

# Simulacija tlačnog lijevanja poklopca diferencijalnog prijenosnika od aluminijske legure

---

**Karlić, Nikola**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:643079>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-22**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Nikola Karlić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Nikola Karlić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru i asistentu Karlu Jurkoviću mag. ing. mech. na ukazanoj pomoći i savjetima tokom izrade ovog diplomskog rada, na uspješno obavljenoj simulaciji i dobrim rezultatima tlačnog lijevanja.

Posebno se zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Tomislavu Staroveškom koji mi je omogućio rad na 3D skeneru, naučio me nebrojeno puno stvari, dao mi mnoštvo dobrih savjeta za daljnji rad i inženjerski razvitak te nesebično davao svoje vrijeme. Također se zahvaljujem ostalim članovima katedre za alatne strojeve doc. dr. sc. Mihi Klaiću, gospodinu Zlatku Čatlaku, dipl. ing. i gospodinu Miodragu Kataleniću koji su uvijek bili na raspolaganju i bez čije kolektivne pomoći ne bi bilo moguće izraditi model na ovaj način.

Zahvaljujem se prijateljima i kolegama koji su pomogli u kriznim situacijama kada je bilo najteže na fakultetu. Ogromna zahvala mojoj Mirti koja mi je uvijek bila podrška u svemu i pomagala kad god je trebalo te na njenom beskrajnom razumijevanju.

Najveća zahvala ide mojoj obitelji, mami Nedi, tati Roniju i seki Veroniki koji su me uvijek savjetima pokretali naprijed i davali mi nadu tako da ne posustajem u najtežim životnim situacijama. Hvala im što su uvijek vjerovali u mene i bili mi podrška.

Nikola Karlić





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **NIKOLA KARLIĆ** Mat. br.: 0035193706

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija tlačnog lijevanja poklopca diferencijalnog prijenosnika od aluminijske legure**

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

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, 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:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:  
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Branko Bašter

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
2. POSTUPCI LIJEVANJA .....	3
2.1. Pješčani kalupi .....	5
2.1.1. Postupak sa svježom kalupnom mješavinom.....	6
2.1.2. CO <sub>2</sub> postupak .....	6
2.1.3. „No bake“ postupak .....	6
2.1.4. Vakuumsko kalupljenje .....	7
2.2. Školjkasti lijev.....	7
2.3. Precizni lijev .....	8
2.4. Lijevanje u pune kalupe .....	9
2.5. Kokilni (gravitacijski) lijev .....	10
2.6. Niskotlačno lijevanje.....	10
2.7. Centrifugalni lijev .....	12
3. TLAČNI LIJEV .....	13
4. PROCES TLAČNOG LIJEVANJA .....	17
4.1. Strojevi s toplom komorom za tlačni lijev .....	18
4.2. Strojevi s hladnom komorom za tlačni lijev .....	20
5. TEHNOLOŠKI PARAMETRI LIJEVANJA .....	23
5.1. Prva faza i parametri .....	23
5.2. Druga faza i parametri.....	24
5.3. Treća faza i parametri .....	26
6. MATERIJALI ZA PROIZVODNJU LEGURE ZA TLAČNI LIJEV .....	27

---

6.1. Aluminijske legure .....	27
6.1.1. Al-Cu legure.....	28
6.1.2. Al-Si legure .....	28
6.1.3. Al-Mg legure.....	29
6.1.4. Al-Si-Cu legure .....	29
6.1.5. Al-Si-Mg legure .....	29
6.2. Legure magnezija .....	30
6.3. Legure bakra .....	30
6.4. Legure cinka.....	30
7. GREŠKE U TLAČNIM ODLJEVCIMA .....	31
7.1. Pukotine .....	31
7.2. Plinska poroznost .....	32
7.3. Deformacija.....	34
7.4. Hladni zavar .....	35
7.5. Nedolivenost odljevka.....	36
7.6. Rubni srhovi.....	37
7.7. Međuslojevi.....	38
7.8. Ispupčenost površine.....	38
7.9. Uključci.....	39
7.10. Zagrebanost (povlačenje) i naljepljivanje .....	40
7.12. Udubine .....	42
7.13. Mrežaste pukotine .....	43
8. TRODIMENZIONALNO SKENIRANJE .....	45
8.1. Povijest 3D skeniranja .....	45
8.2. Princip rada .....	46
8.3. Lasersko skeniranje.....	47
8.4. Rekonstrukcija modela.....	48
8.5. GOM Atos 5X.....	49
8.6. Prednosti i nedostaci 3D skeniranja .....	50
9. EKSPERIMENTALNI RAD.....	52
9.1. Konstruiranje CAD modela uz pomoć 3D skeniranja .....	54
9.2. Simulacija lijevanja i rezultati.....	64

---

9.2.1. Gibanje tlačnog klipa .....	65
9.2.2. Punjenje kalupne šupljine .....	67
9.2.3. Skrućivanje odljevka.....	69
9.2.4. Prisutnost zraka u kalupnoj šupljini .....	70
9.2.5. Poroznost odljevka.....	71
9.2.6. Zarobljeni oksidi u odljevku .....	76
9.2.7. Udio krute faze.....	76
10. ZAKLJUČAK.....	81



**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Prikaz dijelova podvozja automobila [1].....	1
Slika 2.	Podjela postupaka lijevanja prema uljevnoj sili [4] .....	3
Slika 3.	Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [4].....	4
Slika 4.	Osnovne značajke jednokratnih i trajnih kalupa [4].....	4
Slika 5.	Tlačni lijev, odljevci od magnezijских legura [2].....	13
Slika 6.	Blok motora izrađen tlačnim lijevanjem [6].....	14
Slika 7.	Odljevak složene geometrije [7].....	15
Slika 8.	Geometrija odljevaka [7].....	15
Slika 9.	Tlačni lijev s toplom komorom [7].....	18
Slika 10.	Tlačni lijev s hladnom komorom [7].....	21
Slika 11.	Prikaz klasičnog i parashot lijevanja u prvoj fazi [9] .....	23
Slika 12.	Pukotine u odljvcima [13][14].....	31
Slika 13.	Plinska poroznost na odljvcima [13][14].....	33
Slika 14.	Deformacija odljevka [13].....	34
Slika 15.	Hladni zavar u odljvcima.....	35
Slika 16.	Nedostatak materijala u odljevku, nepotpun dio [13] .....	36
Slika 17.	Rubni srhovi kod odljevka [13].....	37
Slika 18.	Međuslojevi u odljevku [13] .....	38
Slika 19.	Ispupčenja u odljvcima [13][14].....	39
Slika 20.	Ukljucci u materijalu odljevka [13].....	40
Slika 21.	Naljepljivanje (lijevo) i zagrebanost površine (desno) izrađenog odljevka [13][14] .....	41
Slika 22.	Linije toka taline u odljevku [13][14] .....	42
Slika 23.	Udubine u odljvcima [13][14] .....	43
Slika 24.	Mrežaste pukotine kod odljevaka [13] .....	44
Slika 25.	Prvi uređaj za 3D skeniranje – ModelMaker [15].....	46
Slika 26.	Princip rada laserskog skenera [19].....	48
Slika 27.	Generiranje oblaka točaka u površine [20].....	49
Slika 28.	GOM ATOS 5x uređaj za skeniranje [21].....	50
Slika 29.	Pjeskareni poklopac korišten za 3D skeniranje.....	52
Slika 30.	Postavljanje referentnih točaka oko predmeta.....	54
Slika 31.	Prvo stezanje predmeta za skeniranje.....	55

---

Slika 32.	Drugo stezanje predmeta za skeniranje .....	55
Slika 33.	Model dobiven 3D skeniranjem u prvom stezanju – prednja strana .....	56
Slika 34.	Model dobiven 3D skeniranjem u prvom stezanju – stražnja strana.....	56
Slika 35.	Model dobiven 3D skeniranjem u drugom stezanju – prednja strana .....	57
Slika 36.	Model dobiven 3D skeniranjem u drugom stezanju – stražnja strana.....	57
Slika 37.	Spojjeni model dobiven 3D skeniranjem – prednja strana.....	58
Slika 38.	Spojjeni model dobiven 3D skeniranjem – stražnja strana .....	58
Slika 39.	Parcijalno skeniranje površine.....	59
Slika 40.	Parcijalno skeniranje – uzorak FSB .....	59
Slika 41.	Površine koje nedostaju u modelu.....	60
Slika 42.	Popunjavanje nekih nedostataka površine u modelu.....	60
Slika 43.	Popunjeni nedostaci nekih površina u modelu .....	60
Slika 44.	Navoj koji je dobiven 3D skeniranjem.....	61
Slika 45.	Uklonjeni navoji i stavljen dodatak za strojnu obradu .....	61
Slika 46.	CAD model poklopca u Solidworksu.....	62
Slika 47.	CAD modeli spremni za simulaciju .....	62
Slika 48.	Renderirani CAD model sa sustavom za ulijevanje .....	63
Slika 49.	Masa, volumen i površina odljevka.....	63
Slika 50.	Izmjerena stvarna masa poklopca s oduškom .....	64
Slika 51.	Klip i talina u mirovanju .....	65
Slika 52.	Početak gibanja klipa.....	65
Slika 53.	Spora faza gibanja klipa 2 .....	66
Slika 54.	Spora faza gibanja klipa 3 .....	66
Slika 55.	Spora faza gibanja klipa 4 .....	66
Slika 56.	Punjenje kalupne šupljine pri 63,3% popunjenosti .....	67
Slika 57.	Punjenje kalupne šupljine pri 70% popunjenosti .....	68
Slika 58.	Punjenje kalupne šupljine pri 80,7% popunjenosti .....	68
Slika 59.	Punjenje kalupne šupljine pri 95,6% popunjenosti .....	69
Slika 60.	Vrijeme skrućivanja taline u kalupnoj šupljini.....	70
Slika 61.	Zarobljeni zrak unutar kalupne šupljine.....	71
Slika 62.	Poroznost skupljanja iznad 30% vjerojatnosti.....	71
Slika 63.	Poroznost skupljanja iznad 50% vjerojatnosti.....	72
Slika 64.	Poroznost skupljanja iznad 70% vjerojatnosti.....	72
Slika 65.	Poroznost skupljanja iznad 80% vjerojatnosti.....	73

---

---

Slika 66.	Presjek mjesta prve poroznosti .....	74
Slika 67.	Presjek mjesta druge poroznosti .....	74
Slika 68.	Presjek mjesta treće poroznosti .....	75
Slika 69.	Presjek mjesta četvrte poroznosti .....	75
Slika 70.	Zarobljeni oksidi u odljevku.....	76
Slika 71.	Udio krute faze odljevka nakon 6 sekundi .....	77
Slika 72.	Udio krute faze odljevka nakon 8 sekundi .....	77
Slika 73.	Udio krute faze odljevka nakon 10 sekundi .....	78
Slika 74.	Udio krute faze odljevka nakon 11,92 sekunde .....	78
Slika 75.	Udio krute faze presjek 1 .....	79
Slika 76.	Udio krute faze presjek 2.....	80
Slika 77.	Udio krute faze presjek 3.....	80

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Karakteristike postupka tlačnog lijevanja [7].....	14
Tablica 2. Preporučeno vrijeme punjenja kalupa s obzirom na srednje debljine stjenke odljevka [4].....	24
Tablica 3. Tlak lijevanja za različite legure i vrste odljevaka [9].....	26

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$v_k$	m/s	Brzina klipa za tlačenje
$A_k$	m <sup>2</sup>	Površina klipa za tlačenje
$v_u$	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 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

**SAŽETAK**

Ovaj rad opisuje postupak tlačnog lijevanja poklopca diferencijalnog prijenosnika. Kratak uvod povezuje automobilsku i ljevačku industriju, te predstavlja koncept diferencijalnog prijenosa. Objašnjeni su postupci lijevanja i pripreme kalupa, a posebno je pobliže objašnjen postupak tlačnog lijeva i izvedbe strojeva koje se primjenjuju u procesu. Definirani su tehnološki parametri koji imaju utjecaj na svojstva odljevka, kao i na sam proces lijevanja. Nadalje su nabrojani materijali koji se koriste za proizvodnju legura za tlačni lijev, ponajviše aluminijskih. Također su dočarane greške koje se mogu pojaviti u tlačnim odljercima. Nadalje, sažet je razvoj trodimenzionalnog skeniranja te je opisano lasersko skeniranje i rekonstrukcija modela. Eksperimentalni dio prikazuje izradu CAD modela upotrebom 3D skenera i povezivanje s uljevnim sustavom i preljevima. Pokazuje se točnost izrađenog modela usporedbom mase sa stvarnim predmetom. Simulacija lijevanja poklopca izvedena je u programskom paketu ProCAST, te je napravljena detaljna analiza odljevka.

Ključne riječi: diferencijalni prijenosnik, tlačni lijev, aluminijske legure, 3D skeniranje, simulacija, ProCAST

---

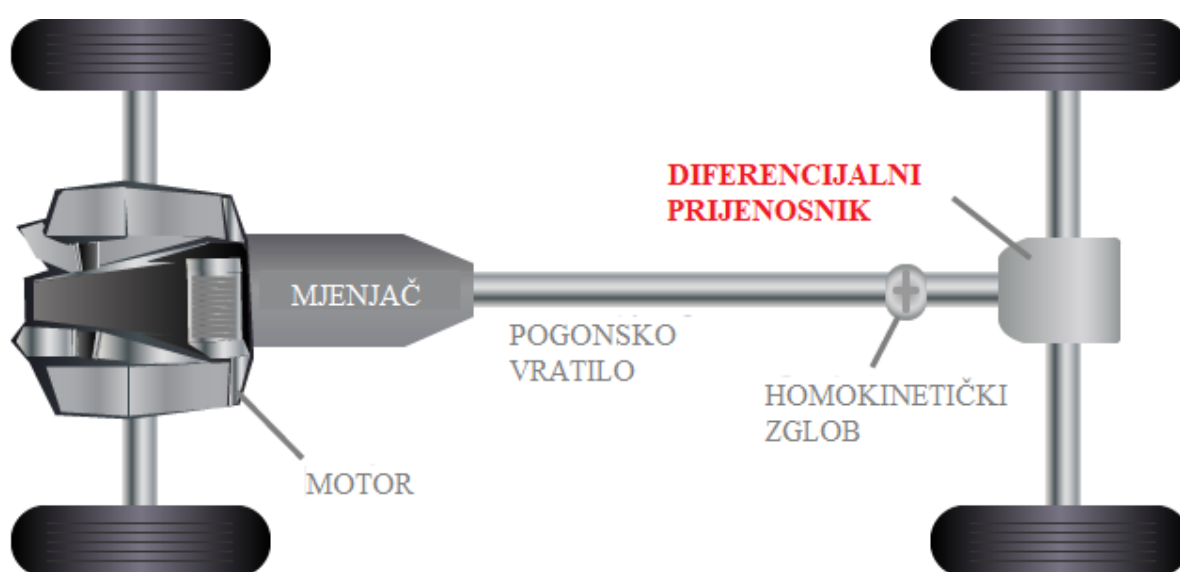
**SUMMARY**

This thesis describes the process of pressure die casting of differential cover. Short introduction connects the car industry with the casting industry while also describes the bare concept of differential. Thesis describes the process of casting and mold preparation as well and it describes the pressure die casting in more detail. The machines used in the process of pressure die casting are also mentioned. Technological parameters which influence the cast and the casting process are defined as well. Materials used in alloy production for pressure die casting are named next (mostly aluminum). Further more, mistakes and errors which can occur in the pressure die casting are mention as well. The development of 3D scans, laser scans and model reconstruction i salso described. Experimental part shows how the CAD models were made by using 3D scanner and how it was applied in casting. Next is the mass comparison of the model and real object. Pressure die casting of differential cover was made in ProCAST computer software and last but not least the detailed analysis of the cast was made.

Key words: differential, pressure die casting, aluminum alloy, 3D scan, simulation, ProCAST

## 1. UVOD

Automobili su odavno zauzeli vodeću poziciju kad je riječ o upotrebi prijevoznih sredstava. Automobilska industrija spada u vodeće industrije po napretku, a i razvoju novih tehnologija. Svakim novim modelom, implementira se nova tehnologija. Diferencijalni prijenosnici, dok god se vozi po tlu, nalaze se u gotovo svakom vozilu s četiri ili više kotača. Popularno zvani diferencijali rješavaju problem razlike u brzini kotača pri skretanju ili ulasku u zavoje. Sprječavaju proklizavanje, kontrola nad vozilom je veća, a time i sigurnost na cesti. Slika 1 prikazuje dijelove podvozja automobila, gdje je prikazan i diferencijalni prijenosnik.



Slika 1. Prikaz dijelova podvozja automobila [1]

Upravo automobilska industrija je najistaknutiji partner ljevačke industrije. Predstavlja najvećeg potrošača s oko 80% lijevanog aluminijskog i 40% lijevanog željeznog. Masa aluminijskog odljevka je otprilike 3 puta manja od mase lijevanog željeza, zbog čega se sve više koristi u automobilima za smanjenje ukupne mase. U prosječnom osobnom automobilu ugrađeno je više od stotinu odljevaka. Većina proizvedenih tehničkih sklopova je nezamisliva bez odljevaka [2]. Kalupi za lijevanje metala uglavnom su izrađeni od metala i/ili pijeska. Pješćani kalupi su za jednokratnu upotrebu, a metalni za višekratnu upotrebu. Dijelovi u automobilskoj industriji često se proizvode u velikim serijama, pa se za njihovo lijevanje koriste metalni kalupi. Postupci lijevanja pomoću metalnih kalupa su: tlačno lijevanje, niskotlačno i protutlačno lijevanje te centrifugalno lijevanje [2].

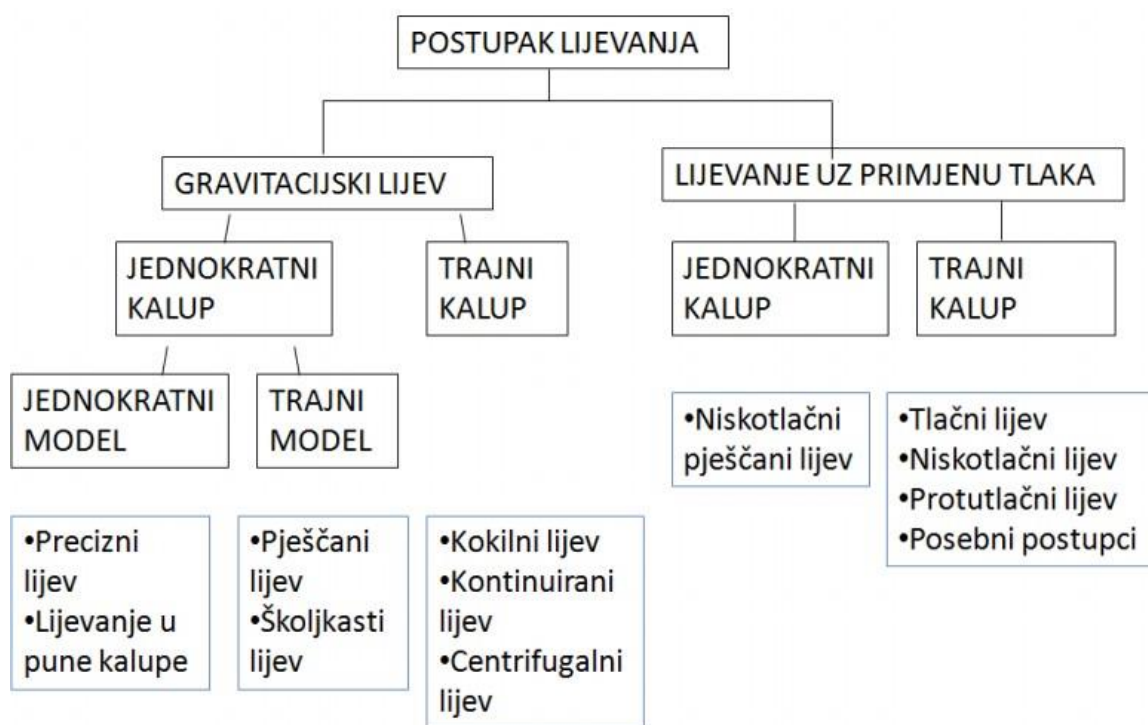


---

Proces lijevanja se prema uljevnoj sili dijeli na lijevanje gravitacijom i lijevanje pod pritiskom. Kod tlačnog lijevanja, talina pod visokim pritiskom ispunjava šupljinu kalupa velikom brzinom protoka rastaljenog metala, tako da je vrijeme punjenja kalupa vrlo kratko. Na taj se način može postići znatno veća kvaliteta površine u odnosu na druge postupke lijevanja. Ovaj je postupak najprikladniji za složene odljevke koji zahtijevaju visoku dimenzijsku točnost [2]. Tijekom procesa lijevanja aluminijskog poklopca diferencijala, koristit će se upravo tlačni lijev.

## 2. POSTUPCI LIJEVANJA

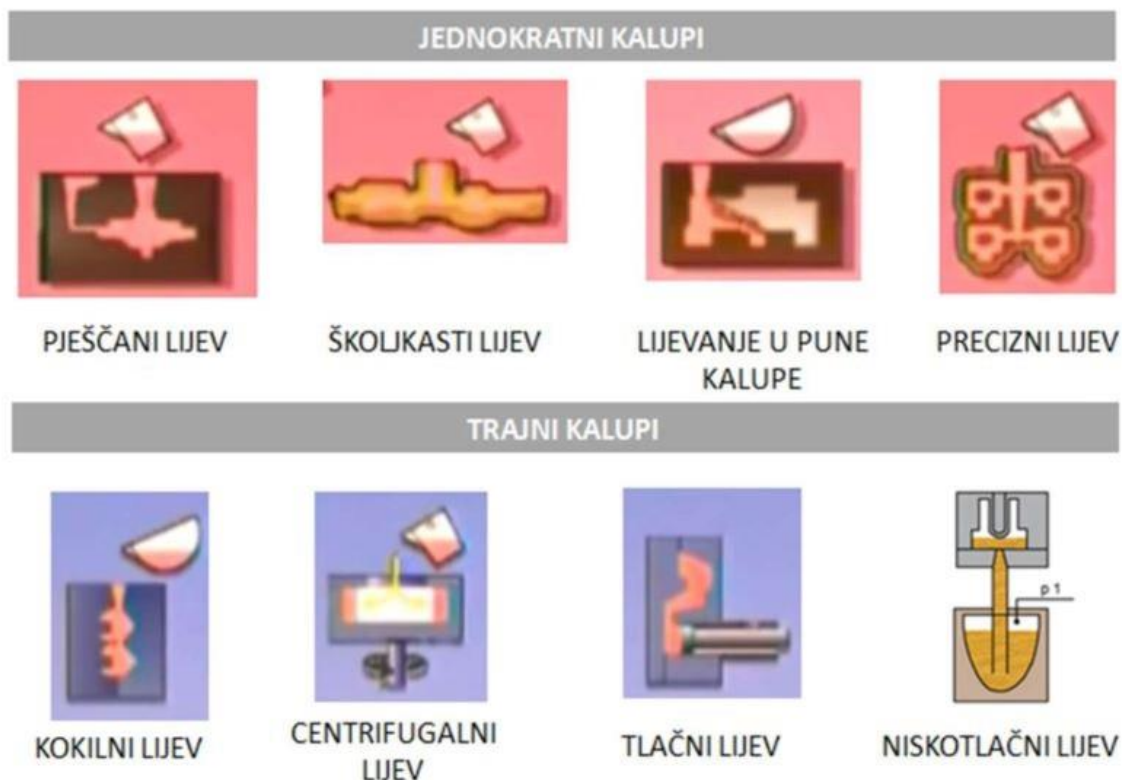
Postoje različiti procesi lijevanja. Razvijeni su za ispunjavanje specifičnih zahtjeva, a to mogu biti projektni zahtjevi, dimenzije i težina proizvoda ili operativni zahtjevi povezani sa stupnjem automatizacije, a sve u cilju optimizacije tehnologije lijevanja i otklanjanja specifičnih problema [3]. Postupci lijevanja mogu se podijeliti prema sili lijevanja, na gravitacijsko i tlačno lijevanje. Zatim slijedi podjela prema vrsti kalupa, koji se može jednokratno koristiti (jednokratni kalup) i višekratno koristiti (trajni kalup). Kod gravitacijskog lijevanja kalup se puni pomoću gravitacijske sile. Tijekom tlačnog lijevanja brzine protoka (ovisne o tlaku) taline su visoke, čime se smanjuje vrijeme punjenja kalupa. Odljevci bilo kojeg oblika i veličine mogu se lijevati u jednokratnim kalupima, dodatno se mogu lijevati pretežno svi metali i pogodni su za individualnu proizvodnju kao i za serijsku te masovnu proizvodnju. Trajni metalni kalupi izrađeni su od izdržljivih materijala koji su otporni na toplinu (najčešće sivog lijeva ili alatnog čelika za topli rad) i imaju prednost što se mogu koristiti veliki broj puta [4]. Detaljnije raščlanjivanje ljevačkih postupaka prikazano je na slici 2.



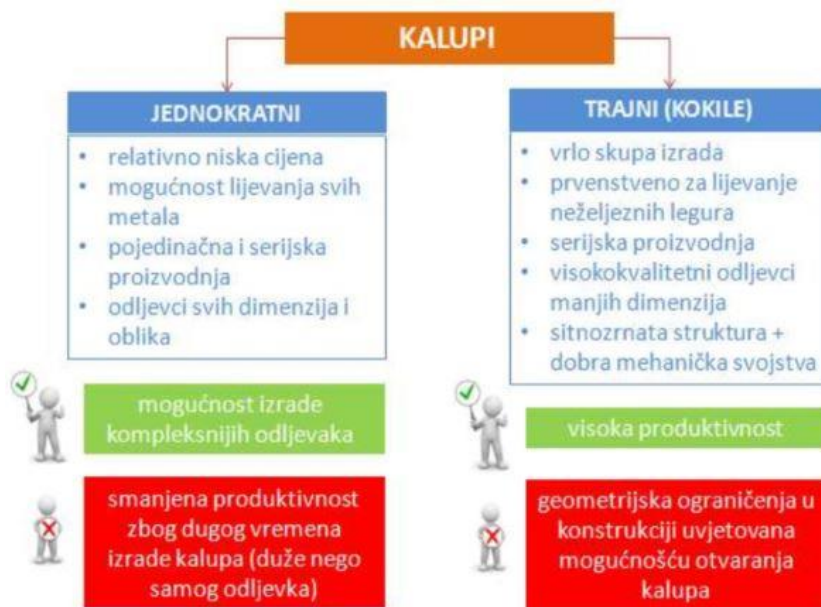
Slika 2. Podjela postupaka lijevanja prema uljevnoj sili [4]

Intuitivno se zaključuje da se jednokratni kalupi koriste samo jednom dok trajni mogu izdržati nekoliko stotina tisuća pa čak i milijun ciklusa. Kod jednokratnih kalupa vrijedi pravilo da pri vađenju odljevka se mora razbiti kalup jer ne postoji drugačiji način da se sačuvaju pravilne

dimenzije i zahtijevana površinska hrapavost odljevka. Na slici 3 se vidi podjela prema kalupima, a na slici 4 su pokazane osnovne značajke kalupa [4].



Slika 3. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [4]



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

## 2.1. Pješčani kalupi

Mješavina smjese za jednokratne kalupe sastoji se od osnovnog materijala, veziva te dodatka. Međutim, osnovni materijali čine većinu (preko 90%) mješavine kalupa. Bez veziva se ne mogu osigurati mehanička svojstva potrebna za smjese za kalupljenje. Nadalje, vezivo ih povezuje jedno s drugim omotavanjem zrna pijeska. Time se osigurava oblikovljivost i čvrstoća kalupnih mješavina. Dodatci služe za poboljšanje svojstava mješavine, kao što su kompresibilnost, tečnost, razgrađivost, itd [4].

Osnovni materijal je zrnasta tvar odgovarajuće otpornosti na visoke temperature. Klasificiran je prema veličini čestica suhog pijeska: kvarc, kromit, cirkon, olivin ili vatrootporna glina. Kvarcni pijesak se najčešće koristi kao osnovni materijal za izradu jednokratnih kalupa i jezgri. To je prirodni sitnozrnati materijal. Osnovna strukturna jedinica kvarcnog pijeska je  $\text{SiO}_2$ . Prosječni promjer zrnaca pijeska koji se koristi za lijevanje je između 0,15 mm i 0,6 mm, ujednačenost između 60% i 85%. Zrna pijeska mogu biti okrugla, uglata, zaobljena te iverasta. Sitnozrnati pijesak osigurava bolju površinsku kvalitetu odljevka, a krupnija zrna pružaju bolju propusnost plinova za lijevanje i otpornost na visoke temperature. Zrna nepravilnog oblika povećavaju čvrstoću kalupa, ali smanjuju propusnost [4].

Negativno svojstvo kvarcnog pijeska je reverzibilna alotropska modifikacija kod temperatura u okruženju od 560 °C do 580 °C kod koje dolazi do povećanja, odnosno smanjenja volumena, kao i do slabe toplinske vodljivosti. Kvarcni pijesak zahtjeva posebno projektirane ventilacijske sustave u ljevaonicama jer prašina kvarcnog pijeska ima nepovoljan utjecaj na zdravlje čovjeka. Odgovor na pitanje zbog čega se kvarcni pijesak onda najviše koristi je mnogobrojna nalazišta istog u svijetu. Zrna zadovoljavaju dimenzijske uvjete, te uzročno-posljedičnom vezom je ta vrsta najjeftinija i najlakše nabavljiva od svih vrsta osnovnog materijala, bez obzira što joj fizikalna svojstva nisu najbolja [4].

