

Simulacija kokilnog lijevanja utega od aluminijeve legure

Tonković, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:488287>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Hrvoje Tonković

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Hrvoje Tonković

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof.dr.sc. Branku Baueru na pomoći koju mi je pružio tijekom izrade ovog rada. Također, zahvaljujem se asistentu, Karlu Jurkoviću na pomoći pri provedbi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i djevojci na podršci tijekom studiranja.

Hrvoje Tonković



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 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Hrvoje Tonković** JMBAG: 0035212541

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

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

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, uteg od aluminijske legure, potrebno je analizirati izgled kalupa sa sustavom lijevanja i napajanja. Variirati parametre lijevanja i napraviti simulaciju u programskom paketu ProCAST. Usporediti dobivene rezultate sa stvarnim stanjem.

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

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tvica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS TABLICA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. ULOGA LIJEVANJA U PROIZVODNOJ INDUSTRIJI	2
2.1. Prednosti procesa lijevanja metalnih materijala	3
2.2. Postupci lijevanja metalnih materijala	4
3. LIJEVANJE ALUMINIJA U PROIZVODNOJ INDUSTRIJI	6
3.1. Prednosti lijevanja aluminijske legure	8
4. LIJEVANJE ALUMINIJA I ALUMINIJEVIH LEGURA U TRAJNI KALUP	10
4.1. Tlačni lijev	10
4.2. Centrifugalni lijev	11
4.3. Kokilni lijev	12
4.3.1. Kalup za kokilni lijev	13
4.3.2. Koraci kokilnog lijeva	15
4.3.3. Prednosti i nedostaci kokilnog lijeva	18
4.3.4. Najčešće legure za kokilni lijev	20
4.3.5. Aluminijska legura AlSi12	21
4.3.6. Aluminijska legura AlSi9Cu3	22
5. SIMULACIJA PROCESA LIJEVANJA	24
5.1. ProCAST softver za simulaciju procesa lijevanja	27
6. EKSPERIMENTALNI DIO	29
6.1. Dobivanje 3D modela odljevka i kokile	29
6.2. Plan pokusa	33
6.3. Simulacija lijevanja i skrućivanja	34
6.4. Rezultati simulacije	40
6.4.1. Rezultati simulacije lijevanja za aluminijsku leguru AlSi12	40
6.4.2. Rezultati simulacije lijevanja aluminijske legure AlSi9Cu3	45
6.5. Eksperimentalno lijevanje aluminijske legure AlSi12	49
6.5.1. Priprema taline i kokile za lijev	49
6.5.2. Lijevanje aluminijske legure AlSi12	53
7. ANALIZA REZULTATA	58
8. ZAKLJUČAK	60
LITERATURA	61

POPIS SLIKA

Slika 1. Predviđeni rast industrije lijevanja metalnih materijala [3]	2
Slika 2. Geografska zastupljenost industrije lijevanja metalnih materijala [4]	3
Slika 3. Postupci lijevanja metalnih materijala [6]	4
Slika 4. Odljevci od aluminija i njegovih legura [8]	7
Slika 5. Tlačni lijev [12]	10
Slika 6. Centrifugalni lijev [14]	11
Slika 7. Ručno ulijevanje rastaljenog metala u kalupnu šupljinu [16]	12
Slika 8. Automatizirano ulijevanje rastaljenog materijala u kalupnu šupljinu [17]	13
Slika 9. Primjer kalupa za kokilni lijev [15]	15
Slika 10. Koraci postupka lijevanja nagibnim kokilnim lijevom [21]	17
Slika 11. Odljevak od aluminijske legure AlSi12 [25]	21
Slika 12. Odljevak od aluminijske legure AlSi9Cu3 [27]	22
Slika 13. Najčešće nepravilnosti kod procesa lijevanja [30]	25
Slika 14. Proces simulacije lijevanja [31]	26
Slika 15. Primjer simulacije gravitacijskog lijeva u softveru ProCast [35]	28
Slika 16. 3D model odljevka od aluminijske legure	30
Slika 17. Kotirane projekcije odljevka	30
Slika 18. 3D model kokile	31
Slika 19. Kotirane projekcije poklopca kokile	31
Slika 20. Kotirane projekcije dijela kokile u kojem ostaje odljevak	32
Slika 21. Trokutasta mreža konačnih elemenata odljevka	34
Slika 22. Trokutasta mreža konačnih elemenata kokile	35
Slika 23. Početak punjenja kokile	35
Slika 24. Talina postupno ispunjuje kokilu	36
Slika 25. Nastavak punjenja kokile i početak hlađenja taline	36
Slika 26. Ispunjenje kalupne šupljine i punjenje uljevnog sustava	37
Slika 27. Početak skrućivanja taline	37
Slika 28. Postepeno skrućivanje taline	38
Slika 29. Potpuno skrućivanje rubnih dijelova taline	38
Slika 30. Potpuno skrućivanje većine taline	39
Slika 31. Vjerojatnost i mjesta pojave poroznosti u odljevku	39
Slika 32. Volumen poroznosti pri vjerojatnosti većoj od 50%	40
Slika 33. Odzivna površina vremena do skrućivanja legure AlSi12 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja	43
Slika 34. Odzivna površina volumena nastale poroznosti legure AlSi12 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja	45
Slika 35. Odzivna površina vremena do skrućivanja legure AlSi9Cu3 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja	47
Slika 36. Odzivna površina volumena nastale poroznosti legure AlSi9Cu3 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja	49
Slika 37. Kokila korištena za lijevanje	50
Slika 38. Zagrijavanje kokile na potrebnu temperaturu	51
Slika 39. Postignuta temperatura kokile	51
Slika 40. Elektrootporna peć za taljenje metala	52
Slika 41. Skidanje oksida i nečistoće s površine taline	52
Slika 42. Postignuta temperatura taline u peći	53
Slika 43. Ulivanje taline iz peći u lonac za lijevanje	53

Slika 44. Kokila spremna za lijevanje	54
Slika 45. Punjenje kokile talinom	54
Slika 46. Skrućivanje i hlađenje taline unutar kokile	55
Slika 47. Otvaranje kokile	55
Slika 48. Otvorena kokila s odljevkom	56
Slika 49. Odliveni uteg od aluminijske legure	56
Slika 50. Mjerenje kemijskog sastava odljevka XRF metodom	57
Slika 51. Usporedba predviđenih i stvarnih mjesta pojave poroznosti na odljevku	59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ulazni parametri lijevanja	29
Tablica 2. Kombinacija ulaznih parametara lijevanja za leguru AlSi12	33
Tablica 3. Kombinacija ulaznih parametara lijevanja za leguru AlSi9Cu3	33
Tablica 4. Rezultati simulacije za leguru AlSi12	40
Tablica 5. Analiza varijance za odziv vremena do skrućivanja za leguru AlSi12	41
Tablica 6. Statističke karakteristike modela odziva vremena do skrućivanja legure AlSi12 ...	41
Tablica 7. Udjeli parametara lijevanja u vremenu do skrućivanja legure AlSi12	42
Tablica 8. Rezultati analize varijance za pojavu poroznosti kod legure AlSi12.....	43
Tablica 9. Statističke karakteristike modela odziva pojave poroznosti legure AlSi12	44
Tablica 10. Rezultati simulacije za leguru AlSi9Cu3	45
Tablica 11. Analiza varijance za odziv vremena do skrućivanja za leguru AlSi9Cu3	46
Tablica 12. Statističke karakteristike modela odziva vremena do skrućivanja za leguru AlSi9Cu3	46
Tablica 13. Udjeli parametara lijevanja u vremenu do skrućivanja legure AlSi9Cu3	47
Tablica 14. Rezultati analize varijance za pojavu poroznosti za leguru AlSi9Cu3	48
Tablica 15. Statističke karakteristike modela pojave poroznosti legure AlSi9Cu3	48
Tablica 16. Potrebne temperature zagrijavanja kokile i taline.....	50
Tablica 17. Kemijski sastav odljevka	57

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je simulacija kokilnog lijevanja utega od aluminijske legure. Rad je podijeljen u dva dijela, prvi teorijski i drugi eksperimentalni.

U teorijskom dijelu rada ukratko je objašnjen značaj industrije lijevanja u proizvodnoj industriji te značaj aluminijske legure. Nadalje, dana je podjela postupaka lijevanja aluminijske legure u trajne kalupe. Naglasak je stavljen na kokilni lijev, dok su ostali postupci ukratko objašnjeni. Dan je pregled najčešće korištenih legura za kokilni lijev, dok su aluminijske legure korištene u ovom radu posebno obrađene. Na kraju teorijskog dijela opisan je značaj simulacije procesa lijevanja. Razrađene su njene mogućnosti, prednosti i način rada. Također, ukratko je obrađen programski paket za simulaciju lijevanja ProCAST.

U eksperimentalnom dijelu rada simuliran je kokilni lijev dvaju aluminijskih legura. Promatran je utjecaj temperature predgrijavanja kokile i temperature lijevanja na trajanje vremena do skrućivanja i pojave poroznosti u odljevku. Dobiveni rezultati simulacije analizirani su ANOVA metodom te su dobivene odzivne površine za vrijeme skrućivanja i pojavu poroznosti. Na kraju, rezultati simulacije uspoređeni su sa stvarnim stanjem odljevka, odlivenim u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Rezultati simulacije poklapaju se sa rezultatima stvarnog lijevanja odnosno simulacija je točno predvidjela lokaciju poroznosti u stvarnom odljevku.

Ključne riječi: kokilni lijev, lijevanje Al-legura, simulacija lijevanja

SUMMARY

The topic of this thesis was the simulation of permanent mould casting of weights made of aluminum alloy. The thesis was divided into two parts, the first being theoretical and the second experimental.

In the theoretical part of the thesis, the significance of the casting industry in manufacturing industry was briefly explained, as well as the importance of aluminum in both industries. Furthermore, the casting processes of aluminum and aluminum alloys into permanent molds were described. The focus was on permanent mould casting, while other processes were briefly explained. An overview of the most commonly used alloys for permanent mould casting was given, with special attention to the aluminum alloys used in this study. The theoretical part ended with a description of the importance of casting simulation. Its capabilities, advantages, and operation were discussed. Additionally, the casting simulation software ProCAST was briefly introduced.

In the experimental part of the thesis, the permanent mould casting of two aluminum alloys was simulated. The influence of mould preheating temperature and casting temperature on the solidification time and the occurrence of porosity in the casting was analysed. The simulation results were analysed using the Analysis of Variance (ANOVA) method, and response surfaces for solidification time and porosity probability were obtained. Finally, the simulation results were compared with the actual casting, produced in the Foundry laboratory at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. The simulation results match the results of the actual casting, which means that the simulation accurately predicted the position of the porosity in the actual casting.

Key words: permanent mould casting, casting of Al-alloys, casting simulation

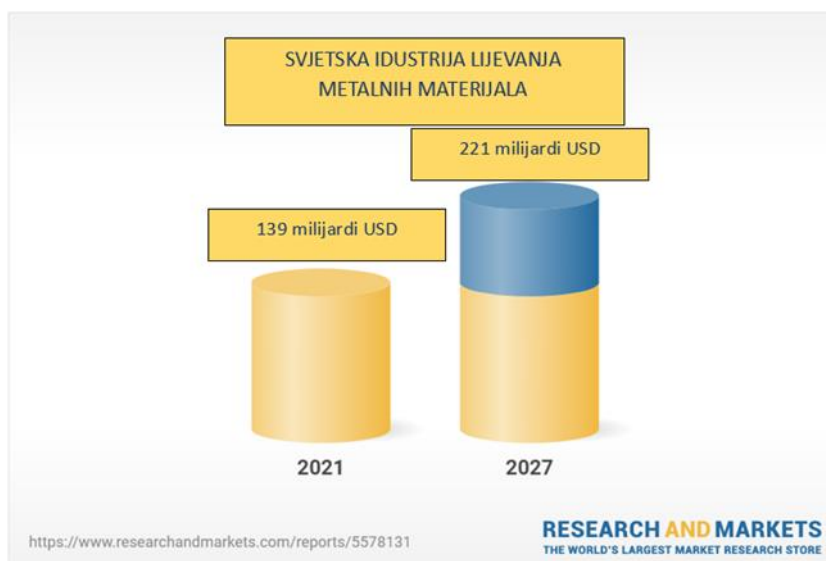
1. UVOD

Proces lijevanja metala najjednostavniji je i najizravniji put do skoro gotovog proizvoda, često i najjeftiniji. Ovaj proces, u svom osnovnom obliku, zahtijeva kalupnu šupljinu i rastaljeni metal, koji se u nju ulijeva. Ljudi su tisućama godina unazad proizvodili odljevke, najčešće ulijevajući rastaljeni metal u pješčane kalupe. Pretvaranje rastopljenog metala u odljevke i izrada kalupa za lijevanje tradicionalno je bila umjetnost, izražavanje kreativnosti. Cilj lijevanja metala bio je proizvesti korisne alate i umjetnička djela. Proučavajući drevne odljevke, jasno je da njihova proizvodnja zahtijeva posebne vještine. Drevni obrtnici koristili su tradiciju i usvojene vještine, prenesene kroz stoljeća, te iskustvo kako bi proizveli željene odljevke. Moderne industrijske ljevaonice koriste iste vještine, ali ih nadopunjuju i poboljšavaju napretkom tehnologije lijevanja te razumijevanjem temeljnih načela mehanike fluida, termodinamike i metalurgije. Lijevanje je jedan od najstarijih postupaka oblikovanja metala te je nekad način lijevanja bio čuvan kao tajna među obrtnicima. Industrijski razvoj, u drugoj polovici prošlog stoljeća, prebacio je proces lijevanja iz umjetnosti u znanost. Da bi ostale konkurentne na današnjem tržištu, moderne ljevaonice moraju u potpunosti iskoristiti prednosti napretka tehnologije lijevanja. Računalno potpomognuto inženjerstvo, u industriji lijevanja, bilo je područje intenzivnih istraživanja tijekom posljednjih dvadeset godina. Ono omogućuje brzu i detaljnu analizu problema, u ranom stadiju proizvodnog ciklusa, što omogućuje donošenje odluka usmjerenih na poboljšanje dizajna i kvalitete. Stoga su troškovi, rizici i pogreške povezane s postupcima lijevanja svedeni na minimum. [1]

2. ULOGA LIJEVANJA U PROIZVODNOJ INDUSTRIJI

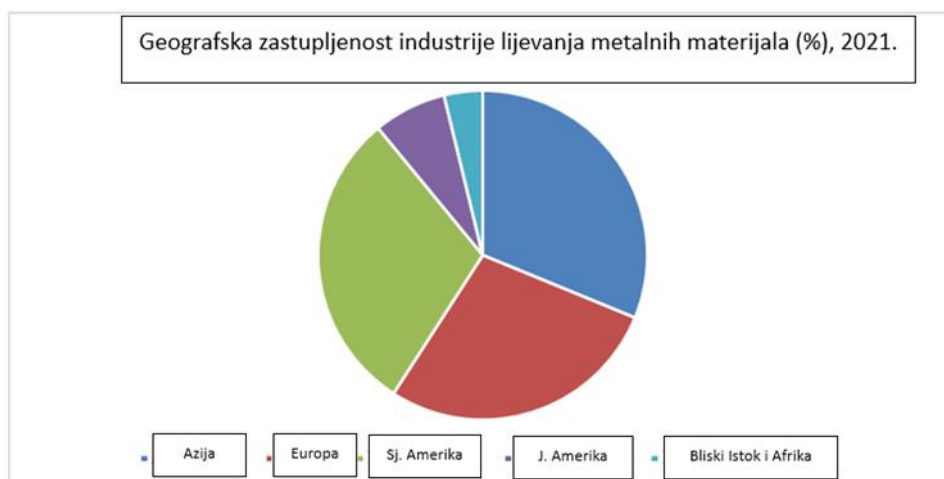
Mnogi su ljudi svjesni važnosti proizvodne industrije, ali svijest o važnosti industrije lijevanja je puno manja. Industrija lijevanja je odgovorna za proizvode koji pokreću svakodnevni život, gospodarstvo, te mnoge druge industrije. Lijevani dijelovi su dio svakog automobila i kamiona, svakog željezničkog vagona i lokomotive, svake zgrade i svakog komada teške opreme za građevinarstvo i poljoprivredu. Procesi lijevanja su postali središnjica proizvodne industrije jer se putem tih procesa proizvode energetske učinkoviti, personalizirani metalni proizvodi u velikim količinama. Industrija lijevanja metalnih materijala jedan je od najvećih pokretača recikliranja u proizvodnji. Ljevaonice su glavni sudionici u ponovnoj uporabi starog metala, reciklirajući milijune tona svake godine. [2]

Zbog brzine izrade i ekonomičnosti, za industriju lijevanja metalnih materijala je predviđen veliki rast u sljedećih nekoliko godina. Slika 1. prikazuje predviđeni rast industrije lijevanja metalnih materijala. [3]



Slika 1. Predviđeni rast industrije lijevanja metalnih materijala [3]

Slika 2. prikazuje geografsku zastupljenost industrije lijevanja metalnih materijala.



Slika 2. Geografska zastupljenost industrije lijevanja metalnih materijala [4]

2.1. Prednosti procesa lijevanja metalnih materijala

Lijevani metalni dijelovi neizostavan su dio mnogih industrija, posjeduju odlična mehanička svojstva, kao što su visoka čvrstoća te izvrsna otpornost na zamor materijala. [5]

Prednosti lijevanih dijelova su razne, mogu se postići točnije dimenzijske tolerancije u usporedbi s proizvodima izrađenim strojnom obradom. Također, lijevani dijelovi pružaju vrlo dobru završnu kvalitetu površine, s vrlo malom potrebom za naknadnom obradom. Još jedna prednost lijevanja je mogućnost smanjenja težine proizvoda. Odabirom odgovarajućih legura ili metala može se značajno uštediti na masi. Ovo čini lijevane metalne dijelove idealnim izborom za vrlo velike komponente, poput blokova motora i dijelova zrakoplova.[5]

Glavne prednosti procesa lijevanja metalnih materijala su [5] :

➤ Cijena

Proizvodnja lijevanjem pruža ekonomičniju opciju za proizvodnju u malim serijama, zbog brzine, niskih troškova alata i mogućnosti proizvodnje složenih geometrija.

