početak skrućivanja i napajanje debelih stijenki odljevka [2]

Primjena simulacija u lijevanju može dovesti do značajnih materijalnih i nematerijalnih koristi. Na materijalnoj razini, simulacija omogućuje optimizaciju troškova, smanjenje broja potrebnih fizičkih testova i skraćuje vrijeme pripreme do samog procesa proizvodnje odljevaka. Ubrzanje do procesa proizvodnje uključuje brže i učinkovitije planiranje i testiranje procesa lijevanja prije nego što se stvarni proizvod počne izrađivati. S druge strane, nematerijalne koristi uključuju poboljšanje kvalitete proizvoda, optimizaciju metoda lijevanja i mogućnost razvoja novih tržišta. Ove prednosti čine simulaciju važnim elementom za poboljšanje konkurentnosti ljevaonica, jer omogućuju precizno modeliranje i optimizaciju cijelog procesa još u fazi dizajniranja, bez potrebe za skupim i vremenski zahtjevnim fizičkim testiranjima. Korištenjem programa poput ProCAST-a, ljevaonice mogu prepoznati potencijalne nedostatke u ranim fazama proizvodnje i poduzeti odgovarajuće mjere prije nego što se ti problemi manifestiraju u konačnom proizvodu [12].

Na slici 5.4 prikazana je usporedba algoritama optimizacije eksperimentalne i računalne metode ispitivanja valjanosti cijeloga procesa lijevanja.

