

# Analiza poroznosti tlačno lijevanih odljevaka od aluminijske legure

---

**Colić, Manuel**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:136915>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Manuel Colić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Manuel Colić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci tijekom studija.

Manuel Colić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Urbroj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Manuel Colić** JMBAG: 0035210659

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza poroznosti tlačno lijevanih odljevaka od aluminijevih legura**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of shrinkage porosity in die-cast aluminium alloy castings**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je opisati tehnologiju tlačnog lijevanja i prikupiti podatke o konstrukciji i izradi kalupa za lijevanje aluminijevih legura. Proučiti parametre lijevanja i njihov utjecaj na pojavu poroznosti.

Za zadani odljevak od aluminijeve legure, potrebno je analizirati konstrukciju kalupa s uljevnim sustavom te parametre lijevanja. Analizirati pojavu poroznosti skupljanja u dobivenom odljevku. Optimirati parametre lijevanja i konstrukciju kalupa. Usporediti dobivene odljevske prije i nakon optimizacije parametara lijevanja.

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

Zadatak izdan:

7. ožujka 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

Datum predaje rada:

9. svibnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

13. - 17. svibnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Željka Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. VISOKOTLAČNO LIJEVANJE .....	4
2.1. Visokotlačno lijevanje s toplom komorom [2,6,7] .....	4
2.2. Visokotlačno lijevanje s hladnom komorom [2,6,8,9] .....	8
2.3. Kalupi za tlačni lijev .....	11
2.4. Sila zatvaranja kalupa .....	14
2.5. Dijagram i parametri visokotlačnog lijevanja .....	15
2.6. Nedostaci visokotlačnog lijeva .....	23
3. LEGURE METALA ZA LIJEVANJE POD TLAKOM I PRIPREMA ZA LIJEVANJE .....	24
3.1. Legure AlSi .....	25
3.2. Legure cinka .....	27
3.3. Legure bakra .....	28
3.4. Priprema legura za lijevanje .....	28
4. POGREŠKE NA ODLJEVCIMA .....	32
4.1. Plinska poroznost .....	32
4.2. Poroznost skupljanja .....	33
4.3. Nedolivenost .....	34
4.4. Pukotine na kalupu i odljevku .....	35
4.5. Srh .....	37
4.6. Dimenzijska odstupanja .....	38
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	40
5.1. Pozicija 624.15 i funkcija komada .....	41
5.2. Alat i stroj pozicije 624.15 .....	44
5.3. Proračun tlačnog lijeva i postavljanje parametara lijevanja .....	48

---

5.4. Optimiranje procesa u svrhu smanjenja poroznosti unutar komada .....	54
5.4.1. Promjena parametara.....	55
5.4.2. Simulacija lijevanja.....	56
5.4.3. Promjena konstrukcije alata .....	61
5.4.4. Ponovno lijevanje nakon promjene konstrukcije alata .....	63
6. ZAKLJUČAK.....	66
LITERATURA.....	67
PRILOZI .....	69

## POPIS SLIKA

Slika 1 Podjela postupaka lijevanja [2] .....	2
Slika 2 Držač kompresora klima uređaja [3] .....	3
Slika 3 Dijelovi motora automobila dobivenim tlačnim lijevanjem [4] .....	3
Slika 4 Stroj za visokotlačno lijevanje s toplom komorom [6] .....	5
Slika 5 Talina u tlačnoj komori prije udarca klipa [6] .....	6
Slika 6 Talina u kalupnoj šupljini nakon udarca klipa [6] .....	6
Slika 7 Vađenje odljevka iz kalupne šupljine [6] .....	7
Slika 8 Stroj za visokotlačno lijevanje s hladnom komorom [6] .....	9
Slika 9 Kalup, tlačna komora i klip prije ulijevanja taline u tlačnu komoru [6] .....	9
Slika 10 Kalup, tlačna komora i klip nakon udarca [6] .....	10
Slika 11 Pokretna strana kalupa [10] .....	12
Slika 12 Nepokretna strana kalupa [10] .....	12
Slika 13 Sile i tlakovi u zatvorenom tlačnom alatu [8] .....	15
Slika 14 Dijagram lijevanja s označenim fazama [10] .....	16
Slika 15 Prikaz puta taline u prvoj fazi lijevanja [6] .....	16
Slika 16 Laminarno (lijevo) i turbulentno (desno) strujanje taline u tlačnoj komori [10] .....	17
Slika 17 Prikaz puta taline u drugoj fazi lijevanja [6] .....	18
Slika 18 Vrijeme punjenja kalupa talinom (druga faza lijevanja) [10] .....	18
Slika 19 Realni dijagram lijevanja (na tlačnom stroju Bühler) [10] .....	22
Slika 20 Odabir legure za tlačno lijevanje [12] .....	25
Slika 21 Nagibna plinska peć za taljenje aluminija (Striko Westofen) [17] .....	30
Slika 22 Postupak otplinjavanja taline [10] .....	31
Slika 23 Plinska poroznost na odljevku (lijevo) i na RTG slici (desno) .....	33
Slika 24 Poroznost skupljanja na odljevku (lijevo) i na RTG slici (desno) .....	34
Slika 25 Nedolivenost na odljevku .....	35
Slika 26 Pukotine na kalupu .....	36
Slika 27 Topla pukotina na odljevku .....	37
Slika 28 Srh na odljevku .....	38
Slika 29 ATOS mjerenje odljevka i prikaz dimenzijskog odstupanja .....	39
Slika 30 Pozicija 624.15 u motoru automobila .....	42



---

Slika 31 Bregasta vratila i glava motora.....	43
Slika 32 Koljenasto vratilo [23] .....	43
Slika 33 Model pokretne strane alata pozicije 624.15 .....	45
Slika 34 Model nepokretne strane alata pozicije 624.15 .....	46
Slika 35 Alat pozicije 624.15 .....	47
Slika 36 Stroj Bühler Ecoline [24] .....	47
Slika 37 Dijagram lijevanja za poziciju 624.15 .....	49
Slika 38 Parametri lijevanja prije optimiranja .....	50
Slika 39 'Fill test' – tlačna komora s puno zarobljenog zraka.....	51
Slika 40 Ponovljeni 'Fill test' – tlačna komora bez zarobljenog zraka.....	51
Slika 41 Parametri nakon optimiranja 1. faze lijevanja.....	52
Slika 42 Plinska poroznost i poroznost skupljanja pozicije 624.15 (RTG).....	53
Slika 43 Poroznost na komadima pozicije 624.15 nakon obrade.....	54
Slika 44 RTG slika poroznosti nakon optimiranja parametara (bez poboljšanja) .....	56
Slika 45 Brzina taline kada je kalup napunjen 40% (lijevo) i 50% (desno) .....	57
Slika 46 Brzina taline kada je kalup napunjen 60% (lijevo) i 70% (desno) .....	58
Slika 47 Brzina taline kada je kalup napunjen 80% (lijevo) i 100% (desno) .....	58
Slika 48 Popunjenost taline u kalupu 20% (lijevo) i 40% (desno).....	59
Slika 49 Popunjenost taline u kalupu 60% (lijevo) i 80% (desno).....	60
Slika 50 Popunjenost taline u kalupu 90% (lijevo) i 100% (desno).....	60
Slika 51 Poroznost na simulaciji (lijevo) i zaokružena mjesta poroznosti na modelu (desno).61	
Slika 52 Prijedlog promjene konstrukcije alata .....	62
Slika 53 Promjena konstrukcije alata (pokretna strana) .....	62
Slika 54 Promjena konstrukcije alata (nepokretna strana) .....	63
Slika 55 Parametri nakon optimizacije .....	64
Slika 56 RTG slike nakon optimizacije .....	64
Slika 57 Proces optimiranja pozicije 624.15.....	65

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Preporučeni tlak 3. faze ovisno o funkciji odljevka [10] .....	20
--	----

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_o$	N	Sila otvaranja alata
$F_z$	N	Sila zatvaranja alata
$A_p$	m <sup>2</sup>	Projicirana površina odljevka
$A$	m <sup>2</sup>	Maksimalna projicirana površina odljevka
$P_t$	Pa	Specifični (lijevni) tlak
$F$	N	Sila lijevanja
$A_k$	m <sup>2</sup>	Površina poprečnog presjeka klipa za lijevanje
$v_k$	ms <sup>-1</sup>	Brzina klipa za lijevanje
$A_u$	m <sup>2</sup>	Poprečni presjek ušća
$\rho$	kgm <sup>-3</sup>	Gustoća taline
$h_u$	m	Visina taline u ušću
$h_k$	m	Visina taline u tlačnoj komori
$p_u$	Pa	Tlak taline u ušću
$p_k$	Pa	Tlak taline u tlačnoj komori
$\eta$	-	Koeficijent učinka taline obzirom na otpor strujanju
$Q_n$	kJ	Odvedena toplina kod jednog ulijevanja u kalup
$m$	kg	Masa odljevka s uljevnim sustavom
$c$	kJ/(kgK)	Srednja vrijednost specifične topline
$\Delta t$	K	Razlika temperature ulijevanja i temperature odljevka pri izbacivanju
$C$	kJ/kg	Toplina taljenja lijeva
$Q$	kJ/h	Količina topline koju kalup odvodi po satu
$k$	kJ/(mhK)	Toplinska provodljivost
$A_1$	m <sup>2</sup>	Površina okomita na toplinski tok
$\Delta t_A$	K	Razlika temperatura kalupne šupljine i vanjske površine kalupa
$L$	m	Ukupna debljina obje polovice kalupa

## SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je analiza poroznosti tlačno lijevanih odljevaka od legure aluminija. Rad se sastoji od teoretskog i eksperimentalnog dijela.

U teoretskom dijelu ukratko je opisano visokotlačno lijevanje i njegove komponente – proces lijevanja, strojevi za tlačni lijev, kalupi (alati) za lijevanje, parametri tlačnog lijeva, prednosti i nedostaci te još neke bitne karakteristike koje se tiču visokotlačnog lijeva. Nakon toga, dan je pregled najčešćih legura aluminija od koji se rade odljevci prvenstveno za automobilsku industriju te su opisana svojstva svake od legura. Na kraju teoretskog dijela opisane su greške na odljercima s kojima se najčešće susreće u lijevaonicama te je opisano kako prepoznati grešku i korigirati proces kako bi greška nestala.

Eksperimentalni dio rada uključuje optimiranje jedne pozicije (odljevka) koja ima problem s poroznosti. Optimiranje je napravljeno tijekom studentske prakse u firmi LTH Metalni Lijev d.o.o. u Benkovcu. Problem je rješavan kroz nekoliko koraka koji uključuju optimiranje parametara lijevanja na stroju za tlačno lijevanje, izradu simulacija i promjenu konstrukcije alata. Na kraju su dobiveni komadi s puno manje poroznosti. Cijeli proces optimizacije napravljen je onako kako se u praksi rješava problem i postupak je detaljno opisan u eksperimentalnom dijelu ovog rada.

Ključne riječi: visokotlačni lijev, legure aluminija, optimiranje parametara lijevanja

## **SUMMARY**

The topic of this thesis is the porosity analysis of die-cast aluminum alloy castings. The paper consists of a theoretical and an experimental part.

In the theoretical part, high-pressure die casting (HPDC) and its components were briefly described - the casting process, die-casting machines, molds (tools) for casting, die parameters, advantages and disadvantages high-pressure die casting process. After that, an overview of the most common aluminum alloys from which castings are made primarily for the automotive industry was given, and the properties of each alloy were described. At the end of the theoretical part, the common die casting defects were described, along with methods for identifying and rectifying them to eliminate the errors.

The experimental part of the work includes the optimization of one position (casting) that has a porosity problem. The optimization was made during the student internship at the company LTH Metalni Lijev d.o.o. in Benkovac. The problem was solved through several steps, which include optimization of the casting parameters on the die casting machine, creating a simulation and changing the construction of the tool. In the end, castings with much less porosity were obtained. The entire optimization process was done how the problem is solved in practice and the procedure was described in detail in the experimental part of this paper.

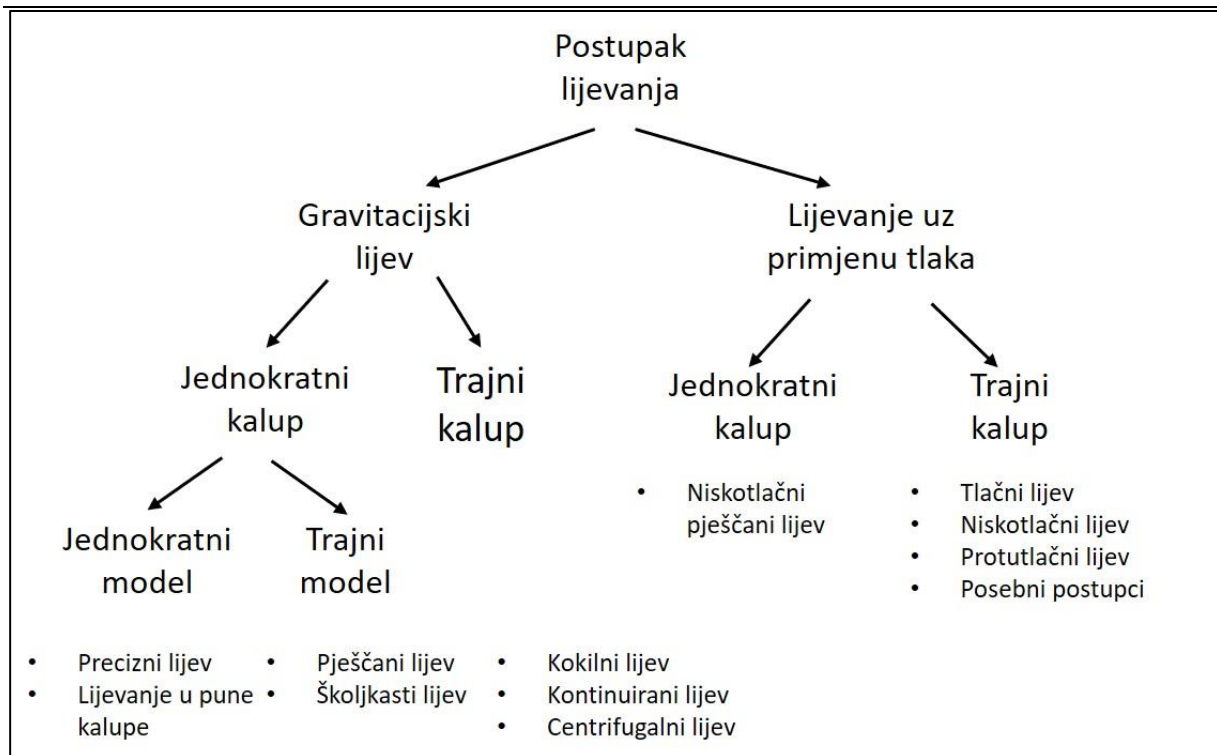
Key words: High-pressure die cast (HPDC), aluminum alloys, HPDC parameters optimization

## 1. UVOD

Lijevanje (odnosno ljevarstvo) jest tehnologija oblikovanja metalnih predmeta ulijevanjem rastaljenog metala u kalupe kako bi se dobio konačan proizvod (odljevak). Lijevanjem se nazivaju svi postupci kojima se od sirovine dobije gotov odljevak. Dobiveni odljevak može imati vrlo složeni oblik, za čiju izradu bi inače trebalo više komada spojiti u sklop, odnosno lijevanjem je moguće znatno pojednostavniti konstrukciju. Također, lijevanje jest najekonomičniji oblik proizvodnje (jeftinije je od ostalih postupaka proizvodnje dijelova za masovnu proizvodnju), a osim zbog ekonomičnosti, uvelike se koristi za proizvodnju specifičnih dijelova koje je nemoguće proizvesti na drugi način. [1]

Lijevanje se koristi za proizvodnju odljevaka više od 5000 godina i jedan je od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja proizvoda. Postupak lijevanja iznimno je pogodan za serijsku i masovnu proizvodnju zbog visoke produktivnosti i mogućnosti izrade replika. Tijekom godina, tehnologija se toliko razvila da se danas lijevanje koristi za proizvodnju najmodernijih mehaniziranih i automatiziranih uređaja i komponenata sklopova i strojeva. Postupak lijevanja zahtjeva vrlo veliku vještinu jer sam proces nastajanja odljevaka nije vidljiv (događa se u zatvorenom kalupu). Odljevci mogu biti različitih oblika i dimenzija, odnosno debljina stijenki. [2]

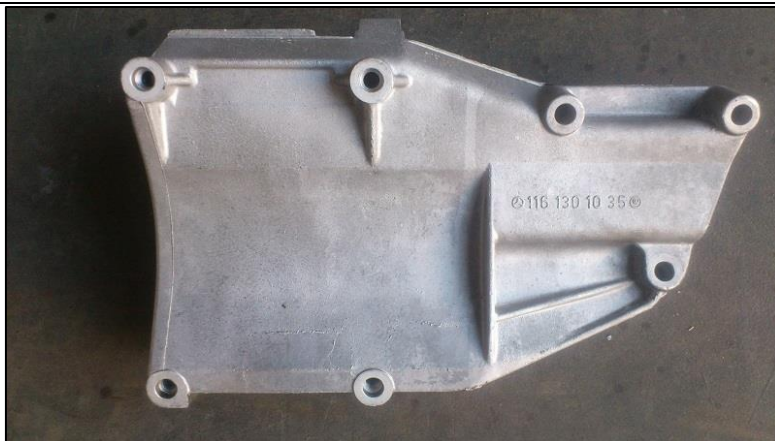
Postupak lijevanja jednak je za sve vrste lijevanja. Na početku je potrebno pripremiti materijal s kojim će se lijevati i dovesti ga u stanje materijala pogodnog za lijevanje. Potom se tim materijalom puni kalup za lijevanje pod djelovanjem gravitacijske ili neke druge sile. Kalup je šupljina definiranog geometrijskog oblika, a izrađuje se ili od nemetalnih materijala (kvarcni pijesak) ili od metala (legure željeza). Materijal unutar kalupa prelazi u stanje pogodno za oblikovanje i popunjava cijelu šupljinu kalupa. Na kraju se materijal (odljevak) vadi iz kalupa. Lijevanje se dijeli prema uljevnoj sili (gravitacijsko lijevanje i lijevanje primjenom tlaka) te prema vrsti alata (kalupa). Kalup za lijevanje može biti jednokratni (za jednokratnu primjenu) ili višekratni (trajni ili stalni kalupi). Slika 1 prikazuje podjelu postupaka lijevanja prema uljevnoj sili te vrsti kalupa i modela. [2]



**Slika 1 Podjela postupaka lijevanja [2]**

Lijevanje se najviše koristi u automobilskoj industriji, strojogradnji, građevinskoj industriji, brodogradnji, medicini, zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, itd. Najveći kupac je automobilska industrija s 40% željeznog i 80% aluminijskog lijeva. Kod automobilske industrije se teži smanjenju mase te se iz tog razloga sve više koriste aluminijski odljevci koji su otprilike 3 puta lakši od odljevaka željeznog lijeva. U jedan automobil ugradi se više od 100 lijevanih dijelova. [2]

Najčešći elementi koji se ugrađuju u automobil, a dobivaju se tlačnim lijevanjem su: gotovo svaki dio motora, nosači, poklopci, itd. Slika 2 prikazuje držač kompresora klima uređaja, a Slika 3 prikazuje više raznih dijelova koji se ugrađuju u automobil, a dobiveni su lijevanjem.



**Slika 2 Držać kompresora klima uređaja [3]**



**Slika 3 Dijelovi motora automobila dobivenim tlačnim lijevanjem [4]**

U ovom radu opisat će se postupak visokotlačnog lijevanja u višekratne (stalne kalupe). Stalni kalupi se izrađuju od izdržljivih metalnih materijala (uobičajeno od sivog lijeva i posebnog čelika). Materijali za izradu stalnih kalupa moraju biti otporni na toplinu i trošenje te moraju proći posebnu toplinsku obradu.

Kako bi se lijevanjem dobili geometrijski složeni oblici odljevaka i kalup mora biti složene konstrukcije. Uobičajeno se kalup sastoji od dva dijela (dvije matrice) koje se postavljaju u kalupne ploče alata za tlačni lijev. Te se dvije strane alata nazivaju pokretna i nepokretna strana. Nepokretna strana je uljevna, a pokretna strana je izbacivačka (iz te strane se izbacuje odljevak nakon lijevanja i skrućivanja). Kalup se sastoji od jednog ili više gnijezda.



## 2. VISOKOTLAČNO LIJEVANJE

Tlačno lijevanje je izraz koji se uobičajeno koristi za lijevanje pod visokim tlakom. U tom se procesu talina tlači u metalni kalup te se tlak održava sve dok se potpuno ne završi skrućivanje. Time se dobiva odljevak visokog stupnja točnosti s najfinijim detaljima unutrašnjeg oblika kalupa. Materijali taline za lijevanje pod visokim tlakom mogu biti različiti, a vrsta tlačnog lijeva će onda ovisiti o temperaturi tališta materijala. Visokotlačno lijevanje dijeli se na tlačno lijevanje s toplom i hladnom komorom.

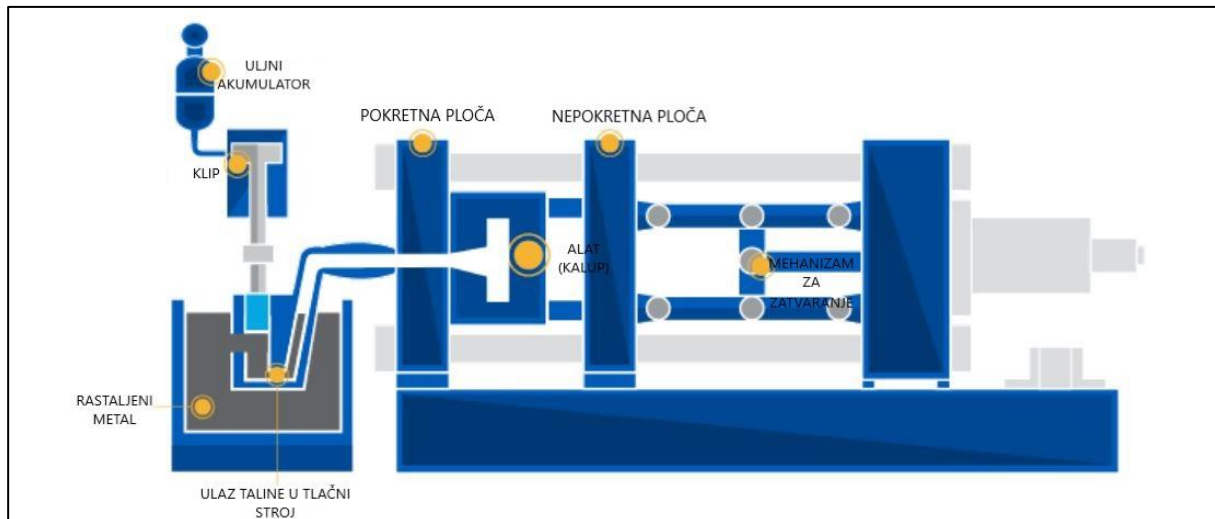
Prednosti visokotlačnog lijevanja su visoke proizvodne stope, iznimna ponovljivost dimenzija dijelova, niski troškovi dijelova i manje strojne obrade. Nedostaci su ograničenja konstrukcije dijelova (kalupa) zbog materijala izrade kalupa (metal), viši početni troškovi izrade i dulje vrijeme izrade kalupa te zahtjevne konstrukcijske promjene na kalupima ukoliko je potrebno izmijeniti kalup radi poteškoća kod lijevanja ili zbog promjene konstrukcije odljevaka [5].

### 2.1. Visokotlačno lijevanje s toplom komorom [2,6,7]

Slitine s niskim talištem (do oko 420°C – npr. magnezij, cink, olovo, kositar) se tlače i lijevanju u tlačnim strojevima s toplom komorom (odnosno u toplokomornim tlačnim strojevima s tlačnom komorom potopljenom u talinu). Ti se metali lijevaju pod relativno niskim tlakom (7 – 35 MPa). Tlačno lijevanje s toplom komorom općenito se koristi za lijevanje manjih odljevaka (manjih dimenzija i masa, od nekoliko grama do 25 kg). Ovakav postupak lijevanja karakteriziraju tlačna komora i klip vertikalno uronjeni u lonac s rastaljenim metalom. Tlačno lijevanje s toplom komorom sastoji se od peći s taljevinom (talinom), sustava za ubrizgavanje taline, tlačne komore i kalupa.