➤ Brza proizvodnja

Budući da se dijelovi lijevaju, minimalna su potrebna sredstva za izradu alata. Dijelovi se mogu brzo proizvesti u malim ili velikim količinama.

➤ Složenost proizvoda

Lijevanje je izvrsna opcija za složene dijelove jer pruža fleksibilnost dizajna, s lakom mogućnosti izrade šupljih dijelova. Odljevci mogu biti izrazito mali ili vrlo veliki, bez narušavanja kvalitete ili strukture.

➤ Kvaliteta proizvoda

Metalni odljevci posjeduju vrlo dobra mehanička svojstva te se mogu proizvoditi i vrlo tanki odljevci, bez narušavanja strukturnog integriteta.

➤ Kvaliteta površine

Iako metalni odljevci imaju potrebe za završnom obradom, ona se vrlo lako izvede ručnom ili strojnom obradom.

➤ Osviještenost prema okolišu

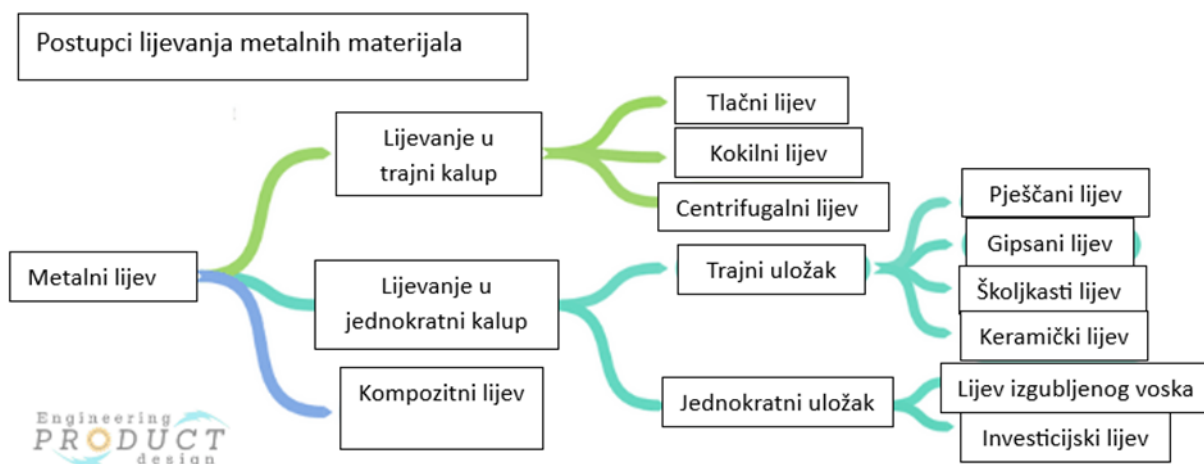
Mnoge ljevaonice metala surađuju s lokalnim tvrtkama za recikliranje, kako bi smanjile otpad. Također, većina ljevaonica ima manju potrošnju energije, u usporedbi s tvrtkama drugih proizvodnih postupaka.

2.2. Postupci lijevanja metalnih materijala

S razvojem moderne tehnologije lijevanja, razvijene su brojne specijalizirane metode lijevanja. Svaka od njih pruža svoje jedinstvene prednosti u proizvodnji. Dobro razumijevanje prednosti i nedostataka različitih postupaka lijevanja metalnih materijala omogućuje odabir optimalne metode lijevanja za željeni proizvod. Lijevanje metala se može podijeliti u dvije grupe prema trajnosti kalupa [6] :

- lijevanje u jednokratne kalupe
- lijevanje u trajne kalupe.

Na slici 3. je prikazana podjela postupaka lijevanja metalnih materijala.



Slika 3. Postupci lijevanja metalnih materijala [6]

Pri odabiru odgovarajućeg postupka lijevanja za određeni proizvod, treba uzeti u obzir sljedeće čimbenike [6] :

- oblik i veličina dijela
- potrebna količina proizvoda
- potrebne tolerancije
- materijal.

3. LIJEVANJE ALUMINIJA U PROIZVODNOJ INDUSTRIJI

Lijevani aluminij i aluminijeve legure igraju ključnu ulogu u različitim industrijama zahvaljujući svojim brojnim prednostima i mehaničkim svojstvima. Nekoliko uobičajenih primjena lijevanog aluminija i njegovih legura dano je u nastavku. [7]

➤ **Automobilska industrija**

Lijevani aluminij koristi se u automobilskoj industriji za proizvodnju složenih dijelova poput blokova motora, glava cilindra, kućišta prijenosa, dijelova ovjesa i kotača. Budući da je lijevani aluminij vrlo lagani materijal, pridonosi poboljšanju učinkovitosti goriva, smanjenju emisije plinova i poboljšanju opće izvedbe vozila. Osim toga, izvrsna toplinska svojstva lijevanog aluminija čine ga pogodnim za komponente motora koje zahtijevaju učinkovito hlađenje. [7]

➤ **Zrakoplovna industrija**

Zrakoplovna industrija se oslanja na lijevani aluminij za proizvodnju ključnih komponenta poput strukturalnih dijelova zrakoplova, kućišta motora, nosača krila i stajnog trapa. Zbog visokog omjera čvrstoće i težine, otpornosti na koroziju i odličnih termičkih svojstava, lijevani aluminij je idealan materijal u zrakoplovnoj industriji. [7]

➤ **Elektronika i elektroindustrija**

U sektorima elektronike i elektroindustrije, lijevani aluminij se koristi u električnim kućištima, hladnjacima, konektorima i drugim komponentama. Izvrsna toplinska vodljivost osigurava učinkovito raspršivanje topline, dok električna vodljivost podržava učinkovitu električnu izvedbu i zaštitu. [7]

➤ **Građevinarstvo i arhitektura**

Lijevani aluminij nalazi primjene u sektorima građevinarstva i arhitekture zbog svoje estetske privlačnosti i trajnosti. Koristi se za arhitektonske elemente, dekorativne predmete, okvire prozora, fasade i strukturalne komponente. Otpornost na koroziju, aluminija i njegovih legura, osigurava dugotrajnost, dok mehanička svojstva pojednostavljuju ugradnju i smanjuju opterećenje konstrukcije. [7]

➤ **Industrijska oprema**

Lijevani aluminij i njegove legure koriste se u različitoj industrijskoj opremi poput pumpi, ventila, kompresora i hidrauličkih sustava. Otpornost na koroziju, obradivost i čvrstoća doprinose pouzdanom radu tih komponenta, što je ključno u industrijskim procesima. [7]

➤ Potrošački proizvodi

Lijevani aluminij koristi se u proizvodnji potrošačkih proizvoda poput posuđa, namještaja, svjetiljki i dekorativnih predmeta. Njegova težina, vodljivost topline i otpornost na koroziju čine ga privlačnim izborom za ove proizvode, osiguravajući visoku kvalitetu i dugotrajnost. [7]

➤ Medicinska oprema

Lijevani aluminij je vrlo lagan, otporan na koroziju i biorazgradiv materijal, stoga se široko koristi u medicinskoj industriji. Pronalazi primjene u okvirima opreme, potpornim strukturama i komponentama, gdje su smanjenje težine i trajnost bitni. [7]

Važnost lijevanog aluminija i njegovih legura u ovim industrijama leži u sposobnosti dobivanja laganih, snažnih, otpornih na koroziju i termički postojanih dijelova. Ova svojstva doprinose poboljšanoj učinkovitosti, trajnosti i općoj izvedbi, čineći lijevani aluminij ključnim materijalom za širok spektar industrijskih primjena. [7]

Na slici 8. su prikazani primjeri odljevaka od aluminija i njegovih legura.



Slika 4. Odljevci od aluminija i njegovih legura [8]

3.1. Prednosti lijevanja aluminiya

Brojne prednosti lijevanja aluminiya vidljive su kroz njegovu široku upotrebu od strane proizvođača. Izvrsna kvaliteta površine, izdržljivost i toplinska stabilnost nekoliko su razloga zbog kojih inženjeri posežu za aluminijem i njegovim legurama prilikom stvaranja novih proizvoda. Razvoj lijevanja aluminiya neprestano se mijenja i napreduje, kako tehničke inovacije stvaraju dodatne opcije za proizvodnju i dizajn. U nastavku su dane najvažnije prednosti lijevanja aluminiya.[9]

➤ Dizajn

Lijevanjem aluminiya može se dobiti odljevak bilo koje veličine, oblika i konfiguracije. Od najmanjeg električnog dijela koji teži manje od grama, do kućišta za prienos i spojke za automobile, lijevanjem aluminiya svaki odljevak se dobiva precizno prema zahtjevima dizajna, uz vrlo malo potrebe za završnom obradom. Lijevani aluminij osigurava široku mogućnost dizajna, uz uvjerenje da će se odljevak ponašati prema očekivanjima. Komponente od lijevanog aluminiya održavaju svoj integritet tijekom montaže, demontaže, popravaka i prerade. [9]

➤ Brzina proizvodnje

Proizvođači neprestano traže brže i učinkovitije metode za proizvodnju visokokvalitetnih proizvoda. S rastućim zahtjevima za većom učinkovitošću i performansama, lijevanje aluminiya postiglo je i nadmašilo ono što je postalo potrebno. Dijelovi i komponente od aluminijских legura se proizvode velikom brzinom, brže od bilo kojih drugih vrsta legura. [9]

➤ Čvrstoća

Jedna od najznačajnijih karakteristika lijevanih dijelova od aluminiya je njihov omjer čvrstoće i težine, koji nadmašuje bilo koji drugi metal ili leguru. Proizvodi od aluminiya su lagani, ali imaju čvrstoću čelika. Ovaj faktor pridonosi njihovoj izdržljivosti i dugotrajnosti, što je ključno za proizvode 21. stoljeća. [9]

➤ Izgled

Odljevci od aluminiya imaju veliku estetsku privlačnost. Idealni su za primjene gdje je bitan izgled proizvoda, bez potrebe za troškom naknadne obrade. [9]

➤ Trošak proizvodnje

Svaka industrija traži načine i metode za smanjenje troškova, uz zadržavanje proizvodnje visokokvalitetnih proizvoda. Niska cijena postupka lijevanja aluminijske legure glavni je faktor zbog kojeg ga tvrtke odabiru za razvoj proizvoda. Veliki dio uštede troškova posljedica je brze proizvodnje i eliminacije potrebe za završnom obradom. [9]

➤ Otpornost na koroziju

Kada su odljevci od aluminijske legure izloženi vanjskim uvjetima, njihova površina oksidira, što je karakteristika metala. Ova pojava osigurava otpornost na koroziju, čineći odljevke dugotrajnima i pouzdanima. Rezultat je veće zadovoljstvo korisnika. [9]

4. LIJEVANJE ALUMINIJA I ALUMINIJEVIH LEGURA U TRAJNI KALUP

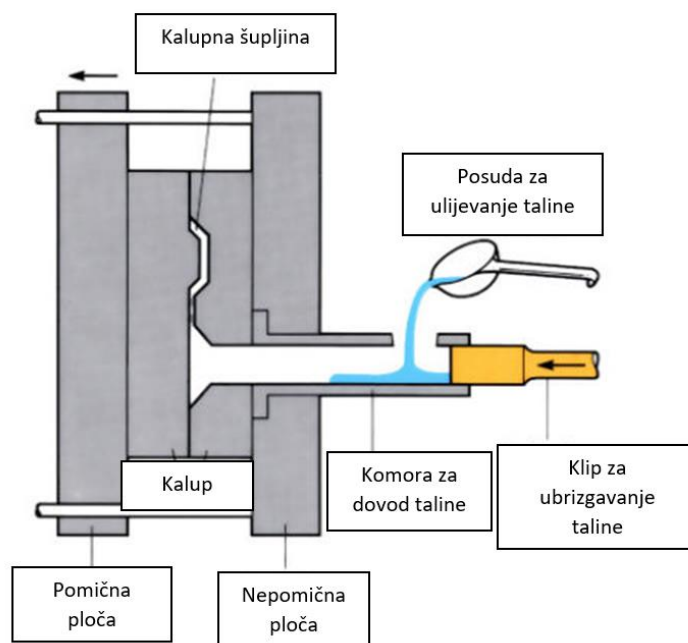
Proizvodnja odljevaka od aluminija odljevaka čini otprilike 20–25% godišnje svjetske proizvodnje aluminija. Aluminijski odljevci mogu se proizvesti praktički svim postupcima lijevanja, stvarajući proizvode s različitim korisnim svojstvima. Glavni postupci lijevanja aluminija i njegovih legura u trajne kalupe su: tlačni lijev, centrifugalni lijev i kokilni lijev.[10]

4.1. Tlačni lijev

Tlačni lijev je postupak oblikovanja, u kojem se tekući metal ubrizgava pod visokim tlakom u kalupnu šupljinu. Kalup se sastoji od dva dijela koji se, nakon što se tekući metal stvrdne, odvajaju, kako bi se otkrio odljevak. [11]

Odljevak je precizno oblikovan s glatkom površinom i zahtijeva minimalno ili nimalo naknadne obrade. Budući da se koriste čelični kalupi, postupak se može ponavljati mnogo puta koristeći isti kalup, što čini tlačni lijev idealnim za velikoserijsku proizvodnju.[11]

Postupak tlačnog lijeva prikazan je na slici 5.



Slika 5. Tlačni lijev [12]

Neki od najčešće korištenih legura aluminija za tlačni lijev su A380, 383, B390, A413, A360 i CC401. Glavna razmatranja pri odabiru odgovarajuće legure ovise o namjeni.[13]

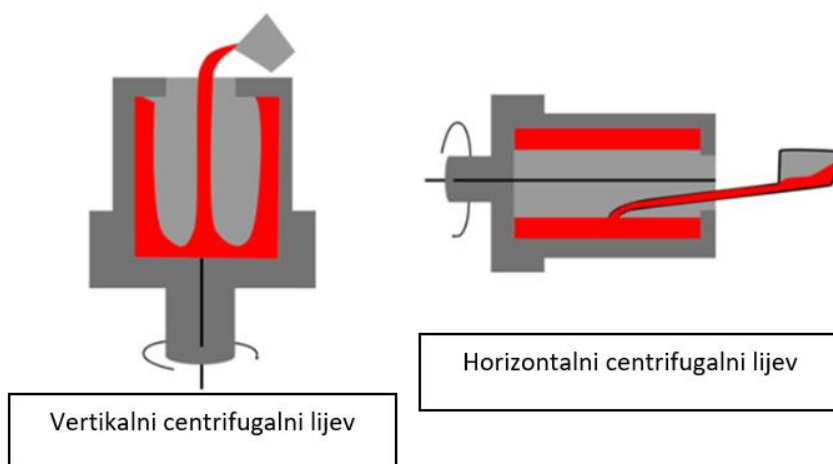
Na primjer, A360 nudi izvrsnu otpornost na koroziju, nepropusnost pod tlakom i vrlo dobru tečljivost. B390 nudi izvanrednu otpornost na trošenje i visoku tvrdoću, ali ima najmanju duktilnost od svih legura, zbog čega se koristi u blokovima automobilskih motora. Legura A380 nudi najbolju kombinaciju svojstava lijevanja i mehaničkih svojstava, te je najčešće određena legura za lijevanje različitih proizvoda.[13]

4.2. Centrifugalni lijev

Centrifugalni lijev je postupak lijevanja u kojem se kalup izrađuje od metala, gipsa ili grafitnog materijala. Kalup se rotira na stroju za lijevanje, dok se sa vanjske strane ulijeva tekući metal. Tekući metal će se ravnomjerno rasporediti duž zida kalupne šupljine, zbog utjecaja centrifugalne sile i stvrdnuti prema obliku kalupa. Nema potrebe za korištenjem jezgre i sustava za ulijevanje taljevine.[14]

Postoje dvije vrste centrifugalnog lijevanja: vertikalno centrifugalno lijevanje i horizontalno centrifugalno lijevanje, prikazano na slici 6. Rotacijski motor okreće kalup kako bi ravnomjerno rasporedio rastaljeni metal po površini kalupa. [14]

Centrifugalno lijevanje aluminija i njegovih legura koristi se za proizvodnju dijelova mlaznih motora, cijevi za petrokemijske peći te mnoge vojne opreme. Ovaj postupak je pogodan za dobivanje okruglih ili cilindričnih odljevaka. [14]



Slika 6. Centrifugalni lijev [14]

4.3. Kokilni lijev

Kokilni ili gravitacijski lijev je jedan od najstarijih načina lijevanja metalnih materijala te spada u metode lijevanja u trajnom kalupu. U ovom procesu rastaljeni metal se ulijeva u šupljinu kalupa, koji je obično izrađen od čelika ili drugih izdržljivih materijala. Rastaljeni materijal popunjava kalupnu šupljinu isključivo pod utjecajem sile teže, otud ime gravitacijski lijev. Kokilni lijev se koristi za proizvodnju srednjih do velikih odljevaka kompleksnih oblika. Često se koristi u industrijama poput automobilske i zrakoplovne, gdje su potrebni dijelovi visoke kvalitete. Za dobavu rastaljenog metala koristi se lonac ili žlica za ulijevanje. Ulijevanje rastaljenog metala u kalupnu šupljinu može biti izvedeno ručno, prikazano na slici 7., ili se proces može automatizirati, prikazano na slici 8. Metal se skrućuje unutar kalupa, a nakon hlađenja, kalup se otvara kako bi se uklonio odljevak.[15]



Slika 7. Ručno ulijevanje rastaljenog metala u kalupnu šupljinu [16]



Slika 8. Automatizirano ulijevanje rastaljenog materijala u kalupnu šuplinu [17]

4.3.1. Kalup za kokilni lijev

Funkcionalni kalup je ključan za proces kokilnog lijevanja. Dizajn kalupa za kokilni lijev glavni je problem u ovom području. Prvo, na kalupu za kokilni lijev trebalo bi odrediti mjesto razdvajanja i liniju razdvajanja, kako bi se postigao minimalni gubitak dimenzija i olakšalo ulijevanje metala te oslobađanje zraka. Nakon što je mjesto razdvajanja određeno, potrebno je odrediti volumen rastaljenog metala potrebnog za ispunjenje uljevnog sustava. Volumen određuje veličinu dovodnog kanala i ušća. Također, kako bi se skrutnuti odljevak izvadio iz kalupa, treba primijeniti sustav izbacivanja na jednoj ili obje strane kalupa. Kalupi za kokilni lijev mogu biti fleksibilniji, u odnosu na kalupe za pješčani i tlačni lijev.[18]

Prilikom dizajna kalupa za kokilni lijev treba uzeti u obzir potrebu za naknadnom obradom. Strojna obrada je najskuplji od svih procesa proizvodnje, stoga uvijek treba biti usmjeren na smanjenje naknadne obrade. Kvaliteta površine lijevanja inferiorna je, u odnosu na obradu, te za postizanje nekih karakteristika površine naknadna obrada je jedini izbor. Međutim, to ne znači da se lijevanje i obrada uvijek isključuju. Dobro osmišljeni dizajn kalupa i proces lijevanja mogu značajno uštedjeti na naknadnoj obradi. [18]

Postoji nekoliko faktora dizajna kalupa koje treba uzeti u obzir, prilikom izrade kalupa za projekt. Svi ovi faktori dizajna kalupa su važni za osiguravanje kvalitete i funkcionalnosti gotovog proizvoda te optimizacije proizvodnog procesa. [19]

Faktori dizajna kalupa su[19] :

➤ **Skošenja**

Ovo je važno za olakšavanje procesa izvlačenja i smanjenje oštećenja na gotovom komadu. Precizno skošenje je potrebno, kako bi se odljevak glatko izvadio iz kalupa.