Ostale vrste pijeska, makar imaju bolja svojstva od kvarcnog pijeska, prije svega cirkonski i kromitni pijesak koji imaju puno veću vatrootpornost i toplinsku vodljivost, zbog visokih se cijena rijetko koriste. Olivinski pijesak, iako ima mali koeficijent toplinske dilatacije, također je zbog visoke cijene rijetko u primjeni. Najčešće se od ovih vrsta pijeska izrađuju samo pojedini dijelovi kalupa ili jezgri kada je to nužno, dok se ostatak izrađuje od kvarcnog pijeska [4].

Veziva daju kalupnoj mješavini prijeko potrebna mehanička svojstva. Osnovna je podjela veziva prema načinu vezivanja:

- vezivanje pomoću fizikalnih sila
- vezivanje pomoću kemijskih reakcija [4].

Postoji nekoliko postupaka izrade pješčanog kalupa.

### **2.1.1. Postupak sa svježom kalupnom mješavinom**

Svježa kalupna mješavina sastoji se većinski od motmorilonita, no osim njega može sadržavati minerale poput kvarca, kaolina, aluminijske i željezne okside... Betonitna glina od velike je važnosti zbog svoje sposobnosti izmjene kationa (npr. Ca, Mg, K, Na) minerala montmorilonita te uz dodatak vode moguće je interkristalno bubrenje. Idealna kristalna rešetka motmorilonita ne postoji u prirodnom stanju, nego u vanjskom tetraedarskom sloju dolazi do izmjene silicijevog i aluminijskog iona. Takve izmjene mogu dovesti do poboljšanja svojstava betonita (još se to naziva i aktiviranje). Jedna od najvažnijih komponenti u svježoj kalupnoj mješavini je svakako voda i to upravo zbog njenog utjecaja na čvrstoću i propusnost stoga je postizanje njenog optimalnog udjela od ključnog značaja. Osim što utječe na čvrstoću i propusnost ima jako veliki utjecaj i u vezivnoj sposobnosti gline [4].

### **2.1.2. CO<sub>2</sub> postupak**

Kod CO<sub>2</sub> postupka kalupna mješavina se sastoji od kvarcnog pijeska i anorganskih veziva, vodenog stakla (natrijev silikat), a njena priprema se vrši na miješalici ili manualno. Nakon što se popunio kalupnik (jezgrenik), mješavina se očvršćuje propuhivanjem plinom i to najčešće ugljičnim dioksidom (CO<sub>2</sub>) po čemu je ovaj postupak i dobio ime. Značajnost ovog postupka jest brzi ciklusi izrade samih jezgara (od 10 do 25 sekundi) te njegova ekološka prihvatljivost. Kako bi spriječili prodiranje vlage prilikom skladištenja u mješavinu se dodaju posebni dodaci koji poboljšavaju razrušljivost klupa. Jedan od nedostataka ovakvog postupka jest komplicirana regeneracija starog pijeska te vrlo slaba razrušljivost kalupa [2].

### **2.1.3. „No bake“ postupak**

„No bake“ postupak poznat je po tome što se osim kvarcnog pijeska mogu koristiti kromitni i/ili cirkonski pijesak (u nekim rijetkim slučajevima). Kako bi ovaj postupak bio uspješan potrebno je isprati i odmuljati pijesak te klasirati i osušiti. Osim ovih uvjeta postoji još jedan koji je od

velike važnosti, a to je da sam pijesak mora biti smješten na temperaturi od 10°C do 30°C. Od velike je važnosti veličina zrna koju je potrebno što više optimizirati, npr. ukoliko je bitna kvaliteta površine koristi se sitnozrnati pijesak, ali kao nuspojava pojavljuje se potreba za većom količinom veziva. Veziva za *no bake* postupak su najčešće na bazi furanskih ili poliuretanskih smola. Količina veziva koju je potrebno dodati u osnovni materijal ovisi o samom materijalu (npr. sivi i nodularni lijev- od 0,8 do 1,2%). Osim smola koriste se i očvršćivači odnosno kiseline poput fosforne i sumporne. Važna napomena je da očvršćivač i smola ne smiju doći u direktni doticaj jedno s drugim [4].

#### **2.1.4. Vakuumsko kalupljenje**

Vakuumsko kalupljenje je postupak kod kojeg se očvršćivanje same mješavine odvija potlakom. Da bi provedba ovog postupka prošla uspješno potrebno je konturu modela prekriti folijom te se preko njega stavlja pijesak bez veziva, a na vanjsku stranu pijeska i kalupnika dolazi druga folija. Potlakom se stvara sila trenja među zrnima pijeska, te tako omogućuje očvršćivanje kalupa. Folija koja je plastična (debljina od 0,05 do 0,1 mm), na nekoliko se sekundi zagrijava kako bi se postigla njena deformabilnost te nakon toga slijedi njeno prevlačenje preko modelne ploče. Stvaranjem podtlaka od oko 0,5 bara dobiva se nalijeganje termoplastične folije na samu konturu određenog modela. Kalupnik koji sadrži cjevovod za izvlačenje zraka stavlja se na modelnu ploču koja je prekrivena folijom. Zatim se kalupnik ispuni suhim pijeskom koji ne sadrži vezivo, stvara se uljevna čaša te se višak pijeska uklanja. Sve se zajedno prekriva gornjom folijom te očvršćuje uz pomoć potlaka (0,5 bara). U cilju olakšanog vađenja modela isključuje se potlak na modelnoj ploči [2].

## **2.2. Školjkasti lijev**

Jedan od najranijih predstavnika za automatizirani i ubrzani postupak za izradu jezgri i kalupa je školjkasti lijev. Kvarcni pijesak glavna je komponenta mješavine za izradu ovih kalupa. Osim toga sastoji se od veziva čiju funkciju obavlja umjetna smola te ostalih dodataka poput maziva. Formaldehidna i poliesterska smola glavni su predstavnici veziva te njihova glavna karakteristika jest termoplastičnost (očvršćivanje na visokim temperaturama). Ukoliko se zahtjeva ubrzano očvršćivanje još im se dodaju i katalizatori [2].

Kako bi se olakšao postupak uklanjanja metalnog modela iz kalupa koriste se maziva dok svojstva ostalih dodataka služe za smanjenje površinske hrapavosti samog kalupa kako bi se izbjeglo njegovo pucanje [2].

Postoje dva načina na koji se može pripremiti mješavina kalupa za školjkasti lijev, a to su:

- suho konvencionalno miješanje pijeska, smole u obliku praha te dodataka i maziva
- nanošenje smole na pijesak u obliku obloga [2].

Glavna svojstva školjkastog lijeva dijele se na tri skupine:

- izrada kalupa i jezgara od pijeska koji je obložen smolom
- glavno oblikovanje kalupa i jezgre obavlja se djelovanjem topline
- tanki presjek kalupa i jezgara je jedan od glavnih obilježja [2].

Mali do srednje veliki dijelovi koji moraju biti izrađeni vrlo precizno se izrađuju ovim postupkom (npr. bregaste osovine, tijela ventila, itd.) [2].

### 2.3. Precizni lijev

Precizni lijev uz školjkasti spada u jedne od najstarijih proizvodnih procesa, a najznačajnija primjena ovog postupka je u vojnoj i automobilskoj industriji te alatničarstvu [2].

Glavno obilježje ovog postupka je to što se dobivanje odljevaka vrši pomoću lijevanja u jednokratne kalupe čija se izrada vrši pomoću isto tako jednokratnih modela. Njime se vrši izrada modela zahtjevnije geometrije čija bi izrada nekim drugim postupcima uzrokovala neekonomičnost [2].

Kod preciznog lijeva modeli se izrađuju posebnim ubrizgavanjem voska ili polimernog materijala u određeni kalup izrađen od metala. U rijetkim slučajevima ova izrada se vrši strojnom obradnom materijala [2].

Prednosti preciznog lijeva:

- dorada odljevka u velikom broju slučajeva nije potrebna
- mogu se primjenjivati svi materijali koje je moguće lijevati
- mogu se izraditi vrlo složeni odljevci
- kvaliteta površine izrađenog odljevka je visoka
- mogu se lijevati odljevci koji imaju više dijelova
- dimenzijska točnost je visoka [2].

Nedostaci preciznog lijeva su:

- proces je relativno spor
- postoje ograničenja mase i veličine odljevka
- visoki su troškovi za velike dimenzije odljevaka
- male serije ili pojedinačna proizvodnja nije isplativa [2].

## 2.4. Lijevanje u pune kalupe

Za razliku od prijašnja dva postupka, postupak lijevanja u pune kalupe relativno je novi. Zbog svog utjecaja prema okolišu koji je povoljan postao je vrlo efikasna i dobra zamjena klasičnim postupcima pješčanog lijeva. Između ostalog ovaj postupak ima sposobnost poput preciznog lijeva za izradu dijelova složenijih geometrija[2].

Kod izrade modela za lijevanje u pune kalupe najvažniju ulogu igra polistiren koji ekspandira. On je relativno jeftin materijal, vrlo se jednostavno obrađuje postupcima strojne obrade. Mogu se koristiti polistireni različitih gustoća ovisno o metalu koji se lijeva (npr. za lijevanje Al i njegovih legura koristi se polistiren od 24 do 27 kg/m<sup>3</sup>, dok se kod čelika najčešće koristi 17 kg/m<sup>3</sup>)[2].

Korak koji slijedi nakon izrade modela jest nanos vatrootpornog premaza na sam model. Ovaj premaz ima dvije funkcije:

- barijera je između površine modela koja je glatka i površine pijeska koja je grublja
- zbog njega je plinska propusnost (plinovi koji nastaju isparavanjem polistirenskog modela u pijesak) u kontroliranom okruženju[2].

Nakon sušenja premaza slijedi ispunjavanje kalupnom mješavinom za što se obično koristi kvarcni pijesak koji ne sadrži nikakva vezivna sredstva te slijedi ulijevanje rastaljenog metala. Kada se odljevak skruti slijedi njegovo istresavanje te vađenje odljevka. Nakon vađenja slijedi čišćenje[2].

Prednosti:

- proces je fleksibilan kod izrade drukčijih odljevaka i lijevanja metala koji se razlikuju
- visoka površinska kvaliteta i točnost dimenzija
- jezgre nisu potrebne
- jednostavnija i brža izrada kalupa usporedno s izradom pješčanog kalupa jer ne kalup ne treba biti iz dva dijela
- ponovno korištenje pijeska, čak 99%. Pijesak nema veziva u sebi pa se regeneracijom ne onečišćuje okoliš



- mogućnost visoke automatizacije postupka
- manje količine pijeska su potrebne
- dorada odljevka u velikom broju slučajeva nije potrebna
- ne treba se odljevak uklanjati iz kalupa
- vrlo složeni oblici se mogu izrađivati
- nema srha na izrađenom odljevku [2].

Nedostaci:

- treba izraditi novi model za svaki odljevak
- cijena postupka ovisi znatno o proizvodnoj cijeni modela
- kontrola procesa se mora obaviti [2].

## 2.5. Kokilni (gravitacijski) lijev

Slijedeći opisani postupak koristi gravitaciju kako bi rastaljeni metal ulio u kalupe izrađene od metala (kokile). Stoga je njegovo ime gravitacijski kokilni lijev. Njegov sustav za ulijevanje sastoji se od uljevne čaše nakon koje slijedi određeni spust te razvodnik i naposljetku ušće. U svrhu nadoknađivanja materijala odljevka koji se skrućuje, koriste se pojila. Sustav mora biti tako oblikovan da omogućuje ubrzano popunjavanje kalupa metalom koji je rastaljen.

Postoje ručni kalupi koji svoju funkciju nalaze u lijevanju manjih serija odljevaka jednostavnije geometrije. No, ukoliko su zahtjevi proizvodnje veći te su odljevci složeniji koriste se strojevi koji mogu biti potpuno ili poluautomatizirani.

Razlike između kokilnog i pješčanog lijeva su u tome što kokilni lijev omogućava izradu odljevaka s manjom površinskom hrapavosti i točnijih dimenzija odljevaka, dok pješčani svoju primjenu nalazi kod izrade kompleksnijih odljevaka [2].

## 2.6. Niskotlačno lijevanje

Niskotlačno lijevanje je postupak ulijevanja rastaljenog metala u kalup pod tlakom od oko 1 bar. Ovim postupkom najčešće se lijevaju legure aluminija i magnezija koje se koriste u automobilskoj industriji te u pneumatici i hidraulici. Bakrene legure, legure cinka i željezni lijevovi također se mogu koristiti za lijevanje pod niskim pritiskom. Odljevci su dobrih mehaničkih svojstava i glatkih površina te se mogu izrađivati u različitim masama, od 5 do 100 kg. Naplatci kotača, blokovi motora, glave motora, klipovi, kućišta, komponente automobilskeg ovjesa lijevaju se ovim postupkom [2].

Kod ovog postupka kalup je izrađen od gornjeg dijela koji je pomičan te donjeg dijela koji je nepomičan te su oni spojeni na pomičnu ili nepomičnu steznu ploču. Kretanje te ploče odnosno dijela kalupa koji je pomičan odvija se okomito na fiksirani dio kalupa. Pomicanjem prema donjoj strani okomice vrši se zatvaranje kalupa, dok pomicanjem u suprotnom smjeru se omogućuje vađenje gotovog odljevka. Vađenje odljevka vrši se tako da nakon otvaranja odljevak ostane u pomičnom dijelu kalupa. Koristeći izbacivače odljevak se odstranjuje od pomičnog dijela te tada slijedi njegovo vađenje iz kalupa. Kalup u sebi ima izrađene kanale kojima protječe voda kao sredstvo podjednagog hlađenja koje uzročno posljedičnom vezom dovodi do bržeg i pravilnijeg skrućivanja [2].

Naglasak je da punjenje šupljine kalupa počinje od uljevka koji predstavlja najnižu točku iste šupljine prema gore te je također bitno da se prije lijevanja kalupi premazuju različitim premazima u svrhu sprječavanja lijepljenja stjenke kalupa i odljevaka [2].

Koraci pri niskotlačnom lijevanju su sljedeći:

- zatvaranje kalupa. U hermetički zatvoren lonac dovodi se plin pod tlakom od 0,2 do 0,5 bara koji uzrokuje podizanje rastaljenog metala kroz cijev za dovod i njegovo ulijevanje u zatvoreni kalup
- kalup je potpuno popunjen. Tlak doseže svoju maksimalnu vrijednost od 1 bar i zadržava se sve dok odljevak potpuno ne skrutne. Time je omogućeno održavanje kalupa punim te nadoknađivanje skupljanja metala iz dovodne cijevi
- prestankom djelovanja tlaka u peći rastaljeni metal iz cijevi vraća se u lonac
- otvaranje kalupa. Odvajanje odljevka pomoću izbacivača od pokretne polovice kalupa
- vađenje odljevka iz kalupa pomoću robota ili istresne platforme [2].

Prednosti postupka niskotlačnog lijeva su:

- znatno smanjeni gubici materijala i energije
- nisu potrebna pojila, a uljevni sustav je bitno manjih dimenzija
- nema pojave turbulencija prilikom punjenja kalupne šupljine pa je ovaj postupak iznimno povoljan za lijevanje Al- i Mg- legura
- dobivanje odljevaka vrlo dobrih mehaničkih svojstava
- minimalna naknadna obrada odljevaka [2].

Iz svega navedenog proizlaze glavne značajke postupka:

- kontrolirano popunjavanje kalupa
- usmjereno skrućivanje
- visoka ekonomičnost [2].

## 2.7. Centrifugalni lijev

U ovom postupku lijevanja metal koji je rastaljen ulijeva se u kalup od metala koji se zakreće dok se taljevina ne skruti. Dakle, centrifugalna sila i sila teža djeluju istodobno na rastaljeni metal i to za vrijeme ulijevanja taljevine i skrućivanja odljevka [2].

Centrifugalna sila iskorištava se za:

- utiskivanje rastaljenog metala u kalupnu šupljinu
- za oblikovanje paraboloidne ili cilindrične slobodne površine rastaljenog metala [2].

Primjena ovog postupka lijevanja primjenjuje se na gotovo sve metale od ugljičnog čelika pa sve do sivog lijeva i bakrenih legura te nemetalnih materijala.

Značajke centrifugalnog lijeva:

- zbog djelovanja centrifugalne sile odljevci imaju sitnozrnatu mikrostrukturu, više su gustoće te su im poboljšana mehanička svojstva
- za vrijeme rotacije kalupa teže čestice putuju prema površini kalupa istiskujući lakše okside i nečistoće prema središnjoj osi, odakle se kasnije odstranjuju strojnom obradom
- skrućivanje odljevaka je od vanjske površine (koja je u dodiru s kalupom) prema sredini odljevka, zbog čega su odljevci bez pukotina, plinskih mjehura i poroznosti [2].

Faze centrifugalnog lijeva:

- faza pripreme – zagrijavanje kalupa i premazivanje površine kalupa premazom
- faza ulijevanja rastaljenog metala – određeni broj okretaja kalupa prije nego što se talina ulijeva te sam čin ulijevanja i hlađenje kalupa
- faza skrućivanja – skrućivanje odljevka vrši se izvana prema unutra
- finalna faza – istiskivanje odljevka iz kalupa nakon završetka skrućivanja [2].

Postoje dvije najznačajnije vrste centrifugalnog lijeva, a to su vertikalni i horizontalni. Dok se horizontalni lijev koristi za izradu odljevaka jednostavnije geometrije pri čemu je duljina tih odljevaka nekoliko puta veća od njihova promjera, vertikalni lijev se koristi u obrnutom slučaju odnosno kada je promjer odljevka veći od duljine te pri izradi asimetričnih i necilindričnih oblika odljevaka [2].

### 3. TLAČNI LIJEV

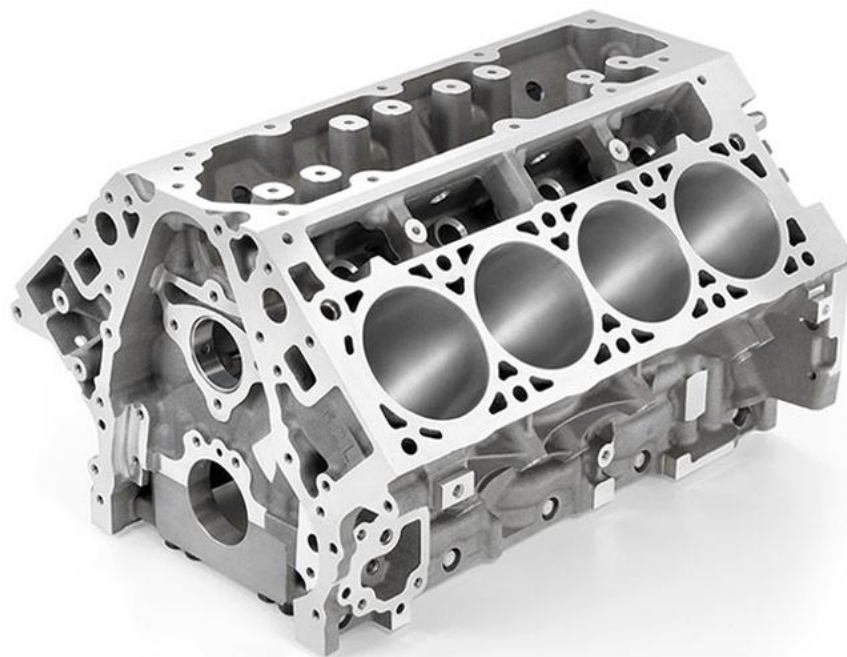
Postupak kojim se dovodi rastaljeni metal pod visokim tlakom se naziva tlačni lijev. Tlačno lijevanje ograničeno je na određene legure te je zbog unutarnje poroznosti otežana toplinska obrada i zavarivanje odljevaka koji su gotovi te to predstavlja nedostatke tlačnog lijeva. Tlak pod kojim se metal koji je rastaljen dovodi u kalup kreće se u rasponu od 10 MPa do 210 MPa [5]. Na slici 5 su prikazani odljevci izrađeni tlačnim lijevom.



Slika 5. Tlačni lijev, odljevci od magnezijskih legura [2]

Ovakav postupak lijevanja našao je svoju primjenu u masovnoj i serijskoj proizvodnji te je velik naglasak na tome da je stopa proizvodnje značajno viša od primjerice gravitacijskog lijevanja ili lijevanja pod niskim tlakom. S druge strane postoje vrlo visoki troškovi u alatu koji su za male serije jednostavno neprofitabilni i neekonomični [5]. Ovakav proces se najčešće automatizira što je i logično s obzirom da se radi o masovnoj proizvodnji. Rezultat same automatizacije očituje se boljom kvalitetom odljevka te smanjenjem krajnje cijene samog proizvoda čime se postiže kompetentnost na tržištu.

Kao glavni predstavnik ovakvog postupka lijevanja očituje se automobilska industrija i to upravo zbog velikog broja različitih mogućnosti lijevanja od dimenzija pa sve do oblika i debljine vanjskih stjenki. Tlačnim lijevom postižu se zahtijevane mehaničke i tehničke karakteristike pa se ovakvim postupkom proizvode komponente poput blokova motora, određenih sastavnica motora s unutarnjim izgaranjem, radijatora, itd [2]. Na slici 6 prikazan je primjer odljevka proizveden postupkom tlačnog lijeva. U tablici 1 prikazane su karakteristike tlačnog lijevanja.



Slika 6. Blok motora izrađen tlačnim lijevanjem [6]

Tablica 1. Karakteristike postupka tlačnog lijevanja [7]

Dio		Postupak	
Materijali	Zn do Cu	Uvježbanost radnika	C ÷
Greške	A ÷ C	Vrijeme uhodavanja	tjedni/mjeseci
Oblici	bez nepogodne jezgre	Proizvodnost, kom/(h·kalup)	5 ÷ 50
Masa, kg	< 0,01 ÷ 50	Minimalna količina, kom	1000
Minimalni presjek , mm	0,5 ÷ 1	Troškovi	
Minimalni promjer jezgre, mm	3 (kod Zn 0,8)	Oprema	B
Detalji površine	A ÷ B	Kalup	B
		Rad	C
		Završna obrada	B ÷ D

\* A – maksimalna vrijednost, E – minimalna vrijednost

Prednosti tlačnog lijevanja su vrlo uske dimenzijske tolerancije te kvalitetna površina odnosno vrlo mala površinska hrapavost. Također, visoka je stopa produktivnosti ovisno o temperaturi komore. Ukoliko se radi o vrućoj komori, produktivnost je do 500 odljevaka po satu dok kod hladne komore produktivnost je nešto manja (do 150 odljevaka po satu). Visoki troškovi izrada matrica (konstrukcijski zahtjevi veoma složeni) su uz ograničene mase i veličine odljevaka te debljina stjenki najveći nedostatak ovog postupka. Kod tlačnog lijevanja dolazi do još jednog ograničenja, a to je mogućnost lijevanja samo neželjeznih legura [7].

Na slikama 7 i 8 su prikazani odljevci složene geometrije izrađeni tlačnim lijevom.



Slika 7. Odljevak složene geometrije [7]



Slika 8. Geometrija odljevaka [7]

Tlačno lijevanje odrađuje se u nekoliko koraka:

- taljenje legure u peći
- prijenos rastaljene legure, ukoliko se radi o stroju s hladnom komorom
- tlačenje taline iz strojne komore u kalup
- vađenje odljevaka
- uklanjanje uljavnog sustava i srha

- mehanička obrada i čišćenje odljevaka
- završna kontrola odljevaka
- skladištenje odljevaka.

Prilikom taljenja legure dolazi do gubitaka mase legure jer je litina sklona odgaranju. Nakon ulijevanja iste u kalup slijedi hlađenje odljevka te njegovo vađenje, obično pri temperaturi 300 °C za aluminijske legure. Na diobenoj ravnini događa se odvajanje uljevnog sustava i srha. Naposljetku se odljevak strojno obrađuje što za posljedicu ima smanjivanje mase odljevka.

## 4. PROCES TLAČNOG LIJEVANJA

Lijevanje u kalup započinje u tlačnoj komori u koju se ubacuje rastaljeni metal. Prije toga je metalni kalup učvršćen na stroj. Tlačna komora zatvorena je s pomičnim tlačnim klipom, na jednoj strani. S druge strane tlačne komore, uljevni sustav dovodi rastaljeni metal do kalupa. Tlačna sila se prenosi putem hidrauličkog sredstva na pogonski klip radom visokotlačnih pumpi. Tlačnim klipom unutar tlačne komore visokim tlakom tlači se rastaljeni metal, što ga potiskuje u kalupnu šupljinu. Ubrizgavanje rastaljenog metala događa se pri velikim brzinama, što rezultira kratkim vremenom punjenja kalupa, čime se cijeli kalup popuni u nekoliko milisekundi. Kada se odljevak ohladi, kalup se otvara, te se putem izbacivača rastavljaju odljevak i kalup. Zatim se alatom namijenjenim za vađenje, odljevak odstranjuje iz kalupa. Opisani ciklus može se ponovo pokrenuti zatvaranjem kalupa [2].

Strojevi za tlačni lijev su velikog razmjera veličina što rezultira time da je moguće lijevati komade različitih veličina. Brzina strujanja rastaljenog metala ponekad postiže brzine od 100 m/s, a ubrizgavanje rastaljenog metala događa se kod tlakova u području od 80 do 100 MPa.

Pri postupku lijevanja pod tlakom koriste se posebni strojevi. Osim metalnih kalupa, oprema sustava za lijevanje pod tlakom uključuje tlačni klip, tlačnu komoru, metalne jezgre i izbacivač. Strojve za tlačni lijev se dijele u dvije grupe s obzirom na sustav za ulijevanje taljevine:

- strojevi sa toplom komorom
- strojevi sa hladnom komorom.

Osim glavne podjele, moguće ih je podijeliti i prema:

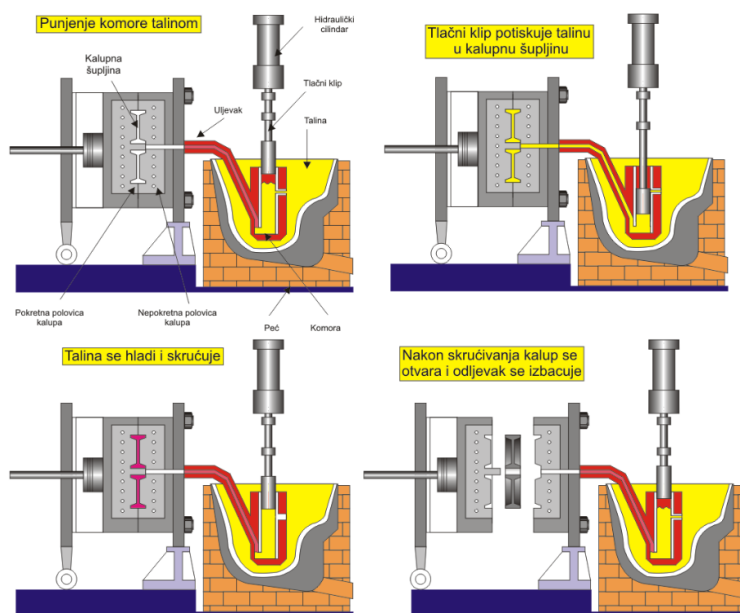
- položaju tlačne komore:
  - strojevi s vertikalnom komorom
  - strojevi s horizontalnom komorom.
- prema snazi stroja:
  - strojevi male snage
  - strojevi srednje snage
  - strojevi velike snage.
- prema stupnju univerzalnosti:
  - univerzalni strojevi
  - specijalni strojevi.



- prema stupnju automatizacije:
  - poluautomatski strojevi
  - automatski strojevi [9].

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

Tlačno lijevanje s toplom komorom primjenjuje se za lijevanje metala niskog tališta kao što su npr. cink, magnezij, kositar i olovo. Na slici 9 prikazan je princip rada stroja s toplom komorom. Lijevanje se vrši pod tlakom koji varira između 7 i 35 MPa. Ova vrsta lijeva primjenjuje se za lijevanje odljevaka manjih dimenzija i masa, od svega par grama do 25 kilograma. Proces je automatiziran, u mogućnosti je izvršiti od 50 do 500 ciklusa lijevanja unutar jednog sata. Posebni strojevi koji su specijalizirani za lijevanje malih odljevaka, u stanju su izvršiti još veći broj ciklusa. Prilikom ove vrste lijevanja, tlačna komora i klip su uronjeni unutar lonca s rastaljenim metalom po vertikalnoj ravnini [2].



Slika 9. Tlačni lijev s toplom komorom [7]

Opisani sustav sadrži peć s taljevinom, tlačnu komoru, sustav za ubrizgavanje i kalup. Napravljene su dvije izvedbe peći. Jedna izvedba peći ima mogućnost taljenja metala u loncu, a druga unaprijed rastaljeni metal prima u lonac gdje ga održava na potrebnoj temperaturi. Kako bi se rastaljeni materijal održao na potrebnoj temperaturi, primjenjuju se grijači, koji mogu biti električni ili plinski. Lonac koji sadrži rastaljeni metal napravljen je od keramike [2].

Sustav za ubrizgavanje rastaljenog metala sadrži hidraulički pogonjen tlačni klip, komoru i dovodne cijevi. Sustav za ubrizgavanje je također uronjen je u rastaljeni metal. Komora i klip moraju biti u takvom međusobnom položaju kako bi se pomakom klipa u smjeru prema gore omogućilo ispunjenje komore rastaljenim metalom, a pomakom u smjeru prema dolje rastaljeni metal ubrizgalo kroz dovodnu cijev putem mlaznice do kalupne šupljine [2].