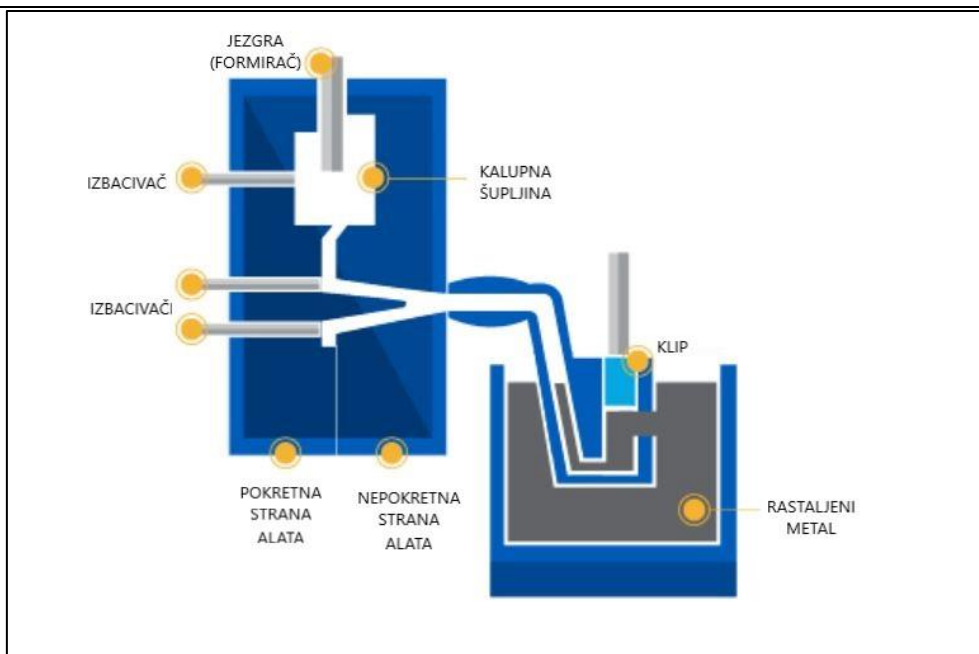
Materijal za lijevanje u tlačnom stroju s toplom komorom može se pripremiti u dvije vrste peći. Jedan sustav koristi peć gdje se ujedno i tali metal u loncu, a kod druge izvedbe se u keramički lonac ulijeva već rastaljeni metal na određenoj temperaturi. Takva se peć naziva peć za držanje na temperaturi lijevanja jer održava talinu na određenoj temperaturi koristeći plinske i električne grijače.

Slika 4 prikazuje shematski prikaz tlačnog stroja s toplom komorom. Sustav za ubrizgavanje taline prikazan je na lijevoj strani slike. On se sastoji od tlačnog klipa kojeg pokreće hidraulika te komore i spojne cijevi. Cijeli sustav za ubrizgavanje uronjen je u talinu.

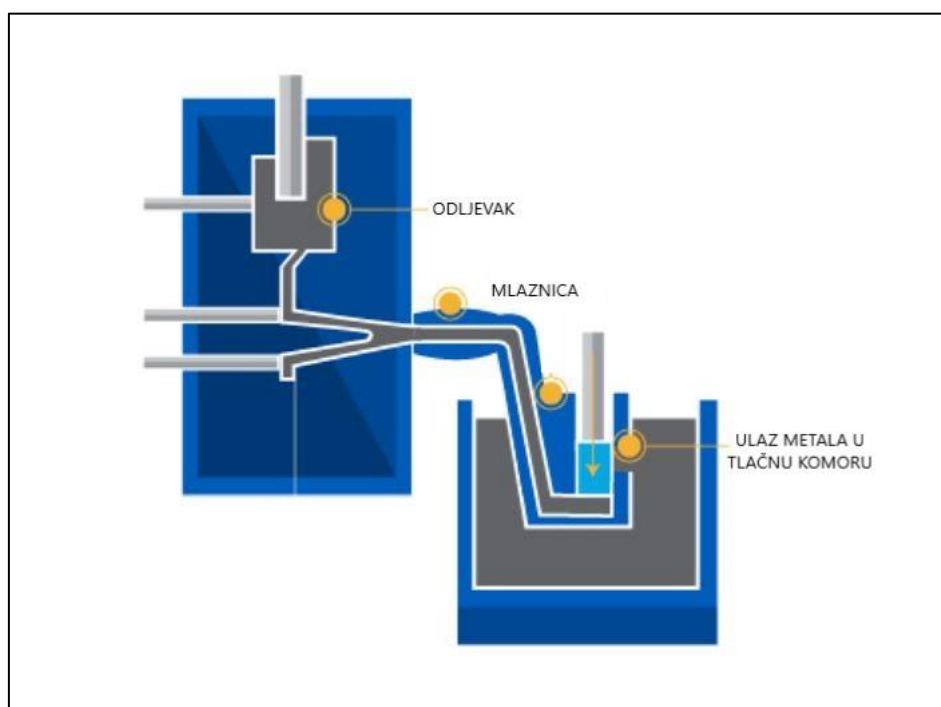


**Slika 4 Stroj za visokotlačno lijevanje s toplom komorom [6]**

Slika 5 i Slika 6 prikazuju kako udar klipa omogućuje prolazak taline kroz spojnu cijev i mlaznicu i dolazak u kalupnu šupljinu. Slika 6 prikazuje talinu koja je poprimila izgled kalupa i njeno skrućivanje u kalupu.

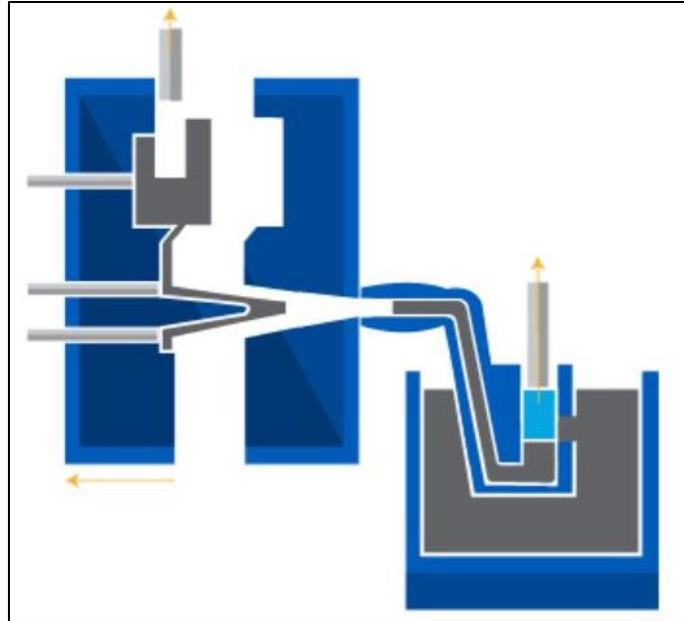


Slika 5 Talina u tlačnoj komori prije udarca klipa [6]



Slika 6 Talina u kalupnoj šupljini nakon udarca klipa [6]

Kada se talina skrutila u kalupu, dobiven je odljevak koji se mora izvaditi iz kalupa. Vađenje odljevka vrši se tako da se razdvoje dvije polovice kalupa što omogućuje vađenje odljevka iz kalupne šupljine (Slika 7).



**Slika 7 Vadenje odljevka iz kalupne šupljine [6]**

Komora i tlačni klip najčešće su izrađeni od alatnih i nehrđajućih čelika. Spojna cijev se obično izrađuje od željeznog lijeva, a mora biti takvog oblika da talina nesmetano protiče kroz nju visokom brzinom i potom ulazi u kalupnu šupljinu. Također, spojna cijev mora biti ugrijana na temperaturu kako ne bi došlo do skrućivanja metala prije nego što uđe u kalupnu šupljinu. Nakon spojne cijevi talina dolazi do mlaznice koja omogućava precizno popunjavanje kalupa. Jednako kao i spojna cijev, mlaznica mora biti ugrijana. Komora, tlačni klip i spojna cijev uronjeni su u lonac s rastaljenim metalom te je njihova temperatura približno jednaka temperaturi taline u loncu. Zbog toga se na ovakav način lijevaju samo legure niskog tališta (legure cinka i magnezija) kako ne bi otopile materijal s kojim su u dodiru. Aluminijske i njegove legure otapaju čelične dijelove sustava za ubrizgavanje te se lijevanje takvih legura radi u visokotlačnim strojevima s hladnom komorom.

Postupak tlačnog lijevanja s toplom komorom započinje zatvaranjem dvije strane kalupa (kalup je tada zatvoren). Tlačni klip je u početnom položaju. Cilindar (tlačna komora) je ispunjena rastaljenim metalom. Proces lijevanja započinje pomicanjem klipa prema dolje, pri čemu se povećava tlak u komori i talina se iz komore ubrizgava u kalupnu šupljinu, prolazeći pritom kroz spojnu cijev i grijanu mlaznicu. Tlak u kalupnoj šupljini se održava sve dok traje skrućivanje odljevka (dok se ne skrutne). Nakon toga se pokretna strana kalupa odvaja od nepokretne i odljevak ostaje na pokretnoj strani. Odljevak se pomoću izbacivača izbacuje iz

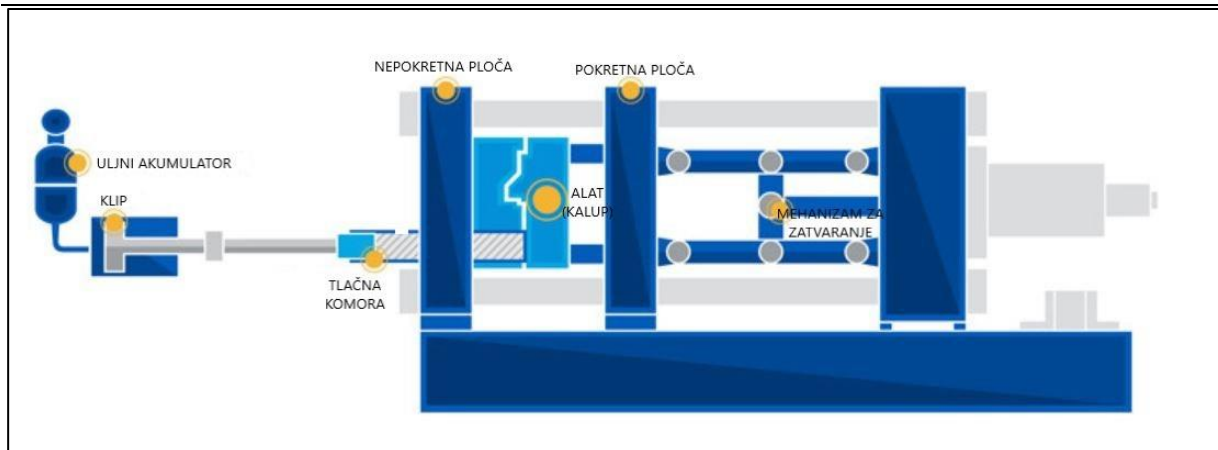
pokretne strane. Kalup se potom zatvara, klip se vraća u početni položaj i cilindar (komora) se ponovno puni talinom.

## 2.2. Visokotlačno lijevanje s hladnom komorom [2,6,8,9]

Strojevi za visokotlačno lijevanje s hladnom komorom koriste se za lijevanje legura s višom temperaturom lijevanja (do 1000°C), prvenstveno legure bakra i aluminijske. Lijeva se pod tlakom od 14 do 140 MPa. Mogu se lijevati odljevci svih veličina i različitih konstrukcija. Komora kod strojeva za tlačni lijev može biti postavljena horizontalno ili vertikalno. U LTH su svi strojevi za visokotlačno lijevanje s hladnom komorom, postavljenom horizontalno.

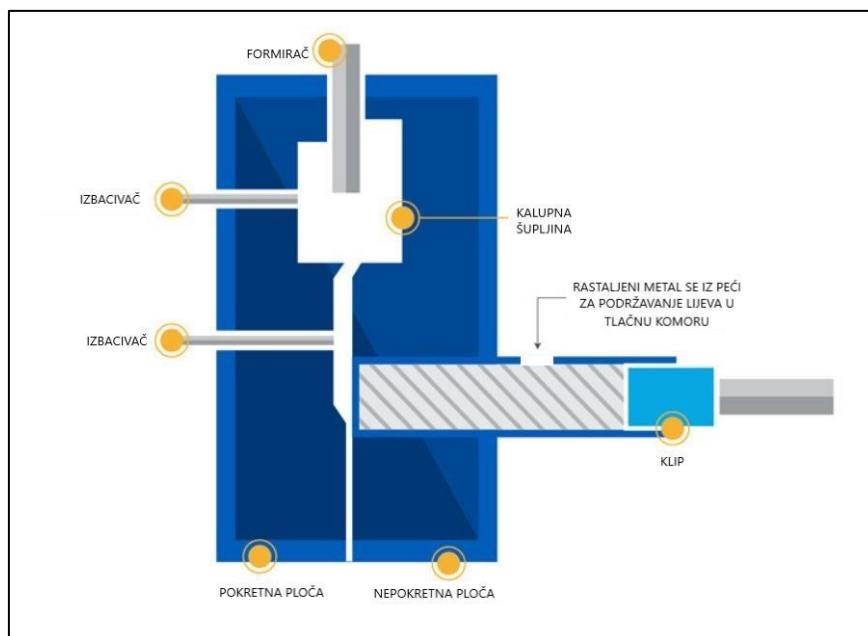
Za razliku od strojeva s toplom komorom, peć za držanje taline kod ovih se strojeva nalazi izvan stroja. Metal se tali u peći za taljenje te se prevozi u loncu do stroja i ulijeva se u peć za držanje. Iz peći se talina ručno pomoću lijevačke žlice ili najčešće u današnje vrijeme automatizirano pomoću dozatora ulijeva u tlačnu komoru (cilindar).

Osnovni dijelovi sustava za tlačni lijev s hladnom komorom prikazani su na slici (Slika 8). Sustav za ubrizgavanje sastoji se od komore, klipa i kalupa. Komora i klip se ne griju prilikom procesa lijevanja, već se zagriju prijelazom topline od taline prilikom ulijevanja. Pri tome se često mora sustav klipa i komore dodatno hladiti kako ne bi došlo do pregrijavanja. Komora i klip nisu u stalnom kontaktu s talinom, za razliku od prethodno opisanog tlačnog lijevanja s toplom komorom. Zbog toga se na ovakav način lijevaju metali s višom temperaturom tališta. Komora i klip izrađuju se od alatnih i nehrđajućih čelika.



**Slika 8 Stroj za visokotlačno lijevanje s hladnom komorom [6]**

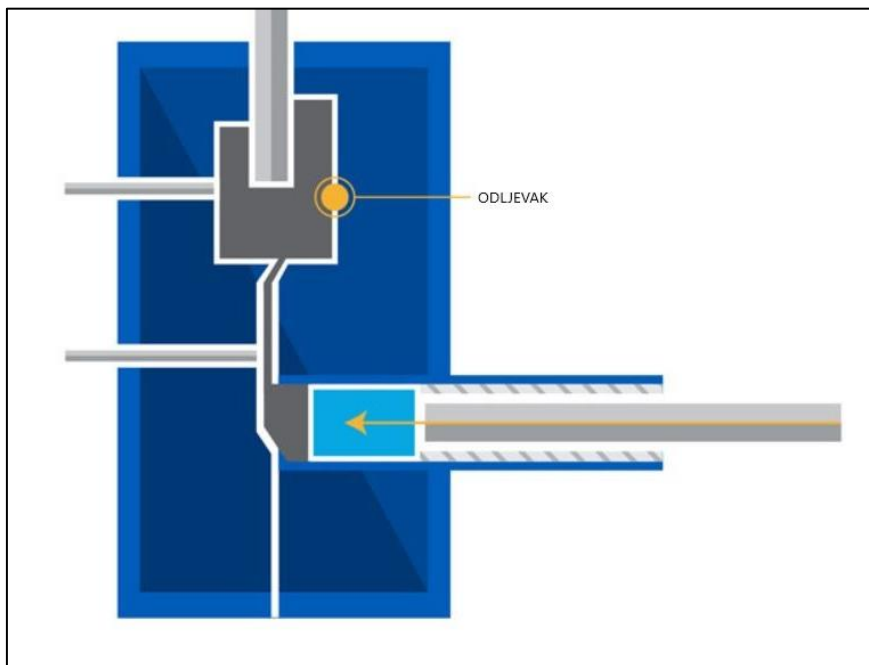
Postupak lijevanja započinje zatvaranjem kalupa (pokretna strana kalupa dolazi do nepokretne). Tada kreće lijevanje taline u horizontalnu tlačnu komoru pomoću dozirnog uređaja ili gravitacijski pomoću ljevačke žlice. Klip je u početnom položaju. Ispunjenost komore talinom jest oko 40 – 60%. Slika 9 prikazuje stanje spremno za početak lijevanja (klip je u početnom položaju, kalup je zatvoren, litina još nije ulivena u cilindar).



**Slika 9 Kalup, tlačna komora i klip prije ulijevanja taline u tlačnu komoru [6]**

Nakon što je potrebna količina taline ulivena u tlačnu komoru, klip počinje tlačiti talinu u kalup (kalupnu šupljinu). Kretanje klipa odvija se u tri vrlo bitne faze, koje određuju kvalitetu

dobivenog odljevka. Kada je litina ispunila kalupnu šupljinu, kreće vrijeme hlađenja (skrućivanja). Slika 10 prikazuje odljevak tijekom skrućivanja.



**Slika 10 Kalup, tlačna komora i klip nakon udarca [6]**

Nakon završetka skrućivanja pokretna strana se odvaja od nepokretne strane kalupa, a odljevak ostaje na pokretnoj strani. Slika 10 prikazuje kalupnu šupljinu s pomičnom jezgrom koja formira dio odljevka. Prije nego što se odljevak izbacuje, jezgra se mora izvući iz odljevka (iz kalupne šupljine). Tek nakon toga se odljevak izbacuje iz kalupa pomoću izbacivača. Odljevak se pomoću kliješta ili automatizirano (robotom) vadi iz kalupa i odlaže na stol kako bi se ohladio. Nakon svakog ciklusa lijevanja potrebno je premazati površine kalupa, posebno ako se radi o leguri aluminija koja se lijeva. Premazivanjem kalupa sprječava se lijepljenje litine na stjenke kalupa, a neki premazi služe i za odvođenje topline i hlađenje kalupa. Nakon premazivanja, klip se vraća u početnu poziciju, kalup se zatvara i stroj je spreman za novi ciklus lijevanja.

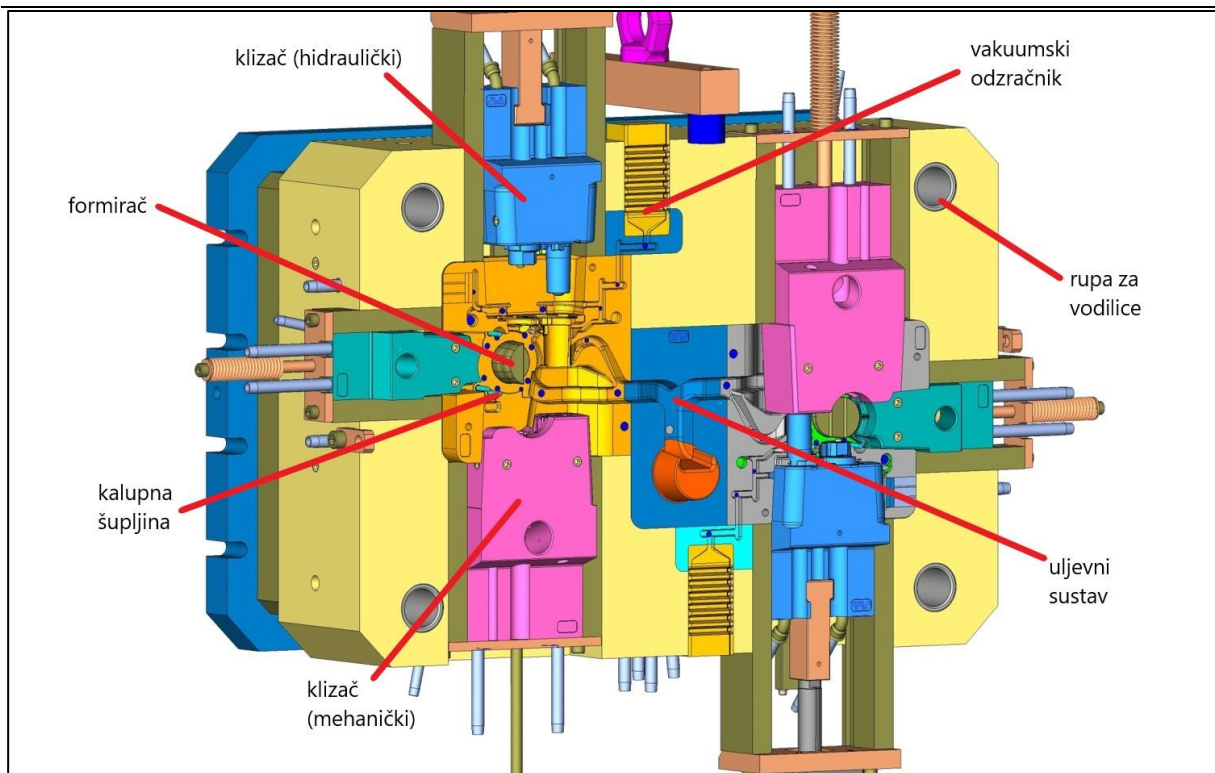
### 2.3. Kalupi za tlačni lijev

Kalupi za tlačno lijevanje nazivaju se još i alati. Većinom se u ljevaonicama proizvode odljevci po mjeri i prema zahtjevima kupca za gotov (obrađeni) komad. Prema izgledu tog obrađenog komada, konstruktori kalupa za lijevanje moraju s vrlo malo informacija konstruirati alat za lijevanje odljevka i razraditi tehnološki postupak izrade ljevarskog kalupa. U to spadaju dogovori s kupcem u svrhu korekcije konstrukcije naručenog dijela, tehnološka razrada crteža odljevka, određivanje položaja odljevka u kalupu, proračun uljevnog i naljevnog sustava te izrada tehnoloških uputa za rad. [8]

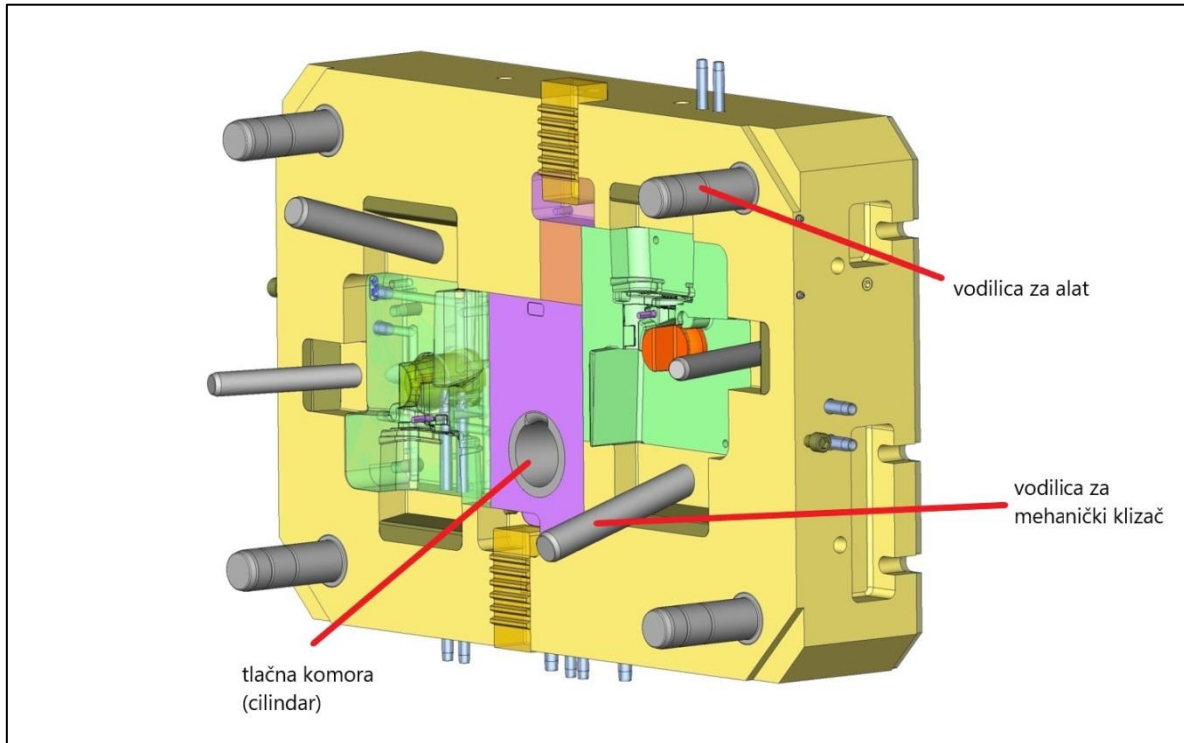
Kalupi se obične rade od dva dijela (nepokretni i pokretni dio) koji se montiraju na ploče stroja. Sastavljeni su od većeg broja međusobno povezanih elemenata (jedan skup elemenata je na pokretnoj, a drugi na nepokretnoj strani). Pokretni dio alata montira se (pričvrsti) na pokretnu ploču stroja koja se dvosmjerno horizontalno kreće po vodilicama. Nepokretni dio se montira na nepokretnu ploču. Pokretni dio se prije početka lijevanja primakne nepokretnom dijelu, a nakon završetka ciklusa lijevanja se odmakne kako bi se odljevak mogao izvaditi iz kalupa.