➤ **Zaobljenja**

Zaobljenja se koriste kako bi se smanjila koncentracija naprezanja na kutovima kalupne šupljine, te smanjili rizici od pucanja. Oštri kutovi mogu otežati proces lijevanja, stoga mnogi kalupi imaju zaobljenja, kako bi smanjili rizik od grešaka u proizvodnji. Zaobljenja se mogu dodati gotovo bilo gdje na kalupu, osim na liniji razdvajanja.

➤ **Linije razdvajanja**

Linije razdvajanja određuju gdje će se dijelovi kalupa spojiti, kako bi se oblikovao gotov komad. Ove linije treba pažljivo odabrati kako bi se minimizirala potreba za dodatnom obradom i postigla željena kvaliteta površine.

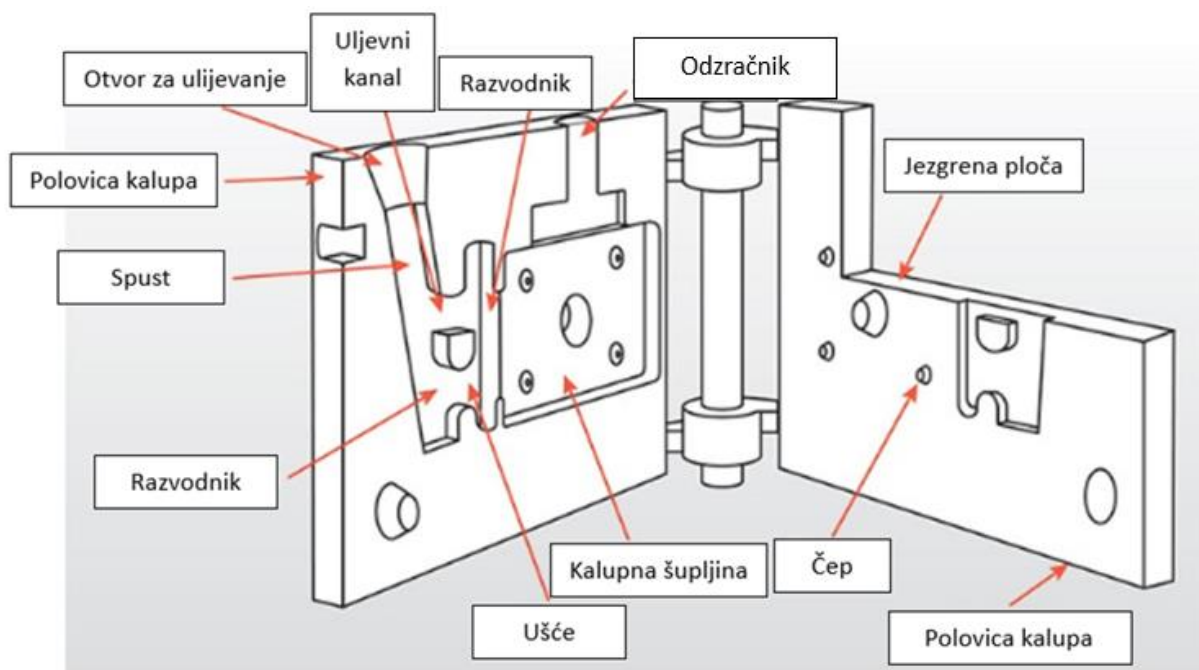
➤ **Čepovi**

Čepovi su izbočine na gotovom komadu koji se koriste za pridržavanje, spajanje ili pričvršćivanje drugih dijelova. Njihov dizajn treba biti funkcionalan i kompatibilan s potrebama krajnjeg proizvoda.

➤ **Rebrasta ojačanja**

Rebrasta ojačanja se koriste za povećanje krutosti i čvrstoće gotovog komada. Njihov dizajn treba biti pažljivo prilagođen kako bi se postigla optimalna čvrstoća uz minimalno povećanje mase. Selektivno postavljanje rebara može smanjiti nejednaku debljinu stjenke te je korisno za poboljšanje sposobnosti punjenja kalupa.

Za izradu kalupa za kokilni lijev često se koristi metalni materijal visoke temperaturne izdržljivosti, poput sivog lijeva ili čelika za topli rad. Oba materijala mogu izdržati ciklično zagrijavanje i hlađenje, koje je tipično za proizvodnju velikih količina. Kokilni lijev rezultira većom dimenzijskom točnošću, boljom kvalitetom površine te višim i ujednačenijim mehaničkim svojstvima, u usporedbi s pješčanim ljevom. Slika 9. prikazuje primjer trajnog kalupa, kakav se koristi kod kokilnog lijeva. [18]



Slika 9. Primjer kalupa za kokilni lijev [15]

4.3.2. Koraci kokilnog lijeva

Proces kokilnog lijevanja može biti ručni ili automatizirani. Koraci izvođenja ovog postupka lijevanja su [20] :

➤ Priprema

Prije početka lijevanja, mora se pripremiti kalup. To uključuje zagrijavanje kalupa na odgovarajuću temperaturu te nanošenje izolirajućeg premaza ili maziva. Ovo mazivo održava temperaturu kalupa tijekom procesa proizvodnje, sprečava prerano skrućivanje i pomaže u uklanjanju odljevka nakon skrućivanja. Dijelovi kalupa se zatim zatvaraju i čvrsto spajaju, pomoću visokog tlaka.

➤ Ulijevanje rastaljenog metala

Nakon obavljene pripreme kalupa, rastaljeni metal se uzima iz peći i ulijeva direktno u kalup, putem uljevne čaše. Proces ulijevanja se može obavljati ručno ili pomoću automatizirane žlice za lijevanje. Taljevina se ubacuje u kalup iz vertikalnog položaja i puni kalupnu šupljinu pod utjecajem sile teže. Nisu potrebne druge sile i tlakovi. Izbjegavanjem upotrebe visokih tlakova turbulencija se značajno smanjuje, što smanjuje poroznost i rezultira boljom kvalitetom površine.

➤ Hlađenje

Nakon što je rastaljeni metal uliven u kalup, ostavlja se da se ohladi i stvrdne. Metalu treba dovoljno vremena da poprimi oblik kalupne šupljine i potpuno se skrutne, prije nego što se kalup otvori. Prerano uklanjanje odljevka može dovesti do nepopravljivih grešaka.

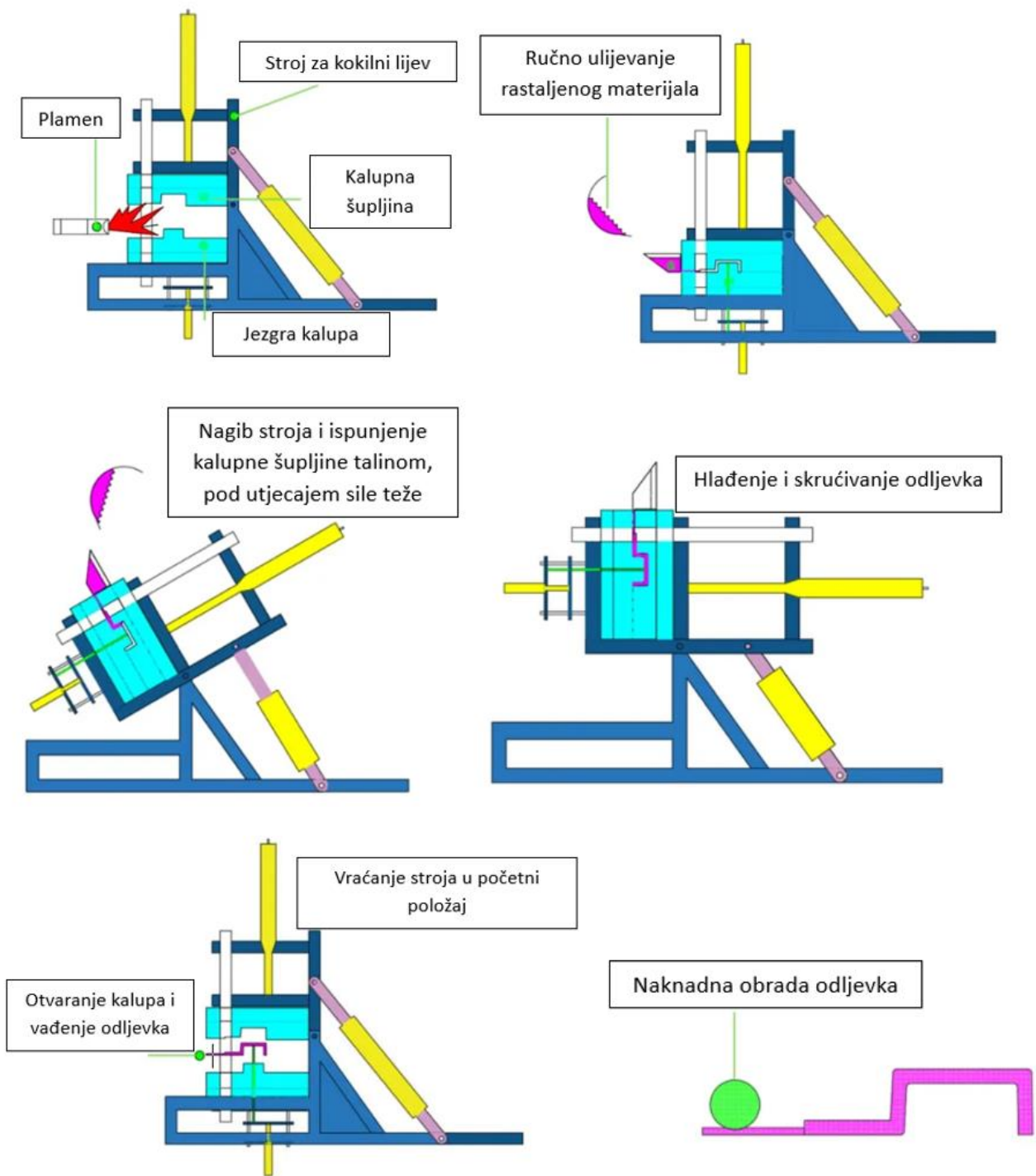
➤ Vađenje odljevka

Nakon što je prošlo dovoljno vremena dijelovi kalupa se otvaraju, a odljevak se pažljivo uklanja iz kalupne šupljine. Postupak vađenja se može obavljati ručno ili pomoću izbacivačkih zatika, koji sigurno izbacuju odljevak iz kalupa za kokilni lijev.

➤ Završna obrada

Završna faza u procesu kokilnog lijevanja je završna obrada. Nakon što je odljevak ohlađen i stvrdnut sav višak materijala, poput uljevnog sustava i srha, se uklanja. Završna obrada se obično izvodi rezanjem i brušenjem. Svi oštri rubovi moraju biti uklonjeni, a odljevci se obično čiste prije isporuke kupcu.

Na slici 10. prikazani su koraci postupka lijevanja metalnih materijala kokilnim ljevom, u slučaju nagibnog stroja za lijevanje.



Slika 10. Koraci postupka lijevanja nagibnim kokilnim lijevom [21]

4.3.3. Prednosti i nedostaci kokilnog lijeva

Prilikom odlučivanja o odabiru proizvodnog procesa važno je uzeti u obzir zahtjeve projekta i ograničenja proizvodnog procesa. Postupak kokilnog lijeva je proizvodni proces, koji nudi niz prednosti i nedostataka. [22]

Prednosti kokilnog lijeva su [22] :

➤ Visokokvalitetni dijelovi

Postupak lijevanja kokilnim lijevom nudi proizvode visoke kvalitete, dobre kvalitete površine i izvrsne dimenzijske točnosti. Također, kalupna šupljina se puni talinom pod djelovanjem gravitacije, rezultirajući odljevcima minimalne poroznosti i izvrsnih mehaničkih svojstava.

➤ Pouzdana točnost proizvodnje

Postupak kokilnog lijeva je ponovljiv proces, koji proizvodi dijelove uz osiguranje dosljedne kvalitete. Kalupi koji se koriste u postupku su izrađeni od čelika, što ih čini izdržljivima i dugotrajnima. Kalupi se mogu koristiti za proizvodnju velikog broja odljevaka s istom razinom točnosti.

➤ Ekonomičnost

Postupak kokilnog lijeva je ekonomična metoda proizvodnje lijevanih dijelova u velikim količinama. Početna investicija u alate i opremu može biti visoka, ali trošak po odljevku se smanjuje kako se povećava volumen proizvodnje. Ovaj postupak lijevanja također smanjuje potrebu za naknadnom obradom, što dodatno smanjuje troškove proizvodnje.

➤ Smanjenje otpada

Postupak kokilnog lijeva proizvodi manje otpadnog materijala, u odnosu na druge metode lijevanja. Razlog toga je proizvodnja odljevaka s minimalnom poroznošću i nepravilnostima. Visokokvalitetni dijelovi, koji se proizvode gravitacijskim lijevanjem, zahtijevaju manje obrade, što dodatno smanjuje količinu proizvedenog otpada.

➤ Širok raspon materijala

Postupak kokilnog lijeva može se koristiti za proizvodnju odljevaka širokog raspona materijala. Postupak je posebno pogodan za proizvodnju dijelova s kompleksnom geometrijom, koje bi bilo teško ili nemoguće proizvesti korištenjem drugih proizvodnih metoda.

Nedostaci kokilnog lijeva su [22] :

➤ Ograničena fleksibilnost dizajna

Kokilni lijev je postupak koji zahtijeva specifična konstrukcijska razmatranja. Kalupi, koji se koriste u postupku, moraju biti dizajnirani, tako da omogućuju protok taljevine uslijed gravitacije. To znači da određene konstrukcijske značajke, poput tankih stjenki, mogu biti teško postignute ovom metodom.

➤ Visoka početna ulaganja

Kokilni lijev zahtijeva značajno početno ulaganje u alate i opremu. To može biti prepreka za male tvrtke, koje nisu u mogućnosti napraviti tako veliko ulaganje odjednom. Trošak alata može, također, biti problem, za tvrtke koje trebaju proizvesti odljevke u malim količinama.

➤ Duže vrijeme izrade

Kokilni lijev obično zahtijeva duže vrijeme izrade u usporedbi s drugim metodama lijevanja. Postupak zahtijeva izradu kalupa, što može potrajati nekoliko tjedana. Stoga, tvrtke koje hitno trebaju odljevke moraju razmotriti druge metode lijevanja.

➤ Ograničena veličina dijelova

Kokilni lijev ima najbolju primjenu kod proizvodnje odljevaka koji su relativno malih dimenzija. Postupak nije pogodan za proizvodnju velikih dijelova jer težina taljevine može uzrokovati deformaciju ili pucanje kalupa.

➤ Ograničena svojstva odljevka

Kokilni lijev ima ograničenja, u pogledu karakteristika materijala koje se mogu postići. Postupak proizvodi odljevke s jednolikom strukturom, što može ograničiti čvrstoću i izdržljivost.