Komora i tlačni klip napravljeni su od alatnog čelika. Dovodna cijev mora biti oblika kojim će se omogućiti neprekidan protok rastaljenog metala, zbog toga što se ubrizgava pri velikim brzinama, kao što je već navedeno, a najčešće se izrađuje od željeznog lijeva [2].

Dovodna cijev se grije na potrebnu temperaturu, kako se unutar nje metal ne bi skrutio. Mlaznica omogućava kvalitetno popunjavanje kalupne šupljine, napravljena je od materijala otpornog na trošenje, kao npr. nitrirani legirani čelik, alatni čelik namijenjen radu na povišenim temperaturama. Mlaznicu, kao i dovodnu cijev, je potrebno grijati. Komora, klip i dovodna cijev se moraju napraviti tako da ih je moguće zamijeniti novim dijelom ako je potrebno. Kao što je već navedeno, komora, tlačni klip i dovodna cijev su uronjeni u lonac s rastaljenim metalom, a temperatura im je otprilike jednaka temperaturi rastaljenog metala. Iz toga se može zaključiti da je moguće lijevati legure sa niskim talištem, legure koje neće otopiti materijal koji dodiruju, tj. legure od gore navedenih materijala. Za razliku od njih, aluminij i aluminijske legure bi otopile dijelove sustava za ubrizgavanje napravljene od čelika i što znači da se ne mogu lijevati ovim postupkom [2].

Postupak tlačnog lijevanja s toplom komorom sadrži sljedeće korake:

- u početnoj fazi, tlačni klip je u početnom položaju, dok kalup nije otvoren. Rastaljeni metal popunjava komoru
- pomicanjem klipa u donjem smjeru povećava se vrijednost tlaka unutar komore, a u kalupnu šupljinu se ubrizgava rastaljeni se metal iz komore preko dovodne cijevi i grijane mlaznice. Tlak unutar kalupne šupljine je na povišenoj razini do trenutka kada se odljevak skruti
- kada se odljevak skruti, ako postoji, potrebno je izvući metalnu jezgru. Nakon toga kalup je spreman za otvaranje. Primjenom izbacivača, odljevak se rastavlja od pokretnog dijela kalupa i sa posebnim alatom (prihvatna naprava) se odstranjuje iz kalupa te postavlja na radni stol. Klip odlazi u početni položaj te se ciklus ponavlja [2].

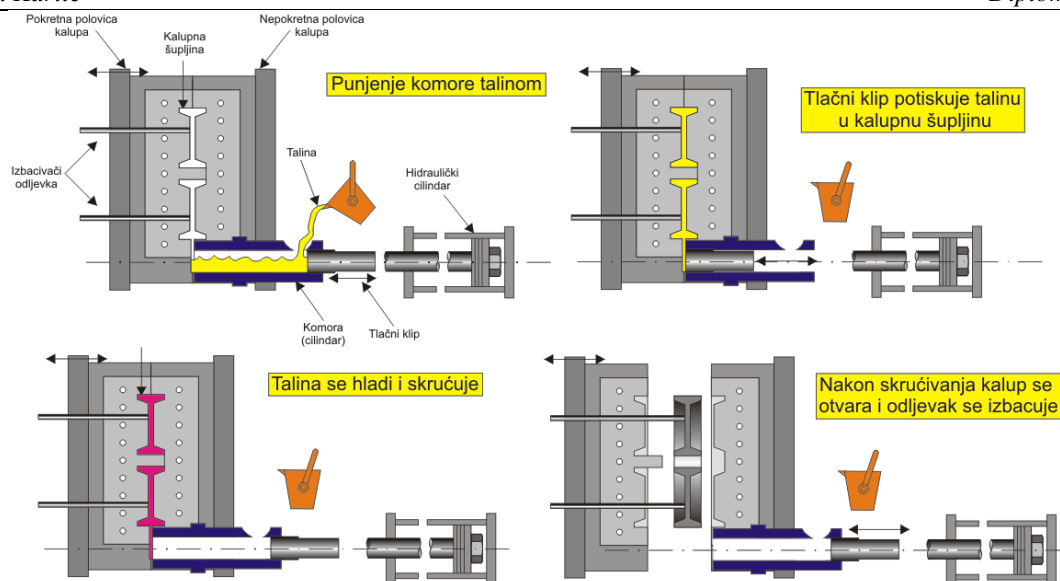
Postupak lijevanja moguće je ponavljati neprestano, tj. dok god je potrebno proizvoditi odljevke ili dok ne dođe do kvara opreme.

Kada se odljevak izvadi iz kalupa, postavlja se na palete kako bi se ohladio na temperaturu okoline. Kada se odljevak ohladi, potrebno ga je dodatno obraditi. Odvaja se uljevni sustav i srh s linije dijeljenja. Odvojeni priljevi postavljaju se na palete i transportiraju na ponovno taljenje [2].

#### **4.2. Strojevi s hladnom komorom za tlačni lijev**

Tlačni lijev s hladnom komorom primjenjuje se za lijevanje legura visokih temperatura taljenja, od aluminija, bakra i magnezija, pod tlakom od 14 do 140 MPa. Moguće je lijevati odljevke svih veličina, kao npr. male konektore i velike poput blokova motora i kućišta mjenjača. Broj ciklusa lijevanja je 50 do 150 odljevaka u sat vremena. Postoje strojevi s horizontalnom i vertikalnom komorom. Praktično, strojevi s horizontalnom hladnom komorom su puno češći. Prilikom postupka tlačnog lijevanja s hladnom komorom, peć unutar koje se nalazi rastaljeni materijal ne nalazi se unutar, nego u okolini stroja. U peći za taljenje se događa proizvodnja rastaljenog metala te se prenosi preko lonca do peći za održavanje potrebne uljevne temperature taljevine. Od tamo rastaljeni metal automatiziranim ili ručnim pristupom biva lijevan u komoru, putem žlice ili automatiziranog dozatora [2].

Sastavni dijelovi sustava za tlačni lijev s hladnom komorom su komora, klip i kalup. Komora i klip se ne zagrijavaju posebno prilikom izvršavanja procesa, ali se zagrijavaju putem prijelaza topline rastaljenog metala prilikom njegovog ulijevanja. Postoje izvedbe sa specijalnim sustavima hlađenja, kako bi prevenirali eventualno pregrijavanje. U usporedbi sa procesom tlačnog lijevanja s toplom komorom pri kojemu su komora i klip u konstantnom dodirivanju s rastaljenim metalom pri čemu se zagriju na temperaturu rastaljenog metala, pri tlačnom lijevanju s hladnom komorom, komora i klip su u dodiru sa rastaljenim metalom samo prilikom ulijevanja te je baš zbog toga je moguće ulijevati legure višeg tališta. Komora i klip su napravljeni od alatnih i čelika. Na slici 10 je prikazan stroj s hladnom komorom i princip rada [2].



Slika 10. Tlačni lijev s hladnom komorom [7]

Postupak tlačnog lijevanja s horizontalnom hladnom komorom sadrži sljedeće korake:

- preko gravitacijski ljevačke žlice, ili dozirnog uređaja ulijeva se rastaljeni metal u horizontalnu tlačnu komoru. Tijekom tog koraka kalup se nalazi u zatvorenom stanju, a tlačni klip u početnom položaju
- po završetku ulijevanja rastaljenog metala rastaljeni metal se dovodi u kalupnu šupljinu uz pomoć tlačnog klipa. Klip se ne kreće u jednakim koracima, njegovo kretanje se sastoji od tri faze. U prvoj fazi se komora ispunjuje, te se rastaljeni metal provodi do ulaza kalupa. (sporo kretanje - brzina vrlo mala, ali raste postepeno, trajanje faze je oko 2 s) . U drugoj fazi se kalupna šupljina ispunjuje (brzo kretanje—dolazi do ubrizgavanja rastaljenog metala u kalupnu šupljinu pri velikim brzinama, trajanje faze je između 0,1 i 0,2 s). U trećoj fazi dolazi do dizanja tlaka u ispunjenom kalupu sve dok se odljevak na skruti (trajanje faze je nekoliko milisekundi)
- kada se odljevak skruti, tada se izvlači metalna jezgra, te se kalup otvara. Odljevak se rastavlja od pokretnog dijela kalupa djelovanjem izbacivača i preko prihvatne naprave se odvodi iz kalupa otkud odlazi na daljnju obradu. Tada dolazi do vraćanja klipa u početni položaj [2].

Postupak lijevanja moguće je ponavljati neprestano, tj. dok god je potrebno proizvoditi odljevke ili dok ne dođe do kvara opreme. Tlačno lijevanje najčešće se provodi na automatiziranim stanicama za tlačni lijev [2].

Kada se odljevak izvadi iz kalupa, postavlja se na palete kako bi se ohladio na temperaturu okoline. Kada se odljevak ohladi, potrebno ga je dodatno obraditi. Odvaja se uljevni sustav i srh s linije dijeljenja. Odvojeni preljevi postavljaju se na palete i transportiraju na ponovno taljenje [2].

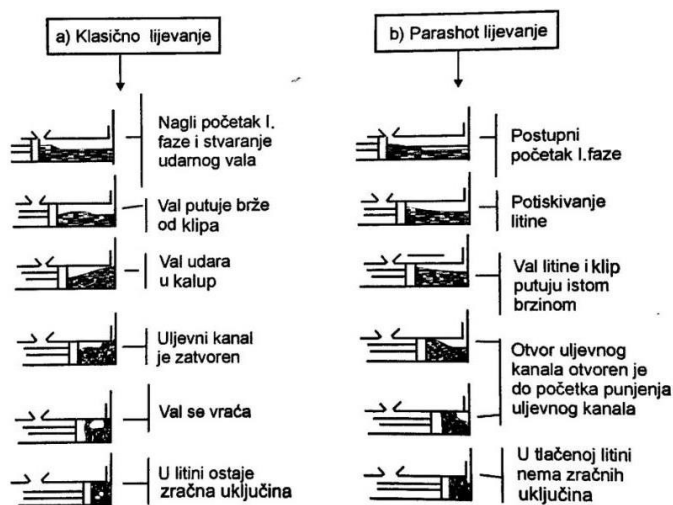
Tlačno lijevanje s toplom i hladnom komorom se u osnovi razlikuju pristupom kojim se ubrizgava rastaljeni metal, i u vremenu potrebnom da se ciklus lijevanja izvrši. Najčešće ciklus lijevanja s toplom komorom traje kraće. Iz razloga što se po završetku tekućeg ciklusa, sustav za ubrizgavanje rastaljenog metala započne ispunjavanje rastaljenim metalom, tako da je sustav spreman za ubrizgavanje rastaljenog metala u proces. Što sugerira da je unutar peći dovoljno (4 puta više nego je potrebno) rastaljenog metala kako bi bez prekida cijeli proces radio sat vremena. Kod sustava sa hladnom komorom, po završetku tekućeg ciklusa, rastaljeni metal je potrebno dovesti do komore, čime nastaju gubici zbog vremena. Također, temperatura tališta legura koje se koriste u procesu lijevanja s toplom komorom je znatno niža od temperature tališta legura koje se koriste u procesu lijevanja s hladnom komorom, čime je vrijeme potrebno da se odljevak skruti manje [2].

## 5. TEHNOLOŠKI PARAMETRI LIJEVANJA

Najveći utjecaj na same karakteristike odljevka što se tiče parametara stroja koji tlači ima brzina, vremenski period te konfiguracija prve faze ulijevanja. Zatim tlak i brzina u drugoj fazi. Naposljetku, ostaje treća faza odnosno njen tlak, vrijeme koje je potrebno da se odljevak skruti te ukupno vrijeme (ciklus) lijevanja [9].

### 5.1. Prva faza i parametri

Prva faza označava dolazak taline do šupljine kalupa odnosno „ušća“ sustava za uljevanje. Jedna od neželjenih posljedica tokom tlačenja taline jest zahvaćanje zraka tj. stvaranje udarnog vala te njime uzrokovanog strujanja (turbulentno strujanje). Greške u odljevku rezultat su stvorenog zraka unutar tlačnog cilindra. Pojava ovakvih grešaka za vrijeme faze 1 rješava se parashot uljevnim principom. Taj princip temelji se na postupnom povećavanju brzina. Kao rezultat toga udarni val se reducira odnosno potpuno nestaje te brzina klipa cilindra se sinkronizira sa brzinom taline [9]. Na slici 11 je prikazana usporedba dva načina lijevanja.



Slika 11. Prikaz klasičnog i parashot lijevanja u prvoj fazi [9]

Ispunjenost komore pod tlakom određenom taljevinom je, uz brzinu klipa, još jedan uzrok formiranja valova te zarobljavanja zraka. Također, na formiranje valova utječu i dimenzijski parametri poprečnog presjeka komore pod tlakom. Ukoliko je količina taljevine manja od 30% veća je mogućnost za pojavu stvaranja vala te zarobljavanja zraka [9]. Prespori ulazak taline u šupljinu kalupa nije toliko česta pojava, no ako se dogodi može uzrokovati skrućivanje te

stvoriti hladne zavare. Dakle, najčešće posljedice prve faze su nedovoljna ispunjenost šupljine kalupa, poroznost te ne toliko dobre mehaničke karakteristike [9].

## 5.2. Druga faza i parametri

Druga faza označava povećanje brzine klipa ovisno o konstrukciji odljevka te debljini njegove stijenke. Također, veliki utjecaj imaju sposobnosti tlačnog stroja odnosno njegovo postizanje određene sile zatvaranja. Klip se kod ovakvih strojeva pri lijevanju s visokim tlakom kreće brzinom do 8 m/s dok se kod legura aluminijske litine na mjestu ulijevanja odnosno na uljevnom ušću kreće između 30 i 70 m/s [9]. Vrijeme koje je potrebno da se kalup napuni, izračunava se uz pomoć srednje debljine stijenke koja je prikazana u tablici 2.

**Tablica 2. Preporučeno vrijeme punjenja kalupa s obzirom na srednje debljine stijenke odljevka [4]**

Srednja debljina stijenke odljevka, mm	Vrijeme punjenja kalupa, s
1,5	0,01...0,03
1,8	0,02...0,04
2,0	0,02...0,06
2,3	0,03...0,07
2,5	0,04...0,09
3,0	0,05...0,10
3,8	0,05...0,12
5,0	0,06...0,20
6,4	0,08...0,30

Za određivanje brzine tlačnog klipa potrebno je odrediti kinematsku sponu između strujanja taljevine u sustavu ulijevanja te kretanja klipa u komori pod tlakom. Ovdje se primjenjuje jednadžba kontinuiteta kako bi se odredila ta neovisnost:

$$v_k \cdot A_k = v_u \cdot A_u \quad (1)$$

gdje je:

$v_k$  –brzina klipa, m/s

$A_k$  –površina klipa, m<sup>2</sup>

$v_u$  –brzina taline u ušću, m/s

$A_u$  –presjek ušća, m<sup>2</sup>.

Bernoulijeva jednačba za stacionarno strujanje tekućine glasi:

$$\frac{\rho \cdot v_u^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_u + p_u = \frac{\rho \cdot v_k^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_k + p_k \quad (2)$$

gdje je:

$\rho$  –gustoća taline, kg/m<sup>3</sup>

$g$  –ubrzanje sile teže,  $g = 9,81$  m/s

$h_u$  –visina taline u ušću, m

$h_k$  –visina taline u tlačnoj komori, m

$p_u$  –tlak u ušću, Pa

$p_k$  –tlak u tlačnoj komori, Pa [9].

Visine  $h_u$  i  $h_k$  približno su jednake u prvom trenutku. Tlak na ušću  $p_u$  jednak je atmosferskom tlaku za sve dobro odzračene kalupe, tj. one koji imaju dobro dimenzionirane otvore za otplinjavanje i ventilaciju kalupa. Brzina klipa  $v_k$  je mala u odnosu na brzinu litine  $v_u$  u ušću te se može zanemariti [4]. Ako ovo sve uzmemo u obzir, izraz za tlak u tlačnoj komori je sljedeći:

$$p_k = \frac{1}{2} v_u \cdot \rho \quad (3)$$

Gubici energije prilikom strujanja taline uzimaju se u obzir uvođenjem koeficijenta  $\eta$ , pa je izraz za stvarnu brzinu strujanja taline u ušću sljedeći:

$$v_u = \eta \cdot \sqrt{\frac{2p_k}{\rho}} \quad (4)$$

gdje je:

$\eta$ - koeficijent učinka taline s obzirom na otpor strujanju (manji je od 1) [9].

Kao posljedica manjih brzina tlačnog klipa te taline na mjestu ulijevanja nastaju povoljna manja opterećenja na kalup odnosno tlačni stroj. Ukoliko su brzine veće od optimalnih moguća je pojava visokog stupnja trenja na mjestu ulijevanja. Kao krajnja posljedica velikih brzina taline pojavljuje se dinamički tlak koji uzrokuje polovično otvaranje kalupa te stvaranje srha na liniji gdje se kalup dijeli [9].



Obilježje druge faze je ispunjavanje šupljine kalupa talinom, čiji je glavni problem porast tlaka zbog promijenjenog otpora na mjestu ulijevanja odnosno na ušću uljevnog sustava. Prilikom prolaska taline kroz mjesto ulijevanja te ulaska u šupljinu kalupa sigurno će doći do pojave pada tlaka. Ukoliko se tlak povisi prerano moguća je pojava otvaranja kalupa i pojave srha stoga je poželjno polovično skrućivanje materijala prije koraka u kojem se primjenjuje visoki tlak [9].

### 5.3. Treća faza i parametri

Glavna karakteristika (parametar) treće odnosno posljednje faze jest tlak. Tlak u ovoj fazi obuhvaća dodatni tlak nakon što se talina ulila te se nalazi u fazi skrućivanja. Poželjno bi bilo da se početak ove fazi dogodi 0,1 do 0,6 sekundi nakon što se šupljina kalupa ispunila talinom [9]. Ukoliko se tlak povisi prerano postoji mogućnost pojave srha te otvaranja kalupa. Stoga, se djelomično skrućivanje materijala prije samog povišenja tlaka smatra poželjnim [10].

Tlak ovisi o namjeni odljevka te o sili zatvaranja kalupa i obično iznosi:

- za odljevke opće namjene od 20 do 40 MPa
- za zahtjevnije odljevke od 40 do 80 MPa
- za tankostjene nepropusne odljevke od 80 do 140 MPa [9].

Dalje ovisi o vrsti legure pa su u tablici 3 prikazani preporučeni tlakovi lijevanja prema vrsti odljevka i vrsti legure

**Tablica 3. Tlak lijevanja za različite legure i vrste odljevaka [9]**

Legure	Tlak lijevanja, MPa			
	Aluminija	Cinka	Magnezija	Bakra
Standardni odljevci	20...40	10...20	20...40	30...40
Tehnički odljevci	40...60	20...30	40...60	40...50
Nepropusni odljevci	80...100	25...40	80...100	80...150

Bolja mehanička svojstva, kvaliteta površine odljevka, smanjena poroznost, te veće opterećenje kalupa i tlačnog stroja su posljedice višeg tlaka, a njegov maksimum je ograničen dimenzijskim veličinama odljevaka te silom kojom se zatvara tlačni stroj [10].

## 6. MATERIJALI ZA PROIZVODNJU LEGURE ZA TLAČNI LIJEV

Izbor materijala za proizvodnju legure je izrazito bitan proces u proizvodnji. Materijali pogodni za proizvodnju legura za lijevanje moraju biti prvenstveno otporni na abraziju, postojani i ekonomski prihvatljivi. Ljevačke legure se dijele na legure pogodne za gravitacijsko lijevanje i legure koje su pogodnije za lijevanje pod viskom tlakom [5].

Legure koje se koriste za lijevanje pod tlakom moraju imati cijeli niz točno specificiranih svojstava kako bi mogle podnijeti lijevanje pod tlakom. Moraju biti otporne na abraziju, odnosno moraju imati sposobnost popunjavanja kalupne šupljine, jer kada se legura lijeva u tekućem stanju ona deformira leguru, te će se protok i klizanje dogoditi u isto vrijeme. Kao rezultat toga trenje koje nastaje može izazvati oštećenja na kalupu. Na otpornost na abraziju, također utječe i vrsta, količina, oblik, veličina i raspodjela karbida u materijalima.

Uz to, moraju biti postojane, što znači da u većini slučajeva legura mora podnijeti veliko udarno opterećenje, a za to su potrebni snaga i postojanost tj. moraju imati dobru livljivost u uvjetima gdje je temperatura 15°C do 20°C iznad likvidus temperature. Postojanost legure uveliko ovisi o udjelu ugljika, veličini zrna i strukturnom stanju.

Još jedno bitno svojstvo je ekonomska prihvatljivost. Pod pretpostavkom da se osigura funkcionalna izvedba potrebno je birati ekonomski prihvatljive materijale. Postoji standardna praksa kako to izvesti npr. koristiti domaći materijal umjesto uvozni.

Legure za lijevanje pod visokim tlakom moraju biti lako obrađive, imati nisku temperaturu lijevanja, minimalno skupljanje u krutom stanju, mogućnost korištenja otpada. Zbog svih navedenih razloga legure koje se koriste za lijevanje pod visokim tlakom su legure aluminijske, magnezij, cinka i bakra. U rijetkim slučajevima lijevaju se i legure olova i kositra.

### 6.1. Aluminijske legure

Aluminij, zahvaljujući svojim svojstvima, ima nezamjenjivu i široku primjenu u današnjoj industriji. Njegova upotreba je prisutna u skoro svakoj proizvodnji, od strojnih dijelova do avio industrije, te je tako našao svoje mjesto i u legurama koje se koriste za lijevanje pod visokim tlakom. Aluminij i njegove legure imaju privlačan izgled, malu masu, dobra mehanička i fizikalna svojstva te otpornost na koroziju u mnogim medijima, uključujući atmosferu, vodu, slanu vodu te mnoge kemijske sustave. Aluminij je skoro tri puta lakši od čelika, ima 13 puta veću toplinsku vodljivost od nehrđajućeg čelika, ne posjeduje magnetska svojstva, ima izvanrednu električnu vodljivost, te je dobro obrađiv. Zbog svoje dobre toplinske vodljivosti

koja iznosi otprilike 50% do 60% vodljivosti bakra, aluminijske su legure pogodne za izradu glavi motora u auto industriji, izmjenjivača topline, radijatora i sl. Ipak, čisti aluminij se rijetko koristi u svrhu materijala za lijevanje pod visokim tlakom jer ima lošu livljivost i loša mehanička svojstva, kao što je veliko volumensko skupljanje od čak 6,5%. Kod lijevanja pod visokim tlakom najčešće se koriste legure aluminijske legirane sa bakrom(Al-Cu), silicijem(Al-Si) i magnezijem(Al-Mg) [9]. Cilj legiranja je postizanje željenih fizičko-kemijskih i mehaničkih svojstava.

### **6.1.1. Al-Cu legure**

Al-Cu legure su aluminijske legure sa bakrom kao glavnim legirajućim elementom, te sadrže od 4 do 5% bakra. Uz bakar sadrže i silicij(Al-Cu-Si), željezo(Al-Cu-Fe), a ponekad i magnezij(Al-Cu-mg) kao nečistoću. Nekada su aluminijske legure koje sadrže od 7% do 8% bakra bile najčešći izbor, dok su ih danas zamijenile Al-Cu-Si legure. Al-Cu legure kao najveću prednost imaju otpornost na nečistoće, dok je najveća mana mala čvrstoća i prosječna livljivost. Aluminijska legura sa bakrom nalazi široku primjenu u proizvodnji žica, šipki, profila, cijevi. One sa većim udjelom bakra od 9% do 10% imaju primjenu i u avio industriji [11].

### **6.1.2. Al-Si legure**

Al-Si legure su legure aluminijske sa dodatkom silicija, obično, u postotku od 12% do 13%. Takve legure imaju izuzetna mehanička svojstva, otporne su na abraziju te se mogu zavarivati. Silicij kao dodatak aluminijskoj leguri osigurava poboljšanje legure u smislu bolje otpornosti na abrazivnost, poboljšanu livljivost, te se skupljanje legure smanjuje. Kod ove legure često se dodaju drugi elementi kao što su magnezij, bakar ili željezo, zbog veće čvrstoće i bolje strojne obradivosti. Postoje tri vrste Al-Si legura koje ovise o postotku silicija u aluminijskoj leguri. One sa manje od 12% silicija su podeutektičke sa otprilike 12% silicija su eutektičke, dok su one sa više od 12% silicija nadeutektičke legure [10]. Najširu primjenu za lijevanje pod visokim tlakom imaju eutektičke legure s otprilike 12% silicija, te se često upotrebljavaju za izradu složenih odljevaka s tankim stijenkama.

### **6.1.3. Al-Mg legure**

Aluminijske legure sa dodatkom magnezija imaju udio magnezija od 10% do 30%. Najveća prednost ove legure je otpornost na morsku vodu, zbog čega se koristi u brodogradnji. Lako se obrađuju rezanjem, a zbog svojih svojstava ne lijepe se za površinu tlačnog klipa prilikom lijevanja pod visokim tlakom. Također, zbog svoje male težine ova legura ima široku primjenu u izradi zrakoplovnih dijelova. Dodavanjem magnezija u aluminijsku leguru dobijemo srebrni odsjaj legure, pri tome treba biti oprezan, jer sa većim postotkom magnezija narušavaju se svojstva legure te dolazi do grešaka i pukotina na odljevcima [10]. Kod legura sa udjelom magnezija od oko 10% smanjena su svojstva istih. Jedan od razloga je širi temperaturni interval kristalizacije, te povećano skupljanje.

### **6.1.4. Al-Si-Cu legure**

Ova legura  $AlSi9Cu3(Fe)$  je jedna od najkorištenijih legura aluminijske, jer se temelji na dobrim mehaničkim svojstvima, iako joj je zbog bakra smanjena otpornost na abraziju i livljivost ova legura ima široku primjenu. A bakar joj s druge strane daje čvrstoću i postiže se veća istezljivost. Zbog tehnologije lijevanja u vakuumu i lijevanja dodatnim tlačenjem, smanjeno je nastajanje poroznosti. Ova legura se dobro strojno obrađuje, a zbog dodatka silicija poboljšana je livljivost. Te se zbog toga legure sa većim udjelom silicija koriste za kompleksne odljeve, kao što su klipovi u autoindustriji i blokovi motora [11].

### **6.1.5. Al-Si-Mg legure**

Ova legura ima izvrsna ljevačka svojstva zbog dodavanje magnezija Al-Si leguri. Ima odlična svojstva nakon toplinske obrade, te se tako postiže odlična otpornost na abraziju i nizak koeficijent toplinske ekspanzije. Ova legura je daleko mekša od Al-Cu i Al-Si-Cu legure, no dodavanje berilija se može postići vrlo visoka čvrstoća [11].

## 6.2. Legure magnezija

Magnezij kao zemno-alkalijski metal najbrojniji je element u zemljinoj kori. Metal srebrno bijele boje ima vrlo visoku točku vrelišta koja iznosi 1097°C vrlo blizu tališta. Može se kovati, lijevati i valjati, no ima vrlo niska mehanička svojstva, a najveći nedostatak mu je oksidacija. Legiranjem mu se poboljšavaju mehanička svojstva. Elementi s kojima se legira su aluminij (do 10%), cink i mangan (od 0,3% do 2,5%), jer magnezij s lakim kovinama tvori plastične slitine male gustoće, koje se lako lijevaju i otporne su na dinamička oštećenja. Nedostatak takvih legura je slaba otpornost prema abraziji i mala istezljivost, te zbog tih svojstava nije pogodna legura za lijevanje pod visokim tlakom. Najčešće se primjenjuje u proizvodnji prijevoznih sredstava zbog izuzetne otpornosti na udarce [11][12].

## 6.3. Legure bakra

Bakar pripada teškim metalima, čija mehanička svojstva ovise o prethodnoj mehaničkoj ili termičkoj obradi. Čisti bakar se koristi za lijevanje samo u slučajevima kada proizvod mora imati odličnu električnu provodljivost. Legura bakra sa cinkom je našla širu primjenu tzv. mjed gdje je udio cinka oko 40%. Ta legura ima dobra mehanička svojstva i otpornost na abraziju, ali lošu električnu provodljivost. Legure bakra generalno imaju najbolja mehanička svojstva i otpornost na abraziju od svih legura za lijevanje pod tlakom. Iako su teške za obradu, dodatnim legiranjem se poboljšavaju svojstva. Tako se dodavanjem olova poboljšava obradivost, a dodatkom silicija se poboljšavaju tehnološka svojstva [4][10].

## 6.4. Legure cinka

Cink iako se svrstava u prijelazne metale, zbog svojih svojstava sličan je zemno alkalnim metalima. On je lomljiv i krhak metal i najčešće se koristi u kombinaciji sa željezom i čelikom. Čisti cink se koristi za izradu anoda za zaštitu od korozije cjevovoda i brodova. Najčešće legure su one sa aluminijem, magnezijem i bakrom. Legure cinka su manje otporne na abraziju od legura bakra. Takve legure imaju svojstva pogodna za izradu tankih i složenih odljevaka. Pa je legura sa bakrom pronašla primjenu u izradi komunikacijske opreme, hardvera, glazbenih instrumenata [4][9].