Unutar pokretne i nepokretne polovice kalupa nalaze se kalupne šupljine koje imaju oblik budućeg odljevka. Čitav sustav alata za lijevanje sadrži još i okvir za kalupe, klip, tlačni cilindar, izbacivače i metalne jezgre (formirače). Metalne jezgre formiraju posebne oblike (npr. udubljenja) na odljevku te se nakon završetka hlađenja, a prije vađenja komada iz alata moraju hidraulički ili mehanički izvaditi iz odljevka. Nakon otvaranja dviju polovica kalupa slijedi izbacivanje odljevka van iz alata pomoću izbacivača [2]. Slika 11 i Slika 12 prikazuju pokretnu i nepokretnu strana alata nekog odljevka i označeni su bitni dijelovi.





Slika 11 Pokretna strana kalupa [10]



Slika 12 Nepokretna strana kalupa [10]

---

Osnovni dijelovi kalupa za lijevanje pod tlakom dijele se u 4 glavne skupine:

- Dijelovi za formiranje odljevaka (kalupna šupljina)
- Dijelovi konstrukcijskog karaktera
- Dijelovi za izvlačenje metalnih jezgri iz kalupa
- Dijelovi za izbacivanje odljevaka iz kalupa (izbacivači).

Kalupna šupljina u svakom je trenutku tijekom lijevanja u dodiru s rastaljenim materijalom. Ona služi za formiranje vanjskog oblika odljevka. U tu skupinu spadaju još i pokretne i nepokretne jezgre, dijelovi uljevnog sustava (služe za razdvajanje i usmjeravanje litine), izbacivači i drugo. Svi dijelovi ove grupe izloženi su toplinskom i hidrauličnom udaru litine. Izrađuju se od visokolegiranih alatnih čelika za rad pri povišenim temperaturama. Također, ti dijelovi moraju biti izrađeni tako da budu povećane otpornosti na trošenje [2].

Druga skupina odnosi se na dijelove koji održavaju alat stabilnim. To su dijelovi za otvaranje i zatvaranje kalupa, dijelovi za vođenje kalupa po vodilicama i za čvrsto vezivanje kalupa za tlačni stroj. Neki od njih su: ploče-držači, dijelovi s udubljenjima, držači jezgri za vođenje, itd.

Konstruiranje kalupa vrlo je složen posao te je za dobru konstrukciju (optimalnu) potrebna dobra priprema. Tijekom razvoja konstrukcije kalupa za tlačni lijev, moraju se uzeti u obzir slijedeće bitne stavke [10]:

- Izbor litine
- Tolerancije mjera na odljevku koje se mogu (i moraju) postići
- Provjera nacrt (crteža) odljevka radi mogućnosti eventualne rekonstrukcije u svrhu tehnološkog prilagođavanja lijevanju
- Utvrđivanje naručene količine odljevaka kao mjerilo za broj gnijezda koje će se postaviti u alat
- Izračun projicirane površine odljevka kako bi se odredila snaga stroja koja je potrebna za lijevanje
- Određivanje specifičnog tlaka
- Određivanje potrebne sile zatvaranja
- Određivanje presjeka ušća prema formulama ili prema nomogramu za određivanje presjeka ušća.

---

## 2.4. Sila zatvaranja kalupa

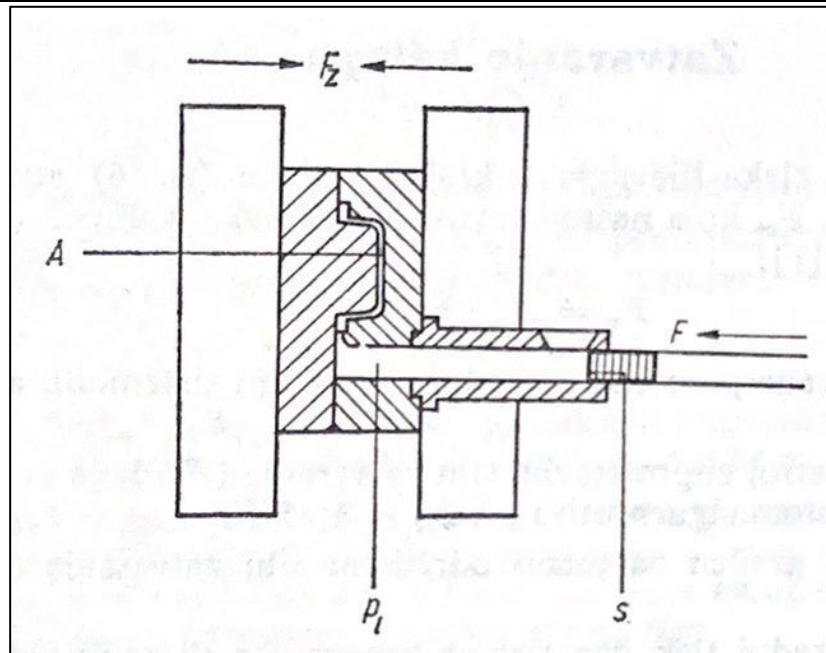
Tijekom procesa lijevanja, litina cijelo vrijeme nekim tlakom djeluje na svoju okolinu, tj. na kalupnu šupljinu. Taj se tlak mijenja po fazama lijevanja i naziva se lijevni ili specifični tlak  $p_1$ . Osim njega, bitan je i krajnji tlak, odnosno tlak treće faze lijevanja kojim se djeluje iz multiplikatora. Pod utjecajem tlaka lijevanja i krajnjeg tlaka stvara se tzv. sila otvaranja  $F_0$  koja nastoji razdvojiti polovice kalupa [8]:

$$F_0 = A_p \cdot p_1 \quad (1)$$

gdje je  $A_p$  projicirana površina odljevka s uljevnim sustavom. Toj sili otvaranja suprotstavlja se stroj sa silom zatvaranja  $F_z$  koja se uvijek uzima s faktorom sigurnosti (od npr. 1,25):

$$F_z = 1,25 \cdot F_0 \quad (2)$$

Radni tlak je određen tlakom spremnika ili multiplikatora i nije promjenjiva veličina, za razliku od lijevnog tlaka i površine projekcije odljevka. Liječni tlak ovisi o promjeru klipa za lijevanje, odnosno o promjenu tlačne komore. Površina odljevka je podložna promjenama, ali do maksimalne granice koja ovisi o sili zatvaranja. Slika 13 prikazuje zatvoreni alat (kalup) na stroju, tlačnu komoru i klip za lijevanje te su označeni osnovni parametri tlačnog lijeva. Ispod slike navedene su ovisnosti radnog (injekcijskog) i specifičnog (lijevnog) tlaka, sile zatvaranja i projicirane površine odljevka [8].



Slika 13 Sile i tlakovi u zatvorenom tlačnom alatu [8]

$$P_t = \frac{F}{A_k}, \text{ specifični (lijevni) tlak} = \frac{\text{sila lijevanja}}{\text{povr. presjeka klipa}} \quad (3)$$

$$A = \frac{F_z}{P_t}, \text{ max površina odljevka} = \frac{\text{sila zatvaranja}}{\text{specifični tlak}} \quad (4)$$

$$P_t = \frac{F_z}{A}, \text{ max specifični tlak} = \frac{\text{sila zatvaranja}}{\text{projicirana površina odljevka}} \quad (5)$$

$F_z$  – sila zatvaranja, N

$A$  – maksimalna projicirana površina odljevka, m<sup>2</sup>

$P_t$  – specifični (lijevni) tlak, Pa

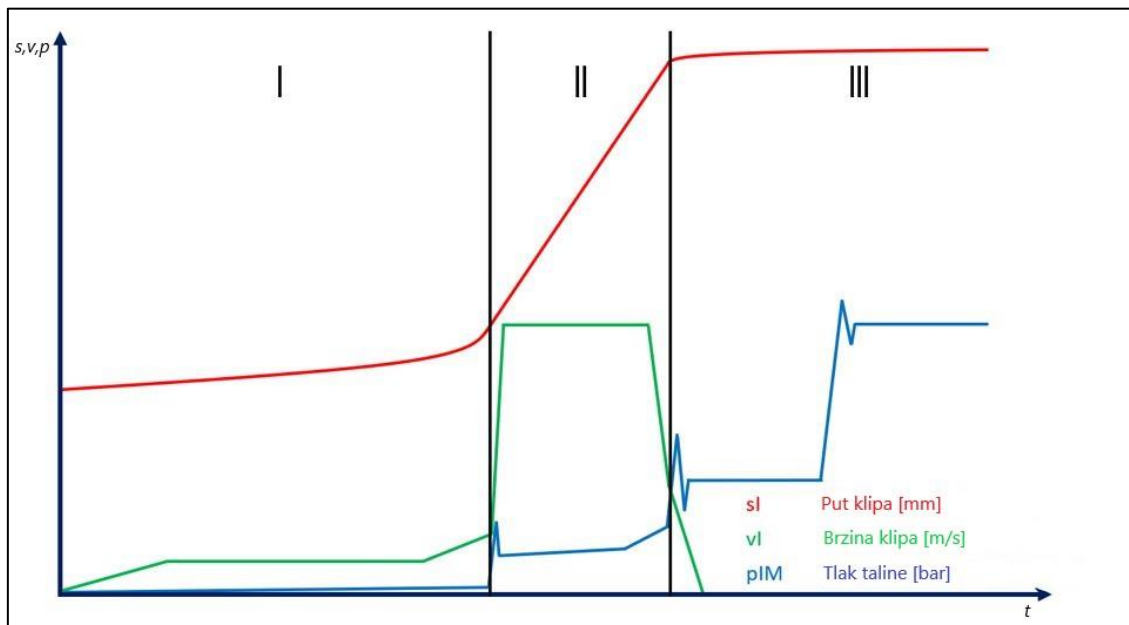
$F$  – sila lijevanja, N

$A_k$  – površina poprečnog presjeka klipa za lijevanje, m<sup>2</sup>

## 2.5. Dijagram i parametri visokotlačnog lijevanja

Najbitnije stavke kod lijevanja prikazuju se u dijagramu lijevanja. To je dijagram ovisnosti pomaka, brzine i tlaka klipa o vremenu. Svaki odljevak ima drugačiji dijagram lijevanja, a

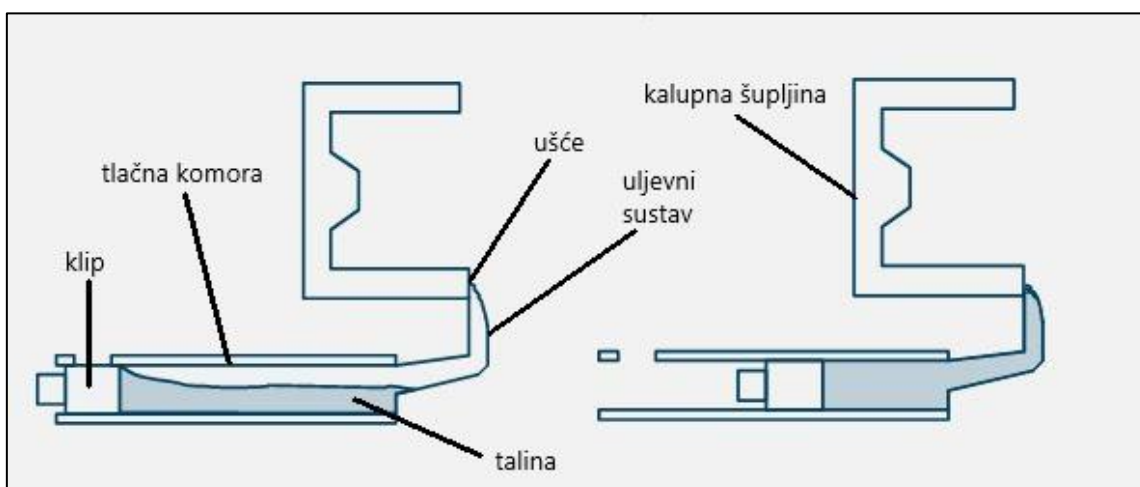
ovisi o dimenzijama i konstrukciji konačnog proizvoda (odljevka). Općeniti dijagram i proces lijevanja u 3 faze prikazan je na slici (Slika 14) [7,8,10].



Slika 14 Dijagram lijevanja s označenim fazama [10]

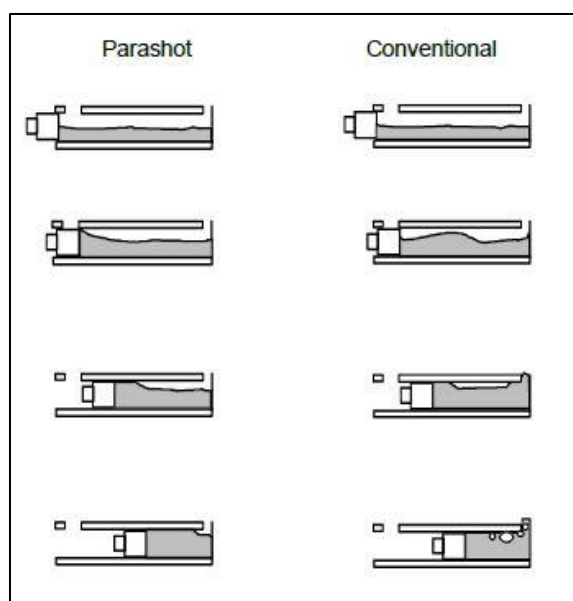
### Prva faza

Prva faza započinje gibanjem klipa malom brzinom, nakon što je talina već izlivena u tlačnu komoru. Klip kreće iz početnog položaja i gura talinu iz komore sve do ušća (Slika 15). Tu završava prva faza.



Slika 15 Prikaz puta taline u prvoj fazi lijevanja [6]

U prvoj fazi klip se pomiče takvom brzinom da ispuni cilindar talinom bez da u njoj zarobi zrak i da se talina giba bez turbulencija (laminarnim strujanjem). Laminarno strujanje se pojavljuje samo dok talina ne ispuni cilindar i dok je brzina gibanja litine manja od  $1\text{ms}^{-1}$ . Nakon što brzina litine postane veća od  $1\text{ms}^{-1}$ , strujanje prelazi u turbulentno. Slika (Slika 16) prikazuje pravilan (lijevo) i nepravilan (desno) način popunjavanja komore litinom putem gibanja klipa. Pravilan način dobiva se postavljanjem optimalne brzine 1. faze lijevanja. Brzina lijevanja u prvoj fazi iznosi 0,05 do  $0,5\text{ms}^{-1}$ . Ako se klip giba konstantnom akceleracijom ta se putanja naziva 'parashot' način ulijevanja [7,8,10].

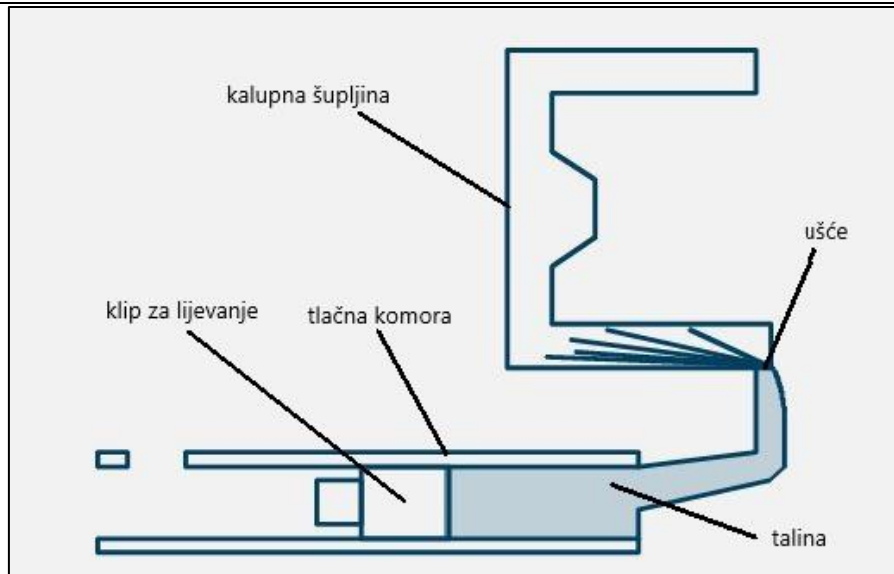


**Slika 16 Laminarno (lijevo) i turbulentno (desno) strujanje taline u tlačnoj komori [10]**

Prva faza završava kada litina ispuni cijeli uljevni sustav i dođe do ušća u kalupnoj šupljini, a može trajati od 1 do 7 sekundi (najčešće do 2 s). Uljevni sustav čine svi kanali koje popuni litina pod tlakom prilikom kretanja iz komore do kalupne šupljine.

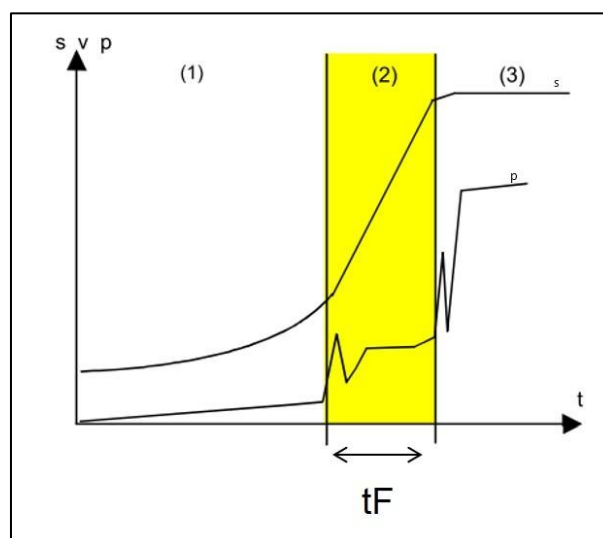
### Druga faza

Druga faza je brza faza, klip se kreće velikom brzinom (nekoliko puta većom od brzine spore faze – od 0,5 do maksimalno  $10\text{ms}^{-1}$ ) i pri tome talina ispunjava prostor kalupne šupljine (počevši od ušća). U trenutku kada je kalup pun, kretanje klipa naglo prestaje. Slika 17 prikazuje početak druge faze.



Slika 17 Prikaz puta taline u drugoj fazi lijevanja [6]

Bitan parametar druge faze je brzina litine na ušću. Uobičajena brzina na ušću je od 20 do 60  $\text{ms}^{-1}$ , a najčešće se koriste brzine od 40 do 60  $\text{ms}^{-1}$ . Slika 18 prikazuje dijagram lijevanja i na njemu je označeno područje 2. faze. Vrijeme trajanja označeno je s  $t_F$ , što znači filling time (vrijeme punjenja). Vrijeme punjenja traje kratko, od 0,1 do 0,3 s, ovisno o debljini stijenke odljevka (odnosi se na najtanju stijenku na odljevku). Npr. za stijenku debljine 1,5 mm  $t_f$  je od 0,01 s do 0,03 s, dok je za stijenku debljine 3 mm  $t_f$  između 0,05 i 0,1 s. Za deblje stijenke, od npr. 6,4 mm  $t_f$  će iznositi 0,08 do 0,3 s.



Slika 18 Vrijeme punjenja kalupa talinom (druga faza lijevanja) [10]

Kao što je spomenuto kod prve faze, veliki utjecaj na lijevanje i kvalitetu odljevka imaju geometrijski parametri uljevnog sustava. Bitno je pravilno dimenzionirati cijeli uljevni sustav, a posebno njegova ušća, kako bi talina optimalnom brzinom došla do ušća, a potom i ispunila kalupnu šupljinu te pritom onemogućila zarobljavanje zraka (nastajanje poroznosti) i nastajanje ostalih grešaka. Uljevni sustav se dimenzionira tako da u njemu vlada turbulentno strujanje s laminarnim podslojem, što znači da je strujanje uz stijenke uljevnog sustava laminarno i nema velikog trošenja kalupa, a u sredini je strujanje turbulentno, što omogućuje brzo punjenje kalupa.

Za određivanje brzine klipa u drugoj fazi, potrebno je poznavati kinematičku vezu između kretanja klipa u komori i strujanja taline u uljevnom sustavu (i kroz ušće uljevnog sustava). Ta se neovisnost određuje koristeći jednadžbu kontinuiteta [7,8,10]:

$$v_k \cdot A_k = v_u \cdot A_u \quad (6)$$

$v_k$  – brzina klipa,  $\text{ms}^{-1}$

$A_k$  – površina klipa,  $\text{m}^2$

$v_u$  – brzina taline na ušću kalupne šupljine,  $\text{ms}^{-1}$

$A_u$  – poprečni presjek ušća,  $\text{m}^2$

Potom se koristi Bernoullijeva jednadžba za opisivanje stacionarnog strujanja tekućine:

$$\frac{\rho \cdot v_u^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_u + p_u = \frac{\rho \cdot v_k^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_k + p_k \quad (7)$$

$\rho$  – gustoća taline,  $\text{kgm}^{-3}$

$h_u$  – 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



U prvom trenutku visina taline u ušću približno je jednaka visini taline u tlačnoj komori. Tlak u ušću jednak je atmosferskom tlaku za sve kalupe koji imaju dobar sustav odzračivanja i ventilacije. Brzina klipa je zanemarivo mala u odnosu na brzinu taline u ušću te se kao takva u proračunu zanemaruje.

Uzevši u obzir gore navedene stavke, tlak u tlačnoj komori izražava se kao:

$$p_k = \frac{1}{2} \cdot v_u^2 \cdot \rho \quad (8)$$

Stvarna brzina strujanja taline u ušću (s obzirom na gubitke energije prilikom strujanja) glasi:

$$v_u = \eta \cdot \sqrt{\frac{2p_k}{\rho}} \quad (9)$$

$\eta < 1$  – koeficijent učinka taline obzirom na otpor strujanju

### Treća faza i hlađenje

Treća faza je faza kompresije. Započinje na kraju punjenja kalupne šupljine talinom i završava zadnjim impulsom klipa. Talina se tijekom skrućivanja skuplja (volumen se smanjuje) i zbog toga je potrebno djelovati visokim tlakom na talinu preko klipa, kako bi se nadoknadio volumen metala smanjen tijekom skrućivanja. Trajanje treće faze je od 0,01 do 0,5 s, ovisno o volumenu odljevka. Aluminij gubi 3 – 7 % svog volumena prilikom prelaska iz tekuće u krutu fazu.

Tlak treće faze ovisi o vrsti materijala taline i o funkciji komada. Tablica 1 prikazuje okvirne vrijednosti tlaka [10]:

**Tablica 1 Preporučeni tlak 3. faze ovisno o funkciji odljevka [10]**

	Tlak 3. faze		
	Al, Mg legure	Cink legure (Zn)	legure bakra
standardni dijelovi (bez mehaničkih zahtjeva)	do 400 bar	100 - 200 bar	300 - 400 bar
tehnički dijelovi (s mehaničkim zahtjevima)	400 - 600 bar	200 - 300 bar	400 - 500 bar
Nepropusni dijelovi s visokim zahtjevima	800 - 1000 bar	250 - 400 bar	800 - 1000 bar

Glavni problem druge faze lijevanja je porast tlaka prilikom promjene otpora kada talina struji kroz uljevni sustav i ušće i ulazi u kalupnu šupljinu. U tom trenutku sigurno dolazi do pojave pada tlaka. Ukoliko se tlak prerano naglo poveća (tlak klipa u trećoj fazi) moguće je da dođe do otvaranja kalupa i pojave srha ili čak do izbijanja taline izvan kalupa. Zbog toga je potrebno optimirati početak treće faze tako da se talina već počne skrućivati prije nego na nju počne djelovati visoki tlak.

Zadnji dio procesa lijevanja je već spomenuto skrućivanje, odnosno hlađenje taline u kalupu i njena pretvorba u kruto stanje. Prilikom ulijevanja taline u kalupnu šupljinu s njom dolazi i dio topline koji se prilikom skrućivanja mora što brže odvesti, kako bi se odljevak ohladio do temperature na kojoj je moguće otvoriti kalup i izvaditi odljevak iz njega. Talina na kalup dovodi najveći dio topline (oko 90%), 1% topline ovisi o kinetičkoj energiji, a ostatak se odnosi na toplinu kalupa. Kalup mora biti zagrijan na radnu temperaturu tijekom cijelog procesa lijevanja jer kada bi rastaljeni metal udario na hladni čelični kalup došlo bi do njegovog oštećenja. Toplina se odvodi iz kalupa prijelazom topline, isijavanjem, hlađenjem uređajima za hlađenje kalupa, premazom, hlađenjem stroja te se određeni dio topline odnosi na odljevak [7,8,10].