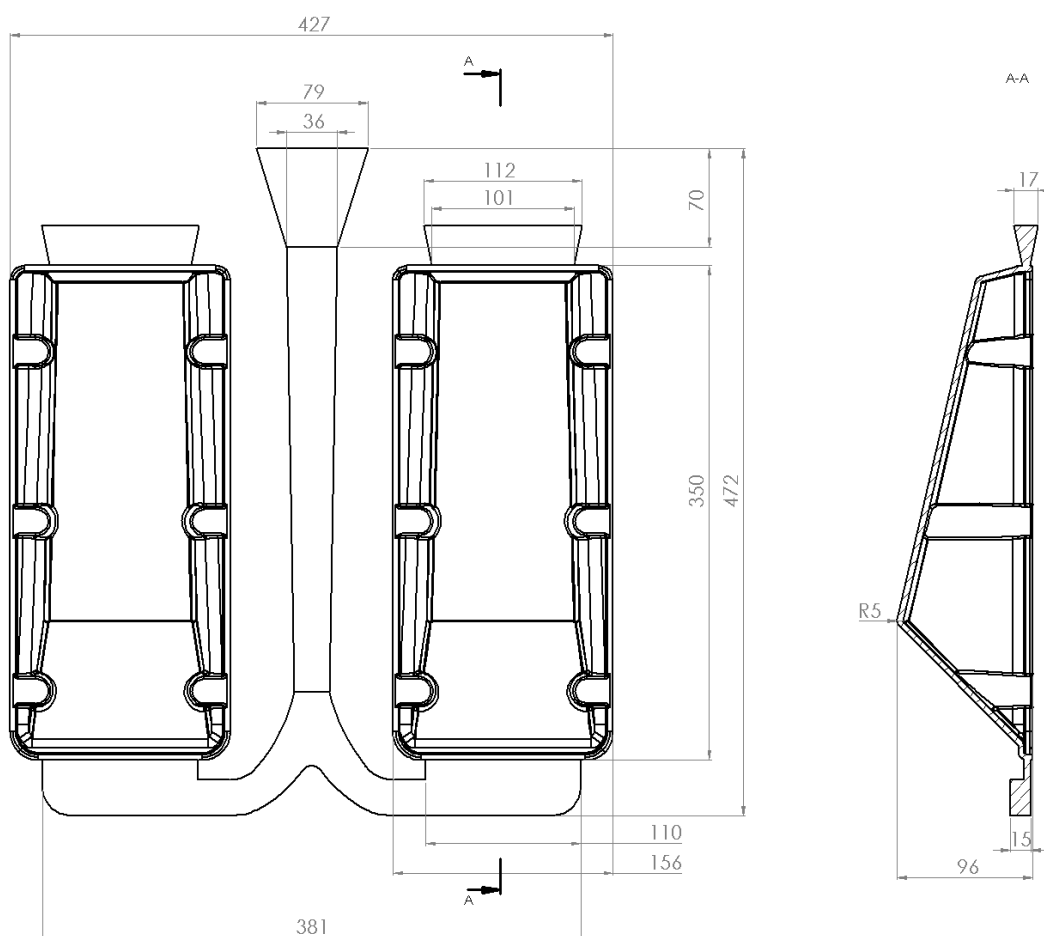


**Slika 5.4 Usporedba optimizacije eksperimentalne i računalne metode ispitivanja valjanosti procesa lijevanja [12]**

Primjena simulacijskih alata u industriji lijevanja još uvijek nije široko rasprostranjena. Manje od 30% ljevaonica koristi napredne simulacijske programe, a glavni razlozi za to uključuju visoke početne troškove, potrebu za specijaliziranim školovanjem kadrova te probleme u integraciji podataka s CAD sustavima. Osim toga, neke ljevaonice mogu imati problem s visokom složenošću modeliranja, što dodatno usporava implementaciju ovih alata. Ipak, primjena najboljih praksi, kao što su demonstracije uživo, suradnja s konzultantima i korištenje kooperativnih simulacijskih centara, može pomoći u prevladavanju tih prepreka i omogućiti bržu i uspješniju primjenu simulacijskih rješenja. [12]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

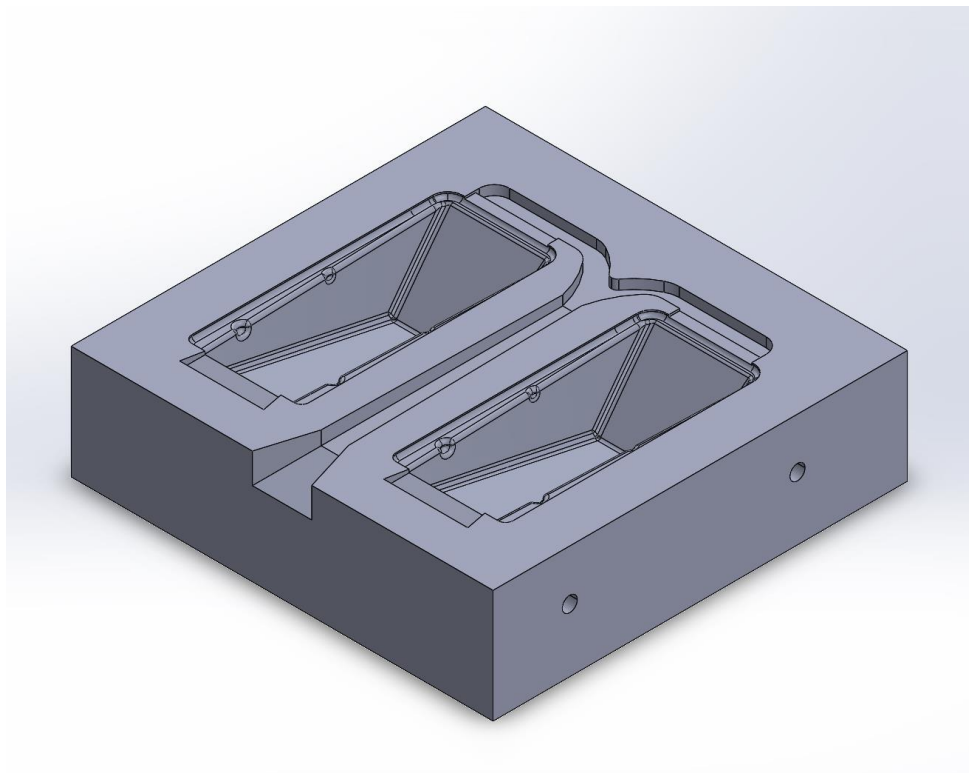
U eksperimentalnom dijelu rada provedena je simulacija kokilnog lijevanja poklopca u programskom paketu ProCAST. U zadatku je definirano da je poklopac od aluminijeve legure AlSi12. Slika 6.1 prikazuje geometriju odljevka s uljevnim sustavom te najvažnije dimenzije.



