

# Simulacija tlačnog lijevanja sapnice od aluminijske legure

---

Čulek, Kristian

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*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:235:271268>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-21**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Kristian Čulek**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Kristian Čulek

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru na savjetima i stručnom znanju koje je pružio tijekom izrade diplomskog rada kao i asistentu Karlu Jurkoviću mag. ing. mech. na pomoći oko izrade simulacije u programu ProCAST.

U Zagrebu, 28. studeni. 2024.

Kristian Čulek



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: 28.11.2024	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 - 497	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Kristian Čulek** JMBAG: 0246074270

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija tlačnog lijevanja sapnice od aluminijske legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **High pressure die casting simulation of aluminium alloy nozzle**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju tlačnog lijevanja aluminijskih legura i prikupiti podatke o konstrukciji i izradi kalupa za tlačni ljev.

Za zadani odljevak, sapnicu od aluminijske legure, potrebno je konstruirati CAD model s uljevnim sustavom te napraviti simulaciju 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:

26. rujna 2024.

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

Predviđeni datumi obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. POVIJEST LJEVARSTVA .....	2
3. PODJELA LIJEVANJA .....	5
4. TLAČNO LIJEVANJE.....	8
5. POSTUPAK I VRSTE TLAČNOG LIJEVANJA.....	10
5.1. Postupak tlačnog lijevanja .....	10
5.1.1. Faze gibanja klipa.....	11
5.1.1.1. Prva faza.....	11
5.1.1.2. Druga faza.....	12
5.1.1.3. Treća faza.....	13
5.2. Vrste postupaka tlačnog lijevanja .....	13
5.2.1. Strojevi s toplom komorom za tlačni lijev .....	14
5.2.2. Tlačni lijev s hladnom komorom .....	16
6. GREŠKE KOD TLAČNIH ODLJEVAKA.....	19
6.1. Plinska poroznost .....	19
6.2. Srh.....	20

6.3. Nedolivenost odljevka.....	20
6.4. Uključci.....	21
6.5. Usahlina .....	22
6.6. Nestaljeno područje.....	23
6.7. Tople pukotine .....	23
7. LEGURE U UPORABI KOD TLAČNOG LIJEVA.....	25
7.1. Aluminijske legure .....	26
7.1.1. Al-Si legure .....	26
7.1.2. Al-Cu legure .....	27
7.1.3. Al-Si-Cu legure .....	27
7.1.4. Al-Mg legure .....	27
7.2. Legure cinka.....	28
7.3. Legure bakra .....	28
7.4. Legure magnezija .....	28
8. EKSPERIMENTALNI DIO .....	30
8.1. Proračun uljavnog sustava .....	31
8.2. Simulacija lijevanja u programu ProCAST .....	37
8.2.1. Priprema simulacije.....	38
8.2.2. Gibanje klipa i popunjavanje kalupne šupljine .....	39
8.2.3. Popunjavanje kalupne šupljine.....	41
8.2.4. Vrijeme skrućivanja .....	42
8.2.5. Udio krute faze .....	43
8.2.6. Poroznost na odljevku uslijed skupljanja .....	44
8.2.7. Zarobljeni zrak i oksidi .....	48
9. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	53

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Ilustracija lijevanja metala u 1870-ima [5] .....	3
Slika 2. Simulacija lijevanja, prikaz deformacije odljevka [6] .....	4
Slika 3. Presjek pješčanog kalupa [7].....	5
Slika 4. Osnovne značajke jednokratnih i trajnih kalupa [3] .....	6
Slika 5. Podjela postupaka lijevanja prema uljevnoj sili te vrsti kalupa i modela [2] .....	7
Slika 6. Radijator dobiven tlačnim lijevanjem [8] .....	8
Slika 7. Dijelovi automobila dobiveni tlačnim lijevanjem [9] .....	9
Slika 8. Faze gibanja hidrauličkog klipa tokom lijevanja [10] .....	10
Slika 9. a) Podkritična brzina, b) Nadkritična brzina, c) Kritična brzina klipa tokom lijevanja [11] .....	12
Slika 10. Koraci pri tlačnom lijevanju s toplom komorom: a) kalupna šupljina, b) pomična polovica kalupa, c) nepomična polovica kalupa, d) cilindar, e) klip za tlačenje, f) tlačna komora, g) sustav za ubrizgavanje, h) lonac, i) peć, j) spojna cijev, k) grijana mlaznica. [3].....	15
Slika 11. Stroj za tlačno lijevanje s hladnom komorom [14] .....	16
Slika 12. Koraci pri tlačnom lijevanju s hladnom komorom. [14].....	17
Slika 13. Krivulja gibanja klipa. [14] .....	18
Slika 14. Plinska poroznost kod odljevaka (tlačni lijev) [15] .....	19
Slika 15. Pojava greške srha [16] .....	20
Slika 16. Nedolivenost odljevka [3] .....	21
Slika 17. Tlačni aluminijski odljevak s oksidnim uključcima [15].....	21
Slika 18. Prikaz usahline nakon skrućivanja odljevka [3] .....	22
Slika 19. Usmjerenom skrućivanje odljevka[3] .....	22
Slika 20. Greška kod tlačnog lijevanja, hladni zavar [18] .....	23
Slika 21. Prikaz tople pukotine kod tlačnog lijevanja [17] .....	24



Slika 22. Dvije podjele lijevova na željezne i neželjezne legure[3].....	25
Slika 23. 3D model sapnice kreirane u SolidWorks-u .....	30
Slika 24. Gabariti sapnice.....	31
Slika 25. 3D model sapnice s preljevnim džepovima .....	33
Slika 26. 3D model sapnice s uljevnim sustavom, preljevnim džepovima i odzračnim kanalima .....	37
Slika 27. Model odljevka s generiranom mrežom u ProCASTU.....	38
Slika 28. Simulacija gibanja tlačnog klipa, podkritična brzina.....	39
Slika 29. Dijagram brzina-udaljenost tlačnog klipa .....	40
Slika 30. Simulacija gibanja tlačnog klipa, kritična brzina.....	40
Slika 31. Početno popunjavanje kalupne šupljine .....	41
Slika 32. Završno popunjavanje kalupne šupljine.....	42
Slika 33. Vrijeme potrebno za skrućivanje određenih dijelova sapnice .....	43
Slika 34. Udio krute faze – 4,5 % i 16,3 % .....	44
Slika 35. Udio krute faze – 20,5 % i 47,8 % .....	44
Slika 36. Presjek 1 - poroznost odljevka kod horizontalnog provrta .....	45
Slika 37. Presjek 2 - ne postojanje poroznosti .....	46
Slika 38. Presjek 3 - poroznost na diobenoj ravnini.....	47
Slika 39. Prikaz potencijalnih poroznosti sa vjerojatnošću javljanja većom od 50 %.....	48
Slika 40. Koncentracija oksida u odljevku.....	49
Slika 41. Prikaz zarobljenog zraka u taljevini.....	50

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
3D	-	3 dimenzije
$v_k$	m/s	Brzina klipa za tlačanje
$A_k$	m <sup>2</sup>	Površina klipa za tlačanje
$v_u$	m/s	Brzina taline u ušću
$A_u$	m <sup>2</sup>	Površina presjeka ušća
$h_k$	m	Visina taline u tlačnoj komori
$h_u$	m	Visina taline u ušću
$g$	m/s <sup>2</sup>	Ubrzanje zemljine sile teže
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća taline
$p_k$	Pa	Tlak u tlačnoj komori
$p_u$	Pa	Tlak u ušću
$\eta$	-	Koeficijent učinka taline s obzirom na otpor strujanju
$V_{uk}$	m <sup>3</sup>	Volumen kalupne šupljine i odljevnih džepova
$v$	m/s	Brzina taljevine
$q$	m <sup>3</sup> /s	Protok u ušću
$t$	s	Vrijeme punjenja kalupne šupljine
$V_p$	m <sup>3</sup>	Volumen preljevnih džepova

## **SAŽETAK**

U ovome radu dan je osvrt o povijesti lijevanja, kada je nastalo i kako se razvijalo kroz povijest. Zatim je navedena podjela postupaka lijevanja ovisno o vrsti kalupa i kako se vrši ulijevanje taljevine u kalupe. Nadalje su opisani bitni parametri, nužni za uspješnu provedbu lijevanja bez grešaka te koji su materijali najpogodniji za lijevanje i čemu koji legirni elementi pridonose.

Drugi dio rada se odnosio na postupak tlačnog lijevanja te je opisan tijekom kako se provodi lijevanje s pomoću ove tehnologije. Nadalje su bile objašnjene faze punjenja kalupne šupljine. Opisani su postupci tlačnog lijevanja s hladnom i toplom komorom te su navedeni prednosti i nedostaci. Zatim su opisane moguće greške koje se znaju pojaviti tijekom lijevanja i kako ih je moguće izbjeći.

U zadnjem dijelu ovoga rada provedena je eksperimentalna simulacija s pomoću softvera ProCAST kojim je simulirano lijevanje i skrućivanje sapnice pomoću postupka tlačnog lijevanja. Na kraju je dan osvrt o rezultatima simulacije lijevanja i opisano je kako bi se nastale greške mogle ukloniti.

Ključne riječi: tlačni lijev, sapnica, simulacija, SolidWorks, ProCAST

## **SUMMARY**

In this paper, an overview of the history of casting was provided, including its origins and development over time. The classification of casting methods based on the type of mould was also described. Furthermore, key parameters necessary for successful casting without defects were described, along with the materials best suited for casting and the specific contributions of alloying elements.

The second part of the paper focuses on the process of die casting, detailing the procedure involved in casting using this technology. The stages of mould cavity filling are explained, as well as the different types of die casting processes using cold and hot chambers, with the advantages and disadvantages of each. Additionally, potential defects that may occur during casting and methods to prevent them were described.

In the final part of the paper, an experimental simulation was conducted using ProCAST software to simulate the casting of a nozzle through the die casting process. Lastly, the results of the casting simulation were analysed and methods for eliminating the resulting defects were proposed.

Key words: die casting, nozzle, simulation, SolidWorks, ProCAST

## 1. UVOD

Lijevanje je jedan od najstarijih, ali i najčešće korištenih postupaka obrade metala. Primjenjuje se u gotovo svim granama industrije. Kako bi se dobio željeni odljevak postupkom lijevanja potrebno je konstruirati kalup za prihvat taljevine. Kalup predstavlja negativ oblika predmeta koji se želi proizvesti, te je bitna korektna izvedba istog. Kalupi se mogu raditi od raznih materijala ovisno o potrebama, kompleksnosti i zahtjevima. Neki od materijala za izradu kalupa su razni metali, pijesak, gips, itd. Uz kalupnu šupljinu također je potrebno konstruirati i cjelokupni uljevni sustav kako bi taljevina pravilno popunila kalupnu šupljinu.

Postupkom lijevanja može se proizvoditi veliki raspon dimenzija odljevaka, od svega par grama do više stotina kilograma. Također ovisno o izabranoj vrsti lijevanja mogu se postići i najkompleksnije geometrije odljevaka. Ovu vrstu obrade metala je relativno lagano automatizirati i upotrebljavati u masovnoj proizvodnji te se i u te svrhe najčešće koristi. Ovisno o postupku lijevanja ulazni troškovi mogu biti niski, ali i veliki, kao kod npr. tlačnog lijeva s kokilama. Ali se zato mogu isti kalupi koristiti i za više od milijun ciklusa. Iako je ovo vrlo raširena metoda i dalje se razvijaju nove metode i poboljšavaju stare radi kompleksnosti dobivanja dobrih odljevaka.

Postoji veliki broj parametra koji se moraju podesiti kako bi se dobio ispravan odljevak. Za kvalitetnu izradu cjelokupnog kalupa potrebna su razna znanja iz više polja kao što su metalurgija, strojarstvo, fizika, kemija, mineralogija itd. Nadalje, nužna je konzistentnost mehaničkih svojstava prilikom lijevanja odljevaka kako ne bi došlo do nepredvidivih situacija. Zato se razvija tehnologija tlačnog lijevanja, koja uključuje uporabu visokog tlaka za dovod taljevine do kalupne šupljine čime se osigurava ravnomjerna popunjenost kalupne šupljine, a time i konzistentna svojstva, neka od tih svojstava su mehanička i vizualna svojstva. Zbog ovih razloga se postupak tlačnog lijevanja sve više koristi u današnje doma, pogotovo u industrijama gdje su bitna mehanička svojstva kao što je to npr. automobilska industrija.

## 2. POVIJEST LJEVARSTVA

Povijest razvoja ljevarstva počinje oko 4000 god. pr. Kr.. Ne zna se kada je lijevanje točno počelo, ali prema povijesnim nalazištima, početak se smješta u bakreno doba na području Mezopotamije. Lijevanje je s kovanjem jedan od najstarijih načina oblikovanja metala. Prva lijevanja su se vršila s bakrom koji ima visoko talište i visoke je mekoće. Prva legura je bronca koja se sastoji od bakra i kositra koji snižava talište i povisuje tvrdoću. Odljevci od bronce su pronađeni u Mezopotamiji, ali i u Egiptu, Kini i Indiji oko 3000 god. pr. Kr. [1].

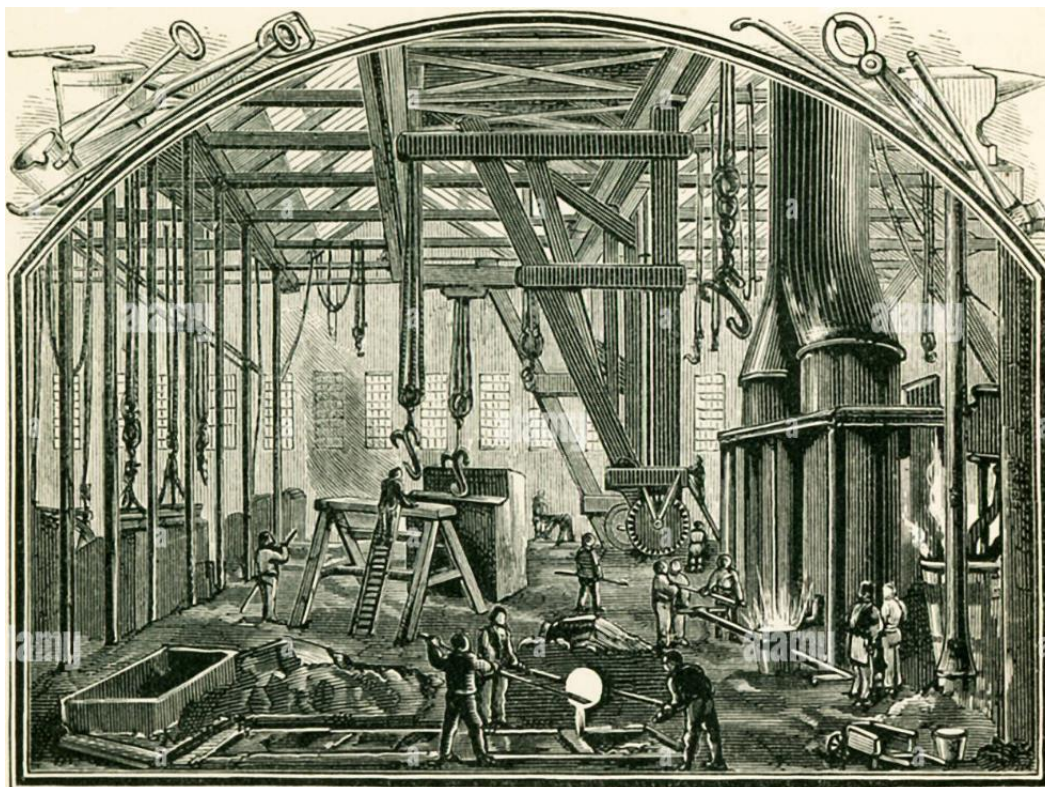
Prvi kalupi su bili vrlo jednostavni tj. jedna strana je bila isprofilirana, dok je druga bila ravna. Kasnije u brončanom dobu počinje lijevanje u kalupe koji s obje strane imaju profil. Nadalje se razvijaju ljevovi pomoću voštanih modela, ovo su bili prvi precizni ljevovi. Postupak se vrši tako da se prvo izrađuje model od voska koji je zatim prekriven glinom koji se onda zagrijava kako bi vosak iscurio van. Zatim se mogla uliti rastaljena bronca, te se kalup razbija kako bi se došlo do odljevka. Dalje se razvijaju jezgre unutar kalupa čime se dalje povećava kompleksnost samih odljevaka. Klasični postupak preciznog lijeva s jezgrama je razvijen u grčkoj u 6. stoljeću pr. Kr. [2,3].

U 5. stoljeću pr. Kr. u Kini za vrijeme Zhou dinastije razvija se lijevanje sa željezom, primarno za agrikulturne svrhe. Ali ovo je željezo bilo vrlo krhko i nije dugo trajalo [4].

Prvi primjeri lijevanja željeza u Europi se javljaju tek oko 1400. godine. Do tada se koristila mjed i bronca, primarno za izradu crkvenih zvona, topova i sličnih predmeta. Sredinom 15. stoljeća počinje uporaba metalnih kalupa koji su zamijenili glinene čime raste produktivnost.

U 18. stoljeću dolazi do razvoja talioničkih peći i alata za lijevanje koji olakšavaju i ubrzavaju cjelokupni proces. Počinje se upotrebljavati čelik u procesima lijevanja koji se onda koristi za izradu tračnica za vlakove, plugove i za izradu mostova. Daljnji razvoj ljevarstva se nastavlja krajem 18. stoljeća razvitkom kupolne peći tj. onda kada se taljevina prestala ulijevati u kalupe neposredno iz peći za taljenje rude [3].

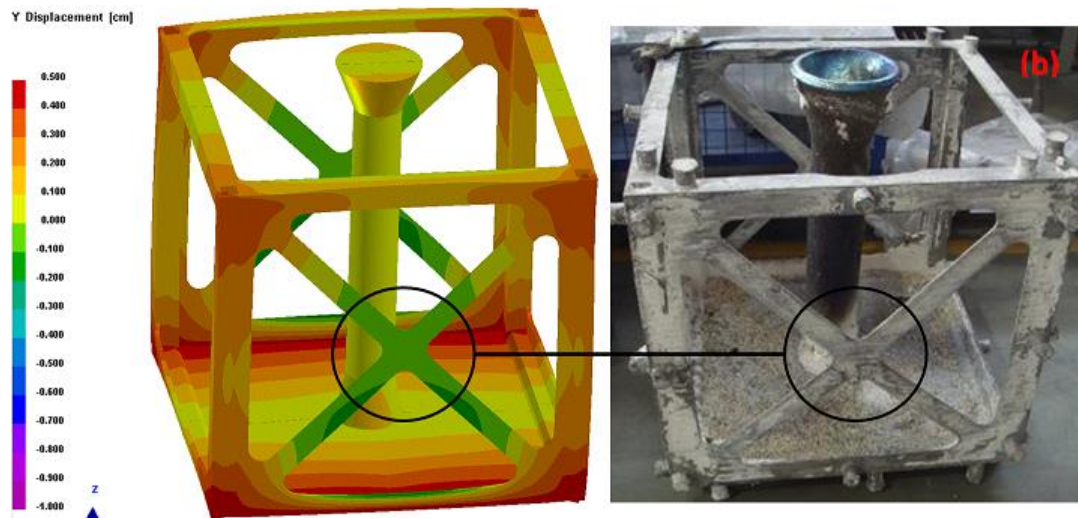
U 19. stoljeću se dalje unaprjeđuju ljevaonice, primjer iste se može vidjeti na slici 1. u kojima se razvijaju novi postupci lijevanja kao što su centrifugalni lijev, ručno upravljani tlačni lijev. Također se razvijaju i novi strojevi: elektrolučna peć, strojevi za kalupljenje itd. Razvijene su nove legure, te se poboljšavaju postojeće. Počinje uporaba aluminijske u lijevanju [3].



**Slika 1. Ilustracija lijevanja metala u 1870-ima [5]**

Najveći razvoj ljevarstva događa se u 20. stoljeću, točnije za vrijeme prvog i drugog svjetskog rata. Uz mehanizaciju, uvelike se unaprjeđuje automatizacija procesa lijevanja. Dolazi do specijalizacija različitih vrsta ljevaonica. Razvijaju se nova veziva za pješčane ljevove, uvodi se kontrola kvalitete. Veći fokus se stavlja na unaprjeđenja samih kalupa kao što su točna dimenzioniranja, te kvalitetnija konstrukcija uljevnih sustava. Nadalje poboljšava se upravljanje taljevinom radi boljeg skrućivanja i hlađenja. Također se unaprjeđuju pomoćne operacije kako bi cjelokupni proces bolje funkcionirao. Razvijaju se novi postupci izrade kalupa i jezgri kao što su: vakuumsko kalupljenje, no bake, školjkasti postupak, niskotlačni lijev, Hotbox i Coldbox postupak za izradu jezgri.