Odvedena toplina kod jednog ciklusa ulijevanja taline u kalup računa se prema slijedećem izrazu [7]:

$$Q_n = m(c\Delta t + C) \quad (10)$$

$Q_n$  – odvedena toplina kod jednog ulijevanja u kalup, kJ

$m$  – masa odljevka s uljevnim sustavom, kg

$c$  – srednja vrijednost specifične topline, kJ/(kgK)

$\Delta t$  – razlika između temperature ulijevanja i temperature odljevka prilikom izbacivanja iz kalupa, K

$C$  – toplina taljenja lijeva, kJ/kg

Također se može izračunati i količina topline koju kalup odvodi po satu:

$$Q = k \cdot A_1 \cdot \frac{\Delta t_A}{L} \quad (11)$$

$Q$  - količina topline koju kalup odvodi po satu, kJ/h

$k$  – toplinska provodljivost, kJ/(mhK)

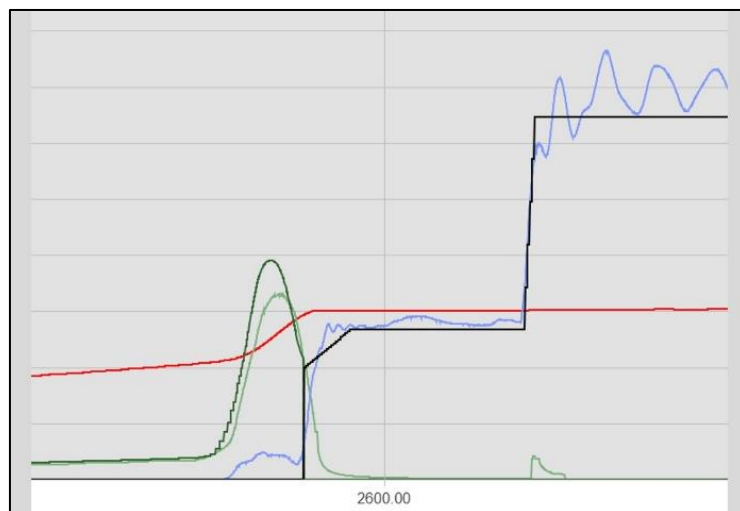
$A_1$  – poprečna površina okomita na toplinski tok, m<sup>2</sup>

$\Delta t_A$  – razlika temperatura kalupne šupljine i vanjske površine kalupa, K

$L$  – ukupna debljina obje polovice kalupa, m

Toplinu je potrebno odvesti iz kalupa jako brzo te zbog toga nije dovoljno samo gore opisano odvođenje topline, već se u kalupe stavljaju posebni kanali za hlađenje kroz koje konstantno ili impulsno struji voda ili neki drugi medij za hlađenje. Što su ti kanali postavljeni bliže radnoj površini kalupa, to je kapacitet hlađenja veći.

Slika 19 prikazuje primjer isječka iz jednog stvarnog, dobro postavljenog dijagrama lijevanja. Crvena linija označava putanju klipa, tamno zelena označava zadanu brzinu klipa, a svjetlo zelena ostvarenu brzinu i klipa. Crna označava zadanu krivulju tlaka, a plava označava ostvareni tlak klipa u trećoj fazi.



**Slika 19 Realni dijagram lijevanja (na tlačnom stroju Bühler) [10]**

---

## 2.6. Nedostaci visokotlačnog lijeva

Visokotlačno lijevanje je vrlo kompleksan postupak proizvodnje dijelova koji zahtjeva jako puno pažnje počevši od same konstrukcije tlačnog alata, preko pažljivih izbora parametara tlačnog stroja pa sve do točne i oprezne obrade komada koji čine završnu fazu izrade željenog proizvoda. Za razliku od nekih drugih proizvodnih linija gdje se škart mjeri u promilima, kod visokotlačnog lijevanja se nerijetko zna dogoditi da škart cijele proizvodnje do dobivanja gotovog proizvoda bude čak 5 do 10%. To se događa zbog pogrešaka na lijevanju ili na kasnijim operacijama (obrada, bojanje komada i slično) [11].

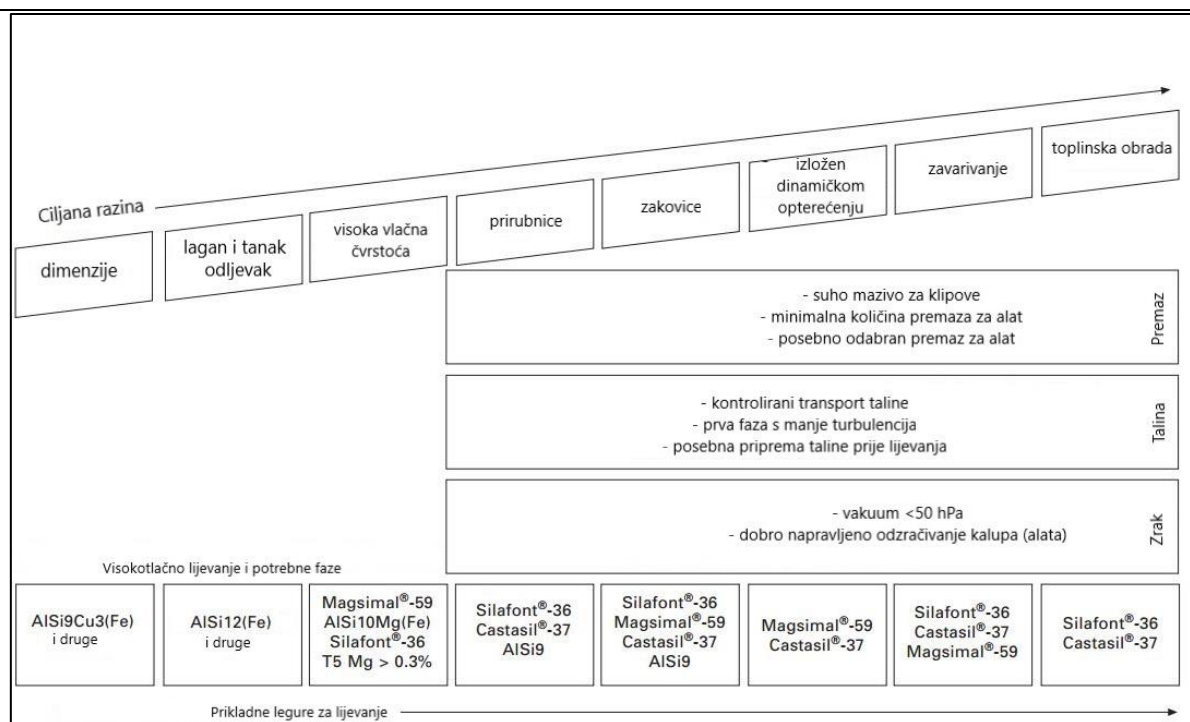
Također, kod visokotlačnog lijevanja postoje neki nedostaci ili mane na koje se mora obratiti pozornost. Na primjer, proizvodi dobiveni visokotlačnim lijevanjem zahtijevaju maksimalnu kvalitetu, pouzdanost i sigurnost, ali je visokotlačno lijevanje najkritičniji oblik proizvodnje zbog mogućnosti stvaranja grešaka i dobivanja proizvoda koji u konačnici neće biti pouzdani (odnosno neće biti dovoljno sigurni). Greške na komadima se ponekad pokažu tek nakon što je velika količina komada napravljena (recimo nakon obrade) ukoliko nije bilo pravovremene kontrole odljevaka te je vrlo teško rješavati probleme iste sekunde kada se dogode. Vrlo često rješavanje problema kod tlačnog lijeva ovisi o nečijem iskustvu te nije temeljeno samo na teoretskom znanju. Zato se u ljevaonicama zaposlenici trebaju stalno dodatno školovati i treba se ulagati u njihovo znanje kako bi uvijek bili konkurenti na tržištu [11].

### 3. LEGURE METALA ZA LIJEVANJE POD TLAKOM I PRIPREMA ZA LIJEVANJE

Odljevci dobiveni tlačnim lijevanjem izrađuju se od legiranih metala koji se nazivaju legure za lijevanje. Legure za lijevanje pod tlakom moraju imati tehnološka i ljevačka svojstva kako bi proizvodnja složenih odljevaka bila uspješna. Pod tim se misli da legura prvenstveno mora imati dobru livljivost te da mora osigurati točne dimenzije odljevka, potrebnu gustoću odljevka i druga mehanička, fizikalna i kemijska svojstva odljevka. Neke od karakteristika koje moraju imati metali koji se legiraju, a potom lijevaju pod tlakom su:

- Što niža temperatura lijevanja
- Dobra livljivost
- Vrlo niska razina skupljanja materijala prilikom skrućivanja i prijelaza iz tekućeg u kruto stanje (zbog pojave poroznosti skupljanja i pojave zaostalih naprezanja)
- Što manja sklonost otapanju plinova
- Niska cijena, mogućnost korištenja otpada (ekonomičnost)
- Dobra obradivost

Najviše se za tlačno lijevanje koriste legure aluminija, cinka, bakra i magnezija. Odabir vrste legure ovisi o funkciji i zahtjevima odljevka te o zahtjevima kvalitete. Zahtjevi za odljevak mogu biti vrlo jednostavno dimenzijski kontroliran komad do komada koje je potrebno toplinski obraditi ili strojno obraditi. Slika 20 prikazuje koju je leguru potrebno odabrati ovisno o kakvim zahtjevima za odljevak se radi. Kod nekih legura se posebno mora paziti na zarobljeni zrak (da ne bude zaostalog zraka u talini prije druge faze), na pripremu taline prije dovođenja u peć za držanje te na premaz za klipove i alat (kalup) [12].



Slika 20 Odabir legure za tlačno lijevanje [12]

### 3.1. Legure AlSi

Prednosti legura aluminija sa silicijem (silumini) su dobra livljivost, dobra mehanička svojstva, otpornost na koroziju i dobra zavarljivost. U procesu visokotlačnog lijevanja uobičajeno se koriste legure aluminija s 11 do 13% Si (eutektičkog sastava). Silicij u leguri povećava livljivost i plastičnost pri visokim temperaturama te smanjuje skupljanje legure prilikom prelaska iz tekućeg u kruto stanje. Takve legure služe za lijevanje odljevaka koji se kasnije ne obrađuju toplinski. Nedostatak takvih legura su otežana mehanička obrada i niža mehanička svojstva u usporedbi s legurama bakra i magnezija. Za odljevke koji moraju biti pogodni za toplinsku obradu u leguru aluminij i silicija dodaje se mali udio magnezija čime se još i bitno poboljšavaju mehanička svojstva [7,13].

Nadeutektičke legure su one s oko 25% silicija. Na povišenim temperaturama takve legure imaju stabilna svojstva. Dodatkom magnezija (0,2 do 0,3%) poboljšavaju im se mehanička svojstva, a dodatkom bakra se smanjuje tvrdoća i otpornost na koroziju.

Općenito, dodavanjem magnezija u Al-Si legure povećava se otpornost na koroziju (posebno pod utjecajem morske vode), imaju visoka mehanička svojstva, a nedostaci su smanjena livljivost, plastičnost i povećano skupljanje prilikom skrućivanja. Također, dodavanje preko 10% magnezija u leguru povećava se sklonost oksidaciji u rastaljenom stanju. Dodavanje cinka u Al-Si leguru omogućava dobru livljivost, manje lijepljenje za kalup, dobro se poliraju i samokaljive su. Bakar u leguri Al-Si smanjuje livljivost i korozijska svojstva, ali su dobre čvrstoće i zadovoljavajuće istezljivosti [7,10].

U tvrtci LTH Metalni lijev, za lijevanje se koriste isključivo legure aluminija i silicija i to 4 vrste:  $AlSi_9Cu_3$ ,  $AlSi_{12}$ ,  $AlSi_{12}(Cu)$  i  $AlSi_9MgMn$  (silafont). U ovim su legurama aluminija legirni elementi silicij i bakar. Osim njih, AlSi legure mogu se legirati još sa željezom (Fe), magnezijem (Mg), manganom (Mn), cinkom (Zn), berilijem (Be), niklom (Ni) i drugim elementima.

### **$AlSi_9Cu_3$**

Za dobivanje odljevaka visokotlačnim lijevom koristi se legura  $AlSi_9Cu_3$  koja je napravljena upravo za potrebne tlačnog lijevanja. Ova legira klasificirana je normom EN 46000. U leguri se nalazi 8-11% silicija, do 1,2% cinka, 2-4% bakra, 0,05-0,55% magnezija, do 0,15% kositra, do 0,55% mangana, do 0,55% nikla, do 1,3% željeza, do 0,25% titanija, do 0,35% olova, do 0,15% kroma i do 0,25% ostalih metala. To je legura s većom toplinskom vodljivošću i izvrsne je čvrstoće. Dodatak kroma leguri daje veću duktilnost i žilavost, poboljšava čvrstoću legure i čini ju otpornijom na pucanje uslijed korozije ili naprezanja. Ova se legura zbog svojih dobrih svojstava koristi u procesu proizvodnje komponenti strojeva i motora (posebice glave cilindra, blokova motora, dijelova motora, zupčanika i ostalo). Nedostaci legura aluminija i silicija s bakrom su smanjena livljivost i sklonost nastajanju poroznosti u odljevcima (u odnosu na legure bez bakra). Isto tako, bakar se lako raspršuje u filmu aluminijevog oksida koji se stvara na površini aluminijevih legura i time smanjuje otpornost na koroziju. [13,14].

### **$AlSi_{12}$**

Legura  $AlSi_{12}$  najčešće je korištena legura za lijevanje. Najveća prednost joj je dobra zavarljivost odljevaka nakon lijevanja. Male je mase u odnosu na čvrstoću i ima povoljna toplinska svojstva. Ta eutektička legura ima talište na  $577^{\circ}C$ , što je niže od zasebnih

elemenata aluminija i silicija čija su tališta na 660°C i 1414°C. Zbog te relativno niske točke tališta ta je legura prvi put napravljena kao legura za lemljenje. Više silicija omogućava veću tečljivost i bolju livljivost te manje skupljanja u odnosu na legure s manjim postotkom silicija. Osim 12% silicija, u leguri se nalazi i 0,5% cinka, 0,1% magnezija, 1% bakra, 0,35% mangana, 0,5% nikla, 2% željeza, 0,15% kositra i 0,25% ostalih metala. Osim gore navedenih prednosti legure, važno je spomenuti da je njena cijena niska, vrhunske je otpornosti na koroziju, male je specifične težine i visoke vlačne čvrstoće. Ova svojstva čine leguru izrazito dobrom za proizvodnju dijelova u zrakoplovstvu, u automobilskoj industriji i za tankostijene odljevke (npr. proizvodnja izmjenjivača topline) [8,10].

### **AlSi<sub>12</sub>(Cu)**

Treća legura koja se koristi u LTH je AlSi<sub>12</sub>(Cu). Sadrži 10,5-13,5% silicija, do 0,7% željeza, do 0,9% bakra, 0,05-0,55% mangana, do 0,35% magnezija, do 0,10% kroma, do 0,30% nikla, do 0,55% cinka, do 0,10% kositra, do 0,15% titanija i do 0,20% olova. Odljevci dobiveni lijevanjem ove legure su izrazito dobri za rad pod visokim tlakovima, a sama legura je dobre livljivosti, zavarljivosti, čvrstoće pri povišenim temperaturama i dobre obradljivosti [15].

### **AlSi<sub>9</sub>MgMn (Silafont)**

Posljednja legura koja se koristi u LTH je Silafont. Silafont je predstavljen 1994. godine kao prva duktilna aluminijska legura za visokotlačno lijevanje. Baza legure su aluminij i silicij koji su se pokazali kao najbolji sastav za jako dobru livljivost legure i najveći raspon primjene. Legirni elementi ove legure su 9,5-11,5% silicija, do 0,12% željeza, do 0,03% bakra, 0,5-0,8% mangana, 0,15-0,5% magnezija, do 0,07% cinka, 0,04-0,15% titanija, 0,01-0,02% stroncija, do 0,001% fosfora i do 0,1% ostalih metala [12,16].

## **3.2. Legure cinka**

Legure cinka koriste se za proizvodnju složenih i tankostjenih odljevaka. Prednosti legura cinka su visoka livljivost i činjenica da se ne lijepe za površine kalupa te ne reagiraju u dodiru s kalupom. Nedostatak je manja otpornost na koroziju od legura bakra [7].



### 3.3. Legure bakra

Za lijevanje pod visokim tlakom od legura bakra upotrebljava se uglavnom mjed. Mjed u usporedbi s broncom ima bolju livljivost i manje se skuplja prilikom prelaska u kruto stanja. Za lijevanje pod tlakom u mjed se dodaje 4,5% aluminijska, čime se povećava čvrstoća i otpornost na koroziju. Dodavanjem olova (do 2,4%) leguri se povećava kemijska otpornost, obradivost rezanjem i otpornost na trošenje. Lijevanjem mjedi dobivaju se odljevci koji se mogu koristiti za dijelove armatura, zupčanika, ukrasnog okova te odljevci koji će biti pod utjecajem morske vode. Legure koje se koriste u tlačnom lijevanju su legure mjedi dodatno legirane silicijem i olovom. Silicij ovim legurama poboljšava tehnološka svojstva (livljivost), čime je omogućeno lijevanje tankostjenih odljevaka složene konstrukcije (debljine stijenke do 0,8 mm) [7].

### 3.4. Priprema legura za lijevanje

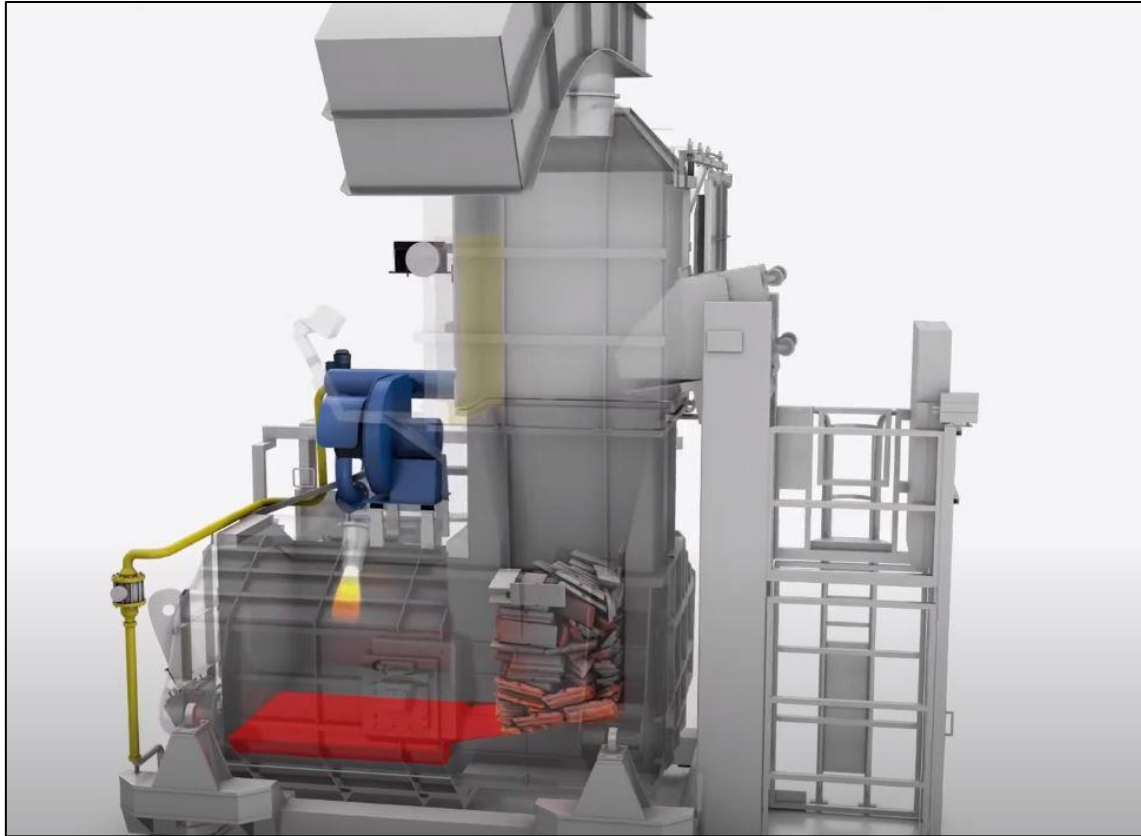
Priprema aluminijske taline za lijevanje u kalupe na tlačnim strojevima izvodi se u talionici aluminijska. Kako je gore navedeno, za visokotlačno lijevanje s hladnom komorom talina se priprema izvan ljevačkog stroja (u ovom slučaju u talionici) te se potom u loncima prevozi do peći za držanje koja se nalazi kod tlačnog stroja. Taljenje aluminijska i dobivanje taline za lijevanje je vrlo važan dio procesa lijevanja jer kvaliteta odljevaka uvelike ovisi o kvaliteti same taline. Iz tog razloga se prilikom taljenja moraju strogo poštivati propisani tehnološki postupci. Peći za taljenje dijele se prema njihovoj konstrukciji i prema načinu zagrijavanja. Izvor energije mogu biti fosilna goriva (koks, nafta i plin), električna struja (električni luk, električni otpor, indukcija) te toplina dobivena kemijskom reakcijom.

Svaka peć radi na principu da se metal rastali i pregrije na temperaturu koja je iznad temperature tališta metala (likvidusa) i na toj se temperaturi održava sve do ulijevanja taline u kalup. Vrste peći su [7,8]:

- Kupolke (sa ili bez koksa)
- Plamene peći
- Elektrolučne peći

- 
- Elektrootporne peći
  - Indukcijske peći.

U LTH Metalnom lijevu, aluminij se tali u nagibnim plinskim koritastim pećima (vrsta plamenih peći). Općenito se plinske koritaste plamene peći koriste u većini ljevaonica u kojima se tali veća količina aluminija. U peć se stavljaju blokovi aluminija (ingoti) i kružni (povratni) materijal. Aluminijskih blokova mora biti minimalno 50% kako bi kvaliteta dobivene taline bila prihvatljiva za lijevanje. Dijelovi plamene koritaste peći su korito (u njega dolazi materijal za taljenje) i ložište (mjesto izgaranja goriva). Plamene peći lože se tekućim gorivom ili plinom. Peći koje se lože tekućim gorivom ili plinom imaju ugrađene plamenike u ložištu ili radnom prostoru. Prijenos topline odvija se od plamenika na svod i zidove peći. Oni se tada zagrijavaju na temperature između 1100 i 1200°C te zatim prenose toplinu na metal zračenjem. To je veća temperatura nego što je temperatura taline prilikom lijevanja u kalup (tada je talina na temperaturi oko 650 do 720°C). Ovakve peći uobičajeno imaju i više od jednog plamenika, a plamenici ne smiju biti izravno usmjereni na metal jer bi moglo doći do oksidacije i većeg gubitka metala. Osim toga, oksidaciju može uzrokovati lokalno pregrijavanje taline, a rješenje tog problema je indirektno zagrijavanje metala (proces zagrijavanja se odvija u posebnoj komori). Metal, odnosno talina se može zaštititi od oksidacije dodavanjem soli. Slika 21 prikazuje StrikoWesthofen nagibnu plinsku koritastu peć [2,8,9].

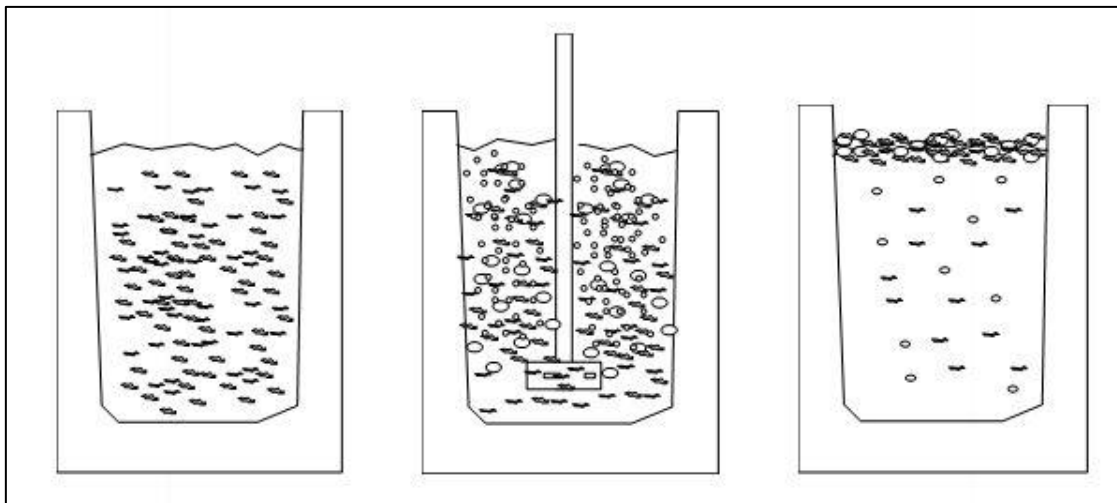


**Slika 21 Nagibna plinska peć za taljenje aluminija (StrikoWestofen) [17]**

Rastopljena talina ima vrlo veliku sklonost asporbcije raznih plinova (vodika, kisika, ugljičnog monoksida i ugljičnog dioksida). Najveći problem stvara vodik koji apsorbiran u talini ima najveći utjecaj na kvalitetu odljevaka. Prisutnost vodika u talini naziva se naplinjenost. Naplinjenost taline utječe na odljevke dobivene lijevanjem tako da se zbog nje pojavljuje plinska poroznost, smanjuju se mehanička svojstva i povećava problem propuštanja odljevaka (vodo nepropusnost).