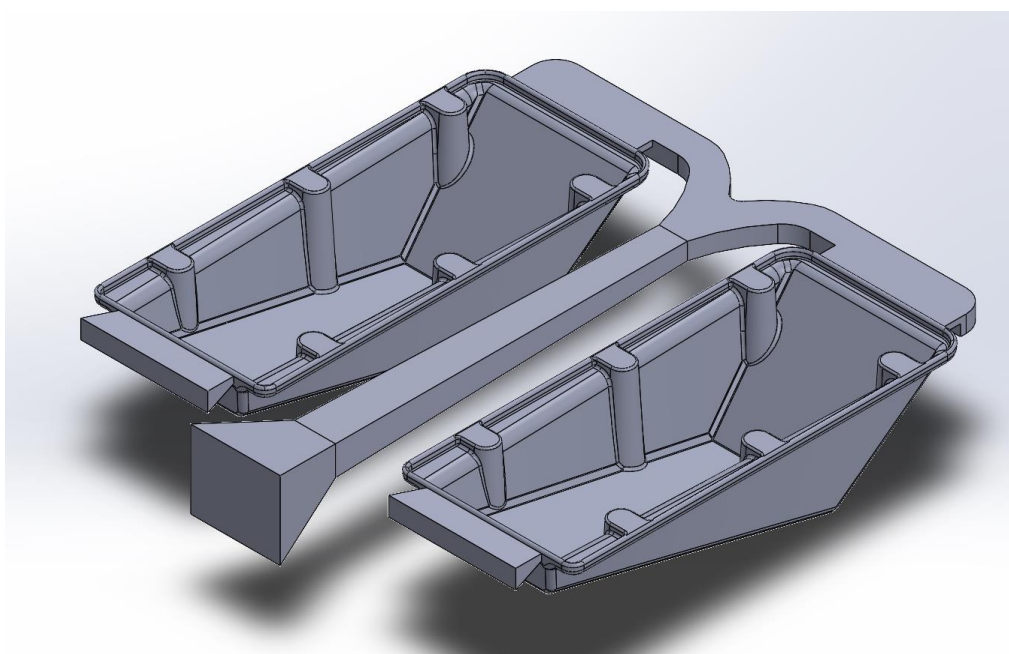
Slika 6.1 Geometrija odljevka s uljevnim sustavom te najvažnije dimenzije

### 6.1. CAD model

Prvi korak prije provedbe simulacije je izrada CAD modela odljevka i kokile koji su prikazani na slikama 6.2 i 6.3.



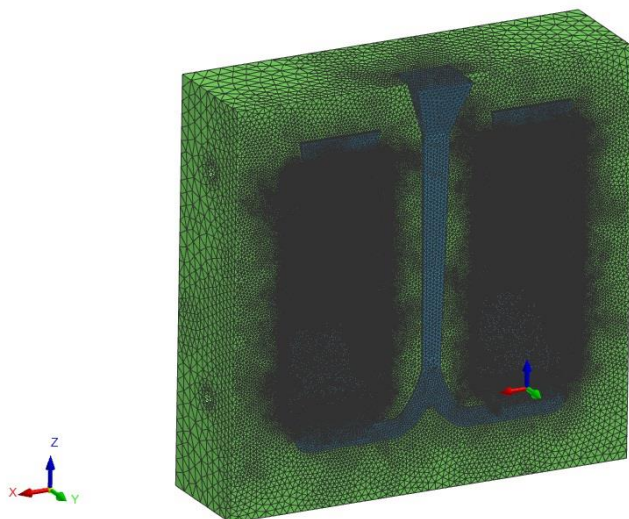
**Slika 6.2 3D model polovice kokile**



**Slika 6.3 3D model odljevka**

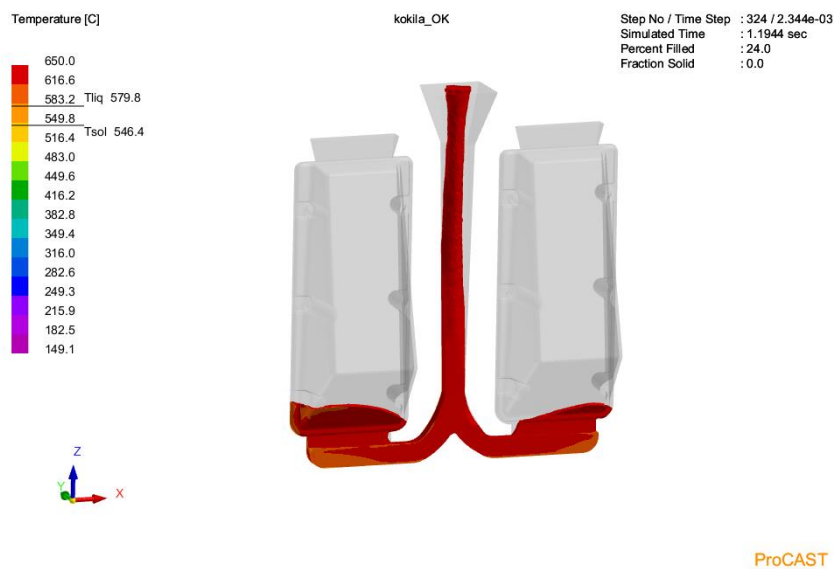
## 6.2. Simulacija lijevanja i skrućivanja

