

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Mikulić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Ivan Mikulić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru na pomoći i savjetima tijekom izrade ovog završnog rada. Zahvaljujem se također, asistentu Karlu Jurkoviću mag.ing.mech. na pomoći i edukaciji prilikom izrade simulacija te uputama za izradu ostatka ovog rada.

Ivan Mikulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Mikulić**

JMBAG: **0035218662**

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

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

30. 11. 2021.

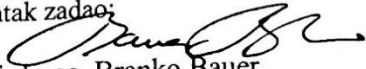
Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. TLAČNI LIJEV	2
3. POSTUPCI TLAČNOG LIJEVANJA	5
3.1. Tlačni lijev s toplom komorom	6
3.1.1. Sustav za lijevanje	6
3.2. Tlačni lijev s hladnom komorom	8
3.2.1 Sustav za lijevanje	8
3.3. Utjecaj tehnoloških parametara na kvalitetu odljevaka.....	12
3.3.1. Parametri u prvoj fazi	12
3.3.2. Parametri u drugoj fazi	13
3.3.3. Parametri u trećoj fazi	16
4. LEGURE ZA TLAČNI LIJEV	17
4.1. Legure aluminijske	18
4.1.1. Al-Si legure	19
4.1.2. Al-Si-Cu legure	20
4.1.4. Al-Zn-Si legure	21
4.1.3. Al-Cu legure	22
4.1.5. Al-Mg legure	22
4.1.6. Al-Si-Mg legure	22
4.2. Legure magnezijске	23
4.3. Legure bakra.....	23
4.4. Legure cinka.....	24
5. GREŠKE U TLAČNIM ODLJEVCIMA	25
5.1. Metalne izrasline (A).....	26
5.2. Šupljine (B)	27
5.4. Napukline (C).....	29
5.5. Površinske greške (D)	30
5.6. Nepotpunosti (E)	30
5.7. Uključine i heterogenosti (G).....	31
6. SIMULACIJA TLAČNOG LIJEVA	34
6.1. Eksperimentalni dio.....	35
6.1.1. Odljevak	35
6.1.2. Rezultati simulacije za prvu brzinu	36

6.1.3. Rezultati simulacije za drugu brzinu	45
6.1.4. Rezultati simulacije za treću brzinu	54
7. ZAKLJUČAK	64
8. LITERATURA.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela postupaka lijevanja [1]	2
Slika 2.	Tlačni lijev, odljevci od magnezijjskih legura [1].....	3
Slika 3.	Primjeri aluminijskih odljevaka iz automobilske industrije [1]	4
Slika 4.	Dijelovi tlačnog sustava s toplom komorom: a) kalupna šupljina, b) pomična polovica kalupa, c) nepomična polovica kalupa, d) cilindar, e) klip za tlačnje, f) tlačna komora, g) sustav za ubrizgavanje, h) lonac, i) peć, j) spojna cijev, k) grijana mlaznica [1].....	7
Slika 5.	Stroj za tlačno lijevanje s hladnom komorom [1]	9
Slika 6.	Prikaz tlaka i puta klipa po fazama procesa [9].....	10
Slika 7.	Prikaz koraka pri tlačnom lijevanju s hladnom komorom [1].....	11
Slika 8.	Prikaz stanice za tlačni lijev s robotom [1]	12
Slika 9.	Prikaz klasičnog i parashot lijevanja u prvoj fazi [4].....	13
Slika 10.	Blok motora od nadeutetičke aluminijske legure [2]	19
Slika 11.	Dijagram stanja Al-Si legura [2]	20
Slika 12.	Srh na diobenoj ravnini odljevka radijatora [4].....	26
Slika 13.	Unutarnje šupljine [4].....	27
Slika 14.	Skica mjehuravosti/izbodenosti [4]	28
Slika 15.	Mjehuravost na površini odljevka [4]	28
Slika 16.	Tople napukline [9]	29
Slika 17.	Hladni zavar na Al odljevku [9].....	30
Slika 18.	Nedolivenost [4]	31
Slika 19.	Oksidni uključci na tlačnom aluminijskom odljevku [9]	32
Slika 20.	Tvrda mjesta na Al odljevku [10].....	33
Slika 21.	Model zadanog odljevka sa generiranom mrežom.....	35
Slika 22.	Tablica i graf za prvu brzinu tlačnog klipa.....	36
Slika 23.	Gibanje tlačnog klipa prvom brzinom.....	37
Slika 24.	Prikaz punjenja kalupa pri 61,9% popunjenosti 1.	38
Slika 25.	Prikaz punjenja kalupa pri 69,2% ispunjenosti 1.	39
Slika 26.	Prikaz punjenja kalupa pri 79,1% ispunjenosti 1.	39
Slika 27.	Prikaz zarobljenog zraka u kalupnoj šupljini 1.	40
Slika 28.	Vrijeme skrućivanja pojedinih dijelova odljevka 1.....	41
Slika 29.	Udio krute faze (5,3 s) 1.....	42
Slika 30.	Udio krute faze (10 s) 1.....	42
Slika 31.	Udio krute faze (10s) 1.- presjek	43
Slika 32.	Ukupna poroznost skupljanja 1.	44
Slika 33.	Ukupna poroznost skupljanja 1.- presjek	44
Slika 34.	Plinska poroznost 1.	45
Slika 35.	Gibanje tlačnog klipa drugom brzinom.....	46
Slika 36.	Prikaz punjenja kalupa pri 61,9% popunjenosti 2.....	47
Slika 37.	Prikaz punjenja kalupa pri 69,3% popunjenosti 2.....	47
Slika 38.	Prikaz punjenja kalupa pri 79,1% ispunjenosti 2.	48
Slika 39.	Prikaz zarobljenog zraka u kalupnoj šupljini 2.	49
Slika 40.	Vrijeme skrućivanja pojedinih dijelova odljevka 2.....	50
Slika 41.	Udio krute faze (4,6 s) 2.....	51
Slika 42.	Udio krute faze (9,3 s) 2.....	51
Slika 43.	Udio krute faze (10 s) 2.- presjek	52
Slika 44.	Ukupna poroznost skupljanja 2.	52

Slika 45.	Ukupna poroznost skupljanja 2.- presjek	53
Slika 46.	Zarobljeni oksidi 2.....	54
Slika 47.	Gibanje tlačnog klipa trećom brzinom	55
Slika 48.	Prikaz punjenja kalupa pri 61,9% popunjenosti 3.	56
Slika 49.	Prikaz punjenja kalupa pri 69,2% popunjenosti 3.	56
Slika 50.	Prikaz punjenja kalupa pri 79,1% popunjenosti 3.	57
Slika 51.	Prikaz zarobljenog zraka u kalupnoj šupljini 3.	58
Slika 52.	Vrijeme skrućivanja pojedinih dijelova odljevka 3.....	59
Slika 53.	Udio krute faze (5,8 s) 3.....	60
Slika 54.	Udio krute faze (10,3 s) 3.....	60
Slika 55.	Udio krute faze (10,3 s) 3.- presjek	61
Slika 56.	Ukupna poroznost skupljanja 3.- presjek	61
Slika 57.	Ukupna poroznost skupljanja 3.	62
Slika 58.	Zarobljeni oksidi 3.....	63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Preporučeno vrijeme punjenja kalupa s obzirom na srednje debljine stjenke odljevka [2].....	14
Tablica 2. Tlak lijevanja za različite legure i vrste odljevaka [4]	16
Tablica 3. Osnovna svojstva aluminija [2].....	18
Tablica 4. Mehanička svojstva AlSi9Cu3 legure [8]	21
Tablica 5. Osnovna svojstva magnezija i njegovih legura [2]	23
Tablica 6. Osnovna svojstva bakra [2]	24
Tablica 7. Osnovna svojstva cinka i njegovih legura [2]	24

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
v_k	m/s	Brzina klipa
A_k	m ²	Površina klipa
v_u	m/s	Brzina taline u ušću
A_u	m ²	Površina presjeka ušća
ρ	kg/m ³	Gustoća taljevine
h_u	m	Visina taline u ušću
h_k	m	Visina taline u tlačnoj komori
g	m/s ²	Ubrzanje sile teže
p_u	Pa	Tlak u ušću
p_k	Pa	Tlak u tlačnoj komori
η	-	Koeficijent učinka taline s obzirom na otpor strujanju

SAŽETAK

U ovom radu dan je opis tehnologije tlačnog lijeva. Opisane su dvije vrste procesa s obzirom na izvedbu strojeva za tlačni lijev. Uz opis strojeva opisani su parametri kojima se može utjecati na sami proces lijevanja te na svojstva odljevka. Nakon toga opisane su najčešće legure koje se upotrebljavaju za tlačni lijev te specifično legura AlSi9Cu3 od koje je napravljen zadani odljevak korišten za eksperimentalni dio. Također su opisane i objašnjene najčešće greške kod tlačnog lijeva. U eksperimentalnom dijelu rada provedene su tri simulacije u programskom paketu ProCAST, za različite brzine tlačnog klipa u sporoj fazi gibanja. Za svaku simulaciju je napravljena analiza punjenja kalupa, prisutnosti zraka u kalupu, vremena skrućivanja odljevka, udjela krute faze, poroznosti skupljanja te oksidnih uključaka. Pomoću navedenih analiza određen je utjecaj brzine tlačnog klipa na kvalitetu odljevka.

Ključne riječi: tlačni lijev, parametri, spora faza, simulacija, analiza, ProCAST

SUMMARY

In this thesis a description of die casting technology is given. Two types of processes were described with respect to the performance of die casting machines. In addition to the description of the machines, the parameters that can affect the casting process, as well as the properties of the casting were described. After that, the most common die casting alloys were described, and specifically the alloy AlSi9Cu3 from which the default casting used for the experimental part was made. The most common defects in die casting were also described and explained. In the experimental part of the paper, three simulations were performed, in the ProCAST software package, for different plunger slow phase speeds. For each simulation, an analysis of mold filling, air entrapment, solidification time, fraction solid, shrinkage porosity and oxide inclusions was performed. Using analyzes, the influence of the plunger slow phase speed on the quality of the casting was determined.

Keywords: die casting, parameters, slow phase, simulation, analysis, ProCAST

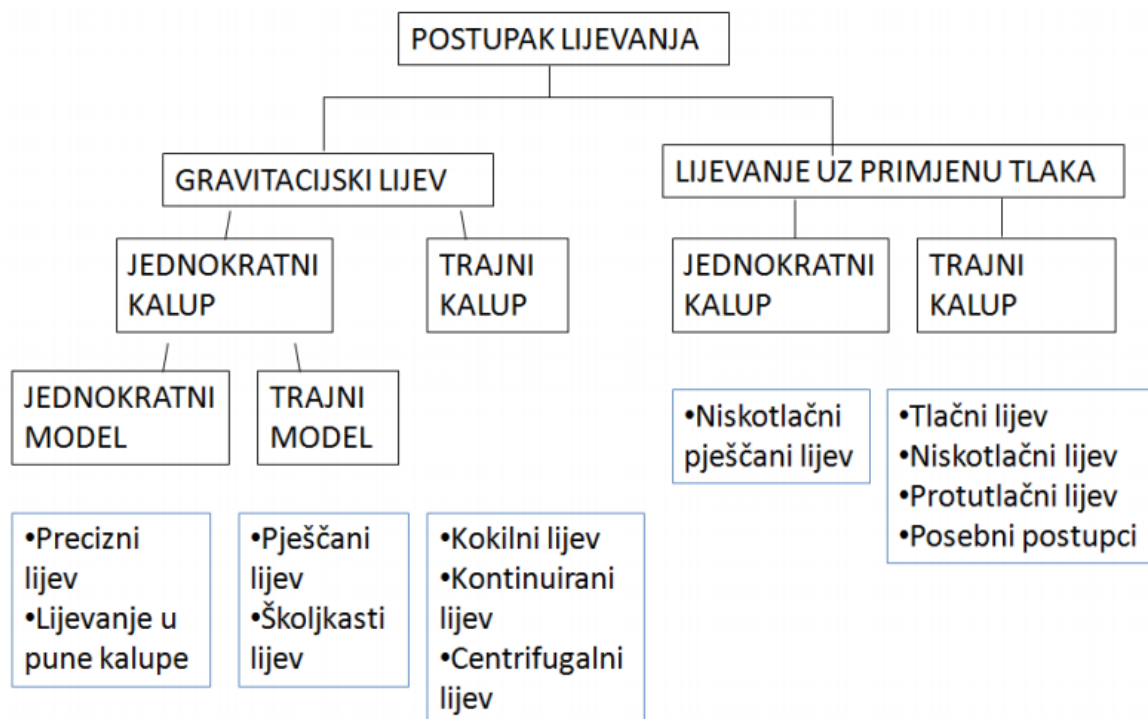
1. UVOD

Lijevanje je tehnologija oblikovanja metalnih predmeta, tako da se rastaljeni metal ulijeva u kalup u kojem skrućivanjem poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine. Lijevanjem se služimo više od 5000 godina, dakle govorimo o jako staroj tehnologiji [1]. Lijevati se mogu svi metali (željezni ljevovi te neželjezne legure), a zahvaljujući razvoju metalurgije danas je dostupan velik broj legura koje je moguće lijevati. Također je razvijen i velik broj postupaka lijevanja od kojih svaki ima neke prednosti i nedostatke u smislu mogućnosti postizanja određenih svojstava odljevaka, najvećih dimenzija odljevaka, odabira legure itd [2]. Zbog visoke produktivnosti lijevanje je pogodno za serijsku i masovnu proizvodnju. Danas je to visokorazvijena i visokoautomatizirana tehnologija, prisutna u svim granama industrije te omogućava proizvodnju visoko zahtjevnih metalnih proizvoda složene geometrije [1]. Izrada kvalitetnih odljevaka nije jednostavna jer proces nastajanja odljevka nije vidljiv (metal se lijeva u zatvoreni kalup). Na postizanje konačnih svojstva odljevka mogu utjecati mnogi parametri kao sastav legure, obrade taljevine (npr. toplinska obrada), konstrukcija odljevka, konstrukcija alata (kalupa), parametri stroja itd. Europska ljevačka industrija je treća najveća u svijetu (nakon Kine i SAD-a) u proizvodnji odljevaka od željeznih ljevova te druga najveća u proizvodnji neželjeznih ljevova [5]. Većina današnje ljevačke industrije su partneri automobilske industrije.

U okviru ovog rada se predstavlja tehnologija tlačnog lijevanja aluminijskih legura (točnije legure AlSi9Cu3).

2. TLAČNI LIJEV

Postoji više različitih postupaka lijevanja. Razvijeni su kako bi zadovoljili određene zahtjeve, koji mogu biti konstrukcijski zahtjevi, dimenzije i masa proizvoda ili pak operativni zahtjevi koji se odnose na stupanj automatizacije, sve to kako bi se optimizirala tehnologija lijevanja te kako bi se uklonili specifični problemi [5]. Postupci lijevanja se mogu podijeliti prema uljevnoj sili, na gravitacijsko lijevanje i lijevanje uz primjenu tlaka. Nakon toga dolazi podjela s obzirom na vrstu kalupa, koji mogu biti za jednokratnu primjenu (jednokratni kalup) i za višekratnu primjenu (trajni kalup) [1]. Kod gravitacijskog lijeva kalup se popunjava pod djelovanjem zemljine sile teže. Kod lijevanja uz primjenu tlaka velike su brzine strujanja (ovise o tlaku) rastaljenog metala pa je vrijeme popunjavanja kalupa skraćeno. U jednokratnim kalupima mogu se lijevati odljevci svih oblika i dimenzija, osim toga mogu se lijevati svi metali, a primjereni su za pojedinačnu te za serijsku i masovnu proizvodnju [1]. Trajni se metalni kalupi (kokile) izrađuju od izdržljivih materijala otpornih na toplinu (obično sivi lijev ili alatni čelika za topli rad), a prednost im je da se mogu koristiti od 10 000 do 100 000 puta pa i više. Detaljnije podjele postupaka lijevanja su prikazane na fotografiji ispod ovog teksta (slika 1) [1].



Slika 1. Podjela postupaka lijevanja [1]

Tlačni lijev je postupak kod kojeg se u trajni kalup uvodi rastaljeni metal pod visokim tlakom. Prvi oblik tlačnog lijeva pojavljuje se u 19. stoljeću, dok su prve legure za tlačni lijev bile kombinacije kositra i olova, sve do pojave legura cinka i aluminijske u 20. stoljeću te naknadno magnezija, bakra, itd [2]. Postoji ograničen broj legura prikladnih za tlačno lijevanje, a unutarnja poroznost ograničava toplinsku obradu ili zavarivanje gotovih odljevaka, što su jedni od nedostataka tlačnog lijeva [3].



Slika 2. Tlačni lijev, odljevci od magnezijevskih legura [1]

Lijevanje pod tlakom je primjenjivo u serijskoj i masovnoj proizvodnji te valja naglasiti da je stopa proizvodnje puno veća od gravitacijskog ili niskotlačnog lijevanja [3]. No jedan od nedostataka visokotlačnog lijevanja su visoki troškovi alata koji čine kratke cikluse proizvodnje neekonomičnima [3]. Često je automatiziran proces čime se postiže viša kvaliteta odljevka te sniženje cijene gotovog proizvoda.

Odljevci nastali tlačnim lijevom koriste se u gotovo svim granama industrije, a najraširenija primjena tlačnih odljevaka je u automobilskoj industriji. Zbog mogućnosti lijevanja različitih dimenzija, oblika, debljina stijenki, uz to se postižu dobra mehanička svojstva i dimenzijska preciznost pa se proizvode dijelovi kao što su blokovi motora, dijelovi motora s unutarnjim izgaranjem, radijatori, zupčanici pa sve do okvira mobilnih telefona i dječjih igračaka [1]. Na fotografiji ispod teksta prikazani su neki primjeri odljevaka proizvedenih postupkom tlačnog lijeva (slika 3).



Slika 3. Primjeri aluminijskih odljevaka iz automobilske industrije [1]

3. POSTUPCI TLAČNOG LIJEVANJA

Sustav za lijevanje pod tlakom se sastoji od metalnog kalupa, tlačnog klipa, tlačne komore, izbacivača i metalnih jezgri [1]. Proces počinje tako da se rastaljeni metal dovodi u tlačnu komoru, koja je s jedne strane zatvorena pomičnim tlačnim klipom a na drugoj strani se nalazi uljevni sustav koji rastaljeni metal vodi u kalup [1]. Nakon toga tlačni klip svojim kretanjem u komori potiskuje visokim tlakom rastaljeni metal u kalupnu šupljinu [1]. Punjenje kalupa se odvija u kratkom vremenu, točnije u nekoliko milisekundi, zbog visokih brzina ubrizgavanja rastaljenog metala u kalup [1]. Nakon što se odljevak ohladi kalup se otvara i odljevak se odvaja od kalupa pomoću izbacivača te vadi iz njega odgovarajućim alatom [1]. Time završava jedan ciklus lijevanja te se zatvaranjem kalupa ponavlja odabrani broj puta.

Strojevi za tlačni ljev su kombinacija električnih, mehaničkih i hidrauličkih sustava. Mehaničke komponente kao što su konstrukcija, stezne ploče, vodilice itd. Električni sustav sadržava elektromotore, elektromagnetne ventile, graničnike, razne senzore i ostale tehnologije. Od hidrauličkih komponentni najpoznatije su zasigurno hidrauličke pumpe, koje su glavni izvor energije za postizanje potrebno visokog tlaka te ostale hidrauličke komponente koje su zaslužne za upravljanje strujanja hidrauličkog medija kroz stroj [3]. Strojevi za lijevanje su različitih veličina. Postoje strojevi kojima sila zatvaranja kalupa iznosi nekoliko desetaka kN, a masa stotinjak kilograma te strojeva kojima je sila zatvaranja kalupa nekoliko desetaka MN, a masa i do nekoliko stotina tona [4]. Strojevi za tlačni ljev mogu se svrstati u dvije skupine prema sustavu za ubrizgavanje litine, dok su ostali dijelovi stroja isti. Danas su u upotrebi dva tipa strojeva i to:

- Strojevi s hladnom komorom
- Strojevi s toplom komorom.

Osim načina ubrizgavanja rastaljenog metala, osnovna razlika između tlačnog lijevanja s toplom i hladnom komorom je u trajanju ciklusa lijevanja. Drugo, legure koje se lijevaju s toplom komorom imaju niže temperature tališta, što znači kraće vrijeme skrućivanja odljevka s time automatski i vrijeme ciklusa lijevanja. U nastavku ovog rada opisat će se dvije vrste stroja s opisom procesa pojedine vrste tlačnog lijeva.

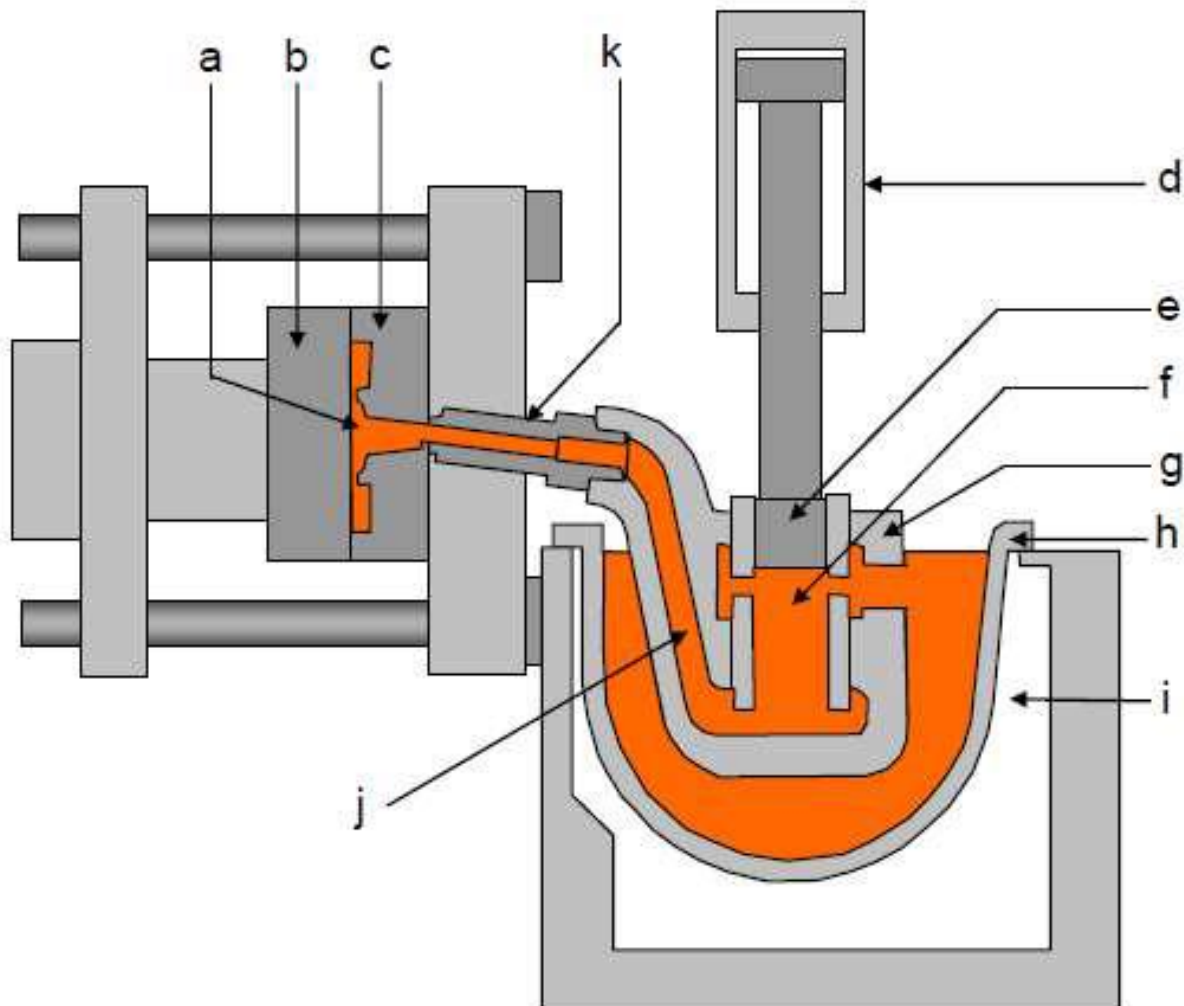
3.1. Tlačni lijev s toplom komorom

Ova vrsta tlačnog lijeva se upotrebljava za lijevanja metala niskog tališta kao što su: magnezij, cink, olovo i kositar. Općenito se koristi za lijevanje odljevaka manjih dimenzija i masa, govorimo o odljevcima u rasponu od nekoliko grama do 25 kg. Kako je ovo lijevanje pod tlakom valja naglasiti da se za ovu vrstu tlačnog lijeva tlak kreće u rasponu od 7 do 35 Mpa. Najčešće je visoko automatiziran proces s brzinom rada od 50 do 500 ciklusa na sat. Posebnost ovog procesa je položaj tlačne komore i klipa koji su vertikalno uronjeni u lonac s rastaljenim metalom [1].

3.1.1. Sustav za lijevanje

Sustav za ubrizgavanje taline sastoji se od hidrauličkog tlačnog klipa te spojene cijevi i mlaznice. Tlačni cilindar, klip i spojna cijev uronjeni su u taljevinu te im je temperatura približno visoka onoj od taljevine [4]. Međusobni položaj komore i klipa mora biti takav da se pomakom klipa prema gore omogući punjenje komore talinom, dok se pomakom prema dolje talina mora ubrizgati kroz spojnu cijev i mlaznicu u kalupnu šupljinu, tako da se tlak u cilindru poveća [1]. Komora i tlačni klip su najčešće izrađeni od alatnih i nehrđajućih čelika [1]. Spojna cijev omogućuje nesmetan protok talini koja se ubrizgava visokom brzinom te je najčešće izrađena od željeznog lijeva [1]. Također je bitno naglasiti kako spojna cijev mora imati temperaturu koja će omogućiti da se rastaljeni metal ne krene skrućivati u njoj [1]. Mlaznica vrši precizno popunjavanje kalupne šupljine te također mora biti grijana. Izrađuje se od materijala otpornih na trošenje, točnije nitriranog legiranog čelika i alatnog čelika za rad na povišenim temperaturama [1]. Spojna cijev, komora i tlačni klip moraju se moći lako i jednostavno zamijeniti novim dijelom u slučaju oštećenja, zato treba paziti pri izradi tih dijelova. Kako su ti dijelovi uronjeni u talinu, temperatura im je približno jednaka istoj, stoga se mogu lijevati samo legure koje imaju nisko talište tako da ne bi otapale materijal s kojim su u dodiru, a to su već navedeni cink, magnezij, olovo i kositar. Što se tiče aluminija i njegovih legura oni bi otapali navedene komponente sustava za ubrizgavanje i stoga se ne mogu lijevati ovim postupkom [1].

Slika 4. prikazuje primjer tlačnog stroja sa toplom komorom te naznačene dijelove navedene u opisu procesa lijevanja.



Slika 4. Dijelovi tlačnog sustava s toplom komorom: a) kalupna šupljina, b) pomična polovica kalupa, c) nepomična polovica kalupa, d) cilindar, e) klip za tlačenje, f) tlačna komora, g) sustav za ubrizgavanje, h) lonac, i) peć, j) spojna cijev, k) grijana mlaznica [1].

Redoslijed operacija lijevanja odljevka u stroju s toplom komorom je sljedeći:

- Kalup za ulijevanje litine je otvoren, a tlačni klip e) se nalazi u početnom položaju dok je komora f) ispunjena talinom
- Pomicanjem pokretnog dijela kalupa b) dolazi do njegovog zatvaranja, a zatim slijedi tlačenje taline pomicanjem tlačnog klipa e) u kalupnu šupljinu a). Plak u kalupnoj šupljini a) se održava sve dok se odljevak ne skrutne

- Nakon hlađenja odljevka kalup se otvara horizontalnim pomicanjem pokretnog dijela b). Istovremeno se pomoću izbacivača odljevak odvaja od pokretnog dijela kalupa i pomoću prihvatne naprave vadi iz pokretnog dijela kalupa b) i odlaže na radni stol [4].