Kokilni lijev proizvodi visokokvalitetne odljevke s izvrsnom točnošću dimenzija te je ekonomičan način proizvodnje odljevaka u velikim količinama. Međutim, postoje ograničenja, uključujući smanjenu fleksibilnost dizajna, duže vrijeme izrade i ograničenu veličinu dijelova. Općenito, kokilni lijev je izbor za ljevaonice koje trebaju proizvesti visokokvalitetne odljevke u velikim količinama i spremne su snositi početno ulaganje u alate i opremu. [22]

4.3.4. Najčešće legure za kokilni lijev

Nekoliko metala i njihovih legura mogu se koristiti, kao odgovarajući materijali za kokilni lijev. To su, uglavnom, materijali koji ne sadrže značajnu količinu željeza, iako se ponekad mogu i oni lijevati. Glavni materijali za kokilni lijev su: aluminij i njegove legure, legure magnezija te cinkove legure.[23]

➤ Aluminijske legure

Aluminij je jedan od glavnih metala koji se koriste u procesu lijevanja, pa tako i u kokilnom lijevu. Aluminijske legure obično još sadrže silicij, bakar i magnezij.[23]

Aluminijske legure imaju malu težinu i nude dobru dimenzijsku točnost, što ih čini dobrom opcijom za visokokvalitetne složene dijelove. Visoka čvrstoća, otpornost na koroziju i sposobnost disipacije topline, pružaju značajne prednosti aluminijskim legurama, kao konstrukcijskim materijalima. Aluminijski odljevci su lagani i mogu izdržati više radne temperature. Ostale prednosti uključuju termalnu i električnu provodljivost.[23]

➤ Magnezijeve legure

Magnezij je još jedan vrlo popularan materijal za kokilni lijev. Još je lakši od aluminija, a ima dodatnu prednost visoke obradivosti, što ga čini pogodnim za odljevke koji zahtijevaju dodatnu obradu. Ostali elementi u legurama od magnezija uključuju aluminij, cink, mangan i silicij. Magnezij je jači i tvrdi od najnaprednijih industrijskih plastika. Također, pruža veću otpornost na trošenje, veću otpornost na visoke temperature te bolje karakteristike apsorpcije energije i otpornosti na udarce. [23]

➤ Cinkove legure

Još jedan od glavnih materijala za lijevanje kokilnim lijevom je cink. Cink nudi prednosti kao što su: otpornost na udarce, duktilnost i pogodnost za galvanizaciju. Zbog svoje odlične sposobnosti lijevanja minimalno troši kalup. Nadmoćna livljivost, čvrstoća i krutost cinka, omogućuju dizajn tankih stjenki odljevka, što rezultira smanjenjem težine i uštedom materijala. Cink je teži od aluminija i magnezija i, obično, se legira aluminijem, bakrom i magnezijem. Proizvodne stope lijevanja cinka su mnogo brže, u odnosu na aluminij i magnezij. [23]

4.3.5. Aluminijska legura AlSi12

Ova legura je jedna od najčešće korištenih legura, aluminijska i silicijska, za lijevanje. Vrlo dobru primjenu ima u zavarivanju lijevanih dijelova od aluminijske te se može koristiti kao legura za lemljenje. Poznata je po vrlo dobrom omjeru težine i čvrstoće, kao i povoljnim toplinskim svojstvima. Eutektička legura AlSi12 ima temperaturu taljenja od 577 °C, dok se pojedinačno aluminij i silicij tale na 660 °C te 1414 °C. Mikrostrukturno, legura AlSi12 ima veliku i dobro oblikovljivu alfa fazu (aluminij), te čvrstu i neoblikovljivu beta fazu (silicij). [24]

Niska čvrstoća legure, gotovo bez istezanja, je posljedica nepromijenjenih faza iz sastava mikrostrukture. Zbog svoje relativno niske temperature taljenja i ograničenog očvršćivanja, AlSi12 je prvotno razvijena kao legura za lemljenje. Veći udio silicija znači veću tečljivost i manje skupljanje. Kada se koristi kao legura za lijevanje, AlSi12 znatno smanjuje vjerojatnost pojave vrućih pukotina. Svojstva legure omogućuju upotrebu u okruženjima s visokim temperaturama. Legura AlSi12 nije pogodna za toplinsku obradu. [24]

Osim široke primjene u područjima zrakoplovstva, svemirske i automobilske industrije, AlSi12 se često koristi i za primjene koje uključuju tanke stijenke odljevaka, poput proizvodnje izmjenjivača topline. Odljevak od aluminijske legure AlSi12 prikazan je na slici 11. [24]



Slika 11. Odljevak od aluminijske legure AlSi12 [25]

Prednosti aluminijske legure AlSi12 su [24] :

- niska cijena
- izvanredna otpornost na koroziju
- niska specifična težina
- manje skupljanje kod skrućivanja u usporedbi s ostalim aluminijskim legurama
- odlična svojstva lijevanja.

4.3.6. Aluminijska legura AlSi9Cu3

Aluminijska legura AlSi9Cu3 posebno je dizajnirana za lijevanje. Ova legura ima umjerenu električnu i toplinsku vodljivost. Ova legura pokazuje izvrsnu čvrstoću i dobru kemijsku otpornost te je ,također, prikladna za aditivnu proizvodnju. Kombinacija silicija i bakra osigurava dobra mehanička svojstva, a niži udio silicija poboljšava sposobnost strojne obrade. Legura AlSi9Cu3 se izdvaja među lijevanim aluminijskim legurama, zbog dodatka olova i kroma. Krom se dodaje metalima prije vrućeg oblikovanja ili toplinske obrade, kako bi se povećala duktilnost i žilavost te smanjilo pogrubljenje zrna, koje se javlja tijekom tih procesa. Dodavanje kroma u leguru poboljšava njezinu čvrstoću i otpornost na lom, uslijed korozije ili naprezanja. [26]

Legura AlSi9Cu3 se često koristi u procesu proizvodnje raznih sofisticiranih strojnih i motornih komponenti, kao što su: glave motora, kućišta prijenosnika, cilindri i dijelovi motora. Zbog visokog udjela bakra, legura AlSi9Cu3 zadržava svoju čvrstoću čak i pri visokim temperaturama, što je čini idealnom za upotrebu u proizvodnji lijevanih zupčanika i motora. Odljevak od aluminijske legure AlSi9Cu3 prikazan je slikom 12. [26]



Slika 12. Odljevak od aluminijske legure AlSi9Cu3 [27]

Prednosti aluminijske legure AlSi9Cu3 su [26] :

- izvrsna mehanička svojstva
- izvrsna svojstva čvrstoće i duktilnosti, kao i sposobnost strojne obrade
- izvrsna otpornost na abraziju i trošenje.

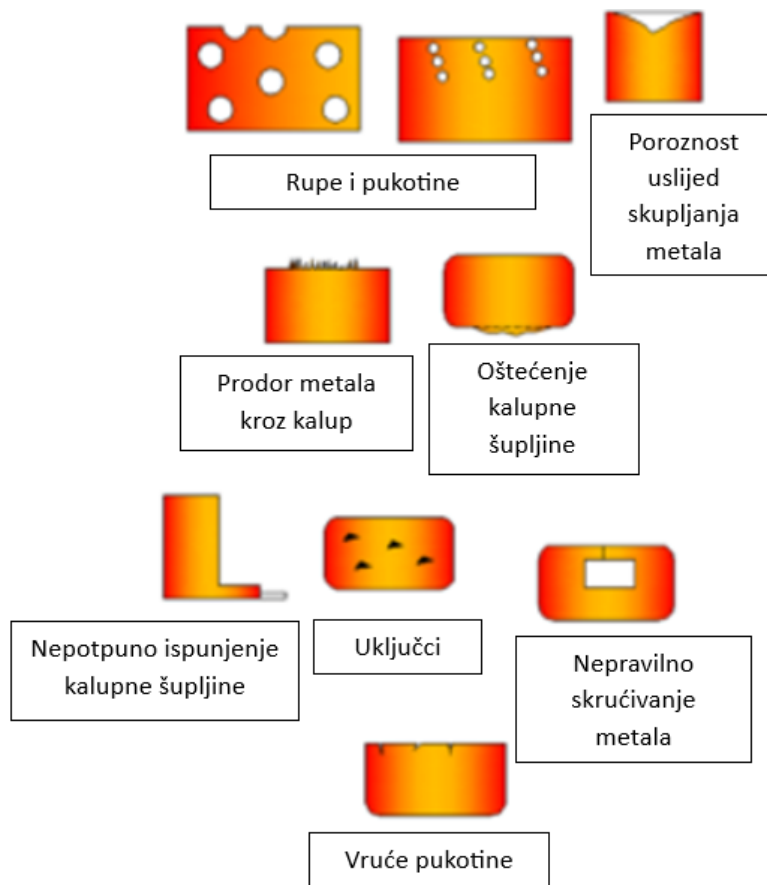
5. SIMULACIJA PROCESA LIJEVANJA

Lijevanje je jedan od najekonomičnijih postupaka proizvodnje u industriji. Proces proizvodnje novog odljevka započinje s primitkom dizajna proizvoda od strane klijenta, koji uključuje dimenzije, tolerancije, vrstu materijala, završnu obradu površine, čvrstoću, itd. Inženjer ljevaonice dizajnira sustav za ulijevanje i odvajanje odljevka. Vrijeme koje se utroši na dizajniranje i redizajniranje tih sustava može trajati nekoliko dana ili čak nekoliko tjedana, ovisno o kompleksnosti odljevka, prije nego što se dobiju kvalitetni odljevci. U prošlosti su ljevači nastojali poboljšati postupak lijevanja i eliminirati nedostatke, koji su se pojavljivali u odljercima, metodom pokušaja i pogreške temeljem vlastitih iskustava. Znanstvenici su tijekom godina proučavali znanost o lijevanju i metalurgiji, te su razvili teorije i matematičke modele, kako bi objasnili svojstva metala tijekom procesa skrućivanja. Programi za simulaciju lijevanja razvijeni su na temelju ovih metoda i korisni su za predviđanje konačnog stanja odljevka. Nedostaci i problemi mogu biti otkriveni prije stvarnog procesa lijevanja, čime se izbjegavaju troškovi ponovnih pokušaja.[28]

Lijevanje metala je zahtjevan postupak. Kada se pojave problemi tijekom lijevanja, postupak postaje još složeniji. Simulacija postupka lijevanja je izvrsno sredstvo koje se koristi u ranim fazama dizajna novog odljevka. Korištenjem softvera za simulaciju procesa lijevanja, proizvođači mogu napraviti prilagodbe kalupa, dizajna ili samog procesa lijevanja te simulirati rezultate prilagodbi u virtualnom okruženju. Mogućnost preciznog podešavanja procesa lijevanja, prije stvarnog ulijevanja rastaljenog metala u kalup, omogućuje efikasniji postupak lijevanja uz smanjenje troškova. Također, softver za simulaciju lijevanja osigurava visokokvalitetne odljevke, skraćuje vrijeme proizvodnje te smanjuje otpad. Simulacija lijevanja se, uglavnom, koristi za optimizaciju procesnih parametara pri lijevanju, u pogledu ponašanja metala kod punjenja kalupa i skrućivanja, kako bi se minimizirale nepravilnosti. [29]

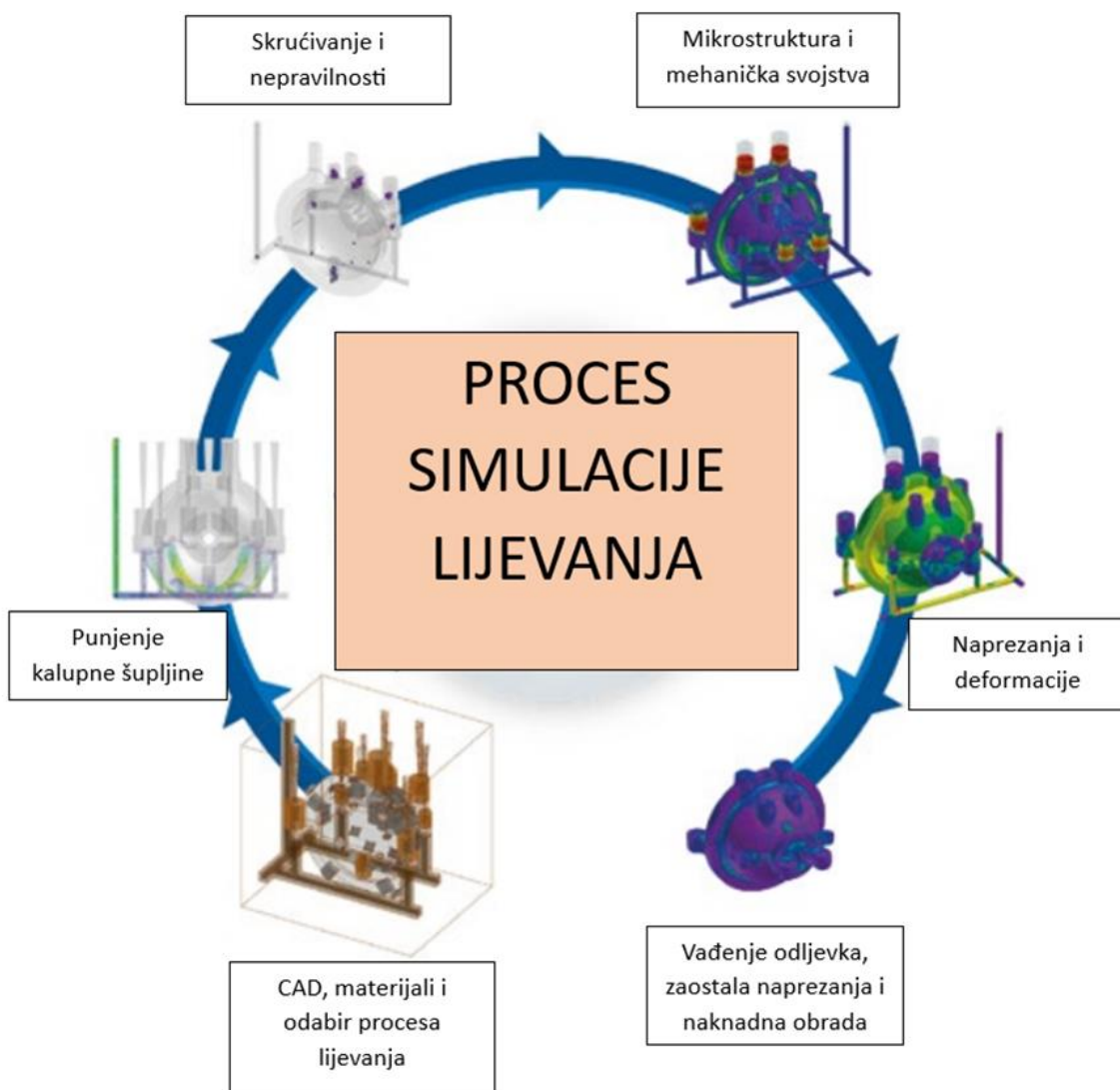
Najčešće nepravilnosti odljevaka, prikazane na slici 13., kod procesa lijevanja su [30]:

- poroznost zbog plinova: pukotine, rupe
- poroznost zbog skupljanja metala pri skrućivanju (usahline)
- nepravilnosti zbog skupljanja metala nakon hlađenja
- nepravilnosti materijala kalupa: oštećenja, prodor metala
- nepravilnosti pri ulijevanju metala: hladne pukotine, nepravilno skrućivanje, uključci
- metalurške nepravilnosti: vruće pukotine, zaostala naprezanja.



Slika 13. Najčešće nepravilnosti kod procesa lijevanja [30]

Simulacija lijevanja poboljšava učinkovitost procesa lijevanja i kvalitetu gotovog odljevka. Većinu nepravilnosti, koje se javljaju tijekom procesa lijevanja, može se izbjeći simulacijom. Procjenjuje se, da je oko 90% nepravilnosti kod lijevanja povezano s dizajnom kalupa i uljevnog sustava te bi se mogle predvidjeti simulacijom. Gotovo svi procesi lijevanja započinju sa digitalnim modelom odljevka, nakon čega simulacijski softver provodi jednostavnu analizu tog modela. Softver za simulaciju može davati preporuke za stvarni odljevak te predlagati veličinu kalupa i druge parametre lijevanja. Zahvaljujući sposobnosti simulacije da predvidi probleme, prije nego što se pojave, čvrstoća i otpornost na umor odljevka se povećavaju. Na slici 14. su prikazani koraci simulacije procesa lijevanja. [29]



Slika 14. Proces simulacije lijevanja [31]

5.1. ProCAST softver za simulaciju procesa lijevanja

ProCAST je softver za simulaciju procesa lijevanja, najbolji u klasi, koji omogućuje ljevaonicama da procijene, potvrde i usavrše svoje procese lijevanja te fino podešavaju različite varijacije procesa. Pokriva širok spektar postupaka lijevanja, koji se koriste u automobilske industriji, industriji kopnenog prijevoza i proizvodnji teške industrijske opreme. Integrirajući naprednu fiziku, ProCAST je dokazan u isporučivanju preciznih rezultata u vrlo kratkom vremenu.[32]

ProCAST također dolazi s velikom bazom podataka materijala koja obuhvaća većinu legura i materijala za kalup, kako bi najbolje podržao specifične potrebe različitih postupaka lijevanja.[32]

ProCAST softver koristi metodu konačnih elemenata za simulaciju prijenosa topline, procesa punjenja, termičko-mehaničkih procesa i mikrostrukture. ProCAST može precizno simulirati proces punjenja kalupne šupljine, proces skrućivanja odljevka te predviđati moguće uvjete lijevanja. Glavni moduli funkcija ProCAST uključuju modul za podjelu rešetke (Grid dividing module), modul za analizu prijenosa topline (Heat transfer analysis module), modul za analizu protoka (Flow analysis module) i modul za analizu naprezanja (Stress analysis module). MeshCAST može automatski generirati rešetku konačnih elemenata, koja se može savršeno povezati s komercijalnim CAD (Computer aided design) softverom. [33]

Modul za analizu prijenosa topline izračunava prijenos topline provođenjem, zračenjem i konvekcijom tijekom punjenja i izračunava latentnu toplinu koristeći jednadžbu entalpije. Modul za analizu protoka može simulirati efekte protoka, turbulenciju te protok u poroznim medijima. Modul za analizu naprezanja može izvesti potpuni izračun protoka, polja temperature i polja naprezanja.[33]

Glavne prednosti korištenja ProCAST-a uključuju [34]:

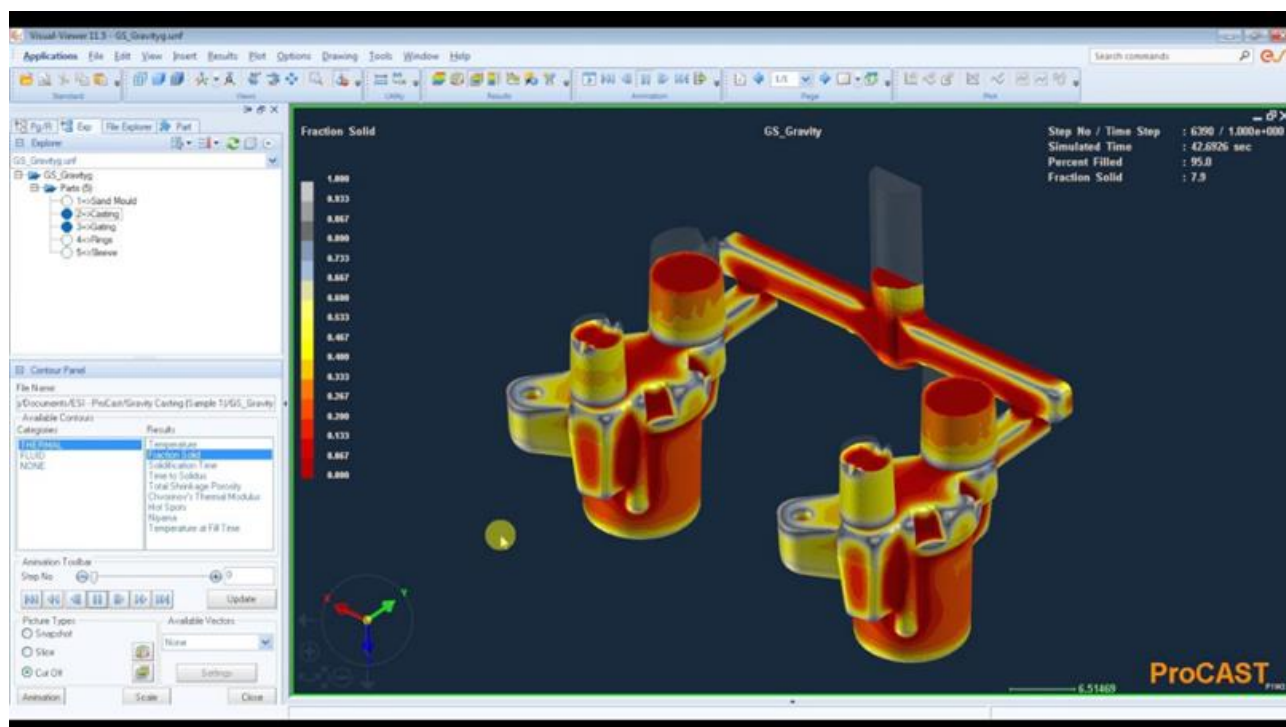
- Provjera problema pri lijevanju što je ranije moguće u procesu, kako bi se ubrzao početak proizvodnje
- Dostava točnih ponuda s preciznim procjenama troškova materijala, kako bi se osigurala marža
- Predviđanje, analiza i kvantifikacija najčešćih pogrešaka pri lijevanju te dizajniranje procesa unaprijed, kako bi se smanjile stope odbačenosti odljevaka i skupe preinake, čime se osiguravaju pravovremena isporuka i kvaliteta
- Poboljšanje kvalitete dijelova, kako bi se privukli novi kupci.