STEP datoteka je učitana u program i kreirana je trokutasta mreža konačnih elemenata za odljevak i kokilu (slika 6.4).

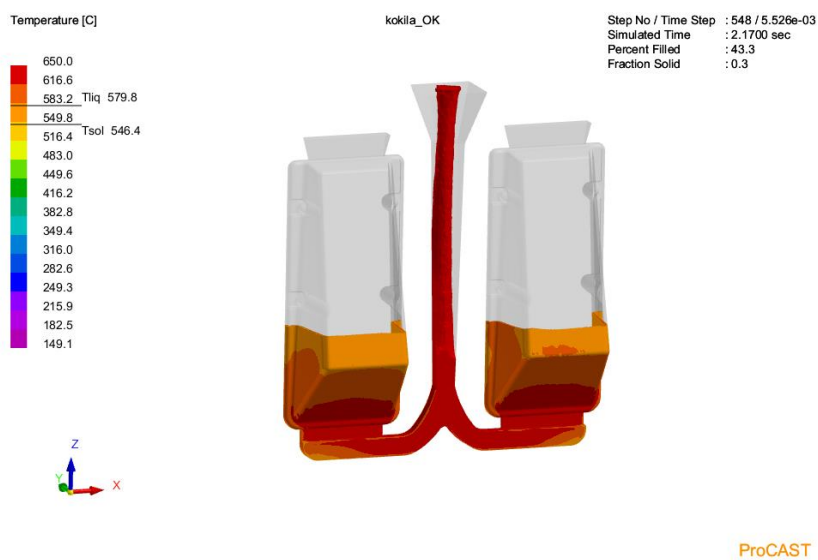


**Slika 6.4** Trokutasta mreža konačnih elemenata odljevka i kokile

Nakon kreiranja mreže i provjere njene ispravnosti, dodaje joj se volumen kako bi se dobila volumna tetraedarska mreža. Idući korak je odabir smjera gravitacije. Nadalje, definiraju se volumeni kao što je odljevak s uljevnim sustavom te dvodijelna kokila. Za njih se unose parametri lijevanja. Kokila je izrađena od čelika H11 (X37CrMoV5-1), a odljevak od legure AlSi12. Temperatura predgrijavanja kokile iznosila je 150 °C, a početna temperatura lijevanja 650 °C. Kokila je izvana hladena zrakom, a unutra kroz kanale uljem. Kako bi kokila poprimila stabilno temperaturno polje, odabrano je 10 ciklusa lijevanja prije početka glavne simulacije lijevanja. Slike 6.5, 6.6, 6.7 i 6.8 prikazuju faze punjenja kalupne šupljine.