Krajem 20. stoljeća razvijaju se simulacijski softveri koji postaju nužni za rješavanje problema lijevanja odljevaka radi povećanja kompleksnosti. Simulacije omogućuju da se vidi cjelokupni proces lijevanja i da se detektira gdje dolazi do problema, te da se dobije uvid kako poboljšati sustav. Stavljanjem naglaska na uljevne sustave i cjelokupni kalup te uporaba softvera omogućila je velike uštede u količini potrošnje materijala. Primjer simulacije se može vidjeti na slici 2. [3].

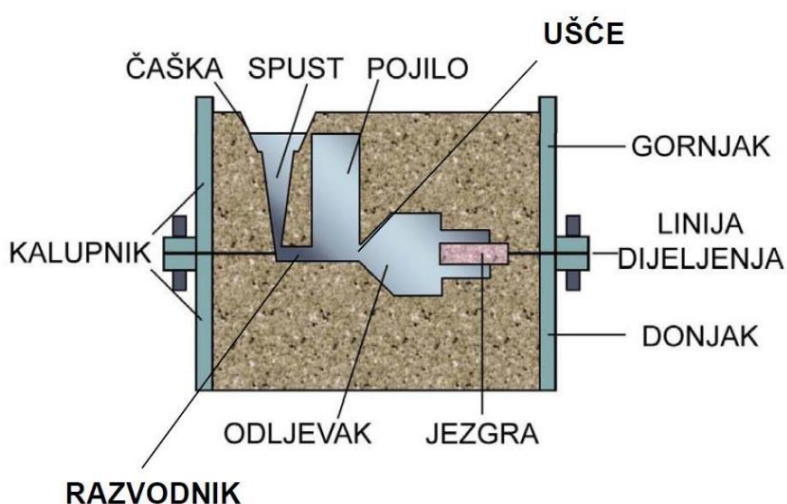


Slika 2. Simulacija lijevanja, prikaz deformacije odljevka [6]



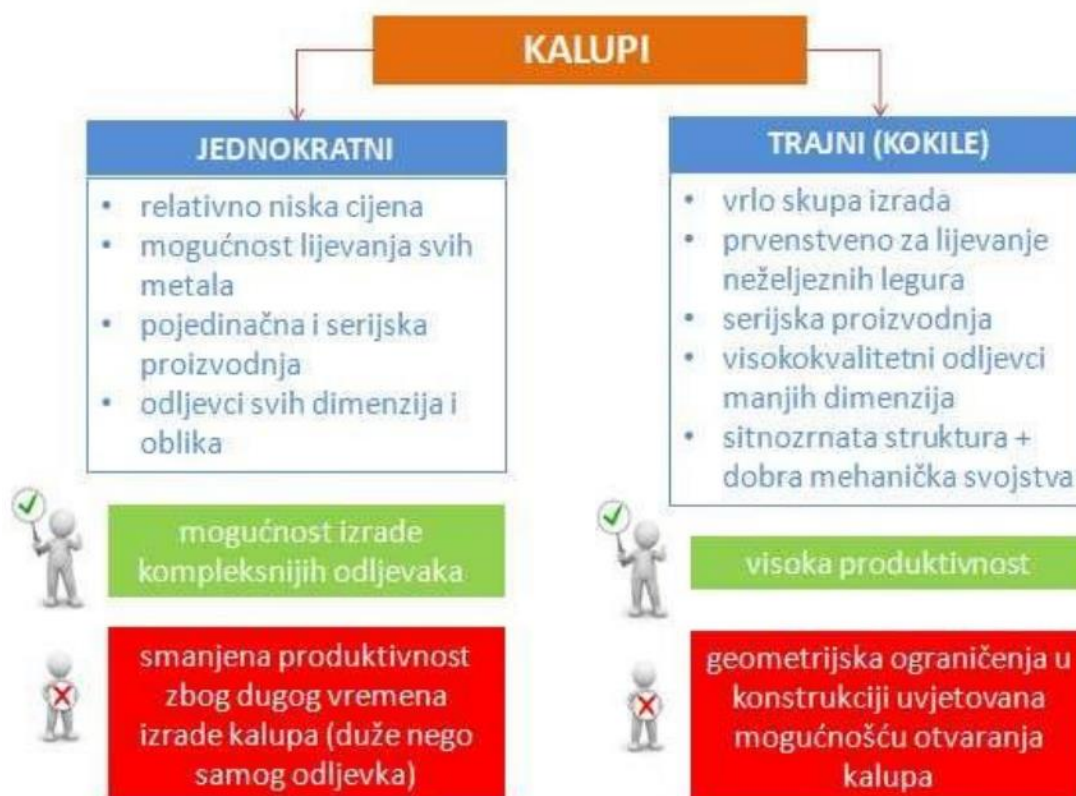
### 3. PODJELA LIJEVANJA

Postoji mnogo vrsta lijevanja, ali većina ih ima slični postupak ulijevanja i pripreme. Prvo je potrebno materijal pripremiti i dovesti ga u stanje pogodno za lijevanje, a to znači rastaliti ga na adekvatnu temperaturu. Potom se kalup puni s pomoću gravitacijske ili neke druge sile, a to može biti centrifugalna sila, sila uzrokovana tlačnim klipom itd. Uporabom dodatnih sila popunjavanja kalupa postiže se brže i preciznije punjenje kalupa što uzrokuje manju poroznost i bolju popunjenost. Taljevina dolazi do kalupne šupljine preko čaške gdje taljevina ulazi u kalup zatim dolazi do spusta, pa do ušća, te dolazi do kalupne šupljine. Kalupna šupljina najčešće još sadržava i pojilo. Pojila se najčešće pozicioniraju na mjesta najvećih presjeka a svrha mu je osigurati usmjereno skrućivanje te ukloniti pojavu poroznosti usred skrućivanja [7]. Primjer osnovnog kalupa se može vidjeti na slici 3.



Slika 3. Presjek pješčanog kalupa [7]

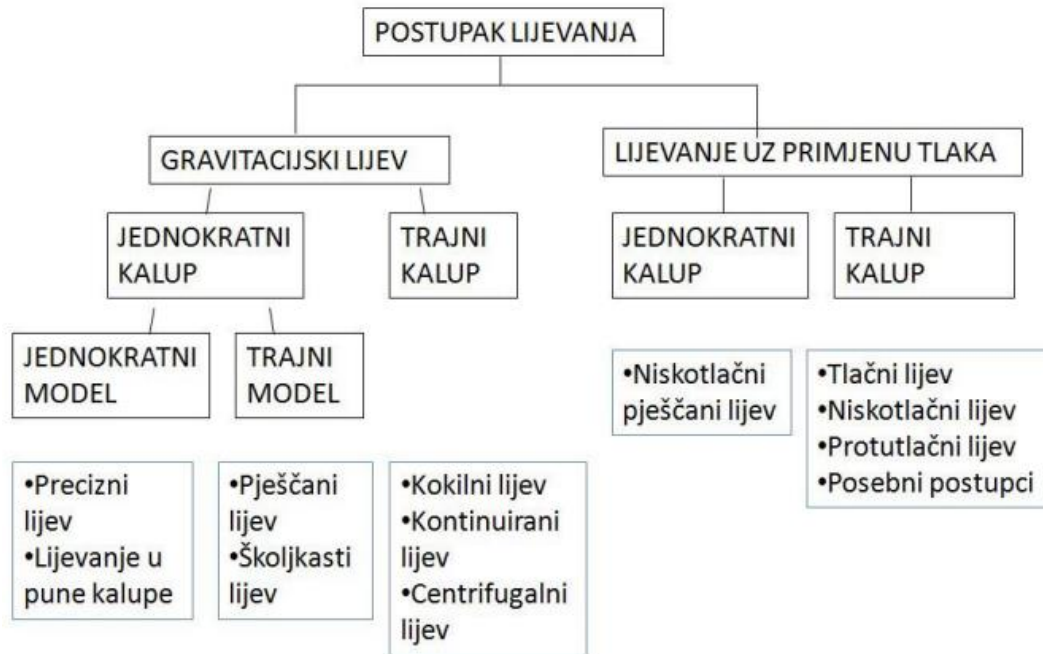
Nakon skrućivanja odljevak se može izvaditi iz kalupa te ovisno o vrsti kalupa, isti se može ili ne može ponovno koristiti za sljedeće lijevanje. Tako se kalupi mogu podijeliti na jednokratne i trajne kalupe. Jednokratni kalupi se najčešće rade od kvarcnog pijeska, te se isti mora razbiti kako bi se došlo do odljevka, dok se trajni kalupi rade od metala. Takvi kalupi se mogu koristiti i preko milijun puta ovisno o pripremi kalupa i silama ulijevanja, detaljnija usporedba se može vidjeti na slici 4.



Slika 4. Osnovne značajke jednokratnih i trajnih kalupa [3]

Kako se trajni kalupi moraju moći otvoriti, uporabom jednokratnih kalupa mogu se postići kompleksnije geometrije odljevaka.

Postoji više podjela postupaka lijevanja, a osnovna podjela je prema uljevnoj sili te prema vrsti kalupa i modela, prema slici 5.



**Slika 5. Podjela postupaka lijevanja prema uljevnoj sili te vrsti kalupa i modela [2]**

Prema ovome vidimo da postoji veliki broj postupaka lijevanja. Razlog tome je da kompleksni problemi zahtijevaju razne i specifične pristupe te je potrebna optimalizacija kako bi odljevak bio ispravan. Također prilikom biranja postupaka lijevanja bitni su konstrukcijski zahtjevi, masa proizvoda, dimenzije ili neki drugi zahtjevi kao što je stupanj automatizacije.

## 4. TLAČNO LIJEVANJE

Tlačno lijevanje je postupak kod kojeg se rastaljeni metal pod visokim tlakom uvodi u trajni kalup [2]. Koristi se obično za proizvodnju metalnih dijelova s preciznim dimenzijama i uskim tolerancijama, konstrukcija odljevaka može biti relativno kompleksna radi visokog tlaka koji omogućuje popunjavanje svih dijelova kalupa. Površina odljevaka je glatka što ubrzava cikluse cjelokupne izrade jer često nije potrebna naknadna površinska obrada odljevaka. Nastavljajući na prethodno, proizvodna stopa je visoka, te je proces učinkovit, također se mogu izrađivati kalupi s više kalupnih šupljina. Postupak tlačnog lijevanja se najčešće koristi za proizvodnju dijelova manjih i srednjih veličina. Primjer izrade radijatora postupkom tlačnog lijevanja se može vidjeti na slici 6.



**Slika 6. Radijator dobiven tlačnim lijevanjem [8]**

Materijali koji se najčešće koriste za postupak tlačnog lijevanja su aluminij, cink, magnezij i njihove legure. Željezne legure se ne koriste previše u tlačnim ljevovima. Tlačno lijevanje se široko koristi u industrijama kao što su automobilska, zrakoplovna, te za industrijske strojeve zbog svoje sposobnosti proizvodnje složenih i visokokvalitetnih dijelova na ekonomičan način. U automobilskoj industriji najčešće komponente izrađene tlačnim

lijevom su blokovi motora, čiji se primjer može vidjeti na slici 7.. Također postupak tlačnog lijevanja se koristi za izradu kućišta prijenosnika, glave cilindra, poklopaca ventila, zupčanica, nosača itd.. U zrakoplovnoj industriji uporaba postupka tlačnog lijevanja je visoka, te se izrađuju razne komponentne radi mogućnosti postizanja uskih tolerancija.



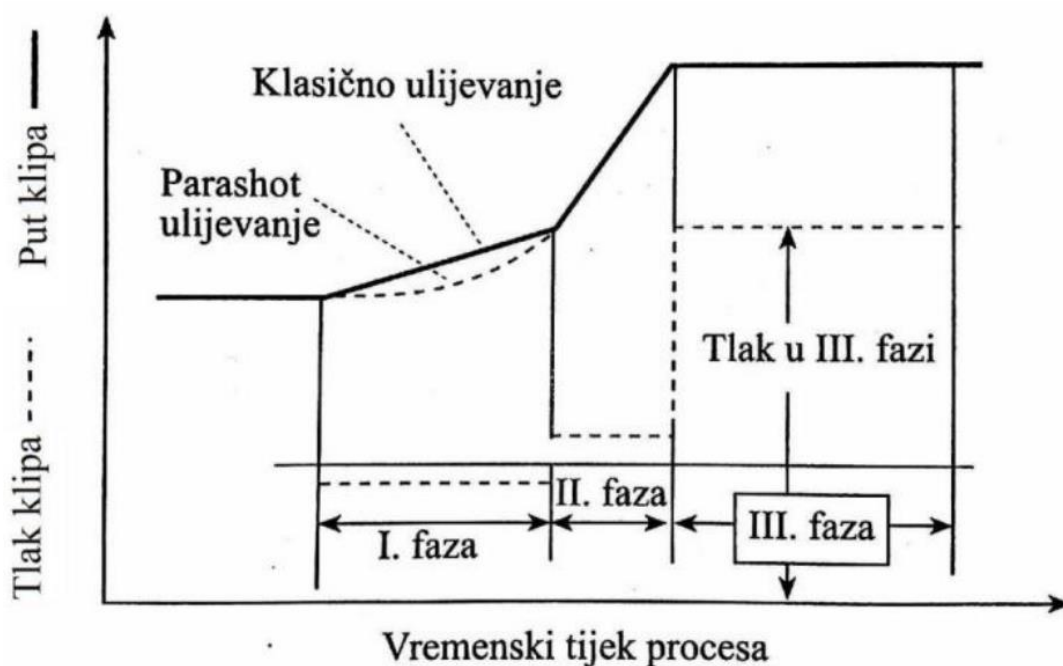
**Slika 7. Dijelovi automobila dobiveni tlačnim lijevanjem [9]**

Neki od nedostataka postupka tlačnog lijevanja su visoka početna cijena izrade alata za lijevanje kao što je sami kalup, ali i stroj koji služi za tlačnje taljevine u kalup. Iako se to kompenzira kroz vrijeme radi visoke ponovljivosti i iskoristivosti kalupa. Potrebno je podesiti veliki broj parametra kako bi se dobio ispravan odljevak, što zahtjeva određeno znanje, ali i vrijeme da se ti parametri točno definiraju.

## 5. POSTUPAK I VRSTE TLAČNOG LIJEVANJA

### 5.1. Postupak tlačnog lijevanja

Kako bi se proveo postupak tlačnog lijevanja, potrebno je imati specijalizirani stroj koji može postići visoke tlakove, te imati kalup u koji se ubrizgava taljevina. Tlakovi koji se postižu unutar kalupne šupljine se kreću između 10 – 170 MPa. Uz ovo sastavni dio tlačnog lijeva su tlačni klip, tlačna komora, izbacivači i metalne jezgre. Proces lijevanja kreće od tlačne komore u kojoj se nalazi rastaljeni metal. Hidraulički klip gibanjem vrši tlačni pritisak, s čime gura rastaljeni metal koji zatim putuje do kalupne šupljine u koju je prethodno bio nanesen premaz za zaštitu i produljenje vijeka kalupa, također služi za lakše vađenje odljevka nakon završetka ciklusa lijevanja. Kada se kalupna šupljina popuni, tlak počinje rasti do zadane vrijednosti te se tako drži do skrućenja kada se odljevak vadi iz kalupa. Detaljniji postupak kretanja klipa se vidi na slici 8. [2].



Slika 8. Faze gibanja hidrauličkog klipa tokom lijevanja [10]

### 5.1.1. Faze gibanja klipa

#### 5.1.1.1. Prva faza

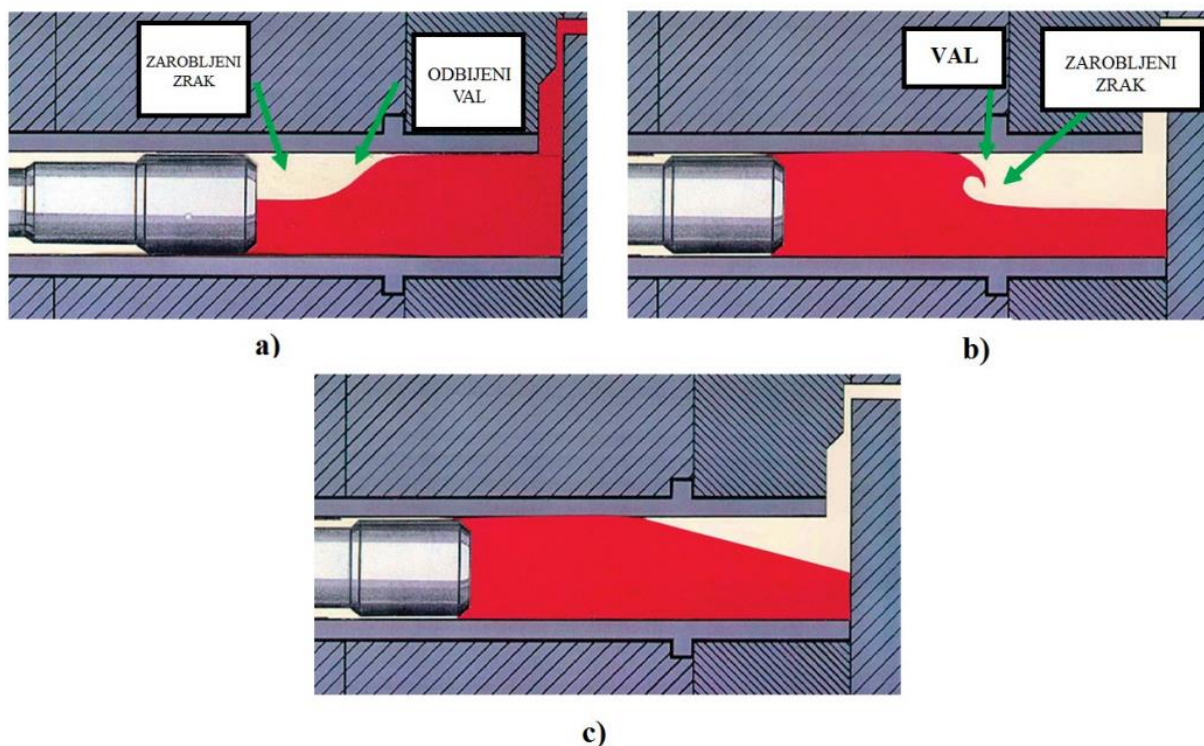
Gibanje klipa je sporo, od 0,05 do 0,5 m/s kako ne bi došlo do stvaranja valova kod taljevine i miješanja sa zrakom te zarobljavanja istog unutar taljevine. Zrak zarobljen u taljevini putuje u kalupnu šupljinu i glavni je uzrok pojave grešaka kod odljevaka koja se zove poroznost. Nadalje kretanje klipa ne smije biti presporo kako ne bi došlo do hlađenja taljevine, nego da taljevina bude točno proračunate temperature za postizanje optimalnih rezultata. Postoje tri vrste brzina unutar prve faze gibanja klipa prema slici 9. [11]

Prva brzina je pod kritična (a) brzina koja nije dovoljno brza za popunjavanje tlačne komore i prostora ispred klipa te dolazi do odbijanja taljevine, a time i zarobljavanja zraka usred kretanje.

Druga brzina je nad kritična (b) brzina taljevine kod koje je brzina kretanje klipa previsoka te se stvara val i kresta preko koje opet dolazi do zarobljavanja zraka unutar taljevine.

Treća brzina je kritična (c) brzina klipa u kojoj se klip kreće točno tom brzinom da se tlačna komora popuni i da ne dolazi do odbijanja taljevine i zarobljavanja zraka [11]. Ti parametri lijevanja moraju se podesiti tako da se postigne kritična brzina kretanja klipa.





Slika 9. a) Podkritična brzina, b) Nadkritična brzina, c) Kritična brzina klipa tokom lijevanja [11]

Nije preporučljivo koristiti manje količine taljevine u tlačnoj komori za popunjavanje kalupne šupljine jer šanse za stvaranje valova i zarobljavanja zraka rastu.

Također već od početka treba paziti na brzinu taljevine, jer kod omjera visine i dužine tlačne komore od 0,15, šanse za pojavu zarobljavanja zraka su velike, a baš taj omjer se često upotrebljava kod projektiranja kalupa i kod mnogih strojeva [12].