ProCAST ima širok spektar predviđanja nedostataka i pogrešaka u procesu lijevanja, uključujući [34]:

- Kompletni modeli skupljanja, modeli mikro i plinske poroznosti koji obuhvaćaju različite legure i procese
- Rješavanje različitih nedostataka povezanih s punjenjem (zrak, oksidi, površinski nedostaci, hladni spojevi, loše punjenje...)
- Praćenje zaostalih naprezanja i kontrola deformacija
- Predviđanje evolucije mikrostrukture i poboljšanje mehaničkih svojstava
- Dizajniranje procesa, kako bi se postigla željena mikrostruktura odljevka
- Utvrđivanje pravilnog proizvodnog okvira i optimizacija procesa
- Povezivanje s drugim procesima, kao što su: izrada i sušenje jezgri te termička obrada.

Suvremeno sučelje omogućuje jednostavno korištenje softvera, uz posebne radne module usmjerene na primjenu kod gravitacijskog, niskotlačnog i visokotlačnog lijeva.[32]

Na slici 15 prikazana je simulacija gravitacijskog lijeva u softveru ProCAST.



Slika 15. Primjer simulacije gravitacijskog lijeva u softveru ProCast [35]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

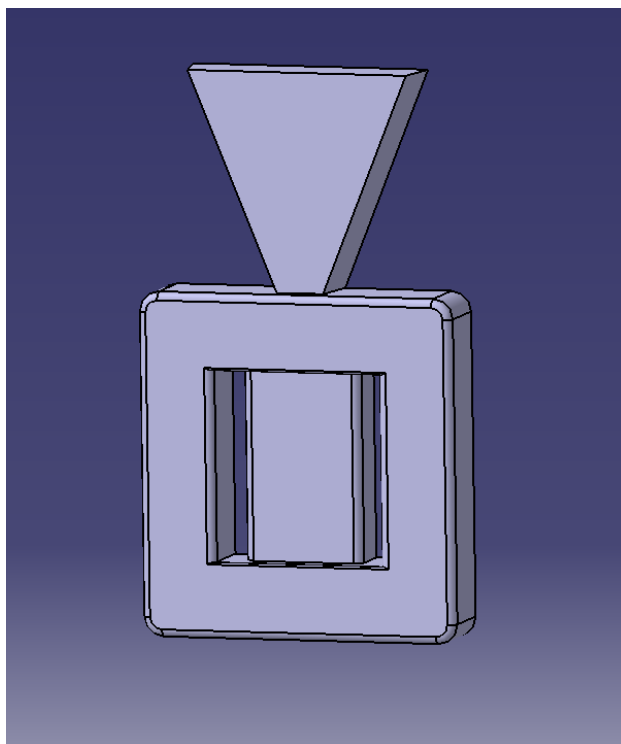
Eksperimentalni dio se temelji na provedbi simulacije kokilnog lijeva za dvije aluminijske legure, AlSi12 i AlSi9Cu3. Promatran je utjecaj temperature predgrijavanja kokile i temperature lijevanja na vrijeme skrućivanja i vjerojatnost pojave greške, u obliku poroznosti. Promjenjivi ulazni parametri su bili temperatura predgrijavanja kokile i temperatura lijevanja. Vrijednosti ulaznih parametara dani su u tablici 1. Rezultati simulacije su uspoređeni sa stvarnim stanjem odljevka. Simulacija lijevanja provedena je u programskom paketu ProCAST, a proces kokilnog lijevanja aluminijske legure proveden je u Laboratoriju za ljevarstvo.

Tablica 1. Ulazni parametri lijevanja

Aluminijska legura	Temperatura predgrijavanja kokile [°C]	Temperatura lijevanja [°C]
AlSi12	100	672
	200	722
AlSi9Cu3	100	691
	200	741

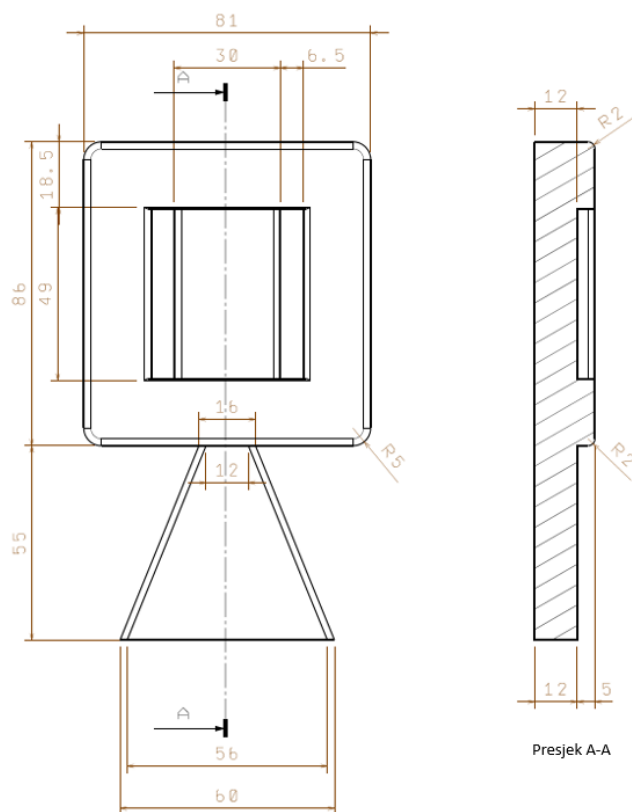
6.1. Dobivanje 3D modela odljevka i kokile

Prije početka provedbe simulacije izrađeni su 3D modeli odljevka i kokile. Uzete su mjere odljevka i kokile te su izrađeni modeli u programskom paketu CATIA. Nakon izrade 3D modela odljevka dobivena je STL datoteka, koja je bila korištena za provedbu simulacije lijevanja. Na slici 16. prikazan je 3D model odljevka, utega od aluminijske legure.



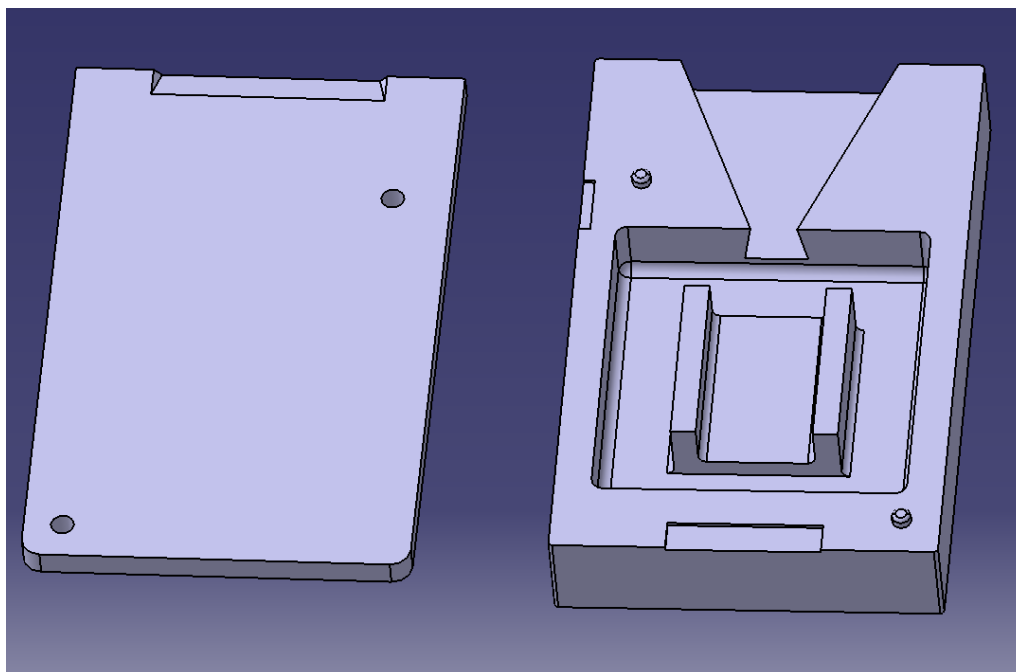
Slika 16. 3D model odljevka od aluminijske legure

Slika 17. prikazuje kotirane projekcije odljevka, utega od aluminijske legure.



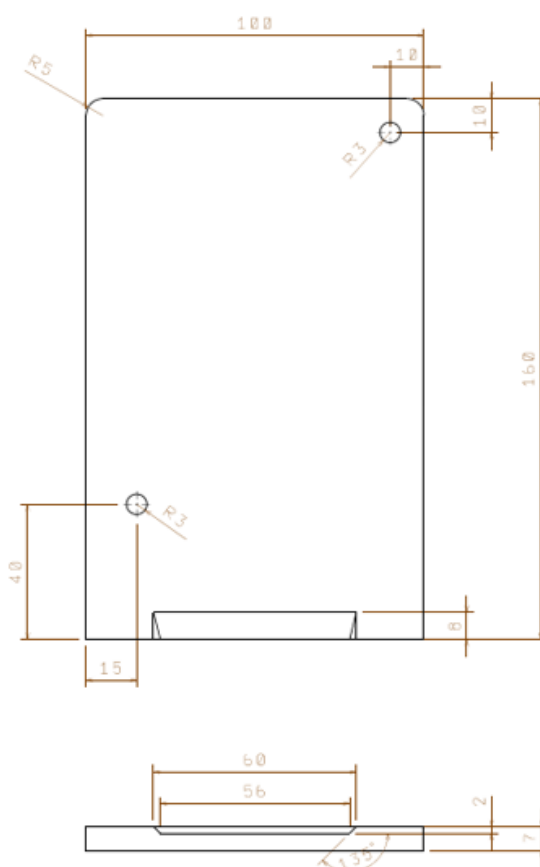
Slika 17. Kotirane projekcije odljevka

Slika 18. prikazuje 3D model kokile.



Slika 18. 3D model kokile

Na slici 19. prikazane su kotirane projekcije poklopca kokile.



Slika 19. Kotirane projekcije poklopca kokile

6.2. Plan pokusa

Nakon izrade 3D modela odljevka i dobivanja STL datoteke, izrađen je plan pokusa prema kojem će se odraditi simulacija. Plan pokusa je izrađen u softveru Design Expert. Za određivanje utjecaja temperature predgrijavanja kokile i temperature lijevanja na vrijeme skrućivanja i vjerojatnost pojave greške korišten je faktorski plan pokusa. Korišteni faktorski plan pokusa s 2 varijable na 2 razine rezultirao je s 4 eksperimenta, za svaku leguru. Za dobivanje pouzdanih rezultata software je generirao plan od 4 eksperimenta s različitim kombinacijama ulaznih parametara. Kombinacije ulaznih parametara za leguru AlSi12 dane su u tablici 2., dok su kombinacije ulaznih parametara za leguru AlSi9Cu3 dane u tablici 3.

Tablica 2. Kombinacija ulaznih parametara lijevanja za leguru AlSi12

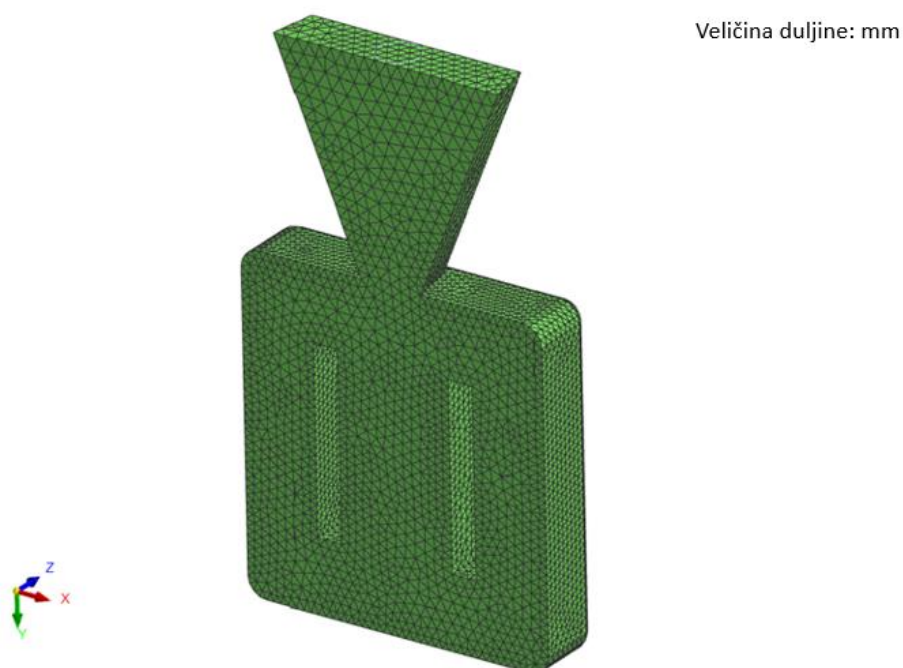
Broj pokusa	Temperatura predgrijavanja kokile [°C]	Temperatura lijevanja [°C]
Pokus 1	100	672
Pokus 2	200	722
Pokus 3	200	672
Pokus 4	100	722

Tablica 3. Kombinacija ulaznih parametara lijevanja za leguru AlSi9Cu3

Broj pokusa	Temperatura predgrijavanja kokile [°C]	Temperatura lijevanja [°C]
Pokus 1	200	691
Pokus 2	100	741
Pokus 3	100	691
Pokus 4	200	741

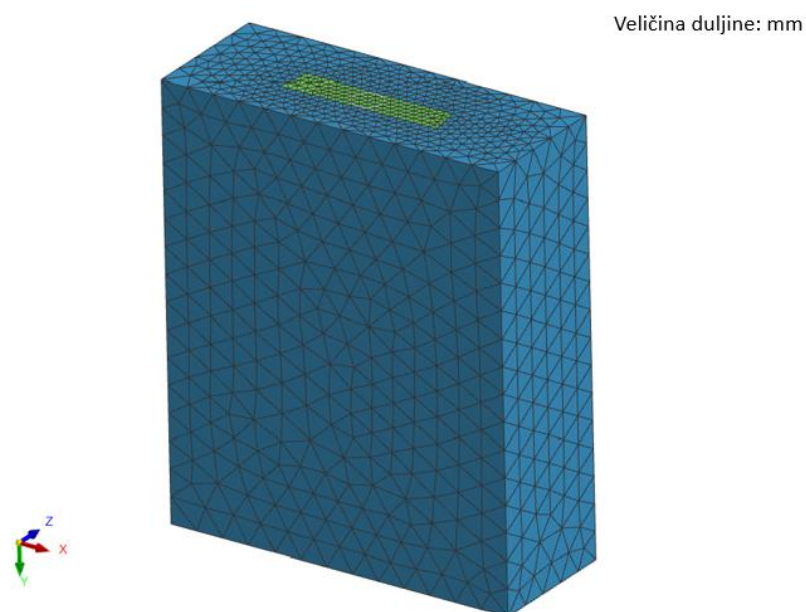
6.3. Simulacija lijevanja i skrućivanja

Nakon učitavanja STL datoteke u ProCAST softver dobivene su trokutaste mreže konačnih elemenata za odljevak i kokilu. Trokutasta mreža konačnih elemenata za odljevak prikazana je na slici 21.



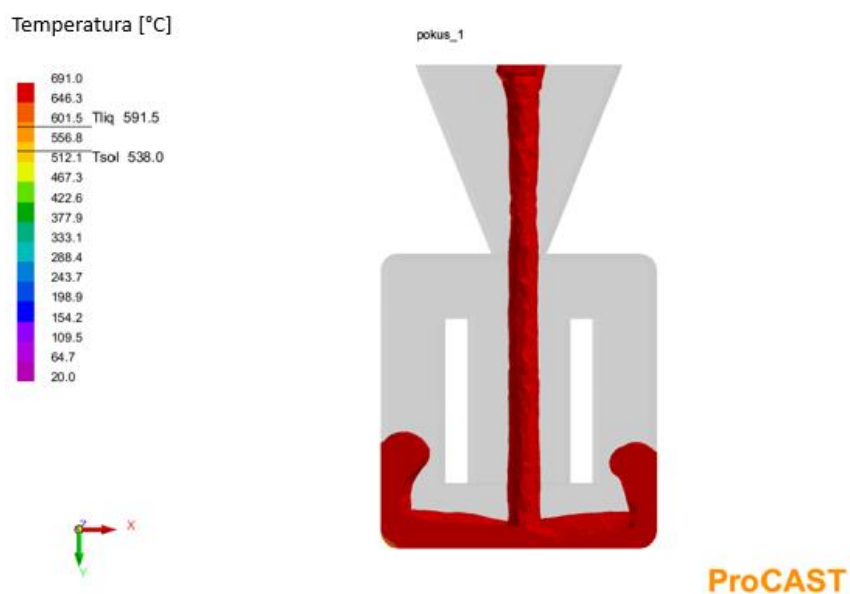
Slika 21. Trokutasta mreža konačnih elemenata odljevka

Na slici 22. prikazana je trokutasta mreža konačnih elemenata kokile.