Slika 6.5 Početak lijevanja taline u kalupnu šupljinu

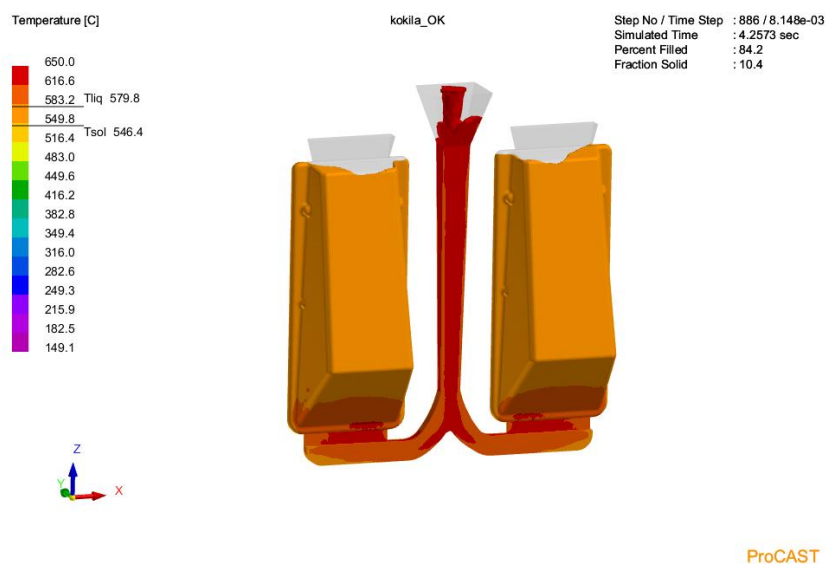


Slika 6.6 Talina počinje ispunjavati poklopac



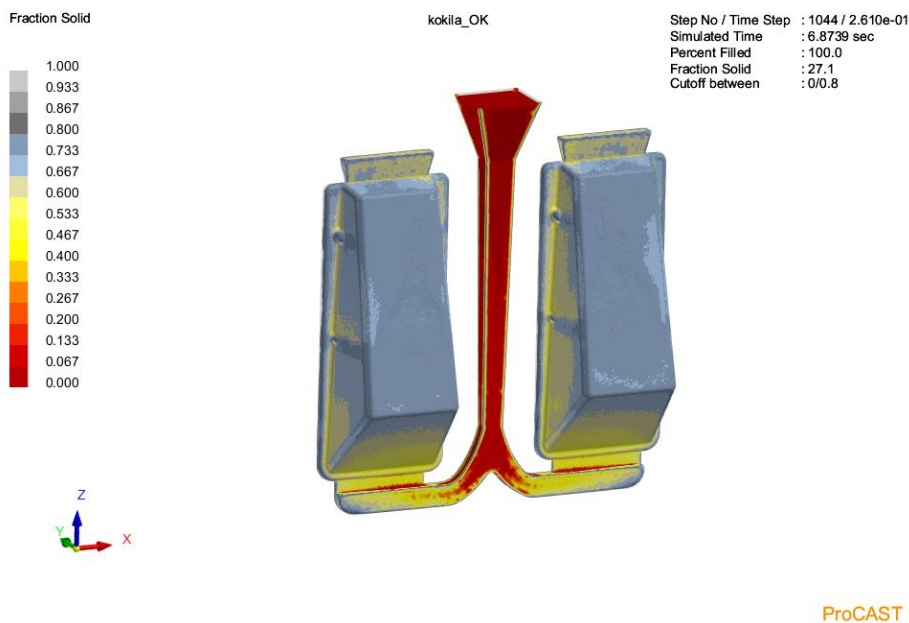


Slika 6.7 Nastavlja se punjenje kalupne šupljine

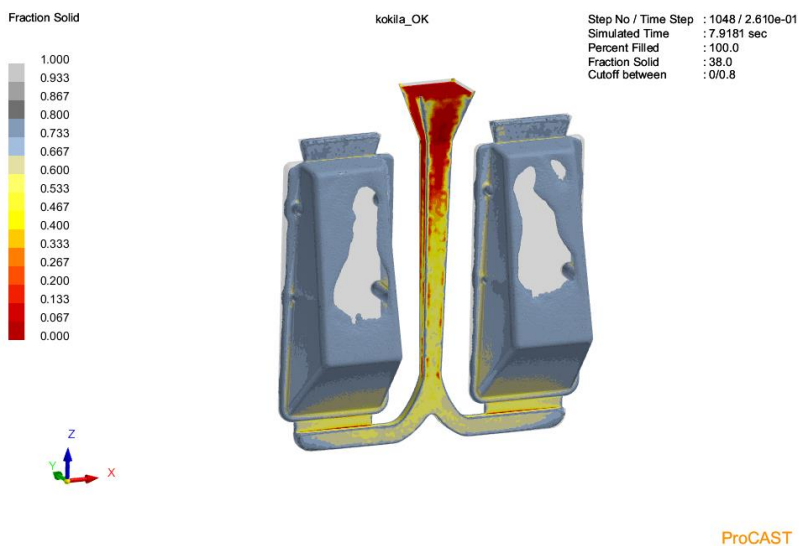


Slika 6.8 Početak punjenja pojila

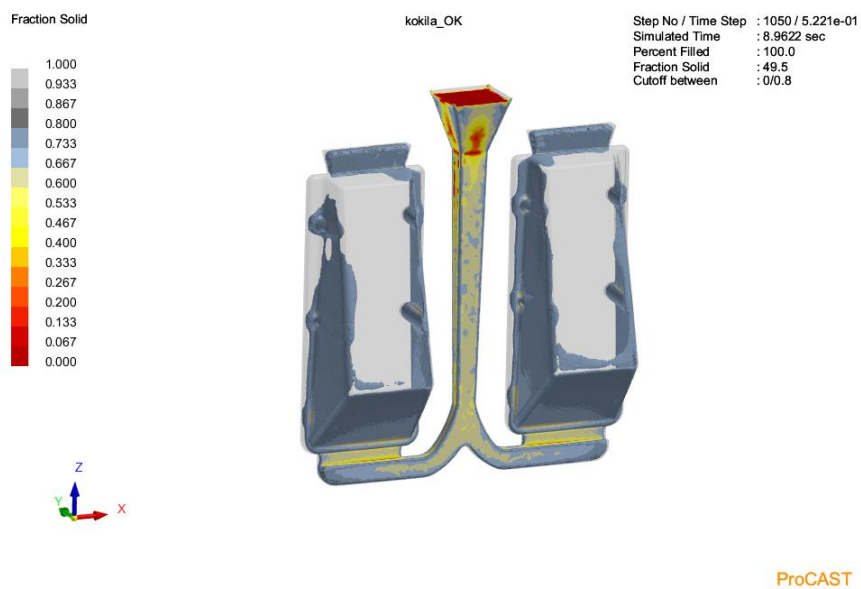
Punjenje je dobro izvedeno jer uljevni sustav pravilno raspoređuje metal u kalupnu šupljinu. Adekvatna je temperatura lijevanja jer je talina u optimalnom stanju dok se kokila ispunjava. Na slikama 6.9, 6.10., 6.11, 6.12 prikazan je proces skrućivanja sa skalom udjela krute faze.



Slika 6.9 Početak skrućivanja taline