#### 5.1.1.2. Druga faza

Brzina klipa u drugoj fazi ovisi o konstrukciji odljevka, sili zatvaranja stroja i debljini stijenke odljevka. Brzine klipa se kreću do 8 m/s. Što je veća brzina taljevine, trošenje kalupa je veće i brže. S druge strane ako je brzina taljevine preniska neće doći do potpunog popunjavanja kalupne šupljine te će doći do pojave grešaka kao što je poroznost. Kod tankostjenih odljevaka potrebna je veća brzina taljevine baš iz tog razloga da se dobije pravilan odljevak. Također kod veće brzine taljevine potrebna je i veća sila zatvaranja kalupa kako ne bi došlo do razdvajanja dvije polovice kalupa. Povećanjem brzine taljevine povećava se gustoća i masa odljevka [10], te se time smanjuje mogućnost pojave poroznosti.



### 5.1.1.3. Treća faza

Treća faza počinje kada je kalupna šupljina u potpunosti ispunjena taljevinom, te dolazi do povećanja tlaka unutar kalupne šupljine usred pritiska od strane klipa. Tlak kod postupaka tlačnog lijevanja uporabom aluminijskih legura kreće se između 20 i 100 MPa, tlak uporabom legura cinka kreće se između 10 i 40 MPa, uporabom magnezijevih legura između 20 i 100 MPa, dok uporabom bakrenih legura tlak raste i do 150 MPa [13]. Veći tlak uzrokuje veća naprezanja na tlačni stroj, ali se dobivaju bolja mehanička svojstva odljevaka, manja poroznost i kvalitetnija površina odljevka. Kako ne bi došlo do otvaranja kalupa usred povišenog tlaka, sila uzrokovana tlakom taljevine mora biti 20 do 30 % manja od sile zatvaranja kalupa.

Završetkom treće faze i skrućivanjem odljevka kalup se može otvoriti, te je odljevak spreman za vađenje iz kalupne šupljine pomoću izbacivača.

## 5.2. Vrste postupaka tlačnog lijevanja

Strojevi za tlačni lijev se dijele u dvije skupine s obzirom na uljevni sustav [3]:

- strojevi s toplom komorom
- strojevi s hladnom komorom.

Osim glavne podjele, moguće ih je podijeliti i prema:

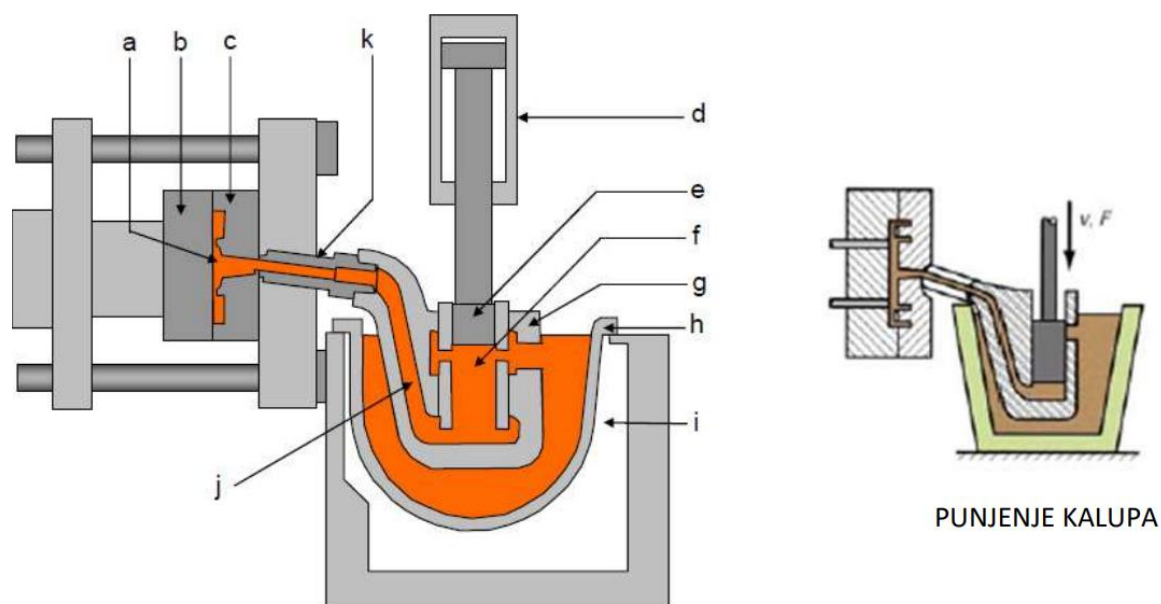
- prema stupnju automatizacije:
  - poluautomatski strojevi
  - automatski strojevi
- prema snazi stroja:
  - strojevi male snage
  - strojevi srednje snage
  - strojevi velike snage
- položaju tlačne komore:
  - strojevi s vertikalnom komorom
  - strojevi s horizontalnom komorom
- prema stupnju univerzalnosti:
  - univerzalni strojevi
  - specijalni strojevi [13].

### 5.2.1. Strojevi s toplom komorom za tlačni lijev

Sastavni dio strojeva s toplom komorom za tlačni lijev je peć s taljevinom. Pošto su dijelovi ovoga stroja, tlačna komora i klip, vertikalno uronjeni u taljevinu ne mogu se ljevati materijali koji u rastaljenom stanju otapaju čelik kao što je aluminij već se koriste legure nižih tališta, kao što su magnezij, cink, olovo i kositar. Strojevi s toplom komorom pogodni su za automatizaciju i tako se najčešće upotrebljavaju, brzina rada ovakvih strojeva se kreće od 50 do 500 ciklusa lijevanja na sat [3]. Uglavnom se koriste za lijevanje odljevaka manjih dimenzija i masa, od svega nekoliko grama, do 25 kg. Tlakovi se kreću od 7 do 35 MPa.

Postoje dvije varijante ovoga stroja. Jedna je da se taljevina ulijeva u lonac koji je zagrijan električki ili plinski, te se tako održava temperatura lijevanja. Druga je da se metal tali u samom loncu stroja koji je izrađen od čelika.

Proces lijevanja započinje ubacivanjem metala za lijevanje u peć za taljenje. Nakon što se sav materijal rastali, može se krenuti s postupkom ubrizgavanja tekućeg metala u kalupnu šupljinu. Sustav za ubrizgavanje se sastoji od hidraulički pokretanog tlačnog klipa, tlačne komore i spojne cijevi. Tlačna komora i klip su uronjeni u taljevinu i napravljeni su od alatnog čelika ili nehrđajućeg čelika. Spojna cijev se izrađuje od željeznog lijeva kojoj je funkcija osiguranje nesmetanog protoka taljevine visoke brzine prema kalupnoj šupljini. Položaj tlačne komore i klipa je takav da se pomakom klipa prema gore omogući punjenje komore rastaljenim metalom, dok se pomakom prema dolje rastaljeni metal ubrizgava kroz spojnu cijev i mlaznicu u kalupnu šupljinu. Spojna cijev je također zagrijana na istu temperaturu kao i tlačna komora. Sljedeći element ovog sustava je mlaznica koja povezuje sustav za ubrizgavanje i kalup. Svrha mlaznice je precizno popunjavanje kalupne šupljine. Mlaznica je također grijana i napravljena je najčešće od nitriranog legiranog čelika ili alatnog čelika, ovi materijali su otporni na trošenje i na rad na povišenim temperaturama. Shema procesa tlačnog lijevanja i dijelovi sustava za ubrizgavanje su vidljivi na slici 10.



**Slika 10. Koraci pri tlačnom lijevanju s toplom komorom: a) kalupna šupljina, b) pomična polovica kalupa, c) nepomična polovica kalupa, d) cilindar, e) klip za tlačanje, f) tlačna komora, g) sustav za ubrizgavanje, h) lonac, i) peć, j) spojna cijev, k) grijana mlaznica. [3]**

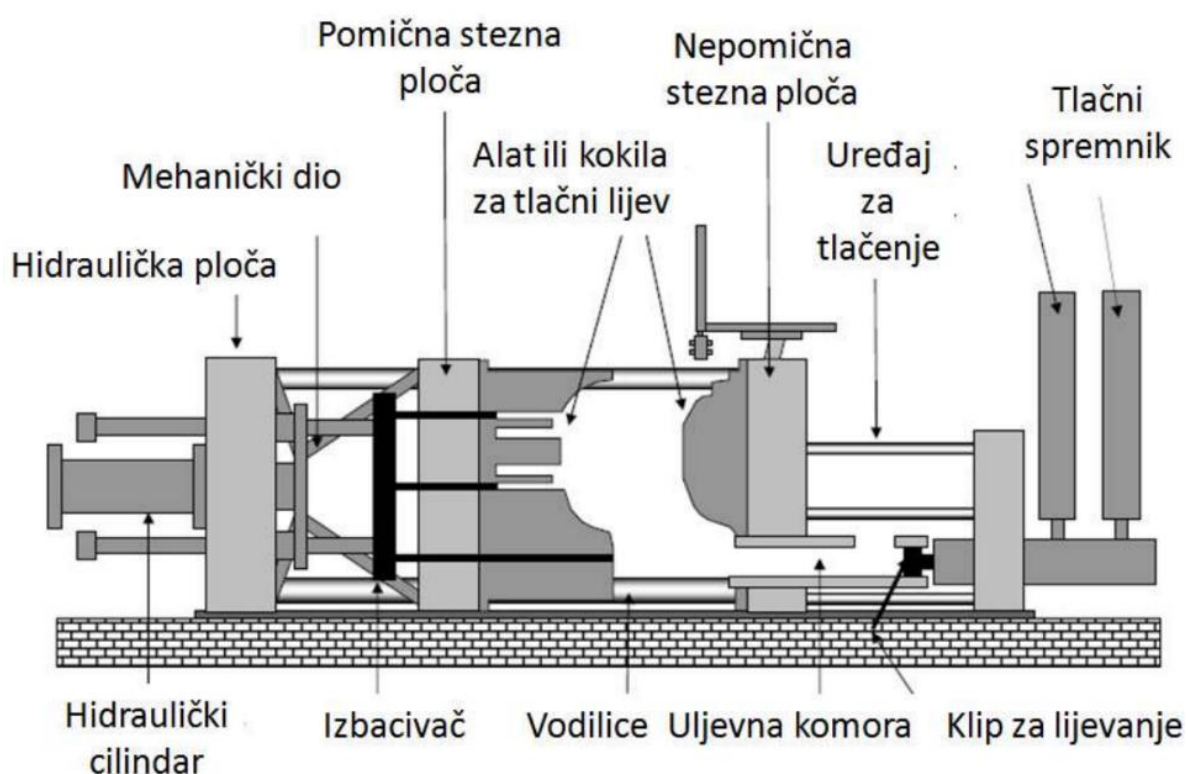
Prednosti tlačnog lijeva s toplom komorom nad tlačnim lijevom s hladnom komorom je taj da se u tlačnoj komori nalazi višestruko veća količina rastaljenog materijala nego što je potrebno za izradu jednog odljevka i čim je taj odljevak spreman za vađenje, u mlaznici se već nalazi materijal za ubrizgavanje, te je sve spremno za izradu sljedećeg odljevka, što skraćuje ciklus. Također, kako su temperature tališta niže kod ljevova za toplokomorni stroj, odljevci se brže hlade što dodatno pospješuje skraćanju ciklusa.

Jedan ciklus lijevanja se sastoji od sljedećih koraka. Kalupna šupljina se premazuje postupkom naštrcavanja kako bi se produljio vijek trajanja kalupa. Zatim se kalup zatvara, dok je hidraulički klip u početnom položaju. U tlačnoj komori se nalazi rastaljeni metal spreman za ubrizgavanje. Nakon početka kretanja klipa prema dolje raste tlak u tlačnoj komori te se rastaljeni metal počinje kretati i popunjava kalupnu šupljinu preko spojne cijevi i mlaznice. Popunjavanjem kalupne šupljine tlak također raste i tako se drži dok se odljevak ne skrutne. Nakon skrućivanja odljevka, kalup se otvara i s pomoću izbacivača i prihvatne naprave odljevak se vadi iz kalupa. Zatim se hidraulički klip vraća u početni položaj čime se omogućava ponovno punjenje kalupne šupljine. Ovime završava jedan ciklus i može krenuti novi.

Nakon vađenja odljevaka, isti se stavljaju sa strane na hlađenje te se s njih odvaja srh s linije dijeljenja te uljevni sustav. Višak materijala se može ponovno vratiti u peć na taljenje.

### 5.2.2. Tlačni lijev s hladnom komorom

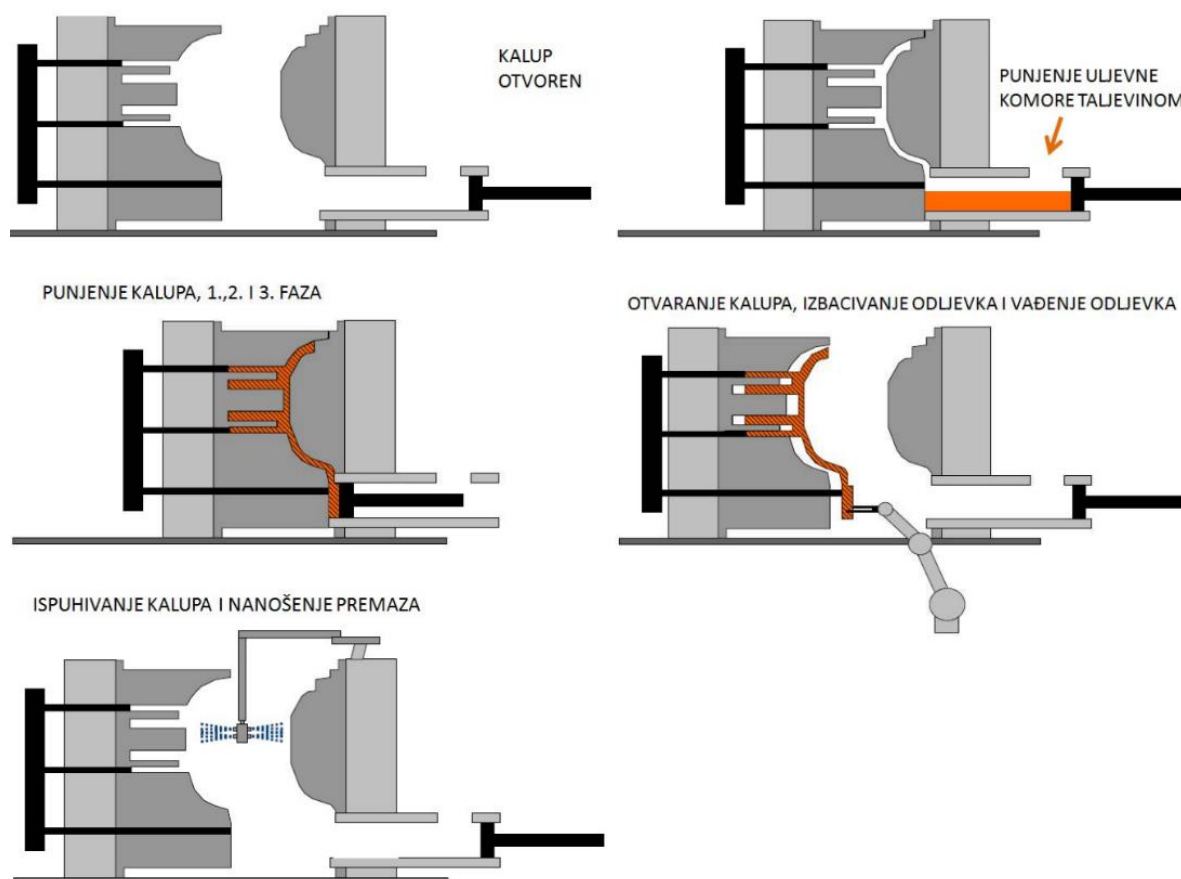
Tlačni lijev s hladnom komorom, koji je prikazan na slici 11., koristi se za lijevanje legura s višom temperaturom lijevanja, do 1000 °C. To znači da se mogu lijevati materijali poput aluminijske, magnezijске i bakra. Također naspram tlačnom lijevu s toplom komorom, ovdje se mogu lijevati odljevci svih dimenzija od najmanjih do najvećih. Primjer većeg odljevka je npr. cijeli blok motora. Kod ovog lijeva taljenje materijala se u potpunosti dešava neovisno i sa strane ovoga stroja, te se taljevina mora donijeti do tlačne komore. Tlačna komora ima mogućnost održavanja temperature, ali ne i taljenja. Tlačna komora i klip ne bi smjeli biti zagrijavani iznad radne temperature, te često znaju biti i opremljeni sustavom hlađenja kako ne bi došlo do pregrijavanja ovih dijelova i njihovog oštećenja. Obično se tlačna komora i hidraulički klip izrađuju od alatnog i nehrđajućeg čelika [2].



Slika 11. Stroj za tlačno lijevanje s hladnom komorom [14]

Ciklus tlačnog lijeva s hladnom komorom počinje s ispuhivanjem otvorenog kalupa i nanošenjem premaza. Zatim, se kalup zatvara te se u horizontalnu tlačnu komoru uljeva rastaljeni metal s pomoću nekog dozirnog pomagala. Hidraulički klip se nalazi u početnom

položaju prema slici 12. Kretanjem hidrauličkog klipa rastaljeni metal se giba prema kalupnoj šupljini te ju ispunjava, gibanje klipa nije konstantno, već se odvija u tri faze prema slici 13.

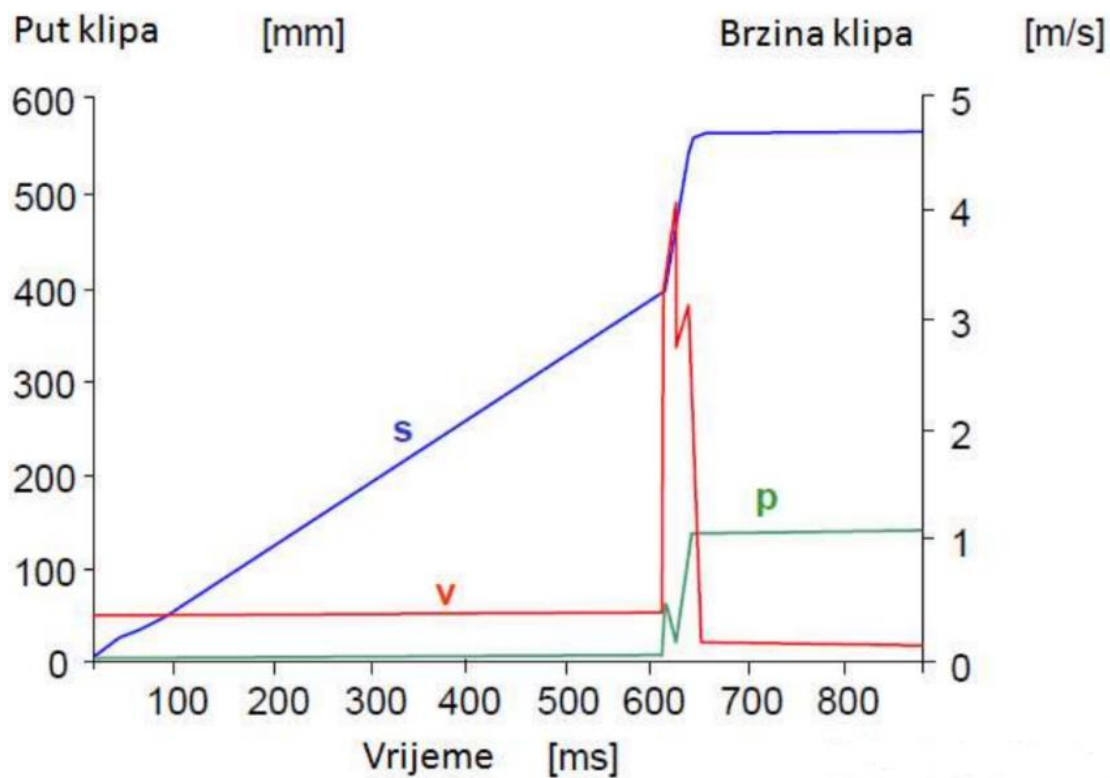


**Slika 12. Koraci pri tlačnom lijevanju s hladnom komorom. [14]**

Prva faza gibanja klipa se sastoji od popunjavanja tlačne komore i dovođenja taljevine do ulaza u kalup bez uvođenja zraka u rastaljeni metal, ovaj proces traje oko 2 sekunde.

Druga faza uključuje popunjavanje kalupne šupljine velikom brzinom kako bi se osiguralo cjelovito popunjavanje kalupne šupljine i minimizirala mogućnost pojave poroznosti, ova faza traje oko 0,15 sekundi.

Treća faza nastupa nakon popunjavanja kalupne šupljine, te se vrši pritisak s pomoću hidrauličkog klipa, tlak raste višestruko puta. Ova faza traje dok se odljevak ne skrutne. Dijagram ovih faza i brzina kretanja klipa se može vidjeti na slici 13.