Talina se iz peći izlijeva u lonac za razvoženje i dolazi do uređaja za otplinjavanje (degazaciju) taline koji služi prvenstveno za odvajanje molekula vodika iz taline, ali i za odvajanje ostalih nečistoća koje su nastale u procesu taljenja. Otplinjavanje je proces propuhivanja taline s plinom visoke čistoće (dušik ili argon). Plin se upuhuje kroz cijev u talinu i zbog vrtnje rotora se ravnomjerno raspoređi po cijelom volumenu taline. Pri tome se mjehuri plina podižu na površinu i sa sobom povlače molekule vodika i zaostale nečistoće. Nakon tog procesa talina je spremna za transport do peći za držanje iz kojih se onda lijeva u tlačnu komoru. Slika 22 prikazuje način otplinjavanja taline. Na prvoj slici vidi se rastaljeni

metal zajedno s nečistoćama u loncu, na drugoj slici je u lonac s talinom uronjen rotor koji upuhuje plin u talinu, a na trećoj slici je vidljivo da su sve nečistoće isplivale na površinu [18].



**Slika 22 Postupak otplinjavanja taline [10]**

Temperatura materijala (taline) se smanjuje od taljenja u peći do lijevanja. Rastaljeni metal u talioničkoj peći uobičajeno ima temperaturu oko  $730^{\circ}\text{C}$ , nakon lijevanja u lonac i prilikom procesa otplinjavanja temperatura se smanji na  $710^{\circ}\text{C}$ , nakon otplinjavanja i tijekom transporta dolazi do temperature oko  $690^{\circ}\text{C}$ . Na toj temperaturi mora biti i u peći za držanje. Kada se ulije u tlačnu komoru temperatura se spusti na  $670\text{-}680^{\circ}\text{C}$  [7]. Temperatura taline u peći za držanje postavlja se ovisno o vrsti legure aluminija. U LTH se stavlja od  $680^{\circ}\text{C}$  do  $710^{\circ}\text{C}$  i prema tome se prilagođavaju temperature u talioničkim pećima i u pećima za držanje.

## 4. POGREŠKE NA ODLJEVCIMA

Lijevanje je vrlo složen proces nastanka odljevka (gotovog proizvoda) te iz tog razloga svaka nepravilnost i svako odstupanje od točno propisanog tehnološkog postupka lijevanja može dovesti do malih ili velikih pogrešaka na odljercima. To se odnosi na cijeli proces, od taljenja materijala, otplinjavanja, prevoženja taline do peći na stroju, rada stroja i samog lijevanja u kalupe. Grešaka ima zaista mnogo, a osnovna teoretska podjela napravljena je u 7 klasa prema njihovom vanjskom izgledu [8]:

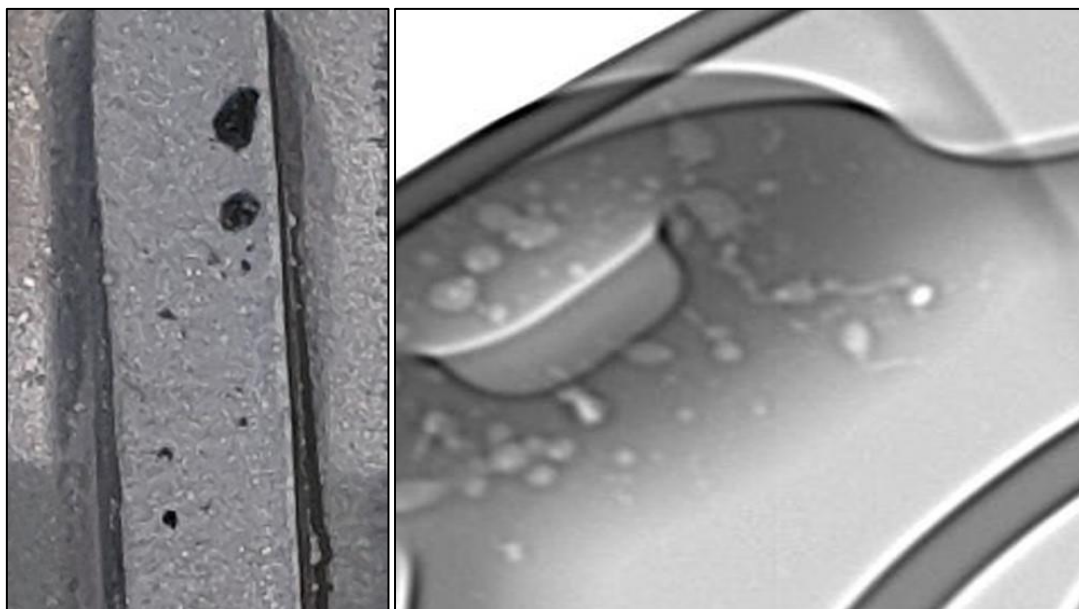
- A) Metalne izrasline
- B) Šupljine
- C) Prekid kontinuiteta mase
- D) Pogreške na površini odljevka
- E) Nepotpun odljevak
- F) Netočne mjere ili oblik
- G) Uključci i nepravilna struktura

Svaka od gore navedenih pogrešaka može nastati zbog više uzroka u isto vrijeme. Uzroci koji utječu na stvaranje pogrešaka su: kvaliteta taline, temperatura taline, parametri prve, druge i treće faze lijevanja, postotak popunjenosti tlačne komore, podmazivanje klipa, sila zatvaranja alata, vrijeme hlađenja, vrijeme ciklusa, sila izbacivanja komada iz alata, vakuum, temperatura površine alata, konstrukcija alata, itd. U idućem dijelu opisat će se najčešće pogreške koje se javljaju u proizvodnji te najčešći uzrok (ili uzorci) zbog kojih one nastaju.

### 4.1. Plinska poroznost

Plinska poroznost sastoji se uglavnom od plina koji je zarobljen u talini utisnut u kalupnu šupljinu tijekom prve i druge faze lijevanja. Zarobljeni plinovi (mjehurići plinova) se tijekom faze hlađenja unutar kalupa šire kompenzirajući skupljanje volumena taline. Veličina zračnih mjehurića (zračne poroznosti) ovisi o tlaku treće faze. Što je tlak veći, to je manji promjer plinskih pora (mjehura). Ova se nepravilnost ne može vidjeti na samom odljevku, već se uočava pregledom komada na rendgenu (Slika 23), presijecanjem odljevka tako da se vidi

unutrašnjost ili nakon strojne obrade (ukoliko se obrađuju mjesta na kojima je poroznost tada će se ona vidjeti kao rupa u npr. strojno napravljenom navoju). Zračna poroznost je uvijek pravilnog oblika (okrugle šupljine).



**Slika 23 Plinska poroznost na odljevku (lijevo) i na RTG slici (desno)**

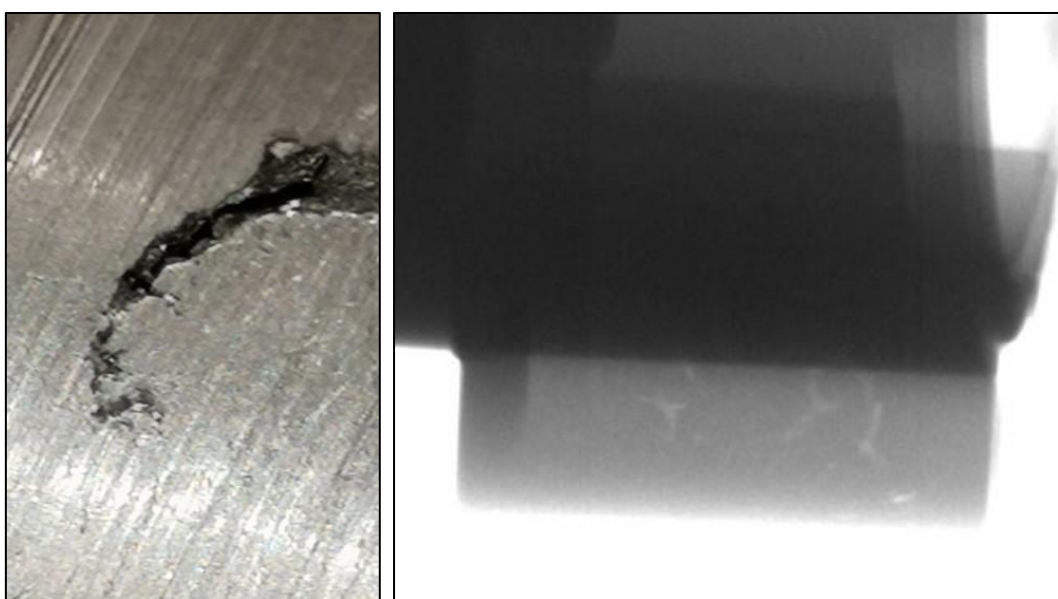
Do pojave plinske poroznosti može doći i kada se razvijaju plinovi zbog reakcije metala i jezgre. To se događa zbog prevelike količine vlage u kalupu (jezgri) te zbog razvijanja plinova iz premaza. Zračna poroznost sprječava se tako da se osigura dobro odvođenje zraka i plinova iz kalupa i jezgra. Isto tako, nakon premazivanja kalupa potrebno je dobro osušiti kalup (da ne bude zaostale vlage na kalupu), a to se radi ispuhom nakon premazivanja kalupa [7,8,10].

#### **4.2. Poroznost skupljanja**

Za razliku od plinske poroznosti čiji su mjehuri (pore) pravilnog, okruglog oblika, poroznost skupljanja se manifestira u obliku duguljastih šupljina (grube površine i gruba, nepravilna geometrija). Ova se poroznost javlja prvenstveno u područjima debelih stijenki odljevka te u područjima koja se zadnje hlade (skrućuju). Kako je ranije objašnjeno, volumen legure aluminijske se smanjuje tijekom prelaska iz tekućeg u kruto stanje i to se kompenzira djelovanjem tlaka na klip u trećoj fazi lijevanja. Ukoliko se to skupljanje ne kompenzira

dovoljno, pojavljuje se poroznost skupljanja. Gubitak volumena kod aluminijskih legura je od 3 do 7%, ovisno o leguri [19].

Poroznost skupljanja javlja se prvenstveno u zonama debelih stijenki odljevka. Slika 24 prikazuju poroznost skupljanja na odljevku te rendgentski snimak. Kada se usporede slike (rendgentske i slike odljevaka) plinske poroznosti i poroznosti skupljanja, jasno su vidljive razlike te se prema tome na različite načine optimira proces lijevanja kako bi se te greške uklonile [20].



**Slika 24 Poroznost skupljanja na odljevku (lijevo) i na RTG slici (desno)**

Poroznost skupljanja rješava se tako da se konstrukcija odljevka, odnosno kalupa radi (konstruira) tako da se izbjegava nagomilavanje materijala (debele stijenke) i da nema velikih razlika u debljinama stijenki [8].

### **4.3. Nedolivenost**

Kod nedolivenosti pojedine zone odljevka nisu uopće popunjene ili su djelomično ispunjene. Rubovi odljevka nisu oštri. Takva greška obično se pojavljuje na kutovima, rebrima ili drugim tankostijenim područjima odljevka (Slika 25). Mogući uzroci su niska temperatura

ulijevanja, nedovoljna livljivost metala, mala površina presjeka uljevnog sustava ili loša konstrukcija uljevnog sustava (ako uljevni sustav nije prilagođen obliku odljevka).



**Slika 25 Nedolivenost na odljevku**

Osim gore navedenih uzroka nedolivenosti, mogući uzorci su i nedovoljno otplinjavanje i ventilacija kalupa, niska temperatura taline ili nizak tlak pri tlačenju taline u sve 3 faze lijevanja. U tim slučajevima se greška sprječava boljim otplinjavanjem i boljom ventilacijom kalupa, povećanjem brzine taline te povećanjem temperature taline i kalupa [7,10].

#### **4.4. Pukotine na kalupu i odljevku**

Postoje pukotine na kalupu i na odljevku. Pukotine na kalupu su zamorni lomovi čelika matrice (kalupa za lijevanje) uzrokovani toplinskim napreznjima (varijacijama u temperaturi) koja tijekom vremena dovode do oštećenja materijala i razaranja metalnog kalupa. Taj dio kalupa se mora zamijeniti ili zavariti i tek onda nastaviti s lijevanjem. Rješavanje problema je u promjeni materijala od kojeg se izrađuje alat te u regulaciji temperature taline (usklađivanje temperature taline s temperaturama alata kako ne bi dolazilo do velikih temperaturnih šokova i pucanja čelika). Upotrebom žilavih materijala za izradu kalupa stvaranje pukotina će biti usporeno. Slika 26 prikazuje primjer pukotine kalupa nastale uslijed termo mehaničkih napreznja [7,10].





**Slika 26 Pukotine na kalupu**

Napukline na odljevku (tople pukotine) su puknuća odljevaka koje uzrokuju vlačna naprezanja na samom kraku skrućivanja, u blizini solidus temperature. Također, ako na odljevku postoje rebra za ojačanje, može doći do pucanja odljevka kada rebra zaglave u kalupu za lijevanje te dolazi do velikog vlačnog naprezanja i puknuća. Slika 27 prikazuje primjer tople pukotine na odljevku [7,10].



**Slika 27 Topla pukotina na odljevku**

#### **4.5. Srh**

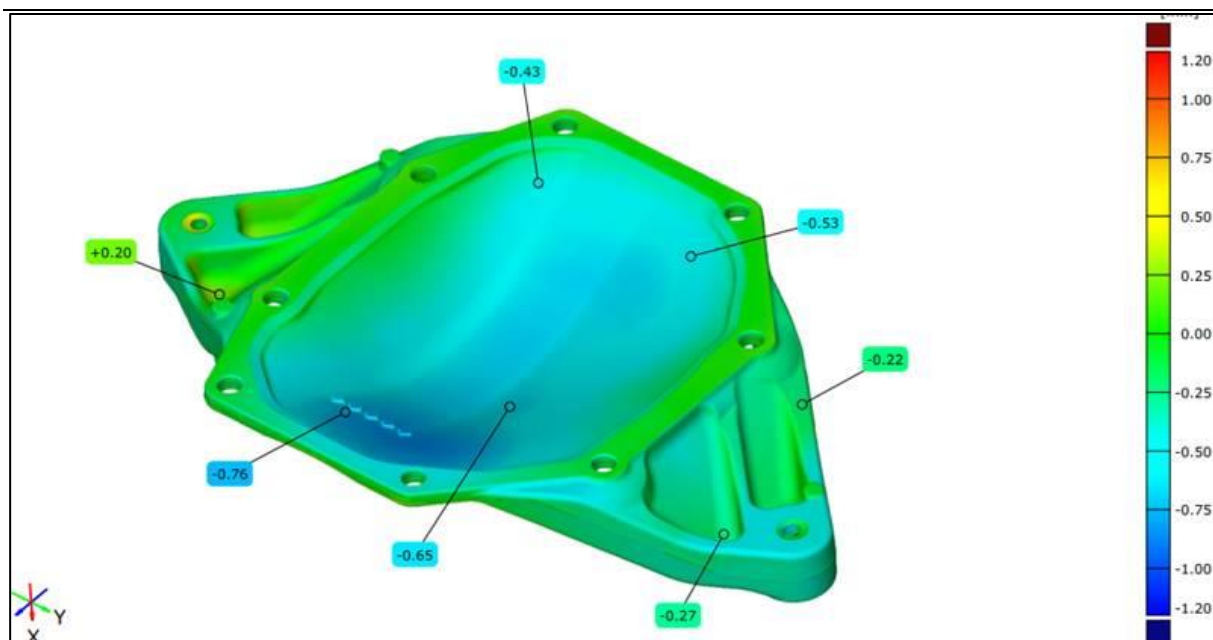
Srh je pojava viška materijala izvan granica odljevka. To su ravna izbočenja neujednačene debljine, nepravilnih rubova i oblika. Pojava srha očekuje se na diobenoj ravnini kalupa, na mjestima gdje se dva dijela kalupa međusobno spajaju ili na mjestima izlaska jezgri iz odljevka (Slika 28). Mogući uzrok je zračnost između dva dijela kalupa ili između jezgre i jezgrenih oslonaca u metalnom kalupu. U tom slučaju se kontrolira oblik i dimenzije kalupa, jezgre i jezgrena oslonci te se usklađuje njihov međusoban odnos. Također se provjerava stezanje (zatvaranje) kalupa. Slika 28 prikazuje dio uljevnog sustava i veliku površinu srha (s lijeve strane grane). Srh debljine manje od 0,1 mm može se lako ukloniti rukom, dok se deblji srh (više od 0,1 mm mora ukloniti nekim reznim alatom). [7]



**Slika 28 Srh na odljevku**

#### **4.6. Dimenzijska odstupanja**

Pod dimenzijska odstupanja spadaju sve greške kada mjere odljevka ne odgovaraju mjerama na crtežu i modelu. To se provjerava mjerenjem komada na mjernom uređaju ATOS. Uređaj skenira dobiveni odljevak komad u 3 dimenzije i uspoređuje ga s 3D modelom (Slika 29). Nakon mjerenja se dobije slikovni prikaz gdje ukoliko se odljevak u potpunosti slaže s modelom, prikaz je zelene boje, a ukoliko postoji odstupanje onda ide u crvenu ili plavu boju (ovisno o tome odstupa li odljevak u plusu ili minusu). Prema tome na kojem mjestu na komadu postoji dimenzijsko odstupanje se gleda kako riješiti grešku [7,10].



**Slika 29 ATOS mjerenje odljevka i prikaz dimenzijskog odstupanja**

Odstupanje dimenzija odljevaka nakon tlačnog lijevanja ovisi o:

- Točnosti izrade kalupa za lijevanje pod tlakom
- O istrošenosti kalupa (promjeni dimenzije kalupa u eksploataciji)
- Nejednakom skupljanju legure odljevka
- Netočno sklapanje kalupa (pokretne i nepokretne strane)

Dimenzije odljevka dijele se na povezane i slobodne dimenzije. Povezane dimenzije vezane su kotama na crtežu, a odnose se na dijelove koji su vezani uz druge dijelove, na međuosna odstupanja otvora i na dijelove odljevka za stezanje tijekom strojne obrade. Slobodne dimenzije nemaju označena točna odstupanja, ali ipak ne mogu biti proizvoljne.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Tvrtka LTH Metalni Lijev proizvodi dijelove za automobilsku industriju. Svaki komad (pozicija) ima svoj brojčani naziv čiji prvi dio naziva ukazuje o kojem se kupcu komada radi, a drugi dio je naziv pozicije kako bi se pozicije razlikovale u dokumentaciji. Uglavnom je postupak dobivanja komada za krajnju prodaju jednak za sve pozicije, a sastoji se od:

- Tlačno lijevanje i kontrola kvalitete
- Pjeskarenje
- Strojna obrada
- Pregledavanje i pakiranje za slanje kupcu.

Svaki odljevak kontrolira se u svim fazama proizvodnje unutar tvornice, a najbitnija je kontrola kvalitete komada u ljevaonici. Na početku svake serije potrebno je vizualno pregledati komade i odnijeti ih na rendgen i na kontrolnu strojnu obradu. Ukoliko je s komadima sve u redu, lijevanje se nastavlja. Ako se uoči neki problem onda na stroj dolazi tehnolog zadužen za tu poziciju i provjerava proces i po potrebi optimira kako bi se dobili komadi najbolje moguće kvalitete (po mogućnosti idealni i bez greške). Nekada je to teško postići jer je lijevanje takva vrsta proizvodnje komada gdje može doći do raznih grešaka (kako je opisano u gornjim poglavljima). Svaka optimizacija sastoji se od nekoliko glavnih koraka kroz koje se mora proći. Uglavnom su to slijedeće stavke:

- Pregled parametara stroja i usporedba s tehnološkom mapom (tehnološka mapa sastoji se od propisanih parametara i čini ju desetak dokumenata kojima se obuhvaćaju gotovo sve stavke unutar stanice, kao npr. tlačni stroj, robot, krzalica, program mazanja i drugo)
- Pregled stroja (potrebno je pogledati dijagram lijevanja i vidjeti ostvaruje li stroj sve potrebno, npr. brzinu prve i druge faze lijevanja, tlak treće faze, zadane parametre vakuuma i drugo)
- Pregled podmazivanja alata nakon ciklusa lijevanja (npr. može doći do zakazivanja naprave za podmazivanje i pri tome se alat dovoljno ne ohladi i slično)
- Robotsko uzimanje komada iz alata (ako robot ne uhvati tabletu dovoljno dobro odljevak se može slomiti)

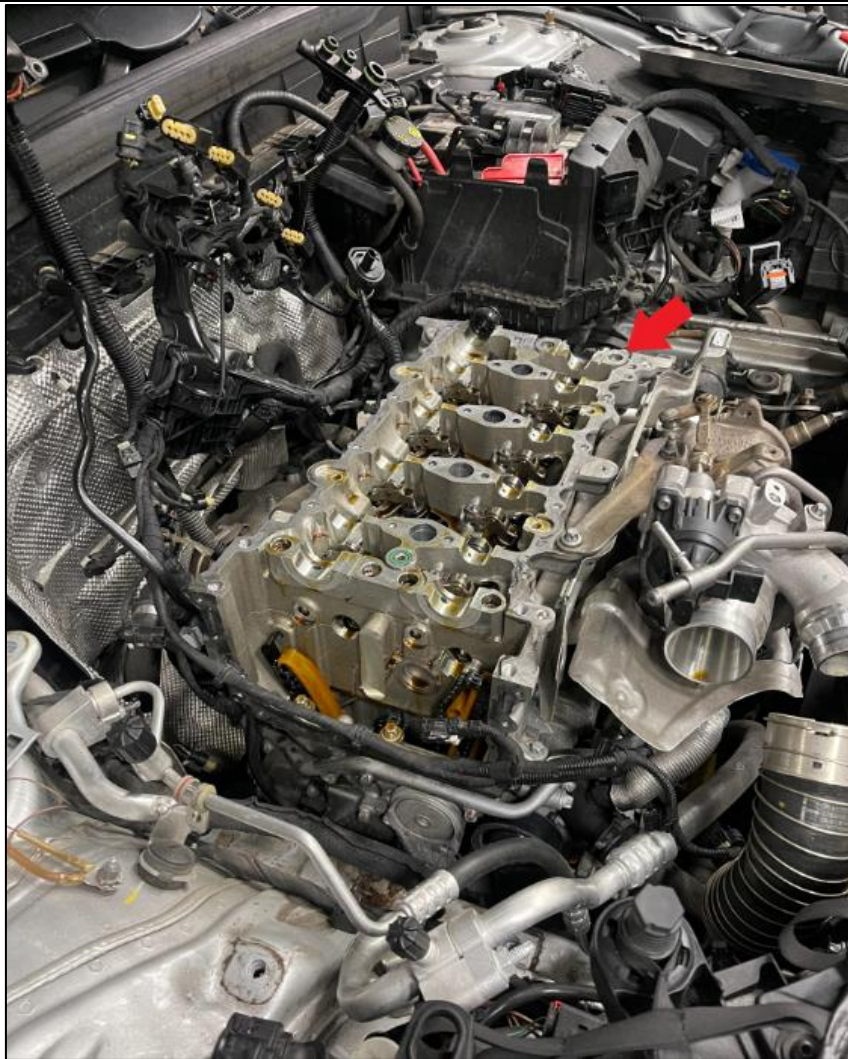
- 
- Krznanje komada (ako se komad ne ohladi dovoljno prije dolaska u krzalicu može doći do ribanja komada i sličnih grešaka).

Ukoliko dođe do neke od gore navedenih grešaka proces se zaustavlja i popravljaju se dio procesa na kojem se stvara greška. Iskustvo tehnologa je vrlo bitno u situacijama rješavanja grešaka jer se već pogledom na samu grešku zna razlog zbog kojeg se greška dogodila i lako ju je riješiti. Jedna od najtežih grešaka za ispravljanje je poroznost (plinska i poroznost skupljanja). U slučaju pojave poroznosti najprije se pregledaju sve gore navedene točke. Ako nema odstupanja u svim točkama i naizgled je sve u redu s procesom, kreće se s optimiranjem. Eksperimentalni dio ovog rada bavi se rješavanjem problema poroznosti pozicije 624.15. U ovom će poglavlju biti potpuno opisan cijeli proces rješavanja problema poroznosti (i plinske i poroznosti skupljanja) na visokotlačnom lijevanju i svi postupci koji se rade kako bi se dobili odljevci zadovoljavajuće kvalitete.