Slika 6.10 Usmjerenom skrućivanju prema pojilima i uljevnom sustavu



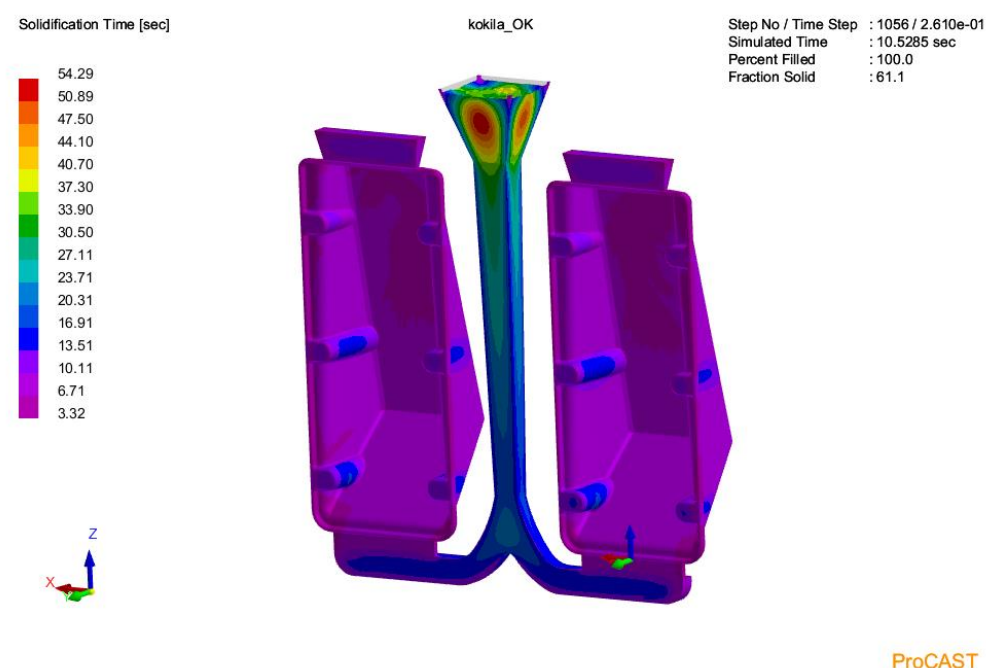
**Slika 6.11** Nastavak skrućivanja prema pojilima i uljevnom sustavu



**Slika 6.12** Potpuno skrućivanje većine odljevka

Na slikama je vidljivo da skrućivanje počinje na vanjskim dijelovima zbog kontakta s hladnijim kalupom. Pojilo ostaje u tekućem stanju što osigurava dobro napajanje odljevka tijekom skrućivanja. Skrućivanje napreduje prema ušću i spustu. U završnoj fazi skrućivanja gotovo cijeli poklopac i uljevni sustav su skrućeni s izuzetkom malih područja kod uljevne čaše i ušća. Također se na rebrima vidi kako se sporije hlade od ostatka poklopca.