## 7. GREŠKE U TLAČNIM ODLJEVCIMA

Pri procesu proizvodnje odljevaka, s obzirom na postupke i materijale postoji puno potencijalnih mjesta za greške. One se generalno dijele na četiri osnovne skupine: volumenske (unutarnje) greške, greške koje utječu na smanjena mehanička svojstva odljevka, dimenzijske greške odljevaka i površinske greške odljevaka. Povezanost uzroka s pojavljivanjem grešaka je vrlo komplicirano objasniti jer jedan uzrok može utjecati na pojavljivanje različitih grešaka, dok neka greška može nastati uslijed različitih uzroka ili kombinacijom više njih [12]. Na greške utječu razni čimbenici: od parametara tlačne komore i klipa do parametara tlačnog stroja, parametri materijala koji se lijeva i parametri samog kalupa u koji se lijeva [10]. Prilikom ispitivanja je potrebno što razumljivije definirati koja je vrsta greške i kako nastaje, nakon toga odmah promijeniti parametre o kojima ona ovisi kako se ne bi ubuduće pojavljivala. Simulacije omogućavaju otkrivanje grešaka na odljevku koji se još tehnološki razrađuje. Tada se greška može izbjeći preoblikovanjem modela ili uljevnog sustava dok se još ne izradi alat ili kalup. To uvelike pojeftinjuje izradu samog kalupa jer se kreće s proizvodnjom tek kada simulacija prođe zadovoljavajuće [12]. U nastavku su objašnjene greške koje se pojavljuju kod tlačnog lijevanja.

### 7.1. Pukotine

Pukotine se na površinama tlačno lijevanih predmeta pojavljuju kao linearni ili nepravilni uzorci, koje se šire ukoliko se dovede vanjska sila na predmet [13]. One nastaju zbog naprezanja izvan i unutar materijala. Prva pukotina najčešće nastaje prilikom hlađenja i skrućivanja predmeta [14]. Pukotina može biti hladna (površina materijala ne oksidira na pukotini) i vruća gdje površina materijala oksidira na pukotini. Vidi se na slici 12 da se greška može identificirati vizualnim pregledom.



Slika 12. Pukotine u odljercima [13][14]

---

**Uzroci pukotina:**

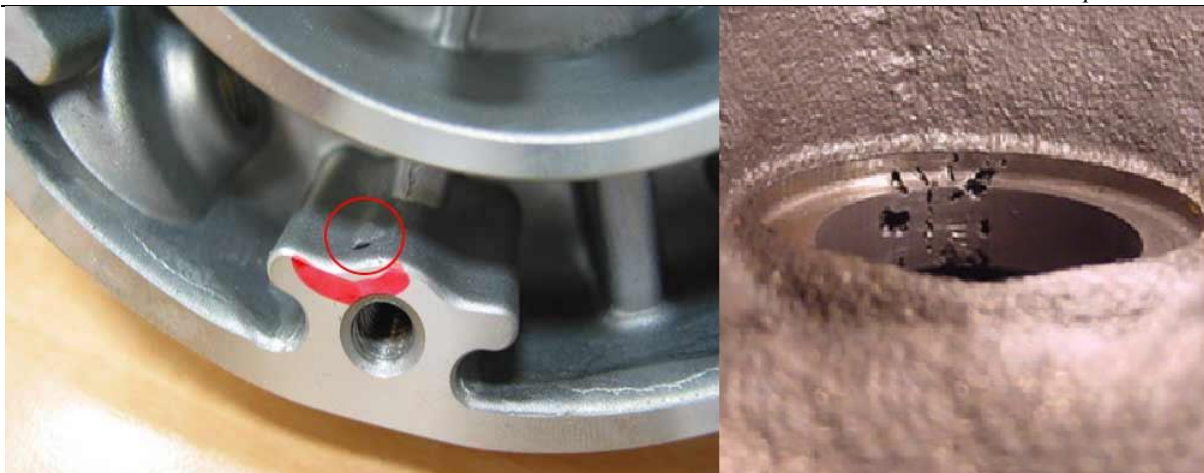
- previsoki udio željeza ili preniski udio silicija u rastaljenoj leguri
- preveliki broj elemenata koji dovode do ograničavanja plastične deformacije lijevanih komada
- previsoki udio cinka u Al-Si leguri ili previsoki udio mangana u Al-Mg leguri
- neujednačena debljina stijenke dovodi do povećanog skupljanja tlačnog lijeva
- predugo vrijeme držanja odljevka u kalupu rezultira povećanjem unutarnjeg naprezanja
- neuravnoteženo izbacivanje odljevka iz kalupa
- preniska temperatura kalupa pri lijevanju [13].

**Rješenja:**

- osigurati potreban sastav legure, odnosno legirnih elemenata tijekom taljenja
- dodati ili podesiti položaje izbacivača kako bi odljevak ravnomjerno izašao iz kalupa
- optimizirati strukturu samog odljevka za tlačni lijev i pokušati izbjeći nejednolike debljine stijenke
- ispravno podesiti i održavati temperaturu kalupa, koja u pravilu mora biti između 180°C i 280°C [13].

**7.2. Plinska poroznost**

Plinska poroznost se pojavljuje u samom tlačnom odljevku nakon hlađenja. To su ovalne ili okrugle šupljine u materijalu glatke površine. Površina je blistavo žute boje ili bijele boje [13]. Većina čvrstih metala nije u mogućnosti zadržati veliku količinu otopljenog plina, ali metali u tekućem stanju mogu. Zbog toga plin, prilikom hlađenja odljevka, u čvrstom metalu stvara šupljine. Najčešće se događa pri fazi skrućivanja [14]. Vizualno se mogu otkriti tek nakon što odljevak prođe strojnu obradu i skine se dio površine, dok se rendgenom mogu otkriti poroznosti u materijalu bez ikakve strojne obrade [13]. Na slici 13 se pokazuju greške koje su nastale zbog plinske poroznosti.



**Slika 13. Plinska poroznost na odljercima [13][14]**

Ispod su navedeni uzroci nastajanja ovih grešaka.

1) Vodik koji je otopljen u rastaljenoj leguri

S većom temperaturom taljenja veća je i topljivost vodika u rastaljenoj metalnoj leguri. Prilikom hlađenja i skrućivanja tlačnih odljevaka, topljivost vodika se smanjuje i on se oslobađa iz rastaljenog metala stvarajući plinske poroznosti. Izvori iz kojeg dolazi vodik u rastaljenu leguru:

- vlaga u zraku ulazi u rastaljenu metalnu leguru i razlaže se na vodik
- vlaga i masti na ingotu metalne legure ulaze u rastaljenu metalnu leguru te se razlažu na vodik
- vlaga koja se nalazi na alatima za taljenje ulazi u rastopljenu metalnu leguru i razlaže se na vodik.

2) Usisani plinovi tijekom punjenja rastaljene metalne legure

Kod postupka tlačnog lijevanja, rastaljena metalna legura se puni pod velikim pritiskom i pod velikom brzinom. Ukoliko talina legure ne može teći stabilno i uredno, lako dolazi do turbulencija u kojima su usisani plinovi.

- nesmisleno projektiranje odzračnih ili preljevnih vodova
- slijepa područja u uljevnom sustavu
- nerazumni parametri tlačnog lijevanja i brzine ubrizgavanja.

3) Plinovi koji se nalaze u sredstvima za odvajanje odljevka

Sredstva za odvajanje odljevaka od kalupa se razgrađuju i stvaraju plinove kada ih zagrije rastaljena metalna legura koja se ulije. Može doći do plinskog isparavanja i uslijed prekomjernog nanošenja sredstava za odvajanje od kalupa [13].



## Rješenja:

- ingoti metalne legure moraju biti čisti i suhi
- temperatura taljenja se mora kontrolirati u slučaju pregrijavanja i treba se izvršiti tretman otplinjavanja rastaljene metalne legure
- parametri tlačnog lijevanja moraju biti pomno izabrani, naročito brzina ubrizgavanja
- za stabilno tečenje rastaljene legure i lako ispuštanje plinova treba biti napravljena dovoljna duljina tlačne komore i uljevnog sustava
- treba napraviti simulaciju u programu za analizu protoka taline, preljevni i ventilacijski kanali moraju biti postavljeni na mjestima na kojima se mogu stvoriti plinske poroznosti
- sredstvo za odvajanje odljevka od kalupa treba biti visoke kvalitete a sama količina nanošenja strogo kontrolirana [13].

### 7.3. Deformacija

Geometrijski oblik tlačnog odljevka ne odgovara tehničkom nacrtu. Dolazi do ukupne deformacije odljevka ili samo do lokalne. Ovisno o dodacima za obradu neke deformacije se mogu ispraviti potrebnom strojnom obradom. Deformacija se može ustanoviti mjerenjem ili vizualnim pregledom [13]. Na slici 14 se vidi deformacija odljevka.



**Slika 14. Deformacija odljevka [13]**

Uzroci deformacija:

- loš strukturni dizajn odljevka dovodi do neravnomjernog skupljanja
- nepravilno uklanjanje uljevnog sustava
- nepravilno konstruiranje mehanizma za izbacivanje dovodi do neravnomjernog izbacivanja odljevka
- prilikom izbacivanja odljevka dolazi do oštećivanja površine povlačenjem

- prerano otvaranje kalupa i zbog toga nedovoljna krutost samog odljevka [13].

Rješenja:

- optimizirati i pojednostaviti ukoliko je moguće dizajn odljevka
- eliminirati loše načine vađenja odljevka iz kalupa
- uljevni sustav skidati prikladnom metodom kako se ne bi odljevak ošteti
- smisleno pozicionirati položaj i broj izbacivača odljevka
- dobro podesiti vrijeme otvaranja kalupa [13].

#### 7.4. Hladni zavar

Na površini odljevaka lijevanih tlačnim lijevom su očite nepravilne i udubljene linearne linije. Male su i uske, a rubovi spajanja su zaglađeni. Prilikom djelovanja vanjske sile na odljevak ove linije se mogu produžiti. Hladni zavar može nastati i u unutrašnjosti odljevka, te će se njega uočiti isključivo nakon strojne obrade. U pravilu hladni zavari u puno slučajeva dovode do dijelova koji su škart. Greška se identificira vizualno [13][14]. Primjeri greške su prikazani na slici 15.



Slika 15. Hladni zavar u odljencima

Uzroci hladnog zavora:

- niska temperatura taline ili kalupa za lijevanje
- uljevni sustav je dizajniran pogrešno, što za posljedicu ima dugu udaljenost koju talina mora proći
- talina ne protječe ujednačeno u kalupnoj šupljini
- brzina ubrizgavanja ili tlak ubrizgavanja su preniski
- dva toka taline se sudaraju i nisu potpuno stopljena
- loša tečljivost taline [13].

Rješenja:

- povećati brzinu ubrizgavanja kao i površinu ulaska iz uljevnog sustava u odljevak
- uzeti odgovarajuću leguru materijala kako bi se poboljšala tečljivost taline
- osigurati da talina ujednačeno i glatko teče u kalupnoj šupljini
- povećati temperaturu ulijevanja i temperaturu kalupa na optimalnu razinu
- poboljšati položaj preljeva i stanje odzračivanja kalupa
- povećati tlak ubrizgavanja taline i skratiti vrijeme punjenja kalupa [13].

### 7.5. Nedolivenost odljevka

Ova greška je jedna od najočitijih na prvi pogled jer se jako lagano primjećuje. Na nekim dijelovima odljevka nedostaje određena količina materijala što rezultira nedolivenim odljencima [13]. Pogreška nedolivenosti je prikazana na slici 16.



**Slika 16. Nedostatak materijala u odljevku, nepotpun dio [13]**

Uzroci slabe napunjenosti kalupa:

- preniska temperatura kalupa ili temperatura lijevanja
- loša tečljivost rastaljenog metala
- prenizak tlak ubrizgavanja
- prevelika količina uključnih plinova izaziva visoki protutlak u kalupnoj šupljini koji na kraju ometa cjelokupan proces punjenja odljevka
- korištenje previše sredstava za odvajanje odljevka ili maziva uzrokuje oslobađanja prevelike količine plina u kalupnoj šupljini
- rastaljeni metal sadrži plinove, uključke ili ima prevelik postotak željeza u sebi
- loši uvjeti punjenja [13].

## Rješenja:

- koristiti odgovarajuće sredstvo za odvajanje odljevka od kalupa i mazivo u određenim, doziranim količinama
- povećati tlak i brzinu ubrizgavanja
- poboljšati dizajn uljevnog sustava i sustav za preusmjeravanje toka taline, dodati preljevne kanale te kanale za odzračivanje kod kratkih područja punjenja
- uzeti odgovarajuću leguru metala i poboljšati joj kvalitetu obradom taline
- povećati temperaturu punjenja ili temperaturu kalupa na optimalnu razinu [13].

## 7.6. Rubni srhovi

Ove nepravilnosti se nalaze na rubu površine kalupa za tlačno lijevanje koja se rastavlja. Imaju nepravilan oblik i debljina im je tanka. S obzirom na debljinu mogu biti jako oštri pa treba biti oprezan za rukovanje tim dijelovima [13]. Srhovi su prikazani na slici 17.



**Slika 17. Rubni srhovi kod odljevka [13]**

Razlozi nastajanja ove greške:

- nečistoće na razdjelnog površni nisu očišćene pa se kalup ne zatvori do kraja
- dijelovi stroja za tlačno lijevanje su potrošeni ili deformirani
- sila stezanja matrice je preniska
- temperatura punjenja je previsoka
- brzina ubrizgavanja je previsoka
- umetci ili klizači matrice su istrošeni zbog čega istječe talina kroz otvor
- matrica se deformira zbog neodgovarajućeg materijala matrice i njene nedovoljne čvrstoće [13].

Rješenja:

- očistiti površine dodira i kalupne šupljine u koju se lijeva
- redovito održavati kalupe i strojeve za tlačni lijev, kako ne bi bilo istrošenih dijelova
- podesiti ispravne parametre za tlačno lijevanje
- osigurati dovoljnu silu stezanja kalupa kako ne bi između curila talina [13].

## 7.7. Međuslojevi

Međuslojevi su slojevita oštećenja na površini odljevka napravljenog tlačnim lijevanjem. Obično se pojavljuju na liniji razdvajanja odljevka s kalupom. Mogu se otkriti vizualnom inspekcijom [13]. Međuslojevi su prikazani slikom 18.



Slika 18. Međuslojevi u odljevku [13]

Uzrok nastajanja međuslojeva:

- na rubovima klizača, umetcima ili razdjelnoj površini nalazi se prekomjerna količina materijala ili srhova. Srhovi i prekomjerni materijal ne spajaju se sa rastaljenom metalnom legurom [13].

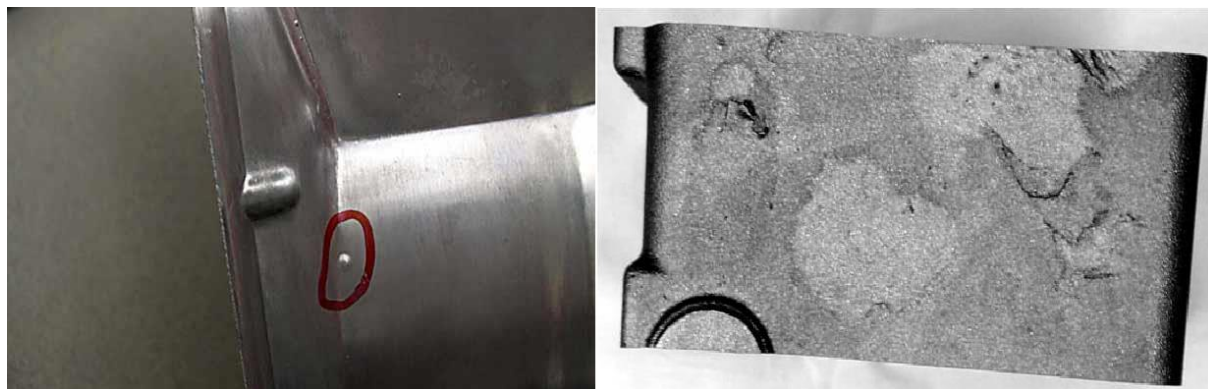
Rješenje:

- prije svakog lijevanja u kalup je potrebno očistiti kompletnu šupljinu matrice te klizače [13].

## 7.8. Ispupčenost površine

Na površinama dijelova napravljenih tlačnim lijevanjem se pojavljuju mjehurići koji izgledaju kao razne veličine ispučenja [13]. Proces tlačnog lijevanja uključuje komprimiranje zraka u stroj. Zarobljeni zrak će se ravnomjerno povezati s talinom. Uslijed širenja plina ispod površine

nastaju takva izbočenja. Turbulencije čine zrak koncentriranim u jednom dijelu. Lako ih je primijetiti vizualnim pregledom [14]. Ispupčenja su prikazana na slici 19.



**Slika 19. Ispupčenja u odljevcima [13][14]**

Uzroci nastajanja:

- nema postupka otplinjavanja taline ili je pregrijana talina na prevelikoj temperaturi
- prevelika temperatura kalupa, nedovoljno vrijeme držanja tlaka i skrućivanja, rezultira smanjenom čvrstoćom odljevaka i uzrokuje širenje plina unutar odljevka
- nedovoljno vrijeme ispuhivanja nakon nanošenja sredstva za odvajanje od kalupa
- uključenost plinova uslijed procesa ubrizgavanja
- loše odzračivanje odljevka prilikom lijevanja zbog pogrešnog dizajna uljavnog sustava
- prevelika količina korištenog maziva ili sredstva za odvajanje od kalupa [13].

Rješenja:

- podešavanje parametara procesa taljenja
- optimiziranje korištenja sredstva za odvajanje od kalupa te maziva
- optimizacija parametara tlačnog lijevanja i brzine ubrizgavanja
- niža temperatura kalupa, mogu se pojaviti nedostaci ali se smanjuje utjecaj tlačnog efekta plina
- produžavanje vremena držanja pritiska i vremena puhanja nakon nanošenja sredstva za odvajanje
- bolji dizajn uljavnog sustava i dodavanje mjesta za preljeve i odzračivanje [13].

## 7.9. Uključci

To su uključci nepravilnih oblika koje se nalaze na površini odljevka ili unutar njega. U metalnom odljevku, s uključcima, postoje neželjene čestice materijala, troske, pijeska ili

deoksidacijskih nusprodukata. Ove greške mogu utjecati na mehanička svojstva odljevaka. Površinski uključci se mogu vizualno detektirati dok se uključci unutar odljevka detektiraju ultrazvučnim testiranjem ili rendgenom [13]. Slika 20 pokazuje uključke u materijalu.



**Slika 20. Uključci u materijalu odljevka [13]**

Uzroci:

- talina se zagađuje nečistoćama prilikom istakanja
- kalupna šupljina nije dobro očišćena
- niska je čistoća punjenja peći
- previše grafitnih uključaka u sredstvu za odvajanje od kalupa
- talina nije pročišćena dovoljno ili troska nije uklonjena temeljito [13].

Rješenja:

- dobro očistiti kalupnu šupljinu
- koristiti čiste uljevne posude i spriječiti nastanak troske
- puniti peć u čistim uvjetima
- grafit mora biti dobro umješan ukoliko ga sredstvo za odvajanje od kalupa sadrži
- talinu pročititi pravilno, a trosku ukloniti u potpunosti [13].

### **7.10. Zagrebanost (povlačenje) i naljepljivanje**

Zagrebanost površine je pogreška koja je paralelna sa smjerom otvaranja kalupa. Pojavljuju se kao trakaste ogrebotine na površini odljevka. Naljepljivanje taline za kalupnu šupljinu se pojavljuje kao višak ili nedostatak materijala na nekom dijelu tlačno lijevanog odljevka [13]. Pogreške na odljevcima prikazane na slici 21.



**Slika 21. Naljepljivanje (lijevo) i zagrebanost površine (desno) izrađenog odljevka [13][14]**

Uzroci nastajanja ovih grešaka:

- nedovoljni kutovi modela
- nakošeno izbacivanje odljevka uslijed pogrešno dizajniranog mehanizma za izbacivanje
- nedostatak željeza u metalnoj leguri
- oštećenja površina kalupne šupljine
- nedovoljna tvrdoća kalupne šupljine ili prevelika hrapavost površine
- pregrijana temperatura taline ili prevelika temperatura kalupa za lijevanje
- sredstvo za odvajanje od kalupa vrlo loše kvalitete [13].

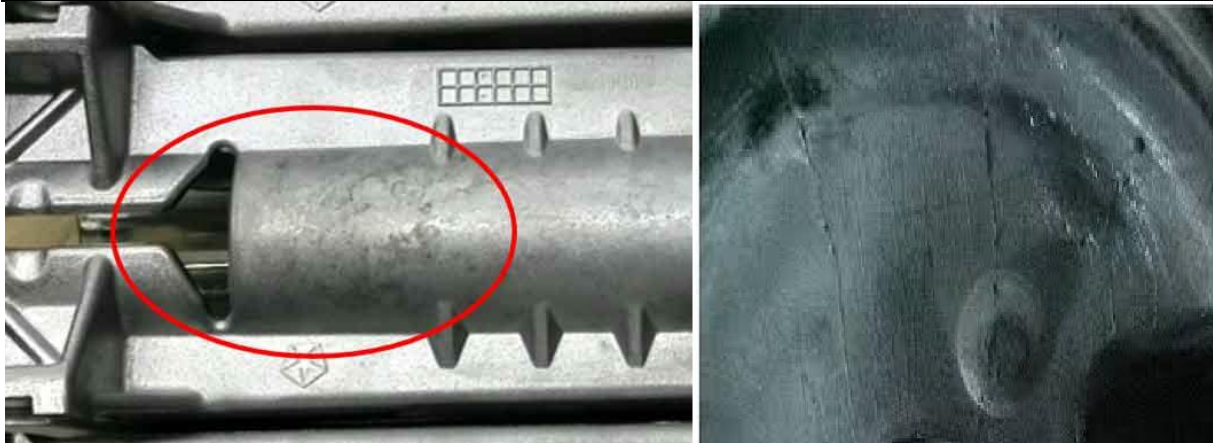
Rješenja:

- podesiti smjer ulaza taline kako bi se izbjegao udar rastaljenog metala na jezgre matrice
- strogo kontrolirati temperature taline i kalupa za lijevanje
- podesiti sadržaj željeza u rastaljenoj leguri
- popraviti svako oštećenje kalupne šupljine i poboljšati hrapavost (polirati)
- uvjeriti se da je tvrdoća matrice minimalno 45-48 hrc i podesiti nacrtane kutove
- koristiti visokokvalitetna sredstva za odvajanje kalupa
- doraditi mehanizam za izbacivanje kako bi izbacivanje bilo ravnomjerno [13].

### 7.11. Linije protoka taline

Na površini tlačno lijevanog odljevka vidljive su pruge (linije) u istom smjeru kao i tok taline dok je ispunjavala kalupnu šupljinu. Jasno se vide neusmjerene linije koje se po boji razlikuju od boje baze odljevka. Ove pruge i linije nemaju tendenciju širenja i produljivanja [13]. Na slici 22 su prikazane linije toka taline.





**Slika 22. Linije toka taline u odljevku [13][14]**

Uzroci:

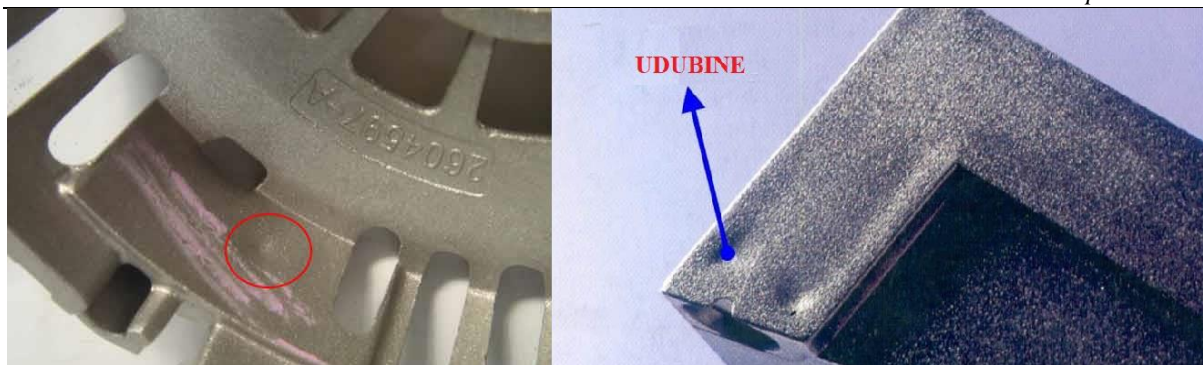
- preniska temperatura matrice
- nedovoljan pritisak punjenja taline
- previše maziva i sredstva za odvajanje od kalupa
- talina koja uđe prva u kalup stvara tanak i nepotpun metalni sloj koji se ispunjava talinom koja kasnije ulazi te se pojavljuju tragovi
- površina poprečnog presjeka uljevnog sustava je premala i postavljena nepravilno, što za posljedicu ima zapljuskivanje taline tijekom punjenja [13].

Rješenja:

- podesiti površinu poprečnog presjeka uljevnog sustava i namjestiti njegov položaj
- odabrati odgovarajuće i kvalitetno mazivo i sredstvo za odvajanje od kalupa, te ga pažljivo dozirati
- povećati temperaturu kalupa
- podesiti brzinu ubrizgavanja i tlak taline u uljevnim kanalima [13].

## 7.12. Udubine

U područjima debelih stijenki odljevaka, nastaju udubljenja na površinama tlačno lijevanih dijelova. Ova se greška vizualno može lako detektirati [13]. Udubine u odljevcima su prikazane na slici 23.



**Slika 23. Udubine u odljercima [13][14]**

Uzroci udubljenja:

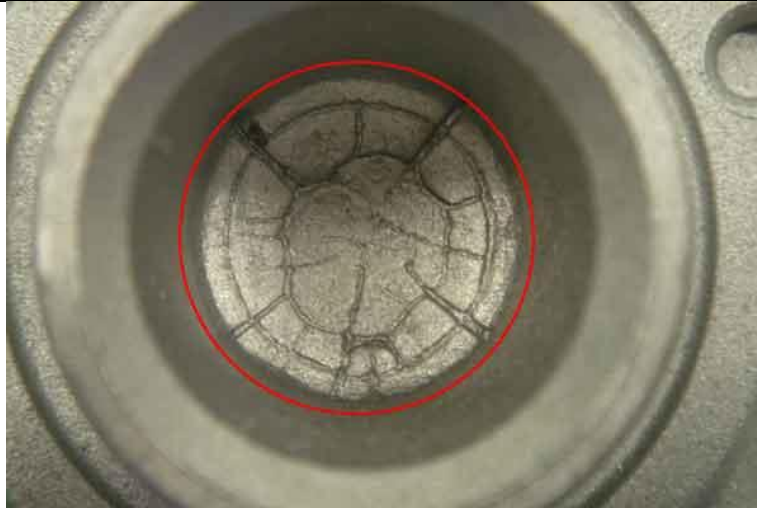
- matrica je djelomično pregrijana i na tim pregrijanim područjima odljevak se sporije skrućuje
- radi lošeg rasporeda odzračnih otvora kalupne šupljine plin se zarobi između površine kalupa i površine taline
- prenizak tlak ubrizgavanja
- prekratko vrijeme držanja pritiska rezultira manjkom materijala u odljevku
- nejednolika debljina stijenke odljevka rezultira različitim skupljanjem tijekom skrućivanja taline [13].

Rješenja:

- povećati vrijeme držanja pritiska
- kontrolirati i izbjegavati lokalna pregrijavanja matrice
- optimizirati konstrukcijski dizajn predmeta za lijevanje kako bi se izbjegla nejednolika debljina stijenke
- poboljšati prelivne i odzračne otvore kalupne šupljine
- povećati tlak ubrizgavanja [13].

### **7.13. Mrežaste pukotine**

Mrežaste pukotine se pojavljuju kao izbočine ili udubljenja na površini tlačnog odljevka koja nalikuju na paukovu mrežu ili kosu. Izbočenja se šire i produžuju kontinuirano kako se povećava vrijeme tlačnog lijevanja. Lako se prepoznaju vizualnim pregledom odljevka [13]. Pojava mrežastih pukotina je prikazana na slici 24.



**Slika 24. Mrežaste pukotine kod odljevaka [13]**

Uzroci mrežastih pukotina, izbočenja:

- pukotine se javljaju na površini kalupne šupljine
- površina matrice za lijevanje je hrapava
- temperatura punjenja je previsoka
- neodgovarajući materijal kalupa za tlačno lijevanje ili pogrešan postupak toplinske obrade
- neravnomjerno ili nedovoljno predgrijavanje kalupa za tlačni lijev
- temperaturna razlika kalupa za tlačno lijevanje se u kratkom vremenu drastično mijenja [13].

Rješenja:

- temperatura lijevanja ne smije biti previsoka, pogotovo kod legura koje imaju visoko talište. treba pokušati raditi sa što nižim temperaturama lijevanja ukoliko to ne utječe na kvalitetu tlačnog odljevka
- odgovarajuća metoda hlađenja osigurava toplinsku ravnotežu matične šupljine
- treba izabrati odgovarajući materijal kalupa za tlačno lijevanje kao i postupak toplinske obrade
- ravnomjerno i dovoljno predgrijavanje kalupa za tlačni lijev
- matrica se mora žariti kako bi se eliminirale unutarnje napetosti nakon određenog vremena
- površina kalupne šupljine i uljevni sustav se poliraju redovito kako bi se osigurala odgovarajuća hrapavost [13].

## 8. TRODIMENZIONALNO SKENIRANJE

### 8.1. Povijest 3D skeniranja

S pojavom računala, postalo je moguće izgraditi vrlo složen model, ali problem je nastao prilikom kreiranja tog modela. Složene površine nije bilo moguće analizirati pomoću mjerne trake.

3D lasersko skeniranje razvilo se tijekom druge polovice 20. stoljeća u pokušaju preciznog rekreiranja kompleksnih površina različitih predmeta. Tehnologija je posebno korisna u područjima istraživanja i dizajna. Prva tehnologija 3D skeniranja nastala je 1960-ih. Rani skeneri koristili su svjetla, kamere i projektore za obavljanje zadatka. Zbog ograničenja opreme često je bilo potrebno mnogo vremena i truda za točno skeniranje objekata. Nakon 1985. godine zamijenjeni su skenerima koji su mogli koristiti bijelo svjetlo, lasere i sjene za snimanje određene površine.