### **5.1. Pozicija 624.15 i funkcija komada**

Pozicija 624.15 zajedno s još 3 slične pozicije dio je glave motora u automobilu, odnosno te 4 pozicije sklopljene u sklop čine mostove (nosače) bregastog vratila unutar glave motora. Osim što nose bregasto vratilo (kako samo ime kaže), služe i za podmazivanje kroz uljne kanale. Slika 30 prikazuje motor i na njoj je označen komad čija se optimizacija lijevanja i proces izrade opisuju u ovom radu.





**Slika 30 Pozicija 624.15 u motoru automobila**

Slika 31 prikazuje glavu motora i bregasto vratilo na njoj. Na slici je označen isti odljevak (imena 624.15) kao i slici iznad.



**Slika 31 Bregasta vratila i glava motora**

Koljenasto vratilo je glavni rotacijski element motora koji prenosi rad iz cilindra na osovinu motora rezultirajući okretnim momentom [21]. Nalazi se u motorima s unutarnjim izgaranjem. Glavna uloga koljenastog vratila je naizmjenično pretvaranje pravocrtnog gibanje klipova pretvara u rotacijsko gibanje. Osim pogonske osovine vozila ili stroja, koljenasto vratilo u benzinskim i Dieslovim motorima pogoni preko zupčanika, lančanika ili klinastoga remena i pomoćne uređaje motora, kao što su bregasto vratilo, razvodnik paljenja, crpka ulja za podmazivanje, crpka vode za hlađenje, ventilator, generator (dinamo) ili alternator [22]. Slika 32 prikazuje bregasto vratilo.



**Slika 32 Koljenasto vratilo [23]**



---

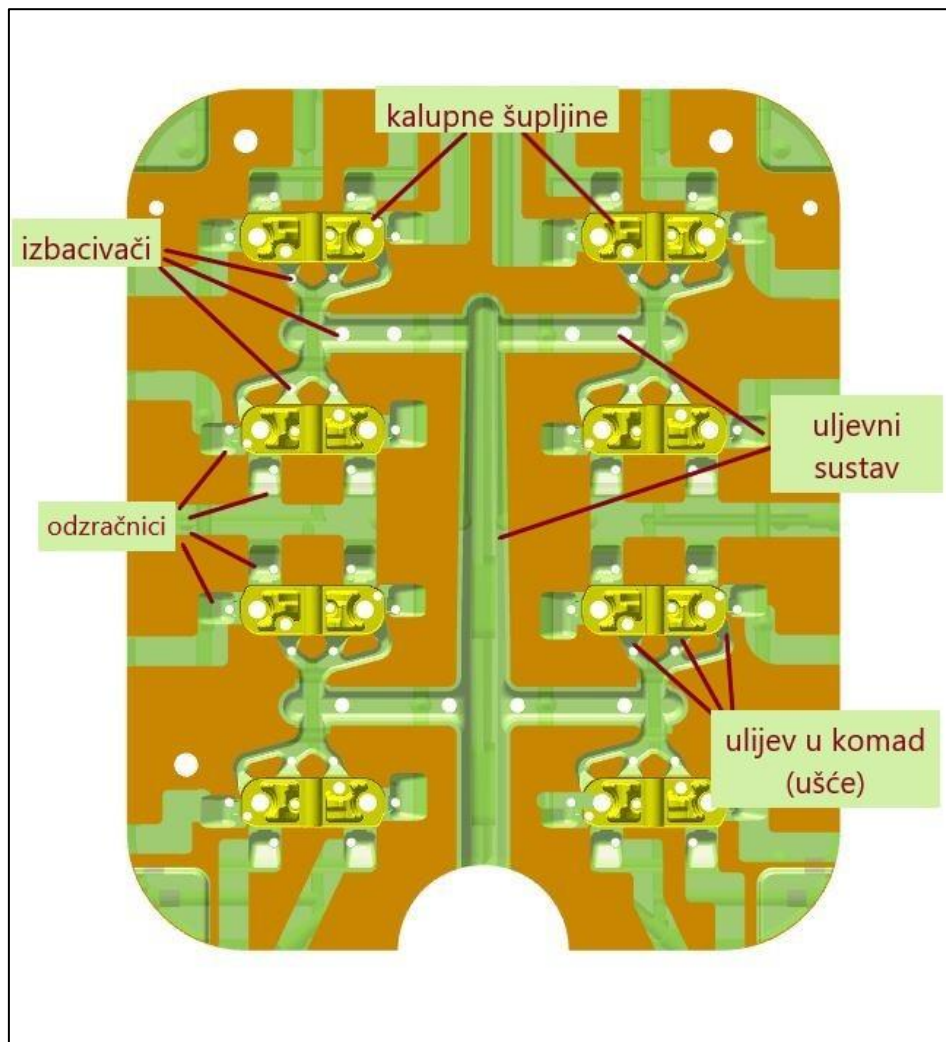
## 5.2. Alat i stroj pozicije 624.15

Pozicija 624.15 je dio alata na kojem se nalazi 8 jednakih gravura (odljevaka), što znači da se jednim udarcem na tlačnom stroju, nakon operacije krzanja, dobije 8 identičnih komada koji se potom pakiraju i idu dalje na potrebne operacije (pjeskaranje i obrada komada u CNC obradnom centru). Tlačni alati s više gravura su kompliciraniji nego npr. alati s jednom ili dvije gravure jer se prilikom lijevanja, odnosno prilikom optimiranja procesa lijevanja mora uzeti u obzir da će rastaljeni aluminij prije doći do gravura koje su bliže klipu, a nešto kasnije će doći do daljnjih gravura. Zbog toga se takvim pozicijama pridonosi veća pažnja te ih je teže optimirati.

U tvrtci LTH ove su pozicije dugo godina radile na stroju marke IDRA (stroj sa silom zatvaranja 7500 kN) i uvijek su komadi bili podosta porozni. Razlog tome je što stroj IDRA, za razliku od strojeva Bühler (koji su sada većinski u firmi LTH te se njima zamjenjuju svi strojevi drugih proizvođača koji su bili prije), nije podložan optimiranju procesa na jednostavan način kao što je to slučaj sa Bühler strojevima. Pozicija 624.15 uglavnom je jednostavan komad s podosta debelom stjenkom radi čega se često javljaju plinska poroznost i poroznost skupljanja na dijelovima najdebljih stjenki. Obzirom da se u svijetu automobilske industrije teži tome da komadi budu sve bolji i s minimalno grešaka (odnosno da budu bez ikakvih grešaka), kupac Mercedes je u zadnjih par godina postrožio zahtjeve kvalitete te se svi proizvođači njihovih dijelova moraju tome prilagoditi i svoje proizvode usavršiti kako bi izgledom i kvalitetom odgovarali kupcu, a kasnije i krajnjem korisniku.

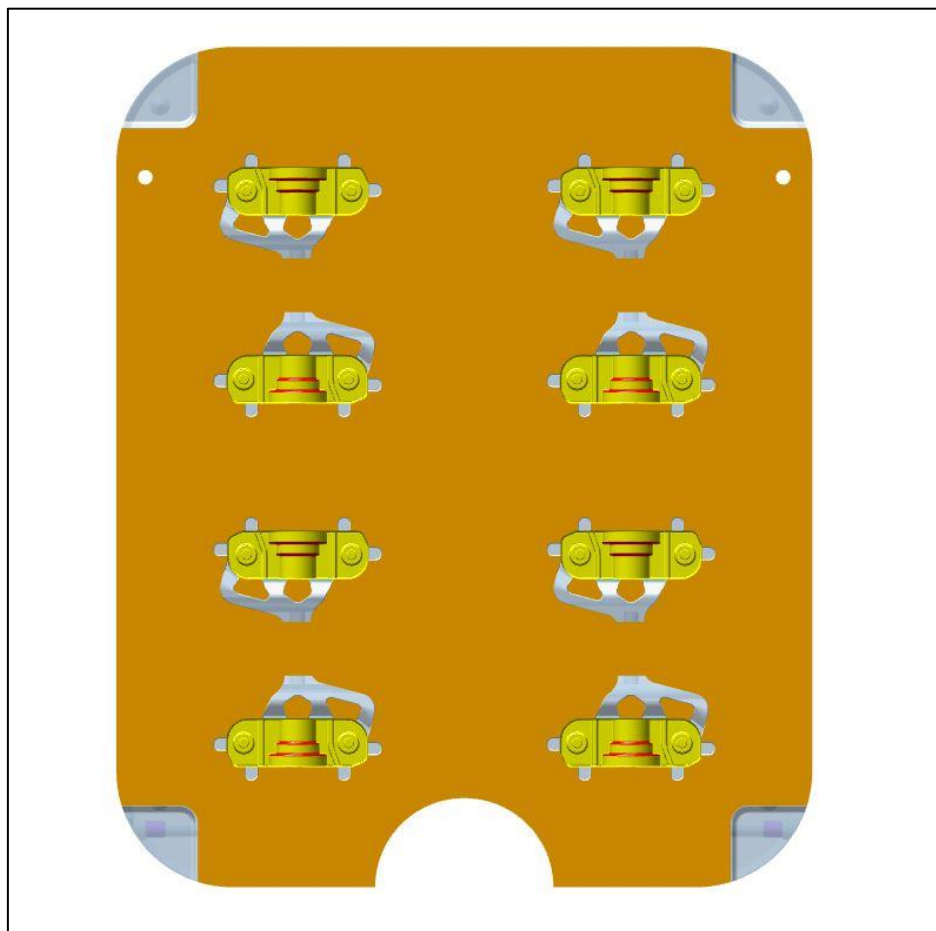
Kako je već navedeno, stroj IDRA nije bio pogodan za dobivanje boljih komada tako da je odlučeno da će se pozicija prebaciti na stroj Bühler Ecoline te će se proces optimirati dok se ne dobiju komadi zadovoljavajuće kvalitete (bez poroznosti). Rješavanje problema poroznosti (bilo plinske, bilo poroznosti skupljanja) nije jednostavan proces već se takvom problemu mora pristupiti s više različitih stajališta. U ovom konkretnom slučaju najprije se pokušalo optimirati proces putem parametara, potom je kontaktiran odjel konstrukcije kako bi napravili izmjene na tlačnom alatu, nakon toga je došao prepravljani alat i napravljena je proba alata s ponovnim optimiranjem parametara.

Svaki alat ima svoj vijek trajanja, uobičajeno se koristi do unaprijed određenog broja udaraca (otprilike 100 000 – 150 000 udaraca) ili iznimno prije toga ako dođe do nekog većeg loma ili oštećenja alata. Nakon završetka rada alata, on se otpisuje te ga zamjenjuje drugi alat. Prilikom izrade novog alata, konstrukcija kontaktira tehnologe koji rade s tim alatom kako bi s njima podijelili informacije o eventualnim greškama i problemima s kojima se suočavaju tijekom rada stroja i lijevanja komada. Iz tog razloga svaki slijedeći alat može biti malo drugačiji od prethodnog, a sve u svrhu dobivanja boljih komada i poboljšavanja cijelog procesa visoko tlačnog lijevanja. Model alata ove pozicije prikazan je na slikama ispod. Slika 33 prikazuje pokretnu stranu alata i na njoj su označeni svi vidljivi dijelovi alata.



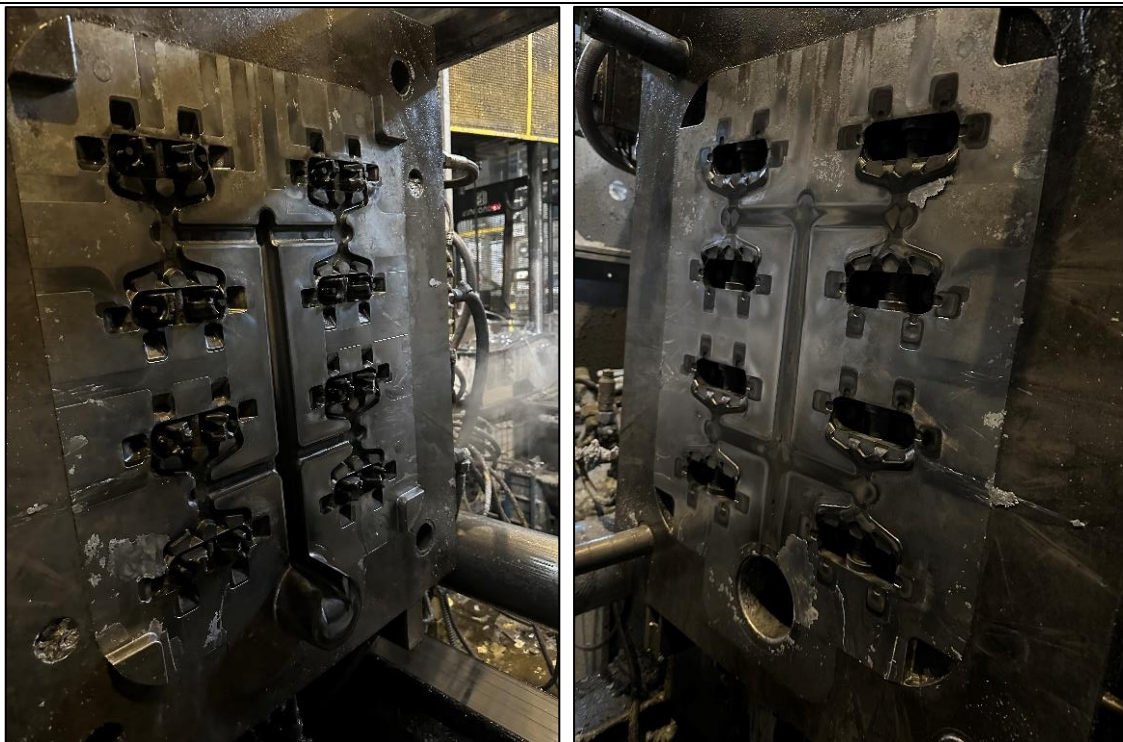
**Slika 33 Model pokretne strane alata pozicije 624.15**

Slika 34 prikazuje nepokretnu stranu alata. Kako je već ranije opisano, kada se te dvije polovice alata (kalupa) zatvore, aluminij popunjava šupljine i dobije se odljevak.



**Slika 34 Model nepokretne strane alata pozicije 624.15**

Slika 35 prikazuje alat kako on u stvarnosti izgleda.



Slika 35 Alat pozicije 624.15

Stroj na kojem se radila serija lijevanja je Bühler Ecoline sa silom zatvaranja od 6600 kN. Slika 36 prikazuje stroj Bühler Ecoline.



Slika 36 Stroj Bühler Ecoline [24]

Osim modela stroja Ecoline, u LTH postoje još i Bühler Evolution i Bühler Carat koji su puno napredniji od Ecoline-a.

### 5.3. Proračun tlačnog lijeva i postavljanje parametara lijevanja

Optimiranje procesa započinje proračunom. Proračunom se dobiju vrijednosti na temelju kojih se napravi dijagram preporučenih vrijednosti za početak lijevanja. Sve formule koje se koriste u proračunu tlačnog lijeva dobivene su iz firme Bühler.

Najbitniji podaci na temelju kojih se proračunava lijevanje su:

- Mase (masa cijelog udarca, masa svih okrzanih komada koji se nalaze u jednom udarcu te masa svih odzračnika)
- Zbroj svih poprečnih presjeka ušća (sva mjesta gdje se aluminij ulijeva u komad pomnoženo s brojem komada u jednom udarcu)
- Zbroj svih poprečnih presjeka ušća u odzračnike
- Sila zatvaranja stroja
- Podaci o klipu i cilindru (promjer klipa i aktivna dužina komore za lijevanje, odnosno cilindra).

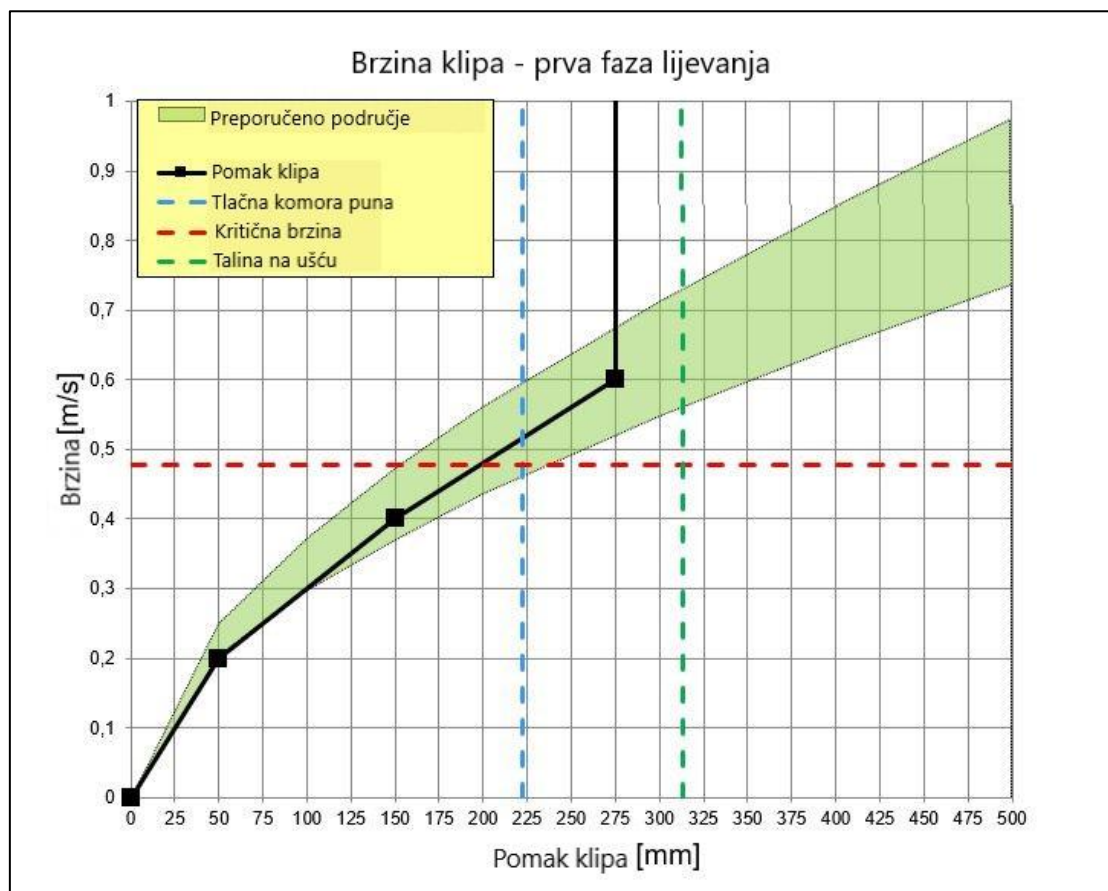
Ispod navedene vrijednosti dobiju se iz proračuna:

- Postotak popunjenosti komore
- Točka hoda klipa u kojem je komora 100% puna
- Točka hoda klipa u kojem je talina popunila uljevni sustav (granu) i došla do ulijeva u komad
- Točka hoda klipa u kojem je talina popunila komad i došla do ušća u odzračnike
- Točka hoda klipa u kojem je punjenje završeno
- Srednja brzina taline
- Vrijeme punjenja, itd.

Od dobivenih podataka dobije se i preporučeni dijagram lijevanja za prvu, sporu fazu. Vrlo je bitno dobro optimirati prvu fazu lijevanja kako se ne bi zarobio zrak u komori koji tijekom

gibanja klipa i punjenja taline u kalup završi u komadima i nema gdje izaći. Zrak nakon što talina popuni šupljinu kalupa izlazi kroz odzračnike, ali kada se oni popune aluminijem, ako ima previše zraka on ostane u 'zarobljen' u komadu jer nema gdje izaći.

Dijagram dobiven iz proračuna za poziciju 624.15 nalazi se na slici ispod (Slika 37). Zelenom bojom označeno je područje unutar kojeg treba postaviti točke prve faze (spore faze lijevanja). Plavom okomitom linijom označeno je na kojem će putu klipa komora biti 100% popunjena aluminijem. Zelena okomita linija prikazuje na kojem će putu klipa talina doći do mjesta ušća u komad. Ona također označava kraj prve faze lijevanja i početak druge, brze faze. Crvena okomita linija predstavlja kritičnu brzinu. To je maksimalna brzina do koje se smije gibati klip do trenutka kada talina ne ispuni cijelu komoru. Ukoliko se stavi veća brzina od kritične, dolazi do stvaranja vala unutar komore i zarobljenog zraka koji dovodi do problema s poroznosti. Ovaj dijagram u procesu lijevanja služi kao orijentir kako postaviti parametre na stroj i u kojem smjeru krenuti s optimizacijom procesa.



Slika 37 Dijagram lijevanja za poziciju 624.15



Vrijednosti hoda klipa dobivene iz proračuna mogu se provjeriti tako da se napravi 'fill test' lijevanja na tlačnom stroju. U tlačni stroj se upisuje do koje točke se želi da klip ide i pokrene se ciklus lijevanja. Klip se zaustavi točno u zadanoj točki te se nakon hlađenja kalup otvori. Pri tome se može vidjeti koliki dio kalupa je ispunila talina. Na primjer, ako se zada da klip ide do točke 'talina na ušću', nakon što se razdvoje pokretna i nepokretna strana tlačnog alata, talina bi trebala biti na cijeloj grani i doći do svake gravure (komada) samo do početka – dakle, niti jedna gravura ne bi smjela biti popunjena s talinom. Ukoliko se nakon testa pokaže da je talina stvarno došla do mjesta na koje je trebalo i da se slaže s proračunom, to znači da je proračun točan i da se prema njemu mogu postaviti točke hoda klipa u ovisnosti o brzini i da će lijevanje biti u redu.

Točke prve faze lijevanja s kojima se krenulo lijevati postavljene su na crnoj krivulji na gornjem dijagramu (takve su upisane u tlačni stroj) te su prikazane na slici ispod (Slika 38).

PUT s (mm)		BRZINA v (m/s)	
s1=	50	v1=	0,2
s2=	150	v2=	0,4
s3=	275	v3=	0,6
s4=	11>2=275	v4=	5,0
s5=		v5=	
s6=		v6=	
s7=		v7=	
s8=		v8=	
sbr=		vbr=	
VRIJEME t (s)		TLAK p (bar)	
t1=	0,05	p1=	450
t2=		p2=	800
t3=		p3=	
t4=		p4=	

**Slika 38 Parametri lijevanja prije optimiranja**

Da bi se provjerila prva faza, napravljen je 'fill test' (odnosno test je napravljen kako bi se vidjelo ima li zarobljenog zraka u tlačnoj komori). Pri tome je stavljeno da se klip pomakne samo do točke u kojoj je tlačna komora 100% puna. Rezultat je prikazan na slici (Slika 39).



**Slika 39 'Fill test' – tlačna komora s puno zarobljenog zraka**

Slika 39 prikazuje talinu koja je ispunila tlačnu komoru s velikom količinom zraka u sredini. To znači da prva faza nije dobro postavljena jer će sav taj zrak završiti u komadu (previše je zraka da bi se on izvukao kroz sve odzračnike). Pretpostavka je da je brzina prve faze prevelika te da dolazi do turbulentnog strujanja i stvaranja vala koji zarobi zrak u tlačnoj komori (objašnjenje: Slika 16). Iz tog razloga je optimirana brzina prve faze (smanjena je) i nakon toga je ponovno napravljen fill test. Rezultat je vidljiv na slici (Slika 40).



**Slika 40 Ponovljeni 'Fill test' – tlačna komora bez zarobljenog zraka**



Slika 41 prikazuje nove parametre prve faze.