Odljevci se slažu na palete i hlade na okolnu temperaturu. Nakon hlađenja slijedi naknadna obrada odljevaka kao što je odvajanje uljevnog sustava i srha s diobene ravnine [4].

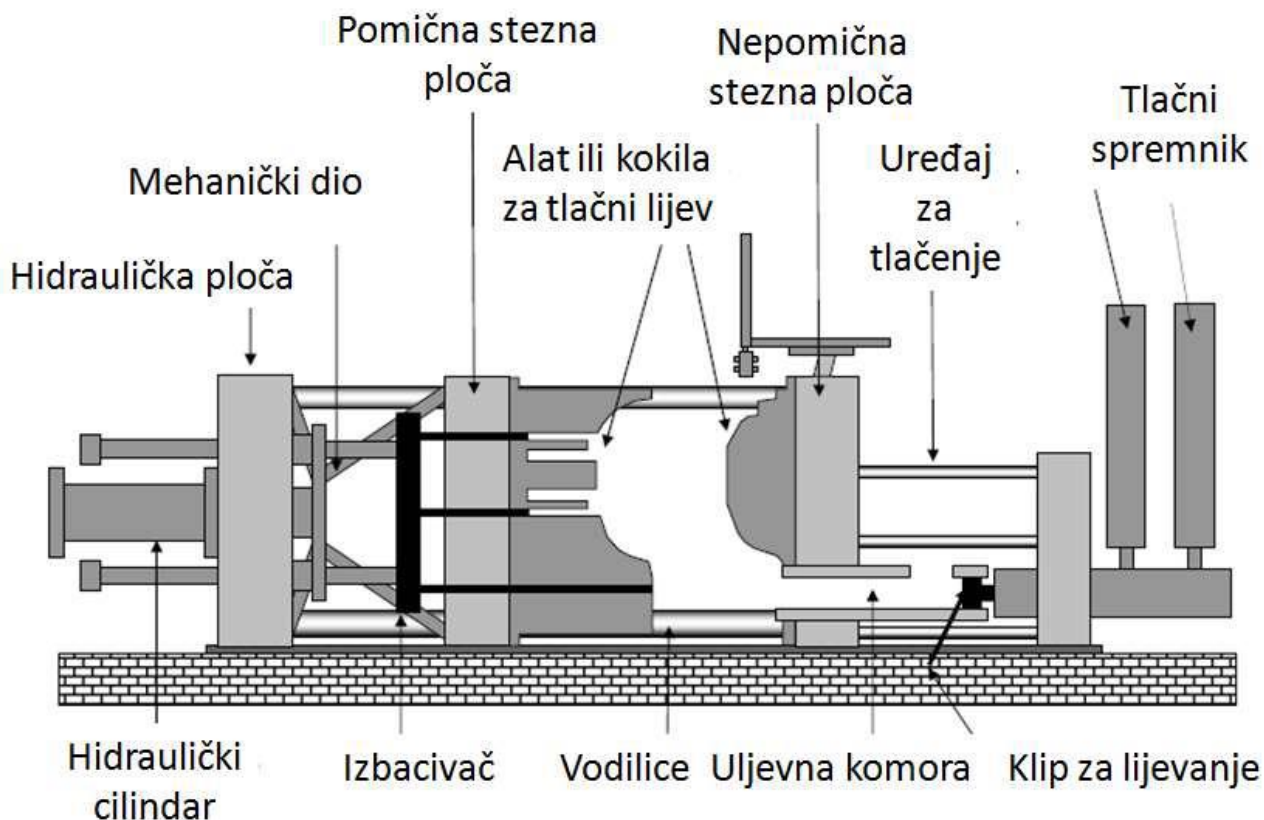
3.2. Tlačni lijev s hladnom komorom

Tlačni lijev s hladnom komorom se koristi za lijevanje legura s višom temperaturom taljenja (do 1000 °C). U tu skupinu spadaju aluminij, magnezij, bakar, a lijevaju se ponekad i neke željezne legure. Ljevaju se odljevci svih veličina, od sitnih konektora do blokova motora (Slika 3) itd, a lijeva se pod tlakom od 14 do 140 MPa. Brzina proizvodnje ide od 50 do 150 odljevaka na sat. Posebnost ovog načina tlačnog lijeva je ta da se peć s rastaljenim metalom nalazi izvan stroja. Dakle rastaljeni metal se proizvodi u peći za taljenje i prenosi loncem do peći za održavanje i regulaciju uljevne temperature taljevine [1]. Iz peći za temperiranje se talina ručno ili automatizirano pomoću ljevačke žlice ili najčešće pomoću automatiziranog dozatora ulijeva u komoru. Postoji izvedba stroja s horizontalnom i vertikalnom komorom. Puno je češća primjena strojeva s horizontalnom hladnom komorom u ljevaonicama [4].

3.2.1 Sustav za lijevanje

Osnovni dijelovi sustava za tlačni lijev s hladnom komorom su komora, klip i kalup. Za izradu komore i klipa koriste se alatni i nehrđajući čelici [1]. Tlačna komora (cilindar i klip), nisu posebno grijani tijekom procesa lijevanja, osim što se zagriju prijelazom topline od taline tijekom ulijevanja. Tlačna komora se često može i hladiti kako bi se izbjeglo njeno pregrijavanje [4]. Upravo zbog toga što su komora i klip izloženi talini samo na kratko vrijeme tijekom ulijevanja, mogu se lijevati i legure višeg tališta, što nije slučaj kod tlačnog lijeva s toplom komorom.

Od ostalih dijelova stroja postoje hidrauličke komponente (ploča i cilindar), mehaničke komponente (vodilice), tlačni spremnik, pomična i nepomična stezna ploča, itd. Sve od navedenog je shematski prikazano na slici 5.

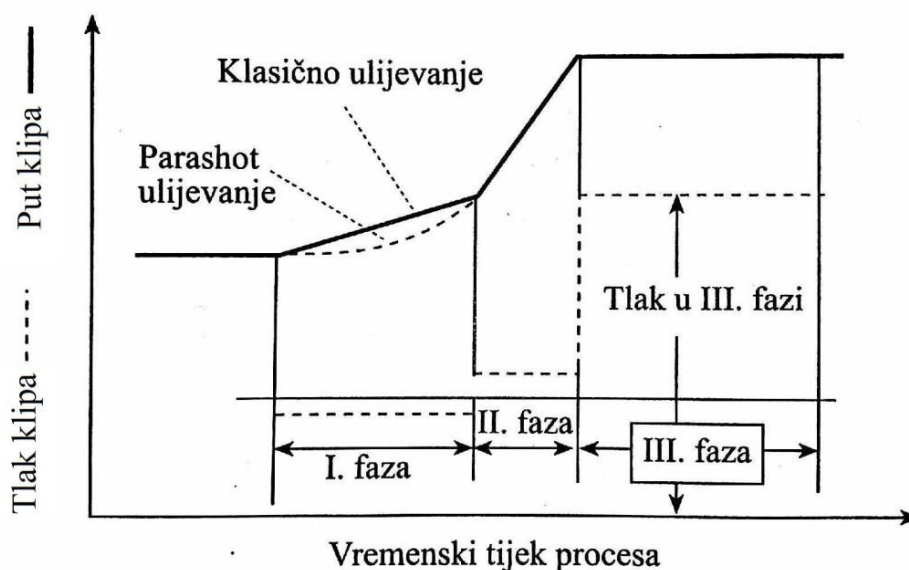


Slika 5. Stroj za tlačno lijevanje s hladnom komorom [1]

Redoslijed operacija lijevanja odljevka u stroju s hladnom komorom je sljedeći:

- U horizontalnu tlačnu komoru talina se gravitacijski ulijeva ljevačkom žlicom ili pomoću ljevačkog lonca odnosno dozirnog uređaja. U tom trenutku kalup je zatvoren, a tlačni klip je u krajnje desnom položaju (Slika 7.) [1]
- Nakon ulijevanja klip svojim kretanjem tlači talinu u kalupnu šupljinu (kalup) (Slika 7.). Kretanje kalupa nije ravnomjerno, nego se odvija u tri faze:
 1. u prvoj fazi (spora faza) se popunjava komora i dovodi talina do ulaza u kalup – brzina klipa je mala te postepeno raste (od 0,25 do 0,4 m/s), dok joj je trajanje oko dvije sekunde

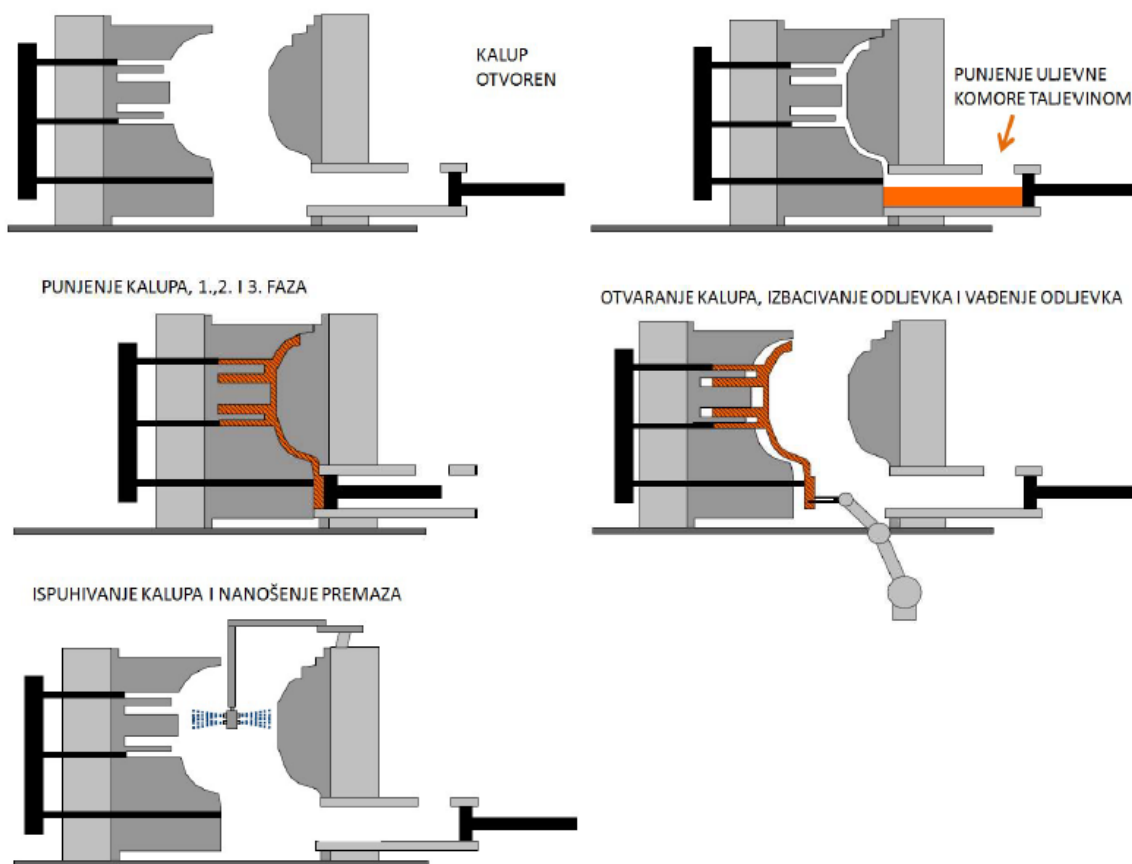
2. druga faza (brza faza) je ona u kojoj se popunjava kalupna šupljina – klip se giba velikom brzinom (oko 2,8 m/s) te ubrizgava metal u kalupnu šupljinu u trajanju od oko 0,1 sekunde
3. u trećoj fazi se povećava tlak u popunjenoj kalupnoj šupljini, i to za nekoliko puta (u nekoliko milisekundi) te se održava dok se odljevak ne skrutne [1], [3].



Slika 6. Prikaz tlaka i puta klipa po fazama procesa [9]

- Nakon skrućivanja odljevka izvlači se metalna jezgra. Zatim dolazi do otvaranja (horizontalnim pomicanjem) pokretne polovice kalupa (Slika 7.). Pomoću izbacivača izbacuje se odljevak iz nje pomoću prihvatne naprave i odlaže na stol. Klip se tada vraća u početni položaj [1].

Detaljniji osvrt na tehnološke parametre tlačnog lijevanja biti će dan u nastavku ovog rada.



Slika 7. Prikaz koraka pri tlačnom lijevanju s hladnom komorom [1]

Postupak lijevanja se ponavlja toliko dugo dok traje proizvodnja odljevaka, odnosno dok ne dođe do eventualnog zastoja zbog kvara u proizvodnji. Nakon potpunog hlađenja odljevka slijedi naknadna obrada kao što je odvajanje uljavnog sustava i srha s diobene linije na tzv. krzalicama (hidraulična štanca za odstranjivanje viška materijala). Odvojeni dijelovi se odvođe u talionicu gdje se ponovno tale i koriste za lijevanje [1]. Kompletan proces proizvodnje odljevaka, sve do odvajanja tehnološkog viška materijala, danas je potpuno automatiziran i vrši se pomoću robota [4]. Tlačno lijevanje obično se izvodi u automatiziranim stanicama za tlačni lijev (slika 8.) [1].



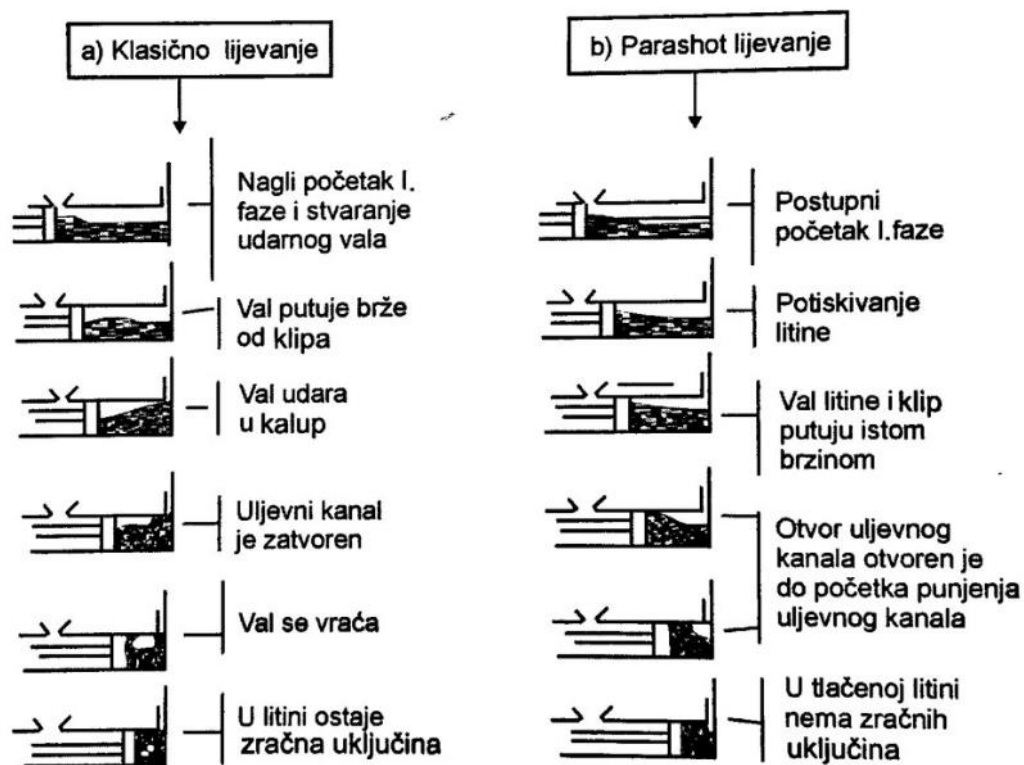
Slika 8. Prikaz stanice za tlačni lijev s robotom [1]

3.3. Utjecaj tehnoloških parametara na kvalitetu odljevaka

Od parametara tlačnog stroja najveći utjecaj na svojstva odljevaka ima brzina, duljina trajanja i oblik prve faze ulijevanja. Nakon toga brzina i tlak druge faze. Na kraju nam ostaje tlak treće faze, vrijeme skrućivanja i ukupni ciklus lijevanja [4].

3.3.1. Parametri u prvoj fazi

U prvoj fazi litina bi trebala doći do ušća uljevnog sustava tj. do kalupne šupljine. Pri tlačenju taline ne bi smjelo doći do zahvaćanja zraka (formiranjem udarnog vala) i njenog turbulentnog strujanja [4]. Tako zarobljeni zrak u tlačnom cilindru uzrokuje nastajanje greške u odljevku koje će se detaljnije opisati u nastavku ovog rada. Problem zarobljavanja zraka tijekom prve (spore) faze rješava se parashot načinom ulijevanja (slika 9). Kod takvog načina ulijevanja brzina u prvoj fazi postupno se povećava tj. nema udarnog vala i brzina klipa slijedi brzinu taline [4].



Slika 9. Prikaz klasičnog i parashot lijevanja u prvoj fazi [4]

Osim brzine klipa, na formiranje vala i zarobljavanje zraka utječu popunjenost tlačne komore taljevinom te dimenzije poprečnog presjeka tlačne komore. Do stvaranja vala i s time zarobljavanja zraka lakše će doći u slučaju manje količine taljevine (<30%) u tlačnoj komori, zbog toga manje količine taljevine nisu preporučene [9]. Ponekad se dešava da u prvoj fazi talina presporo ulazi u kalupnu šupljinu, tamo se skrutne i postane sastavni dio odljevka odnosno tada nastaju hladni zavari. Zbog neadekvatne brzine i duljine trajanja prve faze, može doći do nepopunjenosti kalupne šupljine, poroznosti i lošijih mehaničkih svojstava odljevka [4].

3.3.2. Parametri u drugoj fazi

Brzina klipa u drugoj fazi ovisi o konstrukciji odljevka, debljini stjenke odljevka i mogućnosti tlačnog stroja tj. sili zatvaranja stroja. Brzina tlačnog klipa kod strojeva za visokotlačni lijev kreće se do 8 m/s. Brzina litine na ušću uljavnog sustava kod aluminijskih legura kreće se od 30 do 70 m/s [4]. Na temelju brzine taljevine na ušćima, prema konstrukciji uljavnog kanala, načinu punjenja odljevka te debljini stjenke odljevka određuje se brzina tlačnog klipa [9]. Preporučeno vrijeme punjenja kalupa s obzirom na srednje debljine stjenke odljevka prikazane su u tablici 1 [2].

Tablica 1. Preporučeno vrijeme punjenja kalupa s obzirom na srednje debljine stjenke odljevka [2]

Srednja debljina stjenke 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

Kako bi odredili brzinu tlačnog klipa treba poznavati kinematičku vezu između kretanja klipa u tlačnoj komori i strujanja taljevine u uljevnom sustavu tj. ušću uljavnog sustava. Za određivanje te neovisnosti može se primijeniti jednačba kontinuiteta:

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

gdje je:

v_k –brzina klipa, m/s

A_k –površina klipa, m²

v_u –brzina taline u ušću, m/s

A_u –presjek ušća, m².

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:

ρ – gustoća taline, kg/m³

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 [4].

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:

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

Gubitci energije prilikom strujanja taline uzimaju se u obzir uvođenjem koeficijenta η , pa je izraz za stvarnu brzinu strujanja taline u ušću sljedeći:

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

gdje je:

η - koeficijent učinka taline s obzirom na otpor strujanju (manji je od 1) [4].

Manje brzine tlačnog klipa i brzine taline na ušću uljevnog sustava povoljnije su jer manje opterećuju kalup i tlačni stroj. Pri većim brzinama od optimalnih dolazi do povećanog trenja u ušću uljevnog sustava tj. smanjuje mu se presjek. Veće brzine taline stvaraju veći dinamički tlak na kalup pa može doći do djelomičnog otvaranja kalupa i pojave srha na liniji dijeljenja [4].

U drugoj fazi kalupna šupljina se ispunjava talinom, pri čemu tlak naglo poraste zbog promjene otpora taline na ušću uljevnog sustava. Kada talina prođe kroz ušće uljevnog sustava počinje ulaziti u kalupnu šupljinu, gdje dolazi do pada tlaka. Nakon pada, tlak zadržava konstantu vrijednost sve dok se kalup ne ispunji talinom. Kada se kalupna šupljina ispunji talinom brzina tlačnog klipa pada na nulu, a impulzivno naraste na hidrauličkom klipu uslijed inercijskih sila. Tada tlak naraste 1,5 do 2 puta u odnosu na statički tlak [4].

3.3.3. Parametri u trećoj fazi

U trećoj fazi glavni parametar je tlak. Tlak treće faze je zapravo dodatni tlak na talinu nakon ulijevanja te u fazi skrućivanja. Početak treće faze treba biti od 0,1 do 0,6 sekundi nakon punjenja kalupne šupljine talinom [4]. Ako se povišenje tlaka primjeni prerano može doći do otvaranja kalupa i pojave srha. Stoga je poželjno da se materijal djelomično skrutne prije primjene visokog tlaka [9].

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 [4].

Dalje ovisi o vrsti legure pa su u tablici 2 prikazani preporučeni tlakovi lijevanja prema vrsti odljevka i vrsti legure [4].

Tablica 2. Tlak lijevanja za različite legure i vrste odljevaka [4]

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

Viši tlak će dati bolja mehanička svojstva, bolju površinu odljevka, manju poroznost, ali opterećuje kalup i tlačni stroj [4]. Maksimalni ljevni tlak je limitiran veličinom odljevka i silom zatvaranja tlačnog stroja [9].

4. LEGURE ZA TLAČNI LIJEV

Ljevačke legure se dijele na one podobnije za procese s gravitacijskim lijevanjem i one podobnije za lijevanje pod visokim tlakom. Za postupke lijevanja u jednokratne kalupe dostupan je velik broj različitih legure za lijevanje. Kod lijevanja u stalne kalupe postoji više specifičnih zahtjeva koje legura mora ispuniti pa je dostupan uži izbor legura za takve postupke [9].

Legure koje se koriste za lijevanje pod tlakom trebaju imati odgovarajuća ljevačka i tehnološka svojstva koja omogućuju uspješnu proizvodnju složenih odljevaka. Za lijevanje u tekućem stanju legure bi trebale imati dobru livljivost kako bi talina pri ulijevanju potpuno ispunila kalupnu šupljinu [4]. Tijekom hlađenja i očvršćivanja odljevka, legure trebaju imati potrebna mehanička, kemijska i fizička svojstva odljevka. Također trebaju osigurati dimenzijsku točnost i gustoću odljevka, uz sve to i nisku cijenu te malu količinu defektnih odljevaka [4]. Legure koje se upotrebljavaju za lijevanje pod tlakom trebaju imati:

- sposobnost popunjavanja kalupne šupljine
- što nižu temperaturu lijevanja
- dobru livljivost na temperaturi između 15 i 20 °C iznad likvidus temperature; visoku temperaturu pregrijanja taline jer ona poboljšava sposobnost ispunjavanja kalupne šupljine dok istovremeno uzrokuje oštećenje kalupne šupljine; to je naročito značajno pri lijevanju odljevaka s tankim stijenkama
- zanemarivo skupljanje u tekućem stanju i pri skrućivanju odljevka
- smanjenu sklonost otapanju plinova
- dobru obradivost
- dovoljnu čvrstoću i plastičnost kako bi se mogle oduprijeti silama koje se javljaju pri skrućivanju u procesu formiranja odljevka, izvlačenju metalnih jezgri i vađenju samog odljevka iz kalupa
- minimalno skupljanje radi smanjenja zaostalih naprezanja koja se pojavljuju zbog otežanog skupljanja odljevka
- optimalne ekonomske pokazatelje: niska cijena, nedeficitarnost osnovnih materijala, mogućnost korištenja otpada [4].

Kod tlačnog lijevanja širu primjenu su našle legure aluminija, cinka, bakra i magnezija. Legure željeza nisu našle značajnu primjenu u proizvodnji odljevaka tehnologijom tlačnog lijeva. Čelik se tlačno lijeva samo u posebnim slučajevima [4].

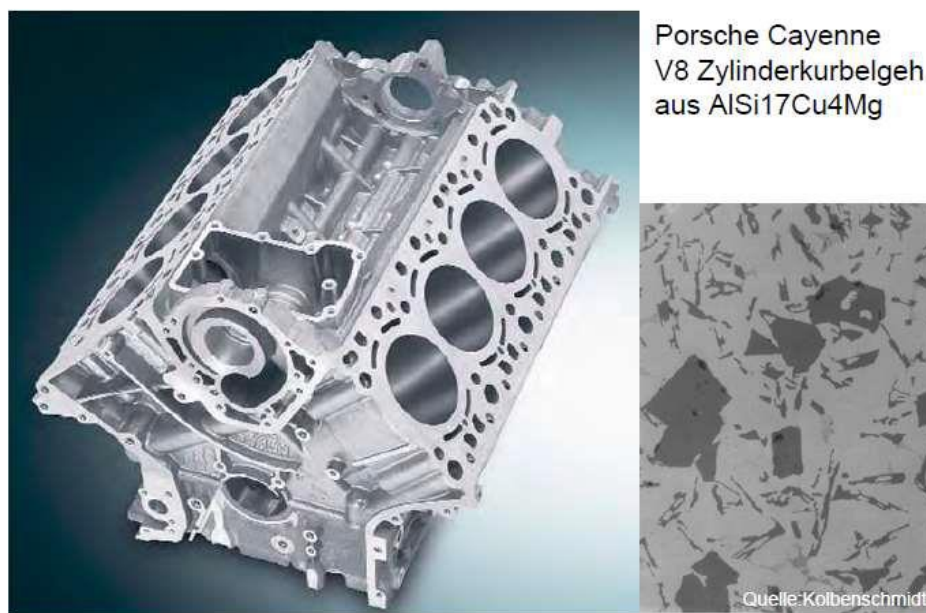
4.1. Legure aluminija

Čisti aluminij se vrlo rijetko koristi kao ljevačka sirovina zbog loše livljivosti i loših mehaničkih svojstava (tablica 3). Također pri njegovom lijevanju dolazi do niza teškoća zbog velikog volumenskog skupljanja koje iznosi 6,5 % [4]. Najčešće se rabe legure aluminija, a to su Al-Si, Al-Cu i Al-Mg legure. Cilj legiranja je poboljšanje mehaničkih svojstava, prvotno vlačne čvrstoće i tvrdoće, a nakon toga krutost, rezljivost te žilavost i livljivost [2].

Tablica 3. Osnovna svojstva aluminija [2]

Osnovna svojstva aluminija	
Talište (°C)	660
Gustoća (kg/dm³)	2,7
Vlačna čvrstoća (N/mm²)	50...150
Tvrdoća (HB)	20...35
Modul elastičnosti (kN/mm²)	690
Istezljivost (%)	50...4

Od dobrih svojstava aluminija i njegovih legura zbog kojih imaju široko područje primjene su mala masa, dobra preradljivost, a pokazuju i dobru otpornost na koroziju u mnogim medijima, uključujući atmosferu, vodu, slanu vodu te mnoge kemijske sustave [9]. Zahvaljujući dobroj toplinskoj vodljivosti, aluminijske legure pogodne su za izradu izmjenjivača topline, radijatora. Pogodan je u području elektronike jer nije feromagnetičan. Uz to je i nezapaljiv pa se može koristiti u uvjetima gdje postoji opasnost od eksplozija. Često se koristi i u prehrambenoj industriji za pakiranje i razne spremnike jer je neutrovan [3]. Najveću primjenu ima zasigurno u automobilskoj industriji. Tipični primjeri aluminijskih odljevaka u automobilima su blokovi motora (slika 10), glave motora, klipovi, naplatci itd [2]. Trenutno se u svijetu 90% proizvodnje odljevaka od aluminija odnosi na proizvodnju od AlSi legura. Razlog tomu je kombinacija njihovih svojstava koja će se detaljnije opisati u nastavku ovog poglavlja.

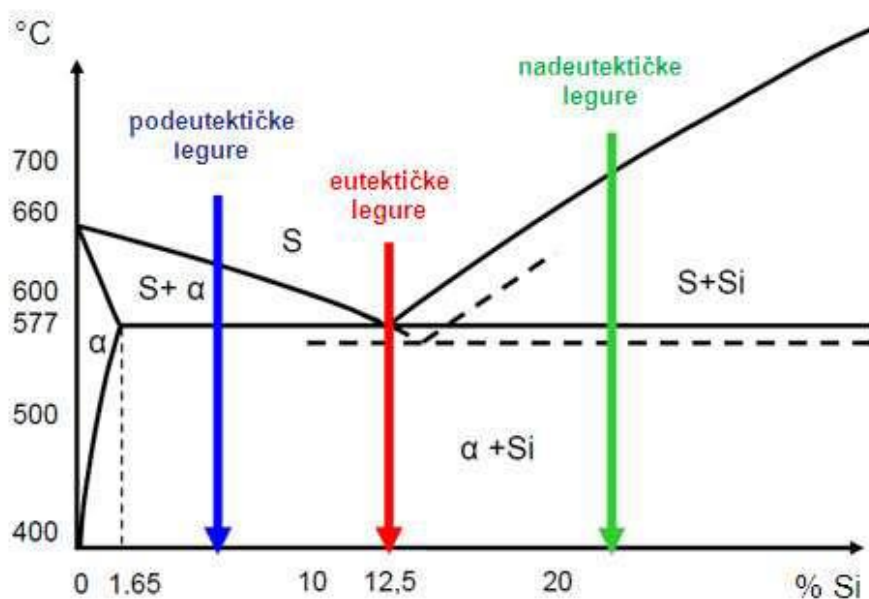


Slika 10. Blok motora od nadeutektičke aluminijske legure [2]

4.1.1. Al-Si legure

Legure aluminija sa silicijem imaju dobru livljivost, dobra mehanička svojstva, otporne su na koroziju i uz to se mogu zavarivati [4]. Najčešće se koriste legure eutektičkog sastava koje sadrže od 12 do 13% silicija [2]. One imaju posebno dobru livljivost, upotrebljavaju se za izradu složenih odljevaka s tankim stijenkama te ih nije potrebno toplinski obrađivati, ali je potrebno izbjegavati lokalna zadebljanja. Silicij osim što poboljšava livljivost i plastičnost pri visokim temperaturama, također smanjuje skupljanje legure [4]. Zbog slabijih mehaničkih svojstava, prije svega male čvrstoće te slabe strojne obradljivosti, često im se dodaju i drugi legirni elementi (Mg, Cu, Fe) [2].

Nadeutektičke legure sadrže od 15 do 24% silicija i obilježje im je stabilna svojstva na višim temperaturama. Njih se može mehanički poboljšati dodatkom od 0,2 do 0,3% magnezija. Dodatkom bakra ovim legurama smanjuje se tvrdoća i otpornost na koroziju [4]. Postoje još i podeutektičke legure (<12% silicija) s obzirom na udio silicija [2]. Podjelu Al-Si legura možemo prikazati i dijagramom (slika 11).



Slika 11. Dijagram stanja Al-Si legura [2]

4.1.2. Al-Si-Cu legure

Ove legure imaju povišena mehanička svojstva, ali su im zbog bakra smanjena livljivost i korozijska otpornost. Sklone su stvaranju poroznosti u odljevcima. Korištenjem novih tehnologija lijevanja u vakuumu i lijevanja dodatnim tlačenjem, smanjeno je nastajanje poroznosti odljevaka [4]. Uz to omogućeno je da se ove legure uspješno toplinski obrađuju radi poboljšanja mehaničkih svojstava. Zbog svih poboljšanja ova legura je ujedno i najupotrebljavanija od svih ljevačkih legura [9].

Bakar pridonosi čvrstoći i postiže se zadovoljavajuća istežljivost. Uz to imaju smanjenu otpornost na trošenje, ali se dobro strojno obrađuju. Povećanjem udjela silicija poboljšava im se livljivost te otpornost na tople pukotine [4]. Iz tog razloga se legure s višim udjelom silicija često koriste za kompleksnije odljevke, kao što su blokovi motora i klipova u automobilskoj industriji (slika 10) [9]. Dodatkom od 0,2 do 0,5 % titana i magnezija te uz provedenu toplinsku obradu postižu se visoke čvrstoće [4].

4.1.2.1. AlSi9Cu3

Ova legura spada u podeutektičke legure jer sadrži 9,4% silicija. Jedna je od najčešće korištenih aluminijevih legura. Mehanička svojstva ove legure ovise o udjelu bakra, ali je problem što bakar ujedno narušava ostala svojstva ove legure pa je potrebno odabrati optimalni udio bakra u kemijskom sastavu. Iz ispitivanja sa više različitih udjela, najoptimalniji rezultati su dobiveni za udio od 3% bakra. Rezultati su praćeni ispitivanjem tvrdoće HB i mjerenjem vlačne čvrstoće. Uz ova ispitivanja, analiziran je i utjecaj bakra na oksidacijska svojstva i otpornost koroziji. Zaključeno je da se dodavanjem bakra dobivaju odlična mehanička i procesna svojstva. No, problem je što viši udjeli bakra narušavaju otpornost na koroziju. Brzina oksidacije je najniža s udjelom bakra od 3% ali su razlike vrlo male i za veće udjele pa se utjecaj bakra na otpornost oksidaciji ne može jasno definirati. Što se tiče mehaničkih svojstava, najveće vrijednosti tvrdoće, vlačne čvrstoće i granice popuštanja uočene su na udjelu između 3 i 4% bakra (tablica 4) [8].

Tablica 4. Mehanička svojstva AlSi9Cu3 legure [8]

Tensile strength R_m / MPa	Yield strength $R_{p0.2}$ / MPa
240	140
Elongation A / %	Brinell hardness / HB
1	80

Osim toga zabilježena je dobra otpornost na visoke temperature što čini AlSi9Cu3 dobrim izborom za proizvodnju motora i zupčanika. Uz to bitno je naglasiti kako se toplinskom obradom ove legure postižu još bolja mehanička svojstva. Ova legura također ima dobru livljivost. Uglavnom se koristi za izradu složenijih odljevaka tankih stijenki koji su izloženi dinamičkim opterećenjima te za odljevke dijelova motora, glava cilindra, dijelova elektromotora, ležajeve bloka itd [8].

4.1.4. Al-Zn-Si legure

Jedne od karakteristika ovih legura su dobra livljivost, ne lijepe se za kalup, dobro se poliraju, imaju povećanu gustoću i samokaljive su. Udio cinka u leguri je od 7 do 12%. Inače zajednički nedostatak svih aluminijevih legura za lijevanje pod tlak je da se lijepe za kalup. Zbog smanjenja lijepljenja u ovim legurama dopušten je povećan sadržaj željeza do 1,5% s time da njegovo prisustvo negativno utječe na korozijsku postojanost te mehanička svojstva legure [4].

4.1.3. Al-Cu legure

To su legure koje sadrže od 4 do 5% bakra, uz to sadrže silicij, željezo, a ponekad i magnezij kao nečistoću. Toplinski su obradive legure čime se može postići velika čvrstoća i dovoljno dobra duktilnost. Legure s većim udjelom bakra od 7 do 8%, nekad su bile jedne od korištenijih legura dok su danas manje upotrebljive jer su ih zamijenile Al-Si-Cu legure. Jedna od značajnih karakteristika ovih legura s višim udjelom bakra je njihova otpornost na nečistoće. Problem kod ovih legura je mala čvrstoća te prosječna livljivost. Legure koje sadrže još veći udio bakra od 9 do 11%, koriste se za uporabu u automobilskoj i avioindustriji, a razlog tomu je otpornost na trošenje te dobra čvrstoća pri povišenim temperaturama [9].

4.1.5. Al-Mg legure

Glavna prednost ovih legura je dobra otpornost na koroziju, naročito pod utjecajem morske vode. Uz to se dobro obrađuju rezanjem, imaju visoka mehanička svojstva i ne lijepe se na površinu klipa za tlačenje prilikom lijevanja odljevka. Dodatkom magnezija dobiva se srebrni sjaj na odljevcima, ali ako količina dodanog magnezija prijeđe određeni udio, narušavaju se ljevačka svojstva i pojavljuju greške na odljevcima, točnije usahline i tople pukotine [4]. Kod legura koje sadrže oko 10% magnezija, zbog šireg temperaturnog intervala kristalizacije smanjena su svojstva legure. Zbog velike sklonosti oksidaciji u rastaljenom stanju potrebna je primjena složene tehnologije pri taljenju i lijevanju [9]. Kod ovih legura je povećano skupljanje, smanjena livljivost te plastičnost pri povišenim temperaturama [4].

4.1.6. Al-Si-Mg legure

Ako se Al-Si legurama dodaje magnezij dobije se skupina legura sa odličnim ljevačkim svojstvima. Takve legure nakon toplinske obrade postižu izvrsna svojstva. Uz to postiže se odlična otpornost na koroziju te mali koeficijenti toplinske ekspanzije. Jedan od nedostataka ovih legura je manja postiziva čvrstoća od nekih poznatih legura kao što su Al-Cu i Al-Si-Cu legure. No, postoji i dalje mogućnost za povećanje čvrstoće ovih legura dodatkom berilija.

4.2. Legure magnezija

Magnezij u čistom stanju je vrlo zapaljiv jer mu je vrelište koje iznosi 1097°C vrlo blizu tališta [2]. Uz to ima niska mehanička svojstva [4]. Glavni nedostatak mu je afinitet prema kisiku. Ne rabi se za konstrukcije. Legiranjem mu se poboljšavaju mehanička svojstva i otpornost na koroziju. Od legiranih elemenata koji se upotrebljavaju glavni su aluminij, cink, mangan i cirkonij [2]. Legure magnezija moguće je lijevati u pijesak, kokile te pod tlakom. Zbog velikog afiniteta prema kisiku samog magnezija tako i njegovih legura, tale se i lijevaju u atmosferi zaštitnog plina ili se talina prekriva solima [2]. Ove legure imaju neka negativna svojstva kao što je mala istezljivost, slaba čvrstoća na povišenim temperaturama, snižena livljivost, veći afinitet prema kisiku, što sve skupa otežava lijevanje odljevka postupkom tlačnog lijeva [4]. Osnovna svojstva čistog magnezija i njegovih legura dana su u tablici 5.

Tablica 5. Osnovna svojstva magnezija i njegovih legura [2]

Osnovna svojstva	Mg	Mg legure
Talište (°C)	650	650
Gustoća (kg/dm ³)	1,74	1,8...1,85
Vlačna čvrstoća (N/mm ³)	do 100	160...250 (400)
Vrelište (°C)	1102	
Skupljanje u krutom stanju (%)	1,2	1,0...1,5
Istezljivost (%)	10...15	2...12

4.3. Legure bakra

Čisti bakar se koristi za lijevanje samo kada se zahtjeva od odljevka da ima čim bolju električnu ili toplinsku provodljivost. Bakar u čistom obliku ima lošu livljivost te veliku sklonost poroznosti [2]. Legure koje su našle primjenu pri tlačnom lijevanju su legure bakra s cinkom. Radi poboljšanja svojstava bronci se dodaje određena količina aluminija, silicija, olova i mangana [4]. Legure bakra imaju najbolja mehanička svojstva i najbolju otpornost na koroziju od svih legura za lijevanje pod tlakom. Ove legure imaju visoke zahtjeve za obradu odvajanjem čestica u odnosu na ostale legure, ali dodatnim legiranjem se mogu postići zadovoljavajuća svojstva [9]. Dodatkom olova kod ovih legura se poboljšava obradivost. Dodatkom silicija poboljšavaju se tehnološka svojstva, čime je omogućeno lijevanje tankostjenih složenih odljevaka [4].

Legure bakra namijenjene lijevanju dijele se u sljedeće skupine:

- bronce (Cu-Sn)
- mjedi (Cu-Zn)
- crveni lijev (Cu-Sn-Zn)
- novo srebro (Cu-Ni-Zn) [2].

Tablica 6. Osnovna svojstva bakra [2]

Osnovna svojstva	Cu
Talište (°C)	1083
Gustoća (kg/dm ³)	8,96
Vlačna čvrstoća (N/mm ³)	200...360
Tvrdoća (HB)	40...130
Modul elastičnosti (kN/mm ²)	1,7
Istezljivost (%)	2...45

4.4. Legure cinka

Čisti cink se lijeva za izradu anoda za zaštitu od korozije cjevovoda i brodova. Češće se koriste legure cinka s aluminijem, magnezijem i bakrom [2]. Legure cinka imaju dobra ljevačka svojstva zbog kojih se mogu lijevati složeni i tankostjeni odljevci [9]. Ove legure se ne lijepe za površinu kalupa i ne reagiraju u dodiru s kalupom i loncem. Manje su otporne na koroziju od legura bakra. Koriste se za nanošenje zaštitnih, dekorativnih i ojačavajućih prevlaka [4]. Najviše se koriste u automobilskoj industriji, dobro se poliraju i prihvaćaju sve galvanske prevlake. Osnovna svojstva cinka i njegovih legura prikazana su u tablici 7.

Tablica 7. Osnovna svojstva cinka i njegovih legura [2]

Osnovna svojstva	Mg	Mg legure
Talište (°C)	420	420
Gustoća (kg/dm ³)	7,13	6,5...6,8
Vlačna čvrstoća (N/mm ³)	30...40	200...350
Tvrdoća (HB)	40...45	70...100
Skupljanje u krutom stanju (%)	1,7	1,3
Istezljivost (%)	0,3...0,5	1...5

5. GREŠKE U TLAČNIM ODLJEVCIMA

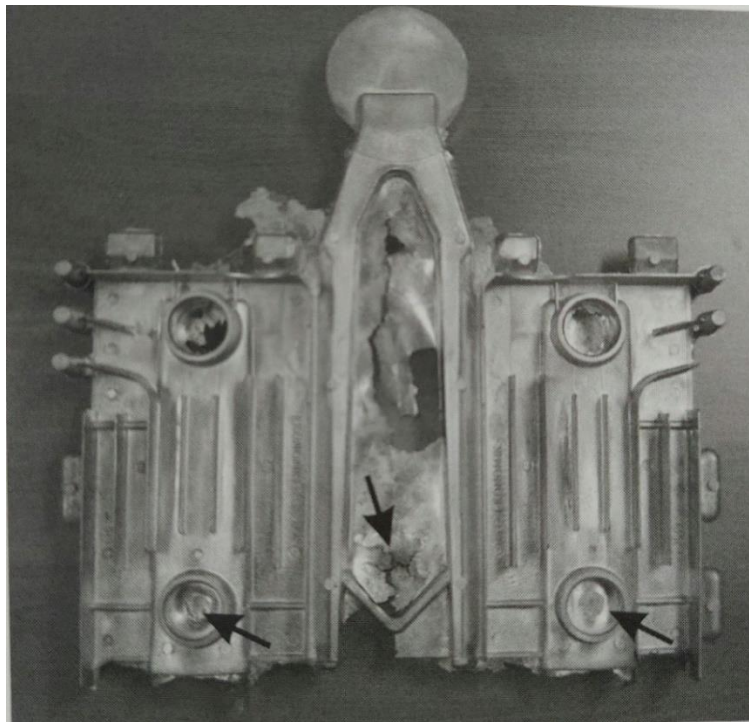
Tokom procesa proizvodnje odljevaka, unutar postupaka koji se provode i materijala koji se koriste za lijevanje, nalazi se mnogo mjesta potencijalnih za nastanak greške. Greške se generalno mogu podijeliti na četiri osnovne skupine: greške dimenzija odljevaka, greške volumena (unutarnje), greške površine odljevka i greške koje smanjuju mehanička svojstva odljevaka [4]. Postoji još jedna podjela grešaka na odljevcima prema izgledu, koje se mogu razvrstati u 7 osnovnih razreda sa oznakama velikih slova od A do G. Svaki razred je podjeljen u skupine, a svaka skupina u podskupine i nakraju pojedinačne greške unutar podskupina. Razredi grešaka su sljedeći:

- A- metalne izrasline
- B- šupljine
- C- prekinuti odljevak
- D- površinski nedostaci
- E- nepotpuni odljevak
- F- netočnost mjera i oblika
- G- uključci i heterogenost.

Veze među uzrocima i posljedicama te mogućnost međusobnih djelovanja različitih uzroka nastanka grešaka vrlo su složene. Jedan uzrok može prouzročiti više različitih grešaka, a jedna greška može biti posljedica djelovanja različitih uzroka ili njihovim kombinacijama [2]. Tokom ispitivanja grešaka potrebno je što jasnije definirati vrstu greške, uzrok nastajanja, a zatim brzo reagirati na utjecajne parametre kako bismo je otklonili. Današnjim metodama simulacija lijevanja i skrućivanja moguće je ostvariti značajne uštede, a razlog tomu je što se greška otkriva na modelu koji je još u fazi tehnološke razrade. U tom stadiju je još moguće izbjeći grešku pravilnim oblikovanjem uljevnog sustava ili samog modela [2]. Osim izbjegavanja navedenih grešaka, neki odljevci zahtijevaju posebna svojstva kao što su nepropusnost, otpornost na koroziju, mogućnost upotrebe odljevka u prehrambenoj industriji kao posude itd. U nastavku će se opisivati najčešći tipovi grešaka kod tlačno lijevanih odljevaka.

5.1. Metalne izrasline (A)

Kada se govori o metalnim izraslinama kod tlačnog lijeva to se odnosi na srh. Pojava srha može ubrzati hlađenje pojedinih dijelova odljevka te uzrokovati hladne napukline odljevaka. Nastajanje srha može biti uzrokovano kada postoji zračnost i netočno sklapanje kalupa, ako jezgri oslonci i jezgre nisu usklađeni u dimenzijama, previsokom temperaturom ulijevanja taline, loše zatvaranje i stezanje kalupa, zbog unutarnjeg pucanja kalupa zbog velikog toplinskog opterećenja itd [4]. Slika 12. prikazuje primjer odljevka sa srhom na diobenoj ravnini odljevka.



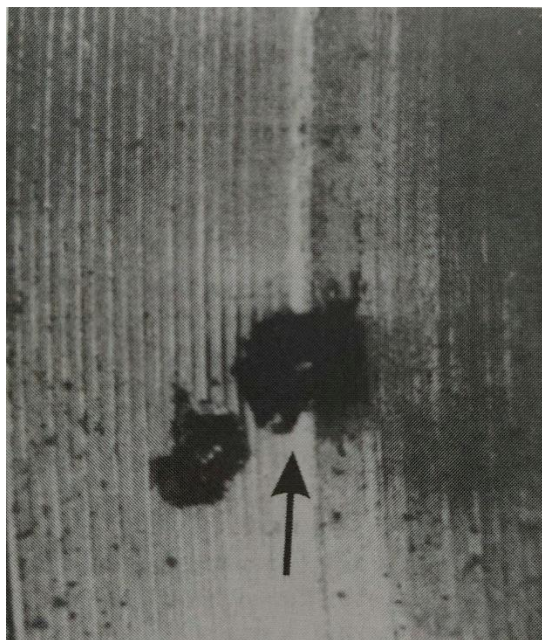
Slika 12. Srh na diobenoj ravnini odljevka radijatora [4]

Rješenja za otklanjanje greške su sljedeća:

- kontrolirati oblik i dimenzije kalupa
- uskladiti dimenzije jezgre i jezgrinih oslonaca
- definirati i kontrolirati temperaturu ulijevanja
- ako je moguće smanjiti tlak ubrizgavanja taline
- poboljšati konstrukciju kalupa radi smanjenja zaostalih naprezanja i upotrijebiti kvalitetniji materijal za izradu kalupa
- poboljšati unutarnju obradu i hlađenje kalupa [4].

5.2. Šupljine (B)

Poroznost odljevka je prva bitna greška iz ovog razreda (Slika 13.). Uzroci nastajanja ovih grešaka su sljedeći: nedovoljni uvjeti za skrućivanje, neodgovarajući uljevni sustav, veća količina plina nastalog od premaza kalupa, previsoka temperatura ulijevanja taline i samog kalupa, povećana brzina ulijevanja taline i unošenje zraka u kalupnu šupljinu, nizak tlak treće faze itd [4].

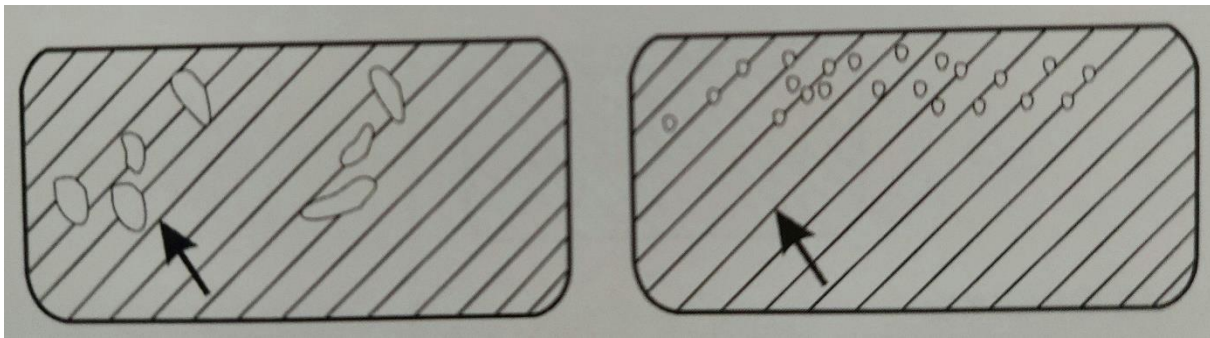


Slika 13. Unutarnje šupljine [4]

Rješenja za otklanjanje greške su sljedeća:

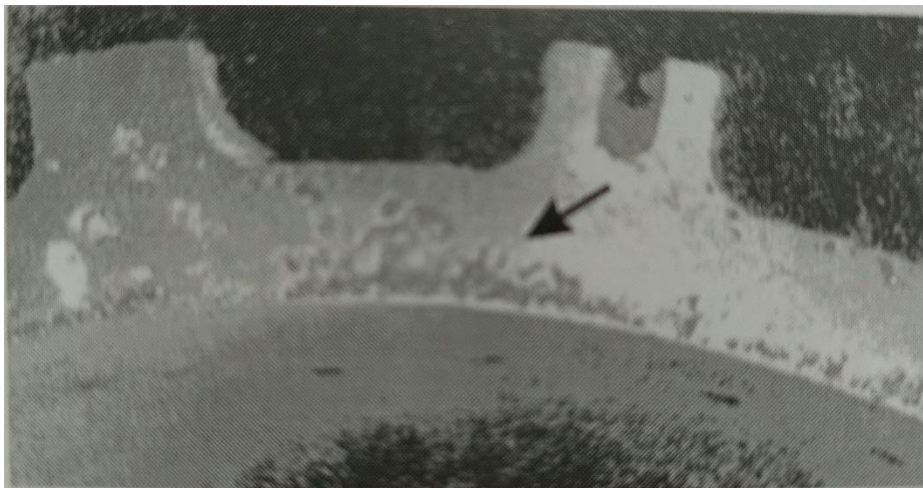
- odabrati odgovarajući uljevni sustav i razmak između kalupnih šupljina ako se lijeva više odljevaka odjednom
- povećati tlak treće faze
- odabrati odgovarajući premaz kalupa
- ugraditi pojila [4].

Dalje, postoje plinski mjehuri u obliku okruglih šupljina obično glatkih stijenki koje se nalaze najčešće ispod površine odljevka, a moguće je i na površini odljevka. Šupljine većih dimenzija najčešće su odvojene (mjehuravost), dok se male javljaju u skupinama različitih dimenzija (izbodenost) (slika 14). Moguća je istovremena pojava jednog i drugog oblika poroznosti.



Slika 14. Skica mjehuravosti/izbodenosti [4]

Ako se radi o površinskim oblicima one su obično smještene na površini ili ispod tankog sloja metala i stoga neuočljive prije obrade (Slika 15.). Nekad se pojavljuju i kao sjajna mjesta na odljevku [4]. Kod tlačnog lijeva zasad je gotovo nemoguće proizvesti odljevak bez poroznosti. Stoga prihvatljiv udio poroznosti u odljevku mora biti dogovoren između kupca i proizvođača pri postavljanju zahtjeva na kvalitetu odljevka [9].



Slika 15. Mjehuravost na površini odljevka [4]

Kod ovog oblika poroznosti rješenja za otklanjanje greške su sljedeća:

- poboljšati izvedbu kanala za otplinjavanje i ventilaciju kalupa
- odabrati premaz za kalup koji razvija manje plina
- pravilno dimenzionirati uljevni sustav
- smanjiti brzinu ulijevanja i povišiti tlak treće faze
- za vrijeme taljenja provesti otplinjavanje taline
- smanjiti brzinu tlačnog klipa [4].

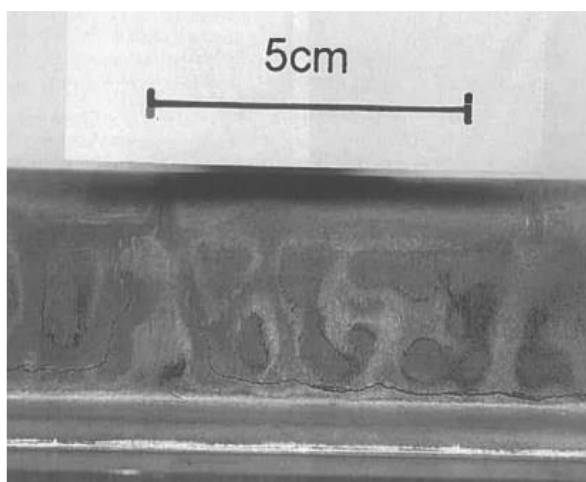
Ove greške se obično pojavljuju kod bakrenih legura i lakih metala, a utvrđivanje njihova uzroka vrlo je složeno. Uzroci su najčešće vanjski tj. uljevni sustav i premaz. Unutarnji uzroci taljenje i kemijske reakcije, uzrokuju male šupljine (izbodenost) jednolike veličine, raspoređene ravnomjerno po odljevku ili dijelu odljevka [4].

Postoje još mikro i makroporoznosti u aluminijskom lijevu, koje izaziva visoka temperatura ulijevanja. Nastaju uključine od veće količine plina nastalog iz premaza kalupa. Ove greške se otkrivaju tek nakon ispitivanja odljevaka pod tlakom. Prepoznati se može po rijetkom spužvastom materijalu ili sitnoj poroznosti. Najčešće nastaje na mjestima koja se posljednja skrućuju tj. na mjestima veće debljine i mase, izbočenim dijelovima itd [4]. Mjera postupaka koje treba pripaziti za otklanjanje greške su iste kao i za prošli primjer, a to su:

- osigurati dobru propusnost plinova
- odabrati odgovarajući premaz kalupa koji će razviti manje plina
- pravilno dimenzionirati uljevni sustav
- izvršiti otplinjavanje taline
- povišiti tlak treće faze itd. [4].

5.4. Napukline (C)

Iz razreda napuklina najbitnije za tlačni lijev su tople pukotine. Ovim greškama su sklonije legure s velikim intervalom skrućivanja i malim udjelom komponenata niskog tališta tj. eutektika koji se lijevaju u stalne kalupe [9]. Tople pukotine su interkristalne napukline nepravilnog oblika, često se može uočiti fina dendritna struktura koja je zbog oksidacije tamno obojena (Slika 16.).

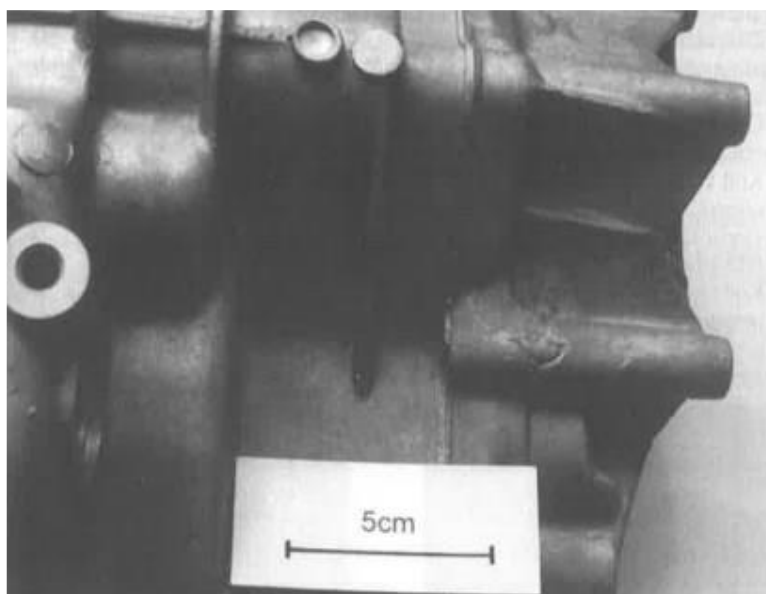


Slika 16. Tople napukline [9]

Greška se najčešće javlja u dijelu koji se najkasnije skrutnuo, a uz to je podložan napetostima. Nastaju zbog nemogućnosti stezanja pri skrućivanju odljevka, što je najčešće izazvano zbog loše konstrukcije ili zbog nemogućnosti skupljanja kalupa. Nagle temperaturne promjene uzrokuju toplinska naprezanja koja tijekom vremena mogu dovesti do oštećenja materijala, a time i razaranja metalnog kalupa [4].

5.5. Površinske greške (D)

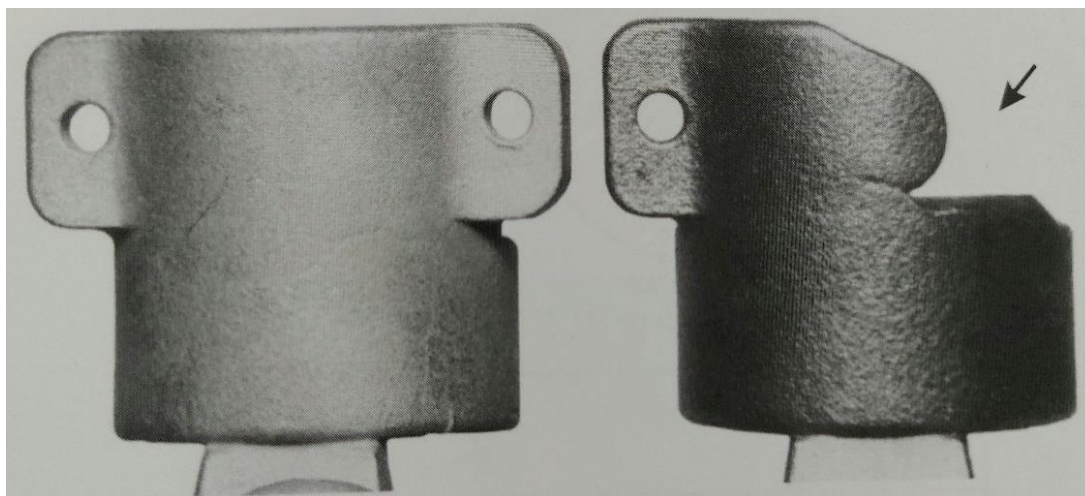
Površinska pogreška koja može biti prisutna kod svih ljevačkih materijala i neovisno od postupka lijevanja je hladni zavar. Može je se uočiti golim okom i najčešće uzrokuje škart odljevka. Kod tlačnog lijeva može nastati i u unutrašnjosti kao uključak hladnog zavara te kao takva je vidljiva tek nakon mehaničke obrade [9]. Pojavljuje se pretežno na ravnim površinama, gdje može doći i do njegova odvajanja tako da ostanu šupljine, nedolivena područja ili zaobljeni bridovi. Može ga se prepoznati po vrlo finim i tankim površinskim slojevima kod odljevaka tlačnog lijeva (slika 17).



Slika 17. Hladni zavar na Al odljevku [9]

5.6. Nepotpunosti (E)

Iz ovog razreda grešaka najpoznatiji oblik je nedolivenost (Slika 18.). Ova vrsta greške nastaje jer talina ne popuni cijelu kalupnu šupljinu. Uzroci tomu su: nedovoljno otplinjavanje i ventilacija kalupa, prekinuto ulijevanje ili niska temperatura taline, mala brzina ulijevanja taline, nizak tlak pri tlačenju taline kroz sve tri faze [4].



Slika 18. Nedolivenost [4]

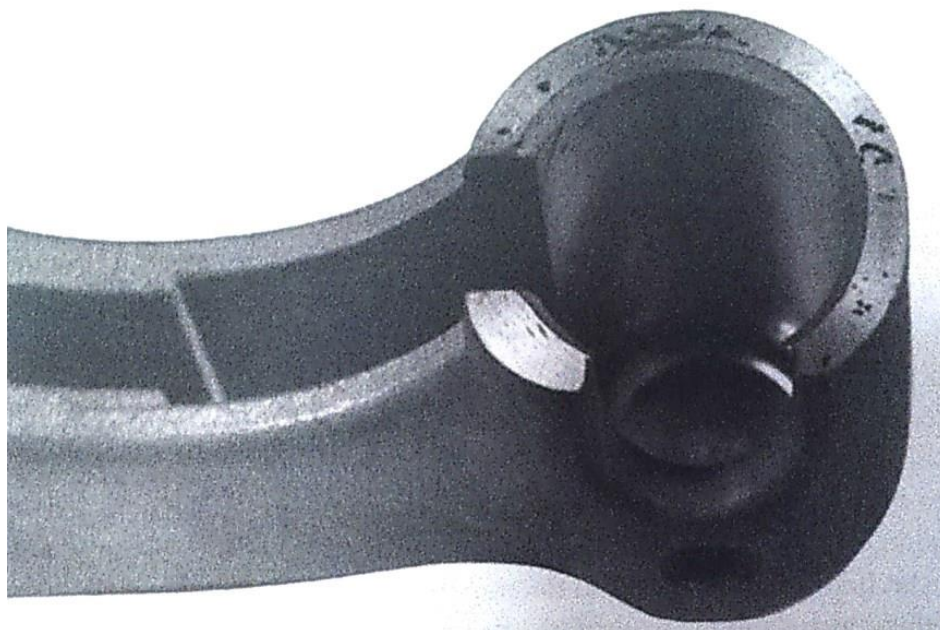
Rješenja za otklanjanje greške su sljedeća:

- poboljšati otplinjavanje i ventilaciju kalupa
- ulijevati kontinuirano bez prekida
- povisiti brzinu ulijevanja metala, temperaturu taline i kalupa
- povisiti tlak litine pri ulijevanju kroz sve tri faze [4].

5.7. Uključine i heterogenosti (G)

U ovaj razred spadaju oksidni uključci čija pojava ne zavisi od postupaka lijevanja te se pojavljuju u pješčanim, kokilnim i tlačnim odljevcima [9]. To su nemetalne uključine koje se najčešće pojavljuju u obliku tankih kožica (Slika 19.). Netopljivi su i mjestimično prekidaju osnovnu strukturu odljevka, a boja im odgovara vrsti oksida [4]. Legure koje sadrže veće udjele aluminijskog, silicijevog, magnezijevog i kromovog oksida naročito su sklone tvorbi oksidnih uključaka. Kod Al-Si legura se javljaju uključci s promjerom od 2 do 7,5 mm. Kod aluminijskih legura javljaju se često dva oblika oksida:

- $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ - nastaje pri temperaturama od 750°C , mekan je i termički nestabilan
- $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ - nastaje na temperaturama višim od 750°C te je termički stabilan [9].



Slika 19. Oksidni ukljucci na tlačnom aluminijskom odljevku [9]

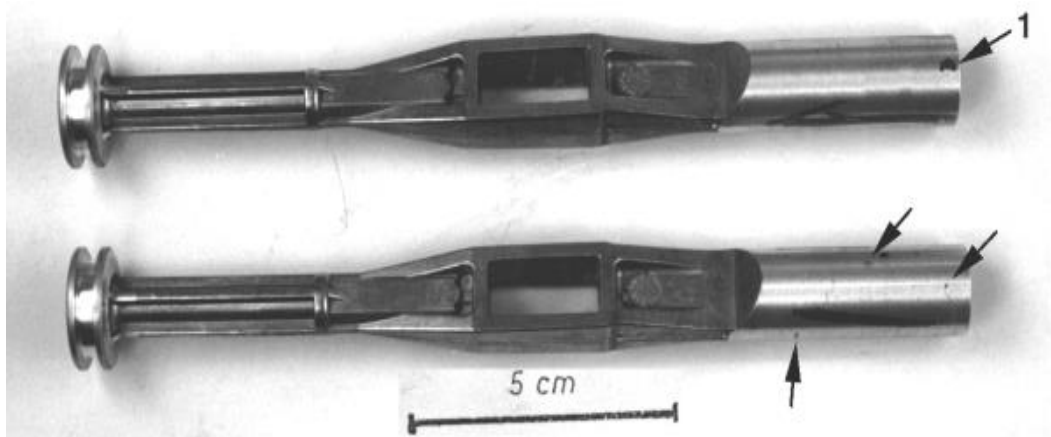
Rješenja za otklanjanje ove greške su sljedeća:

- koristiti sredstvo za podmazivanje sa što manjom toplinskom kontrakcijom
- debljina tog sredstva mora biti što manja, uz uvjet da ispunjava svu potrebnu zadaću
- spriječiti pojavu oksidacije pri uljevanju te smanjiti brzinu protjecanja taline i turbulencije
- imati na umu da se greška oksidna kožica najčešće pojavljuje kod aluminijskih legura [4].

Dalje, bitna greška koja se nalazi u ovom razredu su tvrda mjesta. To su ukljucci ili faze koje se pojavljuju kod aluminijskih legura (slika 20.). Mogu biti različitih veličina, manje ili veće gustoće i velike su tvrdoće kao što im sam naziv govori [4]. Uzrokuju velike probleme pri mehaničkoj obradi odljevaka, uz to oslabljuju strukturu i time pogoršavaju mehanička te dinamička svojstva odljevka. Tvrda mjesta se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine tj. na nemetalne i metalne uključke [9]. Najčešće su to ukljućine korunda, Si-karbida ili kvarcita. Kod lijevanja aluminijskih legura mogu se naći unutar cijelog obratka, a najčešće se pojavljuju pri strojnoj obradi ili drugim završim obradama [4].

Sprečavanje nastanka greške može se ostvariti:

- održavanjem najniže temperature taljevine ovisno o sastavu taljevine
- filtriranjem taljevine
- kontrolirati kvalitetu premaza na kalupima od sivog lijeva [4].



Slika 20. Tvrda mjesta na Al odljevku [10]

6. SIMULACIJA TLAČNOG LIJEVA

Prije nego se krene u proizvodnju odljevka tlačnim lijevanjem, potrebno je izraditi trajni metalni kalup. Takvi kalupi su jako skupi, točnije potrebno je uložiti od nekoliko desetaka pa i više od sto tisuća eura, ovisno koliko je kompleksna izvedba kalupa. Zbog toga da ne bi došlo do propalog ulaganja potrebno je provesti istraživanje može li se odabrani odljevak lijevati bez grešaka [2]. Podešavanjem parametara u proizvodnom procesu može se bitno utjecati na kvalitetu odljevka. No, da bi se došlo do najoptimalnijih parametara u realnim uvjetima proizvodnje trebalo bi provoditi brojne pokušaje ciklusa proizvodnje, a nakon toga ispitivanja kojima će se utvrditi pogreške. Takav pristup nije isplativ jer zahtjeva mnogo vremena i novca te uvelike ovisi i o vještinama radnika [9]. Uz sve to mora se računati na konkurenciju zbog koje se postavljaju visoki uvjeti kao što su smanjenje troškova proizvodnje, povećanje produktivnosti te visoka kvaliteta odljevka. Zbog toga se u posljednjih dvadesetak godina razvijaju simulacijski softveri koji omogućavaju ostvarivanje visoko postavljenih uvjeta [2].

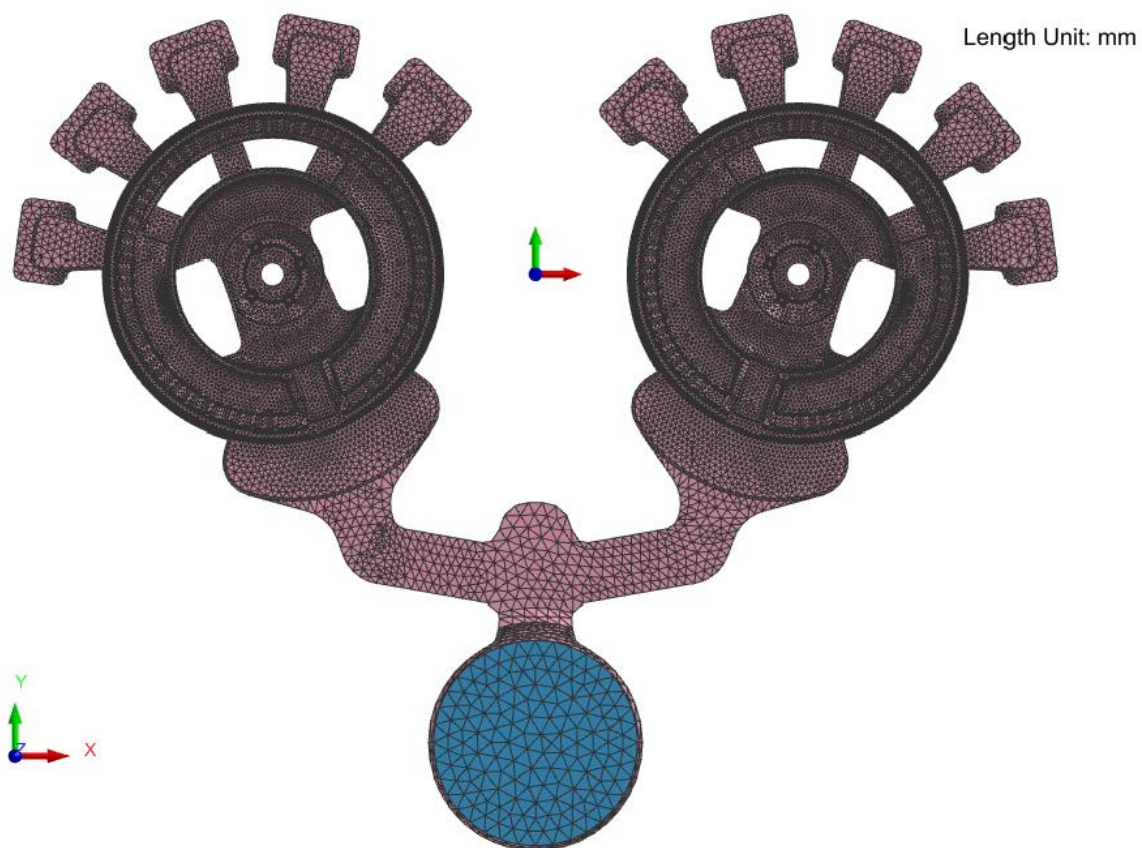
Korištenje simulacijskih softvera omogućuje predviđanje nastanka potencijalnih problema prilikom lijevanja odljevka, tj. prilikom punjenja i skrućivanja. Omogućuje brzu vizualizaciju učinka promjenom dizajna i priliku za ispravno donošenje odluka od najranijih faza proizvodnog procesa. Za ostvarivanje konstrukcijskih rješenja koriste se CAD i CAM tehnologije, dok za optimiziranje proizvodnih parametara prije njihove primjene koriste se CAE tehnologije. CAE simulacija se odvija na principu rješavanja jednadžbi iz mehanike fluida i termodinamike uz korištenje tzv. FEM metode konačnih elemenata ili FDM metode konačnih razlika [7]. Simulacija zapravo nudi odraz realnosti koji se dobiva prema zakonima sličnosti te ne može biti bolja od približnog rješenja jednadžbi koje računa program. Zbog svega toga danas je nemoguće zamisliti lijevanje bez upotreba simulacija. Od programa s kojima se najčešće koriste današnji inženjeri najpoznatiji su ProCAST, QuickCAST i MAGMASOFT. U eksperimentalnom dijelu ovoga rada koji će biti opisan u nastavku, za simulacije je korišten program ProCAST.

6.1. Eksperimentalni dio

U ovom radu potrebno je konstruirati CAD model s uljevnim sustavom. Za takav model napraviti simulaciju za tlačno lijevanje u horizontalnoj komori i to za tri različite brzine tzv. spore faze. Dakle, za usporedbu rezultata ovih simulacija ključna je brzina klipa tijekom spore faze koja će se uvećati od prvog slučaja za 200% te za 400% kako bi dobili značajnije promjene. Simulacije je potrebno provesti u programskom paketu ProCAST te analizirati dobivene rezultate i optimirati parametre lijevanja s obzirom na kvalitetu odljevka.

6.1.1. Odljevak

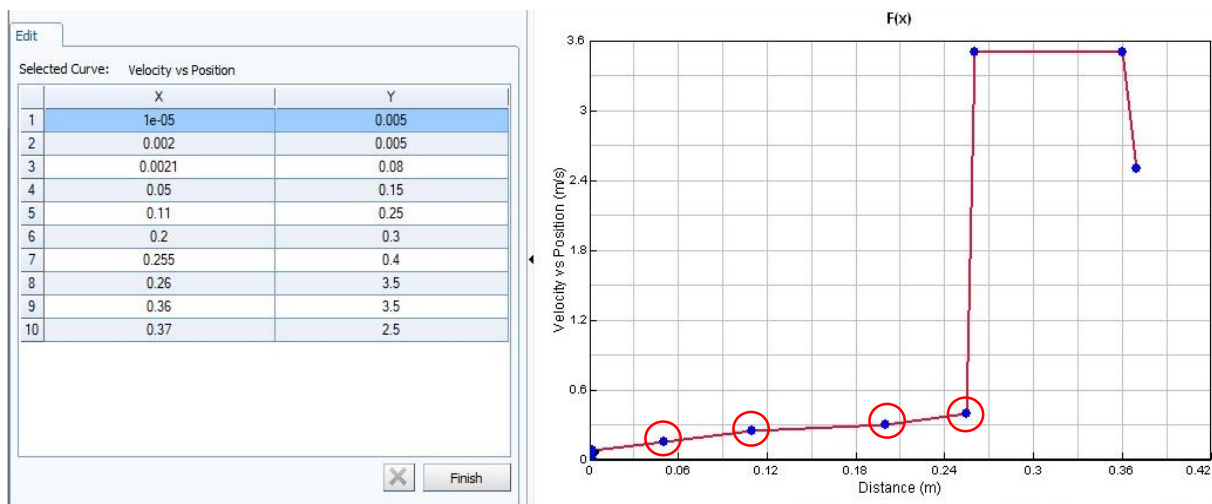
Slika 21. prikazuje model odljevka sa generiranom mrežom izrađenog od materijala AlSi9Cu3, mase 1,007 kg.



Slika 21. Model zadanog odljevka sa generiranom mrežom

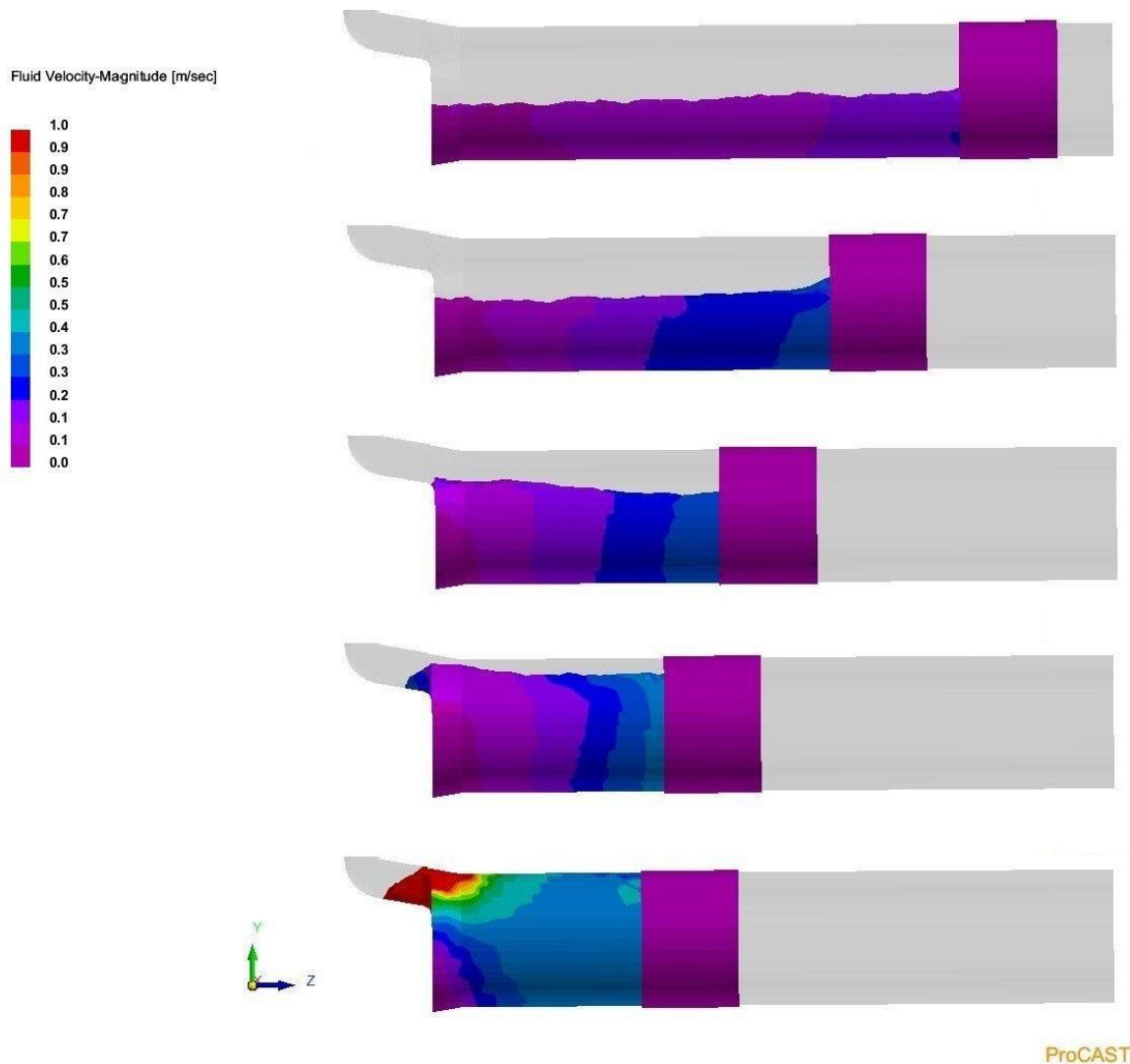
6.1.2. Rezultati simulacije za prvu brzinu

Slika 22. prikazuje graf brzina bata u pojedinim fazama procesa tlačnog lijevanja. Uz graf je dana i tablica sa iznosima brzina i pomaka u pojedinim točkama horizontalnog kretanja tlačnog klipa. U ovom slučaju sporu fazu čine točke 3, 4, 5, 6, koje su ujedno označene na grafu. Prve dvije točke su jako blizu te ih teško uočiti kao razdvojene zbog jako malog pomaka klipa.



Slika 22. Tablica i graf za prvu brzinu tlačnog klipa

Podešavanje brzine tlačnog klipa jedan je od prvih i ključnih parametara koji se moraju odrediti. Gibanje klipa mora biti takvo da ne izazove val taline pod kojim će se zarobiti zrak (Slika 23.). Val taline može nastati ako je brzina tlačnog klipa premalena ili prevelika. Osim vala problem može biti i otkidanje vala taline. Takva pojava nastaje prilikom prevelikih brzina i akceleracija klipa te uz to razlog još može biti mala popunjenost tlačne komore talinom te duljina tlačne komore.

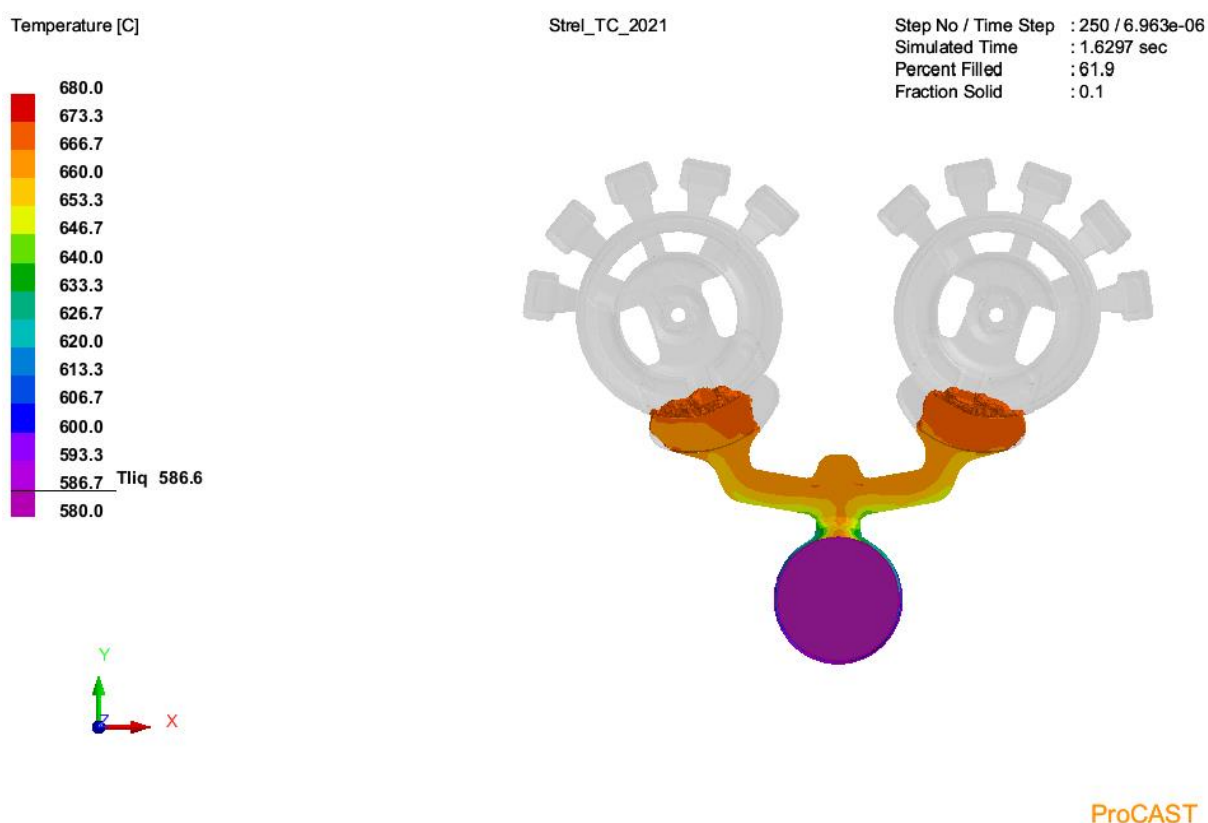


Slika 23. Gibanje tlačnog klipa prvom brzinom

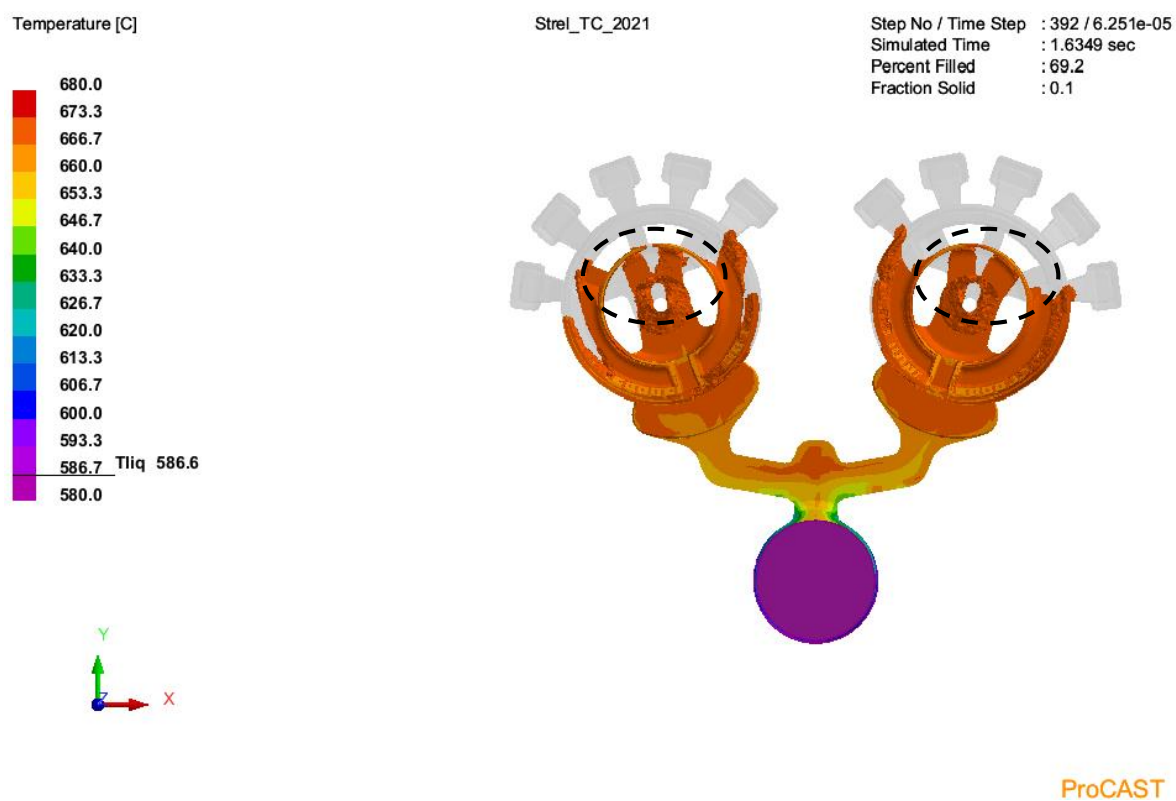
Slika 23. prikazuje gibanje tlačnog klipa za prvi slučaj brzine. Po kretanju taline unutar tlačne komore može se vidjeti da ne dolazi do velikih turbulencija, a time je isključeno i nastajanje vala. Talina postepeno podiže svoju razinu tj. visinu unutar komore i doseže stijenku tlačne komore prije početka druge faze.

6.1.2.1. Analiza punjenja kalupa

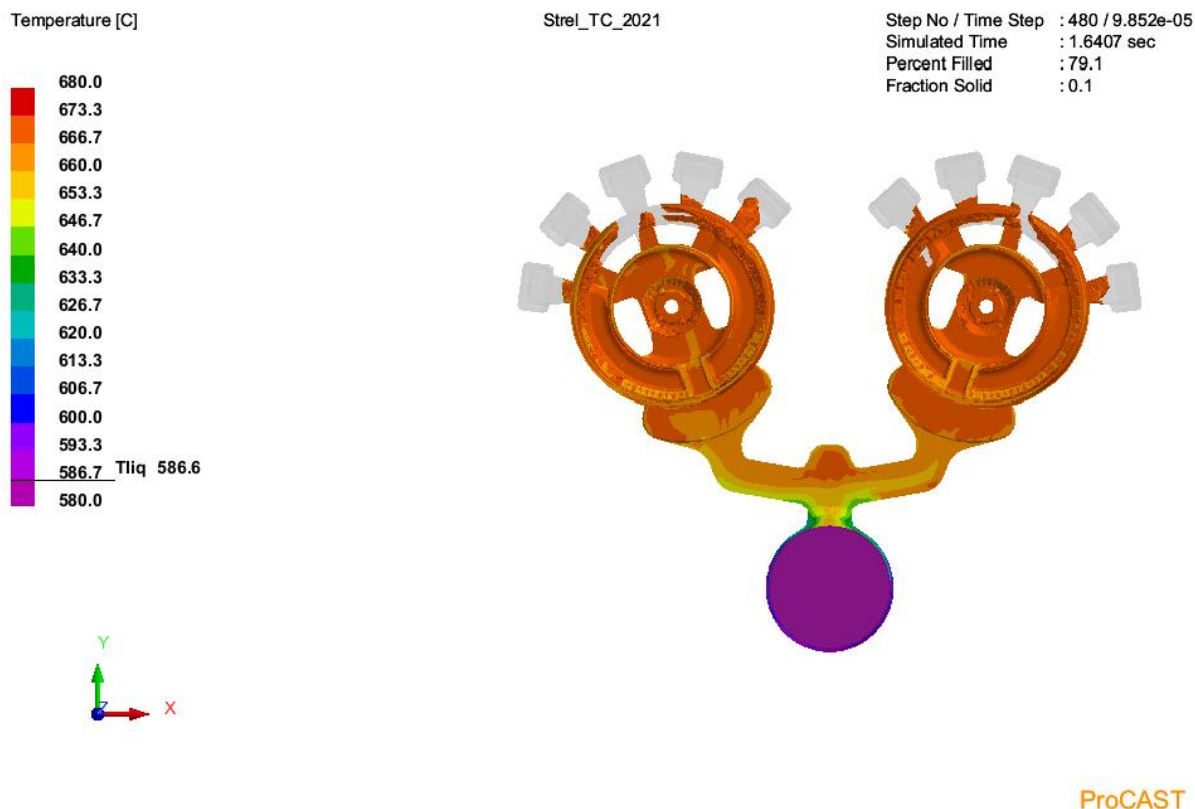
Slike 24., 25. i 26. prikazuju rezultate simulacije punjenja kalupa za prvu brzinu klipa. Iz rezultata simulacije možemo vidjeti označena mjesta gdje se spajaju dva mlaza taline (Slika 25). U tom području su potencijalna mjesta nastanka poroznosti jer će se sigurno zarobiti zrak. Dalje, Slika 26. prikazuje punjenje kalupa pri visokoj ispunjenosti od 79,1%. Tada je kalup skoro popunjen do kraja, ostaju samo preljevi koji su predviđeni da se pune zadnji kako bi ostatak zarobljenog zraka završio u njima.



Slika 24. Prikaz punjenja kalupa pri 61,9% popunjenosti 1.



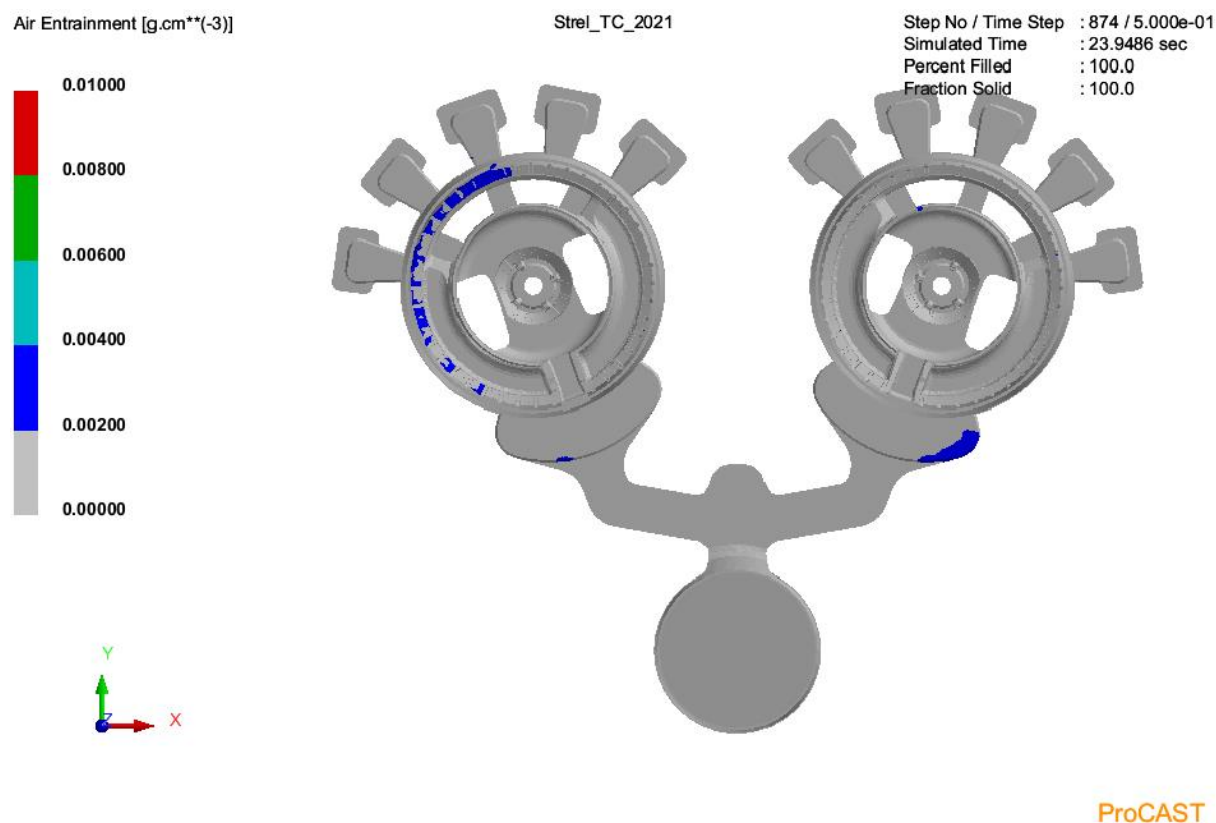
Slika 25. Prikaz punjenja kalupa pri 69,2% ispunjenosti 1.



Slika 26. Prikaz punjenja kalupa pri 79,1% ispunjenosti 1.

6.1.2.2. Analiza prisutnosti zraka u kalupu

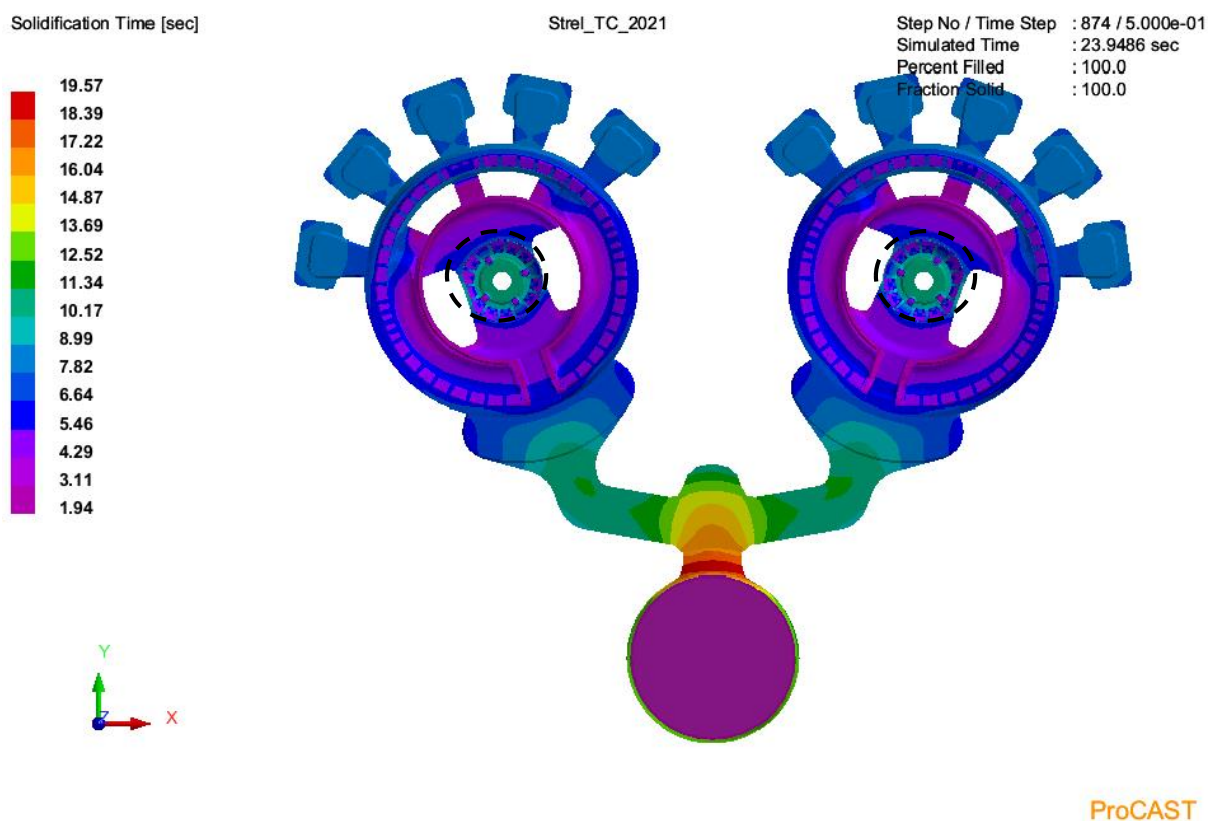
Slika 27. prikazuje količinu zarobljenog zraka unutar kalupne šupljine nakon što se ispuni talinom. Prisutnost zraka kako je opisano u poglavlju 5. može uzrokovati greške u odljevku (plinska poroznost). Dakle to su također mjesta gdje možemo očekivati plinsku poroznost.



Slika 27. Prikaz zarobljenog zraka u kalupnoj šupljini 1.

6.1.2.3. Vrijeme skrućivanja

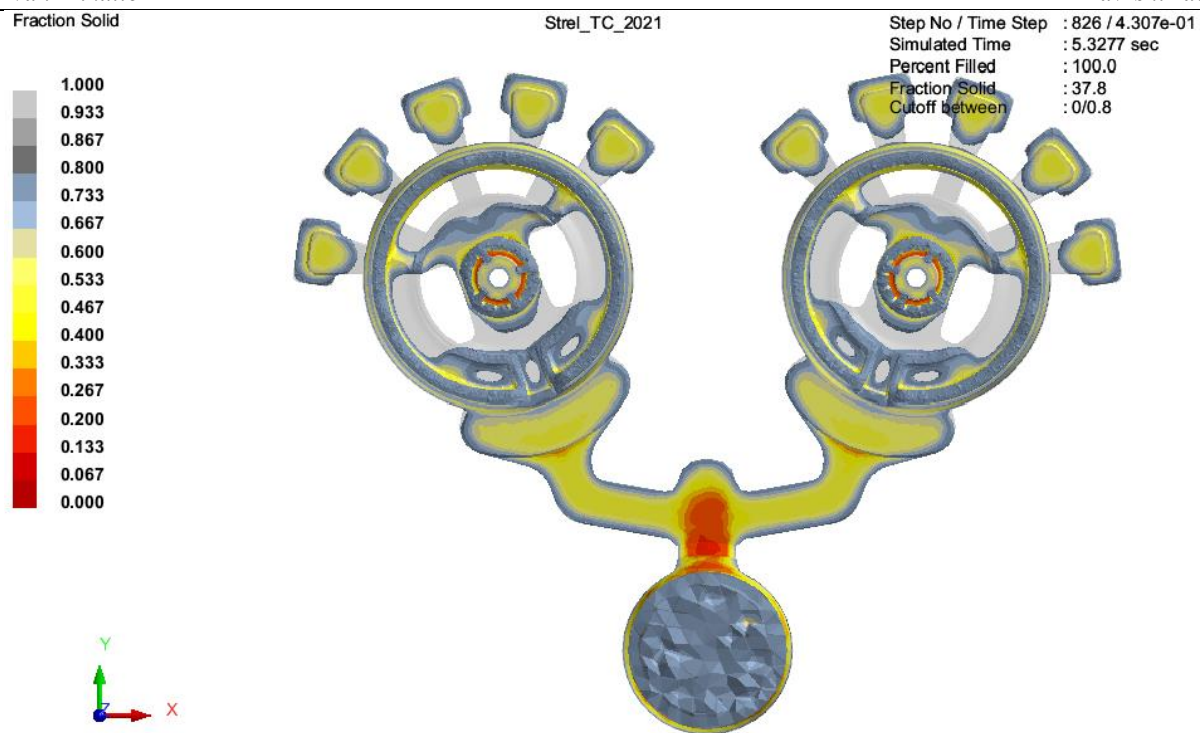
Slika 28. prikazuje vrijeme skrućivanja nakon lijevanja prvom brzinom. Iz rezultata se može vidjeti kako se najduže skrućivaju dijelovi odljevka s najvećom debljinom te oni dijelovi koji se zadnji popunjavaju. U ovom slučaju može se primijetiti kako će najviše vremena trebati za skrućivanje označeni dio koji se nalazi u samom središtu odljevka (Slika 28.). To može biti problem jer će se oko tog područja talina brže skrutnuti te kad dođe do hlađenja i skupljanja materijala može doći do poroznosti zbog nedostatka materijala, jer nisu ispunjeni uvjeti za normalno skrućivanje.



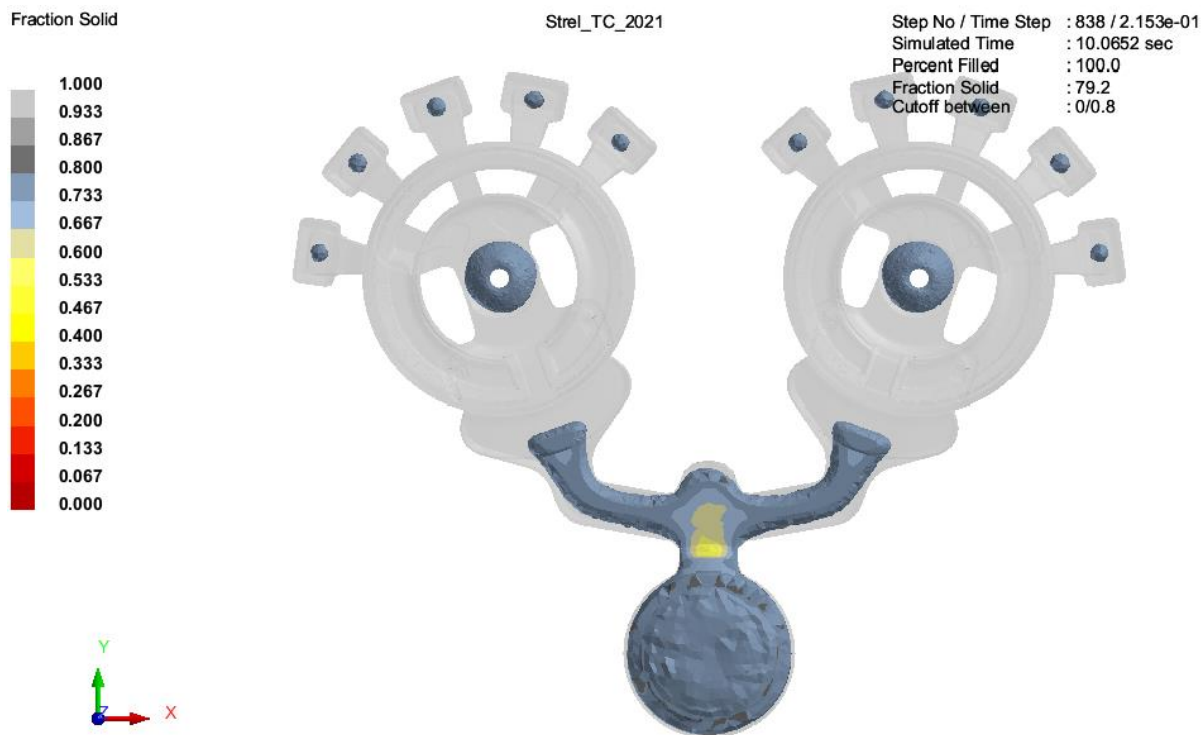
Slika 28. Vrijeme skrućivanja pojedinih dijelova odljevka 1.

6.1.2.4. Udio krute faze

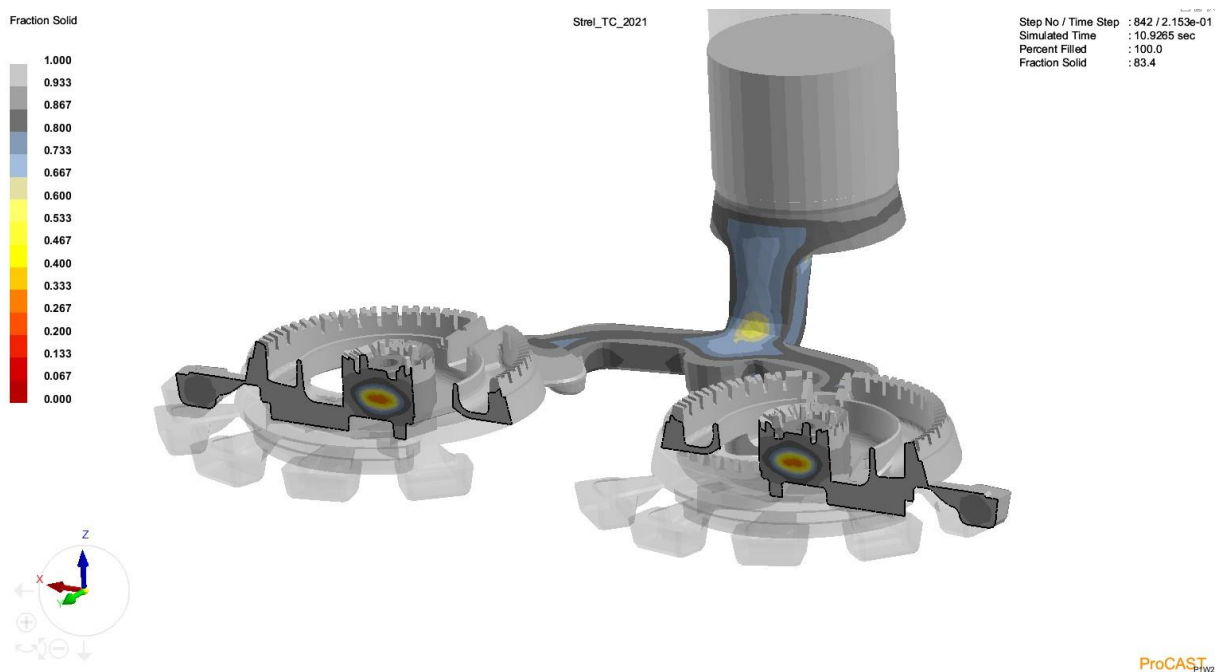
Ova analiza je napravljena kako bi se vidjelo ponašanje odljevka prilikom skrućivanja. Iz dobivenih rezultata se može vidjeti da će značajnijeg udjela krute faze biti upravo u dijelu (Slika 30.) koji je spomenut u prethodnom odlomku 6.1.2.3. Na tom dijelu će biti spriječen protok taline te s time postoji mogućnost nastanka poroznosti zbog nedostatka materijala prilikom skupljanja (Slika 30 i 31).



Slika 29. Udio krute faze (5,3 s) 1.



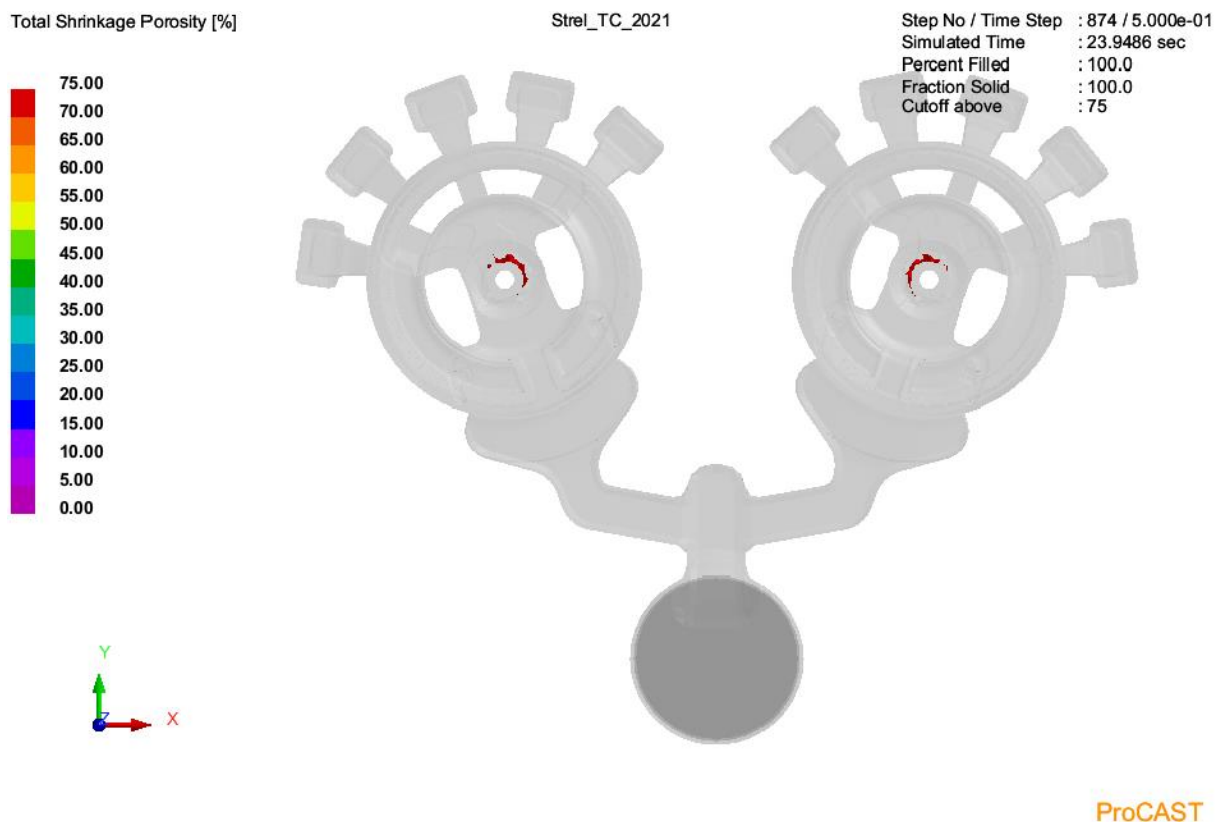
Slika 30. Udio krute faze (10 s) 1.



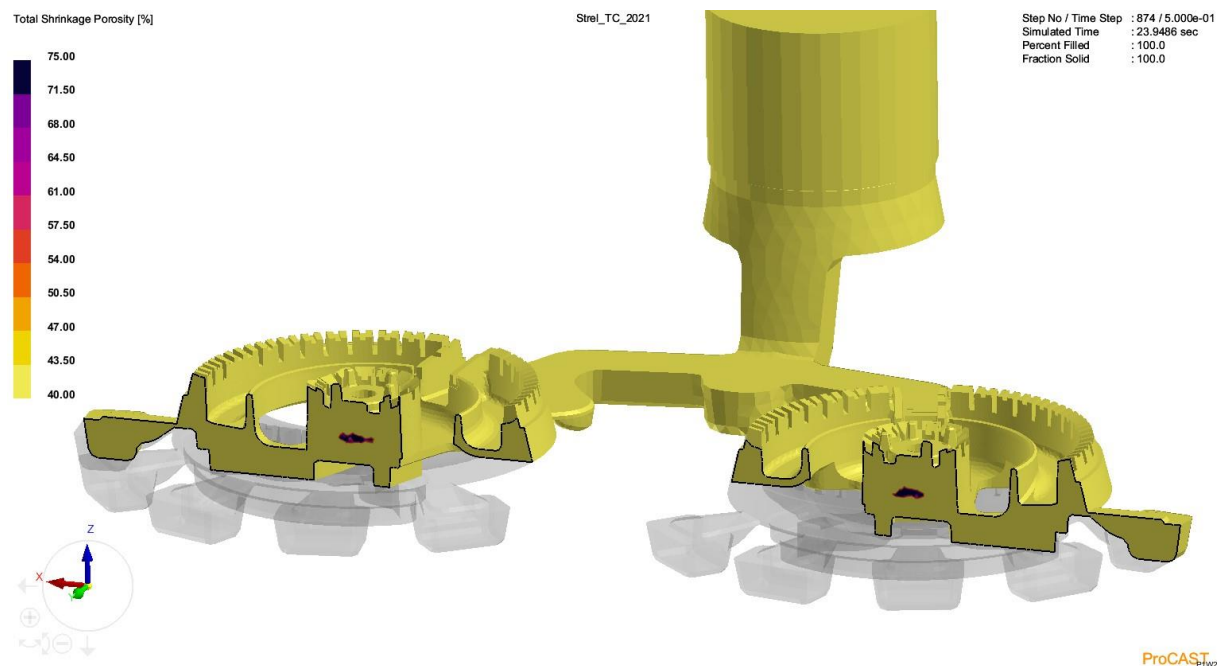
Slika 31. Udio krute faze (10s) 1.- presjek

6.1.2.5. Poroznost skupljanja

Slika 32. prikazuje dobivene rezultate ukupne poroznosti skupljanja za prvu brzinu. Analiza je provedena za vjerojatnosti iznad 75% jer će na tim mjestima skoro pa sigurno doći do poroznosti. Iz rezultata simulacije može se vidjeti da se najviše poroznosti uslijed skupljanja stvara u području oko provrta u sredini odljevka, kao što je i pretpostavljeno u odlomcima 6.1.2.3. i 6.1.2.4. Slika 33. prikazuje dobivene rezultate no prikazan je presjek odljevka kako bi se prikazala poroznost u unutrašnjosti odljevka.



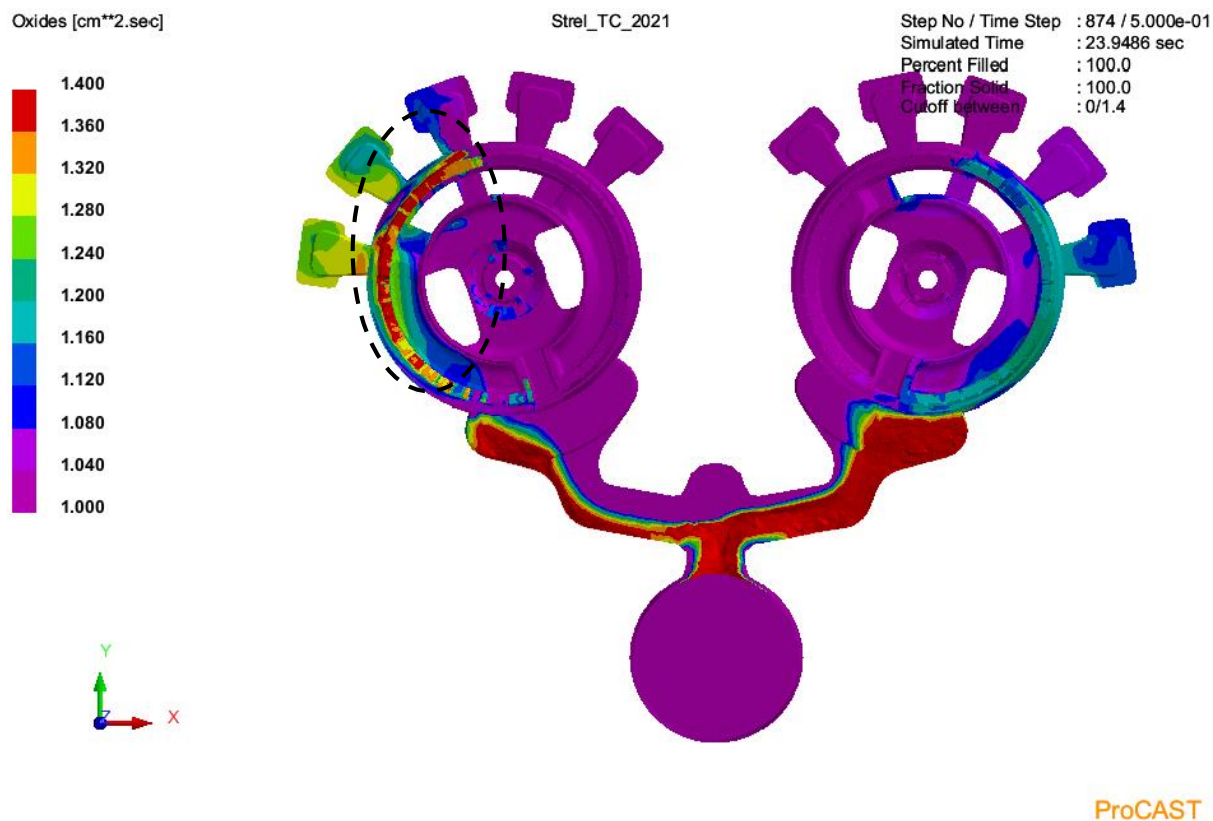
Slika 32. Ukupna poroznost skopljanja 1.



Slika 33. Ukupna poroznost skopljanja 1.- presjek

6.1.2.6. Zarobljeni oksidi

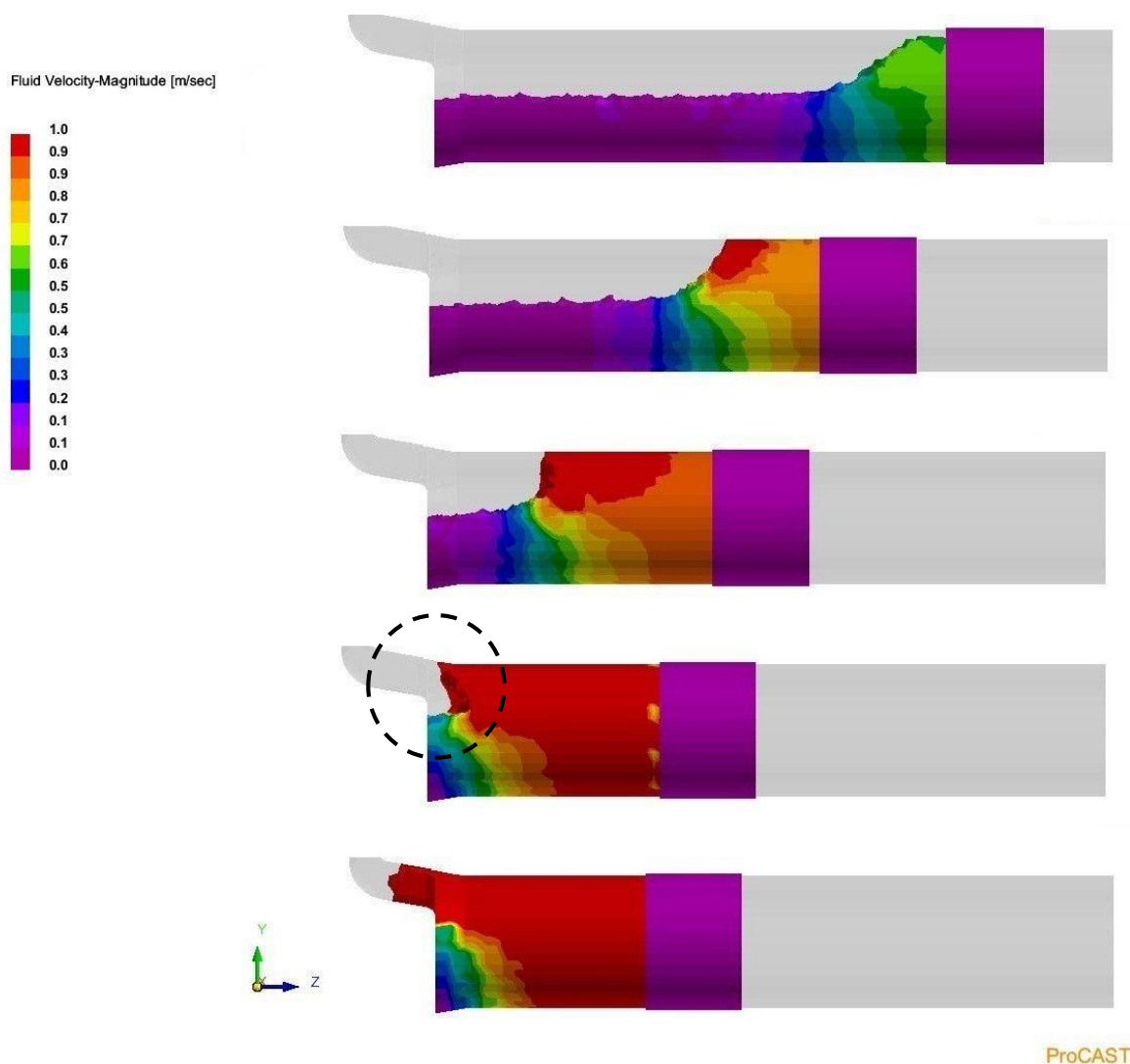
Slika 34. prikazuje rezultate simulacije zarobljenih oksida. Iz slike se može zaključiti da je najveća koncentracija zarobljenih oksida upravo na mjestu koje je dobiveno analizom zarobljenog zraka iz odlomka 6.1.2.2.



Slika 34. Plinska poroznost 1.

6.1.3. Rezultati simulacije za drugu brzinu

U ovoj simulaciji napravljena je promjena brzina u spoj fazi, odnosno u točkama 3, 4, 5, 6. One su uvećane za 200% kako bi dobili val taline i analizirali utjecaj povećanja brzine na rezultate simulacije.

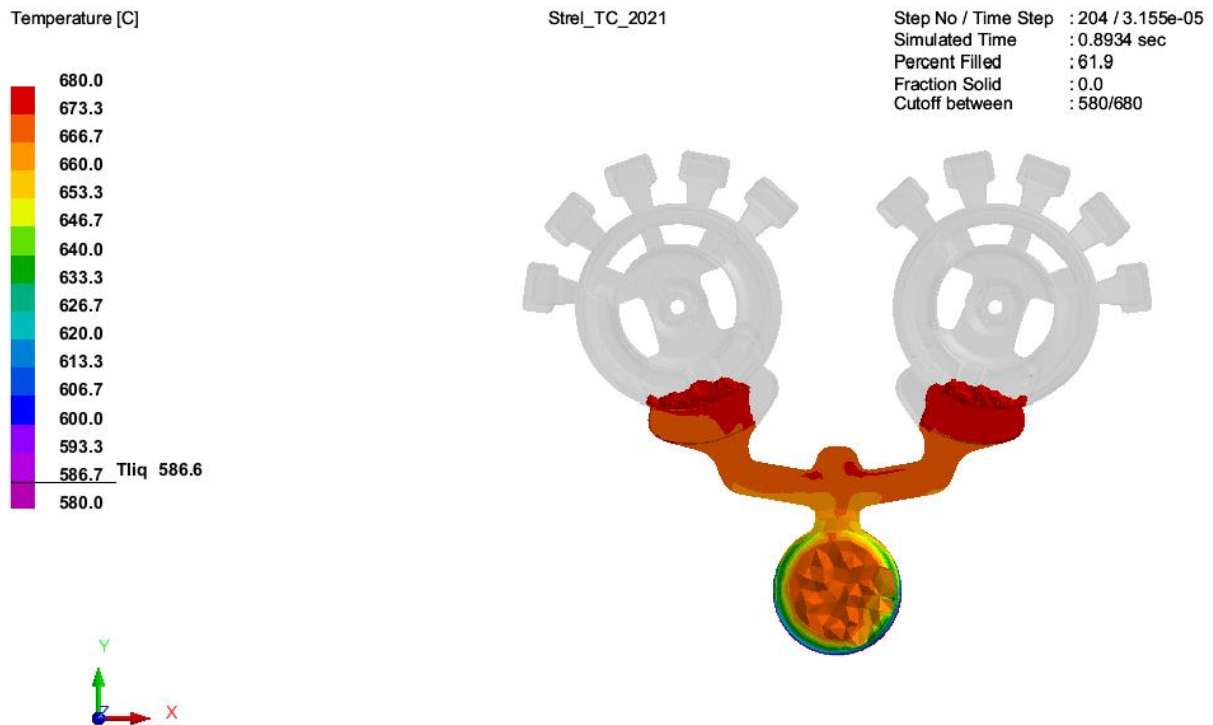


Slika 35. Gibanje tlačnog klipa drugom brzinom

Slika 35. prikazuje gibanje tlačnog klipa i taljevine za drugi slučaj brzine. Iz rezultata je vidljivo kako talina formira val zbog velikih turbulencija te na kraju tlačne komore dolazi do loma vala s kojim se zahvaća zrak.

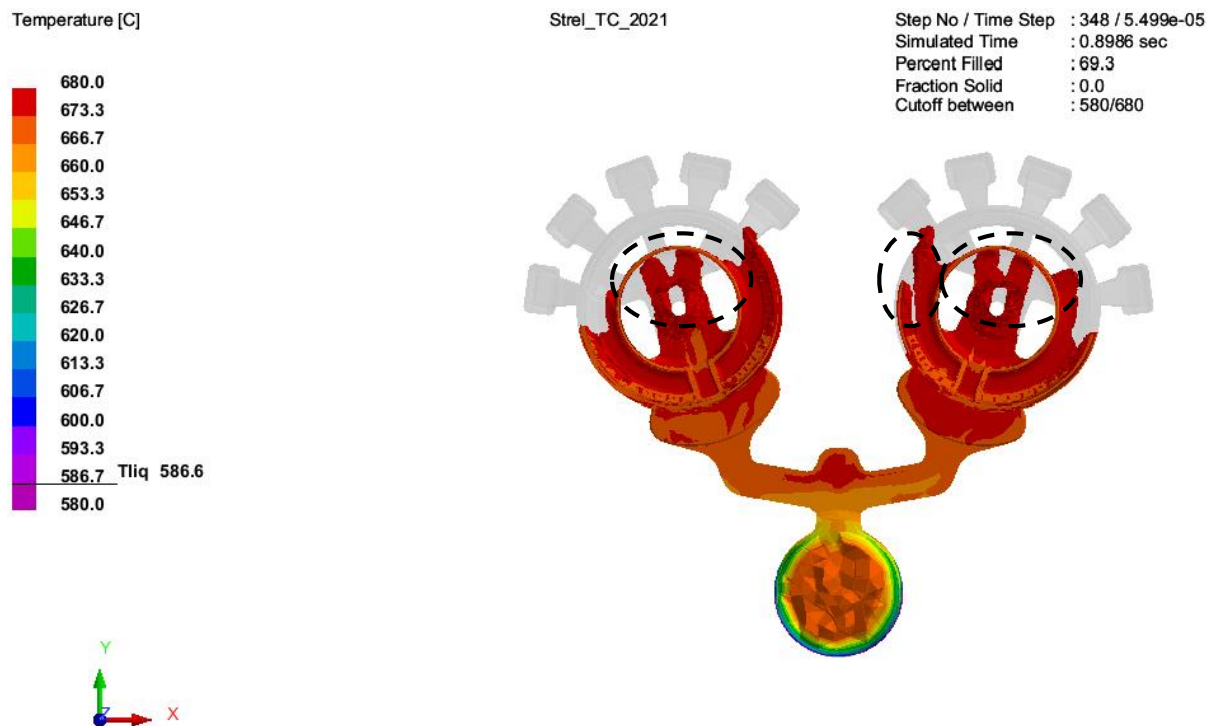
6.1.3.1. Analiza punjenja kalupa

Slike 36., 37. i 38. prikazuju rezultate simulacije punjenja kalupa za drugu brzinu klipa. Iz rezultata je vidljivo da će se pod većom brzinom jako slično popunjavati kalup kao i u prvotnom slučaju. Zbog veće brzine vidno je da će na više mjesta potencijalno doći do zarobljavanja zraka (Slika 37. i 38.). Još jedna od razlika je ta da su temperature taline puno veće od onih u prvom slučaju, a to je upravo zbog duplo veće brzine tlačnog klipa u sporoj fazi.



ProCAST

Slika 36. Prikaz punjenja kalupa pri 61,9% popunjenosti 2.



ProCAST

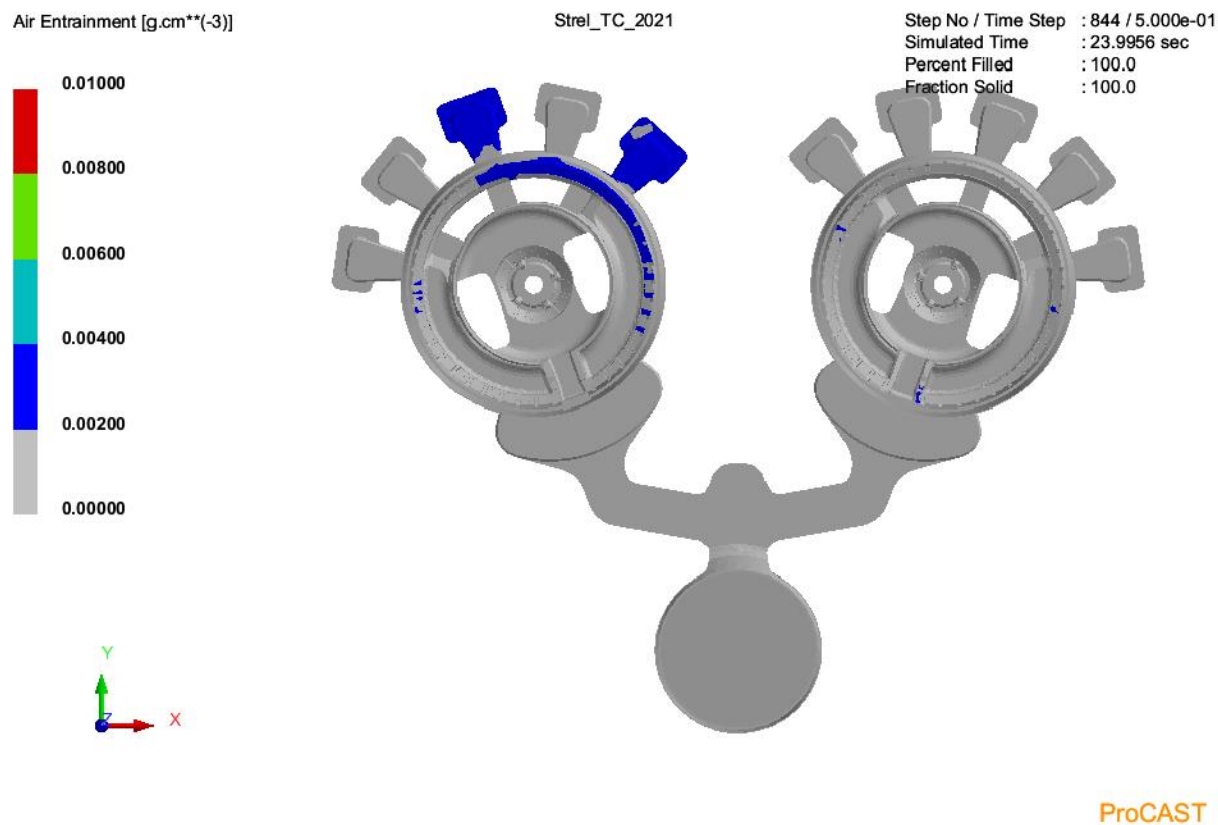
Slika 37. Prikaz punjenja kalupa pri 69,3% popunjenosti 2.



Slika 38. Prikaz punjenja kalupa pri 79,1% ispunjenosti 2.

6.1.3.2. Analiza prisutnosti zraka u kalupu

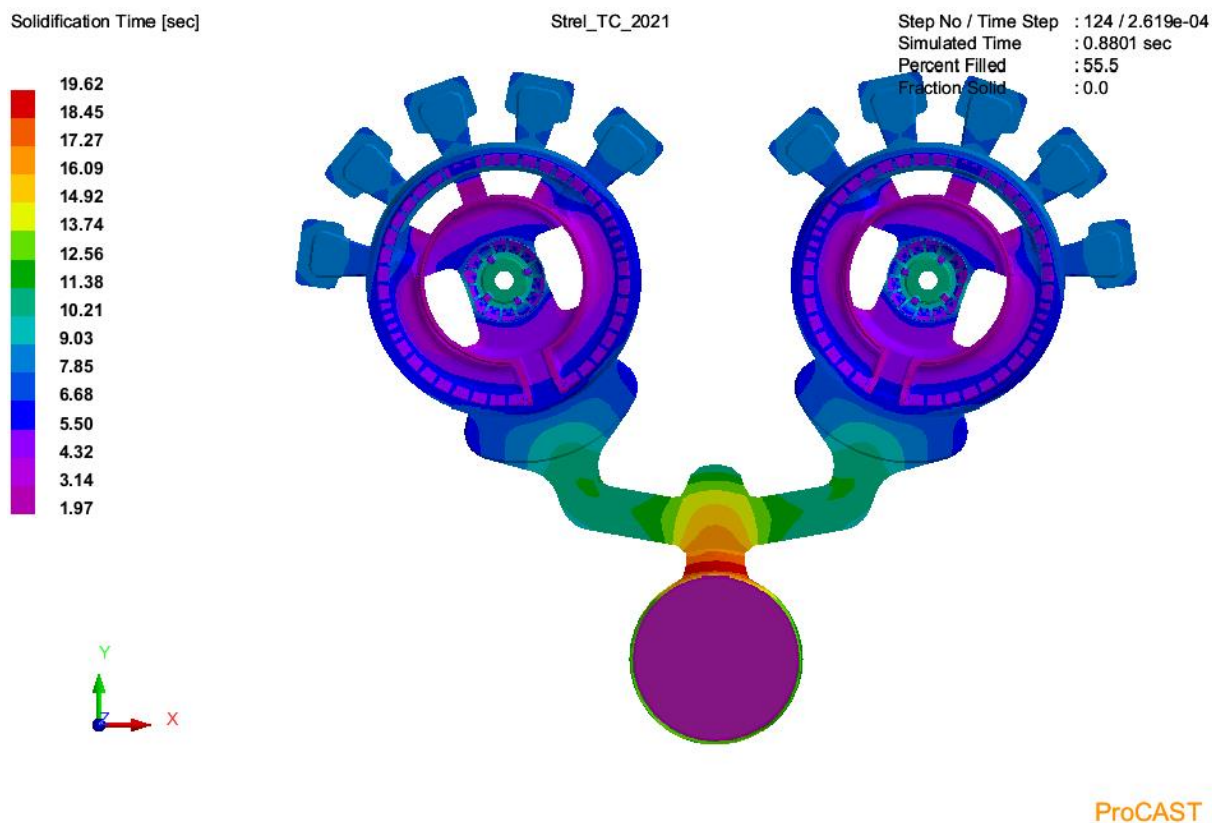
Slika 39. prikazuje količinu zarobljenog zraka unutar kalupne šupljine nakon što se ispuni talinom. Na područjima gdje se vidi da je zrak prisutan može doći do nastajanja plinske poroznosti u odljevku. U usporedbi s prvim slučajem iz odlomka 6.1.2.2. razlika je jer se zarobljeni zrak pojavljuje na drugom mjestu u većoj koncentraciji. Ostatak zraka ide u preljeve koji su i predviđeni za to.



Slika 39. Prikaz zarobljenog zraka u kalupnoj šupljini 2.

6.1.3.3. Vrijeme skrućivanja

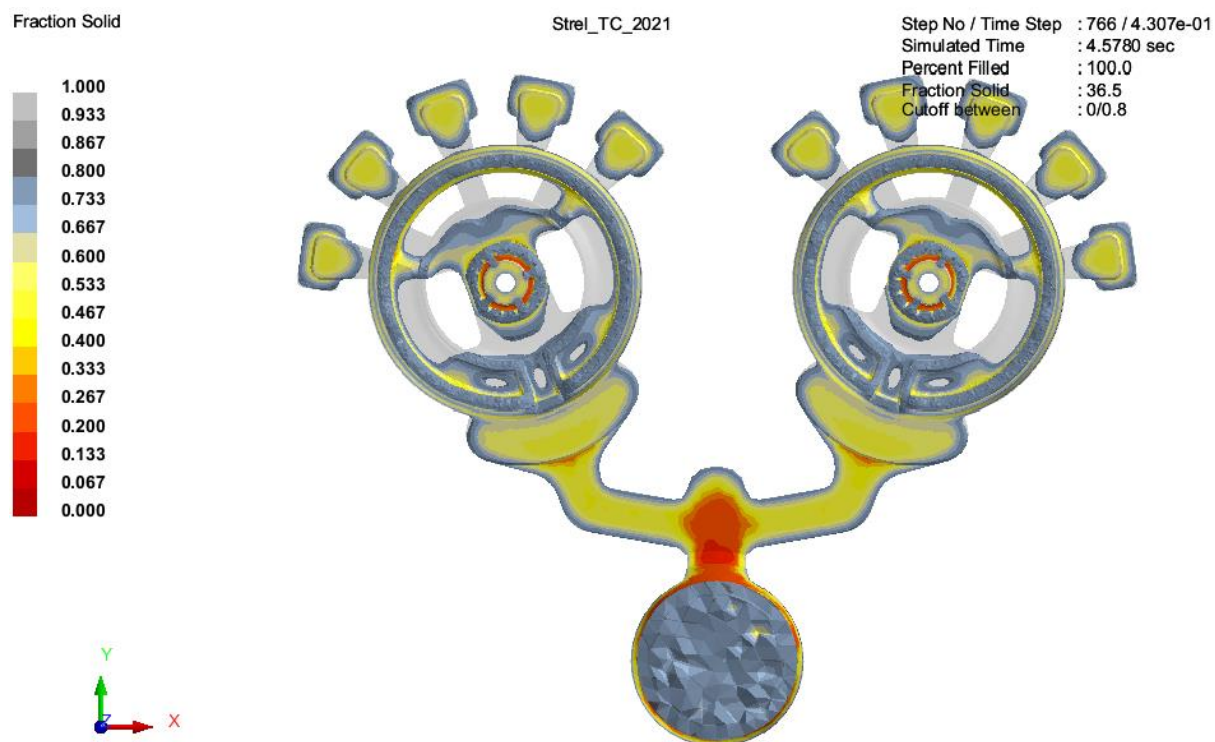
Slika 40. prikazuje vrijeme skrućivanja odljevka za drugu brzinu. Iz rezultata je vidljivo da nemam nikakvih bitnih razlika od prvog slučaja. Potencijalno mjesto nastanka greške je isto, vidjeti odlomak 6.1.2.3.



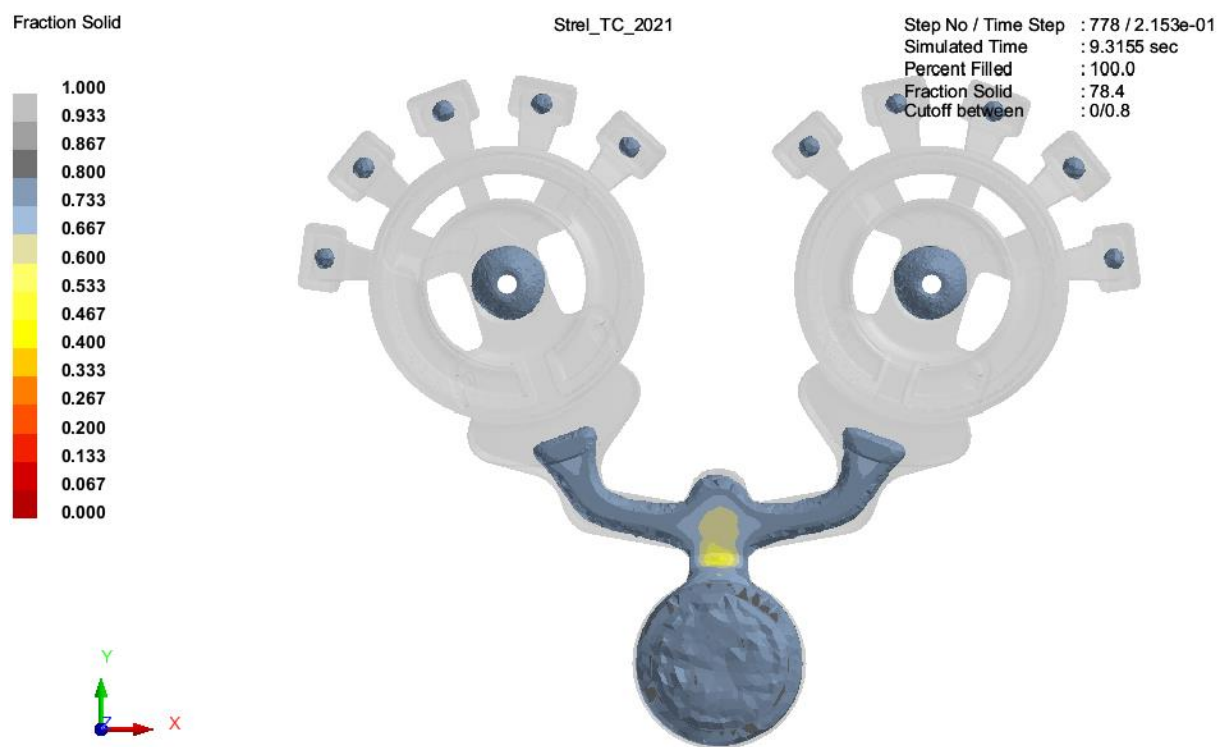
Slika 40. Vrijeme skrućivanja pojedinih dijelova odljevka 2.

6.1.3.4. Udio krute faze

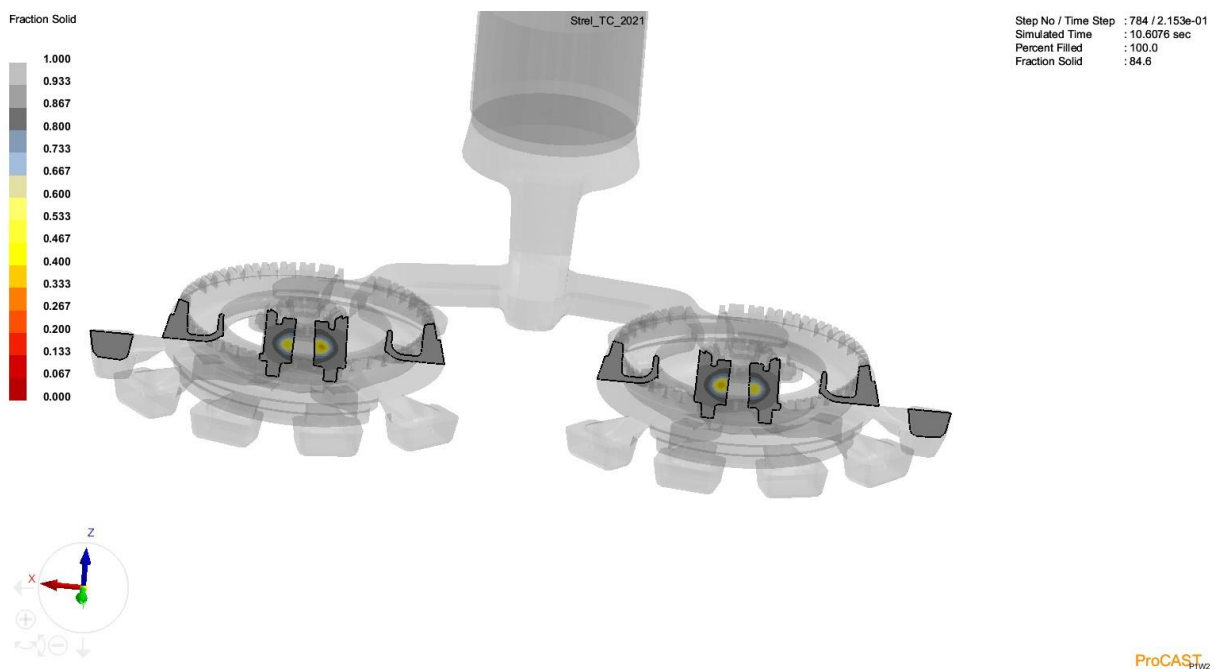
Slike 41., 42. i 43. prikazuju rezultate udjela krute faze druge simulacije. Iz rezultata simulacije vidi se kako također nema nikakvih bitnih razlika, tj. skoro pa su identične snimke iz odlomka 6.1.2.4. Tako da sve što je analizirano u tom odlomku za prvi slučaj vrijedi i za ovaj.



Slika 41. Udio krute faze (4,6 s) 2.



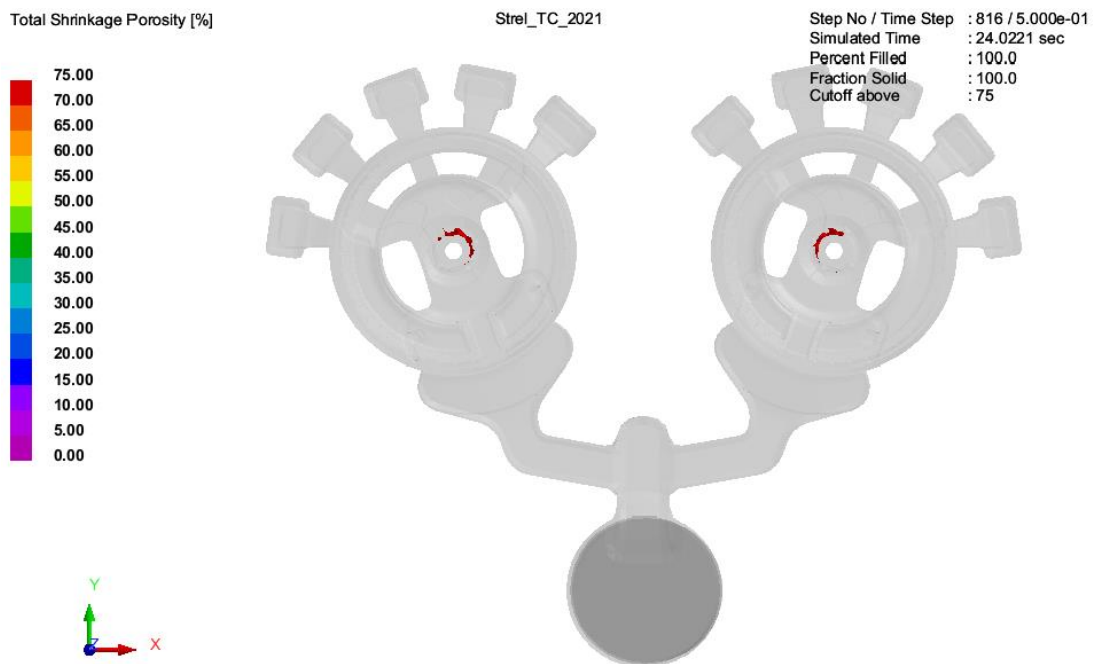
Slika 42. Udio krute faze (9,3 s) 2.



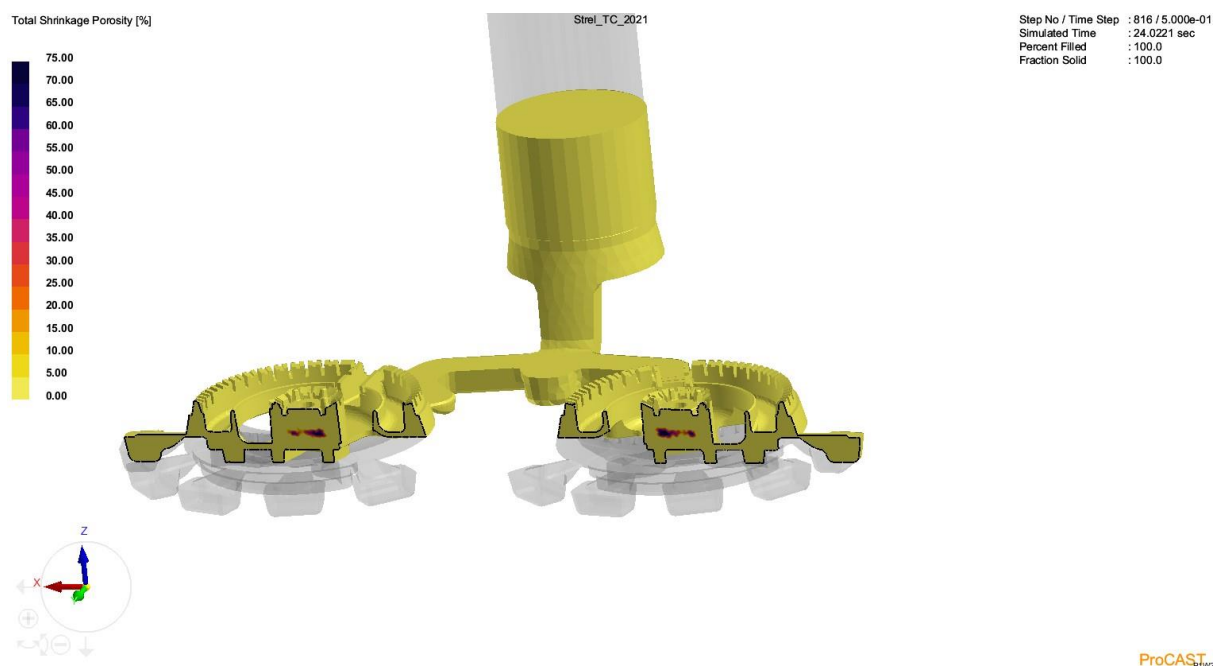
Slika 43. Udio krute faze (10 s) 2.- presjek

6.1.3.5. Poroznost skupljanja

Iz rezultata (Slika 44.) je vidljivo da je poroznost zbog skupljanja ostala praktički ista kao i za prvotni slučaj a to se može vidjeti u odlomku 6.1.2.5



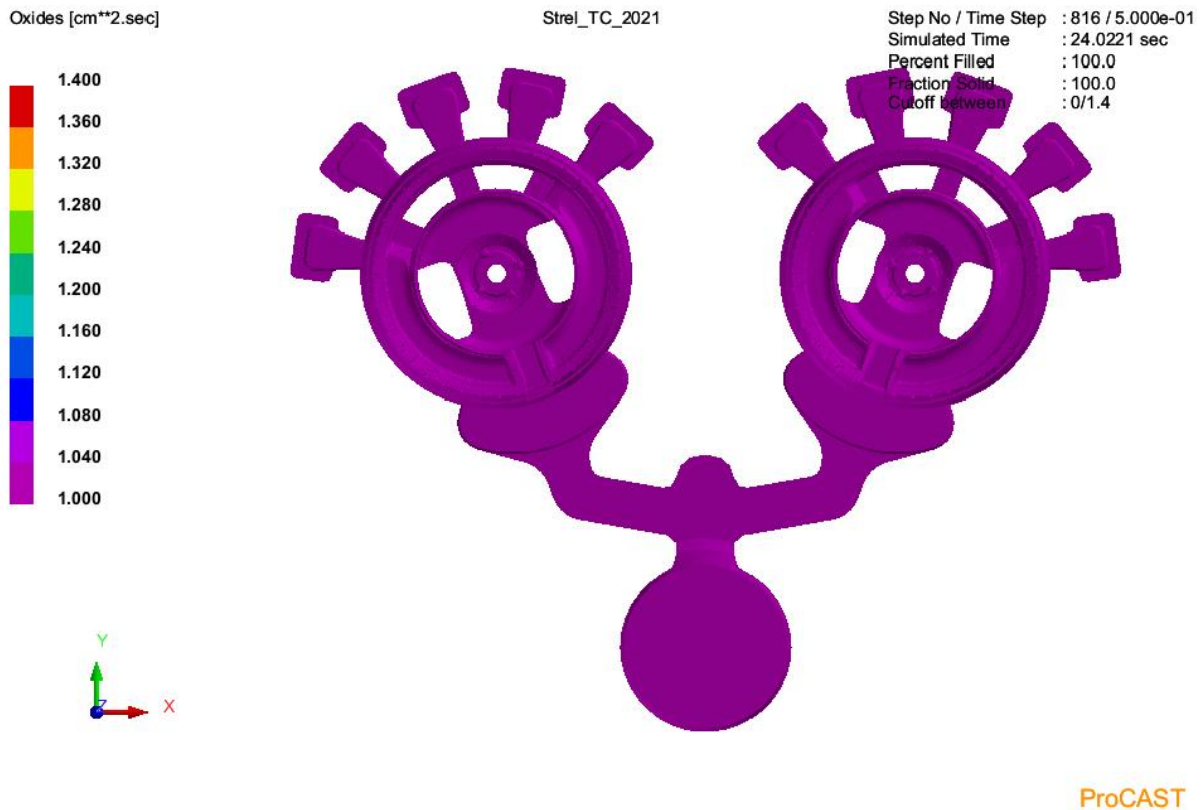
Slika 44. Ukupna poroznost skupljanja 2.



Slika 45. Ukupna poroznost skupljanja 2.- presjek

6.1.3.6. Zarobljeni oksidi

Slika 46. prikazuje rezultate simulacije za količinu zarobljenih oksida unutar odljevka. Iz rezultata je vidljivo kako oksida ima u zanemarivoj količini. Do takve pojave je došlo jer se brzina lijevanja povećala, odnosno brzina tlačnog klipa i to za duplo od početne. Zarobljeni oksidi pri većim brzinama ne dolaze do izražaja jer talina biva u kraćem kontaktu sa zrakom te se oksidi ne stignu razviti.

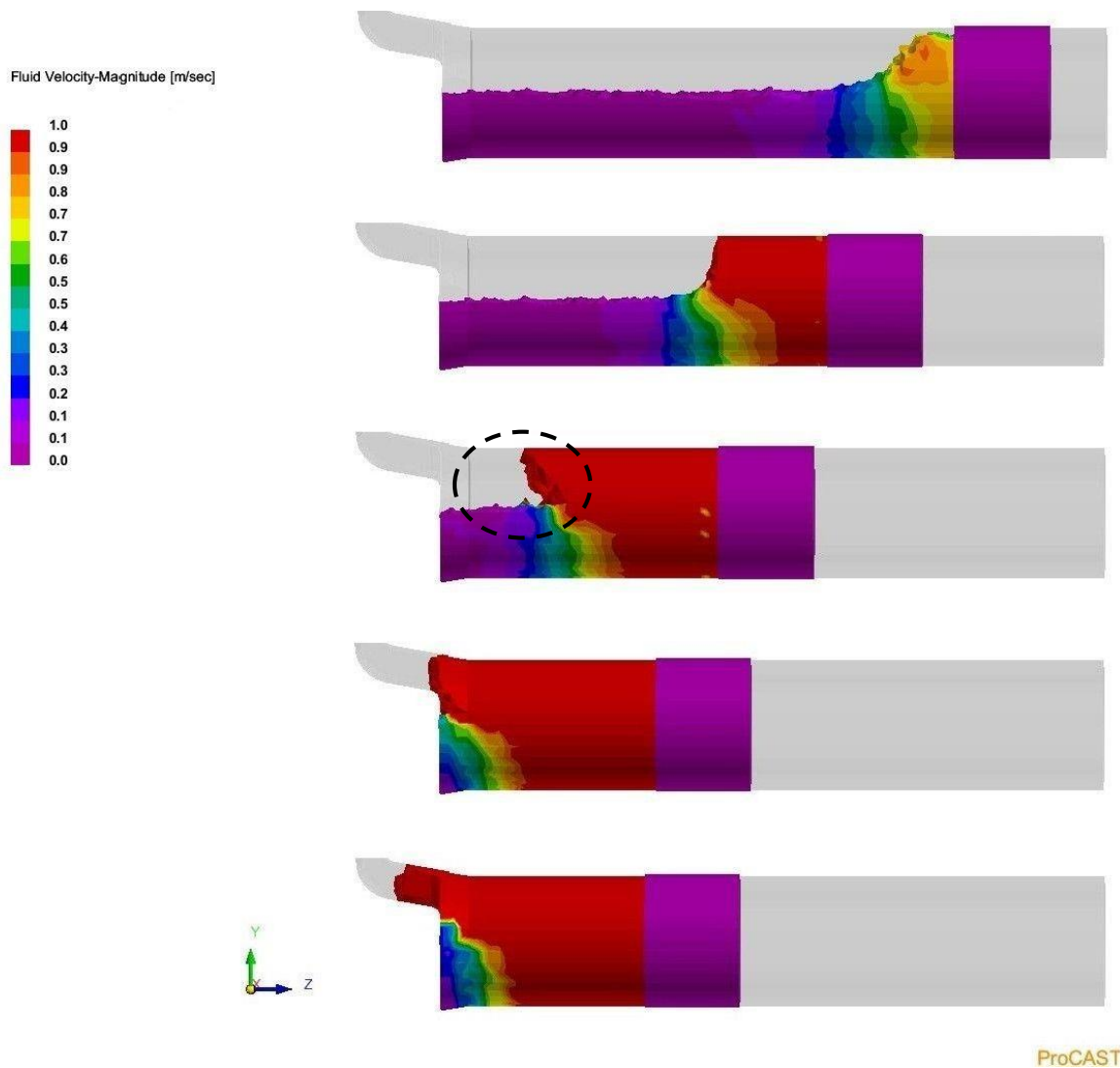


Slika 46. Zarobljeni oksidi 2.

6.1.4. Rezultati simulacije za treću brzinu

Brzine spore faze su u ovom slučaju uvećane za 400% od prvog slučaja, na isti način kao i u odlomku 6.1.3.

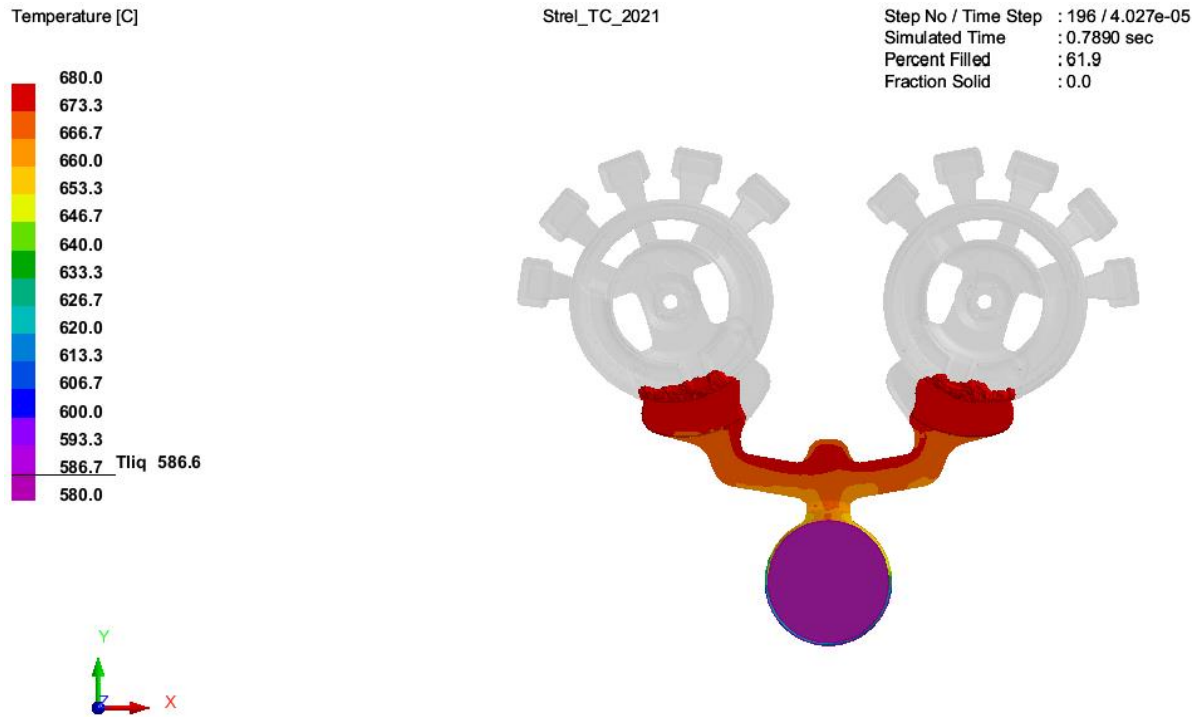
Slika 47. prikazuje gibanje tlačnog klipa trećom brzinom definiranom u ovom odlomku. Vidljivo je da razina talina ima nagli porast unutar tlačne komore. Uz to su turbulencije još veće nego u prethodnom slučaju (odlomak 6.1.3.) te se tako i val formira puno prije i zarobljava veću količinu zraka od prethodnog slučaja, kako je i označeno (Slika 47)



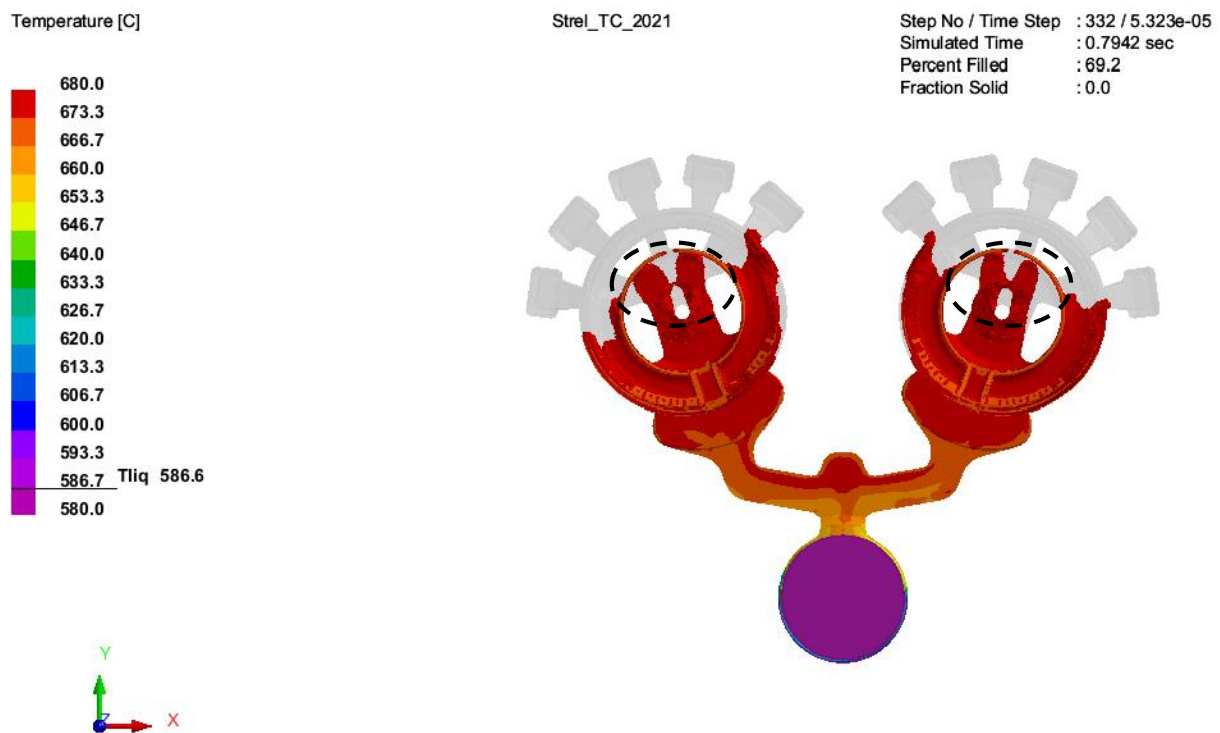
Slika 47. Gibanje tlačnog klipa trećom brzinom

6.1.4.1. Analiza punjenja kalupa za treću brzinu

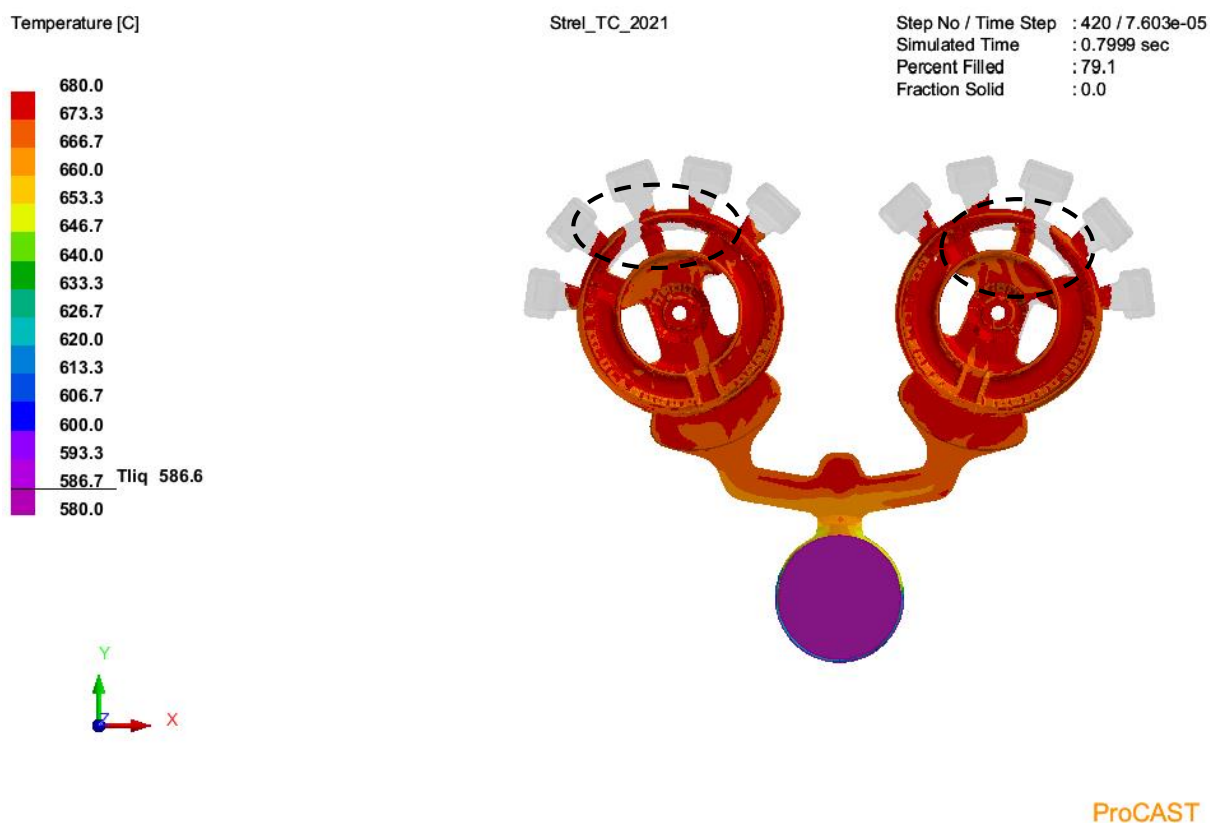
Slike 48., 49. i 50. prikazuju rezultate simulacije punjenja kalupa za treću brzinu. Za ovu simulaciju popunjavanje kalupa je slično kao i u prethodne dvije. Potencijalna označena mjesta na kojima će se zarobiti zrak gotovo su na istim pozicijama kao i za drugi slučaj u odlomku 6.1.3.1.



Slika 48. Prikaz punjenja kalupa pri 61,9% popunjenosti 3.



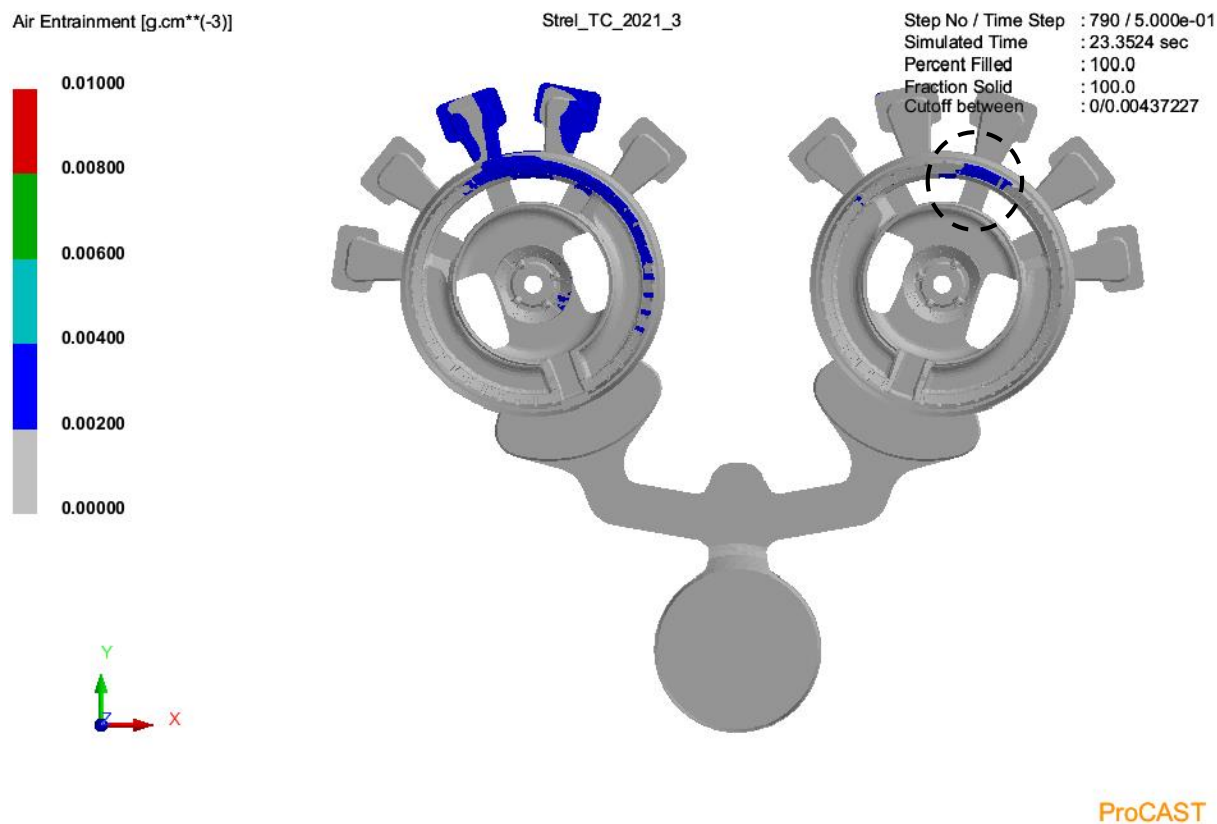
Slika 49. Prikaz punjenja kalupa pri 69,2% popunjenosti 3.



Slika 50. Prikaz punjenja kalupa pri 79,1% popunjenosti 3.

6.1.4.2. Analiza prisutnosti zraka u kalupu

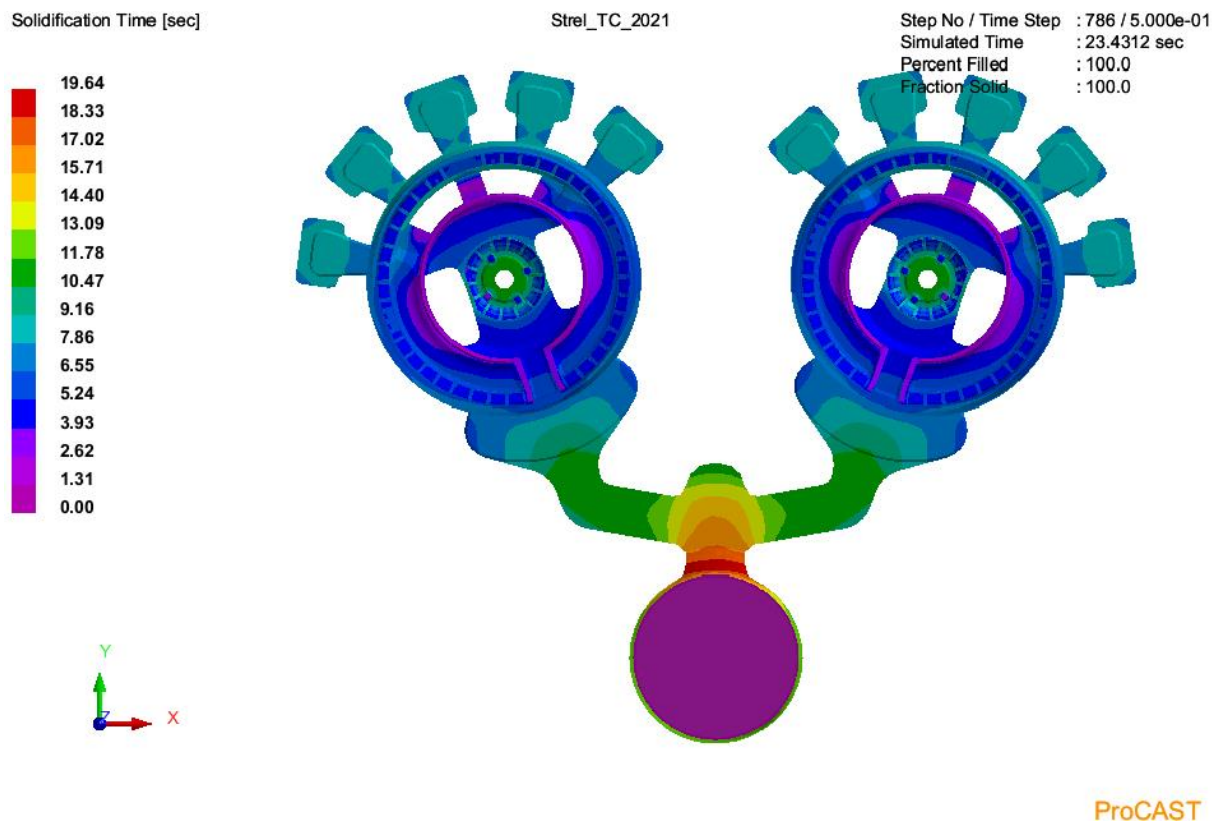
Slika 51. prikazuje količinu zarobljenog zraka unutar kalupne šupljine nakon što se ispuni talinom. Na područjima gdje se vidi da je zrak prisutan može doći do plinske poroznosti u odljevku. U usporedbi s drugim slučajem iz odlomka 6.1.4.2. na lijevom odljevku se vidi veća koncentracija zraka na istom mjestu. No, osim toga može se primijetiti da se pojavljuje na drugom odljevku s desne strane prisutnost zraka (Slika 51).



Slika 51. Prikaz zarobljenog zraka u kalupnoj šupljini 3.

6.1.4.3. Vrijeme skrućivanja

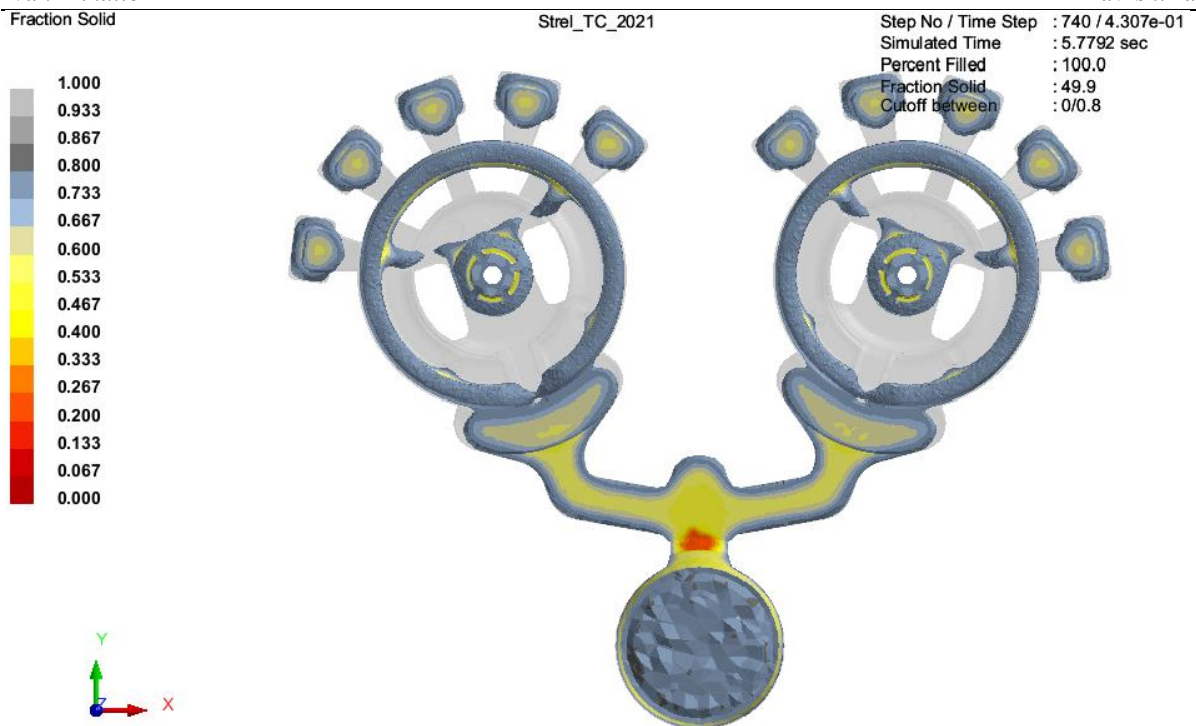
Slika 52. prikazuje vrijeme skrućivanja odljevka za treću brzinu. Iz rezultata je vidljivo da postoji razlika od prvog i drugog slučaja i to u svim područjima odljevka, osim u središtu oko provrta koji nema gotovo primjetne razlike. Upravo taj dio odljevka je bio potencijalno mjesto nastanka greške u prethodna dva slučaja. Stoga će ga se i dalje uzeti u razmatranje kao potencijalno mjesto nastanka greške te će se daljnim analizama u ovom radu utvrditi da li je to mjesto kritično za nastanak pogrešaka unutar odljevka.



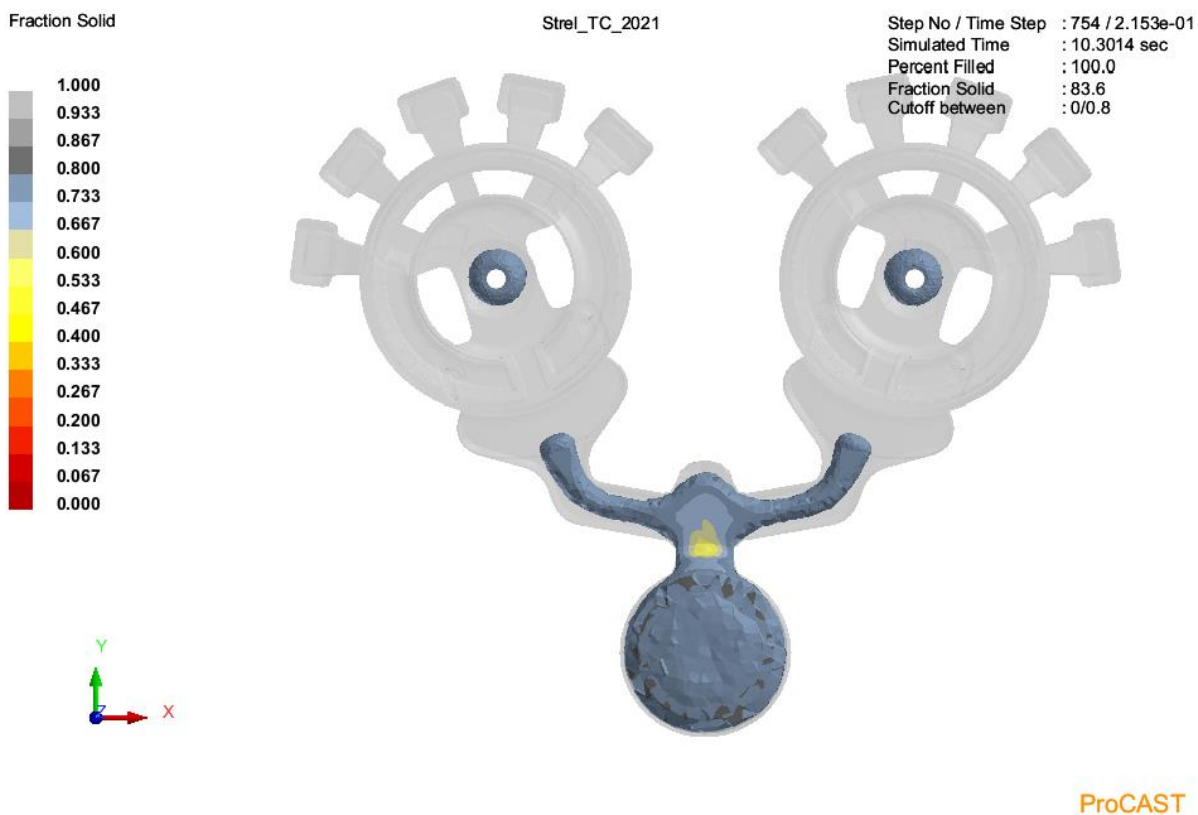
Slika 52. Vrijeme skrućivanja pojedinih dijelova odljevka 3.

6.1.4.4. Udio krute faze

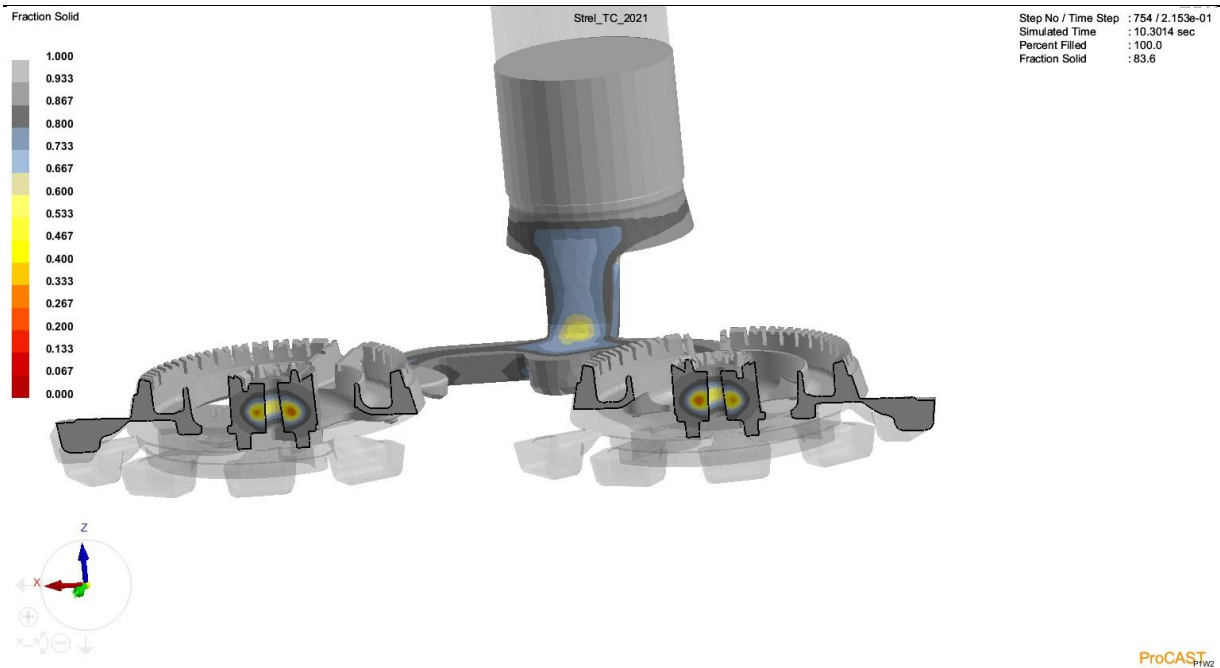
Slika 53., 54. i 55. prikazuju rezultate simulacije udjela krute faze u odljevku. Iz rezultata simulacije se vidi da i dalje neovisno o promjeni vremena skrućivanja, koja je opisana u prethodnom odlomku, imamo krutu fazu oko središnjeg dijela odljevka (Slika 54. i 55.). Takva pojava, kako je već opisano u odlomku 6.1.2.4. ne dopušta protok taline te je velika vjerojatnost da će na tom mjestu doći do poroznosti uslijed skupljanja materijala.



Slika 53. Udio krute faze (5,8 s) 3.



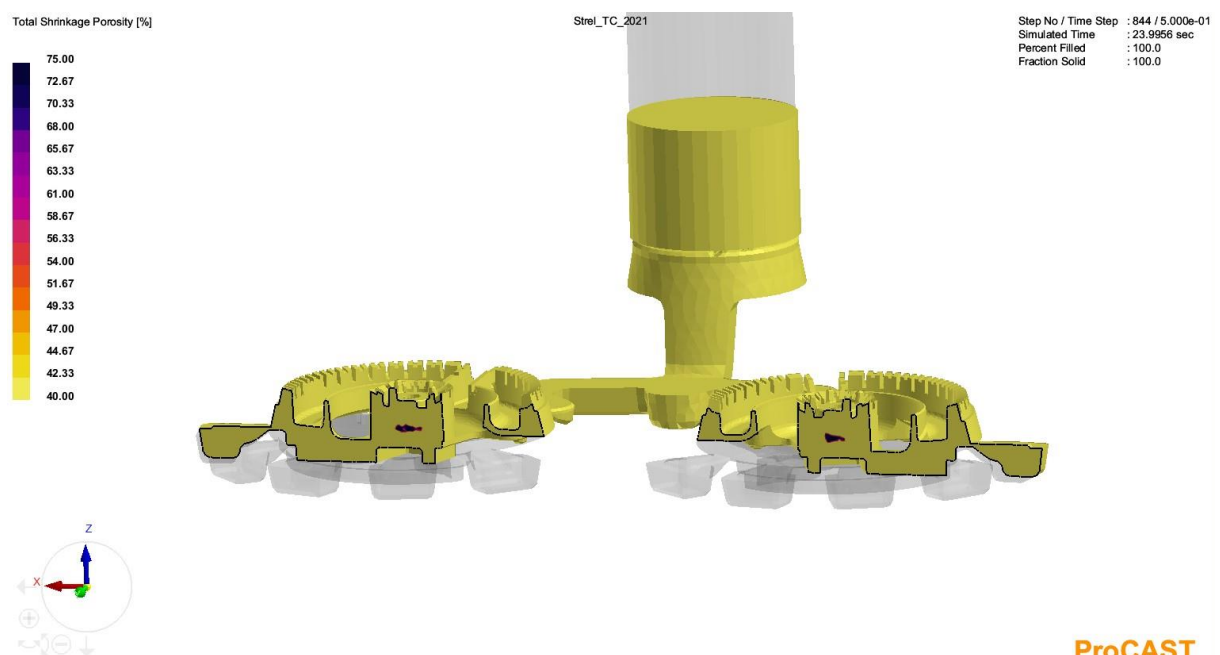
Slika 54. Udio krute faze (10,3 s) 3.



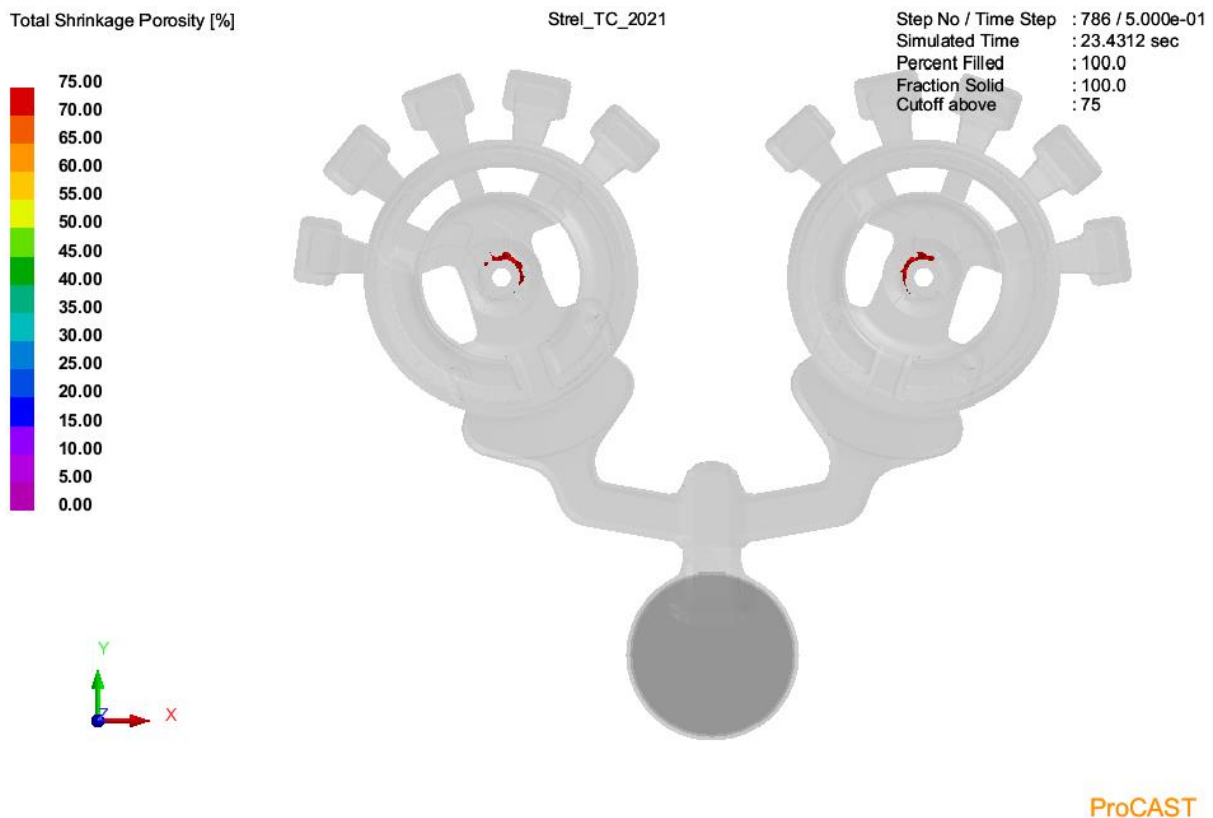
Slika 55. Udio krute faze (10,3 s) 3.- presjek

6.1.4.5. Poroznost skupljanja

Iz rezultata ove simulacije (Slika 56. i 57.) je vidljivo da je poroznost zbog skupljanja ostala praktički ista i također na istom mjestu, kao i za prethodna dva slučaja. To potvrđuje točnost analize u prethodnom odlomku 6.1.4.4.



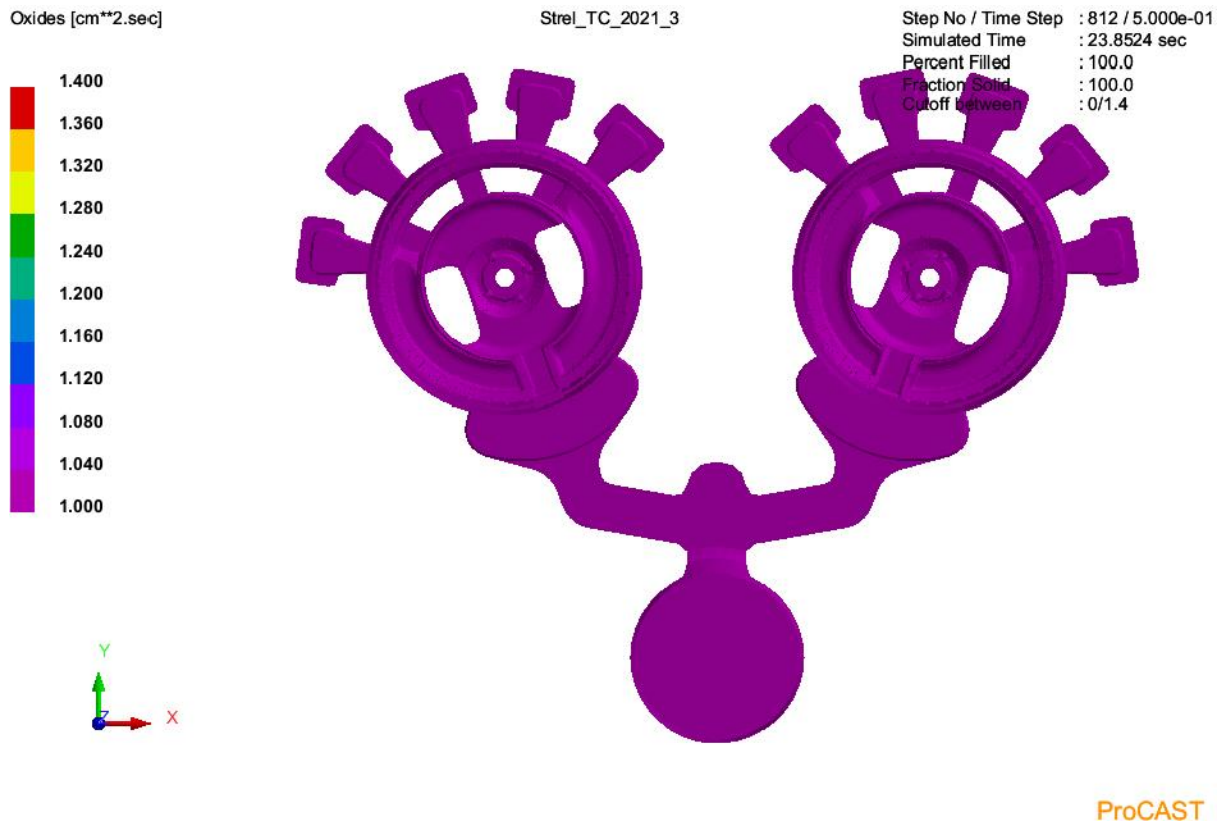
Slika 56. Ukupna poroznost skupljanja 3.- presjek



Slika 57. Ukupna poroznost skupljanja 3.

6.1.4.6. Zarobljeni oksidi

Slika 58. prikazuje rezultate simulacije za količinu zarobljenih oksida unutar odljevka. Rezultati koji su dobiveni su identični onima od simulacije za drugi slučaj brzine. Razlog tomu je naveden već u tom odlomku 6.1.3.6., a to je da velike brzine taline, u ovom slučaju 400% veće od prvotne, uzrokuju pojavu da talina biva u kratkom kontaktu sa zrakom pa se oksidi ne stignu razviti.



Slika 58. Zarobljeni oksidi 3.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu razrađena je tehnologija tlačnog lijeva. Parametri se raspoređuju u 3 faze kretanja klipa, spora, brza i faza držanja tj. povećavanja tlaka. Promatrane su tri faze gibanja klipa. Podešavanjem brzina kretanja klipa može se izbjeći zarobljavanje zraka, te s time i smanjiti količina plinske poroznosti u odljevku.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada za zadani odljevak napravljene su tri simulacije s različitim brzinama klipa u sporoj fazi. Prva simulacija napravljena je sa prethodno optimiranom brzinom klipa u sporoj fazi. U drugoj simulaciji dvostruko je povećana brzina klipa, a u trećoj četverostruko. Kod sve tri simulacije analizirano je ponašanje taline u tlačnoj komori pri kretanju klipa, punjenje kalupa, prisutnost zraka u kalupnoj šupljini, vrijeme skrućivanja, udio krute faze, poroznost skupljanja te na kraju zarobljeni oksidi. Iz provedenih analiza može se zaključiti:

- povećanjem brzine izaziva se stvaranje vala taline i time zarobljavanje zraka u tlačnoj komori
- zarobljavanjem zraka u tlačnoj komori rezultira povećanjem udjela prisutnosti zraka u kalupnoj šupljini što uzrokuje veću pojavu plinske poroznosti u odljevku
- zarobljeni oksidi su prisutni pri prvom optimiziranom slučaju, a razlog tomu je što talina pri nižim brzinama biva u duljem kontaktu sa zrakom te može stvoriti više oksida.

Stoga se može zaključiti da povećanje brzine tlačnog klipa rezultira većom plinskom poroznošću, dok na poroznost skupljanja nema značajan utjecaj. Može se uočiti poboljšanje kod zarobljenih oksida.

8. LITERATURA

- [1] Bauer, B., Mihalic Pokopec, I.: Osnove tehnologije lijevanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [2] Bauer, B., Mihalic Pokopec, I.: Ljevarstvo, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3] Grupa autora: ASM Handbook: Volume 15 Casting, ASM International, 2008.
- [4] Budić, I.: Posebni ljevački postupci II. dio, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2009.
- [5] 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.
- [6] *Ductile Aluminium Alloys for Automotive Structural Applications*, https://rheinfelden-alloys.eu/wp-content/uploads/2015/04/Handbook-Alloys-for-Structural-Applications_RHEINFELDEN-ALLOYS_2017_EN.pdf, 12.1.2022.
- [7] Advekar, A., Arunkumar, Y., Srinath, M.S.: Simulation of High Pressure Die Casting Process for Identifying and Minimising Defects, International Journal of Engineering Research & Technology, 2015.; ISSN: 2278-0181, p. 1-9
- [8] Vončina, M., Močnik, N., Nagode, A., Stoić, A., Bizjak M.: DEPENDENCE OF MECHANICAL PROPERTIES ON Cu CONTENT IN AlSi9Cu3(Fe) ALLOY, Tehnički vjesnik 24, 2017.; doi. 10.17559/TV-20140922143741, p. 1-3.
- [9] Tišljarić, K.: Simulacija tlačnog lijevanja odljevka od Al legure, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [10] <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/hard-spots-3860/?cHash=9ecee71d0bc564a5f0dac6ae8396e8b6>, 10.02.2022.