Slika 13. Krivulja gibanja klipa. [14]

Nakon skrućivanja odljevka metalna jezgra se izvlači van, kalup se otvara, te se odljevak uklanja s pomoću izbacivača. Nakon vađenja odljevka iz kalupne šupljine odljevak ide na daljnju završnu obradu po potrebi. Hidraulički klip se vraća u početni položaj kako bi mogao početi sljedeći ciklus.

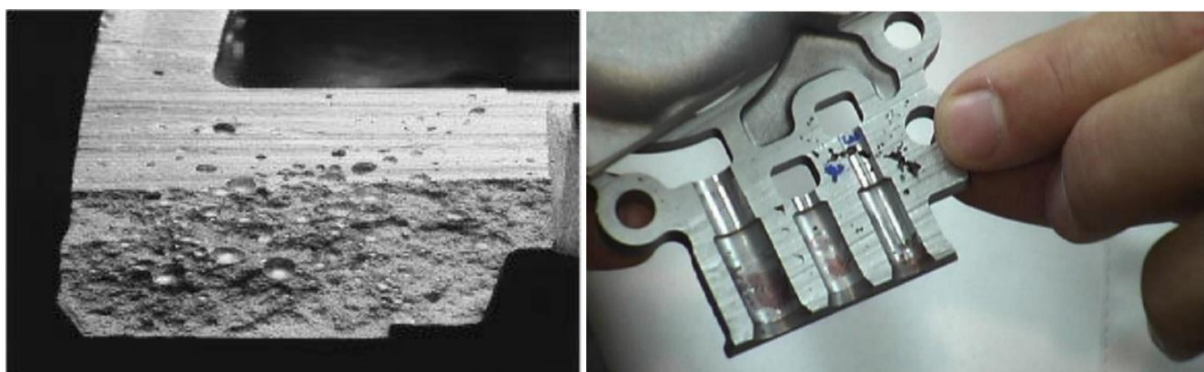
## 6. GREŠKE KOD TLAČNIH ODLJEVAKA

Kod tlačnih odljevaka najčešće greške koje se javljaju su unutarnje greške i greške površine. Ostali tipovi grešaka su greške dimenzija i greške koje smanjuju mehanička svojstva odljevka. U nastavku će biti opisani prva dva tipa grešaka. Ove greške se mogu izbjeći korištenjem točnih tehnoloških parametara obrade. Neki od bitnih parametara koje utječu na smanjenje pojave grešaka su sljedeći. Parametri i konstrukcija kalupa i kalupne šupljine, uljevni sustav kalupa, parametri tlačnog stroja, konstrukcija tlačne komore i hidrauličkog klipa. Također je bitna legura koja se lijeva te svi parametri trebaju biti podešeni prema toj leguri [13]. Kako bi se dalje izbjegle greške unutar odljevaka, korisno je imati znanja o vrstama grešaka koje se najčešće javljaju, te će iste biti opisane u nastavku.

### 6.1. Plinska poroznost

Plinska poroznost je pojava koja je okarakterizirana okruglim glatkim porama, glatke i sjajne površine, primjer se može vidjeti na slici 14. Ova greška se javlja unutar odljevka te se ne može uočiti vizualno, već se može uočiti samo upotrebom nekih razornih i ne razornih ispitivanja, kao što je rezanje odljevaka ili određenim radiografskim metodama kao što je rendgen.

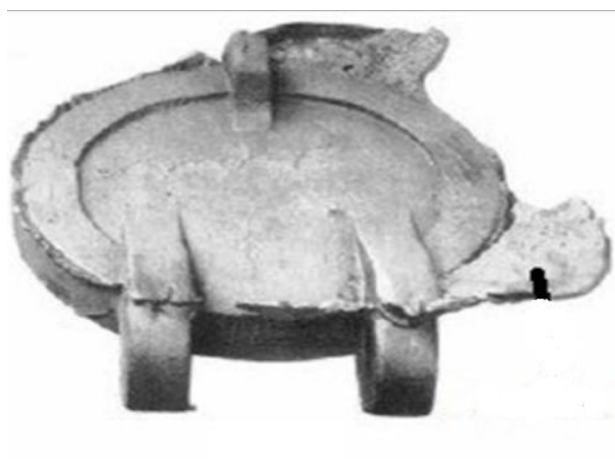
Poroznost odljevaka se najčešće javlja iz dva razloga. Prvi je da je poroznost nastala zarobljavanjem plinova tijekom proces lijevanja i pomicanja hidrauličkog klipa. Drugi je da je došlo do poroznosti radi skrućivanja metala tijekom hlađenja i zarobljavanja vodika otopljenog u talini. Poroznost se najčešće javlja na debelostjenim područjima odljevaka ili na prijelazu s debljih na tanje stijenke i područjima u blizini ušća [15].



Slika 14. Plinska poroznost kod odljevaka (tlačni lijev) [15]

## 6.2. Srh

Srh je pojava viška materijala van granica odljevka, na slici 15. se može vidjeti odljevak sa srhom. To su spljoštena izbočenja debljine oko 0,1 mm nepravilnog oblika. Javlja se na diobenoj ravnini kalupa, na mjestu gdje se dva dijela kalupa spajaju u jedan. Uzrok pojave srha je nedovoljna sila zatvaranja kalupa, koju je onda potrebno naknadno kontrolirati, kako je već pisano ranije, sila tlaka na kalup ne smije biti veća od 0,85 % sile zatvaranja kalupa kako ne bi došlo do pojave srha [16].



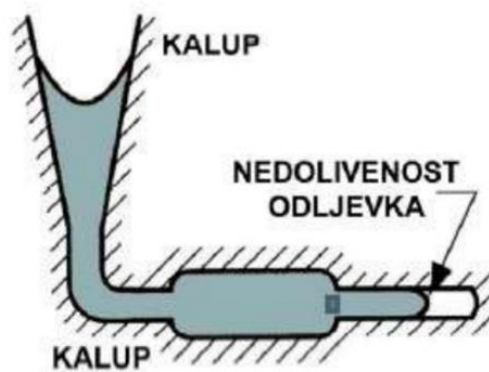
Slika 15. Pojava greške srha [16]

## 6.3. Nedolivenost odljevka

Nedolivenost odljevka je greška definirana nepotpunim popunjavanjem kalupne šupljine, Razlozi pojave ove greške su, preniska temperatura lijevanja ili prenizak tlak taljevine, premale dimenzije ušća, niska tečljivost rastaljenog metala. Ova greška može se izbjeći povišenjem temperature lijevanja, promjenom oblika i veličine ušća, korištenjem legura bolje livljivosti [3]. Primjer ove greške može se vidjeti na slici 16.



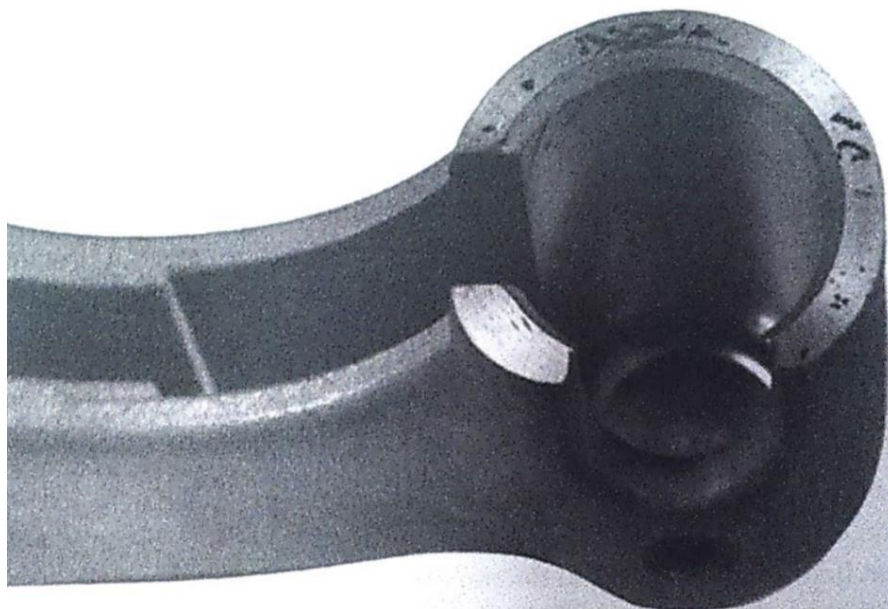
## NEDOLIVENOST ODLJEVKA



Slika 16. Nedolivenost odljevka [3]

### 6.4. Uključci

Javljaju se u obliku kuglica ili strija. Netopivi su u metalu i prekidaju osnovnu strukturu metala. Uključci su najčešće oksidni, te imaju najveću sklonost javljanja kod legura aluminija, silicija, magnezija i kroma. Promjera su do 4 mm [17]. Prilikom lijevanja treba paziti na temperaturu taljevine, što je viša temperatura taljevine dolazi do veće oksidacije legure i moguće pojave uključaka. Na slici 17. se može vidjeti kako uključci izgledaju.

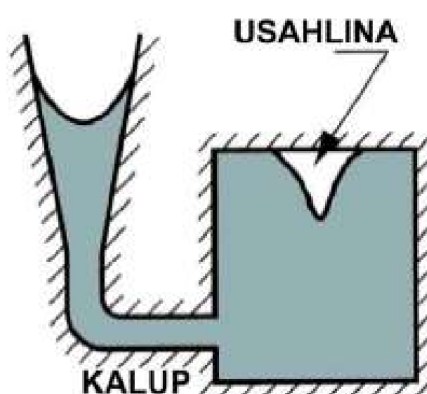


Slika 17. Tlačni aluminijski odljevak s oksidnim uključcima [15]

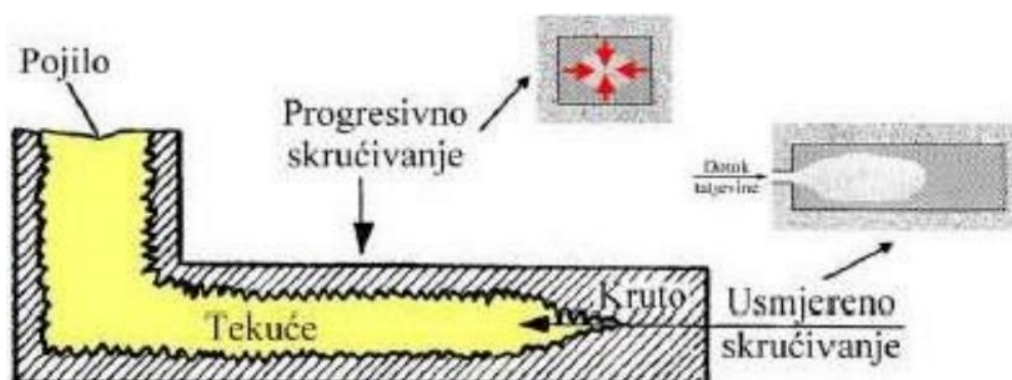
## 6.5. Usahlina

Usahlina je ulegnuće koje nastaje zbog skupljanja metala prilikom skrućivanja, primjer je prikazan na slici 18., te nedostatka materijala koji bi kompenzirao razliku volumena u području koje se ulegnulo. Usahlina se može javiti na površini materijala ili unutar odljevka. Usahlina se može izbjeći osiguravanjem usmjerenog skrućivanja odljevka prema pojilu, uporabom većeg pojila ili bolje lociranog pojila, uporabom egzotermnih pojila, postavljanjem hladila s ciljem usmjeravanja skrućivanja, primjer se može vidjeti na slici 19.

### USAHLINA



Slika 18. Prikaz usahlina nakon skrućivanja odljevka [3]



Slika 19. Usmjerenno skrućivanje odljevka[3]

## 6.6. Nestaljeno područje

Ovo je greška koja se javlja na površini i unutrašnjosti odljevka. Nestaljeno područje je predstavljeno očitim udubljenim i nepravilnim linijama, primjer se može vidjeti na slici 20.. Linije su male i uske, a rubovi spajanja su zaglađeni. Ova greška uzrokuje škart odljevka.

Uzroci nestaljenog područja su preniska temperatura taline ili kalupa za lijevanje, loša konstrukcija uljevnog sustava, čime talina mora proći veliki put kako bi se popunila kalupna šupljina, sudarom dvaju toka, te nedolaska do potpunog stapanja, loša tečljivost taljevine ili kada talina ne protječe ujednačeno po kalupnoj šupljini.

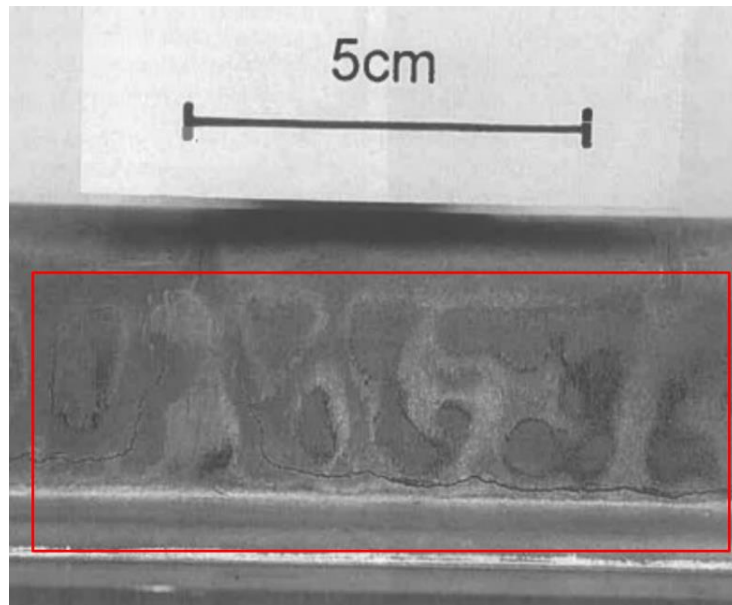
Da bi se izbjegla pojava nestaljenog područja treba obratiti pozornost na sljedeća moguća rješenja. Povećati brzinu ubrizgavanja kao i oblik i dimenzije uljevnog sustava koji vode do odljevka. Povećati tlak ubrizgavanja taline i skratiti vrijeme punjenja kalupa, izabrati leguru bolje tečljivosti, osigurati bolje, ujednačenije i glatko tečenje taline kroz kalupnu šupljinu, povećati temperaturu ulijevanja i temperaturu kalupa, te bolje odzračiti kalupnu šupljinu [18].



Slika 20. Greška kod tlačnog lijevanja, hladni zavar [18]

## 6.7. Tople pukotine

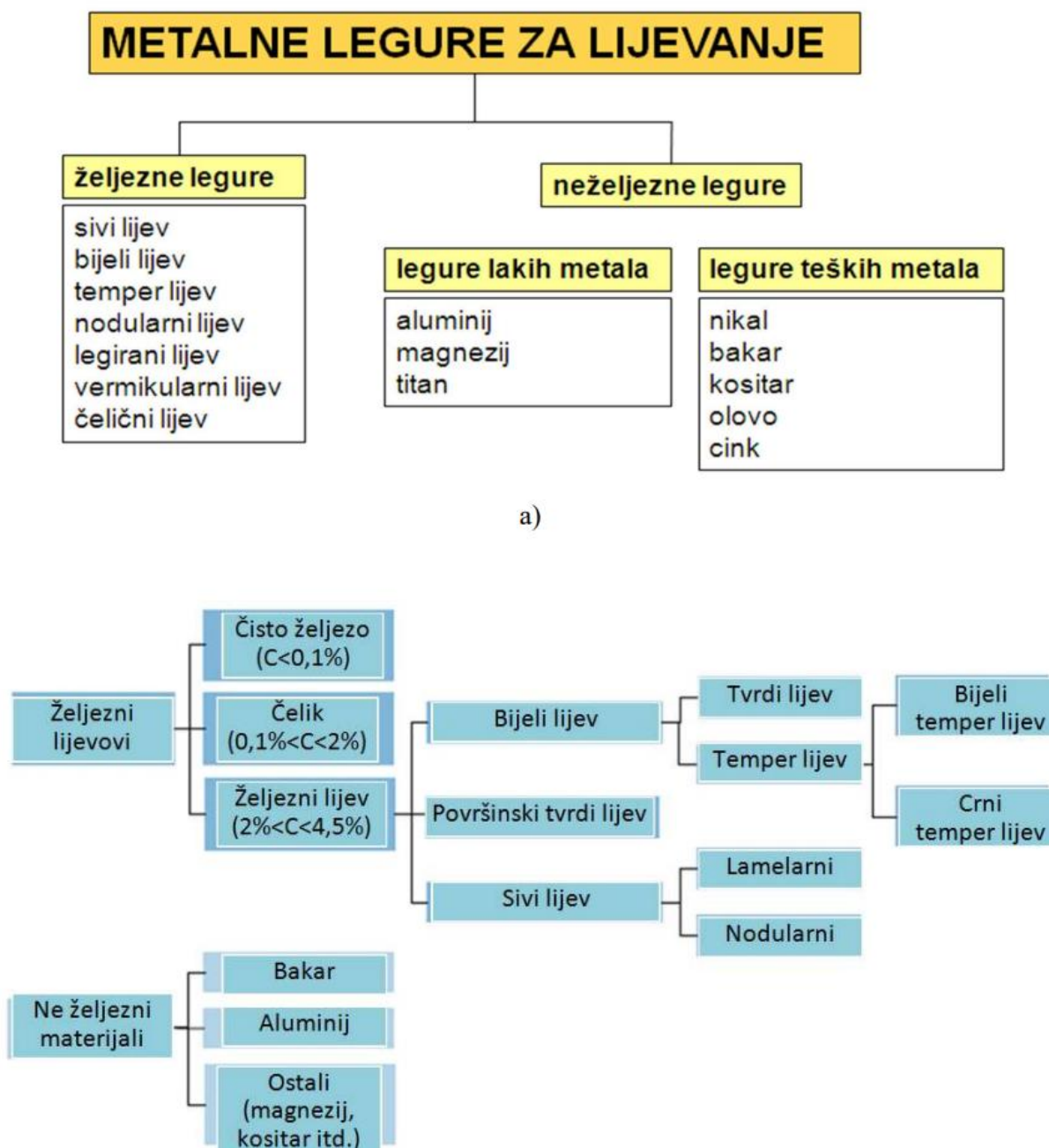
Tople pukotine su greške koje se javljaju kod legura s dugačkim intervalom skrućivanja i malim udjelom elemenata niskog tališta, primjer ove greške se može vidjeti na slici 21. Najčešće se javljaju kod lijevanja u trajne kalupe a rjeđe kod pješčanih kalupa. Uzrok toplih pukotina su unutarnja naprezanja tijekom skrućivanja. Neke aluminijske legure su posebno sklone pojavi toplih pukotina radi gore navedenih razloga. Ove pukotine nastaju na međukristalnim područjima materijala i mogu se protezati po cijeloj dužini odljevka. Tople pukotine su vidljive golim okom, ali da se vidi cijela slika pukotine potreban je detaljniji pregled [17].



**Slika 21. Prikaz tople pukotine kod tlačnog lijevanja [17]**

## 7. LEGURE U UPORABI KOD TLAČNOG LIJEVA

Gotovo uvijek se lijevaju legure, a ne čisti metali, razlog tome je što legure imaju bolja svojstva, ali i ih je i puno lakše lijevati. Legure su zajednički naziv za sve legirane metale. S vremenom postoji sve više vrsta legura, te se poboljšavaju stare. Osnovna podjela legura je na željezne i neželjezne legure, prema slici 22.



Slika 22. Dvije podjele ljevova na željezne i neželjezne legure[3]

U ovome radu je fokus na postupku tlačnog lijevanja tako da neće biti puno pisano o željeznim ljevovima jer se oni ne upotrebljavaju kod tlačnog lijevanja. Za tlačno lijevanje se najčešće koriste legure aluminija, bakra i magnezija kako je već prije navedeno. Kako bi se legura mogla lijevati pomoću tlačnog lijevanja mora imati sljedeća svojstva:

- Što niža temperatura lijevanja
- Dobra livljivost
- Niska sklonost otapanju plinova,
- Mala razina skupljanja tijekom skrućivanja kako ne bi došlo do raznih grešaka
- Ekonomičnost
- Dobra obradivost

## 7.1. Aluminijske legure

Aluminijske legure postaju sve više korištene u zadnje vrijeme radi svojih mehaničkih i fizikalnih svojstava. Najbitnija svojstva su odlična otpornost na koroziju u većini medija kao što je vlaga, slana atmosfera, petrokemikalije te kisela atmosfera. Sljedeće kvalitetno svojstvo je mala gustoća što znači i mala masa [13].