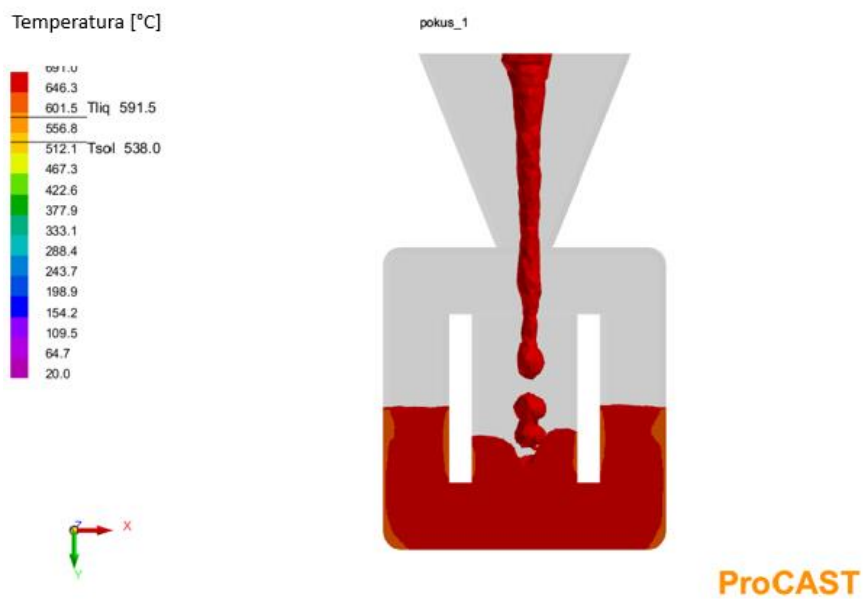


Slika 22. Trokutasta mreža konačnih elemenata kokile

Nakon što je izrađena mreža i provjerena njena ispravnost dodan joj je volumen, budući da je do ovog koraka mreža bila „šuplja“. U sljedećem koraku odabran je materijal, od kojeg je izrađena kokila, te legura od koje će biti izrađen odljevak. Zatim je bilo potrebno unijeti parametre lijevanja i simulacija je mogla biti pokrenuta. Na slikama 23.-26. prikazane su simulirane faze punjenja kokile za vrijednosti parametara lijevanja Pokus 1, legure AlSi9Cu3.



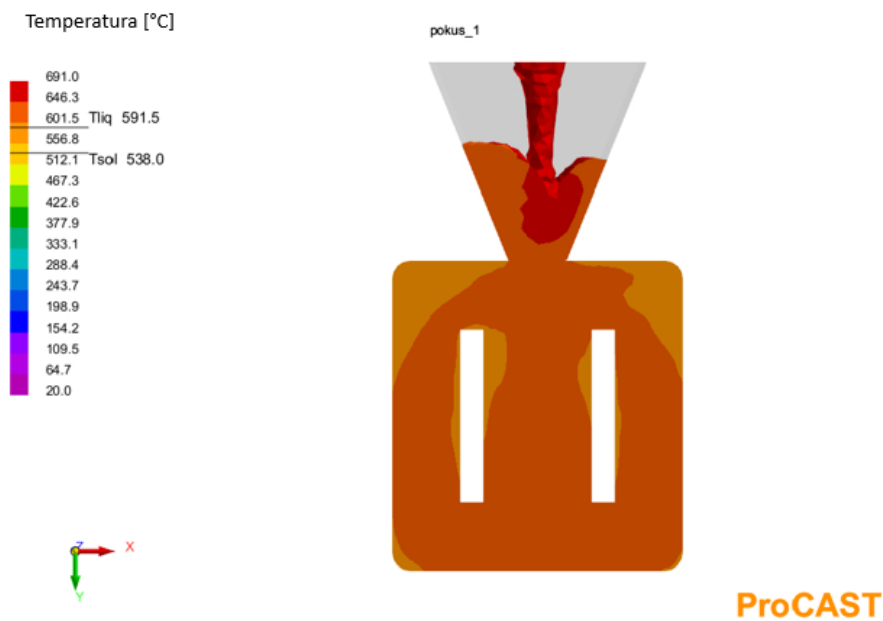
Slika 23. Početak punjenja kokile



Slika 24. Talina postupno ispunjuje kokilu

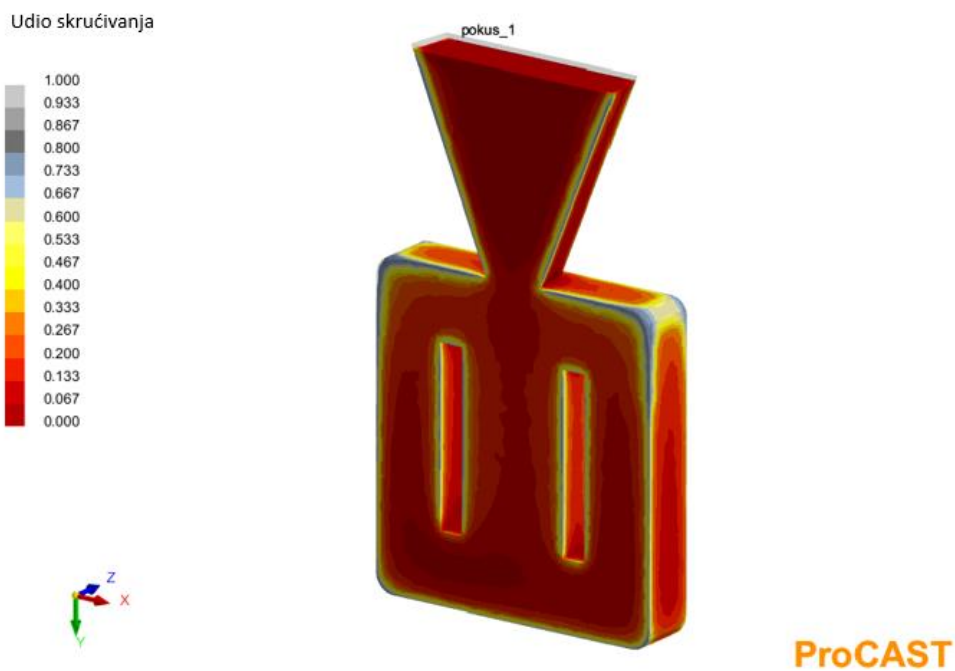


Slika 25. Nastavak punjenja kokile i početak hlađenja taline



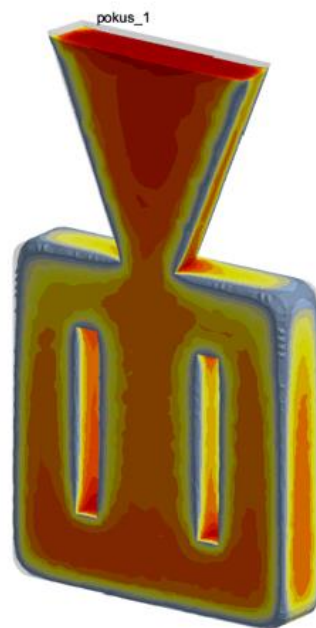
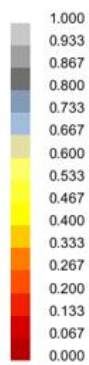
Slika 26. Ispunjenje kalupne šupljine i punjenje uljevnog sustava

Nakon simulacije punjenja kokile započeta je simulacija skrućivanja taline unutar kokile. Također, promatran je slučaj Pokus 1, legure AlSi9Cu3. Na slikama 27.-30. je prikazan proces skrućivanja taline, od prestanka punjenja kokile do gotovo potpunog skrućivanja odljevka..



Slika 27. Početak skrućivanja taline

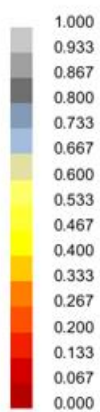
Udio skrućivanja



ProCAST

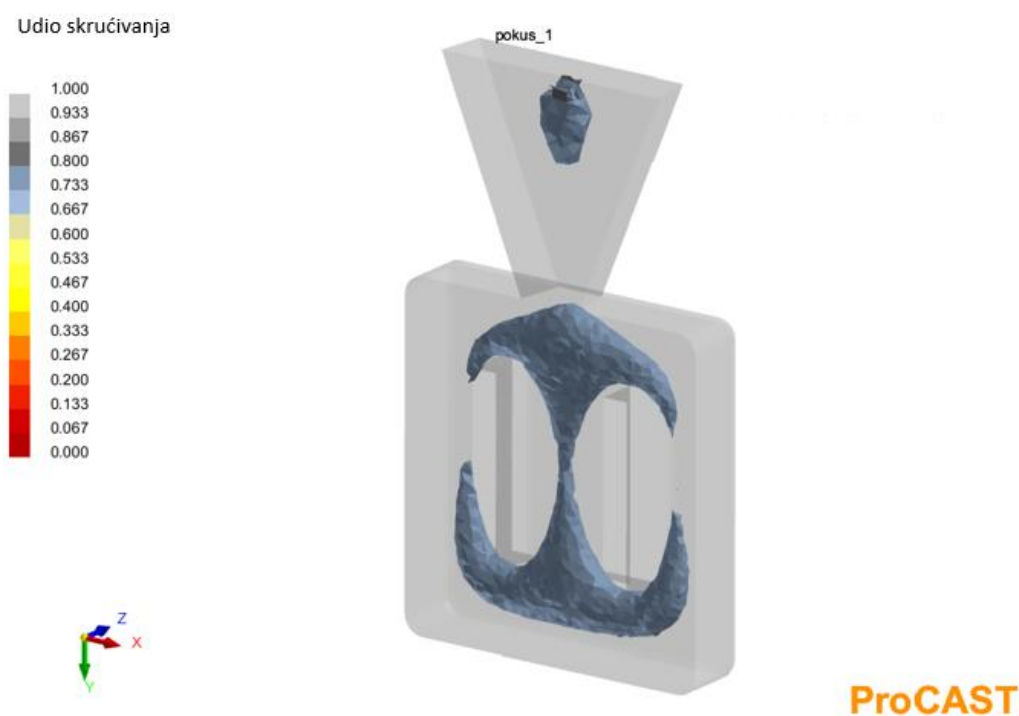
Slika 28. Postepeno skrućivanje taline

Udio skrućivanja



ProCAST

Slika 29. Potpuno skrućivanje rubnih dijelova taline

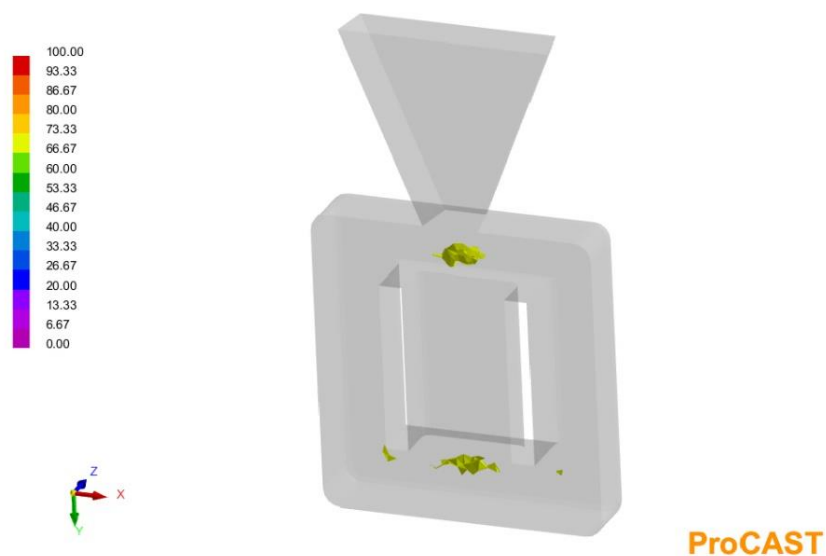


Slika 30. Potpuno skrućivanje većine taline

Nakon simulacije skrućivanja taline promatrana je mogućnost pojave poroznosti u odljevku. Za promatrani slučaj, Pokus 1 legure AlSi12, mogućnost i mjesta pojave poroznosti u odljevku prikazane su na slici 31., dok je volumen nastale poroznosti pri vjerojatnosti većoj od 50% prikazan na slici 32.



Slika 31. Vjerojatnost i mjesta pojave poroznosti u odljevku



Slika 32. Volumen poroznosti pri vjerojatnosti većoj od 50%

6.4. Rezultati simulacije

Nakon završetka simulacije lijevanja i skrućivanja dobiveni su rezultati vremena do skrućivanja i volumena poroznosti. Uzeti su u obzir volumeni poroznosti pri vjerojatnosti većoj od 50 %. Volumeni poroznosti izmjereni su pomoću softvera ProCAST.

6.4.1. Rezultati simulacije lijevanja za aluminijsku leguru AlSi12

U tablici 4. prikazani su rezultati vremena do skrućivanja i volumena poroznosti za leguru AlSi12.

Tablica 4. Rezultati simulacije za leguru AlSi12

Temperatura predgrijavanja kokile [°C]	Temperatura lijevanja [°C]	Vrijeme do skrućivanja [s]	Volumen poroznosti [cm ³]
100	672	8,057	0,6
200	722	14,97	0,78
200	672	13,40	0,68
100	722	9,449	0,72

Analiza utjecaja temperature predgrijavanja kalupa i temperature lijevanja na vrijeme do skrućivanja i pojavu poroznosti u odljevku provedena je korištenjem ANOVA modula za analizu varijance u Design Expert software-u. Korištena je ANOVA analiza kako bi se precizno odredila ovisnost zavisne o nezavisnim varijablama. U tablici 5. prikazana je analiza varijance za odziv vremena do skrućivanja za leguru AlSi12.

Tablica 5. Analiza varijance za odziv vremena do skrućivanja za leguru AlSi12

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Varijabla P	
Model	31,70	2	15,85	2001,01	0,0158	značajan
A- Temperatura predgrijavanja kokile	29,51	1	29,51	3725,11	0,0104	
B- Temperatura lijevanja	2,19	1	2,19	276,90	0,0382	
Pogreška	0,0079	1	0,0079			
Ukupno	31,71	3				

Vrijednost varijable F od 2001,01 ukazuje da je model značajan. Postoji samo 1,58% vjerojatnosti da bi F-vrijednost ove veličine mogla nastati zbog šuma.

Vrijednosti varijable P manje od 0,0500 ukazuju na značajne parametre. U ovom slučaju se vidi da parametar A, temperatura predgrijavanja kokile, najviše utječe na vrijeme do skrućivanja.

Tablica 6. pokazuje statističke karakteristike modela odziva vremena do skrućivanja legure AlSi12.

Tablica 6. Statističke karakteristike modela odziva vremena do skrućivanja legure AlSi12

Standardna devijacija	0,0890
Aritmetička sredina	11,47
Koeficijent determinacije (R^2)	0,9998

Što je koeficijent determinacije bliži jedinici, model je reprezentativniji. Zaključak analize je da temperatura predgrijavanja kokile ima najveći utjecaj na vrijeme do skrućivanja. U tablici 7. prikazani su udjeli pojedinih parametara u vremenu do skrućivanja.

Tablica 7. Udjeli parametara lijevanja u vremenu do skrućivanja legure AlSi12

Faktor	Udio u vremenu do skrućivanja (s)
A- Temperatura predgrijavanja kokile	2,716
B- Temperatura lijevanja	0,7405

Regresijska jednadžba odziva izražena preko označenih faktora:

$$y = 11,469 + 2,716 \times A + 0,7405 \times B$$

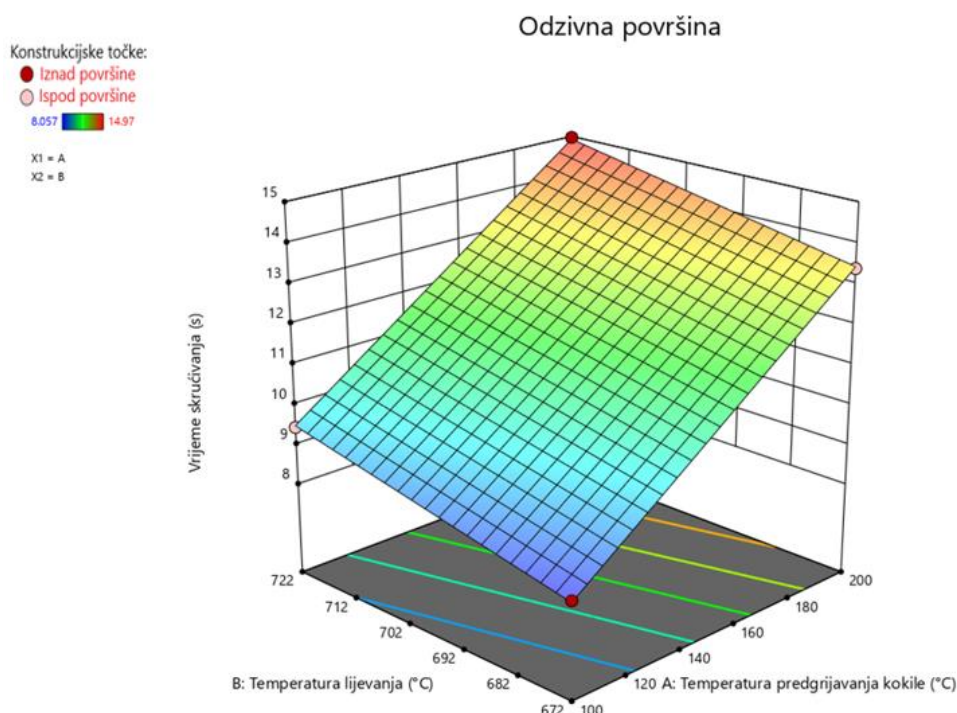
Ova jednadžba nam govori o utjecaju faktora na odziv i služi nam za predviđanje iznosa odziva s obzirom na iznose ulaznih faktora.