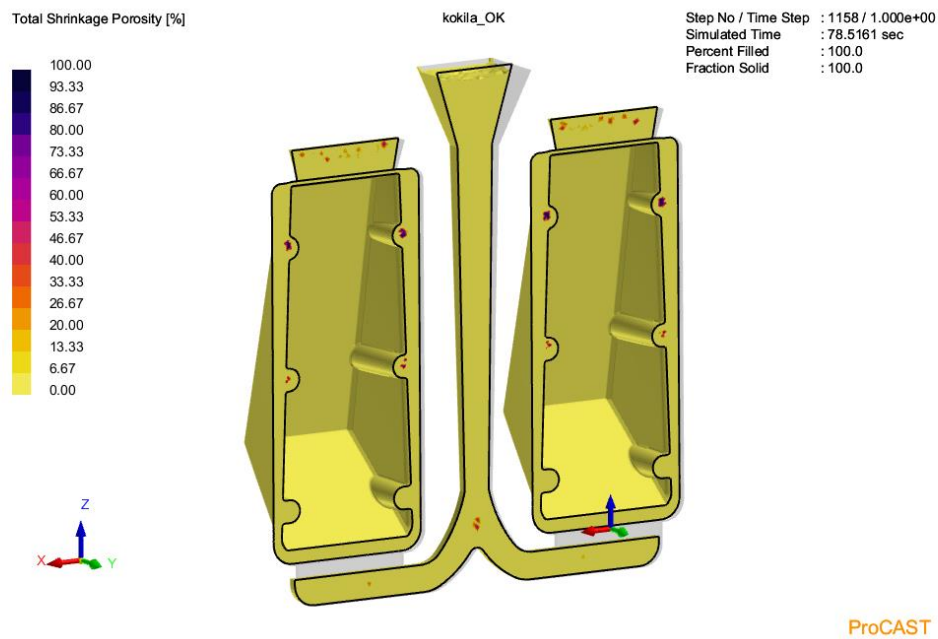
Slika 6.13 prikazuje vrijeme skrućivanja odljevka s uljevnim sustavom. Vidljivo je da je odljevku potrebno približno 15 sekundi da se u potpunosti skrutne. Najviše vremena potrebno za skrućivanje je uljevnoj čaši i iznosi 54,29 sekundi.