Osamdesetih godina industrija alata razvila je kontaktnu sondu, koja je omogućila stvaranje preciznog modela, ali bila je spora. Stoga su stručnjaci počeli razvijati optičku tehnologiju. Korištenje svjetla bilo je puno brže od fizičke sonde. To je također omogućilo skeniranje mekih predmeta, koji bi bili ugroženi kontaktom sa sondom.

Ozbiljan napredak u laserskom skeniranju označila je REPLICA tvrtke 3D Scanners 1994. godine, koja je omogućila brzo, vrlo precizno skeniranje detaljnih objekata.

U isto vrijeme je Cyberware razvijao visokodetaljne skenere, od kojih su neki mogli uhvatiti i boju objekta. Unatoč tome, stupnjevi brzine i točnost REPLICA-e ostali su nedostižni.

Digibotics je predstavio stroj s 4 osi, koji je jednim skeniranjem davao cjelovit 3D model. Doduše, skeniranje se temeljilo na laserskoj točki i stoga je bilo sporo. Usto nije imao šest stupnjeva slobode potrebnih da pokrije cijelu površinu objekta, niti je mogao digitalizirati površinu u boji.

Optički skeneri bili su skupi, stoga su Immersion i Faro Technologies na tržište izbacili jeftine digitalizatore kojima se ručno upravljalo. Mogli su proizvesti potpune modele, ali su bili spori, osobito s detaljnim modelima, te nisu mogli digitalizirati površinu u boji.

Napokon, 1996. godine je 3D Scanners proizveo ModelMaker, prikazan na slici 25, koji je zadovoljavao sve potrebe konstruktora. Bio je brz, precizan, fleksibilan, mogao je uhvatiti boju površine i cjenovno prihvatljiv. Spajao je ključne tehnologije ručno upravljane ruke i 3D skenera s prugama. Čak i složeni 3D modeli u boji mogli su se izraditi za nekoliko minuta. ModelMaker skener i danas je dobro poznat kao Nikon ModelMaker [15].



Slika 25. Prvi uređaj za 3D skeniranje – ModelMaker [15]

## 8.2. Princip rada

3D skeniranje je proces analize objekta iz stvarnog svijeta. Prikupljaju se podaci za određivanja oblika površine ili volumena u trodimenzionalnom prostoru, potom se digitalno rekreira njegov oblik i izgled. Ovaj proces pretvara fizički model u digitalni 3D računalno potpomognuti dizajn (CAD) uz pomoć različitih softvera za skeniranje. 3D model koji može poslužiti kao baza za 3D projekt, a omogućuje 3D mjerenje i 3D vizualizaciju. Model također može biti koristan za rekonstrukciju, analizu ili simulaciju, a u industriji se koristi za projektiranje, inspekciju i kontrolu kvalitete. 3D skeniranje je korisno za reverzni inženjering, analizu, projektiranje i mjerenje složenih zakrivljenih površina, obrazovanje, arhitekturu, praćenje kvalitete, izradu prototipova, razvoj industrijskih alata i još mnogo toga. Ova tehnologija koristi napredni softver za precizno mjerenje, pohranjivanje, analizu, što pomaže u povećanju fleksibilnosti i pouzdanosti procesa [16].

Postoje različiti strojevi i metode za 3D skeniranje objekata, kao i različiti načini za stvaranje digitalne verzije stvarnog objekta. Puno je različitih metoda 3D skeniranja, a najčešće su: lasersko 3D skeniranje, fotogrametrija i skeniranje strukturiranom svjetlošću [17].

Lasersko 3D skeniranje najčešća je tehnika 3D skeniranja. Oblik objekta se digitalno snima pomoću laserskog svjetla, te se dobiva digitalni prikaz objekta iz stvarnog svijeta. Prednost je što može mjeriti jako detaljno, a savršena je i za mjerenje i inspekciju složenih geometrija. Moguće je mjeriti mjesta gdje je nepraktično tradicionalnim metodama. Lasersko svjetlo može uhvatiti samo ono što mu je u vidnom polju. Stoga se laserska točka ili linija projicira na objekt s uređaja, a senzor mjeri udaljenost do površine tog objekta. Obradom podataka oni se mogu pretvoriti u trianguliranu mrežu, a potom i u CAD model.

Fotogrametrija mjeri na temelju fotografija. Metoda koristi paralaksu dobivenu između nekoliko slika koje su snimljene s različitih točaka gledišta. Može se koristiti za snimanje

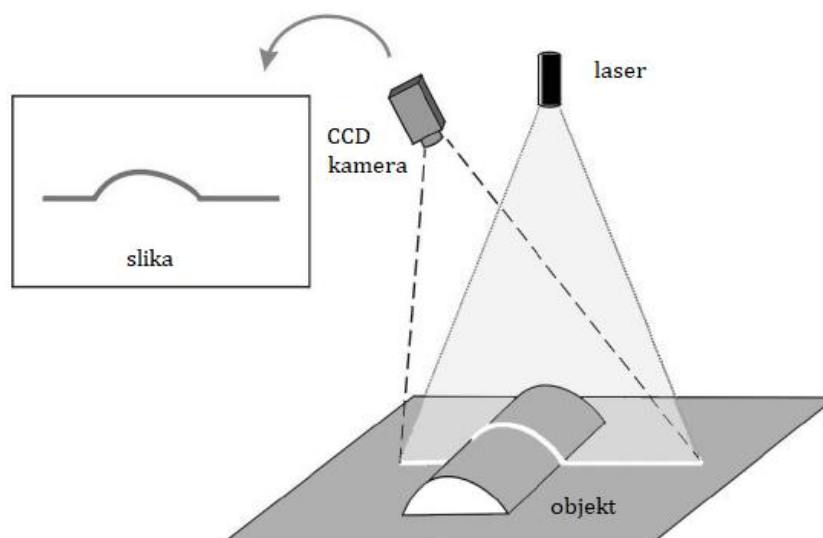
složenih kretanja po 2D i 3D poljima. Imitira stereoskopiju binokularnog ljudskog vida. Prednost je što daje sve informacije o postojećim fizičkim objektima. Proces prikuplja podatke o obliku, volumenu i dubini skeniranog objekta. Koristi se za pretvaranje više slika u točan 3D dizajn. Ne omogućava najpreciznije rezultate, ali pomoću naprednog softvera za fotogrametriju mogu se postići zadovoljavajući rezultati.

Kod metode skeniranja strukturiranom svjetlošću, jedan od položaja kamere korišten u prethodnim metodama skeniranja zamijenjen je projektorom koji projicira različite svjetlosne uzorke na površinu objekta. Proučava se način na koji objekti iskrivljuju te uzorke, što omogućuje stvaranje 3D uzorka. Prednost je što je obično točniji i često veće rezolucije. Ova metoda se koristi u tehnologijama prepoznavanja lica ili okoline [17].

### **8.3. Lasersko skeniranje**

3D lasersko skeniranje je beskontaktna, nedestruktivna tehnologija koja digitalno bilježi oblik fizičkih objekata pomoću linije laserskog svjetla, kako je prikazano slikom 26. Laserski skeneri stvaraju „oblake točaka“ podataka s površine objekta, tj. snimaju točne veličine i oblike fizičkog objekta u računalnom svijetu kao digitalni trodimenzionalni prikaz. Kombiniraju se dva skupa informacija za stvaranje „oblaka točaka“: podaci lasera koji obasjava objekt i podaci drugog senzora koji je obično pokretna kamera ili dvije nepomične. Softver za 3D skeniranje spaja te skupove podataka pomoću poznate udaljenosti između položaja kamere i izvora lasera kako bi generirao točke modela. Da bi se iz skeniranja dobila 3D geometrija, potrebno je na slikama ustanoviti na koja mjesta pada laserska linija.

Kako bi se vrlo precizni oblaci brzo generirali, mjere se fini detalji i hvataju slobodni oblici. 3D lasersko skeniranje idealno je prilagođeno mjerenju i inspekciji konturnih površina i složenih geometrija koje zahtijevaju ogromne količine podataka za njihov točan opis i gdje je to nepraktično uz korištenje tradicionalnih mjernih metoda ili dodirne sonde [18]. Pristupačnost tehnologije se povećava, zajedno s njenom ekonomičnosti i učinkovitosti. Stoga se ona implementira u sve više i više djelatnosti i grana industrije.



Slika 26. Princip rada laserskog skenera [19]

#### 8.4. Rekonstrukcija modela

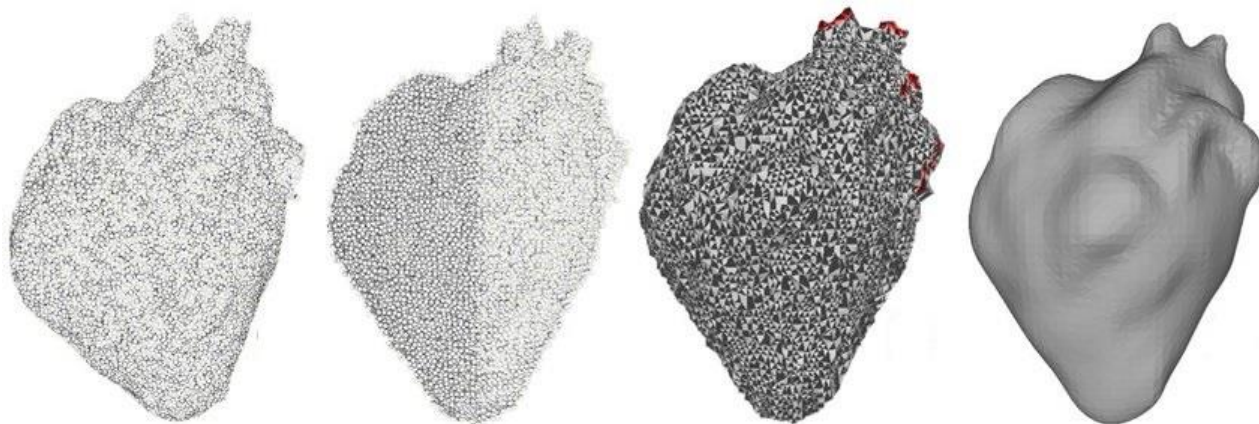
Iako se „oblaci točaka“ koje proizvode 3D skeneri mogu izravno koristiti za mjerenje i vizualizaciju, većina aplikacija ipak koristi poligonalne 3D modele, površinske modele ili CAD modele koji se mogu uređivati na temelju značajki [15]. Postupak je ilustrativno prikazan slikom 27.

U poligonalnom prikazu oblika, zakrivljena površina je modelirana kao mnogo malih ravnih površina. Poligonalni modeli su korisni za vizualizaciju ili za CAM, ali nedostatak im je što sadrže goleme skupove podataka, pa ih je gotovo nemoguće uređivati u tom obliku. Da bi se model rekonstruirao, potrebno je stvoriti kontinuiranu površinu što uključuje pronalaženje i povezivanje susjednih točaka ravnim linijama. Za tu namjenu su dostupne mnoge aplikacije.

Površinski modeli su nešto sofisticiraniji jer u modeliranju koriste skup zakrivljenih površinskih zakrpa. To mogu biti NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), T Splines ili neki drugi zakrivljeni prikazi. Ovisno o aplikaciji, raspored zakrpa se mora podešavati ručno ili je moguć i automatizirani raspored zakrpa. Prednost je lakše rukovanje nakon izvoza u CAD. Modeli se donekle mogu uređivati, što je pogodno za modeliranje organskih i umjetničkih oblika.

CAD model je krajnji prikaz digitaliziranog oblika. Može se uređivati i ima određene parametre. Koristi se u industriji kao standard kojim se opisuje, uređuje i dijeli oblik. On je opisan parametarskim značajkama koje se lako uređuju promjenom vrijednosti. Aplikacije i programi nude različite pristupe dolasku do parametarskog CAD modela. Neki izvoze NURBS površine i ostavljaju CAD dizajneru da dovrši model u CAD-u. Drugi koriste podatke

skeniranja za izradu modela temeljenog na značajkama koji se mogu uređivati. Pojedine CAD aplikacije su čak dovoljno sofisticirane da manipuliraju ograničenim točkama ili poligonskim modelima unutar CAD okruženja [15].



**Slika 27. Generiranje oblaka točaka u površine [20]**

### **8.5. GOM Atos 5X**

ATOS 5X, prikazan na slici 28, je industrijski 3D skener koji proizvodi GOM. GOM je vodeći proizvođač 3D skenera sa sjedištem u Njemačkoj. Ovaj inspekcijski 3D skener verzija je ATOS 5, predstavljen kao "sustav za 3D skeniranje velike brzine". Verzija 5X posebno je dizajnirana za automatizirane procese 3D skeniranja za objekte velikih volumena.

Skener koristi integrirani kompresor laserskog svjetla za generiranje ultra-jakog svjetla, koje omogućuje mjerenje područja do 1000 mm, a vrijeme ekspozicije održava izuzetno kratkim, samo 0.2 sekunde po skeniranju. U kombinaciji sa serijom ATOS ScanBox, ATOS 5X je vrhunski sustav skeniranja za radionice za alate, preše i karoserije. Automatizirano mjerenje kompletne karoserije automobila, iznutra i izvana, obično traje 30 minuta, uključujući i precizno pokrivanje složenih geometrija. Razvijen za industrijsku upotrebu, daje podatke visoke preciznosti u kratkom vremenu mjerenja čak i pod teškim uvjetima. 3D mjerni podaci u cijelom polju omogućuju sveobuhvatnu kontrolu procesa i kvalitete, vizualizirajući skrivene pogreške i time ubrzavajući proizvodne procese [21].

Značajke koje ATOS 5x nudi su:

- izuzetno jak izvor laserskog svjetla otporan na vanjske uvjete osvjetljenja
- kratko vrijeme ekspozicije pogodno i za tamne i sjajne površine



- visoka razlučivost detalja, te niska razina šumova i precizno skeniranje složenih geometrija
- robustan dizajn senzora koji omogućuje veliku preciznost u industrijskim uvjetima
- prijenos podataka bez smetnji zbog inteligentne povezanosti senzora pomoću optičkih vlakana [21].



Slika 28. GOM ATOS 5x uređaj za skeniranje [21]

### 8.6. Prednosti i nedostaci 3D skeniranja

3D skeneri pružaju brzu i točnu metodu digitalizacije objekata iz stvarnog svijeta. Koriste se i za spajanje umjetnosti i tehnologije tako što stvaraju 3D digitalne prikaze izvornih djela, zvane poligonalna mreža. Aplikacije za 3D modeliranje i animaciju olakšavaju mijenjanje veličine, orijentacije i oblika poligonalne mreže. Poligonalna mreža može se koristiti čak i za druge aplikacije kao što su 3D igranje, 3D specijalni efekti, 3D animacija, brza izrada prototipova i napredna vizualizacija. Poligonalna mreža može se pretvoriti u format kompatibilan za različite CAD aplikacije. Konačni CAD model može se brzo proizvesti pomoću strojeva za brzu izradu prototipa i koristiti za izradu kalupne šupljine za lijevanje [15].

Za razliku od ručnog mjerenja i drugih metoda mjerenja, laserske izmjere bilježe fizičke podatke cijelog prostora, okoliša ili objekta, čime je nemoguće slučajno izostaviti potrebne podatke iz mjerenja. Osim toga, besprijekorne mogućnosti snimanja podataka laserskog mjerenja daju točne rezultate prvi put, dok ručno mjerenje može zahtijevati brojna ponavljanja kako bi se dobili kvalitetni rezultati. Bez obzira je li predmet krajolik, unutarnji prostor,

struktura, veliki ili mali objekt, podaci laserskog skeniranja omogućuju promatranje subjekta s višestrukih točaka gledišta dok se koriste različiti modeli podataka [15].

Korist od 3D skeniranja imaju osobe koje se bave proizvodnjom, inženjeringom, dizajnom, razvojem, istraživanjem ili testiranjem. Tehnologija 3D skeniranja može se primijeniti u bilo kojoj točki tipičnog proizvodnog ciklusa, štedeći vrijeme, novac i materijal. Također rezultira kvalitetnijim dijelovima. Trošak tipičnog ciklusa proizvodnje smanjen je za 75% korištenjem 3D skeniranja.

Prednosti 3D skeniranja u proizvodnji:

- brzo mjerenje bilo kojeg fizičkog objekta
- ušteda vremena u projektiranju
- utvrđivanje kompatibilnosti dvaju ili više proizvoda
- inženjerska optimizacija svojstvena proizvedenim dijelovima
- moderna proizvodnja dijelova koji su izvorno proizvedeni prije CAD-a
- usporedba projektiranog i izvedenog modela proizvedenih dijelova [15].

Što se tiče naknade za uslugu, 3D lasersko skeniranje košta više od ručnog snimanja. Međutim, ovisno o prirodi projekta, trošak projekta ručnog snimanja može premašiti trošak korištenja lasera. Zbog brzog i preciznog prikupljanja podataka, lasersko mjerenje može dovršiti projekt u samo jednom mjerenju, dok relativno spor proces ručnog skeniranja može dovesti do znatno više naplativog vremena što poništava prednost njegove nešto niže cijene.

Iako laserski skeneri daju besprijekorne rezultate podataka koji se mogu uređivati i prenamijeniti na različite načine korištenjem poligonskih mrežastih modela, modela čvrstih površina i CAD modela, korisnici moraju imati pravi računalni hardver kako bi se prilagodili značajnim zahtjevima memorije podataka. Za tehničke tvrtke kao što su inženjerske tvrtke i proizvodne tvrtke, to obično nije problem. Ali to može predstavljati problem za organizacije koje ne koriste komercijalni računalni hardver [15].

## 9. EKSPERIMENTALNI RAD

Za potrebe rada korišten je poklopac diferencijalnog prijenosnika automobila marke BMW prikazan na slici 29. Trebalo je konstruirati CAD model i uljevni sustav kako bi se mogla napraviti simulacija tlačnog lijevanja. CAD model odljevka se napravio 3D skeniranjem poklopca i metodom reverzibilnog inženjerstva.



Slika 29. Pjeskareni poklopac korišten za 3D skeniranje

Prije proizvodnje odljevka treba izraditi metalni kalup za lijevanje. Izrada takvih kalupa je jako skupa, kompleksnost izvedbe kalupa povećava cijenu. Zato je potrebno prije nego se krene u proizvodnju kalupa napraviti simulaciju lijevanja i istražiti da li se uopće može odljevak izraditi bez grešaka [4]. Tijekom proizvodnog procesa postoji puno parametara za podešavanje koji utječu na kvalitetu izrađenog proizvoda. Optimalni parametri za lijevanje odljevka se najčešće dobiju metodom pokušaja i pogrešaka. Velika količina utrošenog vremena na ispitivanja i resursi koji su potrebni za analize ovise o iskustvu radnika. Visokotlačni lijev pronalazi primjenu u jako velikom broju industrijskih grana jer se mogu proizvoditi odljevci komplicirane geometrije koji imaju dobra mehanička svojstva i to s visokim postotkom produktivnosti[22]. Uz to sve jaka konkurencija prisiljava proizvođače na što manje ispitivanja i probnih lijevanja, što veću produktivnost i kontinuirano povećanje kvalitete odljevka. Posljednjih dvadeset godina su se jako razvili alati za simulacije čija je svrha pojeftinjenje izrade odljevka i povećanje njegove kvalitete s poboljšavanjem procesa.

Danas simulacije lijevanja uvelike poboljšavaju rješavanje problema u ljevarstvu i olakšavaju konstruiranje proizvoda i razvoj procesa lijevanja [9]. U industriji se koriste CAD/CAM tehnologije za uspješna konstrukcijska rješenja u fazama razvoja proizvoda, dok se za optimiziranje parametara proizvodnje koriste CAE alati. Najisplativiji i tehnološki najučinkovitiji način za analizu i procjenu kvalitete odljevaka je upravo CAE simulacija. Simulacija rješava jednadžbe iz termodinamike i mehanike fluida (jednadžba kontinuiteta itd.) metodom konačnih elemenata ili metodom konačnih razlika [22].

Simulacijom je moguće predvidjeti kretanje i skrućivanje taljevine u alatu i dobiti informacije o formiranju grešaka i kvaliteti odljevka. Moguće je dobiti informacije o:

- brzini taljevine u kalupu
- redoslijedu skrućivanja odljevka
- područjima toplinskih čvorova
- zarobljenom zraku u taljevini
- temperaturi unutar kalupa
- neželjenim tokom taljevine pri procesu punjenja kalupne šupljine
- pojavi poroznosti
- skupljanju materijala
- načinu popunjavanja kalupa, itd [22].

Danas je dostupan velik broj alata za simulaciju lijevanja koji se upotrebljavaju u praksi. Neki od najčešće susretanih programa u literaturi su MAGMASOFT, ProCAST, QuikCAST, itd. Jedan od najpreciznijih i najmoćnijih alata današnjice za simulacije lijevanja je ProCAST. Pojavio se 1990. godine u svom prvom izdanju, a koriste ga velike kompanije poput General Electrica ili Rolls Roycea. Program ima napredne module termomehničke analize pojave grešaka na odljevcima te može predvidjeti pojavu pukotine kalupa i zamora materijala. Na temelju ulaznih parametara simulira naprezanja kokile kod tlačnog lijevanja, temperature kokile, popunjavanje kalupne šupljine talinom i potrebno vrijeme za skrućivanje taline. Ima mogućnost simulacije velikog broja postupaka lijevanja visokotlačno i niskotlačno lijevanje, kokilni lijev, lijevanje u pješčane kalupe, centrifugalni lijev itd. Dostupna je velika baza materijala tako da korisnik po kemijskom sastavu materijala može odrediti točne parametre potrebne za lijevanje odljevka te se ispravno simuliralo lijevanje [10].

## 9.1. Konstruiranje CAD modela uz pomoć 3D skeniranja

Za potrebe izrade CAD modela je korišten 3D skener proizvođača GOM, model ATOS 5X koji je opisan u prethodnom ulomku. Stroj se nalazi na katedri alatnih strojeva. Prva faza je bila stavljanje referentnih točaka oko predmeta kako bi stroj znao prepoznati poziciju predmeta u prostoru što je prikazano na slici 30.

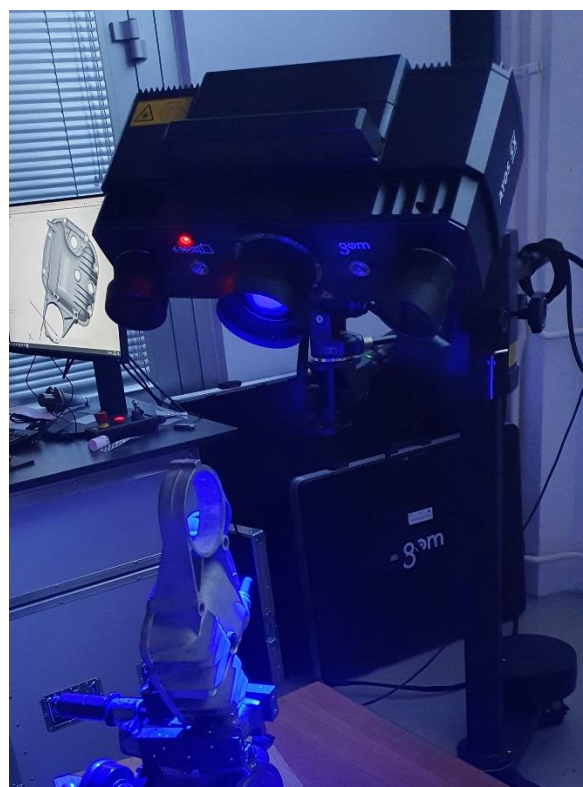


Slika 30. Postavljanje referentnih točaka oko predmeta

Skeniranje je započeto u toj poziciji i nakon toga je planirano okrenuti predmet gornjom stranom dolje i ponoviti postupak. Ubrzo je shvaćeno da neće biti dovoljno zajedničkih geometrija predmeta kad program bude spajao ta dva skena u jedan, stoga je predmet uhvaćen u stezni rotacioni alat na način prikazan na slikama 31 i 32. Program prepoznaje točke u prostoru i na temelju toga radi površine na modelu koje ovise o podudaranju skenova.

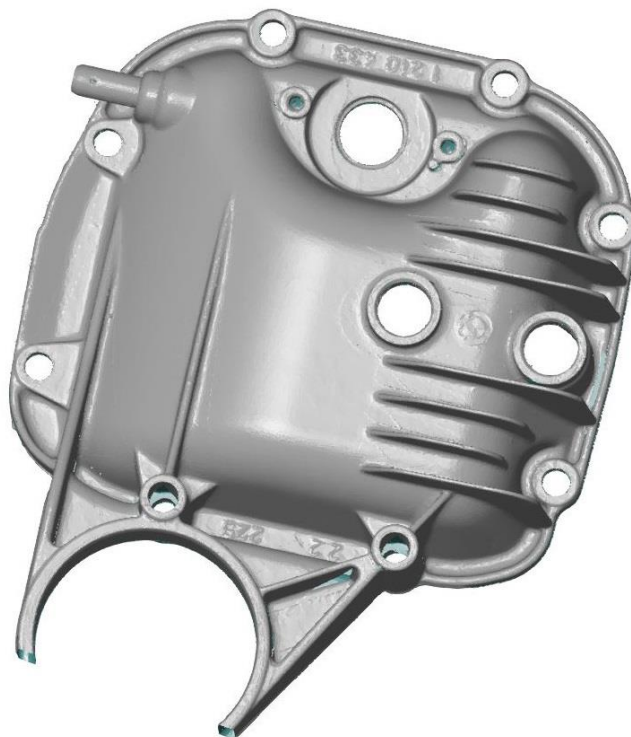


**Slika 31. Prvo stezanje predmeta za skeniranje**

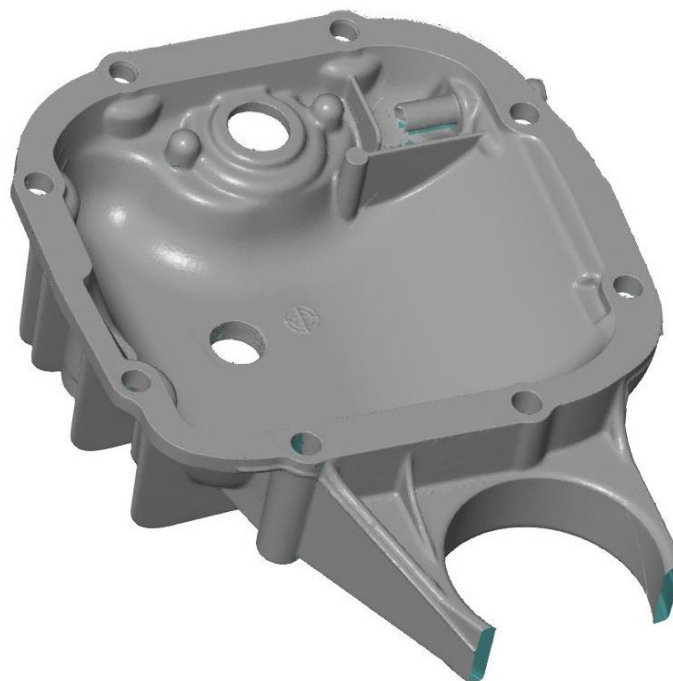


**Slika 32. Drugo stezanje predmeta za skeniranje**

Nakon nekoliko skenova u prvom stezanju dobiven je model prikazan na slikama 33 i 34.



**Slika 33. Model dobiven 3D skeniranjem u prvom stezanju – prednja strana**



**Slika 34. Model dobiven 3D skeniranjem u prvom stezanju – stražnja strana**

Zatim je predmet uhvaćen na način prikazan na slici 32 i ponovljen je postupak skeniranja. Najviše se fokusiralo skeniranje na dio koji nedostaje u prvom skeniranju. Na slikama 35 i 36 je prikazan model koji je dobiven skeniranjem u drugoj poziciji stezanja.



**Slika 35. Model dobiven 3D skeniranjem u drugom stezanju – prednja strana**



**Slika 36. Model dobiven 3D skeniranjem u drugom stezanju – stražnja strana**

Potom su u programu GOM Inspect ta dva dijela automatski analizirana i spojena u zajednički model koji je prikazan na slikama 37 i 38.





**Slika 37. Spojeni model dobiven 3D skeniranjem – prednja strana**

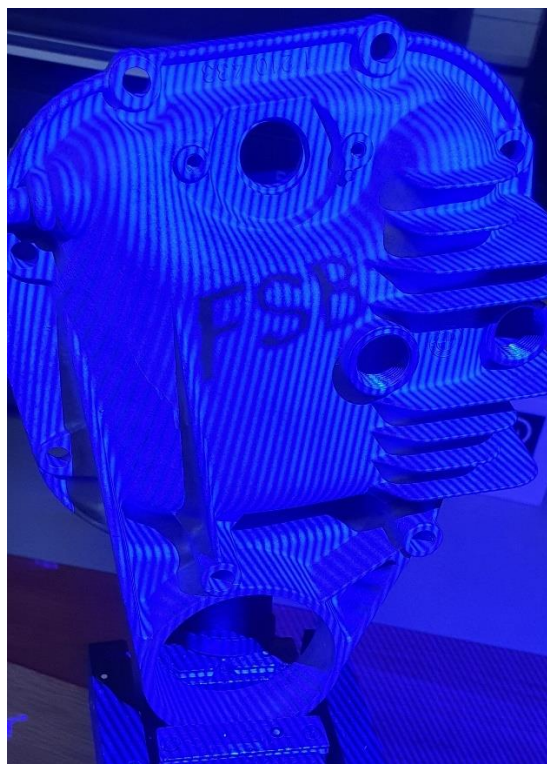


**Slika 38. Spojeni model dobiven 3D skeniranjem – stražnja strana**

Kako bi se što bolje skenirao dio sa što manjim brojem preklapanja već poznatih površina, što komplicira model i povećava veličinu datoteke, stroj ima mogućnost parcijalnog skeniranja predmeta koje je prikazano na slikama 39 i 40.