Aluminij ima gustoću svega  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , što je gotovo 3 puta manje od gustoće bakra ( $\rho_{\text{bakra}} = 8,93 \text{ g/cm}^3$ ), mjedi ( $\rho_{\text{mjedi}} = 8,53 \text{ g/cm}^3$ ) i čelika ( $\rho_{\text{čelika}} = 7,83 \text{ g/cm}^3$ ). Toplinski je visoko vodljiv što je pogodno za radijatore, motore itd. Nije feromagnetičan što ga čini pogodnim za industriju elektronike. Nije otrovan za ljude te se može koristiti u prehrambenoj industriji.

U okviru tlačnog lijeva najviše se koriste legure aluminija s bakrom, silicijem i magnezijem. Svrha legiranja je poboljšanje mehaničkih svojstava, ali i livljivosti. Kod aluminija bitno je poboljšati vlačnu čvrstoću, tvrdoću, krutost, rezljivost i livljivost. Najveći nedostatak aluminija, ali i aluminijevih legura je veliko volumno skupljanje tijekom skrućivanja koje se kreće između 3,8 % i 6,6 % [3].

### 7.1.1. Al-Si legure

Silicij je element koji pridonosi većoj livljivosti legure, te je kao takav najrasprostranjeniji legirni element, najčešće se legira u postotku od 10 - 13 %. Silicij također sprječava pojavu toplih pukotina te olakšava napajanje odljevka tokom skrućivanja. Silicij je pogodan kada se ne zahtijeva naknadna toplinska obrada, jer legiranje samo sa silicijem smanjuje mehaničku

obradivost i mehanička svojstva. Radi toga, Al-Si legure se dodatno legiraju s bakrom, magnezijem, cinkom i željezom. Dodavanjem bakra se smanjuje tvrdoća legure i povećava se otpornost na koroziju. Dodavanje magnezija u leguru do 0,3 % poboljšava mehanička svojstva i također poboljšava otpornost na koroziju, pogotovo na slanu vodu, ali zato smanjuje plastičnost, livljivost, te povećava skupljanje tijekom skrućivanja. Dodavanje cinka u Al-Si leguru omogućava dobru livljivost, manje lijepljenje za kalup. Legure s cinkom se dobro poliraju i samokaljive su [19].

### 7.1.2. Al-Cu legure

Aluminij bakar legure zadržavaju tražena mehanička svojstva na visokim temperaturama, također ova legura je dobro rezljiva i otporna na trošenje. Al-Cu legure su vrlo podložne toplim pukotinama radi visokog tališta. Dodavanjem bakra opada livljivost te je potrebno dodatno legiranje drugim elementima. U novije vrijeme se ova legura sve manje koristi i zamjenjuje s Al-Cu-Si legurom [20].

### 7.1.3. Al-Si-Cu legure

Ovo je jedna od legura koja se najviše upotrebljava u ljevarstvu u današnje doba. Kao što je ranije već rečeno silicij povećava livljivost, otpornost na tople pukotine i poboljšava antikorozivna svojstva, dok bakar povećava čvrstoću. Ova legura se primarno koristi u autoindustriji za izradu blokova motora i klipova [17].

### 7.1.4. Al-Mg legure

Magnezij se u Al-Mg leguri kreće između 10-30 %. Magnezij povećava otpornost na koroziju, pretežito na slanu vodu, te se najviše koristi u brodogradnji. Ova legura ima dobra mehanička svojstva, te se lagano vadi iz kalupa radi neljepljivosti. Nedostatak legiranja magnezijem je sklonost oksidaciji prilikom lijevanja i pojavi uključaka, također je livljivost relativno loša [20].

U nastavku će biti dan kratki opis kako svaki legirni element utječe kada je u leguri s aluminijem za bolji pregled:

- bakar – povećava tvrdoću te čvrstoću na sobnoj i u uvjetima povišenih temperatura, smanjuje otpornost na koroziju te smanjuje livljivost

- željezo – smanjuje tendenciju legure prema naljepljivanju taline na kalup unutar kalupne šupljine, smanjuje duktilnost, povećava čvrstoću (pogotovo pri povišenim temperaturama)
- olovo – povećava obradivost
- magnezij – temelj povišene čvrstoće kod toplinski obradivih Al legura, međutim kao samostalan element povećava otpornost na koroziju te estetski izgled površine
- silicij – drastično poboljšanje svojstava livljivosti te tečljivosti, najčešće korišten legirni element
- titan - često u kombinaciji s borom usitnjava zrno
- cink – samostalno se ne koristi međutim u kombinaciji s bakrom i magnezijem daje dobra svojstva toplinske obradivosti
- kositar – smanjuje trenje te se stoga koristi za proizvodnju ležajeva.

## 7.2. Legure cinka

Legure cinka očituje odlična livljivost, te se koristi za lijevanje tankostjenih i geometrijski složenih odljevaka. Nisu toliko otporne na koroziju kao bakrene legure, te se mogu dodatno prevlačiti. Dodavanjem magnezija može se povećati otpornost na interkristalnu koroziju. Legure cinka se lagano uklanjaju iz kalupa te se dobro poliraju. Često se koriste u automobilskoj industriji [17].

## 7.3. Legure bakra

Legure bakra imaju najbolja antikorozivna svojstva u odnosu na druge legure, te se koriste na mjestima podložnim slanoj vodi. Obradivost odvajanjem čestica je otežana, zato se zna legirati s olovom do 2,4 % kako bi se povećala rezljivost i otpornost na trošenje.

Mjed (legura s cinkom) ima dobru livljivost, bronca (legura s kositrom) nešto lošiju, bronca se također volumenski više smanjuje tijekom skrućivanja, zato se mjed više koristi u visokotlačnom lijevanju. Moguće je i legiranje sa silicijem kako bi se poboljšala tehnološka svojstva [21].

## 7.4. Legure magnezija

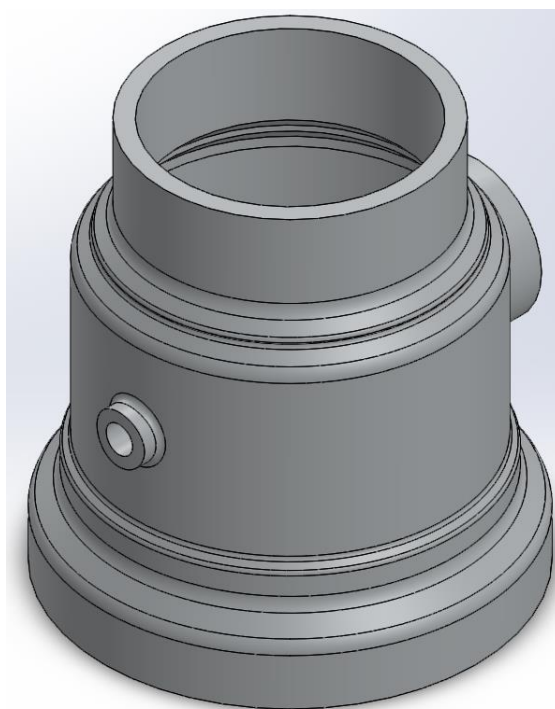
Legure magnezija imaju visoku sklonost oksidaciji i pojavi uključaka i poroznosti, također ove legure imaju niska mehanička svojstva. Zato se magnezij često legira s aluminijem i cinkom. Ovi elementi povećavaju otpornost na koroziju, te povisuju livljivost i čvrstoću.



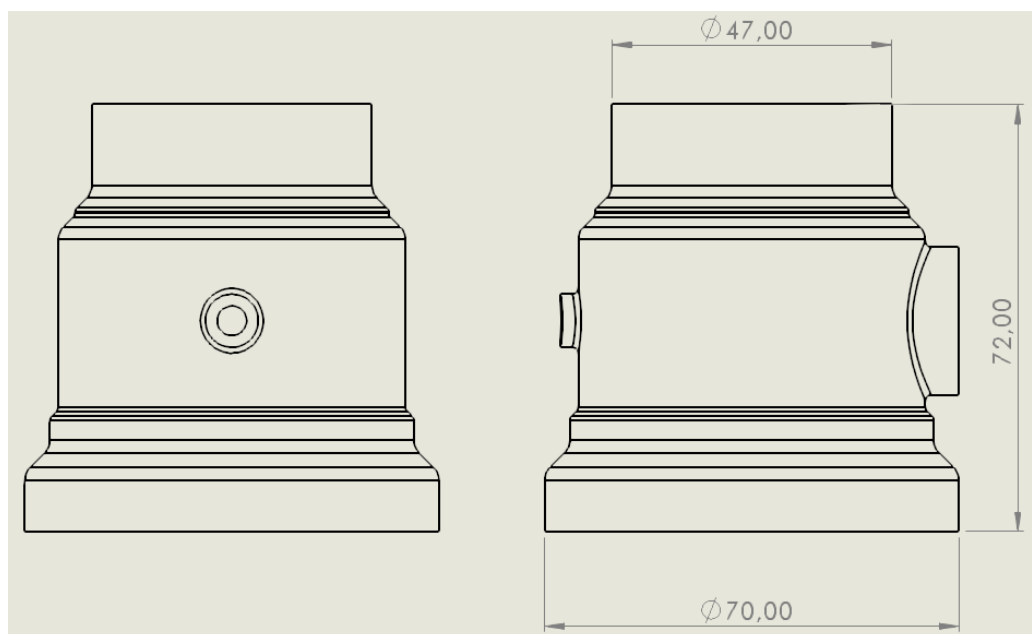
Legiranje s manganom povećava se istežljivost, žilavost i otpornost na udarce, ali smanjuje otpornost na abraziju. Zbog ovih svojstava legure s manganom se ne koriste u visokotlačnom lijevanju. Glavna karakteristika magnezijevih legura je mala gustoća, te time ima bolju specifičnu čvrstoću čak i od aluminijevih legura [21].

## 8. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovome radu zadatak je bio dimenzionirati sapnicu u jednom od softverskih paketa, te provesti simulaciju lijevanja aluminijske legure AlSi12. Za ovo su odabrani programi SolidWorks i ProCAST. U SolidWorksu je izrađen 3D model odljevka s uljevnim sustavom, dok je sama simulacija lijevanja provedena putem softvera ProCAST. Na slici 23. može se vidjeti 3D model kreirane sapnice, dok se na slici 24. mogu vidjeti dimenzije sapnice.



**Slika 23. 3D model sapnice kreirane u SolidWorks-u**



Slika 24. Gabariti sapnice

### 8.1. Proračun uljevnog sustava

Pomoću software-a SolidWorks, gdje je izrađen 3D model, također se određuje volumen modela, te on iznosi:

$$V = 2,6653 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 26,65 \text{ cm}^3$$

Gustoća aluminija iznosi:

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$$

Masa odljevka iznosi:

$$m = \rho \times V = 0,072 \text{ kg} = 72 \text{ g} \quad (1)$$

Gdje je:

$m$  – masa odljevka.

Za razliku od pješčanih kalupa, visoko tlačno lijevanje zahtjeva postojanje trajnih kalupa koji se mogu koristiti više puta, te svojim oblikom i dimenzijama daju oblik odljevku. Kalupna šupljina predstavlja negativ odljevka, ali kako taljevina mora nekako doći do odljevka

tako kalupna šupljina mora predstavljati i negativ cijelog uljevnog sustava potrebnog za pravilnu izradu odljevka s pripadajućim preljevnim džepovima koji osiguravaju pravilno punjenje i odzračnim kanalima koji rješavaju problem zaostalog zraka unutar kalupne šupljine.

Bitan dio kalupne šupljine predstavlja ušće. Ušće uvelike utječe na brzinu taljevine prilikom ulaska u kalupnu šupljinu. Kod konstruiranja i modeliranja kalupne šupljine bitan faktor je pravilno pozicioniranje ušća, kao i oblik i dimenzije tog ušća [22].

Svrha preljevnih džepova je da na sebe preuzimaju sve nečistoće i uključke koji se potencijalno mogu pronaći u taljevini, te je bitno njihovo pravilno pozicioniranje u kalupnoj šupljini. Nakon skrućivanja, ovi džepovi se uklanjaju od odljevka, kao i pojilo kod pješčanih ljevova te njihova spojnica s odljevkom mora biti što manja kako bi odvajanje bilo što lakše i manje vidljivo.

Svrha odzračnih kanala, kako ime kaže, je da kroz njih izađe zrak koji se nalazi u kalupnoj šupljini prije procesa lijevanja. Ne uklanjanjem zraka iz kalupne šupljine javlja se poroznost unutar kalupne šupljine i kao takav, odljevak je neispravan. Što je veća brzina popunjavanja kalupne šupljine, potrebni su odzračni kanali većih poprečnih presjeka.

Iskustveno, volumen preljevnih džepova, kako bi se osigurala njihova adekvatna funkcija, iznosi oko 35 % volumena samog odljevka. Ovaj postotak predstavlja volumen svih preljevnih džepova zajedno, a ne svaki džep pojedinačno [22].

$$V_p = 2,6653 \times 10^{-5} * 0,35 = 9,33 \times 10^{-6} m^3 = 9,33 \text{ cm}^3 = 9300 \text{ mm}^3 \quad (2)$$

Gdje je:

$V_p$  – ukupni volumen preljevnih džepova.

Broj preljevnih džepova se određuje eksperimentiranjem, ali nikad se ne postavlja samo jedan, već mnogo manjih. Isti se raspoređuju ravnomjerno po raznim lokacijama unutar kalupa. Često na najdeblje dijelove kalupne šupljine, te na krajnje dijelove kalupne šupljine.

U ovome primjeru, koristit će se 8 preljevnih džepova. Sa suprotne strane u odnosu na uljevni sustav stavljeno je 5 preljevna džepova. Ovih 5 džepova su većih dimenzija pošto se nalaze dalje od uljevnog sustava kako ne bi došlo do grešaka. Nadalje, još tri preljevna džepa stavljena su u blizini uljevnog sustava, ali su manjih dimenzija. Ovi džepovi su ravnomjerno raspoređeni po diobenoj ravnini kalupa kako bi se sa što većom vjerojatnošću izbjegla

poroznost uslijed zarobljenog zraka, ali i kako bi se sami odljevak mogao izvaditi iz kalupne šupljine. Izrađeni model se može vidjeti na slici 25.

Volumeni preljevniha džepova iznose:

$$V_1 = 3 \cdot 10 \cdot 20 = 600 \text{ mm}^3$$

$$V_{2,3} = 3 \cdot 10 \cdot 35 = 2\,100 \text{ mm}^3$$

$$V_4 = 3 \cdot 7 \cdot 35 = 735 \text{ mm}^3$$

$$V_5 = 12 \cdot 3 \cdot 45 = 1\,620 \text{ mm}^3$$

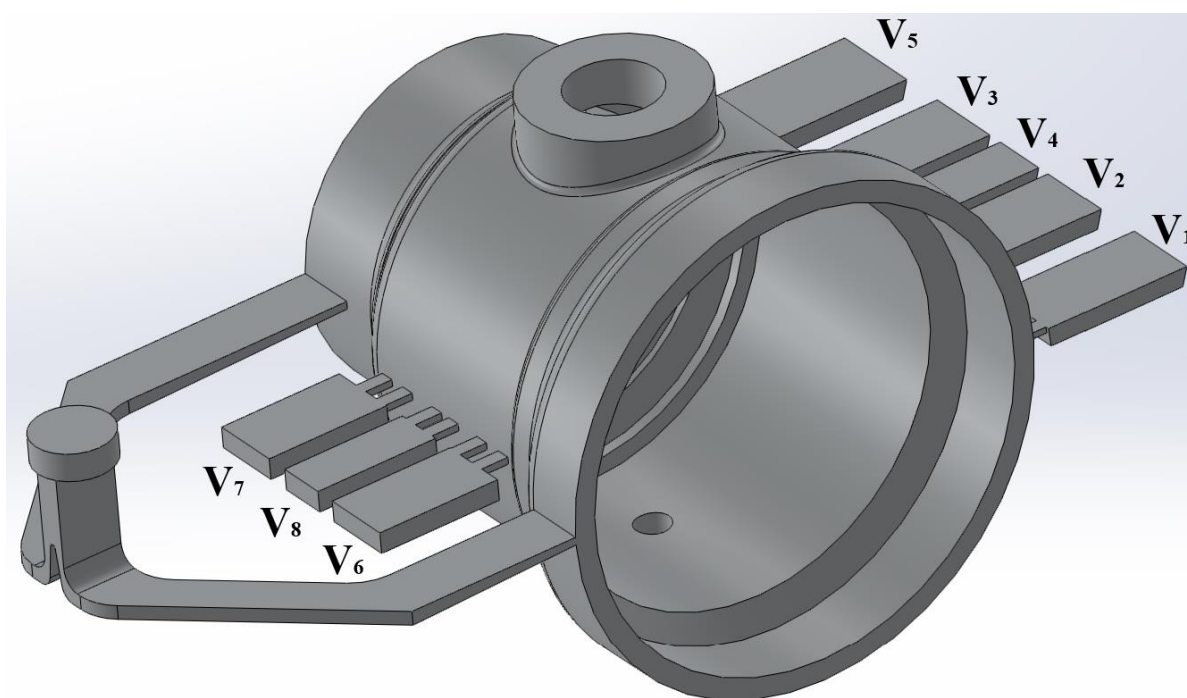
$$V_{6,7} = 3 \cdot 10 \cdot 18 = 1\,080 \text{ mm}^3$$

$$V_8 = 7 \cdot 3 \cdot 18 = 378 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{kanali}} = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 16 + 1505 = 1\,601 \text{ mm}^3$$

Ukupni volumen preljevniha džepova iznosi:

$$V_{\text{UK}} = 8\,113 \text{ mm}^3 = 8,113 \text{ cm}^3$$



Slika 25. 3D model sapnice s preljevnim džepovima

Usporedbom teorijskog i praktičnog volumena preljevanih džepova može se vidjeti kako volumen istih od 35 % mase samog odljevaka zadovoljava osnovne uvjete izrade kalupa kao vađenje odljevka i teoretski rješava problem poroznosti, praktično će to biti utvrđeno simulacijom. Što je volumen džepova veći kvaliteta odljevka se povećava, ali se povećava dodatni materijal koji ne pridonosi dobiti nekog poduzeća te je bitno konstrukcijski optimirati proces kako bi se pronašao optimalni kompromis između kvalitete i troškova poduzeća. Iskustveni podaci pokazuju kako je baš vrijednost od 35 % dobar kompromis između ova dva faktora, te se nastavlja s tom vrijednošću.

Konačan volumen se dobiva zbrajanjem volumena modela sapnice i preljevanih džepova, te iznosi:

$$V_{uk} = 26,653 + 9,33 = 35,983 \text{ cm}^3 \quad (3)$$

Gdje je:

$V_{uk}$  – ukupni volumen modela sapnice i preljevanih džepova.

Sljedeći parametar koji je potrebno izračunati je vrijeme lijevanja. Parametri koji su najbitniji kod određivanja vremena lijevanja su: fizikalna svojstva taline, najmanja debljina stijenke, toplinska svojstva kalupne šupljine, volumen negativna kalupne šupljine koji uključuje odljevak i preljevne džepove te brzina ulaska taljevine kroz ušće u kalupnu šupljinu. Što je veća brzina ulaska taljevine u kalupnu šupljinu, mehanička svojstva odljevka su bolja, također se smanjuje šansa za pojavu poroznosti, ali sile na kalupnu šupljinu su veće te dolazi do bržeg trošenja kalupa. Zato treba pronaći kompromis između ovoga dvoje. Iskustveni podaci govore kako je optimalno uzeti brzinu taljevine od 40 m/s [22]. Ovime se izbjegava trošenje kalupa dok se u isto vrijeme održavaju relativno dobra mehanička svojstva. Dodatnim obraćanjem pažnje na konstrukciju uljevnog sustava i ušća može se utjecati na turbulenciju taljevine. Smanjivanjem turbulencija u toku taljevine u kalupnu šupljinu nastoji se izbjeći pojava poroznosti usred zarobljavanja zraka unutar taljevine. Ovo je iteracijski postupak kod kojeg se kroz nekoliko faza dolazi do adekvatnog rješenja. Pravo rješenje se tek može dobiti kod fizičkog lijevanja odljevka, ali simulacije mogu uvelike ubrzati i olakšati ovaj proces [22].

Podatak o vremenu lijevanja dobiva se indirektno preko volumenskog protoka taljevine na mjestu ušća. Držeći se vrijednosti brzine taljevine na ušću od 40 m/s, te konstruirane

površine poprečnog presjeka ušća od  $100 \text{ mm}^2$ , volumni protok taljevine na ušću te konačno vrijeme lijevanja iznosi:

$$q = v * A_u = 40 * 100 = 4000 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \quad (4)$$

$$t = \frac{V_{uk}}{q} = \frac{35,983}{4} = 9 \text{ ms} \quad (5)$$

Gdje je:

$q$  – protok u ušću

$v$  – brzina taljevine

$A_u$  – presjek ušća

$t$  – vrijeme lijevanja

$V_{uk}$  – volumen kalupne šupljine i odljevnih džepova.

Informacija o vremenu lijevanja omogućuje izračun brzine klipa koji je potreban da se takvo lijevanje ostvari. Kako je promjer klipa jednak 35 mm, brzina klipa iznosi:

$$v_k = A_u * \frac{v}{A_k} = 100 * \frac{9}{\left(\frac{0,35}{2}\right)^2 * \pi} * 10^{-4} = 0,94 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6)$$

Gdje je:

$A_k$  – površina klipa

$v_k$  – brzina klipa.

Nakon definiranja vremena trajanja popunjavanja kalupne šupljine i brzine taljevine. Potrebno je odrediti dimenzije i položaj odzračnih kanala [22]. Za brzinu zraka uzeti će se najgori slučaj od 200 m/s. Ova vrijednost predstavlja najveću brzinu kretanja zraka unutar kalupne šupljine s obzirom na tehnologiju lijevanja.

$$A_0 = \frac{V_{uk}}{v_s} = \frac{35,983}{200} * 10^3 = 20 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

Gdje je:

$A_0$  – površina odzračnih kanala

Odzračni kanali se najčešće konstruiraju tako da imaju pravokutni poprečni presjek s jednom stranicom dvostruko duljom od druge. Prema formuli, dimenzije odzračnih kanala su sljedeće [22] :

$$4 * x * 2x \geq 20 \quad (8)$$

Gdje je:

$x$  – visina pravokutnika

$2x$  – širina pravokutnika

Iz ove formule dobivaju se visina i širina odzračnih kanala:

Visina: 1,58 mm

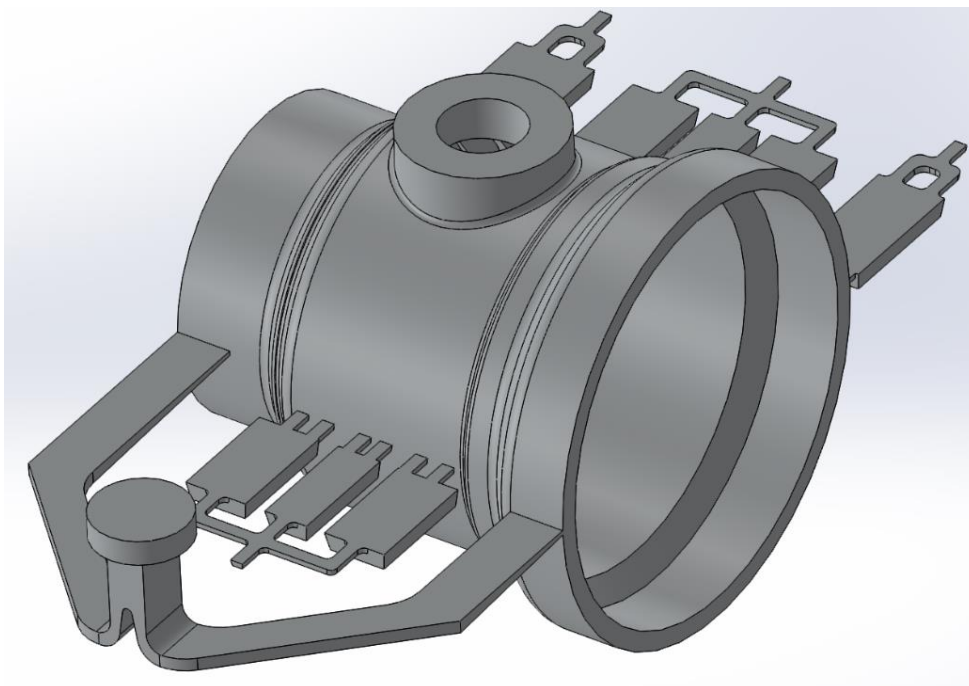
Širina: 3,16 mm

Ukupna površina poprečnog presjeka odzračnih kanala iznosi:

$$A_{O_{uk}} = 4 * 1,58 * 3,16 = 19,97 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

Valja uočiti da je broj odzračnih kanala jednak broju preljevniha džepova. Usporedbom teorijske i stvarne površine poprečnog presjeka odzračnih kanala dolazi se do zaključka da su oni pravilno proračunati te će kao takvi minimizirati volumen zarobljenog zraka u kalupnoj šupljini. Izrađeni model se može vidjeti na slici 26.





**Slika 26. 3D model sapnice s uljevnim sustavom, preljevnim džepovima i odzračnim kanalima**

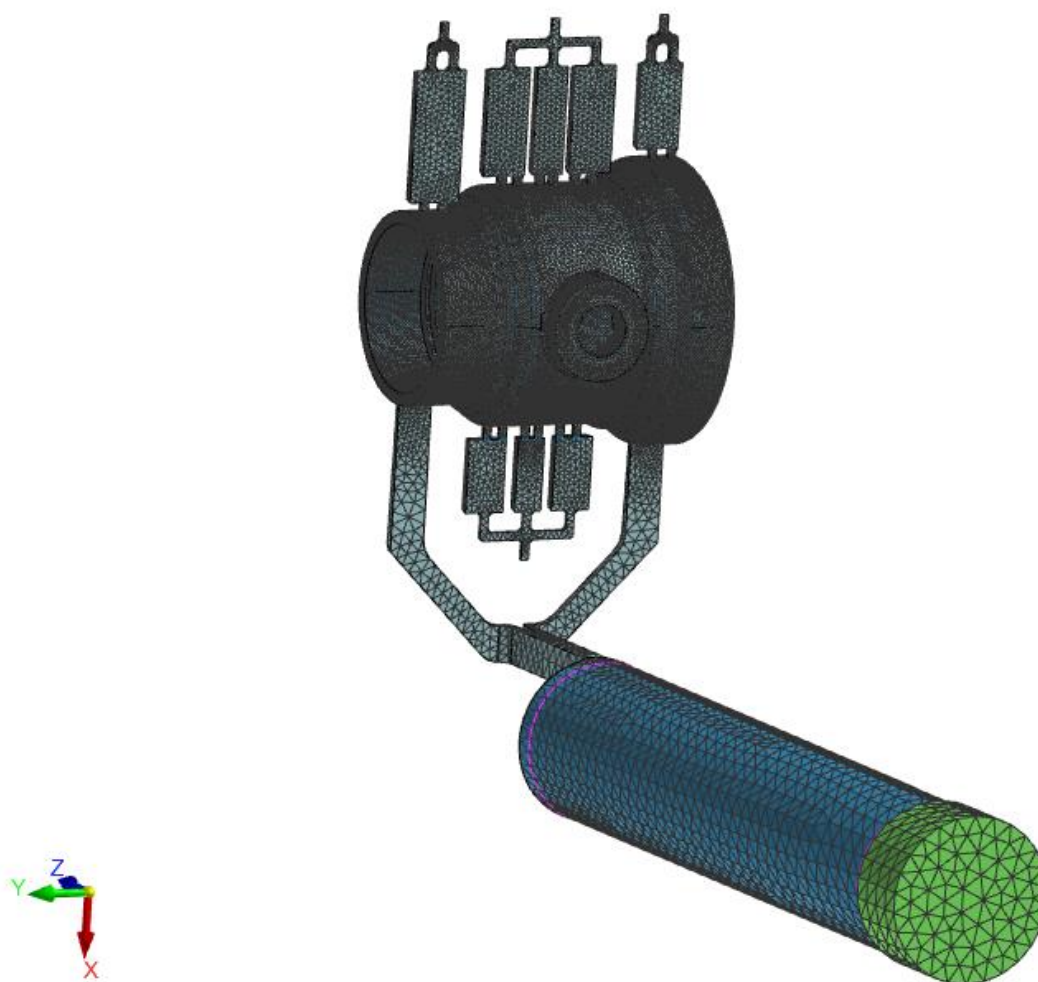
## **8.2. Simulacija lijevanja u programu ProCAST**

U svrhu provjere koncepta i dobivanja uvida u korektnost lijevanja odljevka napravljenog u programu SolidWorks. Vršiti se simulacija lijevanja u programskom alatu ProCAST. Ovo je napredni program namijenjen specifično raznim vrstama lijevanja kako bi se skratila vremena izrade gotovih proizvoda, te dobio uvid o tome kako se taljevina kreće unutar kalupne šupljine i kako se sami proces može unaprijediti. ProCAST koristi metodu konačnih elemenata za proračun punjenja i skrućivanja. Postupak se sastoji od definiranja materijala odljevka, klipa i alata. Nakon toga se kreira mreža konačnih elemenata u željenoj veličini elemenata. Veličina elemenata je obrnuto proporcionalna s dužinom trajanja simulacije te kvalitete opisa gibanja taljevine. Ali isto tako što je veći broj elemenata procesiranje traje duže te je potrebno kvalitetnije računalo za izvedbu simulacija. Metoda konačnih elemenata je alat koji preko parcijalnih diferencijalnih jednažbi omogućava jednostavno rješavanje prethodno spomenutih problema. Kako se unutar ovog softvera rješavaju problemi mehanike fluida, prijenosa topline na kalup te kretanja taljevine i vala, potrebno je rješavanje kompleksnih matematičkih funkcija. Također ovaj softver daje informacije i o ostalim rezultatima lijevanja kao što su moguće deformacije odljevka, dimenzijska odstupanja, zaostala naprezanja i životni

vijek trajanja kalupa što je korisno kako ne bi došlo do zastoja u pogonima, te da se pravovremeno izrade novi kalupi [23].

### 8.2.1. Priprema simulacije

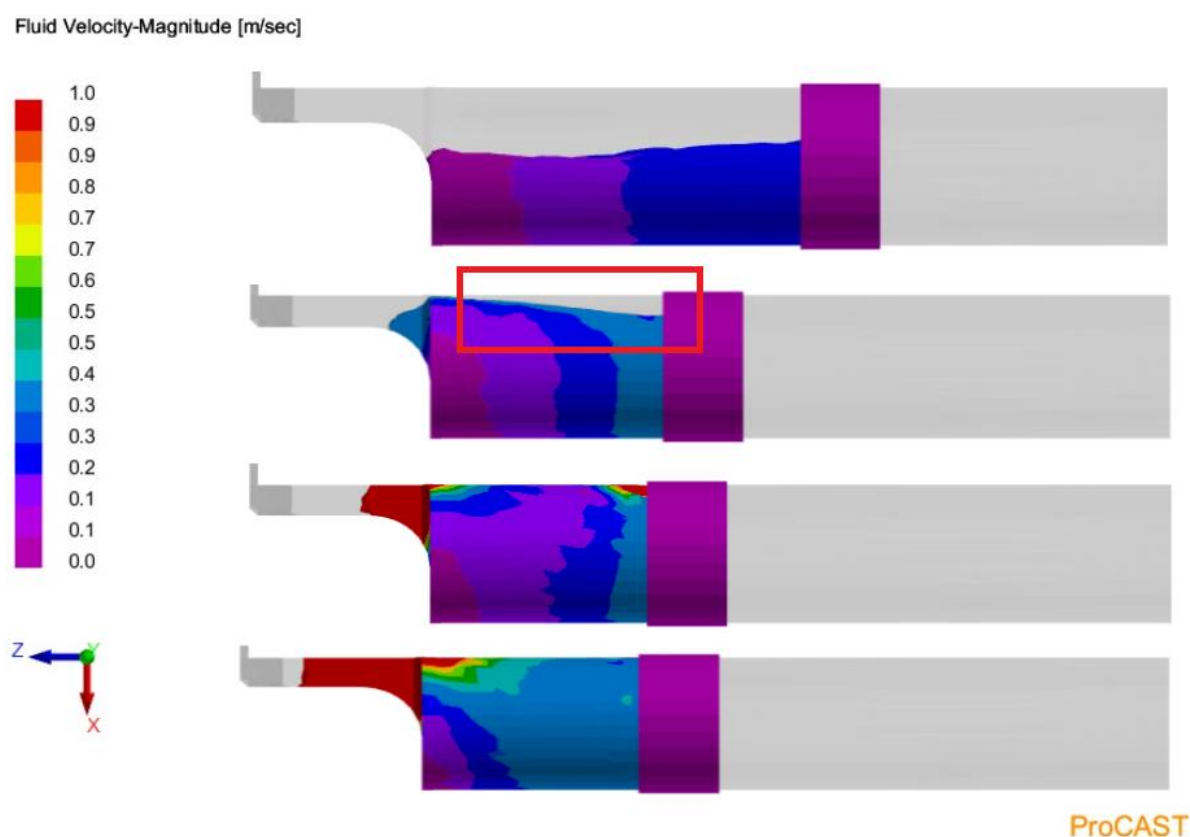
U prvom koraku, izrađeni model iz SolidWorksa bilo je potrebno ubaciti u softver ProCAST. Kako bi se to napravilo potrebno je kreirati model izvesti iz SolidWorksa u obliku STL datoteke. Kada je model ubačen u ProCAST, generira se površinska i volumenska mreža elemenata koja je nužna za uspješnu simulaciju. Model u ProCAST softveru se može vidjeti na slici 27.



Slika 27. Model odljevka s generiranom mrežom u ProCASTU

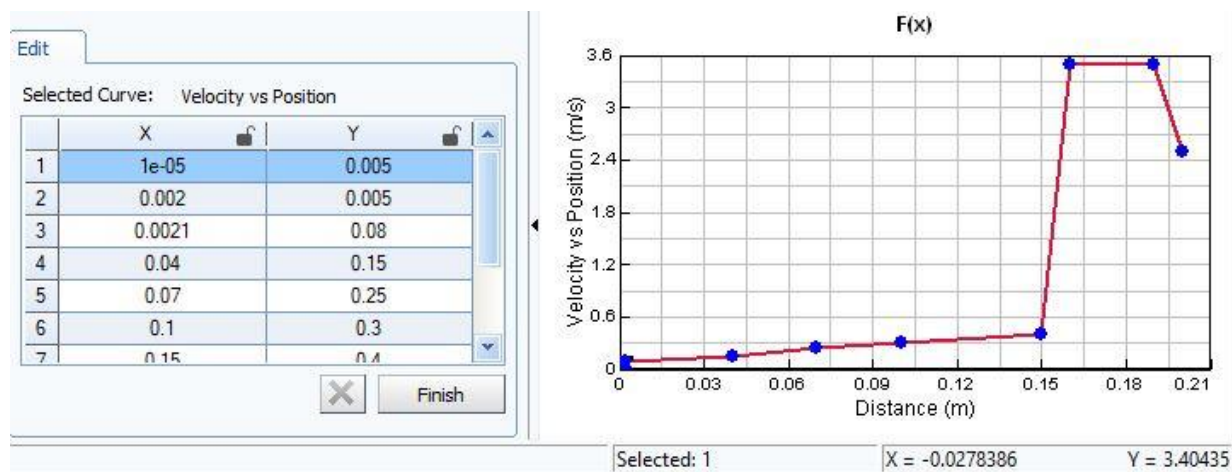
### 8.2.2. Gibanje klipa i popunjavanje kalupne šupljine

Na slici 28. prikazana je prva faza gibanja klipa unutar tlačne komore. Prva faza se sastoji od popunjavanja tlačne komore i kretanja taljevine do kalupne šupljine. Kako je napisano u točki 5.1.1.1, bitno je da ova brzina bude pravilno definirana kako ne bi došlo do zarobljavanja zraka unutar taljevine što bi kasnije uzrokovalo poroznost. Na ovoj slici se vidi kako brzina nije dovoljno velika jer dolazi do odbijanja taljevine od stijenke komore i povratnog hoda iste. Detalj je zaokružen crvenom bojom. Brzina klipa u prvom primjeru iznosi 0,4 m/s, te ju je potrebno povisiti kako bi se postigla kritična brzina taljevine.



**Slika 28. Simulacija gibanja tlačnog klipa, podkritična brzina**

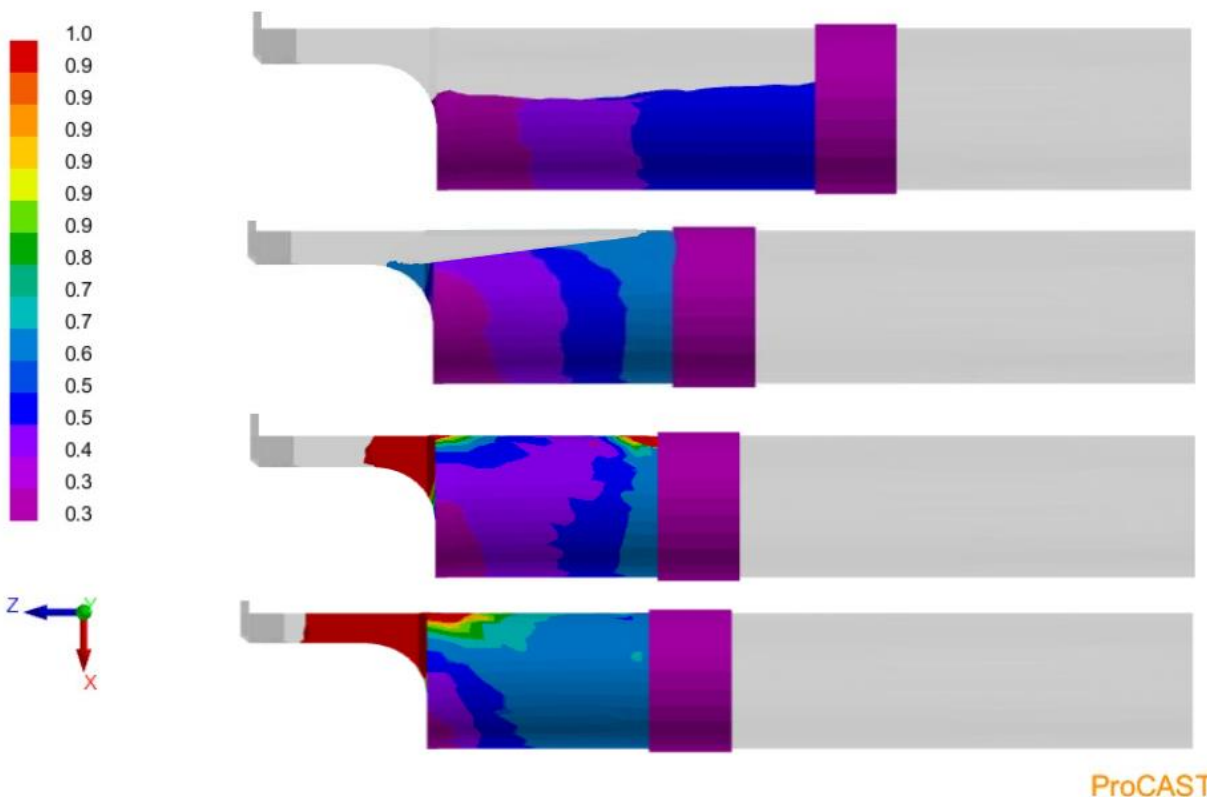
Na slici 29. je prikazan dijagram brzina – udaljenost. Ovaj dijagram prikazuje pojedine faze kretanja klipa isto kako je teoretski objašnjeno u točki 5.2.2. Prva faza predstavlja popunjavanje tlačne komore i dovođenje rastaljenog metala do ulaza u kalup, koje traje oko 2 sekunde. Druga faza predstavlja popunjavanje kalupne šupljine, kod koje brzina gibanja klipa naglo raste na višestruke vrijednosti. Treća faza je predstavljena povišenjem tlaka u već popunjenom kalupu. Tlak se održava sve dok se odljevnik ne skrutne.



Slika 29. Dijagram brzina-udaljenost tlačnog klipa

Kako bi se ovo ispravilo, potrebno je povećati brzinu klipa s podkritične na kritičnu brzinu. Povećanjem brzine klipa dobivaju se prihvatljivi rezultati, jer se postiže kritična brzina taljevine, te ne dolazi do zarobljavanja zraka unutar taljevine i odbijanja iste, rezultati se mogu vidjeti na slici 30.

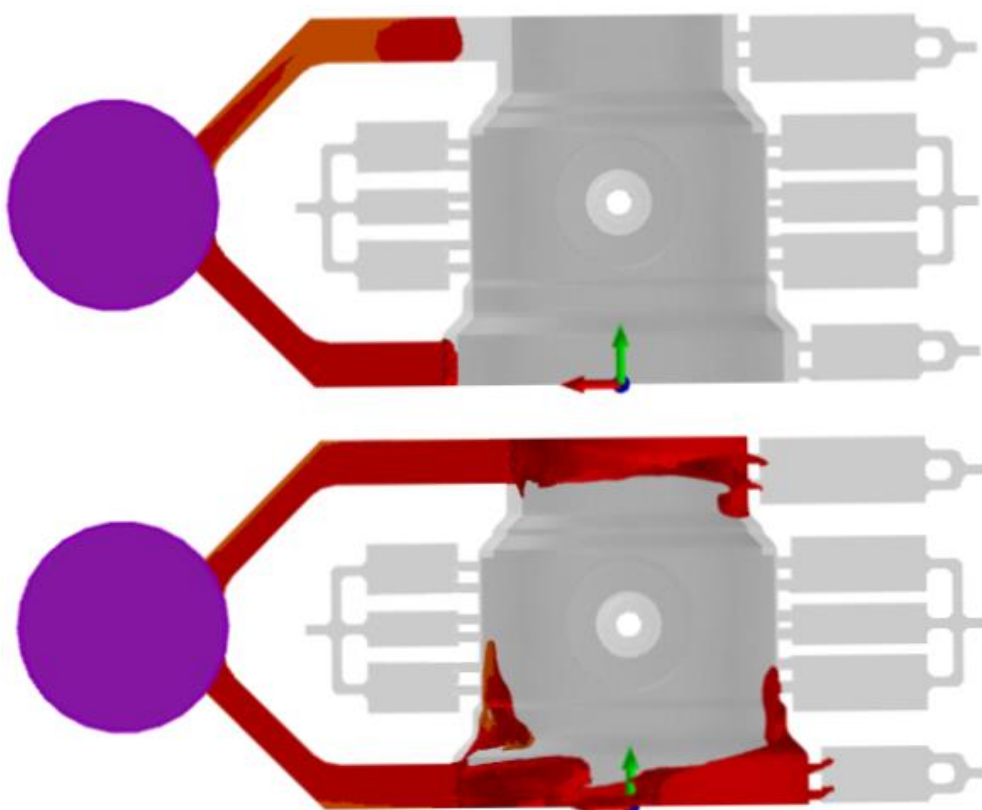
Fluid Velocity-Magnitude [m/sec]



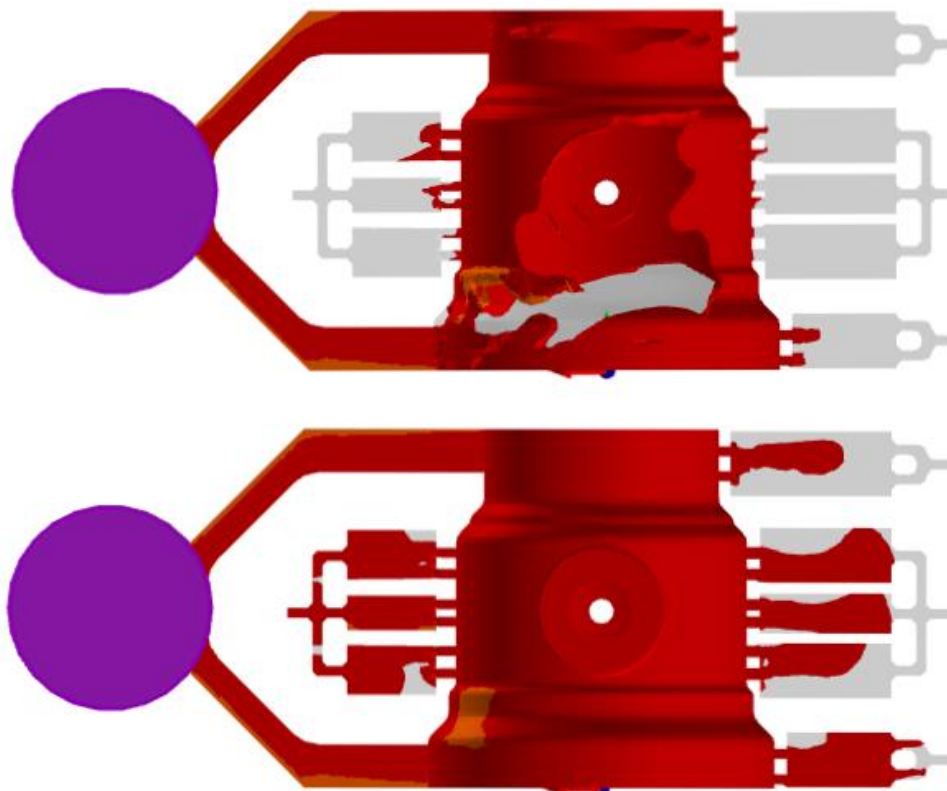
Slika 30. Simulacija gibanja tlačnog klipa, kritična brzina

### 8.2.3. Popunjavanje kalupne šupljine

U nastavku se prikazuje popunjavanje kalupne šupljine u određenim trenucima, prema slikama 31. i 32.. Kako je brzina popunjavanja kalupne šupljine velika, cijeli proces traje kraće od 1,5 sekundi. Ovakva brzina popunjavanja je pogodna kako ne bi došlo do hlađenja taljevine tijekom lijevanja. Na slikama se može uočiti kako na suprotnoj strani dolazi do sudara dviju taljevina s gornje i donje strane, ovo je potencijalno mjesto gdje može doći do pojave zarobljavanja zraka i nastajanja plinske poroznosti, te su na tim mjestima smješteni preljevni džepovi i odzračni kanali.



Slika 31. Početno popunjavanje kalupne šupljine

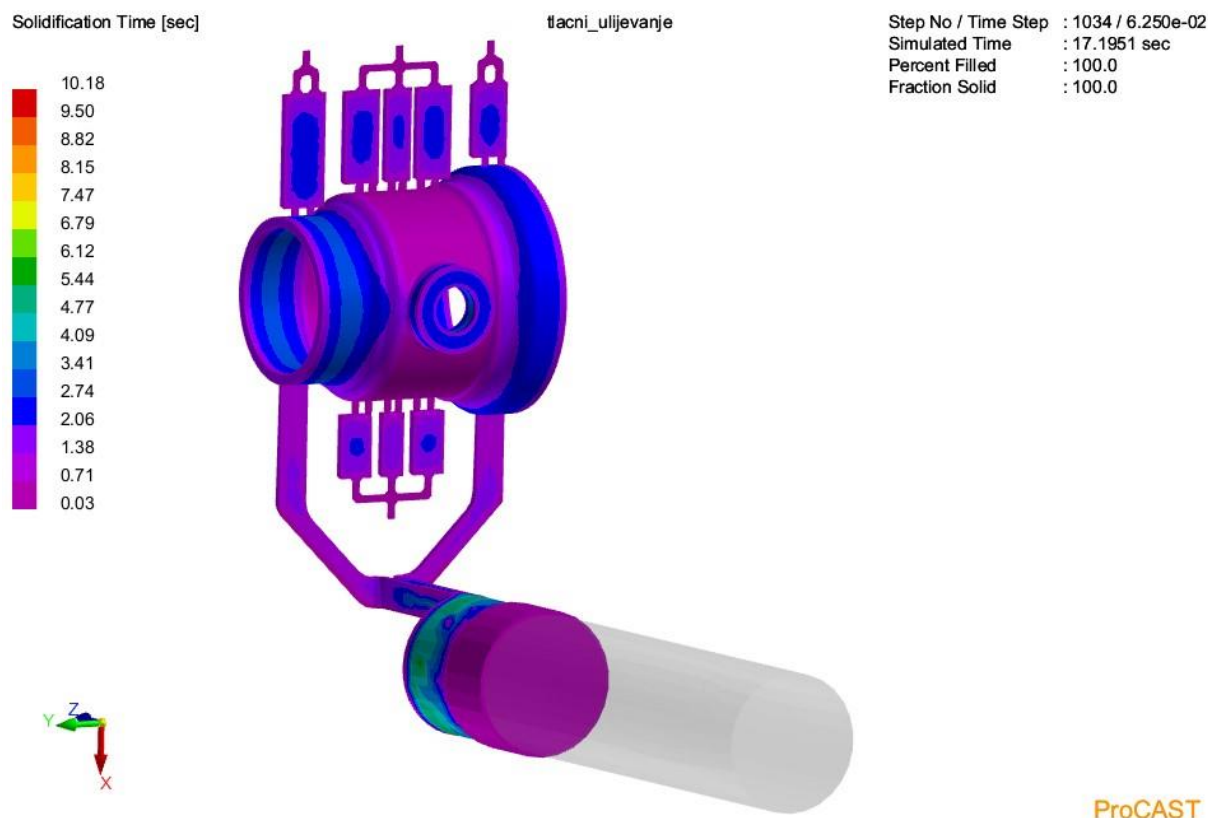


Slika 32. Završno popunjavanje kalupne šupljine

#### 8.2.4. Vrijeme skrućivanja

Na slici 33. može se vidjeti vrijeme skrućivanja odljevka nakon završetka lijevanja. Iz ove slike se može iščitati da će zadnje skrutnuti mjesta oko provrta na ulazu i izlazu iz sapnice, te dijelovi oko bočnih provrta na koje se smješta ručka s ventilom za kontrolu protoka. Ova mjesta predstavljaju kritične pozicije koji su potencijalni kandidati za pojavu grešaka tijekom hlađenja taljevine i skrućivanja uzrokovano skupljanjem materijala. Ali se također vidi kako je vremenska razlika između mjesta kojem je potrebno najviše vremena da se skrutne i mjesta kojem je potrebno najmanje vremena da se skrutne relativno mala, te iznosi oko 3 sekunde.



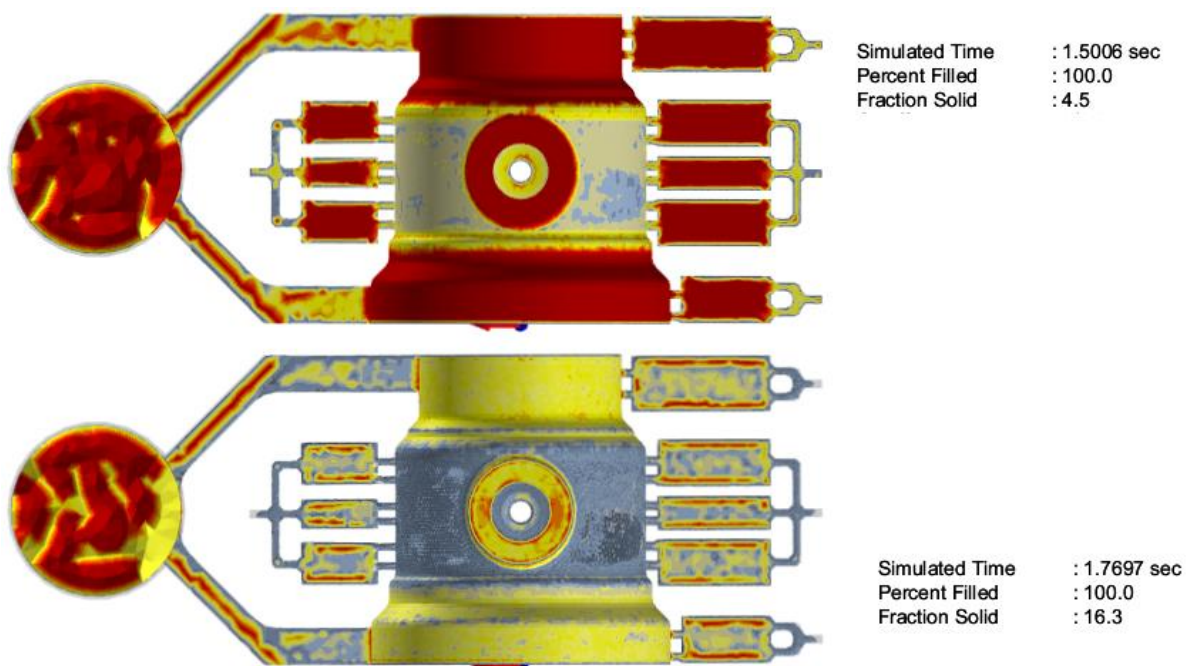


Slika 33. Vrijeme potrebno za skrućivanje određenih dijelova sapnice

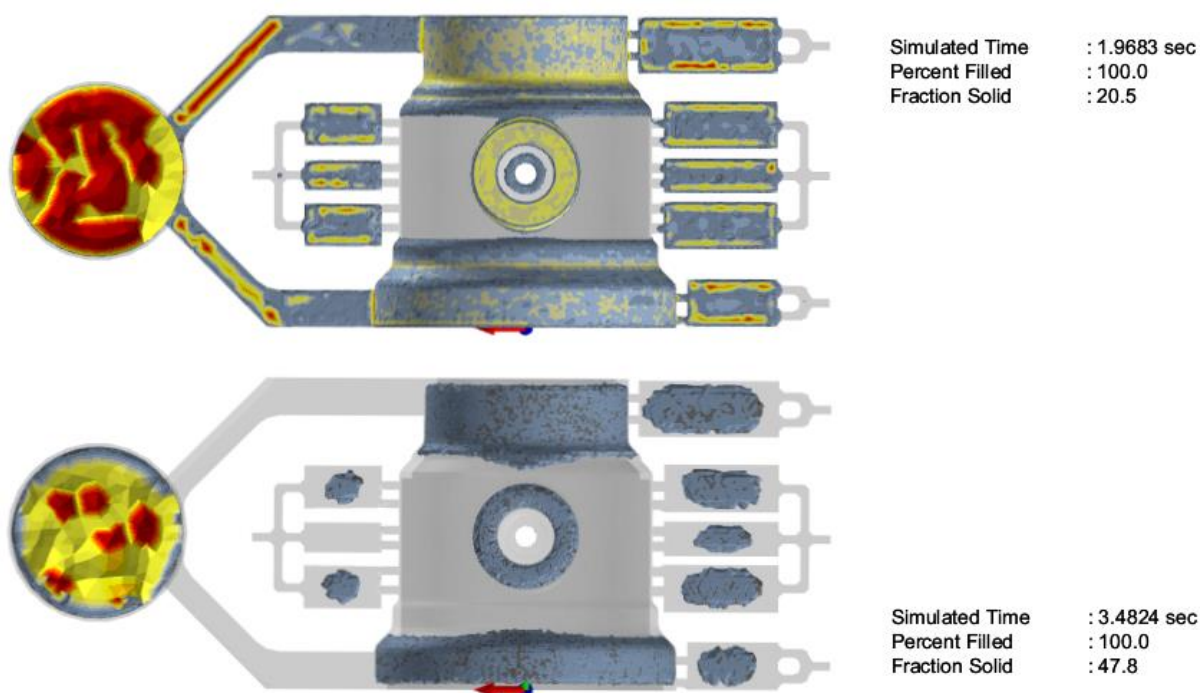
### 8.2.5. Udio krute faze

Na slikama 34. i 35. prikazan je proces skrućivanja taljevine u kalupnoj šupljini. Optimalna situacija bi bila kada bi se u kalup postavili kanali za hlađenje kalupne šupljine da se postigne ravnomjerno hlađenje.

Vrijednost „Fraction Solid“ predstavlja postotnu vrijednost kod koje je došlo do skrućivanja. Na trećem koraku se može uočiti kako je središnji dio sapnice već gotovo u potpunosti skrutnuo dok su dijelovi oko provrta tek u početnoj fazi skrućivanja. U zadnjem koraku se mogu vidjeti ne skrutnuti dijelovi sapnice, te kako je pisano i u prijašnjim odlomcima, ovo su potencijalna mjesta pojave greške.



Slika 34. Udio krute faze – 4,5 % i 16,3 %



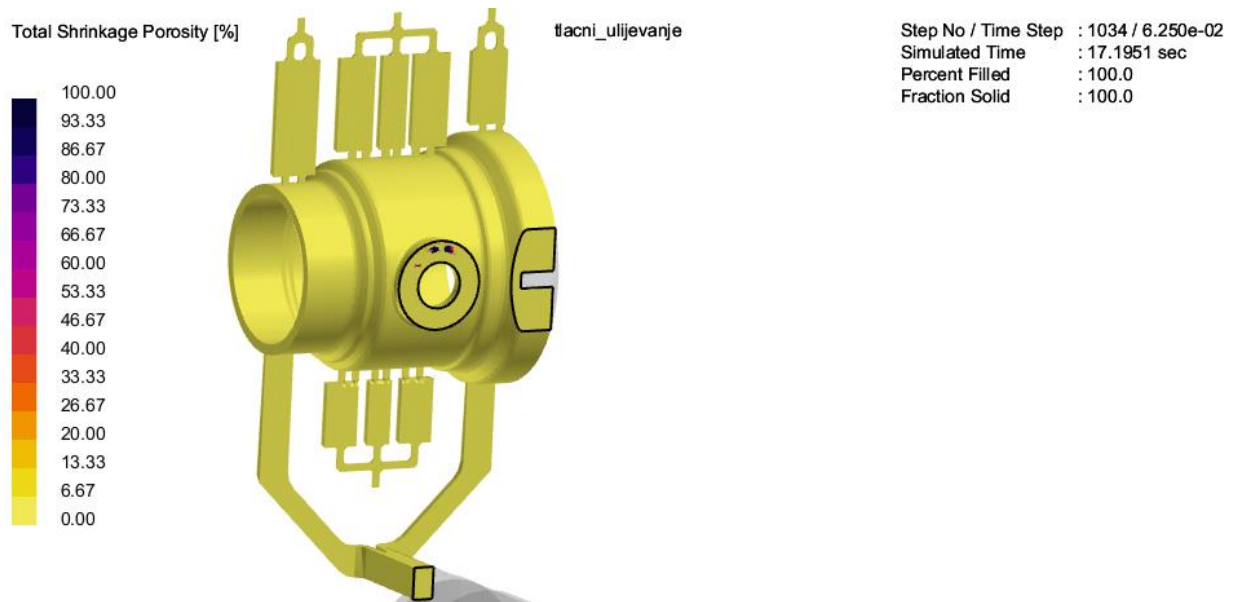
Slika 35. Udio krute faze – 20,5 % i 47,8 %

### 8.2.6. Poroznost na odljevku uslijed skupljanja

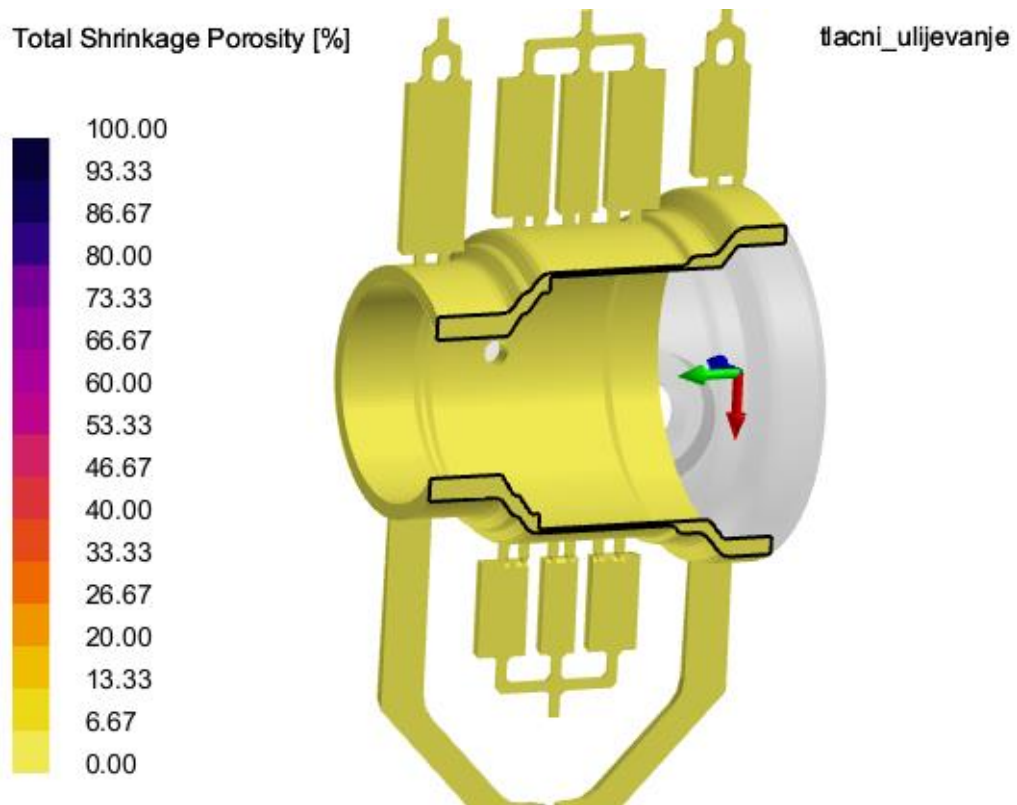
Na slikama 36., 37. i 38. prikazani su presjeci sapnice, te greške poroznosti uslijed skupljanja s vjerojatnošću pojave većom od 50 %. Kao što je pretpostavljeno u odlomcima