**Slika 6.13 Vrijeme skrućivanja odljevka i uljavnog sustava**

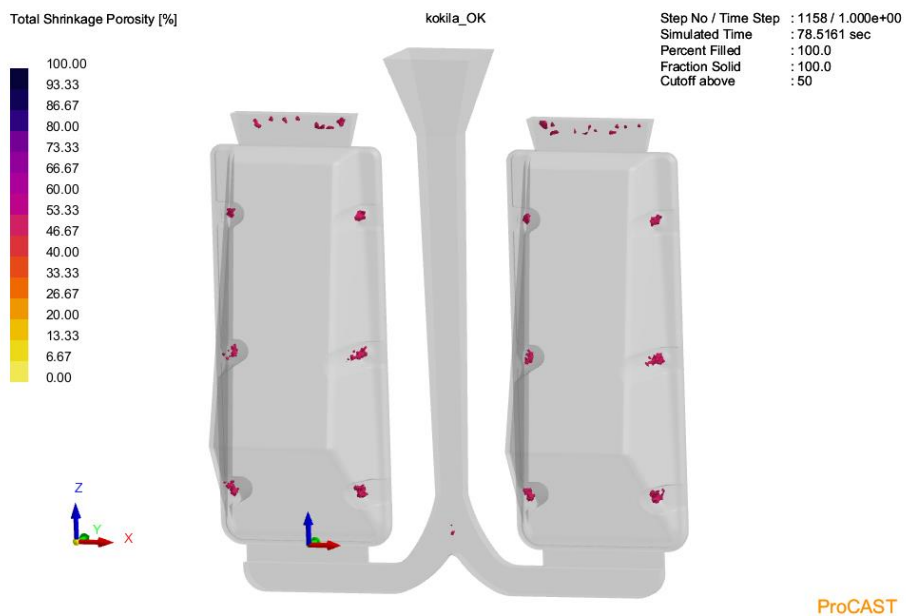
### 6.3. Greške poroznosti

Nakon simulacije skrućivanja, mogu se vidjeti mjesta na kojima može doći do poroznosti. Na slici 6.14 uočena je veća vjerojatnost do pojave poroznosti na vrhu pojila, vrhu uljevne čaše, donjem dijelu spusta te na rebrima odljevka, ali problem može biti samo poroznost na rebrima jer se ostatak navedenog odreže i ide kao kružni materijal nazad u peć za taljenje.



**Slika 6.14** Vjerojatnost i mjesta pojave poroznosti

Na slici 6.15, koja prikazuje mjesta na kojima može doći do pojave poroznosti pri vjerojatnosti većoj od 50%, vidi se da je poroznost izražena na unutarnjim rebrima poklopca. Kako je uočeno na slici 6.12, na unutarnjim rebrima nije bilo napajanja što je rezultiralo povećanom vjerojatnošću nastanka poroznosti.



**Slika 6.15** Mjesta pojave poroznosti pri vjerojatnosti većoj od 50%

## 7. ZAKLJUČAK

Aluminij i njegove legure, zbog svojih mehaničkih svojstava, male gustoće i otpornosti na koroziju, široko se koriste u industriji. Lijevanje aluminijevih legura metodom kokilnog lijevanja omogućuje proizvodnju preciznih i čvrstih odljevaka uz smanjenje troškova i povećanje proizvodne učinkovitosti. Ključni parametri lijevanja, poput temperature lijevanja, temperature predgrijavanja kalupa, vremena lijevanja i konstrukcije uljevnog sustava, značajno utječu na kvalitetu konačnog proizvoda.

Eksperimentalni dio rada uključivao je simulaciju kokilnog lijevanja poklopca od aluminijske legure AlSi12 u programskom paketu ProCAST. Korištenjem računalne simulacije analiziran je proces punjenja kalupa, tijekom skrućivanja te pojava mogućih grešaka poroznosti. Dobiveni rezultati potvrđuju da primjena računalne simulacije u kokilnom lijevanju omogućuje optimizaciju parametara procesa, smanjenje proizvodnih grešaka te povećanje kvalitete odljevaka.

## LITERATURA

- [1] Stefanescu D. A Succinct History of Metalcasting Knowledge. International Journal of Metalcasting; 2023.
- [2] Bauer B, Mihalic Pokopec I. Ljevarstvo. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2017.
- [3] Glavaš Z. Osnove lijevanja metala. Sisak: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet; 2014.
- [4] Kaufman JG, Rooy EL. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications. Materials Park (OH): ASM International; 2004.
- [5] Prerad D. Utjecaj kemijskog sastava na značajke Al-Si legure [diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet; 2015. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:107887>. Pristupljeno: 19. studenog 2024.
- [6] Boksit. Hrvatska tehnička enciklopedija, portal hrvatske tehničke baštine. Dostupno na: <https://tehnika.lzmk.hr/boksit/>. Pristupljeno: 19. studenog 2024.
- [7] Campbell J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2011.
- [8] Bauer B, Mihalic Pokopec I. Osnove tehnologije lijevanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu; 2017.
- [9] Sunrise Metal. What is Gravity Die Casting? Dostupno na: <https://www.sunrise-metal.com/what-is-gravity-die-casting/>. Pristupljeno: 19. studenog 2024.
- [10] Product Specification Standards for Die Casting: Aluminum, Aluminum-MMC, Copper, Magnesium, Zinc, and ZA Alloys. 9th ed. Arlington Heights (IL): North American Die Casting Association; 2015.
- [11] ESI Group. ProCAST Casting Simulation Suite. Dostupno na: <http://www.amozeshcatia.ir/pdf/casting-brochure.pdf>. Pristupljeno: 19. studenog 2024.
- [12] Ravi B. Casting simulation and optimisation: benefits, bottlenecks, and best practices. Indian Foundry Journal; 2008.