Regresijska jednadžba odziva izražena preko stvarnih faktora:

$$y = -17,3241 + 0,05432 \times A + 0,02962 \times B$$

Pošto su vrijednosti izražene u stvarnim mjernim jedinicama, na temelju ovog oblika regresijske jednadžbe konstruiraju se odzivne površine. Odzivne površine služe za vizualan, 3D, prikaz utjecaja faktora na odziv.

Slika 33. prikazuje odzivnu površinu vremena do skrućivanja legure AlSi12 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B-Temperatura lijevanja.



Slika 33. Odzivna površina vremena do skrućivanja legure AlSi12 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja

U tablici 8. prikazani su rezultati analize varijance za pojavu poroznosti kod legure AlSi12.

Tablica 8. Rezultati analize varijance za pojavu poroznosti kod legure AlSi12

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Varijabla P	
Model	0,0170	2	0,0085	85,00	0,0765	nije značajan
A- Temperatura predgrijavanja kokile	0,0049	1	0,0049	49,00	0,0903	
B- Temperatura lijevanja	0,0121	1	0,0121	121,00	0,0577	
Pogreška	0,0001	1	0,0001			
Ukupno	0,0171	3				

Budući da je vrijednost P varijable veća od 0,05 nema značajnih parametara, tj. model nije značajan. Međutim, rezultati analize su valjani te se može istražiti utjecaj parametara na mogućnost pojave poroznosti.

Tablica 9. pokazuje statističke karakteristike modela odziva pojave poroznosti legure AlSi12.

Tablica 9. Statističke karakteristike modela odziva pojave poroznosti legure AlSi12

Standardna devijacija	0,0100
Aritmetička sredina	0,6950
Koeficijent determinacije (R^2)	0,9942

Regresijska jednadžba odziva izražena preko označenih faktora:

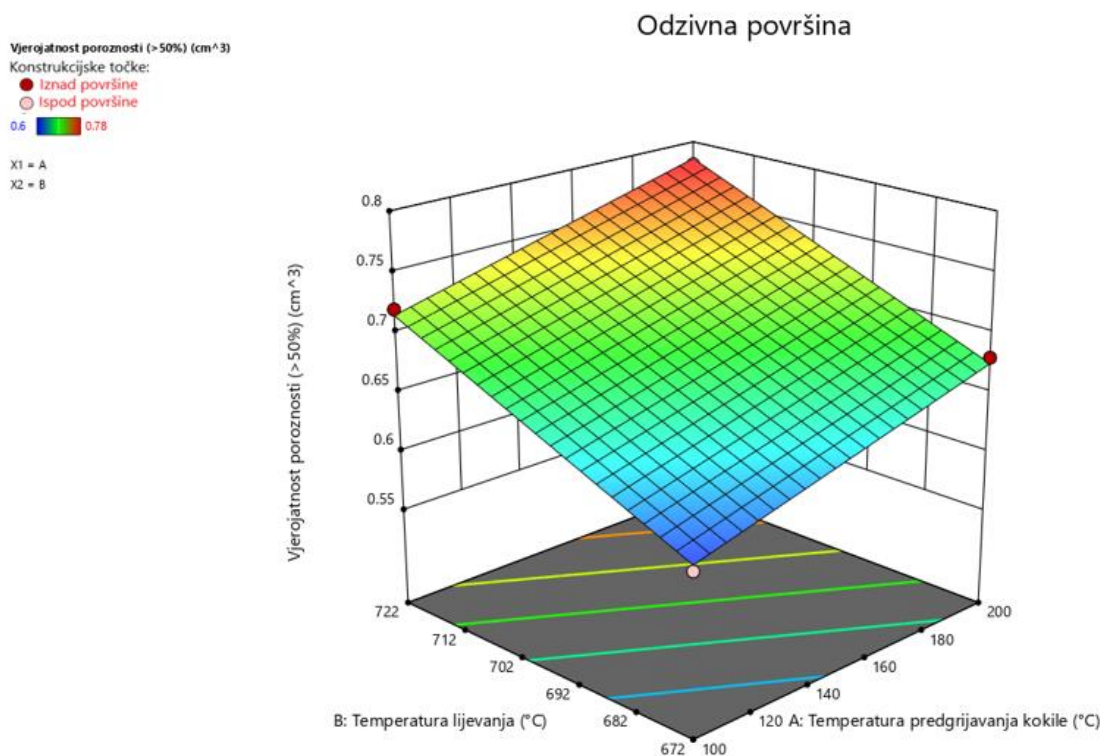
$$y = 0,695 + 0,035 \times A + 0,055 \times B$$

Iz regresijske jednadžbe odziva preko označenih faktora vidi se da temperatura lijevanja utječe više nego temperatura predgrijavanja kokile, na mogućnost pojave poroznosti.

Regresijska jednadžba odziva izražena preko stvarnih faktora:

$$y = -0,9434 + 0,0007 \times A + 0,0022 \times B$$

Slika 34. prikazuje odzivnu površinu volumena nastale poroznosti (pri vjerojatnosti većoj od 50%) legure AlSi12 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja.



Slika 34. Odzivna površina volumena nastale poroznosti legure AlSi12 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja

6.4.2. Rezultati simulacije lijevanja aluminijske legure AlSi9Cu3

Kao i kod legure AlSi12, analiza utjecaja temperature predgrijavanja kalupa i temperature lijevanja na vrijeme do skrućivanja i pojavu poroznosti u odljevku provedena je korištenjem ANOVA modula za analizu varijance u Design Expert software-u. U tablici 10. prikazani su rezultati vremena do skrućivanja i volumena poroznosti za leguru AlSi9Cu3.

Tablica 10. Rezultati simulacije za leguru AlSi9Cu3

Temperatura predgrijavanja kokile [°C]	Temperatura lijevanja [°C]	Vrijeme do skrućivanja [s]	Volumen poroznosti [cm ³]
200	691	19,11	0,87
100	741	14,85	0,91
100	691	14,46	0,82
200	741	19,77	0,62

U tablici 10. vidi se, da je dobivena mala razlika u vremenu do skrućivanja za različite temperature lijevanja pri istoj temperaturi predgrijavanja kokile. Također, pri temperaturi predgrijavanja kokile 200 °C i temperaturi lijevanja 741 °C volumen poroznosti bi trebao biti veći, u usporedbi s ostalim slučajevima. Ovo odstupanje može se pripisati grešci unutar simulacije.

U tablici 11. prikazana je analiza varijance za odziv vremena do skrućivanja za leguru AlSi9Cu3.

Tablica 11. Analiza varijance za odziv vremena do skrućivanja za leguru AlSi9Cu3

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Varijabla P	
Model	23,17	2	11,59	635,72	0,0280	značajan
A- Temperatura predgrijavanja kokile	22,90	1	22,90	1256,31	0,0180	
B- Temperatura lijevanja	0,2756	1	0,2756	15,12	0,1602	
Pogreška	0,0182	1	0,0182			
Ukupno	23,19	3				

Vrijednost varijable F od 635,72 ukazuje da je model značajan. Postoji samo 2,8% vjerojatnosti da bi F-vrijednost ove veličine mogla nastati zbog šuma.

Vrijednosti varijable P manje od 0,0500 ukazuju na značajne parametre. U ovom slučaju se vidi da parametar A, temperatura predgrijavanja kokile, najviše utječe na vrijeme do skrućivanja. Parametar B, temperatura lijevanja, nije značajan.

Tablica 12. pokazuje statističke karakteristike modela odziva vremena do skrućivanja za leguru AlSi9Cu3.

Tablica 12. Statističke karakteristike modela odziva vremena do skrućivanja za leguru AlSi9Cu3

Standardna devijacija	0,1350
Aritmetička sredina	17,05
Koeficijent determinacije (R^2)	0,9992

Što je koeficijent determinacije bliži jedinici, model je reprezentativniji. Zaključak analize je da faktor A ima najveći utjecaj na vrijeme do skrućivanja. U tablici 13. prikazani su udjeli pojedinih parametara u vremenu do skrućivanja.

Tablica 13. Udjeli parametara lijevanja u vremenu do skrućivanja legure AlSi9Cu3

Faktor	Udio u vremenu do skrućivanja (s)
A- Temperatura predgrijavanja kokile	2,3925
B- Temperatura lijevanja	0,2625

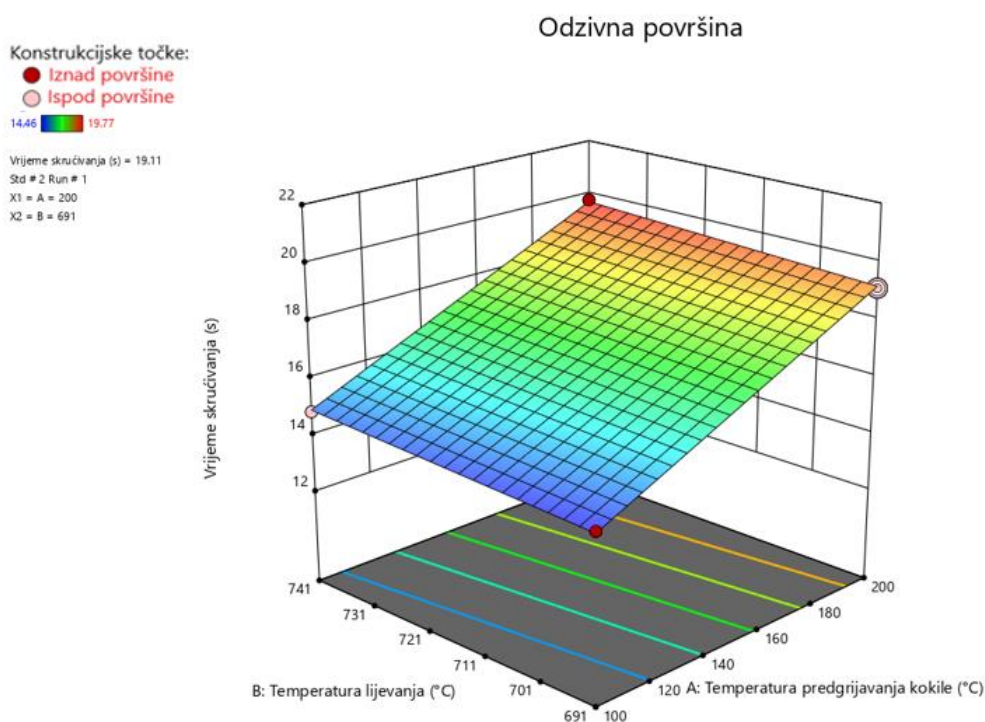
Regresijska jednadžba odziva izražena preko označenih faktora:

$$y = 17,0475 + 2,3925 \times A + 0,2625 \times B$$

Regresijska jednadžba odziva izražena preko stvarnih faktora:

$$y = 2,352 + 0,04785 \times A + 0,0105 \times B$$

Slika 35. prikazuje odzivnu površinu vremena do skrućivanja legure AlSi9Cu3 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B-Temperatura lijevanja



Slika 35. Odzivna površina vremena do skrućivanja legure AlSi9Cu3 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja

U tablici 14. prikazani su rezultati analize varijance za pojavu poroznosti kod legure AlSi9Cu3.

Tablica 14. Rezultati analize varijance za pojavu poroznosti za leguru AlSi9Cu3

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Varijabla P	
Model	0,0433	2	0,0216	3,38	0,3588	nije značajan
A- Temperatura predgrijavanja kokile	0,0144	1	0,0144	2,25	0,3743	
B- Temperatura lijevanja	0,0289	1	0,0289	4,52	0,2800	
Pogreška	0,0064	1	0,0064			
Ukupno	0,0497	3				

Budući da je vrijednost P varijable veća od 0,05 nema značajnih parametara, tj. model nije značajan. Međutim, rezultati su valjani te se može istražiti utjecaj parametara na mogućost pojave poroznosti.

Tablica 15. pokazuje statističke karakteristike modela pojave poroznosti legure AlSi9Cu3.

Tablica 15. Statističke karakteristike modela pojave poroznosti legure AlSi9Cu3

Standardna devijacija	0,0800
Aritmetička sredina	0,8050
Koeficijent determinacije (R^2)	0,8712

Koeficijent determinacije u ovom slučaju iznosi 0,87, no to ne znači da model ne prikazuje dobru statističku karakteristiku. Model prikazuje dobru statističku karakteristiku, ali pokazuje manju reprezentativnost od drugih slučajeva gdje je koeficijent determinacije veći od 0,99.

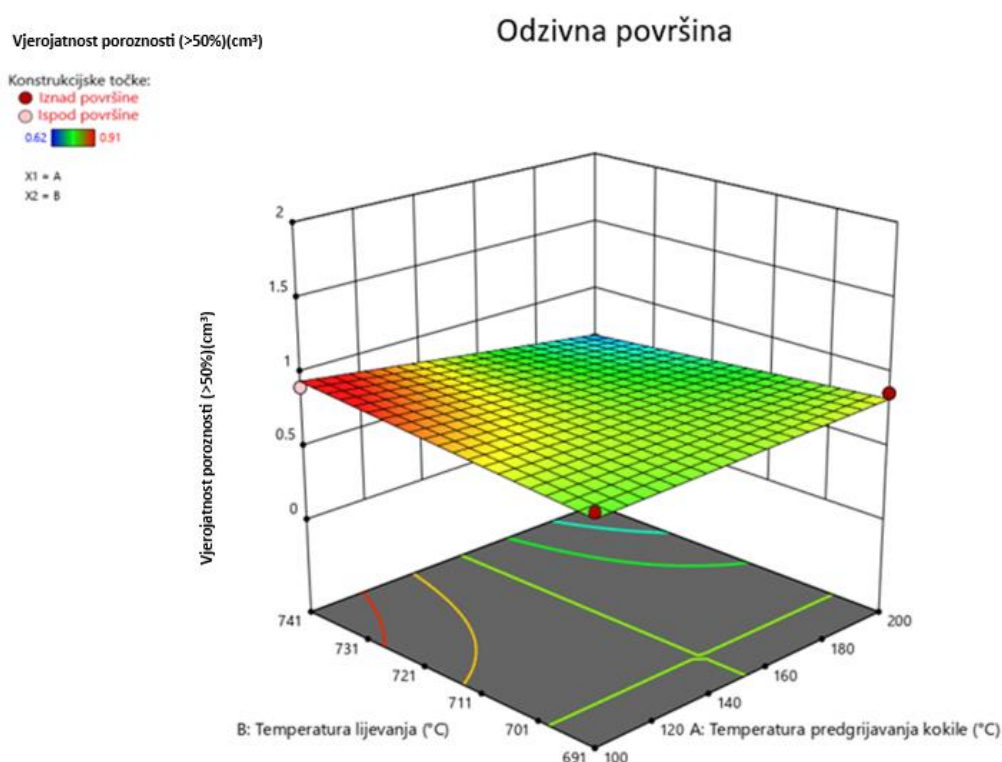
Regresijska jednadžba odziva izražena preko označenih faktora:

$$y = 0,805 \pm 0,06 \times A \pm 0,085 \times B$$

Regresijska jednadžba odziva izražena preko označenih faktora govori da temperatura lijevanja utječe više na pojavu poroznosti, od temperature predgrijavanja kokile.

Zbog koeficijenta determinacije manjeg od 0,99 softver nije konstruirao regresijsku jednadžbu odziva izraženu preko stvarnih faktora.

Slika 36. prikazuje odzivnu površinu volumena nastale poroznosti (pri vjerojatnosti većoj od 50%) legure AlSi9Cu3 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja.



Slika 36. Odzivna površina volumena nastale poroznosti legure AlSi9Cu3 s faktorima A- Temperatura predgrijavanja kokile i B- Temperatura lijevanja

6.5. Eksperimentalno lijevanje aluminijske legure AlSi12

Kokilni lijev i usporedba rezultata simulacije i stvarnog stanja, provedeni su na aluminijskoj leguri AlSi12.

6.5.1. Priprema taline i kokile za lijev

Prije lijevanja bilo je potrebno pripremiti kokilu i talinu. Odabrane temperature zagrijavanja kokile i taline prikazane su u tablici 16.

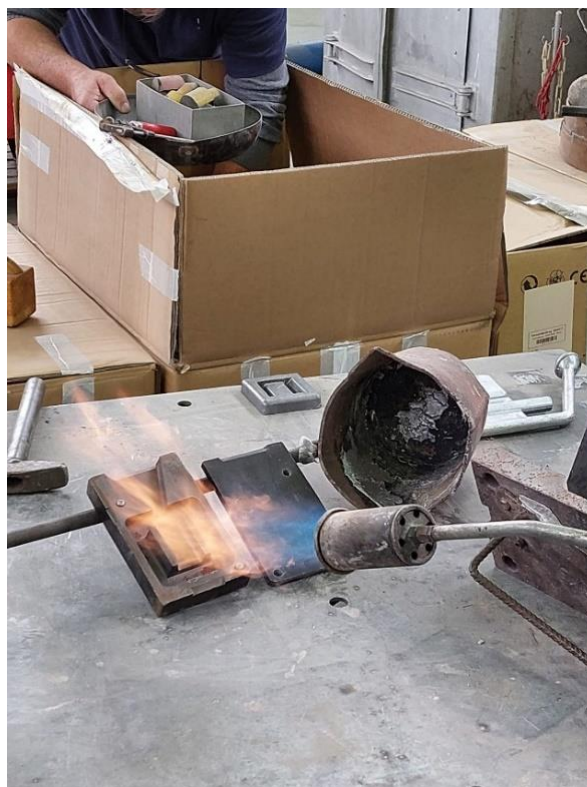
Tablica 16. Potrebne temperature zagrijavanja kokile i taline

Temperatura predgrijavanja kokile [°C]	Temperatura lijevanja [°C]
100	672

Kokila je izrađena od čelika za topli rad i sastoji se od 2 dijela. Poklopca i dijela u kojem se nalazi kalupna šupljina. Kokila u kojoj se izvodilo lijevanje prikazana je na slici 37.

**Slika 37. Kokila korištena za lijevanje**

Prije početka lijevanja, bilo je potrebno kokilu i talinu zagrijati na potrebnu temperaturu. Zagrijavanje kokile je izvedeno plinskim plamenom, kako je prikazano na slici 38.



Slika 38. Zagrijavanje kokile na potrebnu temperaturu

Postignuta temperatura kokile prikazana je na slici 39.



Slika 39. Postignuta temperatura kokile

Aluminijska legura AlSi12 bila je zagrijavana u elektrootpornoj peći za taljenje metala, prikazanoj na slici 40.



Slika 40. Elektrootporna peć za taljenje metala

Prije početka lijevanja bilo je potrebno skinuti okside i nečistoće s površine taline, prikazano na slici 41., te postići potrebnu temperaturu za lijevanje, prikazano na slici 42.



Slika 41. Skidanje oksida i nečistoće s površine taline



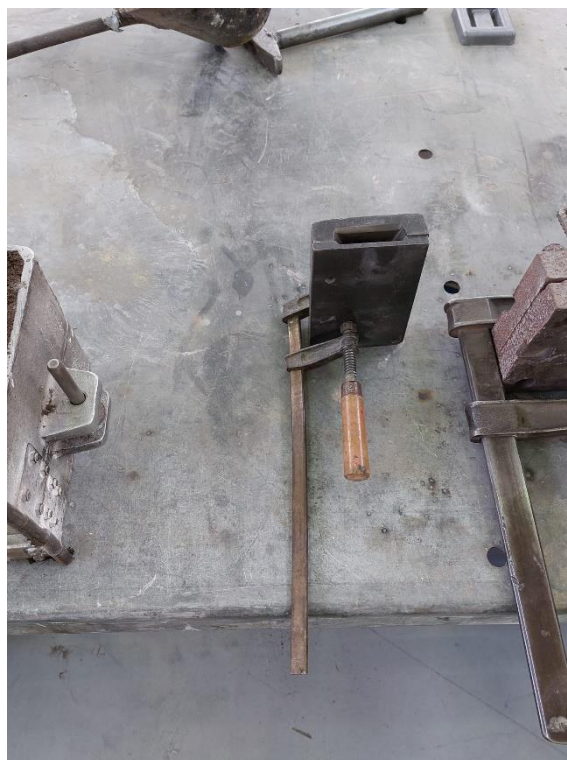
Slika 42. Postignuta temperatura taline u peći

6.5.2. Lijevanje aluminijske legure AlSi12

Nakon obavljene pripreme kokile i taline te postignutih potrebnih temperatura, moglo se početi s postupkom lijevanja. Lijevanje je izvedeno ručno, pomoću lonca za lijevanje u koji je izlivena talina, prikazano na slici 43. Na slici 44. je prikazana kokila spremna za lijevanje.



Slika 43. Ulijevanje taline iz peći u lonac za lijevanje



Slika 44. Kokila spremna za lijevanje

Talina je od peći do kokile bila prenesena ručno u loncu za lijevanje, prethodno zagrijanom plinskim plamenom. Punjenje kokile talinom prikazano je na slici 45., dok slika 46. prikazuje skrućivanje i hlađenje taline unutar kokile.



Slika 45. Punjenje kokile talinom



Slika 46. Skrućivanje i hlađenje taline unutar kokile

Nakon što se talina skrutila i ohladila, kokila je otvorena i odljevak je izvađen. Slika 47. prikazuje otvaranje kokile, a na slici 48. se može vidjeti otvorena kokila s odljevkom.

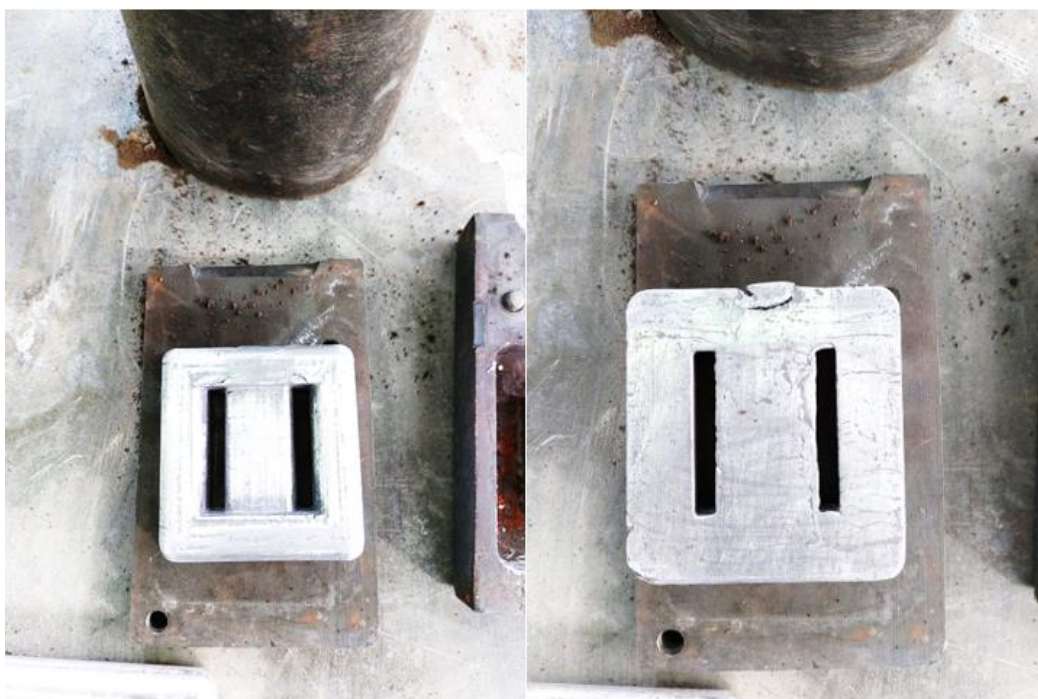


Slika 47. Otvaranje kokile



Slika 48. Otvorena kokila s odljevkom

Nakon otvaranja kokile i vađenja odljevka odvojen je uljevni sustav te je dobiven konačni proizvod, uteg od aluminijske legure. Odliveni uteg od aluminijske legure prikazan je na slici 49.



Slika 49. Odliveni uteg od aluminijske legure

Naknadno je provjeren kemijski sastav odljevka pomoću XRF metode, prikazano na slici 50. Kemijski sastav odljevka dan je u tablici 17. Provjera je napravljena na drugom odljevku odlivenom od iste taline iz peći.



Slika 50. Mjerenje kemijskog sastava odljevka XRF metodom

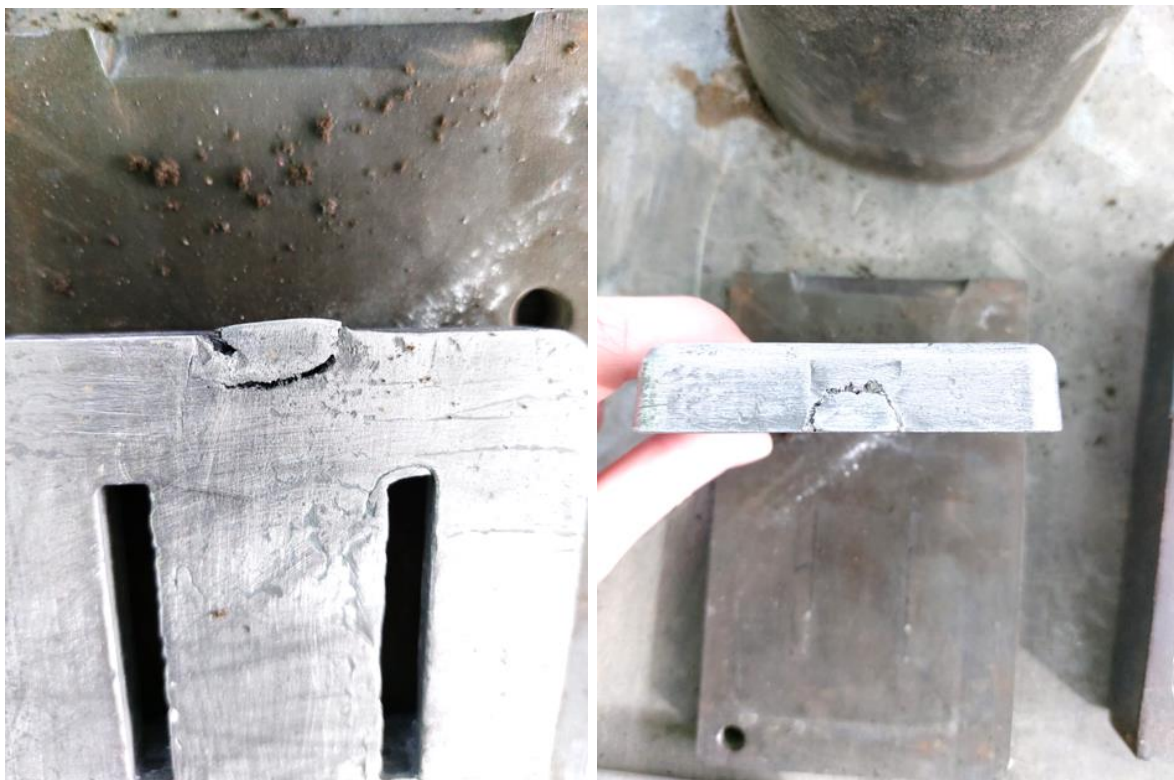
Tablica 17. Kemijski sastav odljevka

Kemijski sastav mas. %							
Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Al
0,85	14,42	0,08	0,43	0,25	0,145	0,076	83,749

Sadržaj silicija malo je veći od normom predviđenog za eutektičku leguru AlSi12, a udjeli magnezija, bakra, cinka i olova također su viši od dozvoljenog. Legura koja je lijevana razlikuje se od čiste AlSi12, koja je korištena za simulaciju.

7. ANALIZA REZULTATA

- Dobiveni rezultati vremena do skrućivanja i volumena poroznosti govore da je prosječno vrijeme do skrućivanja manje kod legure AlSi12, nego kod legure AlSi9Cu3. Također, izmjereni volumen nastale poroznosti je manji kod legure AlSi12, nego kod legure AlSi9Cu3.
- Rezultati ANOVA analize odziva vremena do skrućivanja za leguru AlSi12 govore da temperatura predgrijavanja kokile ima veći utjecaj na vrijeme do skrućivanja, u odnosu na temperaturu lijevanja.
- Rezultati ANOVA analize odziva vjerojatnosti pojave poroznosti kod legure AlSi12 pokazuju da temperatura lijevanja ima veći utjecaj na pojavu poroznosti, nego temperatura predgrijavanja kokile.
- Rezultati ANOVA analize odziva vremena do skrućivanja za leguru AlSi9Cu3 govore da, kao i kod legure AlSi12, temperatura predgrijavanja kokile ima veći utjecaj na vrijeme do skrućivanja, nego temperatura lijevanja.
- Rezultati ANOVA analize odziva vjerojatnosti pojave poroznosti kod legure AlSi9Cu3 govore da, kao i kod legure AlSi12, temperatura lijevanja ima veći utjecaj na pojavu poroznosti, u odnosu na temperaturu predgrijavanja kokile.
- Simulacija je predvidjela pojavu poroznosti u obje legure. Predviđena mjesta pojave poroznosti su bila ista za obje legure.
- Simulacija je precizno predvidjela mjesta na odljevku na kojima bi moglo doći do pojave poroznosti. Usporedba predviđenih i stvarnih mjesta pojave poroznosti na odljevku prikazana je na slici 51.



Slika 51. Usporedba predviđenih i stvarnih mjesta pojave poroznosti na odljevku

8. ZAKLJUČAK

Mogućnost široke primjene i postizanja odličnih mehaničkih svojstava čine aluminij i njegove legure jednim od najkorištenijih konstrukcijskih materijala. Od najjednostavnijih do vrlo složenih, aluminijski odljevci su, gotovo, neizostavan dio svake proizvodne industrije. Brojne prednosti proizvodnje lijevanjem dodatno su unaprijeđene napretkom tehnologije i računalno potpomognutog inženjerstva. Razvojem softvera za simulaciju procesa lijevanja smanjeni su troškovi i vrijeme proizvodnje, greške koje se mogu dogoditi tijekom lijevanja te je povećana kvaliteta proizvoda, na zadovoljstvo kupaca. Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je provjeriti ovisnosti vremena do skrućivanja i pojave poroznosti, o temperaturi predgrijavanja kokile i temperaturi lijevanja. Promatrane su aluminijske legure AlSi12 i AlSi9Cu3. Eksperimentalnim radom je utvrđeno da legura AlSi12 ima manje prosječno vrijeme do skrućivanja, nego legura AlSi9Cu3. Izmjereni volumen nastale poroznosti je manji kod legure AlSi12, nego kod legure AlSi9Cu3. Kod obje legure parametar koji najviše utječe na vrijeme do skrućivanja je temperatura predgrijavanja kokile. Što se tiče pojave poroznosti, u oba slučaja se temperatura lijevanja pokazala kao najutjecajniji parametar. Simulacijom je predviđena pojava poroznosti kod obje legure, na istim mjestima. Usporedbom predviđenih mjesta pojave poroznosti i mjesta na kojima je došlo do poroznosti na stvarnom odljevku, može se zaključiti da je simulacija precizno predvidjela ishod.

LITERATURA

- [1] Karl B. Rundman: Metal casting, Michigan Tech. University, 2000.
- [2] <https://casttechnologies.net/casting-industries/>, pristupljeno travanj 2023.
- [3] <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/05/18/2445819/28124/en/Global-Metal-Casting-Market-Report-2022-to-2027-Industry-Trends-Share-Size-Growth-Opportunity-and-Forecasts.html>, pristupljeno travanj 2023.
- [4] <https://www.datamintelligence.com/research-report/metal-casting-market>, pristupljeno travanj 2023.
- [5] <https://precisecast.com/advantages-of-metal-castings/>, pristupljeno travanj 2023.
- [6] https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/metal-casting/#Advantages_and_disadvantages_of_metal_casting, pristupljeno travanj 2023.
- [7] <https://yijinsolution.com/news-blog/comprehensive-guide-to-cast-aluminum/>, pristupljeno studeni 2023.
- [8] [Aluminum Die Casting: A Comprehensive Guide on Die-Cast Aluminum Process \(rapiddirect.com\)](#), pristupljeno studeni 2023.
- [9] <https://www.iqsdirectory.com/articles/die-casting/aluminum-casting.html#:~:text=Conclusion-.Aluminum%20casting%20is%20a%20method%20for%20producing%20high%20tolerance%20and,is%20removed%20from%20the%20mold.>, pristupljeno studeni 2023.
- [10] Roger Lumley: Fundamentals of aluminium metallurgy, Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [11] <https://www.gabrian.com/what-is-aluminum-die-casting/>, pristupljeno studeni 2023.
- [12] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sunrise-metal.com%2Faluminum-pressure-die-casting%2F&psig=AOvVaw1V_x60RVkENCCG7cZ7_7Wd&ust=1699099023646000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CA8QjRxqFwoTCLD8wKDjp4IDFQAAAAAdAAAAABAQ, pristupljeno studeni 2023.
- [13] <https://www.gabrian.com/what-is-aluminum-die-casting/#:~:text=A%20few%20of%20the%20most,very%20good%20fluidity%20when%20molten.>, pristupljeno studeni 2023.

- [14] <https://vietnamcastiron.com/aluminum-casting-process/#:~:text=Aluminum%20Centrifugal%20casting%20is%20the,is%20poured%20into%20the%20mold.> , pristupljeno studeni 2023.
- [15] <https://omnidexcastings.com/permanent-mold-gravity-casting/>, pristupljeno travanj 2023.
- [16] <https://www.weld2cast.com/gravity-die-casting/>, pristupljeno travanj 2023.
- [17] <https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/11/aam-manufacturing-1-casting-methods.pdf>, pristupljeno travanj 2023.
- [18] <http://aluminiumgravitycasting.com/aluminium%20gravity%20casting%20and%20mold%20design.html>, pristupljeno travanj 2023.
- [19] <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/die-casting-molds/>, pristupljeno travanj 2023.
- [20] <https://www.lupton-place.co.uk/news/die-casting-process/>, pristupljeno travanj 2023.
- [21] <https://oeform.com/aluminium-gravity-die-casting-step-by-step-process-animation/>, pristupljeno travanj 2023.
- [22] <https://www.investmentcastchina.com/gravity-die-casting-advantages-and-disadvantages/>, pristupljeno travanj 2023.
- [23] <https://www.3erp.com/blog/die-casting-materials-when-to-use-them/>, pristupljeno travanj 2023.
- [24] <https://www.sunrise-metal.com/aluminum-alloy-alsi12>, pristupljeno travanj 2023
- [25] <http://www.alutech.si/en/aluminium-alloy-gravity-casting/>, pristupljeno travanj 2023.
- [26] <https://www.sunrise-metal.com/aluminum-alloy-alsi9cu3>, pristupljeno travanj 2023
- [27] Hurtalová, L., Tillová, E., Chalupová, M. (2013) "Effect of heat treatment on fracture surfaces in recycled aluminium cast alloy", *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 41(2), pp. 117–122.
- [28] S. Ferhathullah Hussainy, M. Viquar Mohiuddin, P. Laxminarayana, A. Krishnaiah, S. Sundarajan: A practical approach to eliminate defects in gravity die cast Al-alloy casting using simulation software, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2015.
- [29] <https://blog.transvalorusa.com/articles/best-casting-simulation-software>, pristupljeno travanj 2023.
- [30] <https://bajrangengineering.in/types-of-casting-defects/>, pristupljeno travanj 2023.
- [31] <http://www.amozeshcatia.ir/pdf/casting-brochure.pdf>, pristupljeno travanj 2023.

-
- [32] <https://www.esi-group.com/products/procast/die-casting-simulation>, pristupljeno studeni 2023
- [33] <https://www.zhycasting.com/introduction-to-casting-simulation-software-procast/>, pristupljeno studeni 2023
- [34] <https://www.esi-group.com/products/procast>, pristupljeno studeni 2023.
- [35] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fm.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3Ddnb69TM7z4w&psig=AOvVaw1CqH9cDqV_9MUSF3Ou0s4z&ust=1699206217958000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CA8QjRxqFwoTCKjQs8zyqoIDFQAAAAAdAAAAABAr, pristupljeno studeni 2023