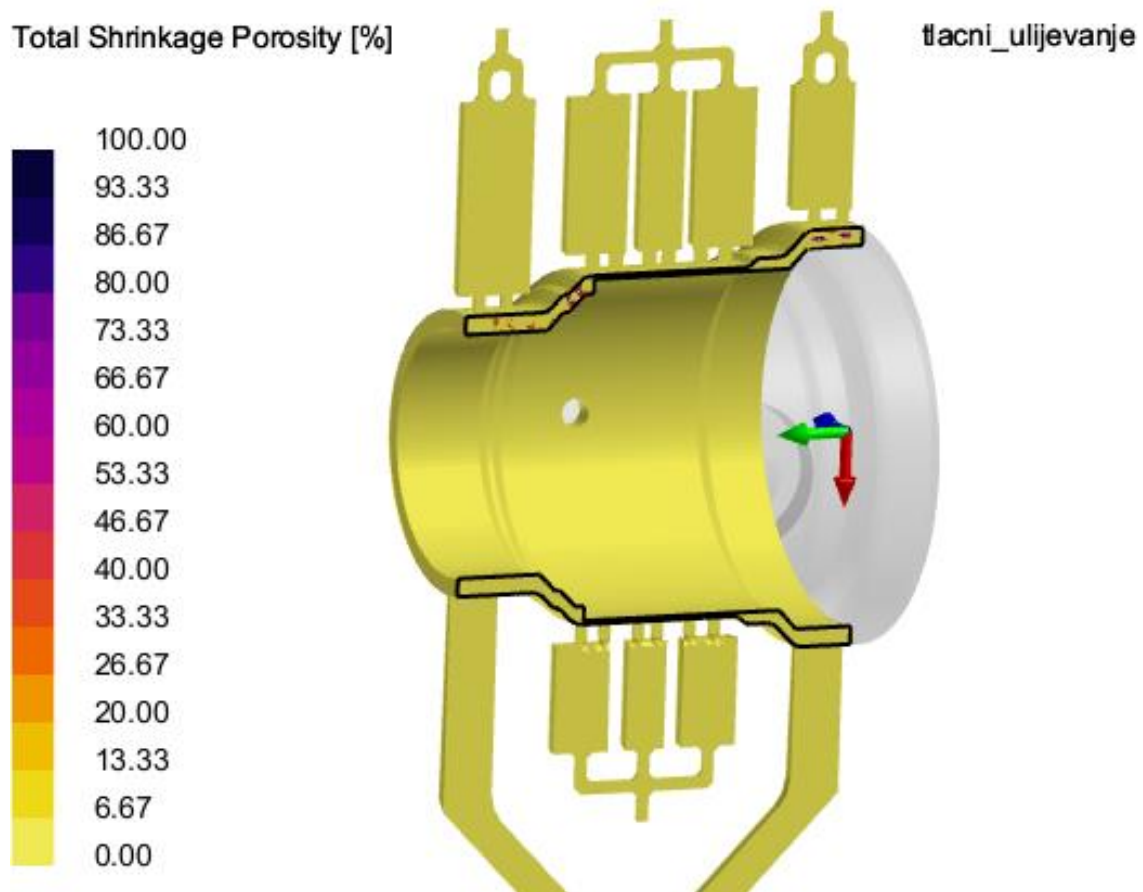
8.2.4. i 8.2.5. poroznost uslijed skupljanja se javlja na mjestima oko bočnih i horizontalnih provrta jer su to mjesta koja će zadnja skrutnuti.



Slika 36. Presjek 1 - poroznost odljevka kod horizontalnog provrta

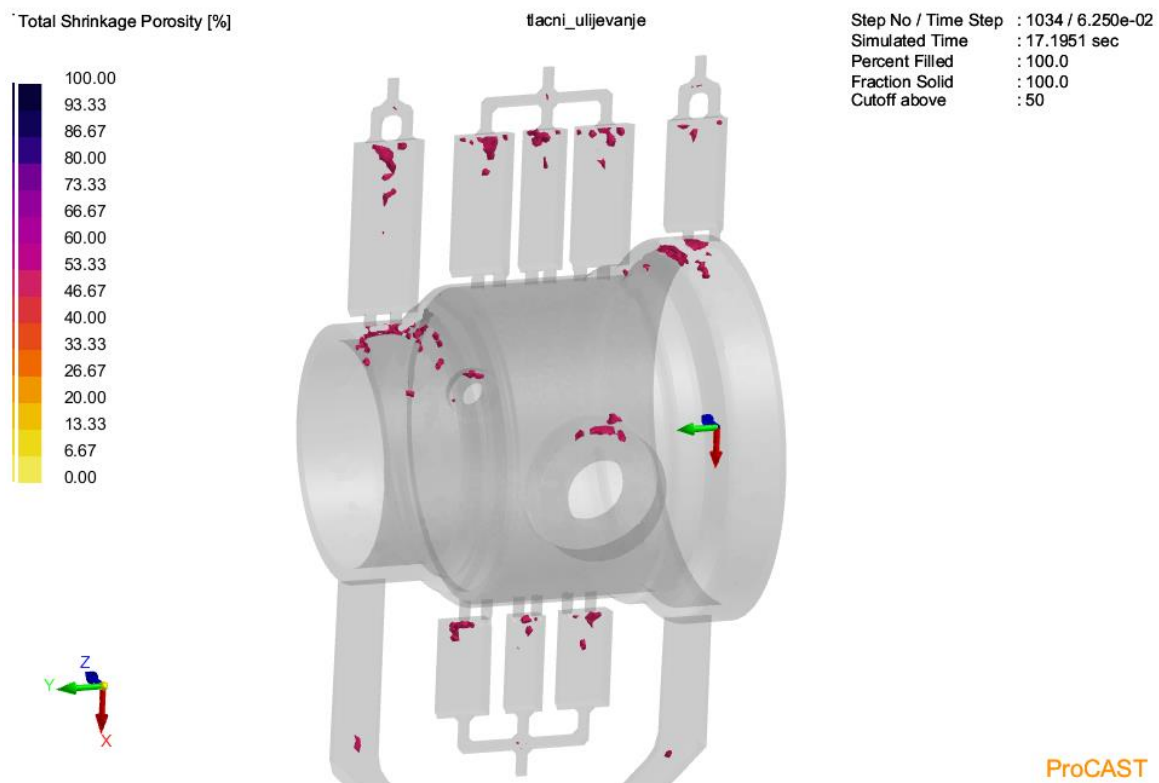


Slika 37. Presjek 2 - ne postojanje poroznosti



Slika 38. Presjek 3 - poroznost na diobenoj ravnini

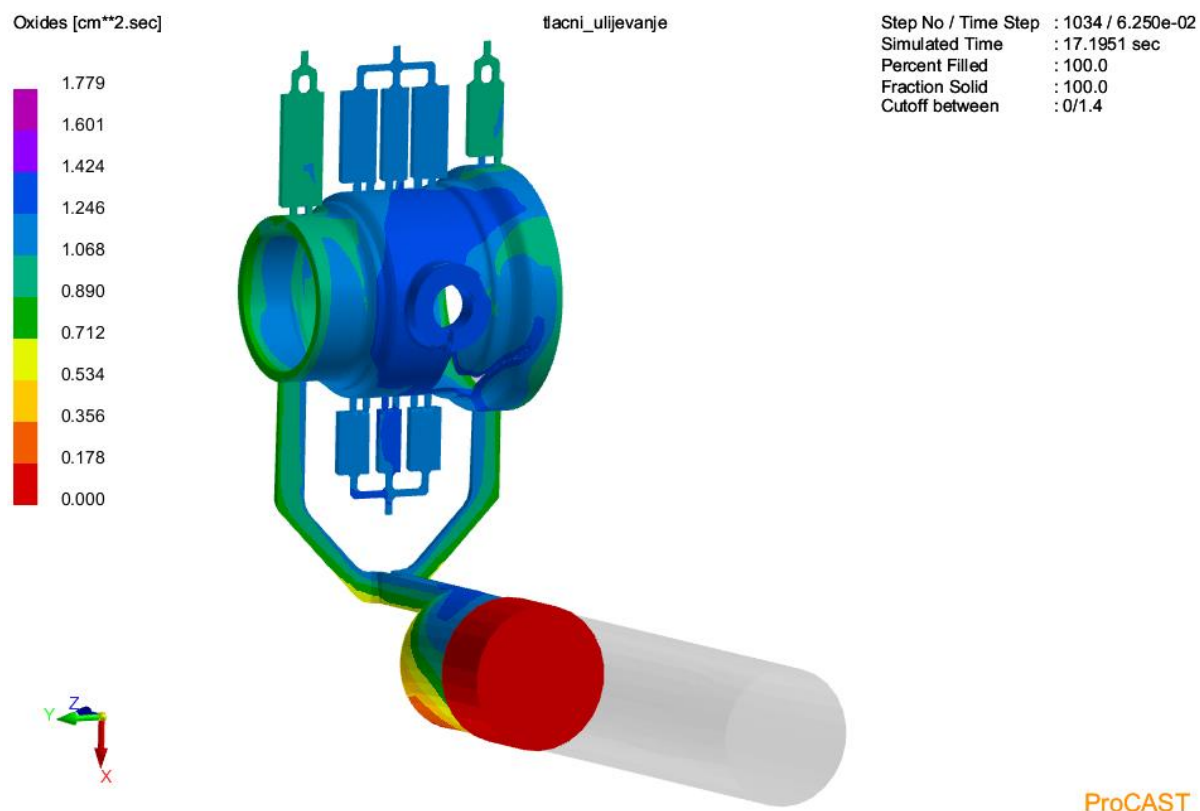
Na slici 39. se može vidjeti ukupna poroznost uslijed skrućivanja na cijeloj sapnici s vjerojatnošću pojave preko 50 %, koja potvrđuje prethodne pretpostavke o lokacijama grešaka.



Slika 39. Prikaz potencijalnih poroznosti sa vjerojatnošću javljanja većom od 50 %

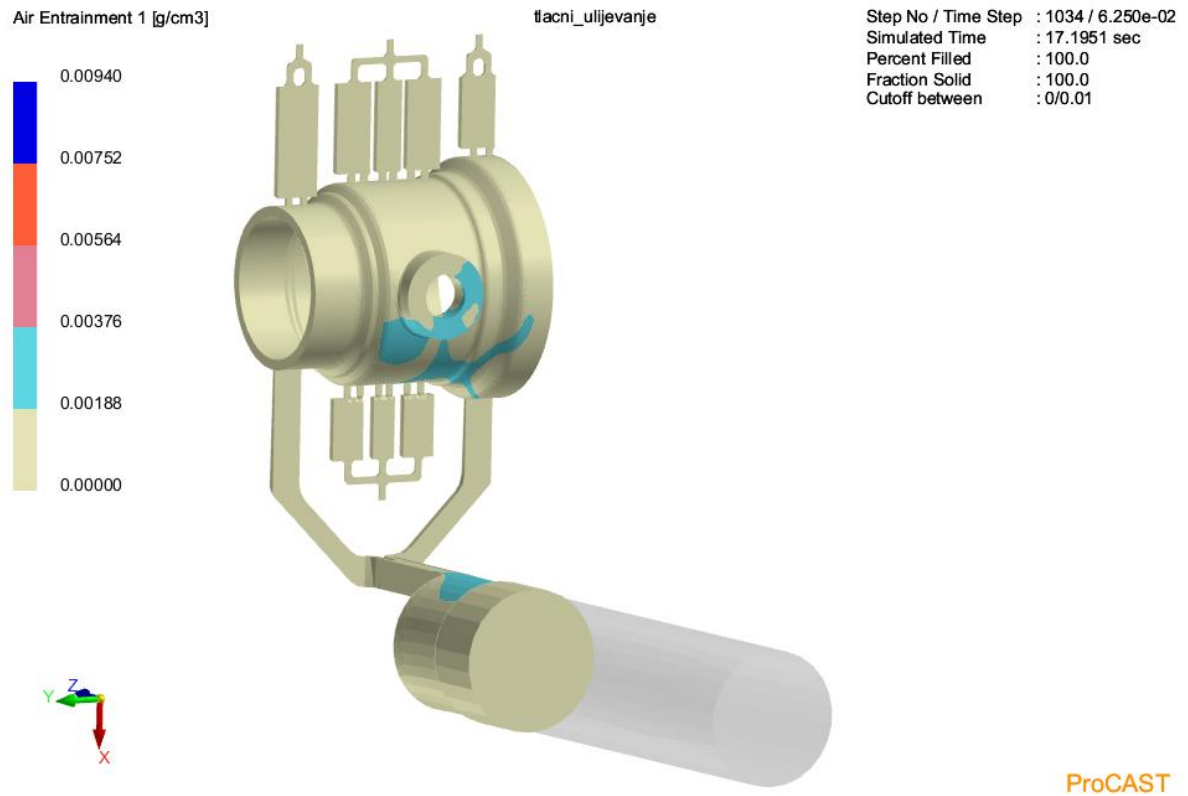
### 8.2.7. Zarobljeni zrak i oksidi

Slika 40. prikazuje rezultate simulacije zarobljenih oksida. Prema ovoj slici može se vidjeti kako je najveća koncentracija oksida kod bočnih provrta gdje dolazi ručka za kontroliranje protoka. Iako ni ove vrijednosti nisu velike. Kritičnu koncentraciju predstavljaju iznosi veći od  $1,4 \text{ cm}^2/\text{s}$ , dok se na slici vidi da je koncentracija oksida oko  $1,3 \text{ cm}^2/\text{s}$ .



Slika 40. Koncentracija oksida u odljevku

Na slici 41. mogu se vidjeti rezultati zarobljenog zraka unutar taljevine. Najviše zarobljenog zraka se nalazi oko bočnog provrta. Što se može riješiti uporabom odzračnika, tako da se isti smjesti na poziciju gdje je koncentracija zraka najveća. Ovaj rezultat simulacije ima smisla jer su parametri koncentracije oksida i zarobljenog zraka povezani, te zajedno koreliraju.



Slika 41. Prikaz zarobljenog zraka u taljevini

## 9. ZAKLJUČAK

U ovome radu dan je osvrt na tehnologiju visokotlačnog lijevanja. Navedene su prednosti ove metode obrade metala kao što je visoki stupanj automatizacije te brzi ciklusi obrade i lako postizanje masovne proizvodnje. Odljevci proizvedeni visokotlačnim lijevanjem imaju dobra mehanička svojstva te visoku dimenzijsku točnost. Površinska obrada je u dosta slučajeva minimalna ili nepotrebna. Postupak visokotlačnog lijevanja se radi ovih karakteristika masovno upotrebljava u zahtjevnim industrijama kao što su automobilska i zrakoplovna industrija, ali i u velikom broju drugih industrija. Postoji veliki broj legura koje se mogu lijevati tlačnim lijevom, time raste kompleksnost ovoga postupka, ali svaka legura ima svoje prednosti i nedostatke i treba znati kada koju koristiti.

Iako tehnologija lijevanja postoji već više od 5 000 godina. I dalje se vrši veliki broj istraživanja u ovom području time se razvijaju nova poboljšanja ove metode lijevanja te kompleksnost odljevaka raste s vremenom kao i broj parametra potrebnih za dimenzioniranje.

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada napravljena je konstrukcija uljevnog sustava sapnice i simulacija visokotlačnog lijevanja u programima SolidWorks i ProCAST. Prvo je konstruirana sapnica u programu SolidWorks s pripadajućim uljevnim sustavom, preljevnim džepovima i odzračnim kanalima prema općenitom proračunu za proces tlačnog lijevanja. Time su dobiveni početni podaci o dimenzijama preljevnih džepova te o dimenzijama ušća, kao i vrijeme lijevanja u odnosu na promjer tlačnog klipa i presjek ušća.

Zatim je simulirana brzina tlačnog klipa, te se ispostavilo kako je ista preniska, to jest podkritična čime nastaje povratni val taljevine usred pomicanja tlačnog klipa, što uzrokuje zarobljavanje zraka unutar taljevine. U drugoj iteraciji brzina tlačnog klipa povećana je na kritičnu čime je osigurano da ne dođe do zarobljavanja zraka unutar taljevine i do kasnijih grešaka unutar kalupne šupljine.

Nakon toga provedena je cjelokupna simulacija. Praćeno je popunjavanje kalupne šupljine i sudaranje taljevine. Zatim je određeno vrijeme skrućivanja i koji dio odljevka se zadnji skrutnuo. Ukupno vrijeme skrućivanja je iznosilo 6,1 sekundu, dok je središnji dio sapnice već skrutnuo nakon 1,96 sekundi. Simulacijom skrućivanja ustanovljena su zadnja mjesta skrućivanja oko bočnih provrta, na kojima se pojavila poroznost skupljanja. Praćenjem zarobljenog zraka i oksida zaključeno je kako su najveće šanse za pojavu zračne poroznosti i oksida također na mjestima oko bočnih provrta gdje se kasnije montira ručka za kontrolu

protoka. Ovakav zaključak ima smisla jer na tim mjestima nisu smješteni odzračnici i preljevni džepovi, a kako bi se osigurao odljevak bez grešaka, trebalo bi na ta mjesta dodati odzračnici i preljevni džepovi za prihvatanje prve taljevine i izlazak zraka iz kalupa.



## LITERATURA

- [1] History of Metal Casting : [https://mimoza.marmara.edu.tr/~altan.turkeli/files/cpt-1-history\\_of\\_metal\\_casting.pdf](https://mimoza.marmara.edu.tr/~altan.turkeli/files/cpt-1-history_of_metal_casting.pdf), Pristupljeno 10.10.2024.
- [2] Bauer, B., Mihalic Pokopec, I.: Osnove tehnologije lijevanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3] Bauer, B., Mihalic Pokopec, I.: Ljevarstvo, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [4] Benchmarkabrasives: <https://benchmarkabrasives.com/blogs/metal-working/history-and-evolution-of-metal-casting>, Pristupljeno 10.10.2024.
- [5] Alamy: [This illustration dates to the 1870s and shows a foundry, a workshop or factory for casting metal, in England in the 1870s Stock Photo - Alamy](#), Pristupljeno 10.07.2024.
- [6] Engineering: <https://www.engineering.com/procast-simulation-of-titanium-structural-components-produced-by-centrifugal-casting/>, Pristupljeno 10.10.2024
- [7] Prezentacija lijevanje: <https://titan.fsb.hr/~dzezelj/StudijDizajna/2020-21/Prezentacije/LIJEVANJE.pdf>, Pristupljeno 10.10.2024.
- [8] Ecorad: <https://ecorad.ecogbl.com/our-products/aluminium-radiators/die-cast-radiators/>, Pristupljeno 10.10.2024.
- [9] Akhdiecasting: <https://akhdiecasting.com/product/custom-aluminium-gravity-die-casting-mold/> Pristupljeno 10.10.2024.
- [10] Babić, S., Unkić, D.: Ispitivanje utjecaja brzine druge faze na čvrstoću visokotlačnih odljevaka, Ljevarstvo 50(2008)3, 81-88.
- [11] J. Vann: From Simulation to Process Automation – “Define It And Do It”
- [12] Jalili Nikroo, A., Akhlaghi, M., Najafabadi Ahmadi, M.: Simulation and analysis of flow in the injection chamber of die casting machine during the slow shot phase, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 41.1-2(2009), 31-41
- [13] Budić, B.: Posebni ljevački postupci II.dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2009.
- [14] Vdguss: Grundlagen der Giessereitechnik, PowerPoint-Präsentation, VDG, 2005., Pristupljeno 10.07.2024

- [15] Sumit Shukla: Study of Porosity Defect in Aluminum Die Castings and its Evaluation and Control for Automotive Applications 2020, 07; 2125
- [16] sunrise-metal: [Flash - Die Casting Defect - Sunrise Metal \(sunrise-metal.com\)](https://sunrise-metal.com) , Pristupljeno 10.10.2024.
- [17] Tišljar, K.: Simulacija tlačnog lijevanja odljevka od Al legure, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [18] Dolincasting: <https://www.dolincasting.com/13-die-casting-defects-and-how-to-avoid-them.html>, Pristupljeno 10.10.2024
- [19] Colić, M.: Analiza poroznosti tlačno lijevanih odljevaka od aluminijske legure, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.
- [20] Grupa autora: ASM handbook volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1998.
- [21] Karlić, N.: Simulacija tlačnog lijevanja poklopca diferencijalnog prijenosnika od aluminijske legure, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.
- [22] Habuš, L.: Simulacija tlačnog lijevanja spojnice od aluminijske legure, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2023.
- [23] Meethum P, Suvanjumrat C. Evaluate of Chill Vent Performance for High Pressure DieCasting Production and Simulation of Motorcycle Fuel Caps. InMATEC Web of Conferences 2017 (Vol. 95, p. 07025). EDP Sciences.
- [24] Esi-group: <https://www.esi-group.com/products/procastFgh>, Pristupljeno 10.11.2024.