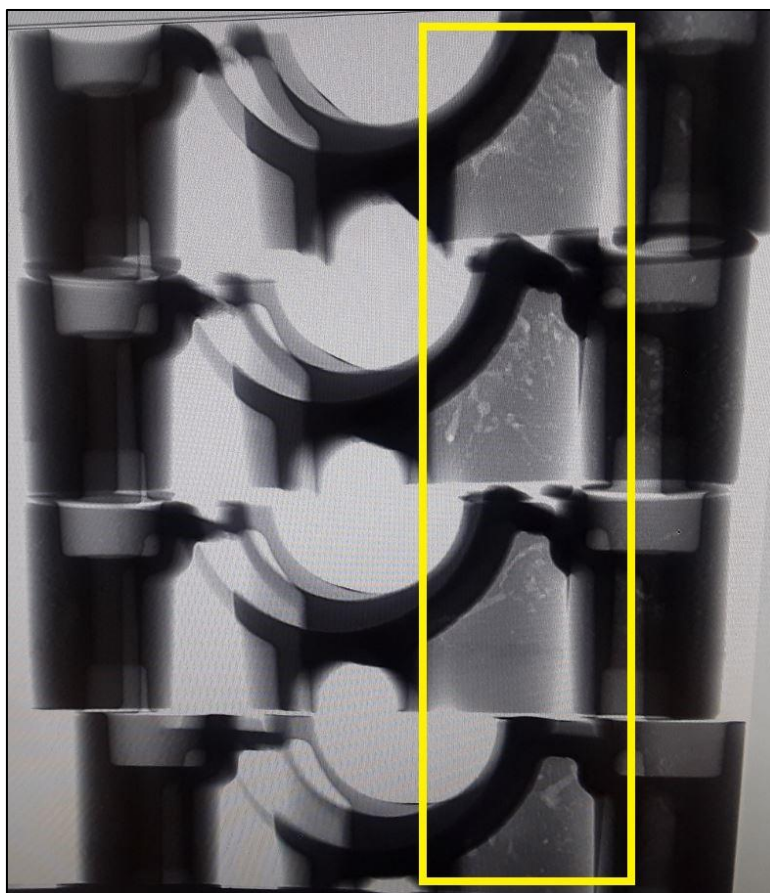
PUT s (mm)		BRZINA v (m/s)	
s1=	50	v1=	0,15
s2=	150	v2=	0,25
s3=	275	v3=	0,45
s4=	l1>2=275	v4=	5,0
s5=		v5=	
s6=		v6=	
s7=		v7=	
s8=		v8=	
sbr=	420	vbr=	2,5
VRIJEME t (s)		TLAK p (bar)	
t1=	0,05	p1=	450
t2=		p2=	800
t3=		p3=	
t4=		p4=	

Slika 41 Parametri nakon optimiranja 1. faze lijevanja

Na istom mjestu sada više nema zarobljenog zraka već je aluminij skroz popunio tlačnu komoru i klip će u nastavku udarca popuniti kalup bez viška zraka. Može se reći da je prva faza sada optimirana te se prelazi na postavljanje druge, brže faze. U drugoj fazi lijevanja klip ima višu brzinu od prve faze i ona služi za popunjavanje gravura (odnosno komada koji se žele na kraju dobiti). Dakle, manjom brzinom (prva faza) klip ide do samog ulaza u gravuru (do mjesta ulijeva) i onda drugom fazom popunjava gravuru. Za određivanje hoda klipa gdje će brzina prijeći iz manje u veću, koristi se podatak iz proračuna, a to je 'talina na ušću'. Treća faza je potisna faza. Počinje od trenutka kada je cijeli kalup ispunjen rastaljenim aluminijem. Klip tada tlakom iz multiplikatora pritišće talinu kojoj se tijekom skrućivanja (hlađenja) smanjuje volumen te ga je potrebno 'nadoknaditi'.

Provjera kvalitete dobivenih komada pri početku serije najprije se vrši vizualno – gledaju se svi komadi iz jednog udarca koji moraju biti bez ikakve greške (najčešće su to greške nepopunjenosti, komadi sa crnim flekama radi izbijanja vode, puknuti komadi i drugo). Ukoliko je vizualnim pregledom ustanovljeno da je kvaliteta komada prihvatljiva, oni se potom nose na rendgenski uređaj gdje se provjerava unutrašnjost komada, odnosno ima li plinske ili poroznosti skupljanja unutar komada (u njegovim stjenkama).

Nakon provjere komada na rendgenu ustanovljeno je da su komadi poprilično porozni te da kvaliteta komada nije zadovoljavajuća. Slika 42 prikazuje porozna mjesta na komadu. Komadi se ispituju na rendgenu tako da se stave 4 komada jedan na drugi i tako 2 puta (kako bi se ispitalo svih 8 komada koji čine jedan udarac). Poroznost se prepoznaje kao svjetlije područje jer zbog manje debljine stijenke prođe više rendgenskog zračenja. Ukoliko su ti mjehuri pravilnog, okruglog oblika tada se radi o plinskoj poroznosti, a ako su mjehuri više duguljasti onda se radi o poroznosti skupljanja. Na komadima na slici može se vidjeti da ima jednako i plinske i poroznosti skupljanja (vidljivi su i pravilni i nepravilni oblici mjehura).



**Slika 42 Plinska poroznost i poroznost skupljanja pozicije 624.15 (RTG)**

Ovi se komadi nakon lijevanja obrađuju u CNC obradnom centru gdje se skida dio materijala. Poroznost, odnosno rupe u komadu dobro se vide na obrađenim komadima, kao što prikazuju slike ispod (Slika 43).



**Slika 43 Poroznost na komadima pozicije 624.15 nakon obrade**

Sveukupno je nakon obrade bilo oko 7% škartnih komada zbog poroznosti, a tolerira se maksimalno 1-2%. Iz tog razloga se moralo nešto poduzeti kako bi se maksimalno smanjio škart. Najprije je optimiran proces, rađene su simulacije lijevanja, a potom je promijenjena konstrukcija alata.

#### **5.4. Optimiranje procesa u svrhu smanjenja poroznosti unutar komada**

Optimiranje lijevanja nije postupak u kojem se prolazi uvijek kroz iste korake rješavanja problema, već je to metoda pokušaja i pogrešaka. Optimiranje se izvodi nakon što je već napravljen proračun lijevanja i zadani su neki početni parametri, a komadi su loše kvalitete (imaju neku ponavljajuću grešku). Tijekom optimizacije se uobičajeno najprije mijenjaju parametri na tlačnom stroju na način da se ide iz krajnosti u krajnost (npr. može se testirati neka od točaka hoda klipa iz dijagrama ovisnosti brzine o putu klipa za 1. ili 2. fazu tako da se hod klipa stavi 30 mm prije ili 30 mm kasnije nego što je preporučeno u proračunu). Problematika je u tome što se malim promjenama vrijednosti neće dobiti komadi potpuno

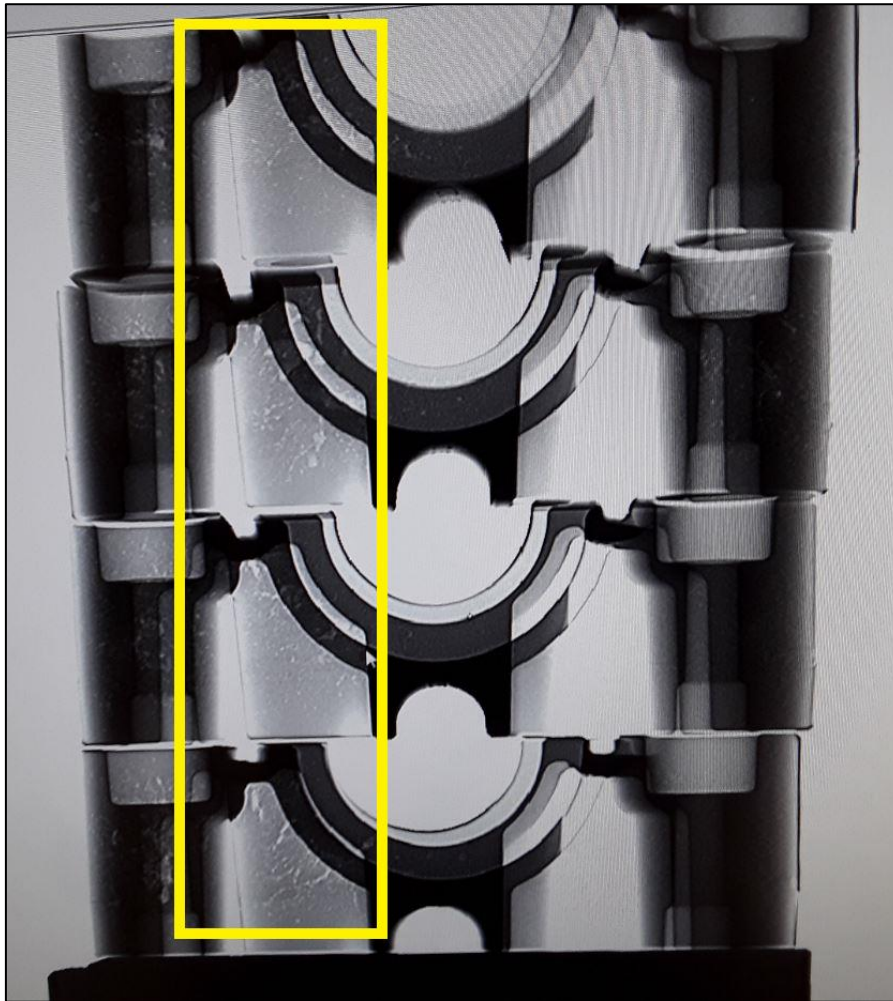
drugačije kvalitete već će te promjene uglavnom biti vrlo male, gotovo neprimjetne. Zato se u praksi tijekom optimiranja procesa vrlo loših komada (npr. ako je slučaj baš velike poroznosti) ispituje kvaliteta komada pri tlaku 3. faze od 800 bara, 1000 bara pa 1200 bara. Nakon svake promjene vrijednosti komadi se pregledavaju te se zapisuje je li se greška smanjila ili povećala i za koliko otprilike te se ide dalje u tom smjeru. Nakon promjene parametara, ukoliko se nije dobila zahtijevana kvaliteta, rade se simulacije lijevanja u svrhu promjene konstrukcije alata. To je u praksi tek drugi korak jer su konstrukcijske promjene alata i izrade simulacije vrlo zahtjevne i skupe. Npr. u LTH Metalnom lijevu postoji alatnica gdje se mogu napraviti manje promjene na alatu koristeći CNC obradni centar, ali za sve veće promjene alat se mora slati u neku drugu lokaciju gdje se proizvode alati (u slučaju ove firme te su lokacije u Sloveniji i Makedoniji). Osim troška samog popravka alata, trošak je sam transport, a uskraćeno je i vrijeme za koje bi se mogli lijevati komadi u lijevaonici da je alat prisutan. No, ukoliko nema drugog rješenja za dobivanje dobrih komada i ukoliko se smatra da će izmjene biti profitabilne, rade se simulacije i potom izmjene na alatu. U slučaju komada 624.15 postupak optimizacije procesa sastojao se od promjene parametara na tlačnom stroju, izrade simulacija i promjena na alatu, ponovnog stavljanja alata na stroj i optimiranja parametara dok se nisu dobili komadi zadovoljavajuće kvalitete. Idući dio potpoglavlja opisuje svaki korak optimizacije.

#### **5.4.1. Promjena parametara**

Pokušaj optimizacije procesa i smanjenja poroznosti u komadu sastojao se od idućih promjena:

- Povećanje tlaka 3. faze s 1000 bara na 1200 bara
- Promjena brzine 2. faze (isprobano  $4 \text{ ms}^{-1}$ ,  $4,5 \text{ ms}^{-1}$ ,  $5 \text{ ms}^{-1}$ )
- Promjena temperature alata (povišena temperatura uređaja za temperiranje alata sa  $150^\circ\text{C}$  na  $180^\circ\text{C}$ ).

Nakon svake promjene odrađeno je minimalno 20 ciklusa lijevanja kako bi se dobio stabilan rad stroja s novim parametrima te su komadi svaki put nošeni na rendgen. Nakon svakog pregleda komada poroznost je bila jednaka prethodnim komadima te se nisu dobila nikakva poboljšanja. Slika 44 prikazuje RTG slike odljevaka nakon pokušaja optimizacije procesa lijevanja. Vidljivo je da nema velike razlike između slika (Slika 42 i Slika 44).



**Slika 44 RTG slika poroznosti nakon optimiranja parametara (bez poboljšanja)**

#### **5.4.2. Simulacija lijevanja**

Zbog toga što se promjenom parametara nisu dobili bolji rezultati (odnosno komadi bez poroznosti), napravljena je simulacija lijevanja kako bi se vidjelo je li i na simulaciji vidljiva poroznost. Simulacija lijevanja radi se u programu Magma Soft. U program je potrebno ubaciti 3D model alata i odljevaka i sve parametre lijevanja. Na kraju se dobiju rezultati simulacija sa različitim zadanim parametrima lijevanja koji se mogu učitati u program Magma Ineract.

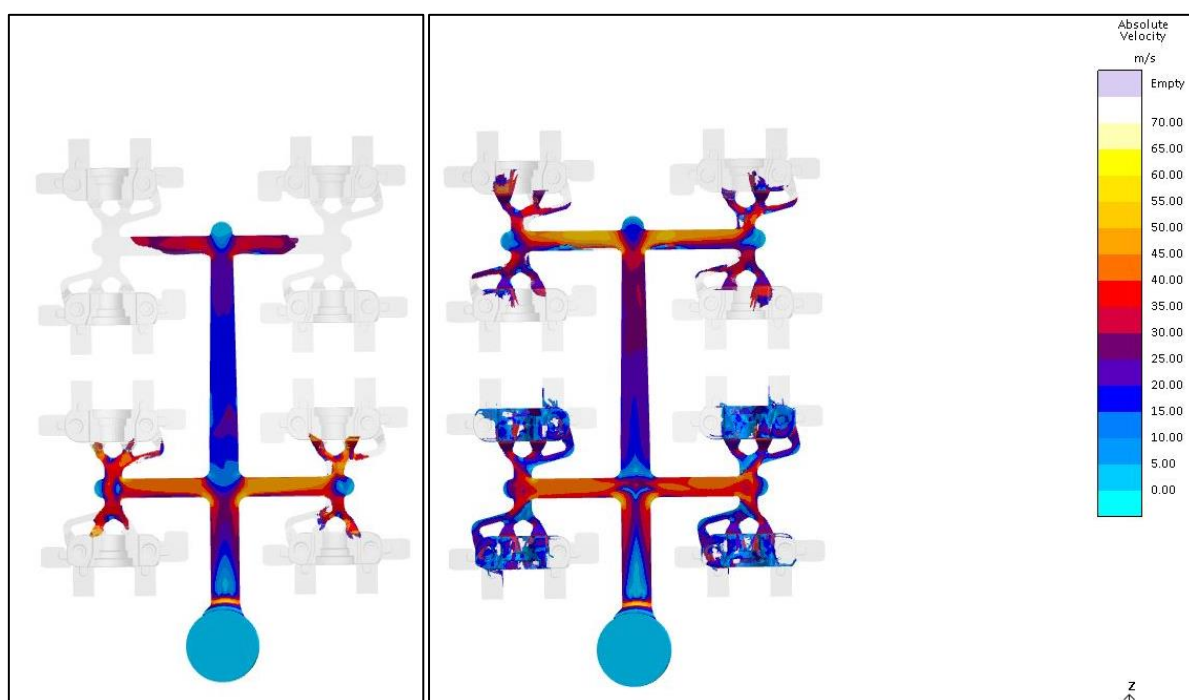
Neki od tih rezultata su:

- simulacija punjenja aluminijskog u kalup (alat) gdje su bojama prikazane brzine rastaljenog aluminijskog koje se mijenjaju tijekom punjenja

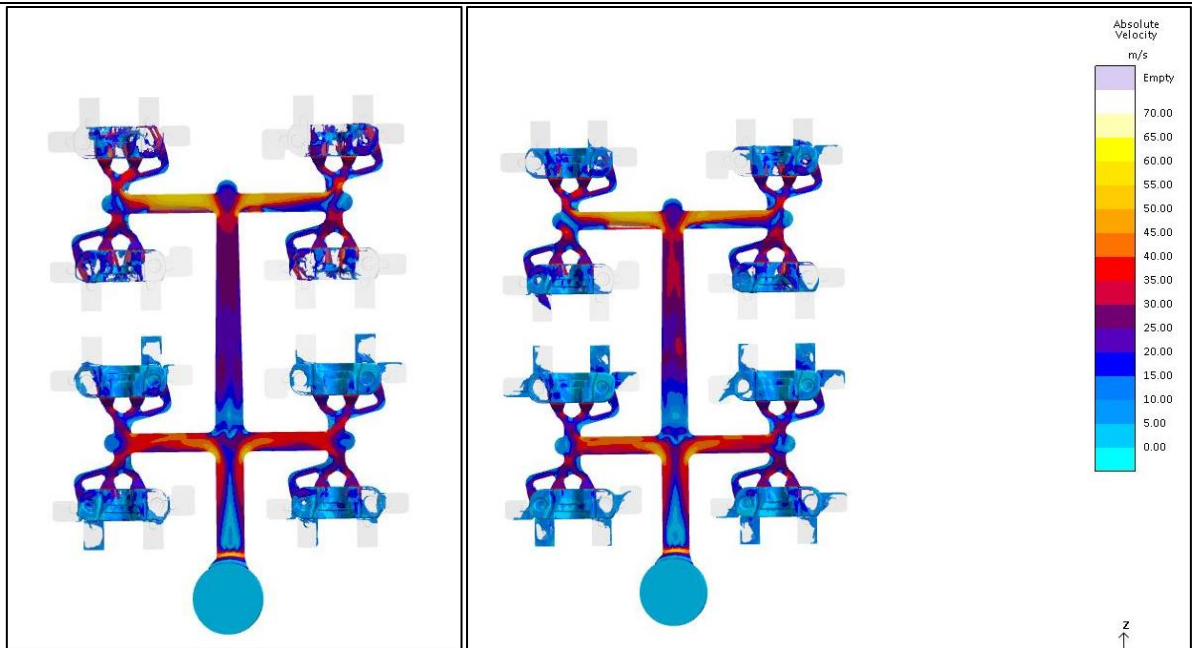


- zrak koji ostaje u kalupu nakon punjenja (plinska poroznost)
- poroznost skupljanja
- promjena temperature tijekom vremena punjenja kalupa aluminijem i tijekom hlađenja odljevka (skrućivanja)
- itd.

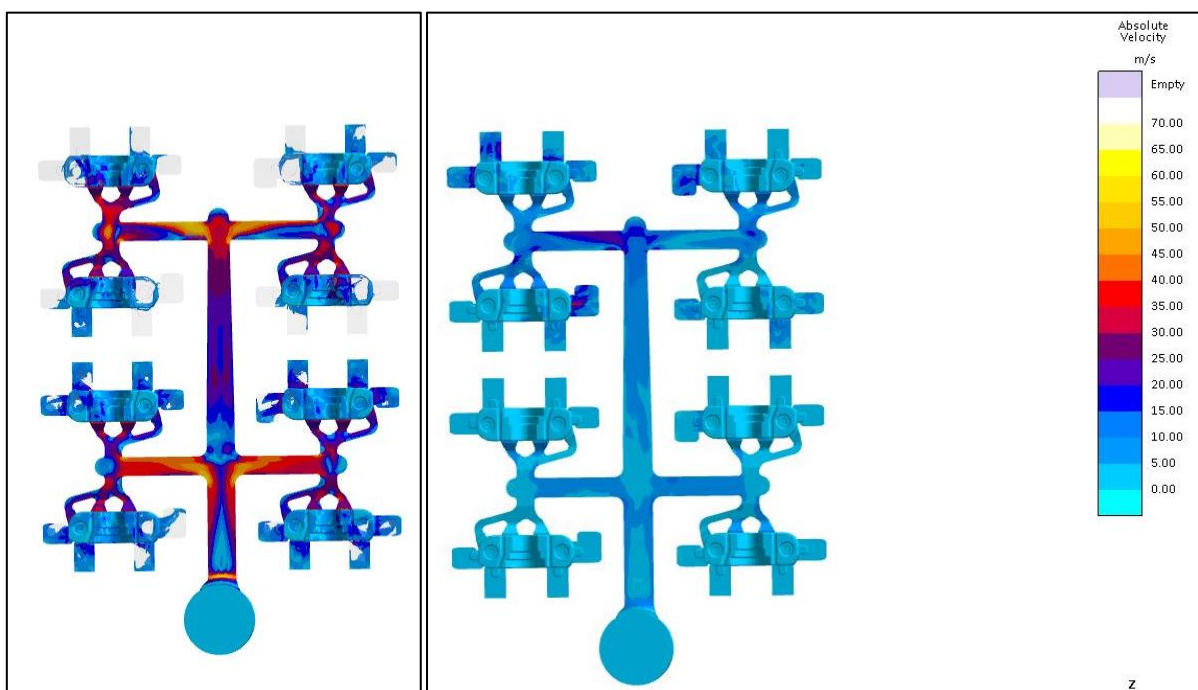
U tvrtci LTH simulacije se rade u matičnoj firmi u Sloveniji, a radi ih odjel konstrukcije i razvoja proizvoda. U ovoj firmi se samo mogu vidjeti rezultati simulacija (u LTH u Benkovcu se ne rade simulacije niti imaju pristup programu za izradu simulacija). Na slikama (Slika 45, Slika 46, Slika 47) je prikazana simulacija brzine taline tijekom punjenja kalupa, gdje su bojama označene različite brzine taline.



Slika 45 Brzina taline kada je kalup napunjen 40% (lijevo) i 50% (desno)



Slika 46 Brzina taline kada je kalup napunjen 60% (lijevo) i 70% (desno)

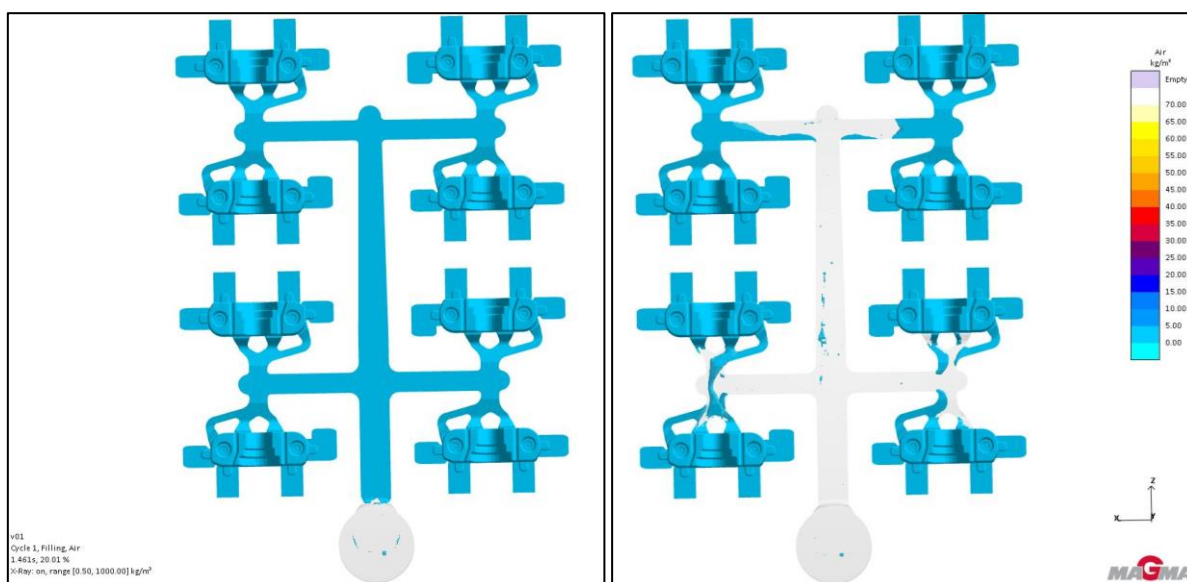


Slika 47 Brzina taline kada je kalup napunjen 80% (lijevo) i 100% (desno)

Na slikama se vidi da se tijekom punjenja prije pune donje dvije gravure, a tek onda gornje dvije gravure (što je i logično jer talina prije dođe do donjih gravura). Također se može primijetiti da se kod svake gravure prvo pune dijelovi gdje su uljevne grane, a onaj dio komada gdje nema uljevne grane se dosta kasno puni. Može se primijetiti da se talinom prije

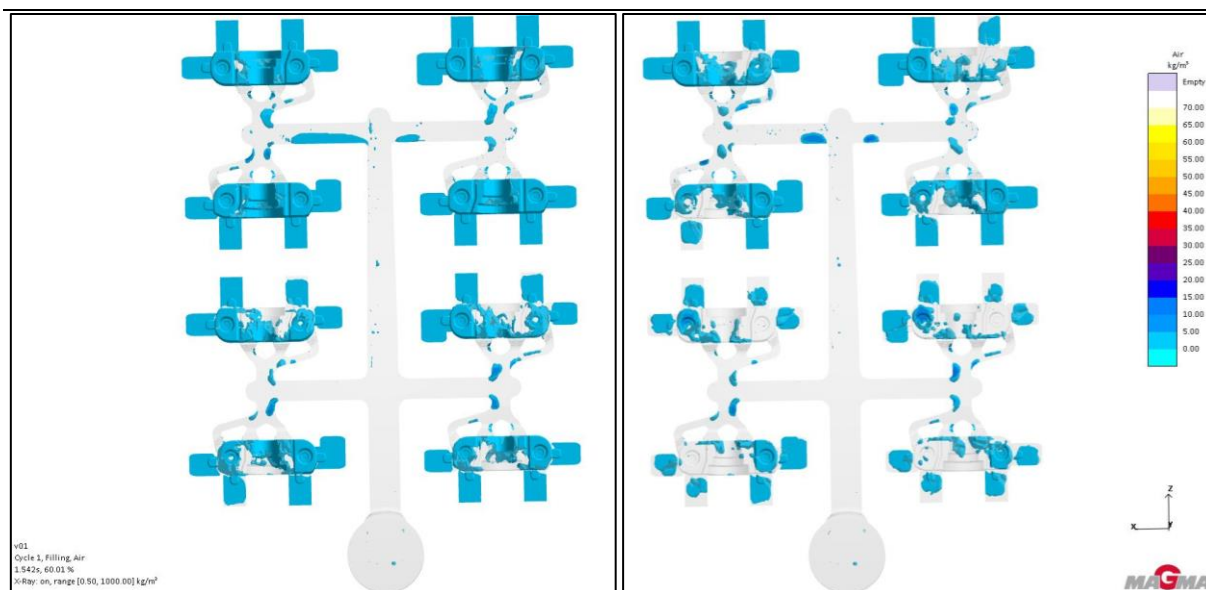
napune odzračnici nego taj dio komada gdje nema uljevne grane. Tu se može dogoditi da ostane zarobljeni zrak. Zbog toga se gledaju druge simulacije na kojima se vidi putanja izlaska zraka iz alata.