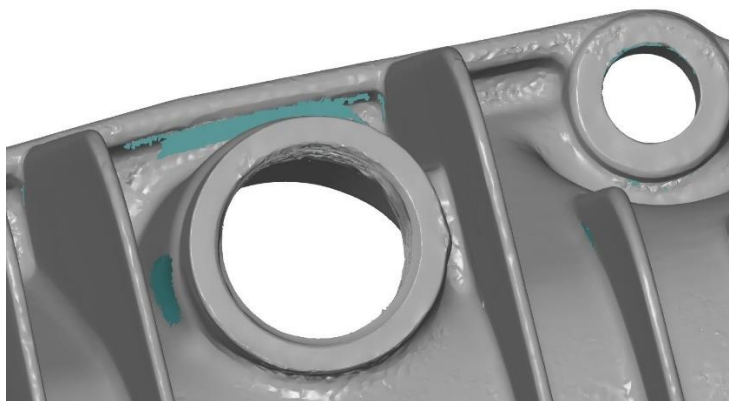


**Slika 39. Parcijalno skeniranje površine**

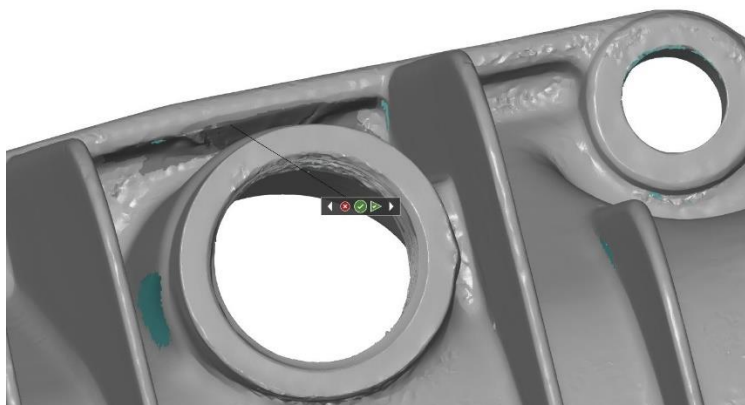


**Slika 40. Parcijalno skeniranje – uzorak FSB**

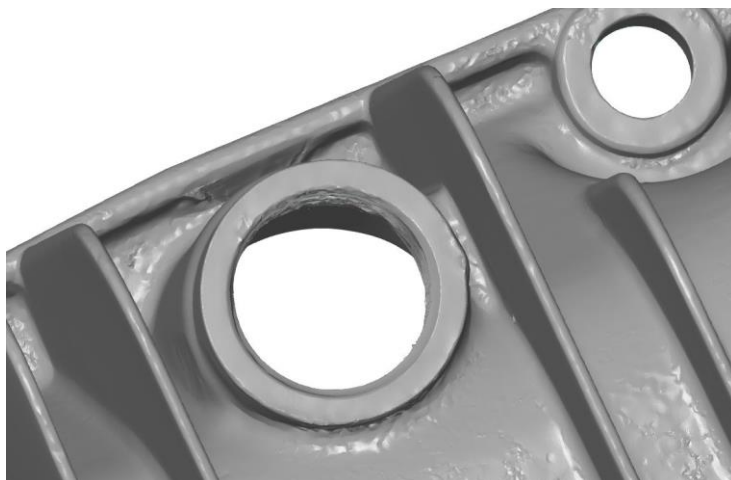
Na modelima se vide zelene površine koje znače da se tu nije moglo doprijeti laserskim zrakama ili da se površine nisu mogle spojiti tako da su ostale šupljine unatoč svim mogućnostima laserske glave i programa za upravljanje skeniranjem. Model mora biti skroz zatvoren kako bi bio jedna cjelina stoga program ima mogućnost zatvaranja tih površina. Prikaz postupka zatvaranja nekih površina je prikazan na slikama 41, 42 i 43.



**Slika 41. Površine koje nedostaju u modelu**

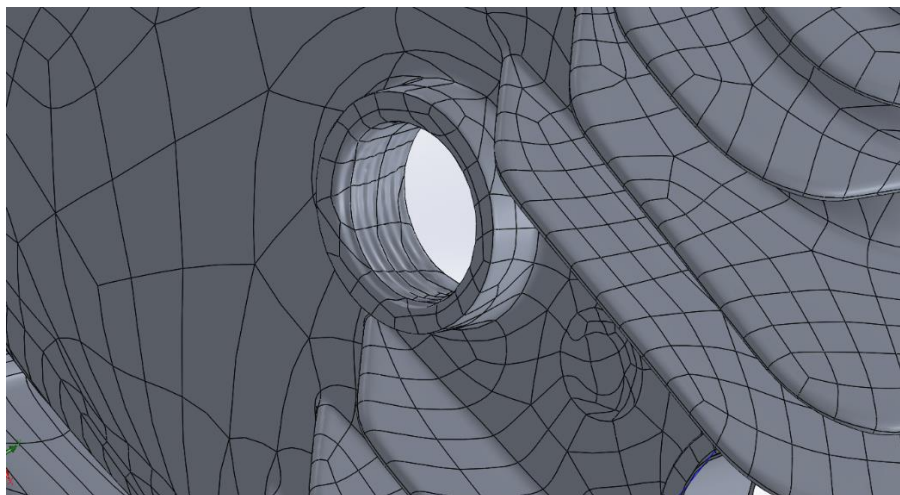


**Slika 42. Popunjavanje nekih nedostataka površine u modelu**

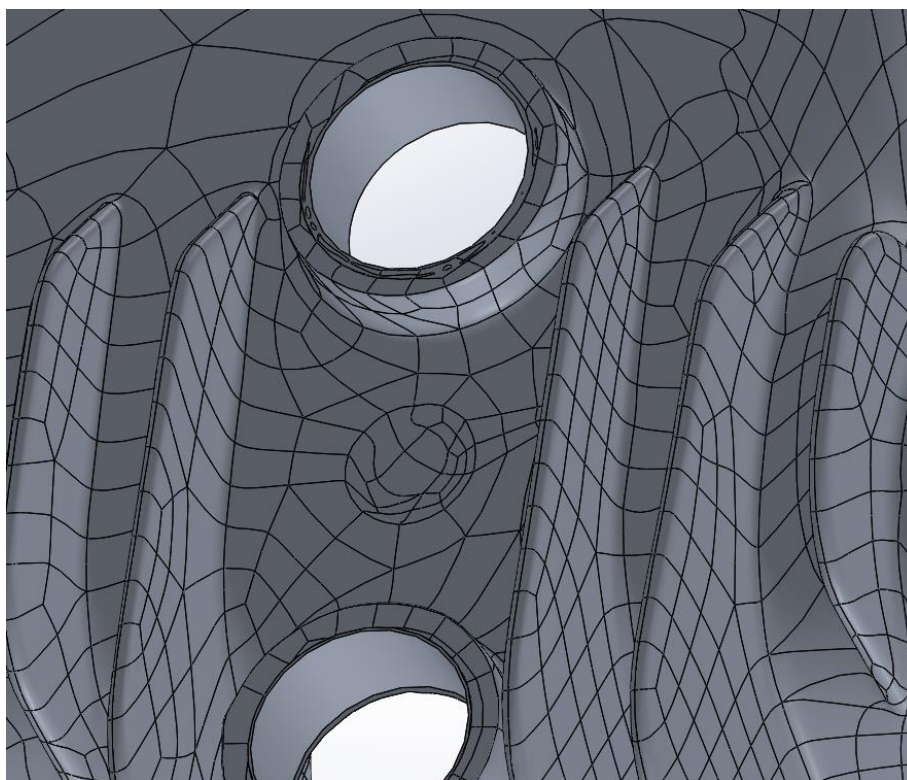


**Slika 43. Popunjeni nedostaci nekih površina u modelu**

Nakon popunjavanja svih površina model je izvezen u odgovarajući format površina i tamo pojednostavljen te su napravljeni dodaci za strojnu obradu nakon lijevanja. Provrti gdje se moraju urezati navoji su smanjeni u promjeru tako da ne nedostaje materijala za obradu što je prikazano na slikama 44 i 45.



**Slika 44. Navoj koji je dobiven 3D skeniranjem**



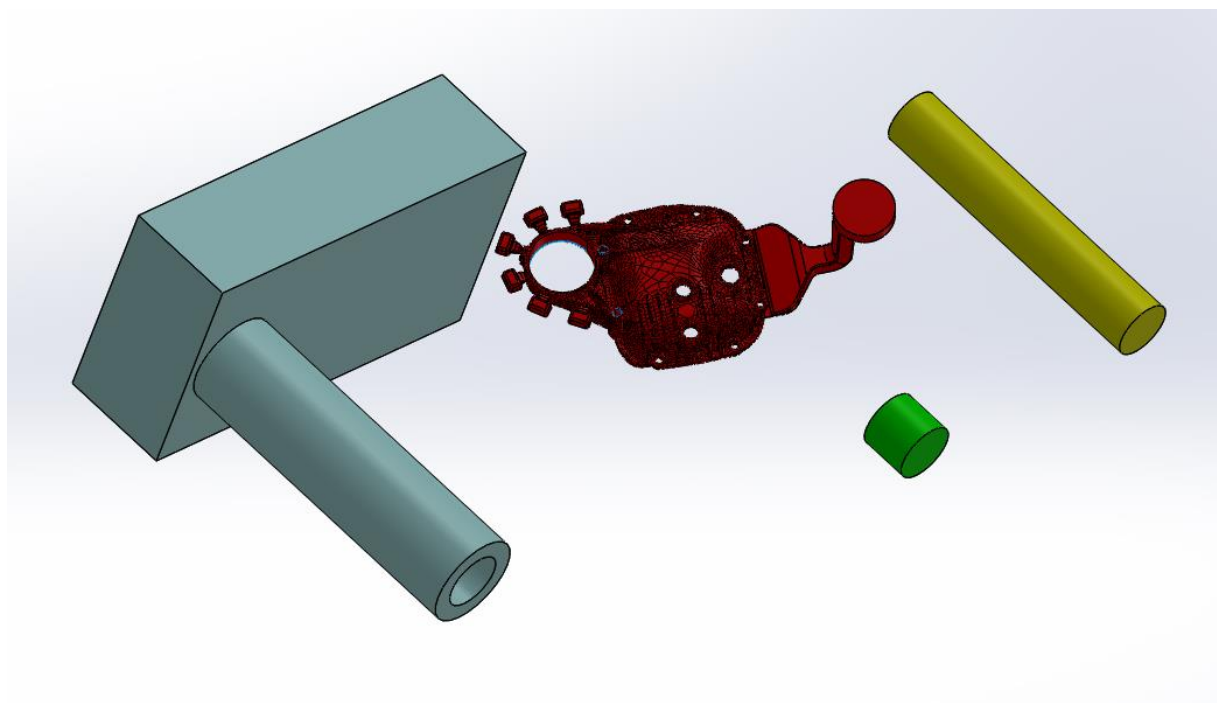
**Slika 45. Uklonjeni navoji i stavljen dodatak za strojnu obradu**

Nakon ovakve obrade, CAD model je spreman za spajanje uljavnog sustava, odzračnika (ujedno i preljeva) te izrade kalupa za simulaciju. CAD model je prikazan na slici 46.



**Slika 46. CAD model poklopca u Solidworksu**

CAD model poklopca koji je spojen s uljevnim sustavom i odzračnicima, tlačna komora, klip i kalup prikazani su na slici 47.



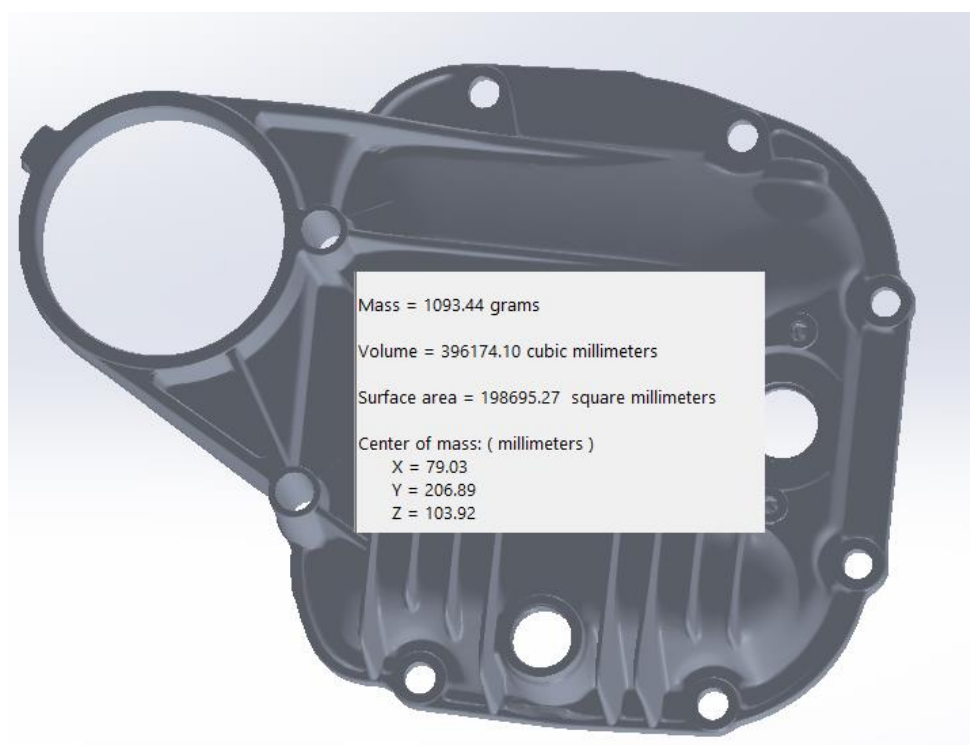
**Slika 47. CAD modeli spremni za simulaciju**

Renderirani CAD model odljevka s uljevnim sustavom i odzračnicima je prikazan na slici 48.



**Slika 48. Renderirani CAD model sa sustavom za ulijevanje**

Na slici 49 je prikazana masa i volumen modela odljevka od materijala AlSi12 u Solidworksu.



**Slika 49. Masa, volumen i površina odljevka**

Informacije o odljevku su:

- masa: 1,094 kg
- volumen: 0,00396 m<sup>3</sup>
- gustoća:  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

Na slici 50 se vidi izmjerena masa poklopca zajedno s oduškom težine cca 10 grama. Odušak je u Solidworksu izrezan kako bi se dio mogao proizvesti tlačnim lijevanjem te to dokazuje da je CAD model uistinu jako precizan u odnosu na stvarni predmet.



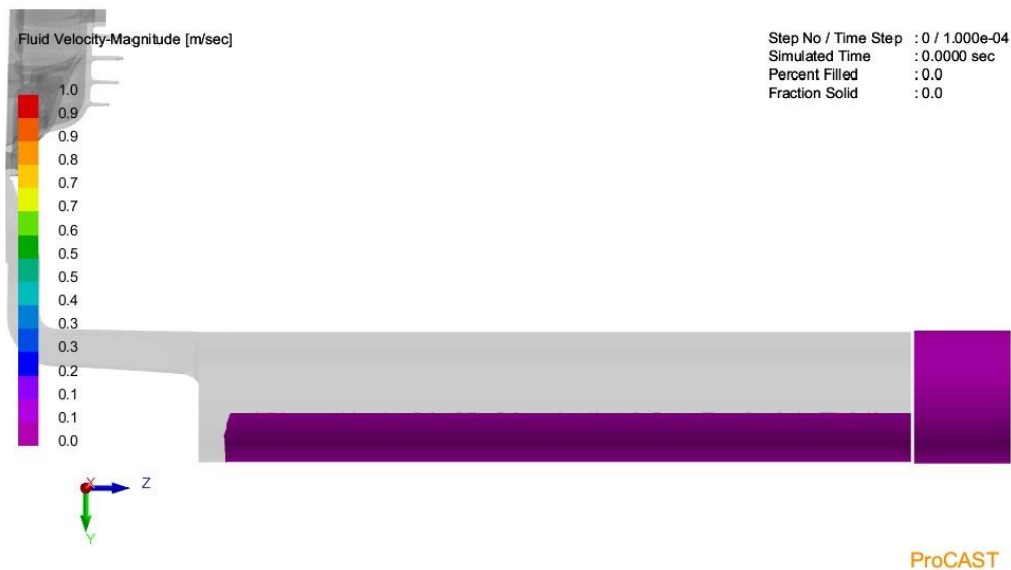
Slika 50. Izmjerena stvarna masa poklopca s oduškom

## 9.2. Simulacija lijevanja i rezultati

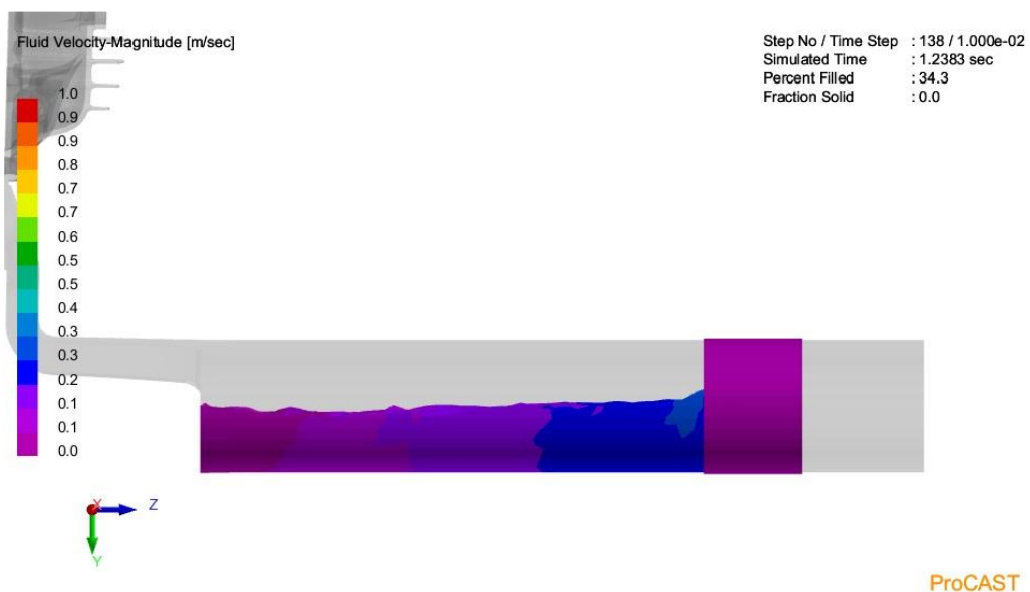
Simulacija lijevanja je napravljena u programskom paketu ProCAST kao i analiza dobivenih rezultata. Simulacija se temelji na volumenskoj mreži odljevka koja se rješava metodom konačnih elemenata (MKE). Prije nego što se simulacija pokrene moraju se zadati parametri sile gravitacije, koji materijal se lijeva, na koji način se provodi toplina, odrediti parametri brzine klipa lijevanja, temperature taline koja se ulijeva tlačnu komoru, tlak kojim se talina puni u kalupnu šupljinu i mnogi drugi. Kada se zadaju svi potrebni parametri simulacija se bazira na principu rješavanja Navier-Stokes-ovih jednadžbi.

### 9.2.1. Gibanje tlačnog klipa

Gibanje klipa treba biti umjereno da ne izazove val taline. Uslijed vala se zarobi zrak unutar taline koji se zatim zarobi negdje u odljevku i najčešće napravi poroznost ili nepopunjenost kalupne šupljine. Može se dogoditi i otkidanje vala taline, uslijed prevelike brzine i akceleracije klipa. Premala popunjenost ili duljina tlačne komore također utječe na ovaj problem. Na slici 51 je prikazan klip u mirovanju dok je na slici 52 prikazano početno ubrzanje klipa i taline u cilindru.



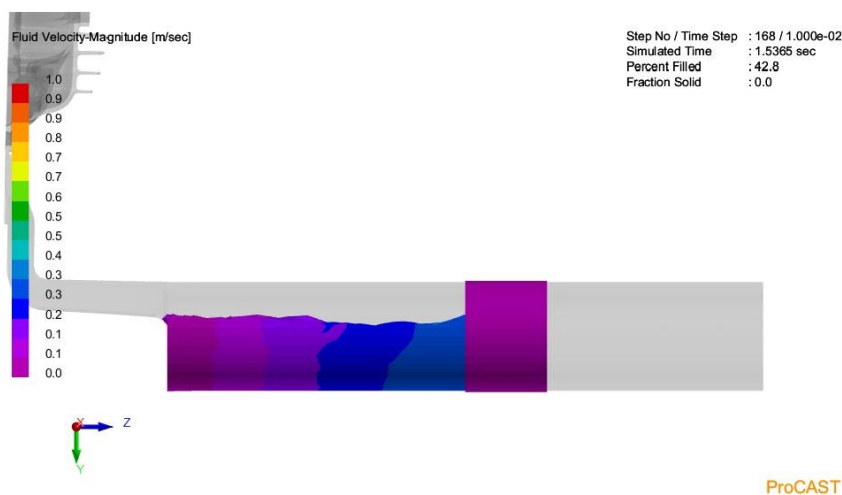
Slika 51. Klip i talina u mirovanju



Slika 52. Početak gibanja klipa



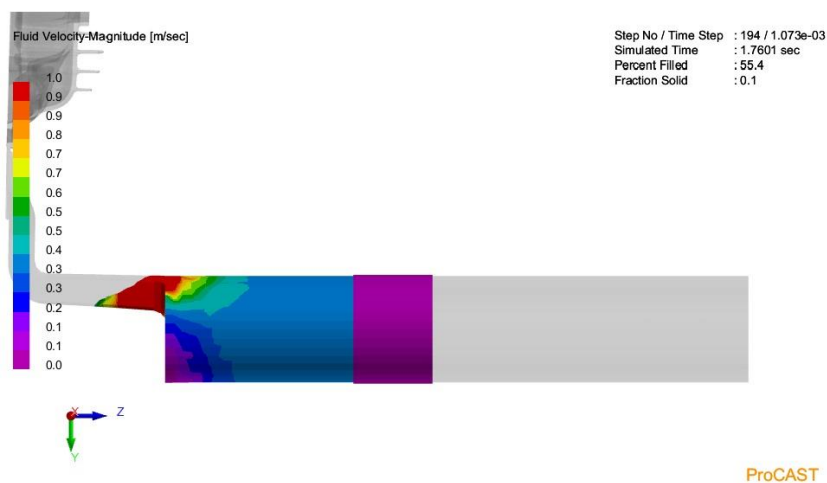
Na slikama 53, 54 i 55 su prikazane povećane brzine klipa i taline u postupku tlačnog lijevanja.



Slika 53. Spora faza gibanja klipa 2



Slika 54. Spora faza gibanja klipa 3

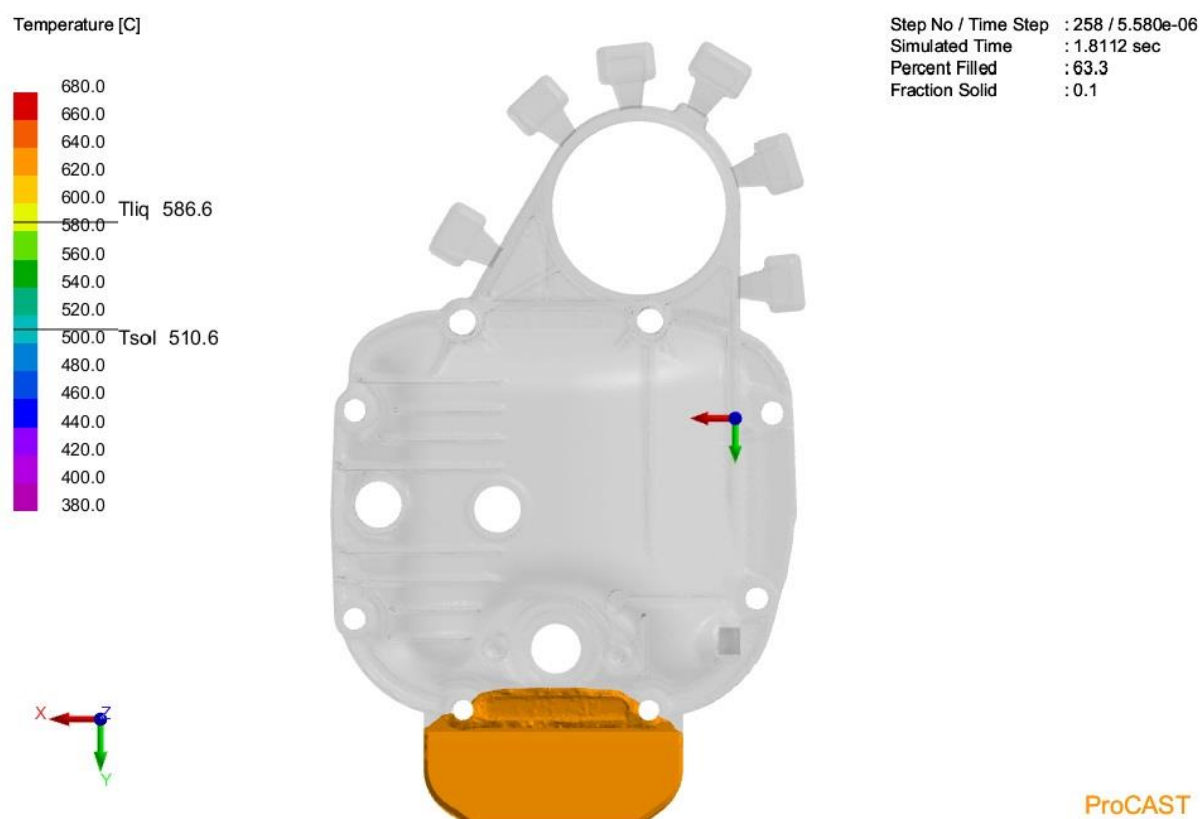


Slika 55. Spora faza gibanja klipa 4

Iz slika 51-55 se po kretanju taline unutar tlačne komore može vidjeti da ne dolazi do nastanka vala u talini i zarobljavanja zraka. Sve ove brzine čine sporu fazu gdje se lagano povećava brzina klipa. Nema velikih turbulencija što bi značilo da su brzine klipa dobro izabrane. Vidi se iz slika da se postupno podiže razina taline u komori sve dok se ne popune stijenke tlačne komore i talina uđe u uljevni sustav. Nakon toga se naglo povećava brzina klipa kako bi se talina što bolje rasporedila i popunila cijelu kalupnu šupljinu.

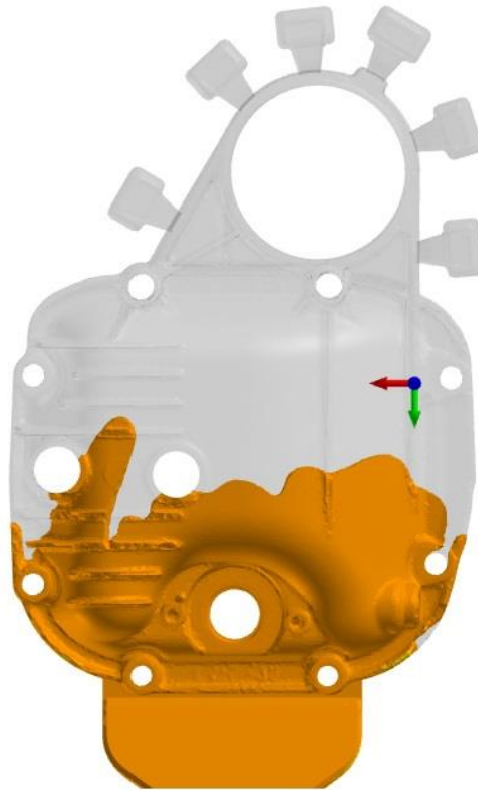
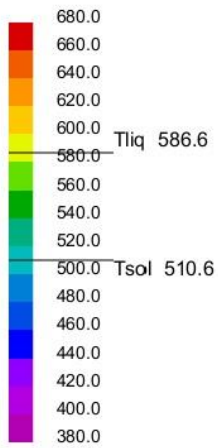
### 9.2.2. Punjenje kalupne šupljine

Slike 56-59 prikazuju rezultate punjenja kalupne šupljine s obzirom na zadanu brzinu klipa. Na slikama izvučenim iz simulacije vidljivo je da će se talina ravnomjerno rasporediti u kalupnu šupljinu. Zbog složene geometrije odljevka moguće je zarobljavanje zraka iznad provrta. Može se također primijetiti da će se kalup popuniti talinom prije nego što temperatura taline padne ispod likvidus granice što je pozitivno. Preljevi se popunjavaju zadnji što znači da su postavljeni na ispravna mjesta modela.



Slika 56. Punjenje kalupne šupljine pri 63,3% popunjenosti

Temperature [C]

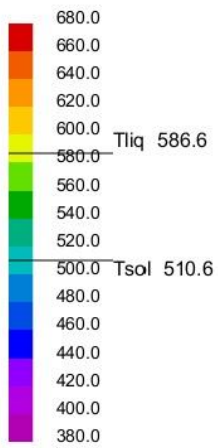


Step No / Time Step : 368 / 2.128e-05  
 Simulated Time : 1.8173 sec  
 Percent Filled : 70.0  
 Fraction Solid : 0.1

ProCAST

Slika 57. Punjenje kalupne šupljine pri 70% popunjenosti

Temperature [C]

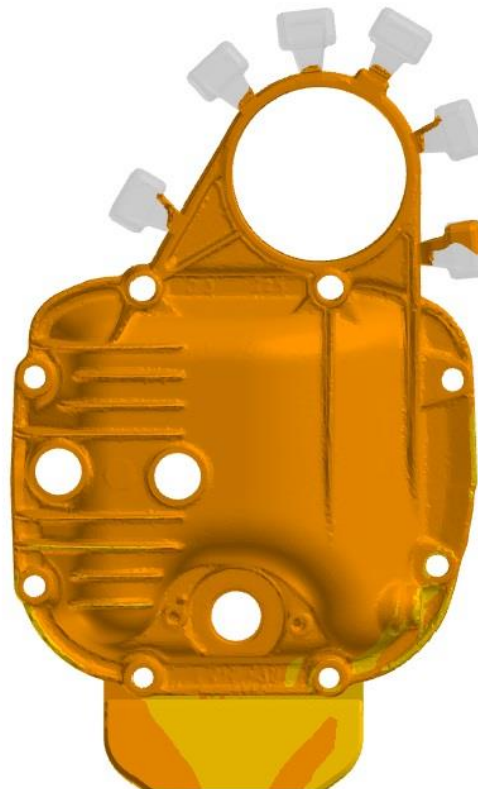
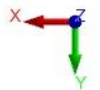
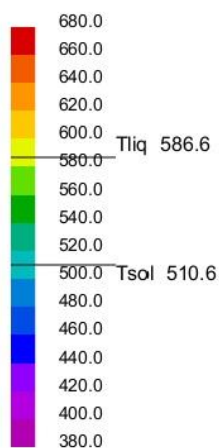


Step No / Time Step : 488 / 5.911e-05  
 Simulated Time : 1.8253 sec  
 Percent Filled : 80.7  
 Fraction Solid : 0.1

ProCAST

Slika 58. Punjenje kalupne šupljine pri 80,7% popunjenosti

Temperature [C]



Step No / Time Step	: 642 / 9.439e-06
Simulated Time	: 1.8338 sec
Percent Filled	: 95.6
Fraction Solid	: 0.1

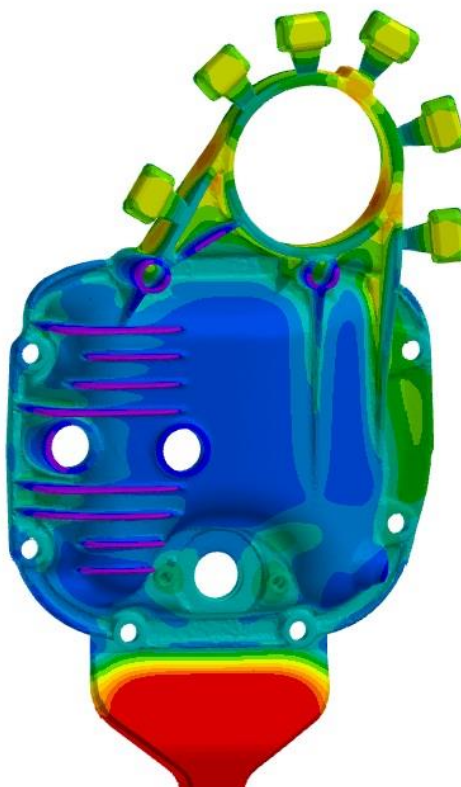
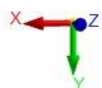
ProCAST

**Slika 59. Punjenje kalupne šupljine pri 95,6% popunjenosti**

### 9.2.3. Skrućivanje odljevka

Pretpostavka je da se zadnje skrućuju dijelovi koji imaju najdeblju stijenku i dijelovi koje zadnje popuni talina. Na slici 60 je prikazano potrebno vrijeme nakon punjenja kalupne šupljine kako bi talina prešla iz tekućeg stanja u kruto stanje. Iz rezultata prikazanih na slici 60 je vidljivo da se zadnje skrućuju dijelovi oko preljeva tj. odzračnika. To su ujedno mjesta koja su se posljednja popunila talinom i tamo se nalaze dijelovi s najdebljim stijenkama što je potvrdilo pretpostavku. Prilikom skrućivanja oko njih se može dio materijala povući iz preljeva kako ne bi došlo do manjka materijala u odljevku, što pokazuje pozitivan utjecaj preljeva.

Solidification Time [sec]



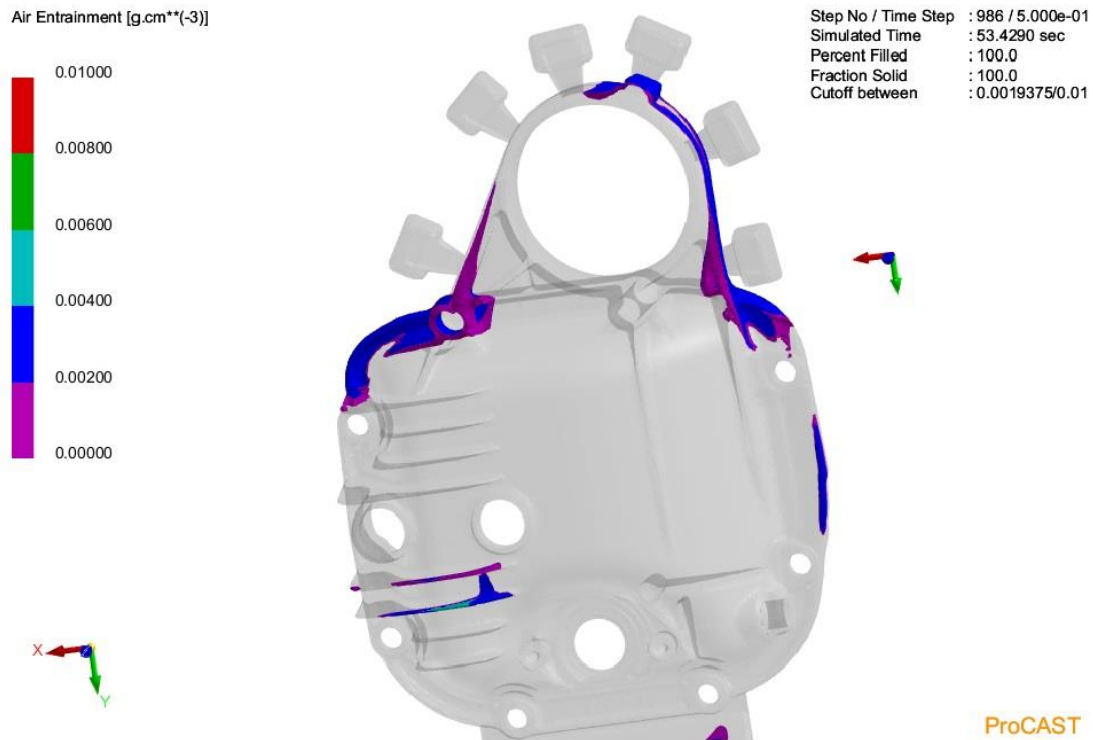
Step No / Time Step	: 986 / 5.000e-01
Simulated Time	: 53.4290 sec
Percent Filled	: 100.0
Fraction Solid	: 100.0

ProCAST

Slika 60. Vrijeme skrućivanja taline u kalupnoj šupljini

#### 9.2.4. Prisutnost zraka u kalupnoj šupljini

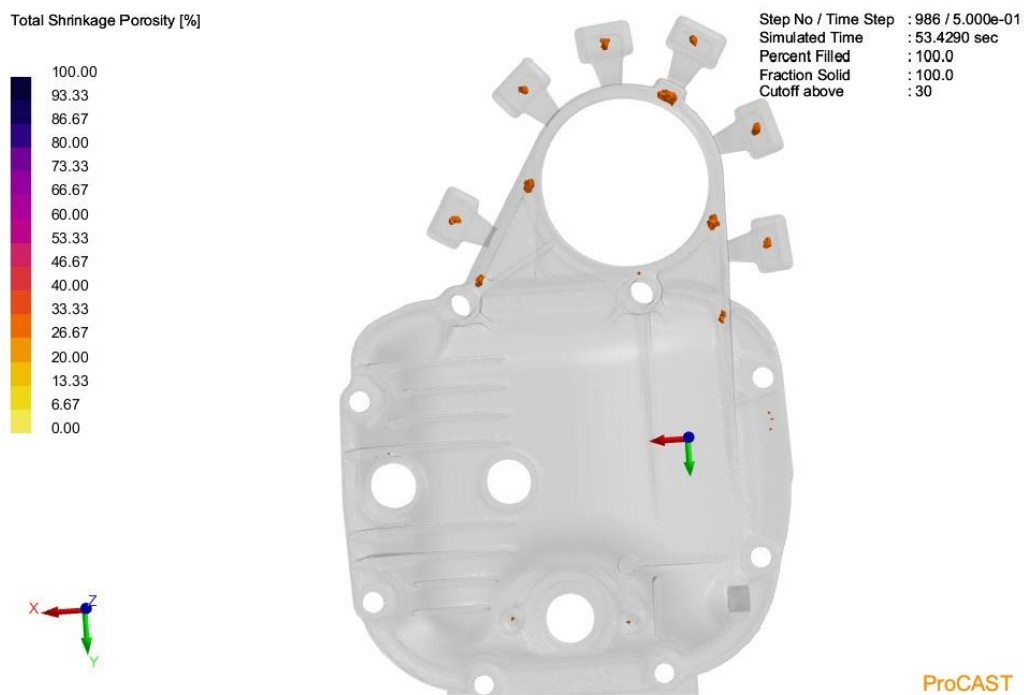
Prilikom svakog lijevanja postoji mogućnost da se zarobi zrak unutar kalupne šupljine na nekim kritičnim mjestima. Najčešće su to mjesta oko provrta ili teško dostupna mjesta okomita na smjer kretanja taline, rubni dijelovi odljevka i slično. Slika 61 prikazuje prisutnost zraka u kalupnoj šupljini nakon popunjavanja kalupne šupljine talinom. Uočava se da je najveća koncentracija zarobljenog zraka na jednom rebro za hlađenje, dok je najveća zona na mjestima zadnjeg popunjavanja kalupne šupljine. Zarobljen je u vrlo malim količinama te se po količini zraka u simulaciji ne očekuje plinska poroznost u materijalu na tim mjestima.



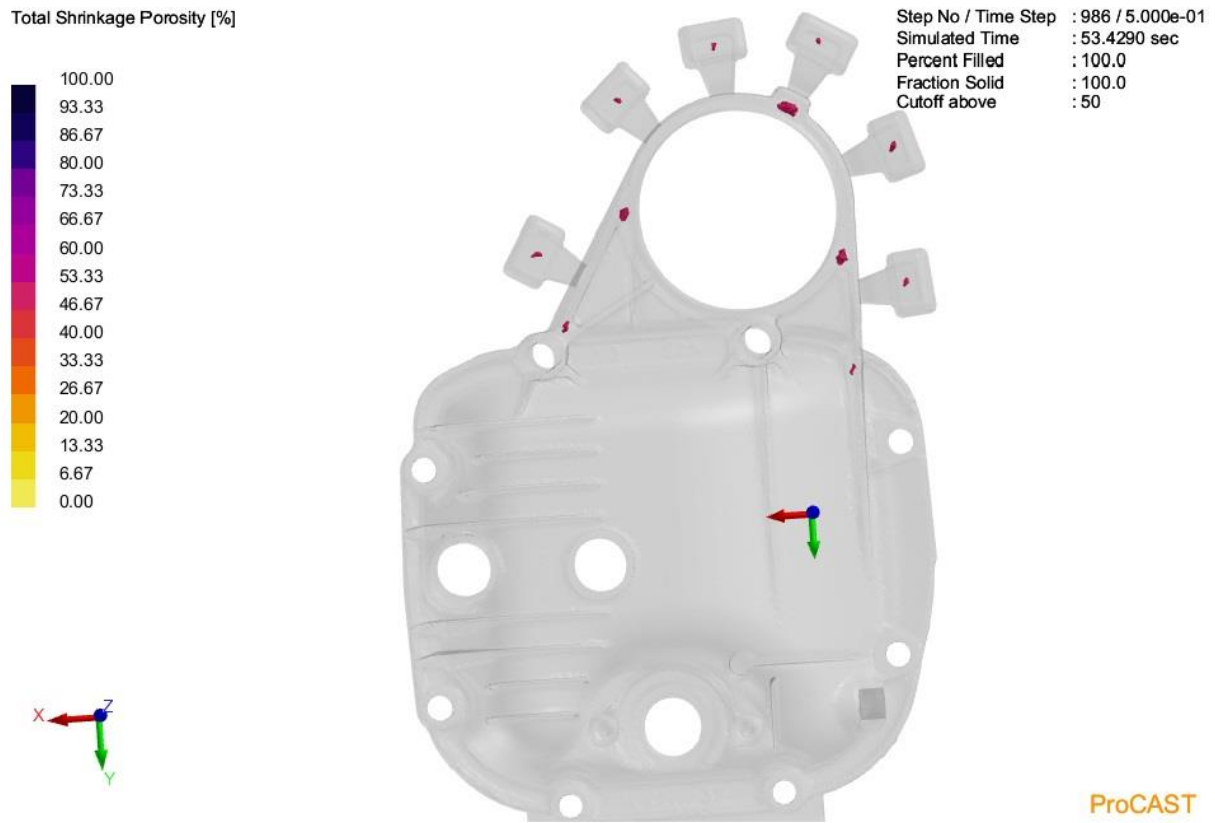
Slika 61. Zarobljeni zrak unutar kalupne šupljine

### 9.2.5. Poroznost odljevka

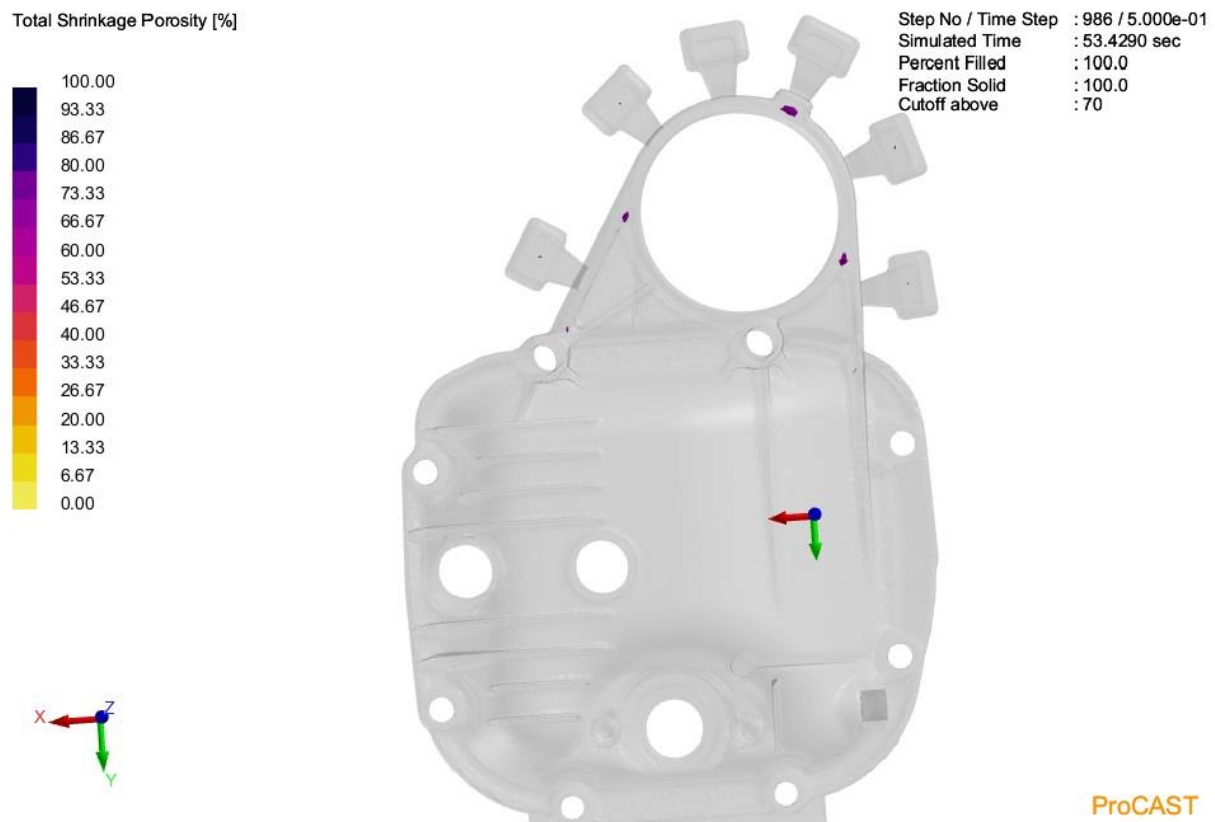
Ova analiza pokazuje mogućnost pojave poroznosti u odljevku. Provedena je analiza u vjerojatnostima nastanka poroznosti u postocima od 30-80% što je prikazano na slikama 62-65.



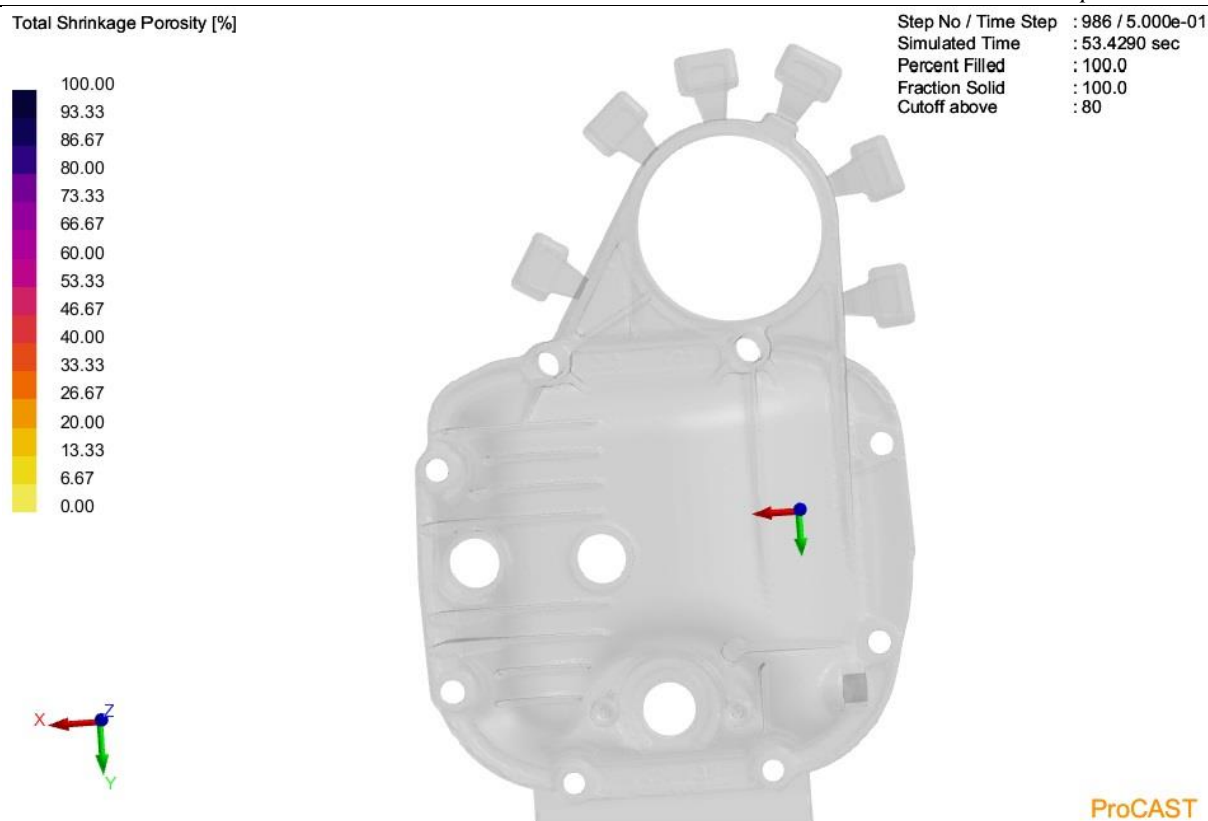
Slika 62. Poroznost skupljanja iznad 30% vjerojatnosti



Slika 63. Poroznost skupljanja iznad 50% vjerojatnosti



Slika 64. Poroznost skupljanja iznad 70% vjerojatnosti



**Slika 65. Poroznost skupljanja iznad 80% vjerojatnosti**

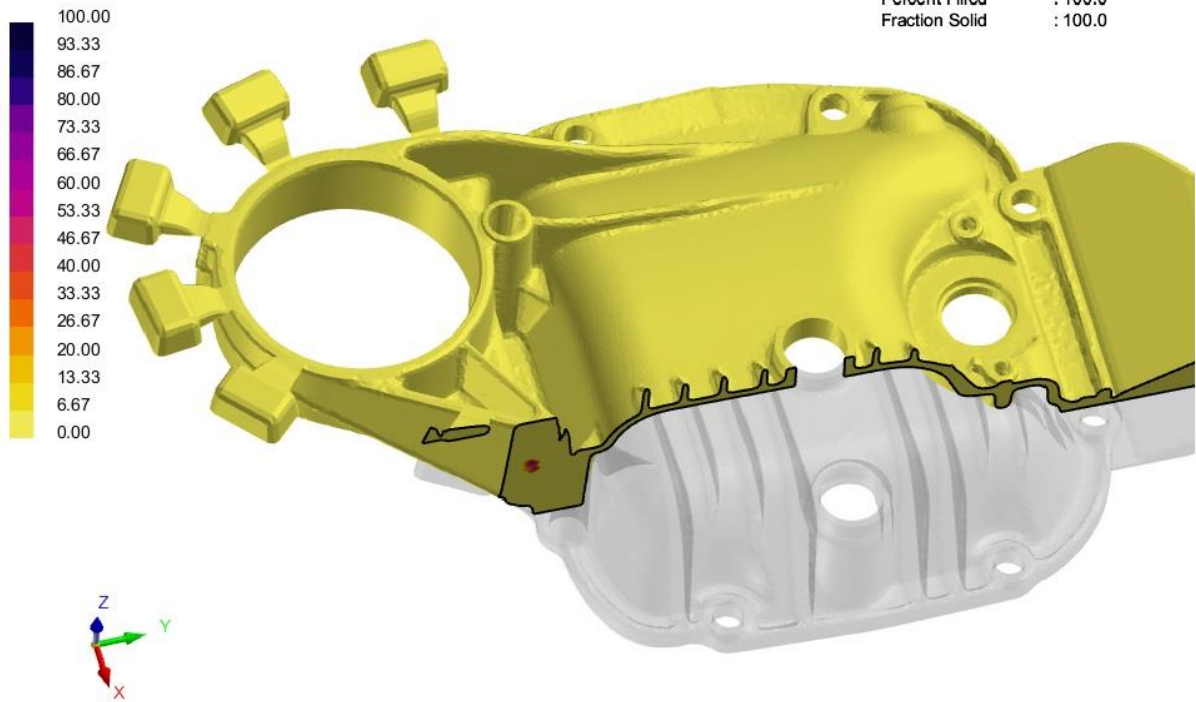
Sa slika 62-65 je vidljivo da se poroznost javlja na nekoliko mjesta na odljevku. Najviše se pojavljuje na mjestima gdje je prethodna analiza pokazala da će se odljevak zadnji skruniti. Kritična su mjesta preko 70% poroznosti kojih ima jako malo (vidljivo na slici 64) dok 80% poroznosti nema nigdje u odljevku.

Radi boljeg uočavanja poroznosti na slikama 66-69 je prikazana poroznost u presjecima odljevka. Iz tih slika je vidljivo da je rezultat jako dobar i poroznost je minimalna. Na slici 66 je prikazana mala poroznost u odljevku. Slika 67 prikazuje dvije poroznosti ali se jedna nalazi u preljevu i ona nije bitna. Slika 68 prikazuje poroznost na krajnjem dijelu odljevka radi zadebljanja stijenke odljevka. Na slici 69 je prikazana poroznost na mjestu spajanja pojačanja te tako mala poroznost ne bi trebala utjecati na mehanička svojstva odljevka.



Total Shrinkage Porosity [%]

Step No / Time Step : 986 / 5.000e-01  
 Simulated Time : 53.4290 sec  
 Percent Filled : 100.0  
 Fraction Solid : 100.0

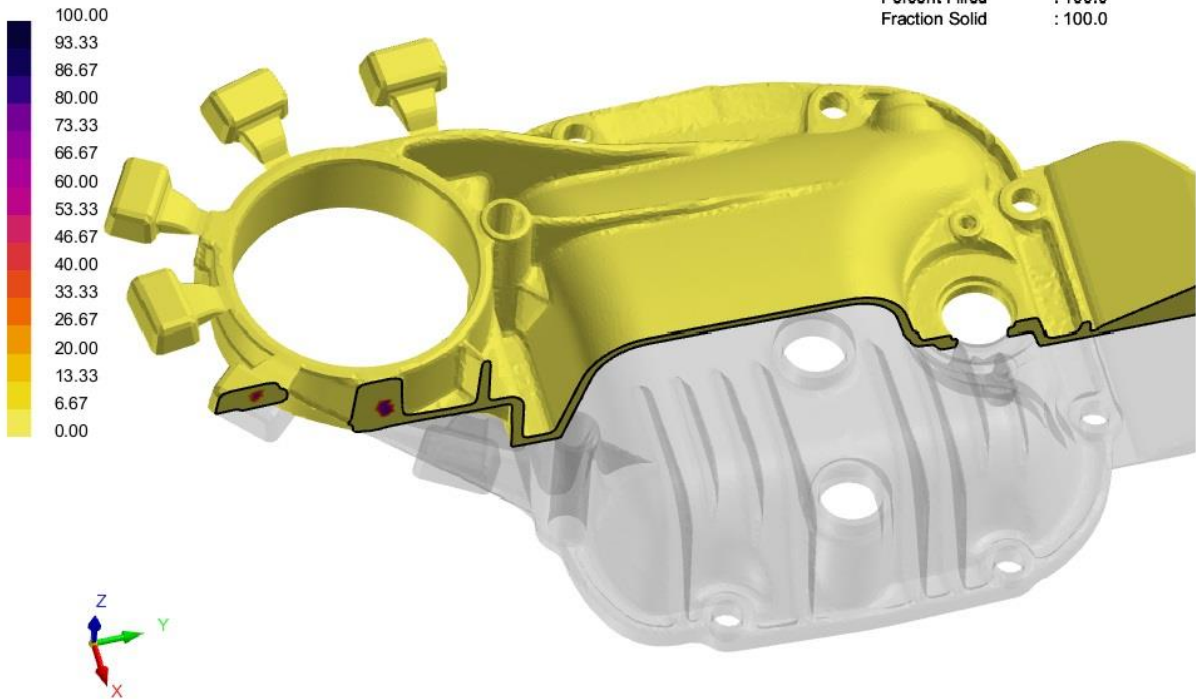


ProCAST

Slika 66. Presjek mjesta prve poroznosti

Total Shrinkage Porosity [%]

Step No / Time Step : 986 / 5.000e-01  
 Simulated Time : 53.4290 sec  
 Percent Filled : 100.0  
 Fraction Solid : 100.0

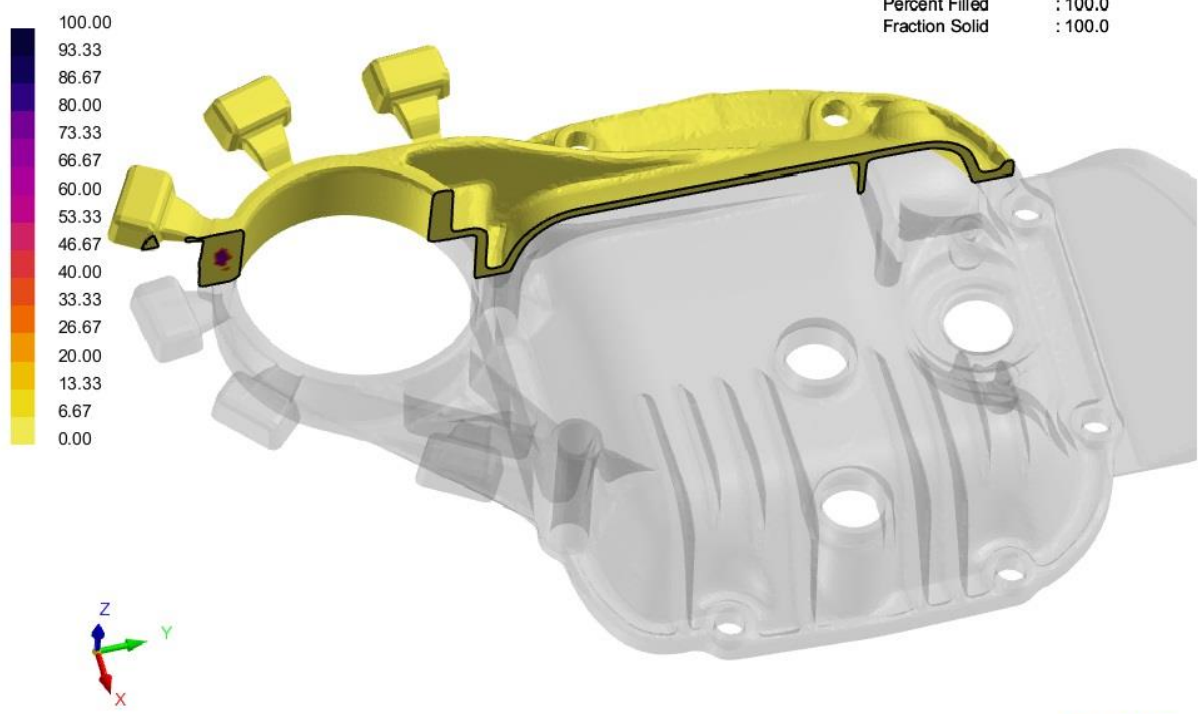


ProCAST

Slika 67. Presjek mjesta druge poroznosti

Total Shrinkage Porosity [%]

Step No / Time Step : 986 / 5.000e-01  
 Simulated Time : 53.4290 sec  
 Percent Filled : 100.0  
 Fraction Solid : 100.0

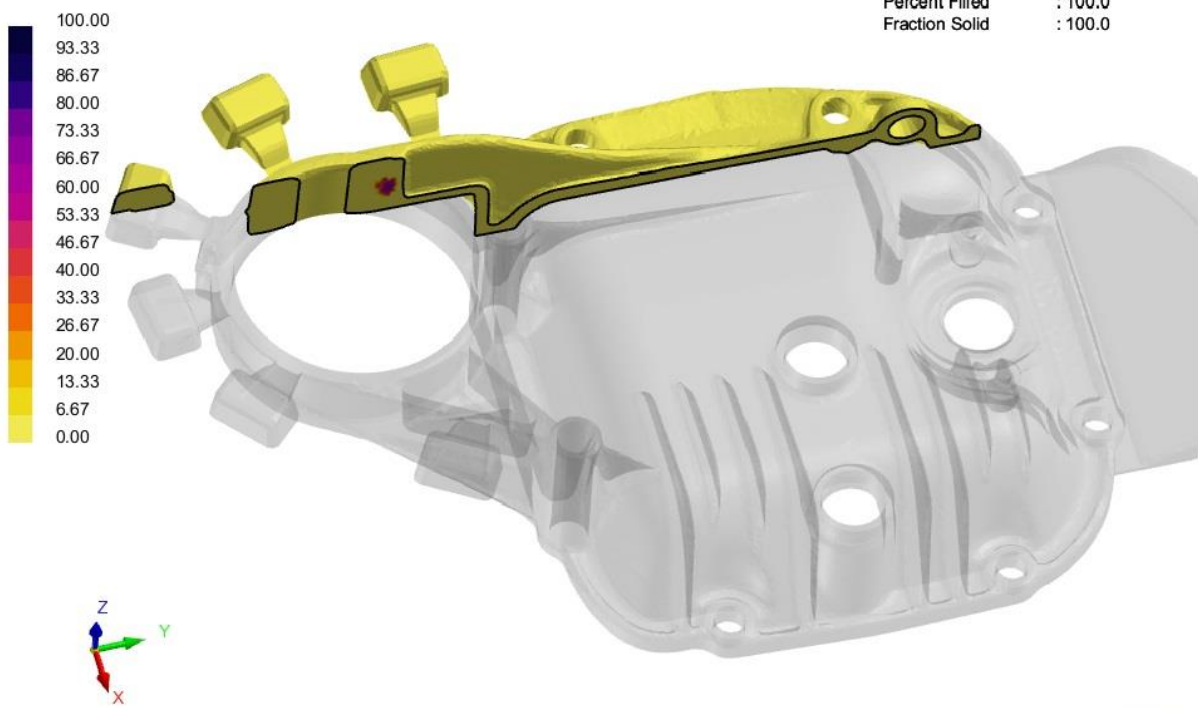


ProCAST

Slika 68. Presjek mjesta treće poroznosti

Total Shrinkage Porosity [%]

Step No / Time Step : 986 / 5.000e-01  
 Simulated Time : 53.4290 sec  
 Percent Filled : 100.0  
 Fraction Solid : 100.0

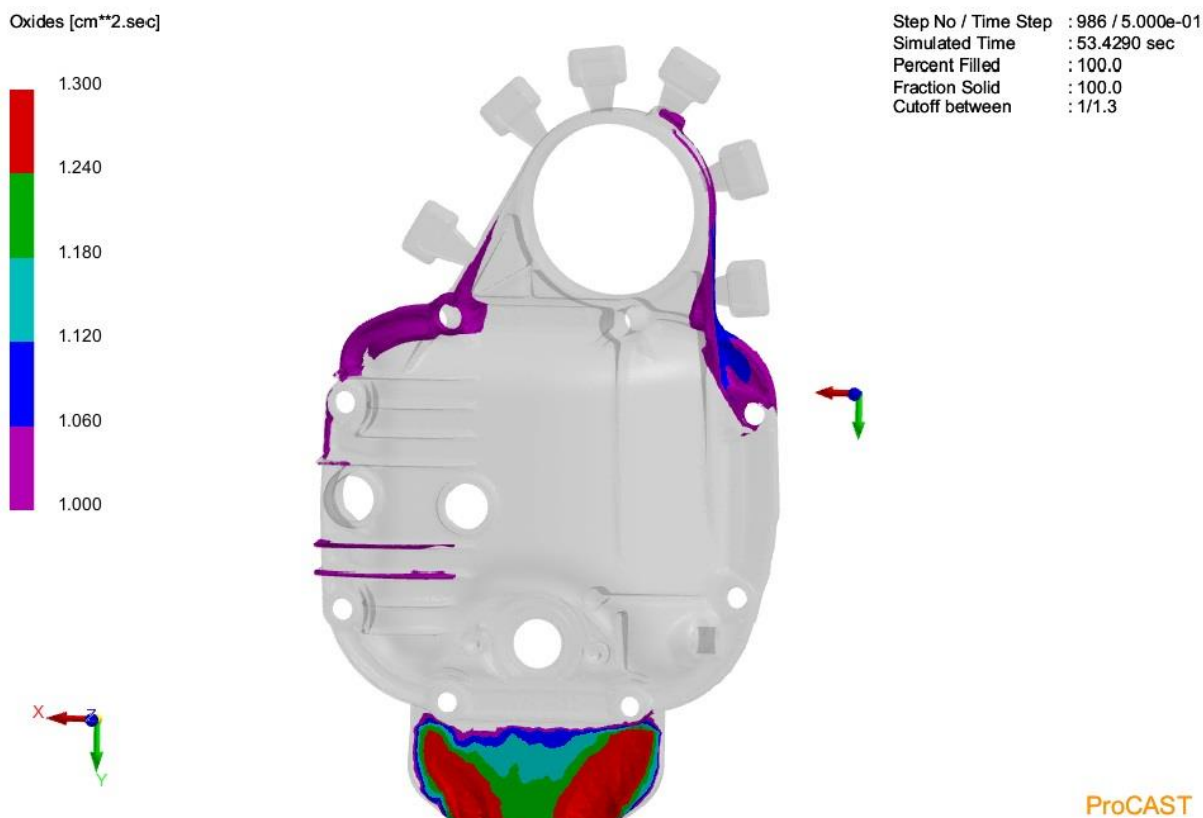


ProCAST

Slika 69. Presjek mjesta četvrte poroznosti

### 9.2.6. Zarobljeni oksidi u odljevku

Na slici 70 su prikazani zarobljeni oksidi u odljevku nakon provedene simulacije. Rezultati su zadovoljavajući jer su manji od granice 1,3. Preko te granice količina oksida bi mogla dovesti do nepopunjenosti odljevka. Na ovom primjeru se vidi da su oksidi u traženim granicama tako da greške uslijed nastalih oksida nisu očekivane u odljevku.

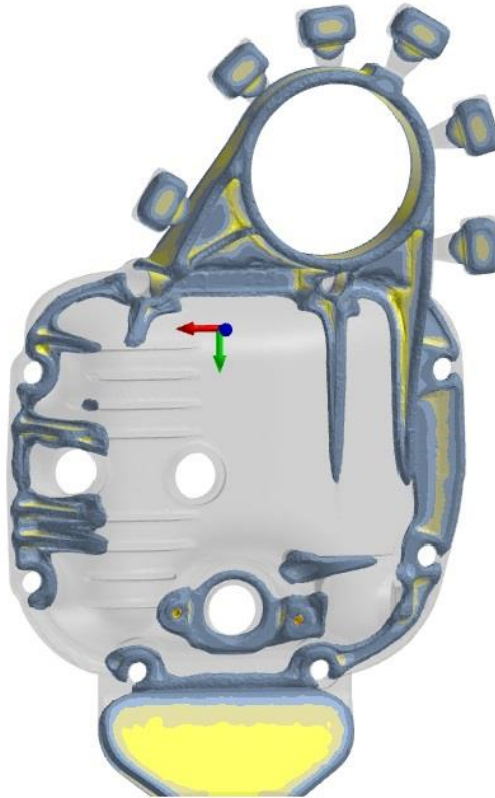
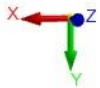
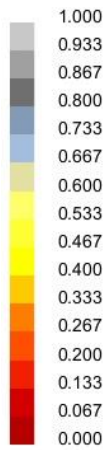


Slika 70. Zarobljeni oksidi u odljevku

### 9.2.7. Udio krute faze

Analiza skrućivanja odljevka je napravljena kako bi se uočilo koji dio odljevka se zadnji skrućuje i prikazuje se ponašanje odljevka prilikom skrućivanja. Najveća mogućnost greške se javlja kod dijelova odljevka koji se zadnji skrućuju. Na slikama 71-74 je prikazan udio krute faze u određenim intervalima. Na slici 74 je vidljivo da se odljevak u potpunosti skrutio nakon 11,92 sekunde.

Fraction Solid

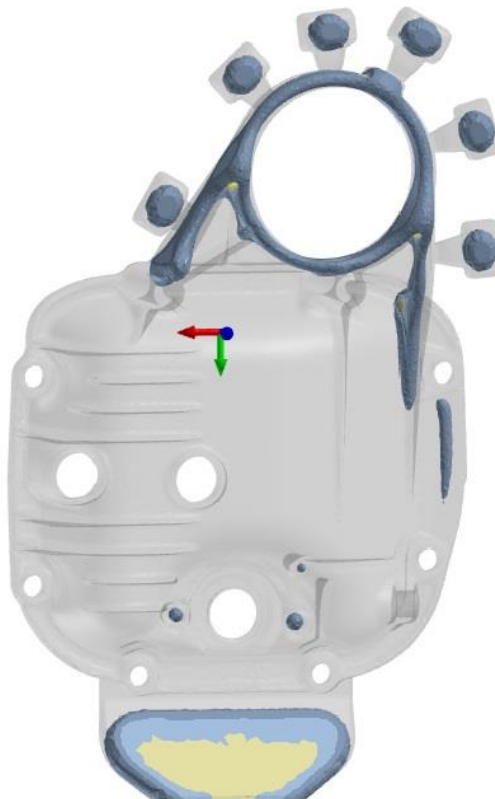
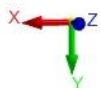
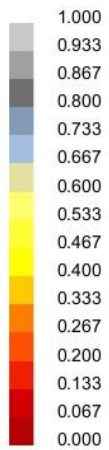


Step No / Time Step : 872 / 5.000e-01  
Simulated Time : 6.0540 sec  
Percent Filled : 100.0  
Fraction Solid : 53.7  
Cutoff between : 0/0.8

ProCAST

Slika 71. Udio krute faze odljevka nakon 6 sekundi

Fraction Solid

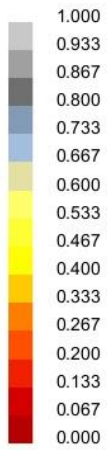


Step No / Time Step : 876 / 5.000e-01  
Simulated Time : 8.0540 sec  
Percent Filled : 100.0  
Fraction Solid : 67.6  
Cutoff between : 0/0.8

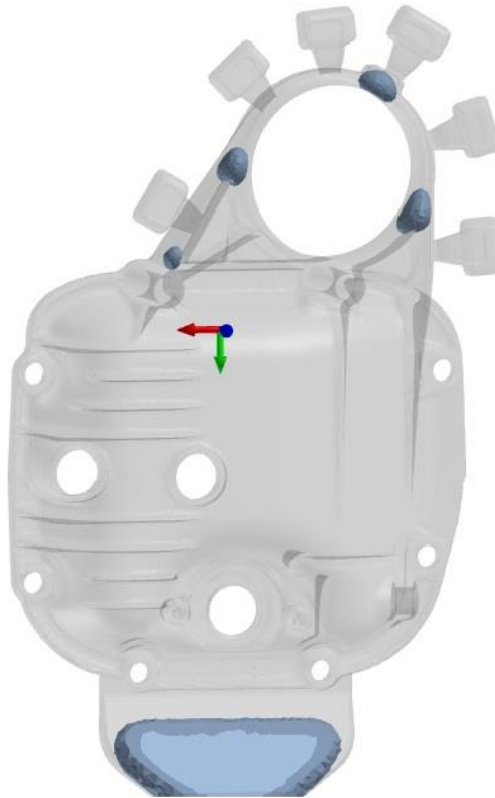
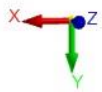
ProCAST

Slika 72. Udio krute faze odljevka nakon 8 sekundi

Fraction Solid



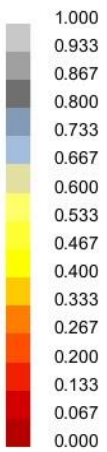
Step No / Time Step : 884 / 1.250e-01  
 Simulated Time : 10.0540 sec  
 Percent Filled : 100.0  
 Fraction Solid : 74.5  
 Cutoff between : 0/0.8



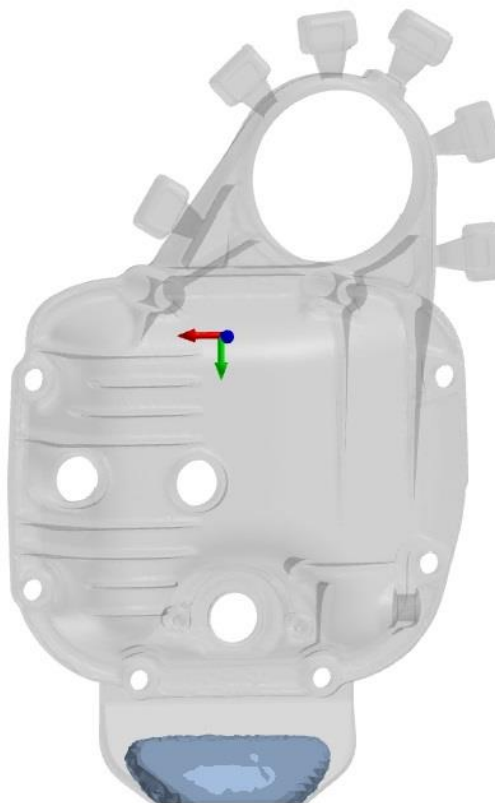
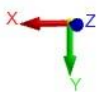
ProCAST

Slika 73. Udio krute faze odljevka nakon 10 sekundi

Fraction Solid



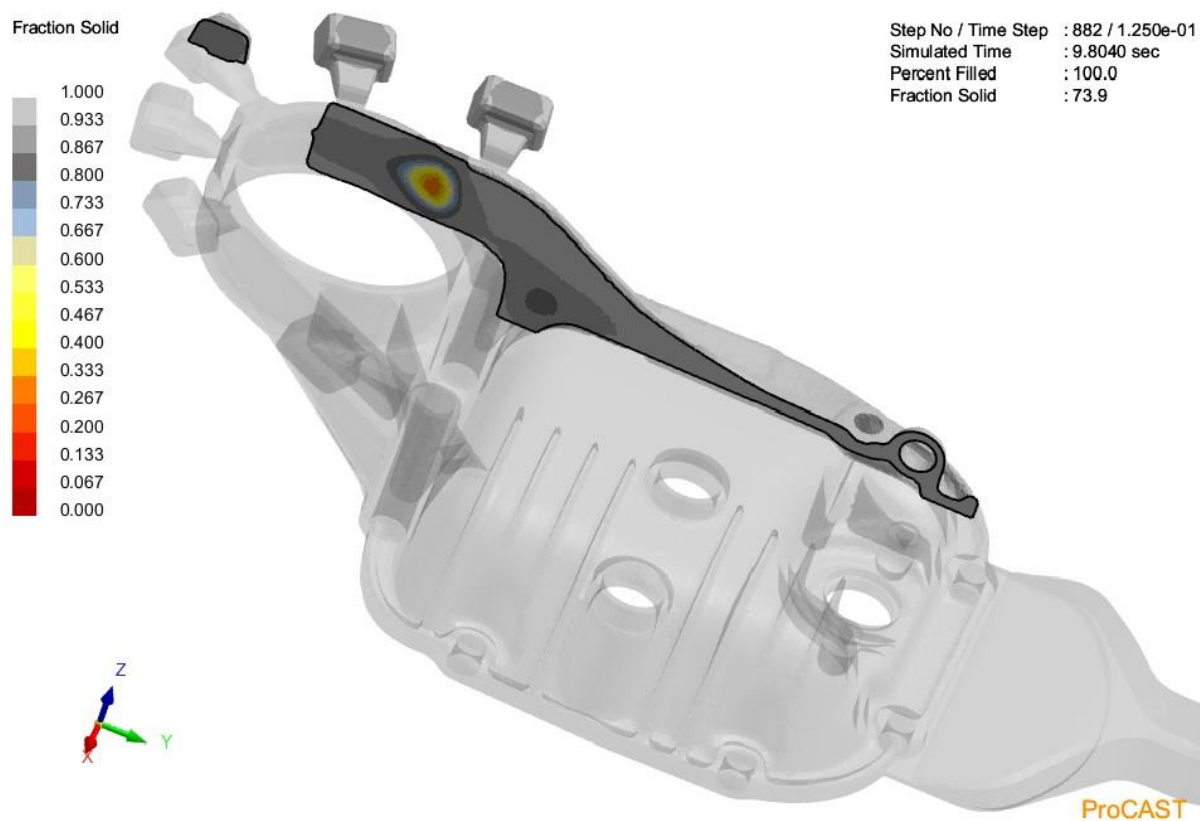
Step No / Time Step : 898 / 2.500e-01  
 Simulated Time : 11.9290 sec  
 Percent Filled : 100.0  
 Fraction Solid : 78.5  
 Cutoff between : 0/0.8



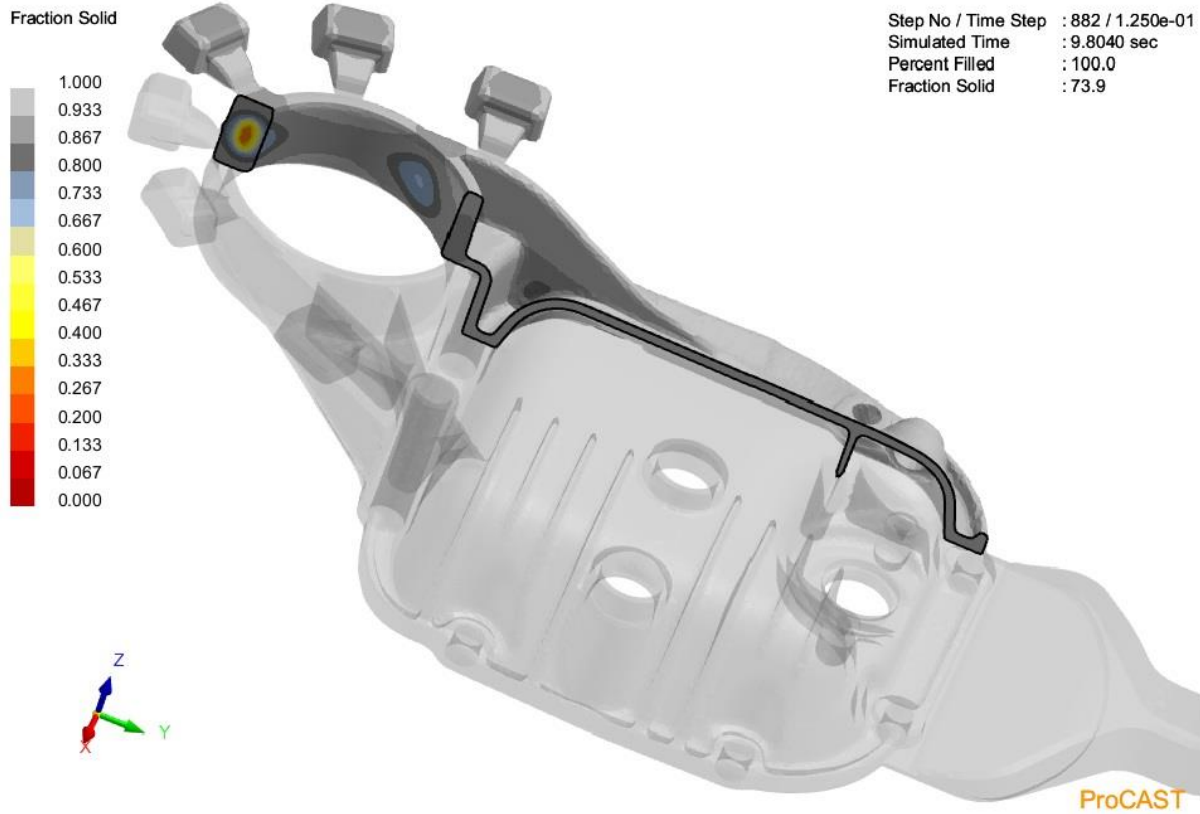
ProCAST

Slika 74. Udio krute faze odljevka nakon 11,92 sekunde

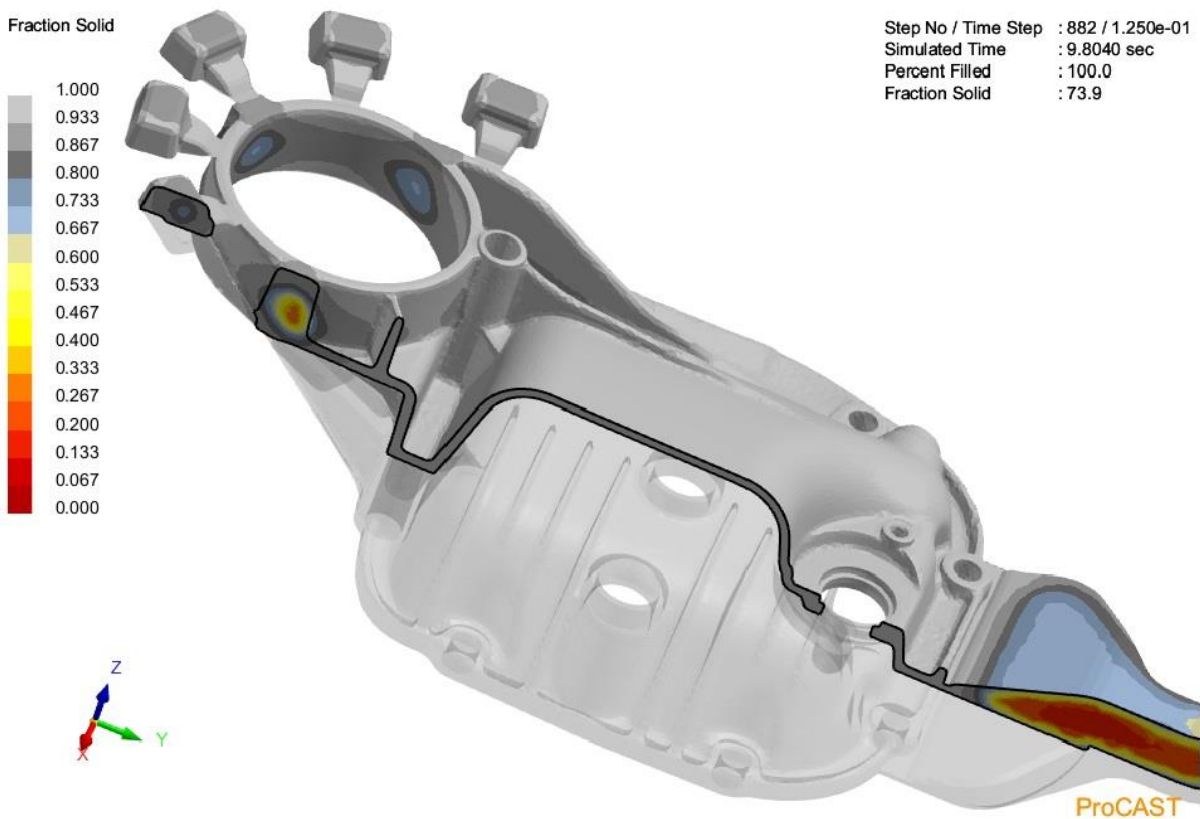
Također je vidljivo da su se dijelovi s najdebljim stijenkama skrutili posljednji. Ojačanja kod provrta za selen su se zadnja skrutila stoga bi se moglo naslutiti da bi se greška mogla pojaviti baš u tim dijelovima. Područja zadnjeg skrućivanja pobliže se vide na slikama 75-77 gdje su prikazani presjeci odljevka.



Slika 75. Udio krute faze presjek 1



Slika 76. Udio krute faze presjek 2



Slika 77. Udio krute faze presjek 3

## 10. ZAKLJUČAK

Tlačni lijev ima široku primjenu u industriji, a posebno u automobilskoj zbog kvalitete, visoke dimenzijske točnosti i dobrih mehaničkih svojstava koje posjeduju dobiveni odljevci. Ovaj proces omogućava izradu tankostijenih odljevaka kao što je poklopac diferencijalnog prijenosnika razmatran u radu. Stoga je u prvom dijelu rada detaljnije opisan proces tlačnog lijevanja, te su navedene greške koje se mogu pojaviti tijekom procesa. U drugom dijelu rada provedena je simulacija tlačnog lijevanja na poklopcu diferencijalnog prijenosnika, odnosno ispitnog uzorka.

CAD model ispitnog uzorka koji je korišten u simulaciji dobiven je postupkom digitalizacije. Za tu svrhu korišten je digitalizator tipa ATOS 5X njemačkog proizvođača GOM. Uzorak je skeniran u dva različita stezanja, te su skenovi kasnije spojeni u jedinstveni model. Iako su digitalizacijom dobiveni kvalitetni rezultati modela, isti nisu bili potpuni. Glavni razlog tome bile su značajke ispitnog uzorka koje su dijelom onemogućavale osvjetljavanje svih površina strukturiranim izvorom svjetlosti. Stoga je nad dobivenim modelom proveden niz postupaka u cilju pojednostavljenja i zatvaranja svih površina modela.

Naposljetku su primjenom programskog paketa Solidworks na CAD model uzorka dodani uljevni sustav i preljevi za tlačno lijevanje za koje se smatralo da su nužni u cilju postizanja kvalitetnog odljevka. Posebna pažnja je pri tome posvećena orijentaciji i broju preljeva, kao i obliku, položaju i gabaritima uljevnog sustava. Simulacija je provedena primjenom programskog paketa ProCAST.

Rezultati simulacije ukazuju na mogućnost pojave poroznosti skupljanja, koja se uglavnom javlja na dijelovima odljevka koji su se zadnji skrutili. Razlog tome je nedostatak napajanja zadnjih mjesta skrućivanja odljevka. Oksidi i zarobljeni zrak su ispod granične razine stoga prilikom lijevanja odljevak ne bi trebao imati nepopunjenih dijelova i grešaka.

Zaključno, rezultati simulacije su povoljni no zbog mogućnosti nastanka poroznosti proces je preporučeno još dodatno optimirati. Zbog iznimne složenosti procesa tlačnog lijevanja teško ga je optimirati. Najčešće se optimira metodom pokušaja što za posljedicu ima vrlo skupu izradu tehnologije za poboljšano lijevanje. U ovom slučaju bi trebalo probati promijeniti mjesto uljevnog sustava, a možda i položaj preljeva na modelu.



**LITERATURA**

- [1] <https://www.mandttransmissions.co.uk/how-a-differential-works.html> , 19.06.2022.
- [2] Bauer B., Mihalic I.: Osnove tehnologije lijevanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2012.
- [3] Bonollo, F., Gramegna, N., Timelli, G.: High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges, The Minerals, Metals & Materials Society, 2015.; doi. 10.1007/s11837-015-1333-8, p. 1-8
- [4] Bauer, B., Mihalic Pokopec, I.: Ljevarstvo, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [5] Grupa autora: ASM Handbook: Volume 15 Casting, ASM International, 2008.
- [6] <https://x-engineer.org/engine-block/> , 16.06.2022.
- [7] Z. Kolumbić, M. Dunder, I. Samardžić, Strojarska tehnologija I, Rijeka, 2010.
- [8] <https://repositorij.unisb.hr/islandora/object/unisb%3A137/datastream/PDF/viewAsd>
- [9] Budić, B.: Posebni ljevački postupci II.dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2009.
- [10] Tišljar, K.: Simulacija tlačnog lijevanja odljevka od Al legure, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [11] Grupa autora: ASM handbook volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1998.
- [12] Mikulić, I.: Simulacija tlačnog lijevanja poklopca od aluminijske legure, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [13] <https://www.dolincasting.com/13-die-casting-defects-and-how-to-avoid-them.html>, 29.06.2022.
- [14] <https://www.rapiddirect.com/blog/die-casting-defects/>, 30.06.2022.
- [15] M.A-B Ebrahim: 3D laser scanners: History, applications, and future, 2014
- [16] M.J., A.H., R.P.S., R.S.: Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications, 2021.
- [17] <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/what-is-3d-scanning/> , 01.07.2022.
- [18] <https://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning> , 01.07.2022.
- [19] R.F., M.C.G., M.G., E.P., L.P., R.S.: High-resolution 3D digital models of artworks
- [20] R.B.G., V.G-S., P.S., L.J.G.: Topology-Aware Surface Reconstruction for Point Clouds

---

[21] <https://www.gom.com/en/products/high-precision-3d-metrology/atos-5> , 02.07.2022.

[22] Fu, M.W., Yong, M.S.: Simulation-enabled casting product defect prediction in die casting process, *International journal of production research*, 47(2009)18, 5203-5216.