Iduće slike (Slika 48, Slika 49, Slika 50) prikazuju simulaciju izlaska zraka iz alata. Najprije je cijeli kalup ispunjen plavom bojom koja označava prazninu kalupa, odnosno da kalup popunjava samo zrak. Potom, kako dolazi aluminij (na simulaciji je proziran) tako se taj zrak miče prema gore i izvan alata. Plavi mjehuri koji se vide na kraju predstavljaju zarobljeni zrak, odnosno zračnu poroznost u komadu.

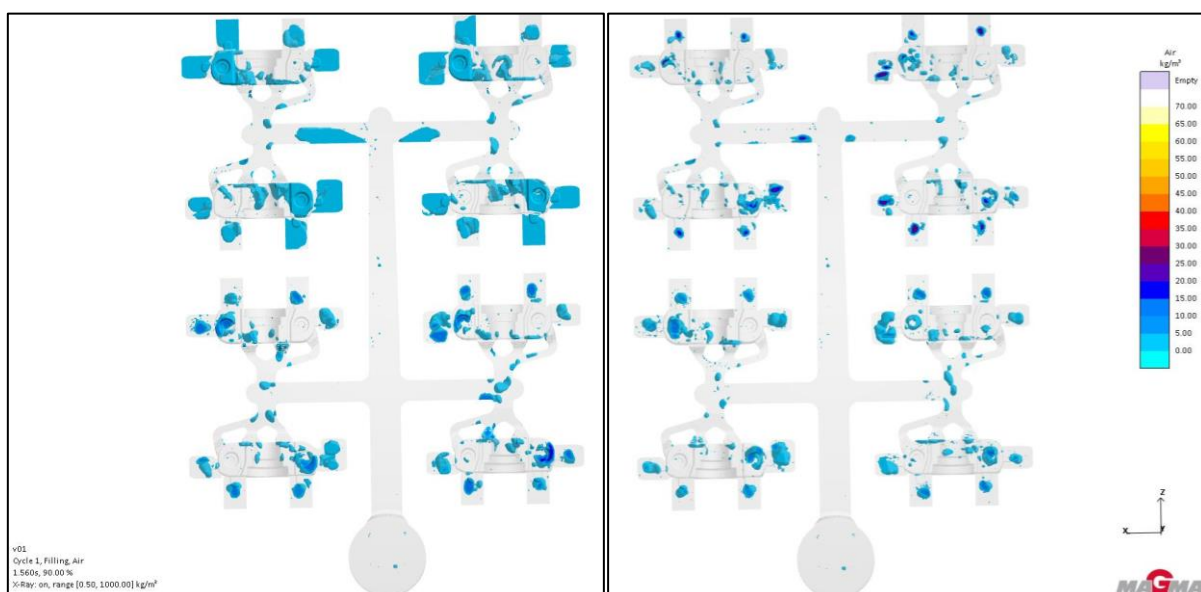


**Slika 48 Popunjenost taline u kalupu 20% (lijevo) i 40% (desno)**





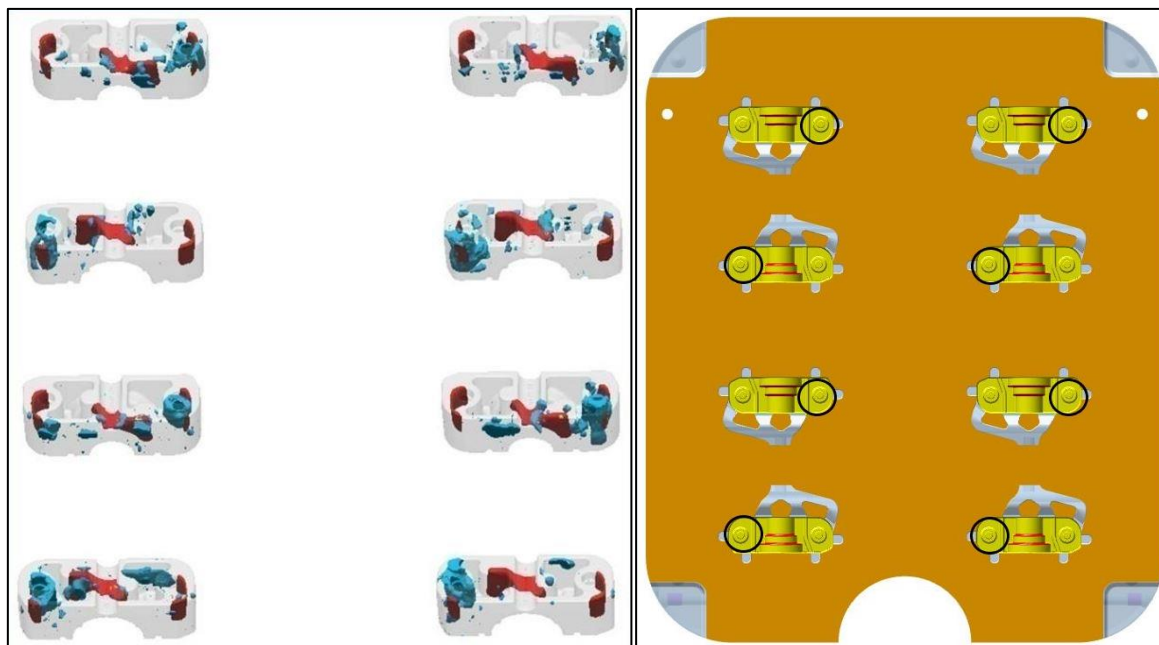
**Slika 49** Popunjenost taline u kalupu 60% (lijevo) i 80% (desno)



**Slika 50** Popunjenost taline u kalupu 90% (lijevo) i 100% (desno)

Jedan od mogućih rezultata simulacije lijevanja je prikaz zajedno i plinske poroznosti i poroznosti skupljanja nakon ulijevanja rastaljenog materijala u kalup i njegovog skrućivanja (Slika 51). Taj je rezultat simulacije prikazan na lijevoj strani slike 51 (slike prikazuju komade nakon hlađenja i skrućivanja aluminija). Plavom bojom označena su područja plinske poroznosti, a crvenom bojom označena su područja poroznosti skupljanja. Rezultati poroznosti iz simulacije slažu se sa rendgentskim slikama komada na kojima se vidi poroznost. Također, na slikama se vidi da ima podjednako i plinske i poroznosti skupljanja.

Slike simulacije prikazuju komade gledano u nepokretnu stranu alata. Desna slika (Slika 51) prikazuje nepokretnu stranu alata u istom prikazu kakva je i lijeva slika simulacije lijevanja te su crnom bojom zaokružena mjesta najveće koncentracije zraka (prema simulaciji).

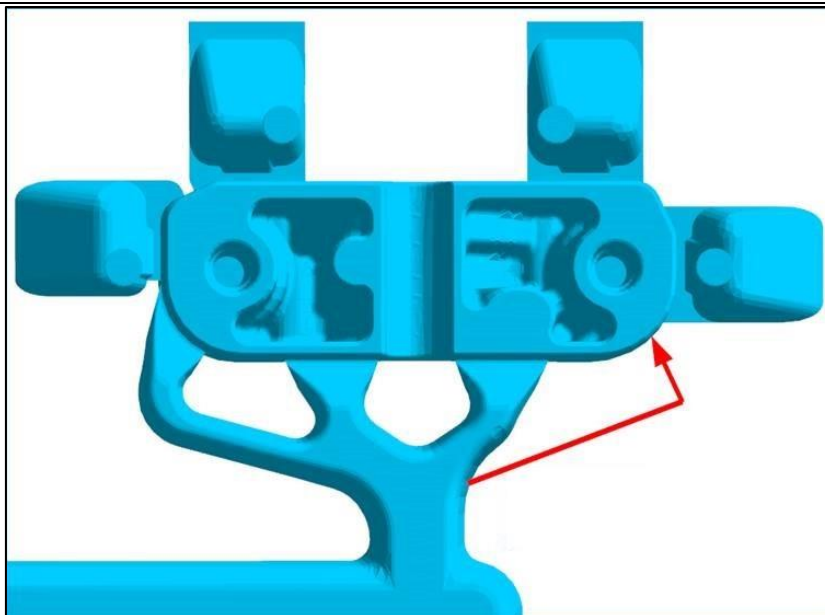


**Slika 51** Poroznost na simulaciji (lijevo) i zaokružena mjesta poroznosti na modelu (desno)

Obzirom da se poroznost nije uspjela riješiti optimiranjem parametara lijevanja, preostao je pokušaj promjene konstrukcije alata kako bi se komad punio aluminijem na drugačiji način i kako bi se riješio problem koncentracije poroznosti koji je dokazan simulacijama.

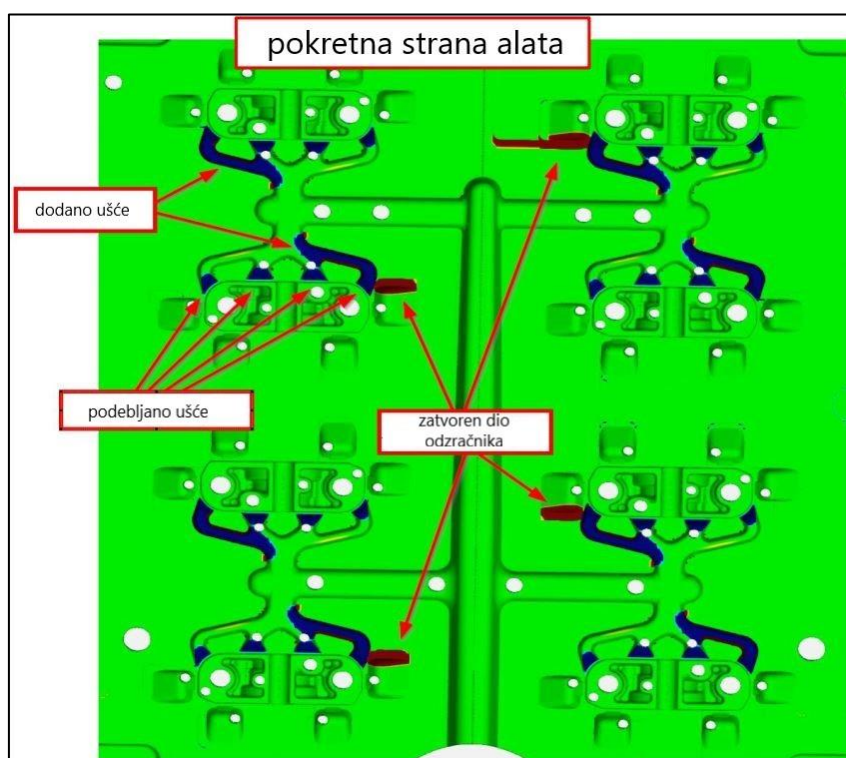
#### **5.4.3. Promjena konstrukcije alata**

Napravljen je prijedlog da se doda još jedno ušće na svaki komad na alatu kako bi se talina punila na 4 mjesta, a ne na 3 kako je do sada bilo. Slika 52 prikazuje strelicom mjesto na kojem je potrebno dodati još jedno ušće na svaki od 8 komada. Ukoliko se pogleda gornja desna slika vidljivo je da su sva zaokružena mjesta s povećanom poroznosti mjesta na kojima nema četvrtog ušća za ulijevanje taline te će se na to mjesto dodati jedno ušće za dodatno punjenje taline.



Slika 52 Prijedlog promjene konstrukcije alata

Osim dodavanja ušća, konstrukcija je predložila da se podebljaju sva mjesta ušća (radi boljeg djelovanja tlaka u 3. fazi) te da se zatvori dio jednog od odzračnika. Sve su promjene alata prikazane i označene na slikama ispod (Slika 53, Slika 54).



Slika 53 Promjena konstrukcije alata (pokretna strana)



Slika 54 Promjena konstrukcije alata (nepokretna strana)

#### 5.4.4. Ponovno lijevanje nakon promjene konstrukcije alata

Nakon promjene konstrukcije alata potrebno je ponovno napraviti proračun lijevanja jer su se promijenili idući parametri:

- površina poprečnog presjeka svih ušća taline u komad (na svakoj od 8 gravura dodan je još jedno ušće)
- masa cijelog udarca (zbog dodatne grane koja pridonosi povećanju mase)
- masa svih odzračnika (smanjila se zbog zatvaranja jednog od odzračnika na svim gravurama).

Nova krivulja dobivena u proračunu vrlo je slična već dobivenoj krivulji prije promjene konstrukcije alata jer se bez obzira na 8 novih ušća parametri nisu promijenili toliko da bi promjene bile značajne. Iz tog razloga ostavljena je krivulja lijevanja prve faze kako je optimirano prije promjene konstrukcije alata (nakon napravljenog 'fill testa'). Brzina druge faze stavljena je na  $5 \text{ ms}^{-1}$  (prije promjene alata lijevano je s brzinama od 4 do  $5 \text{ ms}^{-1}$ ), i tlak



treće faze stavljen je na 1200 bara. Put klipa za prvu i drugu fazu ostao je isti. Nova tablica brzina i tlaka prikazana je na slici (Slika 55).

PUT s (mm)		BRZINA v (m/s)	
s1=	50	v1=	0,15
s2=	150	v2=	0,25
s3=	275	v3=	0,45
s4=	l1>2=275	v4=	5,0
s5=		v5=	
s6=		v6=	
s7=		v7=	
s8=		v8=	
sbr=	420	vbr=	2,5
VRIJEME t (s)		TLAK p (bar)	
t1=	0,05	p1=	450
t2=		p2=	1200
t3=		p3=	
t4=		p4=	

**Slika 55 Parametri nakon optimizacije**

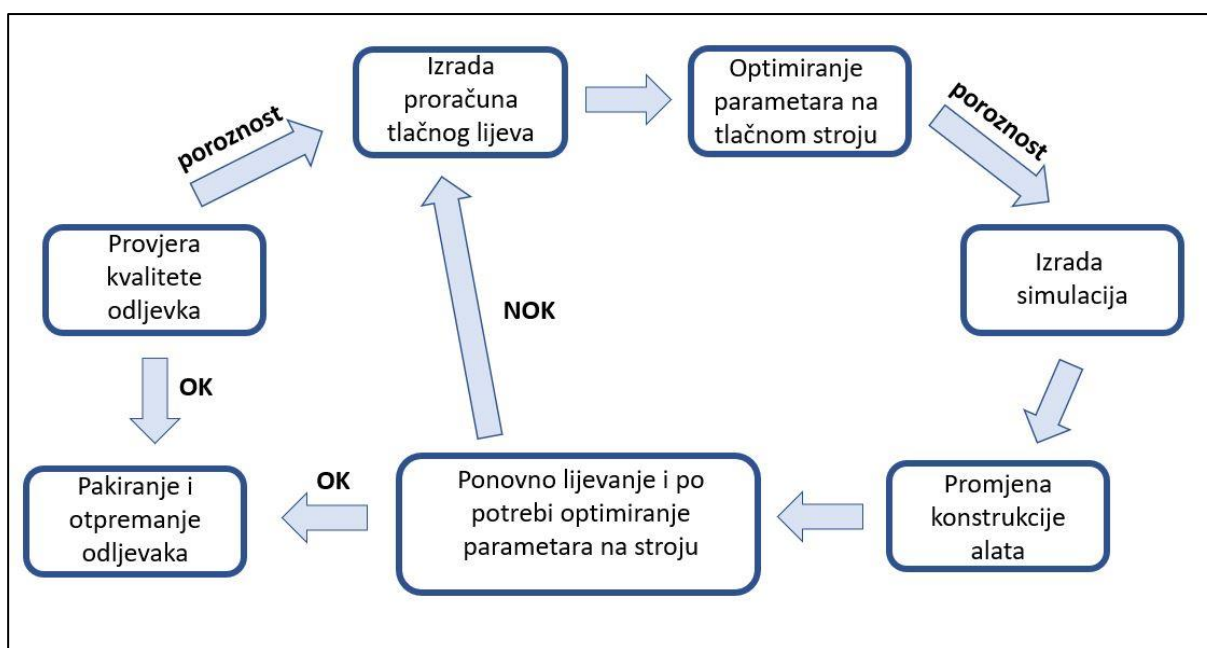
S ovako postavljenim parametrima i nakon izmjene konstrukcije alata dobiveni su jako dobri rezultati. Više komada je pregledano na rendgen te je vidljivo smanjena poroznost u komadima. Slika 56 prikazuje rendgenski snimak s puno manje mjehurića zraka nego je to bilo na gornjoj slici (Slika 44).



**Slika 56 RTG slike nakon optimizacije**

Iako su rezultati puno bolji, poroznost se nije uspjela skroz riješiti. To je u praksi tlačnog lijevanja tlakom uobičajeno kada se radi o komadima sa stjenkom debljom od par milimetara (očekivano je da će se pojaviti poroznost). Najbitnije je da se ta poroznost ne vidi nakon obrade komada i da komadi nisu šuplji. U ovom slučaju se nakon promjena i optimizacije procesa lijevanja greška poroznosti kod obrađenih komada smanjila sa 7% na 0,8%, što je zadovoljavajuće.

Optimizacija procesa tlačnog lijevanja vrlo je kompleksan procesa rješavanja problema (u ovom slučaju poroznosti unutar odljevka). Tijekom rješavanja poroznosti u ovom radu, napravljeno je nekoliko koraka koji su prikazani na slici (Slika 57). U praksi se uobičajeno koriste navedeni koraci kao polazišne točke za rješavanje problema na odljevcima (ovisno o vrsti problematike), a nije neuobičajeno i da se neki od koraka ponavljaju i više puta sve dok se ne dođe do komada (odljevaka) zadovoljavajuće kvalitete.



Slika 57 Proces optimiranja pozicije 624.15

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisano je visokotlačno lijevanje. Teoretski dio obuhvaća opis cijelog procesa visokotlačnog lijevanja, a služi kao podloga za razumijevanje eksperimentalnog dijela rada. Eksperimentalni dio napravljen je u ljevaonici firme LTH Metalni Lijev d.o.o., gdje se izrađuju odljevci za automobilsku industriju. Praćen je proces dobivanja pozicije naziva 624.15, od taljenja aluminijske legure (dobivanja taline u talionici), preko lijevanja odljevaka do pjeskarenja i na kraju strojne obrade odljevaka. Prilikom provjere kvalitete komada nakon lijevanja (radiografska kontrola) i tijekom kontrolne obrade komada na CNC stroju, uočeno je da su komadi porozni. Greška se vidjela na rendgenu u obliku mjehurića i pora i nakon strojne obrade u obliku šupljih komada (rupica na komadima).

Popravljanje greške naziva se optimizacija procesa, a radi se o nekoliko koraka napravljenih kako bi se smanjila poroznost u odljevku. Najprije je isprobano lijevanje s različitim parametrima promijenjenima na stroju, ali nisu dobiveni bolji komadi (bez poroznosti). Potom su izrađene simulacije lijevanja na alatu na kojem se trenutno radi te je ustanovljeno da postoje mjesta na kojima se skuplja veća količina zraka koja uzrokuje poroznost u komadima. Na tim mjestima je napravljena konstrukcijska izmjena alata za lijevanje, dodan je još jedan uljevni kanal i ušće kako bi se komad punio talinom na 4 ušća, umjesto na 3 kako je bilo do tada. Nakon prepravka alata, lijevanje je ponovno krenulo uz male prepravke parametara na tlačnom stroju. Ponovno su pregledani komadi i ovaj put je poroznost znatno smanjena, a nakon kontrolne obrade komada na CNC stroju uopće nije bilo poroznosti. Na kraju lijevanja cijele serije od oko 15 000 komada ukupan škart na poroznost iznosio je oko 0,8% (dok je prije optimizacije procesa iznosio oko 7% škarta zbog poroznosti).

Kvaliteta odljevaka nakon procesa optimizacije nije rezultirala time da je poroznost skroz nestala i da škarta uopće nema. Tlačno lijevanje je takav proizvodni proces gdje će vrlo često doći do pojave grešaka (posebice poroznosti i to kod komada čija je debljina stijenke veća od 1 mm) te je greške potrebno minimizirati koliko god je moguće. Obzirom na kompleksnost pozicije 624.15, i na činjenicu da nisu dobiveni još bolji rezultati od ovih, prihvaćen je škart na poroznost od 0,8%.

## LITERATURA

- [1] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/ljevarstvo.pdf>, pristupljeno: veljača 2024.
- [2] B. Bauer, I. Mihalic Pokopec: Osnove tehnologije lijevanja, FSB, Zagreb, 2017.
- [3] [https://kas-shop.de/product\\_info.php?info=p14\\_halter-klimakompressor.html](https://kas-shop.de/product_info.php?info=p14_halter-klimakompressor.html), preuzeto: veljača 2024.
- [4] <https://www.investmentcastchina.com/aluminum-die-casting-for-automotive-industry/>, preuzeto: veljača 2024.
- [5] W.A. Butler, G. Timelli, E. Battaglia, F. Bonollo: Die Casting (Permanent Mold), Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016.
- [6] <https://www.dynacast.com/en-sg/die-casting/die-cast-process/hot-chamber-die-casting>, preuzeto: veljača 2024.
- [7] I. Budić: Posebni ljevački postupci, 2. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2009.
- [8] ..., Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1985.
- [9] <https://www.foundry-planet.com/d/aluminium-melting-furnaces-for-die-casting/>, pristupljeno: veljača 2024.
- [10] ..., Bühler prezentacija o tlačnom lijevanju, privatno vlasništvo firme LTH Metalni Lijev d.o.o., 2022.
- [11] F. Bonollo, N. Gramenga, G. Timelli: High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges, JOM, Volume 67, 901-908, 2015.
- [12] F. Casarotto, A.J. Franke, R. Franke: High-pressure die-cast (HPDC) aluminium alloys for automotive applications, Advanced materials in automotive engineering, pp 109-149, 2012.
- [13] L. Wang, M. Makhlof, D. Apelian: Aluminium die casting alloys: alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships, International Materials Reviews, Vol.40, No.6, 1995
- [14] <https://www.sunrise-metal.com/aluminum-alloy-alsi9cu3> , preuzeto: ožujak 2024
- [15] <https://www.bayrammetal.com.tr/uploads/docs/en-ab-and-ac-47000.pdf>, preuzeto: veljača 2024.
- [16] A. Zovi, F. Casarotto: Silafont-36, The Low Iron Ductile Die Casting Alloy Development and Applications, La metallurgia Italiana, Issue 6, Giugno 2007.



- 
- [17] <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=4p-YRpG4ScU>, preuzeto: veljača 2024.
- [18] <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/shaft-melting-furnace-4493/?cHash=8c9701c342be1d4ff49723f035497901>, preuzeto: veljača 2024.
- [19] <https://www.bruschitech.com/blog/shrinkage-porosity-causes-and-remedies> , preuzeto: veljača 2024.
- [20] Z. Ignaszak, J. Hajkowski: Gas and Shrinkage Porosities in Al-Si high-Pressure Die-Castings. Virtualization and Experimental Validation, Defect and Diffusion Forum Vol. 364 (2015) pp 80-91, Trans Tech Publications, Switzerland
- [21] <http://struna.ihjj.hr/naziv/koljenasto-vratilo/4338/>, preuzeto: ožujak 2024.
- [22] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/koljenasto-vratilo>, preuzeto: ožujak 2024.
- [23] <https://www.seat.co.uk/car-terms/c/crankshaft>, preuzeto: ožujak 2024.
- [24] <https://www.foundry-planet.com/d/buehler-ag-ecoline-pro-the-latest-enhancement-to-our-newest-machine-series/>, preuzeto: ožujak 2024.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc