Greške na odljevcima od aluminijevih legura

Šušak, Marino

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:397578

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marino Šušak

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Ovom prilikom zahvaljujem svojem mentoru prof.dr.sc. Branku Baueru na predloženoj temi, stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog završnog rada, te se također zahvaljujem i svim djelatnicima Katedre i Laboratorija za ljevarstvo, Fakulteta strojarstva I brodogradnje u Zagrebu. Zahvaljujem se svojim roditeljima, Mladenu i Nadi na podršci, razumijevanju i ukazanom povjerenju tijekom studiranja.

Marino Šušak

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARINO ŠUŠAK** Mat. br.: 0035204623

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **GREŠKE NA ODLJEVCIMA OD ALUMINIJEVIH LEGURA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DEFECTS IN ALUMINIUM ALLOYS CASTINGS**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti osnovne grupe grešaka na odljevcima. Posebnu pozornost obratiti na greške uslijed skupljanja metala, plinova, kalupa, ulijevanja te pukotine. Proučiti mjere pomoći odnosno sprječavanja ponovnog pojavljivanja greški.
Lijevati odljevke u obliku palice kroz pojila različitih dimenzija, te analizirati pojavu usahlina. Odrediti zonu napajanja pojedinog pojila. Postaviti hladilo na drugi kraj palice i odrediti njegov utjecaj na veličinu zone napajanja.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2. LJEVARSTVO 3
2.1. Lijevanje 3
2.2. Prednosti i nedostatci lijevanja 3
2.3. Podjela postupaka lijevanja 4
2.4. Primjena odljevaka 5
3. KALUP 6
3.1. Osnovna obilježja kalupa 6
3.2. Svojstva kalupne mješavine 7
3.3. Jednokratni i stalni kalupi 7
3.3.1. Lijevanje u jednokratne kalupe 8
3.3.2. Lijevanje u stalne kalupe 9
4.ULJEVNI SUSTAV 11
4.1. Kriteriji uljevnog sustava 11
4.2. Glavne komponente uljevnog sustava 12
4.3. Vrste uljevnih sustava 13
4.3.1. Direktni uljevni sustav 13
4.3.2. Indirektni uljevni sustav 14
4.3.3. Uljevni sustav sa ušćem odozdo 15
5. NAPAJANJE ODLJEVAKA 16
5.1. Volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka 16
5.2. Skrućivanje Al-Si legura 18
5.3. Pojila 19
6. HLADILO 21
7.KONTROLA KVALITETE ODLJEVAKA 23

7.1. Greške na odljevcima 23
7.1.1. Podjela grešaka na odljevcima 23
7.1.1.1. Nedolivenost odljevka 24
7.1.1.2. Nestaljeno područje 24
7.1.1.3. Nemetalni uključci 25
7.1.1.4. Usahlina 25
7.1.2. Podjela greškaka na odljevcima karakteristične za lijev u pijesak 26
7.1.2.1 Mjehuravost 26
7.1.2.2. Penetracija litine 26
7.1.2.3. Pomak 27
7.2. Podjela grešaka na odljevcima prema izgledu 28
8. ALUMINIJ 29
8.1 Općenito o aluminiju 29
8.2 Aluminijeve legure 29
8.2.1 Svojstva aluminija i njegovih legura 30
8.2.2. Al-Si legure 31
8.2.2.1. Al-Si 12 legura 31
9. EKSPERIMENTALNI DIO 32
8.1. Simulacija lijevanja 35
8.1.1. Simulacije lijevanja sa pojilom 1 (bez hladila), pojilom 1 (sa hladilom), pojilom 2 (bez hladila) i pojilom 2 (sa hladilom) 35
9.3. Lijevanje 46
9.4. Analiza rezultata 50
10. ZAKLJUČAK 53
11. LITERATURA 54

POPIS SLIKA

Slika 1. Lijevanje metala u kalup....2
Slika 2. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa....4
Slika 3. Blok motora....5
Slika 4. Dvodijelni pješčani kalup....6
Slika 5. Shematski prikaz upotrebe različitih vrsta kalupa....8
Slika 6. Primjer ulijevanja litine u jednokratni pješčani kalup....9
Slika 7. Stalni kalup....10
Slika 8. Glavne komponente uljevnog sustava....12
Slika 9. Direktni uljevni sustav sa uščem odozgo....13
Slika 10. Indirektni uljevni sustavi....14
Slika 11. Uljevni sustav sa uščem odozdo....15
Slika 12. Skupljanje metala prilikom hlađenja taljevine, skrućivanja i hlađenja skrutnutog odljevka....17
Slika 13. Dijagram stanja Al-Si legura....18
Slika 14. Podjela Al-Si legura s pripadajućim mikrostrukturama....19
Slika 15. Pomak usahline u pojilo....19
Slika 16. Shematski prikaz usmjerenog i progresivnog skrućivanja....20
Slika 17. Unutarnje hladilo....21
Slika 18. Vanjsko hladilo....22
Slika 19. Primjer nedolivenosti odljevka....24
Slika 20. Primjer nestaljenog područja....24
Slika 21. Primjer nemetalnih uključaka....25
Slika 22. Primjer usahlina....25
Slika 23. Primjer mjehuravosti....26
Slika 24. Primjer penetracije taljevine....27
Slika 25. Primjer pomaka....27
Slika 26. Poluproizvodi od aluminijevih legura....29
Slika 27. Mikrostruktura AlSi12 legure....31
Slika 28. Dimenzije odljevka....32
Slika 29. Dimenzije pojila broj 1....33

Slika 30. Dimenzije pojila broj 2 33
Slika 31. CAD modeli sa različitim vratovima pojila 34
Slika 32. CAD model odljevka 34
Slika 33. Modeli korišteni za izradu kalupa 42
Slika 34. Postavljanje donjaka i nanošenje sredstva za razdvajanje 42
Slika 35. Dodavanje modelne i punidbene kalupne mješavine 43
Slika 36. Sabijanje kalupne mješavine i dodavanje sredstva za razdvajenje 43
Slika 37. Postavljanje modela u gornjak 44
Slika 38. Kalupljenje gornjaka 44
Slika 39. Sabijanje kalupne mješavine i vađenje modela pojila 45
Slika 40. Otvaranje kalupa i uklanjanje modela 45
Slika 41. Zatvaranje kalupa 46
Slika 42. Elektrootporna peć i zagrijavanje ljevačkog lonca 47
Slika 43. Mjerenje temperature taljevine pirometrom 47
Slika 44. Ulijevanje taljevine u kalup 48
Slika 45. Kalupi nakon skrućivanja odljevka 48
Slika 46. Gotovi odljevci 49
Slika 47. Raspored odljevaka na slikovnoj ploči 50
Slika 48. Radiogrami odljevaka, 1-malo pojilo sa hladilom, 2-veliko pojilo sa hladilom, 3-malo pojilo bez hladila, 4-veliko pojilo bez hladila. 51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa 4
Tablica 2. Volumno stezanje tijekom skrućivanja za različite ljevačke legure 17
Tablica 3. Fizikalna svojstva aluminija 30
Tablica 4. Poroznost u trodimenzionalnom prikazu 36
Tablica 5. Vrijeme do solidusa 38
Tablica 6. Završetak skrućivanja 39
Tablica 7. Skrućivanje 220 sekundi nakon ulijevanja 40
Tablica 8. Presjeci odljevka na završetku skrućivanja 41
Tablica 9. Kemijski sastav legure AlSi13 46
Tablica 10. Prikaz poroznosti u poprečnom presjeku odljevaka 52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Tt	$°C$	Temperatura tališta
ρ	$g\ cm^{-3}$	Gustoća
α_L	$°C^{-1}$	Koeficijent linearnog istezanja
c	$J\ kg^{-1}\ °C^{-1}$	Specifični toplinski kapacitet
λ	$J\ s^{-1}m^{-1}$	Toplinska vodljivost
ρ_E	Wmm^2m^{-1}	Specifični električni otpor
E	N/mm^2	Modul elastičnosti

SAŽETAK

Ovaj rad se sastoji od dva dijela: teoretskog i eksperimentalnog.

U teoretskom dijelu ovog rada objašnjen je postupak lijevanja, osnovne greške prilikom lijevanja, te utjecaj pojila i hladila na skrućivanje odljevka.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada provedeno je lijevanje aluminijske legure AlSi13 u pješčani kalup kroz pojila različitih dimenzija. Odljevci su bili u obliku palice kvadratnog presjeka. Promatran je i utjecaj hladila.

Na temelju rezultata može se zaključiti, da se odabirom pojila većih dimenzija i dodavanjem hladila znatno smanjuje pojava poroznosti u odljevku.

Ključne riječi: aluminijske legure, lijevanje, poroznost, pojilo, hladilo

SUMMARY

This paper consists of two parts: theoretical and experimental.

The theoretical part of this paper explains the casting process, basic casting deffects, and the influence of feeders and chills on the solidification of the casting.

In the experimental part of this paper, casting of AlSi13 aluminum alloy in a sand mold was carried out through feeders of different dimensions. The castings were in the shape of a square bars. The effect of chill was also analyzed.

Based on the results, it can be concluded that by choosing larger feeders and by adding a chill, the occurrence of porosity in the casting is significantly reduced.

Keywords: aluminium alloys, casting, porosity, feeder, chill

1. UVOD

Lijevanje metala prati čovječanstvo od samih početaka. Neka doba u staroj povijesti su nazvana upravo prema vrsti materijala koji se u tom vremenu lijevao i koristio u različite svrhe kao što su izrada oruđa i oružja, koje su se koristile u svakodnevnom životu, npr. bakreno, brončano i željezno doba. [1]

Lijevanje je jedna od tehnologija oblikovanja metalnih predmeta kojom se rastaljeni metal oblikuje tako što se ulijeva u kalupe i zatim skrućivanjem poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine. Lijevanje se koristi više od 5000 godina za proizvodnju odljevaka jasno definiranog geometrijskog oblika i svojstava. U tom periodu se tehnologija stalno razvijala, pa se danas mogu proizvesti visoko zahtjevni metalni dijelovi kompleksnih geometrija pomoću najmodernijih mehaniziranih i automatiziranih sprava. Sve metalne legure mogu se lijevati, a zbog široke raznolikosti postupka lijevanja mogu se proizvesti odljevci drugačijih oblika, dimenzija, stupnja složenosti te veličine serije. Izrađivanje dobrih odljevaka zahtjeva veliku vještinu, zato što se proces formiranja odljevka ne može pratiti vizualno, jer je kalup zatvoren. Upravljanje kvalitete je vrlo složeno jer postizanje mehaničkih i dimenzijskih svojstava skrućivanjem litine i promjenom agregatnog stanja nije još dovoljno istraženo. Ljevarstvo se još uvjek svrstava u rizične tehnologije, iz razloga što je proces kontinuiran pa ga je teško u cjelosti kontrolirati. Zbog tog razloga će se razvoj ljevarstva kretati ne samo u iskorištavanju mogućnosti visoke proizvodnje, nego i u smanjenju rizika u njoj. [2]

Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade, tehnologiju lijevanja čine pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju odljevaka. Vrlo često je i jedina tehnologija za izradu jako složenih dijelova s unutrašnjim šupljinama ili za izradu velikih i masovnih kučišta strojeva. Lijevanjem je moguće dijelove strojeva, koje bi se inače morali lijevati parcijalno , odliti u jednom dijelu odjednom. Oblikovanje se odvija u tekućem stanju, a taljevina zahtijeva minimalan utrošak energije za promjenu oblika. Ukupna potrošnja energije je značajna, iz razloga što materijal prvo treba rastaliti i dovesti u tekuće stanje. [3]

Glavni cilj lijevanja je postizanje visoke kvalitete i određenih svojstava odljevaka uz što je moguće niže proizvodne troškove. Međutim, lijevanje metala je vrlo kompleksan proces i često može rezultirati neočekivanim rezultatima budući da se jako velik broj faktora mora kontrolirati. Takvi faktori mogu biti: proces taljenja i obrada taljevine, kvaliteta uloženih materijala, metalurško stanje i čistoća taljevine, kvaliteta kalupa, temperatura i brzina lijevanja, uljevni sustav i sustav napajanja odljevka; samo su jedan jedan dio iz velikog skupa faktora koje utječu na konačnu kvalitetu i svojstva odljevaka. [4]

Na slici 1. je prikazano ulijevanje taljevine u pješčani kalup.



Slika 1. Lijevanje metala u kalup [5]

2. LJEVARSTVO

2.1. Lijevanje

Lijevanje odnosno proizvodnja odljevaka se uglavnom sastoji od tri povezane operacije: taljenje, kalupljenje te ulijevanje taljevine u kalup. Nakon što se odljevak ohladi u kalupu, slijedi njegovo istresanje iz kalupa, čišćenje, brušenje, potrebna završna obrada, skladištenje te otprema odljevka. Za vrijeme dok se taljevina ulijeva, skrućuje i hladi, ona na kalup djeluje mehanički, kemijski i toplinski. Svako djelovanje ima nekakav utjecaj na kvalitetu odljevka, stoga ih tijekom proizvodnje treba svesti na najmanju moguću mjeru. Danas se u električnim pećima obavlja taljenje, a samo u izuzetno velikim i zahtjevnim pogonima se koristi kemijska energija. Ljevarstvo je i dalje rizična tehnologija, jer je proces kontinuiran i teško ga je u cijelosti kontrolirati. [3]

2.2. Prednosti i nedostatci lijevanja

Lijevanje uz sve svoje prednosti ima i svoje nedostatke:

PREDNOSTI:

- Složena geometrija vanjskog i unutarnjeg dijela
- Moguće je dobiti dimenzijski točan oblik
- Moguće proizvesti vrlo velike odljevke
- Moguće korištenje bilo kojeg materijala
- Moguća masovna proizvodnja
- Velik raspon dimenzija – od 1g do 250 tona [6]

NEDOSTACI:

- Ograničenja u mehaničkim svojstvima
- Dimenzijska točnost
- Opasnosti u proizvodnji
- Utjecaj na okoliš [6]

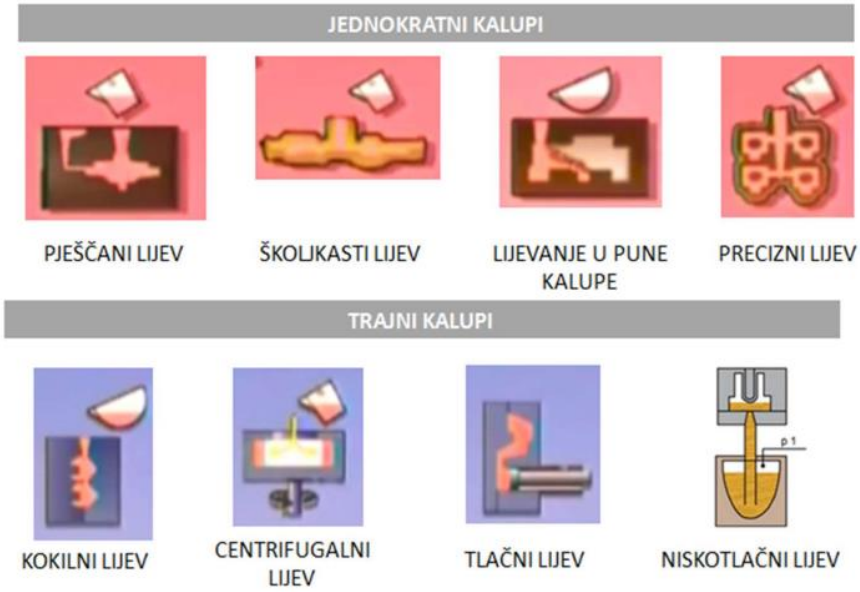
2.3. Podjela postupaka lijevanja

Trenutno postoji više postupaka lijevanja, tablica 1. Stvoreni su i razvijeni kako bi se uklonili neki specifični problemi lijevanja i kako bi se optimizirala tehnologija lijevanja za određene metale tj. legure, konstrukcijske zahtjeve, dimenzije i masa proizvoda ili zadovoljili ostali operativni zahtjevi (npr. stupanj automatizacije). [7]

Tablica 1. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [7]

LIJEVANJE U JEDNOKRATNE KALUPE	LIJEVANJE U STALNE KALUPE
- pješčani lijev - školjkasti lijev - lijevanje u pune kalupe - točni (precizni) lijev - lijevanje u kalupe od gipsa - lijevanje u keramičke kalupe - vakuumsko kalupljenje pijeska	- kokilni lijev - tlačni lijev - centrifugalni lijev

Na slici 2. prikazana je podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa



Slika 2. Podjela postupaka lijevanja prema vrsti kalupa [7]

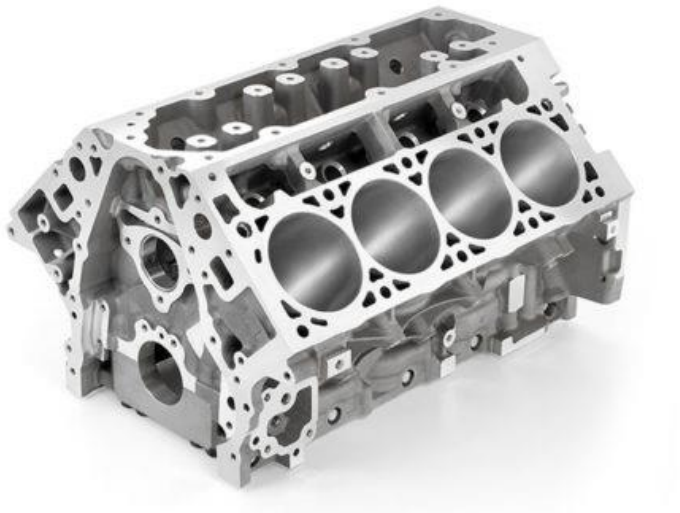
2.4. Primjena odljevaka

Danas je najveća primjena odljevaka u automobilskoj industrij. U jednom automobilu se ugradi više od 100 odljevaka, jer većinu tehničkih sklopova nije moguće izraditi nekom drugom tehnologijom. [6]

Najbitnija područja ljevačke industrije:

- Automobilska industrija
- Strojogradnja
- Građevinska industrija i strojevi
- Medicina
- Brodogradnja
- Tračnička vozila
- Energetika
- Zrakoplovna i svemirska industrija
- Lijevanje umjetničkih skulptura [6]

Na slici 3. prikazan je blok motora.



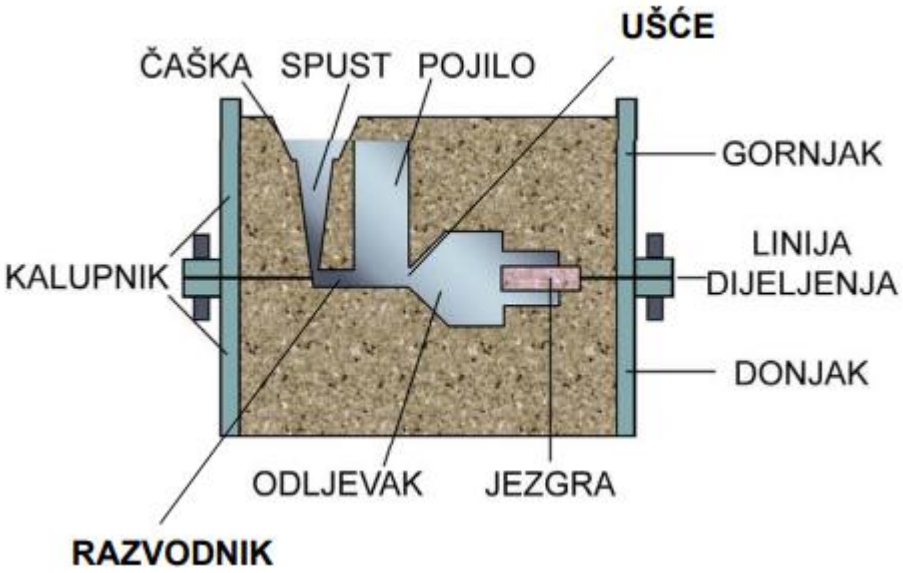
Slika 3. Blok motora [8]

3. KALUP

3.1. Osnovna obilježja kalupa

Taljevina se kao tekućina ulijeva u unutrašnjost kalupa i poprima oblik koji će odgovarati izgledu odljevka. Nakon što se taljevina skruti i ohladi dobiva se oblikovani proizvod. Tako oblikovan proizvod naziva se odljevak, a zapremnina u kojoj se oblikuje naziva se kalup. Iz toga se može zaključiti da je kalup alat kojim se oblikuje odljevak. Pomoću kalupa se ne oblikuje samo vanjski oblik odljevka, nego se umecima koje se nazivaju jezgre, pri ulijevanju formiraju unutarnje šupljine i kanali u odljevku. Razlikujemo dvije vrste kalupa: jednokratni i stalni kalupi. [3]

Na slici 4. može se vidjeti da je kalup je podijeljen na dva dijela, a to su gornjak i donjak. Linija koja dijeli gornjak i donjak zovemo razdjelna linija.



Slika 4. Dvodijelni pješčani kalup [6]

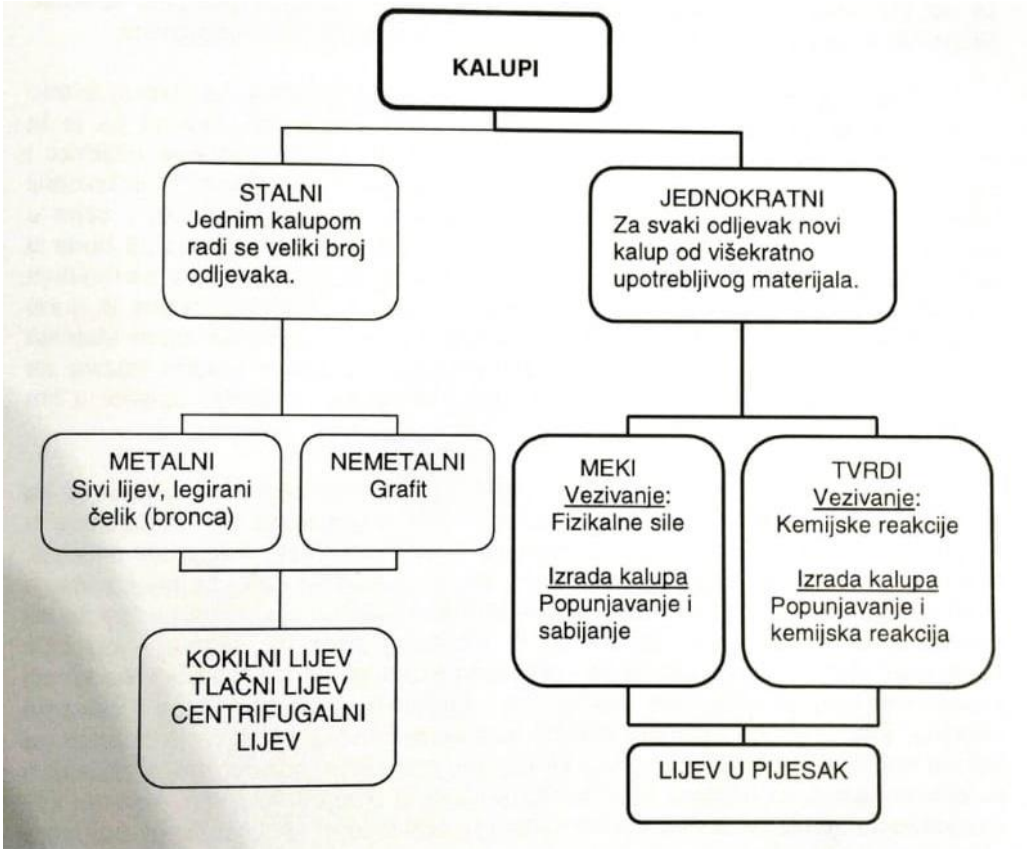
3.2. Svojstva kalupne mješavine [9]

Materijal od kojeg izrađujemo kalupnu mješavinu mora zadovoljavati sljedeća svojstva:

- Propustljivost – propuštanje pare kroz kalupnu mješavinu, može se mjeriti metrom koji mjeri volumen zraka koji prođe kroz testni uzorak po minuti za neki određeni tlak
- Finoća – veličina zrna pijeska
- Upornost – svojstvo pijeska da izdrži visoke temperature bez da se istopi ili raspadne
- Snaga veze – snaga pijeska da održi oblik kalupa
- Vlačna čvrstoća – sila koja zadržava pijesak u sloju
- Suha snaga – svojstvo pijeska da održi svoj oblik i u suhom stanju
- Izdržljivost – ponovna upotrebljivost pijeska bez da izgubi svoja svojstva

3.3. Jednokratni i stalni kalupi [2]

Postoje dvije vrste kalupa, stalni i jednokratni kalupi, slika 5. Kod lijevanja u stalne kalupe pomoću jednog kalupa se oblikuje veći broj odljevaka, dok se kod lijevanja u jednokratne kalupe za svaki odljevak izrađuje novi kalup. Ovisno o veličini, kalup može sadržavati jedan ili više odljevaka. Najčešće su dvodjelni: stalni tako da se može izvaditi odljevak nakon ulijevanja, a jednokratni da bi se mogao izvaditi model kod kalupljenja. Izbor između stalnog i jednokratnog kalupa ovisi o tehnološkim i ekonomskim zahtjevima. Najvažnija je vrsta legure koja se lijeva i veličina serije. Kalup mora biti izrađen od materijala temperaturno višestruko otpornijeg nego što je lijevana legura. Zbog toga se odljevci od legura višeg tališta lijevaju u jednokratne kalupe. Većina odljevaka se lijeva u jednokratne kalupe. Materijal od kojeg se izrađuju jednokratni kalupi se nakon upotrebe ne baca, nego se ponovno iskorištava za izrađivanje kalupa. Materijal za izradu jednokratnih kalupa zove se kalupna mješavina.



Slika 5. Shematski prikaz upotrebe različitih vrsta kalupa [2]

3.3.1. Lijevanje u jednokratne kalupe

U današnje vrijeme su jednokratni kalupi najrašireniji tip kalupa u tehnologiji lijevanja. Prije ulijevanja u jednokratni kalup mora se za svaki odljevak izraditi kalup, a zbog velikog broja kalupa oni se izrađuju u ljevaonici s posebnom opremom koju nazivamo kalupnim linijama. Materijal od kojeg se izrađuju jednokratni kalupi zove se kalupna mješavina, a izrada jednokratnih kalupa naziva se kalupljenje. Kalupna mješavina sastoji se od osnovnog materijala, veziva i različitih dodataka. Vrsta jednokratnog kalupa je određena vezivom. Ukoliko se koristi vezivo koje vezuje pomoću fizikalnih sila, onda te kalupe zbog njihovih slabijih mehaničkih svojstava nazivamo mekima, u odnosu na tvrde kod kojih se vezivanje odvija kemijskom reakcijom. Kako bi se unutar kalupa izradila šupljina koja će odgovarati obliku željenog odljevka, potrebna je posebna naprava koja se izrađuje na osnovi crteža odljevka, a naziva se model. [2]

Glavna obilježja jednokratnih kalupa:

- Nakon lijevanja se uništava kalup da se izvadi odljevak
- Kalupni materijal može biti gips, pijesak (kvarcni ili kremeni), te vezivo i dodaci
- Koristi se za izradu složenijih oblika odljevaka i konstrukcijskih elemenata [6]

Na slici 6. prikazan je primjer ulijevanja litine u jednokratni pješčani kalup.



Slika 6. Primjer ulijevanja litine u jednokratni pješčani kalup [10]

3.3.2. Lijevanje u stalne kalupe

Stalni kalupi se upotrebljavaju više puta, slika 7. Nazivaju se kokile i posjeduju dobru toplinsku provodljivost kako bi skrućivanje metala teklo brzo. Zbog toga je struktura odljevka sitnozrnata. Izrađeni su od metala i grafita. U njima se izrađuje veliki broj odljevaka i proces lijevanja je moguće mehanizirati i automatizirati. Zbog visoke cijene koriste se kod većih serija. [3]

Izrađuju se od sivog lijeva ili legiranog čelika. Potrebni su jako skupi, specijalizirani strojevi i posebno obrazovani radnici pa je izrada takvih kalupa skupa. Kako bi se smanjili troškovi izrade potrebno je maksimalno iskorištenje specijaliziranih alatnih strojeva i zbog toga zna biti jako često da jedna alatnica izrađuje višekratne kalupe za više ljevaonica. [2]

Glavna obilježja stalnih kalupa:

- Kalup je za čelične odljevke izrađen od metala ili grafita
- Ograničen broj odljevaka
- Isplativiji su u odnosu na jednokratne kalupe u visokoserijskoj proizvodnji [6]



Slika 7. Stalni kalup [11]

4.ULJEVNI SUSTAV

4.1. Kriteriji uljevnog sustava

Uljevnim sustavom se smatra mreža kanala gdje taljevina ulazi u kalup i ispunjava kalupnu šupljinu. Uljevni sustav je pravilno konstruiran ako ispunjava sljedeće zahtjeve:

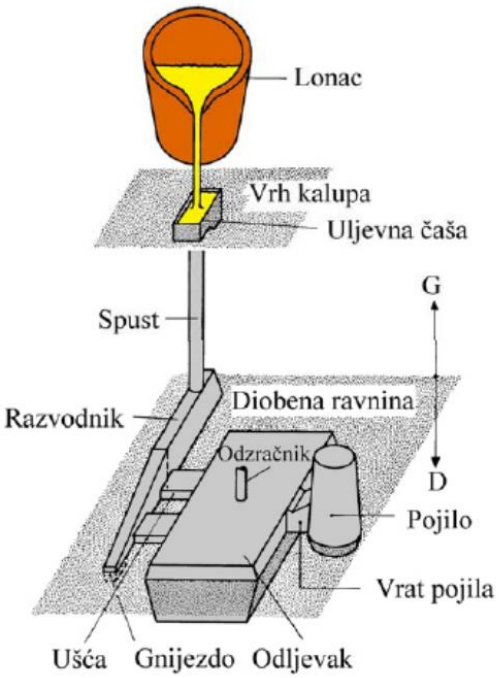
- brzo popunjavanje kalupne šupljine
- minimalizacija turbulencije
- izbjegavanje erozije kalupa i jezgara
- uklanjanje troske, metalnih oksida i uključaka prije ulaza u kalupnu šupljinu
- spriječiti zahvaćanje zraka i ukloniti plinove iz kalupne šupljine
- izbjegavanje distorzije odljevaka
- stvaranje pogodnih toplinskih gradijenata
- omogućiti proizvodnju odljevaka uz korištenje minimalne količine metala
- ekonomičnost uklanjanja uljevnog sustava
- kompatibilnost s postojećim načinom kalupovanja i lijevanja [4]

Pored osnovnog zadatka da ispuni kalupnu šupljinu taljevinom, uljevni sustav mora uvjetovati ne samo konačna kvalitativna svojstva odljevka, nego će o njemu ovisiti i izbor tehnologije kalupljenja, a u pojedinim slučajevima će o tehnologiji kalupljenja ovisiti izbor uljevnog sustava. Zbog hlađenja taljevine za vrijeme ispunjavanja kalupa, uljevni sustav treba osigurati povoljan raspored topline radi kompenzacije pojave usahlina i napetosti, pravilnu brzinu punjenja da ne dođe do usisavanja zraka, erozije kalupa i jezgri, nastajanja troske i uključina, što su sve vrlo važni čimbenici za osiguravanje kvalitete odljevka. Uljevni sustav mora osigurati lako kalupljenje, minimalan utrošak materijala i mora biti omogućeno njegovo lako uklanjanje. [2]

4.2. Glavne komponente uljevnog sustava

Glavne komponente uljevnog sustava su:

- uljevna čaša
- spust
- podnožje spusta
- razvodnik
- ušće
- odzračnik (odzračnici). [4]



Slika 8. Glavne komponente uljevnog sustava [4]

Sve komponente sustava, slika 8., su povezane između sebe primjenom specifičnih pravila i proračunatih omjera. Moguće je da uljevni sustav sadrži neke elemente koji osiguravaju napajanje odljevka, odnosno pritjecanje taljevine i nakon što se završi punjenje kalupne šupljine kako bi se izbjegle pogreške uslijed stezanja metala. Prije ulaska u kalupnu šupljinu, u uljevni sustav se mogu inkorporirati filtri zbog poboljšanja čistoće taljevine. [4]

4.3. Vrste uljevnih sustava

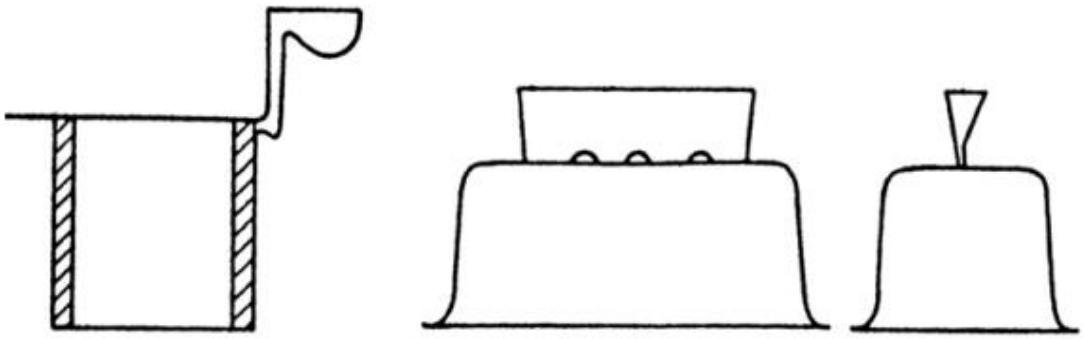
Uljevni sustavi se mogu podijeliti na horizontalne i vertikalne prema tehnici izrade kalupa, tj. na diobenu ravninu. U praksi se češće koriste horizontalni uljevni sustavi. Vertikalni uljevni sustavi se najčešće primjenjuju kod automatskih linija za izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom. [4]

Obzirom na položaj ušća, možemo uljevne sustave podjeliti u tri osnovne grupe:

- direktni uljevni sustav sa ušćem odozgo
- indirektni uljevni sustavi sa ušćem na diobenoj ravnini
- uljevni sustavi sa ušćem odozdo [4]

4.3.1. Direktni uljevni sustav

Direktni uljevni sustav, slika 9., omogućuje brzo lijevanje, pravilno skrućivanje odljevka i postepeno hlađenje. Teško se primjenjuje kod velikih odljevaka. Kako dolazi do velike brzine, dolazi do udara taljevine i snažnog erozivnog djelovanja u kalupu, raspršivanja mlaza i stvaranja grešaka u obliku hladnih kapi. Takav sustav s klinastim ušćem primjenjuje se za lijevanje odljevaka s vrlo tankim stjenkama, gdje je upravo velika brzina lijevanja potrebna. [4]



Slika 9. Direktni uljevni sustav sa ušćem odozgo [4]

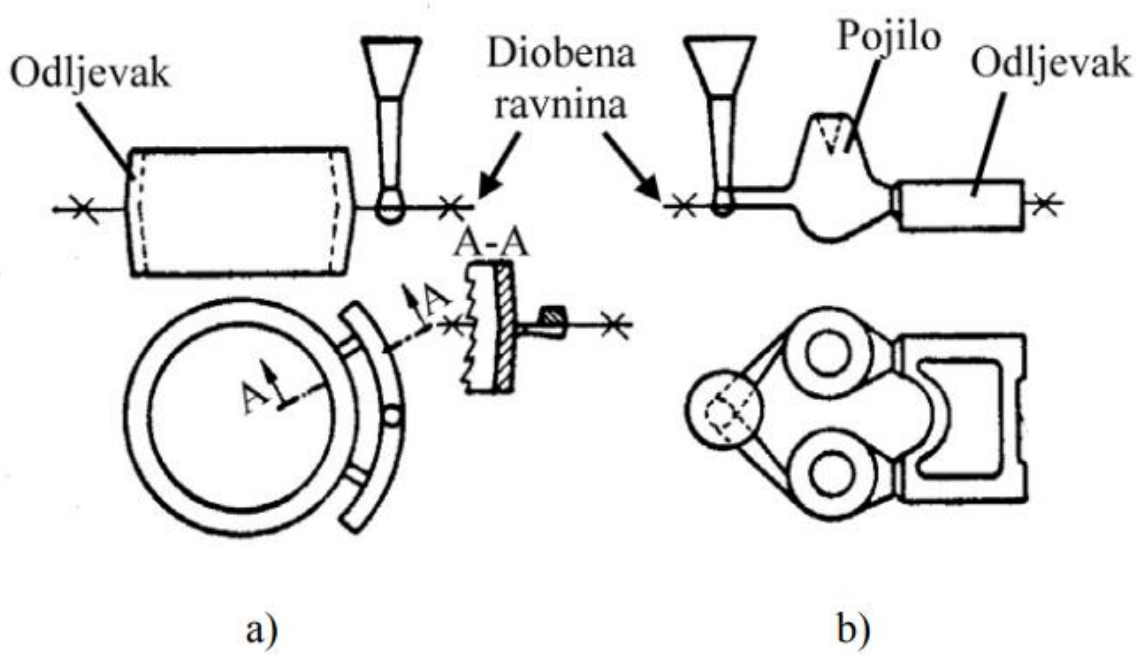
4.3.2. Indirektni uljevni sustav

Indirektni uljevni sustav se često primjenjuje jer je najčešće uvjetovan konstrukcijom odljevka i jednostavnošću kalupljenja. Prema pogledu slijeda skrućivanja uvjeti su složeniji i ovise o obliku odljevka i razmještaju pojila. Kako bi se postigla povoljnija raspodjela temperature primjenjuje se više ušća. Ušća se postavljaju pod kutem od 90° u odnosu na razvodnik. [4]

Na slici 10. prikazani su indirektni uljevni sustavi:

a) ulijevanje kroz razvodnik i ušća

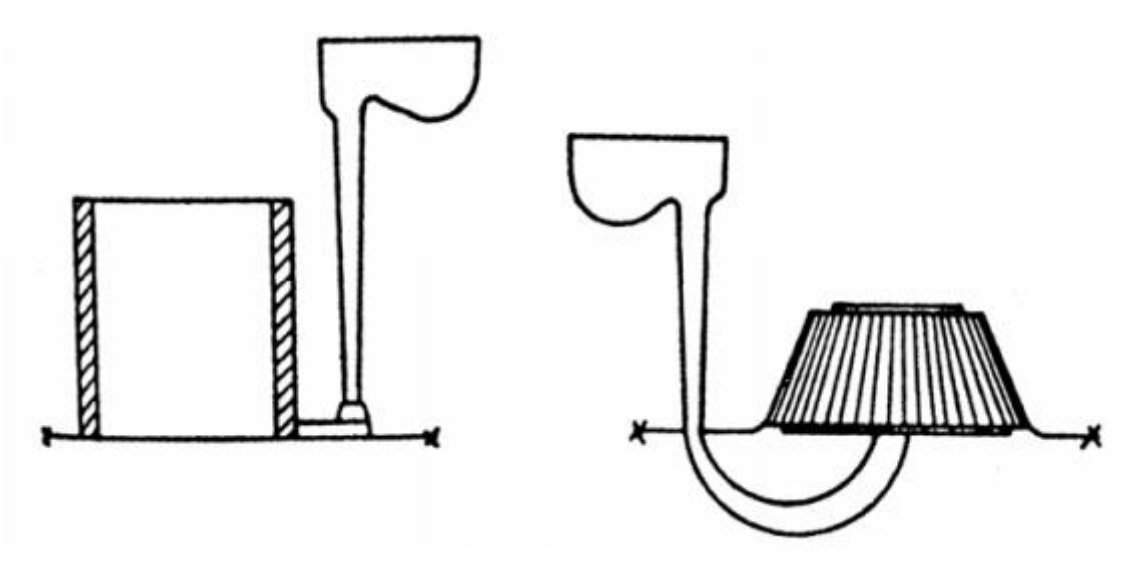
b) ulijevanje kroz pojilo



Slika 10. Indirektni uljevni sustavi [4]

4.3.3. Uljevni sustav sa uščem odozdo

Uljevni sustav sa uščem odozdo, slika 11., se puno manje primjenjuje zbog složenosti kalupljenja. On odlikuje mirnijim načinom punjenja kalupne šupljine, ali i neprirodnim slijedom skrućivanja zbog ćega su potrebna veća pojila. Uljevni sustav sa uščem odozdo pogodan je za lijevanje metala koji su osjetljivi na oksidaciju. [4]



Slika 11. Uljevni sustav sa uščem odozdo [4]

5. NAPAJANJE ODLJEVAKA

Razumjevanje i kontrola volumnih promjena koje se događaju tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka je od iznimne važnosti u proizvodnji kvalitetnih odljevaka. Da bi omogućili pravilnu konstrukciju sustava napajanja bitno je poznavanje tih promjena. [4]

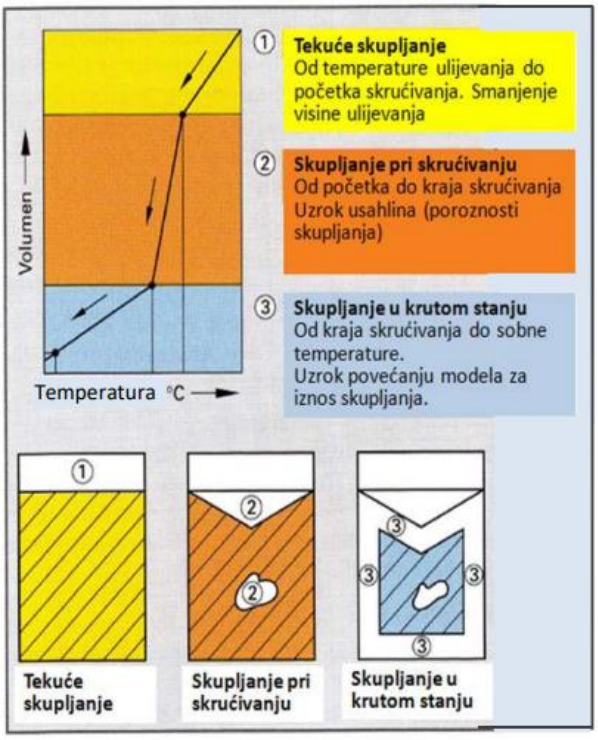
5.1. Volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka

Pri punjenju kalupne šupljine kalupni materijal dolazi u kontakt s taljevinom. Temperatura u kalupu postepeno pada zbog odvođenja topline kroz stjenke kalupa okolini. Kada temperatura dostigne temperaturu likvidusa, tada će započeti skrućivanje, tj. fazna pretvorba iz tekućeg u kruto stanje. Dok se događa proces skrućivanja, zbog povećanja gustoće pakovanja uslijed ugradnje atoma u kristalnu rešetku, dolazi do diskontinuirane promjene volumena, tj. smanjenja volumena (stezanja). Zbog smanjenja volumena nastaju usahline, na mjestu koje zadnje skrućuje. [4]

Razlikujemo tri područja volumnih promjena u odljevku koje se događaju tijekom hlađenja od temperature koju taljevina ima nakon završetka ulijevanja u kalupnu šupljinu do sobne temperature:

- stezanje u tekućem stanju, tj. smanjenje volumena taljevine tijekom hlađenja od temperature koju taljevina ima u kalupu nakon završetka ulijevanja do likvidus temperature skrućivanja,
- stezanje tijekom skrućivanja, tj. smanjenje volumena tijekom hlađenja od likvidus do solidus temperature,
- stezanje u krutom stanju, tj. smanjenje volumena tijekom hlađenja odljevka od solidus temperature do sobne temoperature. [4]

Na slici 12. može se vidjeti prikaz volumnih promjena koje se događaju pri skupljanju.



Slika 12. Skupljanje metala prilikom hlađenja taljevine, skrućivanja i hlađenja skrutnutog odljevka [7]

U tablici 2. prikazane su volumne vrijednosti tijekom skrućivanja za različite ljevačke legure.

Tablica 2. Volumno stezanje tijekom skrućivanja za različite ljevačke legure [4]

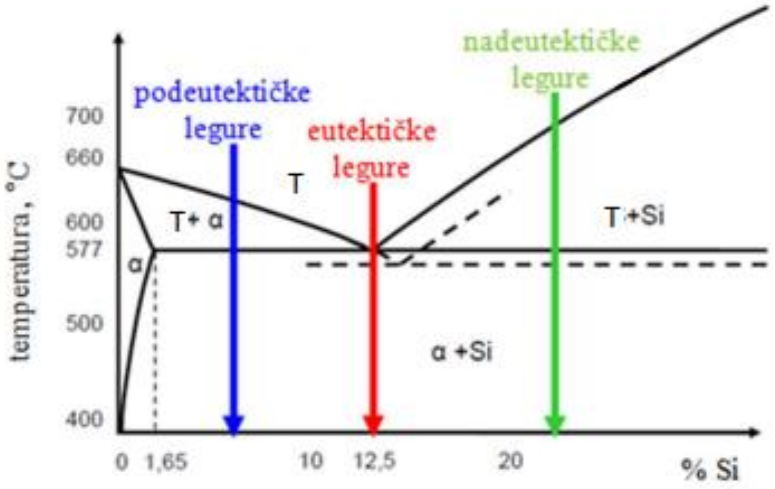
Materijal	Stezanje tijekom skrućivanja, vol.%
Ugljični čelik	2,5 – 3,0
Ugljični čelik sa 1% C	4,0
Bijeli željezni lijev	4,0 – 5,5
Sivi lijev	Od 1,6 kontrakcije do 2,5 ekspanzije
Nodularni lijev	Od 2,7 kontrakcije do 4,5 ekspanzije
Cu	4,9
Cu-30Zn	4,5
Cu-10Al	4,0
Al	6,6
Al-4,5Cu	6,3
Al-12Si	3,8
Mg	4,2
Zn	6,5

Iz tablice 2. može se vidjeti kako se skupljanje u vremenu događanja skrućivanja znatno mijenja ovisno o metalu ili leguri koja se lijeva. Može se vidjeti da tijekom skrućivanja dolazi do ekspanzije kod sivog i nodularnog lijeva. Praksa je pokazala da se ispravnom kontorolom metalurških i kaluparskih uvjeta ekspanzija može primjeniti u svrhu smanjenja ili eliminacije primjene pojila. [7]

5.2. Skrućivanje Al-Si legura

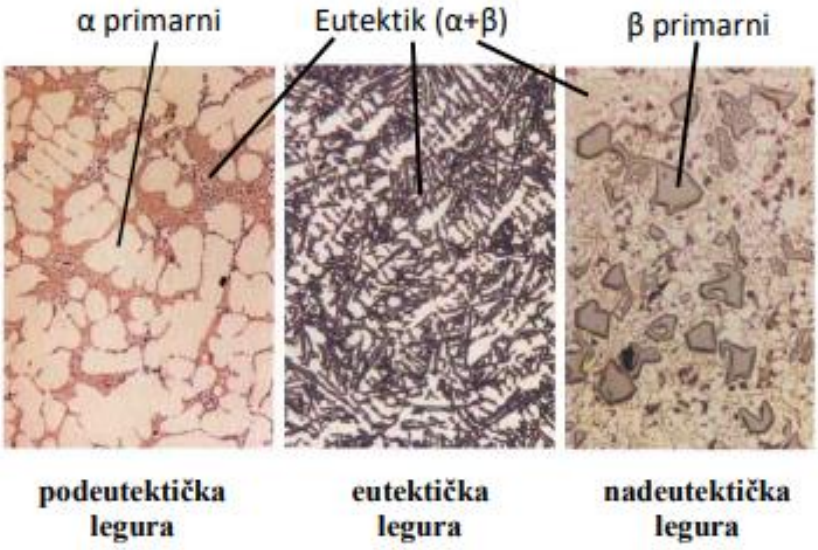
Binarne Al-Si legure tvore eutektički sastav s eutektičkom točkom kod masenog udjela silicija od 12.5% i temperature 577 °C. [7]

Na slici 13. može se vidjeti fazni dijagram Al-Si binarne legure. Legure koje imaju manje od 11% silicija su podeutektičke. Ukoliko je sadržaj silicija između 11% i 13% onda su eutektičke, a ako je veći od 13% onda se nazivaju nadeutektičkim legurama. U strukturi podeutektičkih legura nalazi se primarni aluminij (α aluminij) i eutektik, u strukturi eutektičkih legura gotovo samo eutektik, a u nadeutektičkim legurama nalazimo eutektik i primarni silicij (β-silicij). Eutektik se sastoji od α-aluminija i β-silicija. [7]



Slika 13. Dijagram stanja Al-Si legura [7]

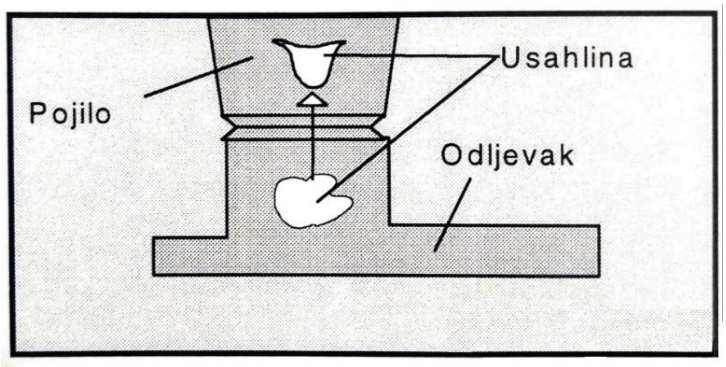
Na slici 14. vidljiva je podjela Al-Si legura s pripadajućim mikrostrukturama gdje su: α primarni – primarni dendriti aluminija, β primarni – primarni pločasti silicij.



Slika 14. Podjela Al-Si legura s pripadajućim mikrostrukturama [7]

5.3. Pojila

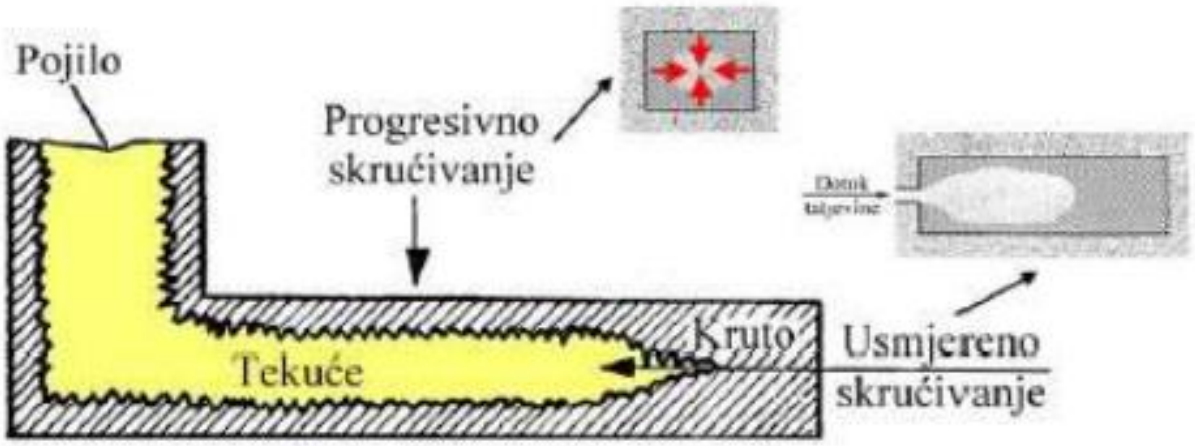
Kako bi se izbjegle usahline, u svrhu nadoknade volumena mora se predvidjeti poseban rezervoar taljevine koji nazivamo pojilo. Osobito je bitan položaj pojila, jer pojilo utječe na temperaturni raspored unutar odljevka. Položaj pojila mora biti takav da se odljevku nesmetano može dopajati ono mjesto gdje bi se pojavila usahlina. Usahlina se premješta u pojilo koje se nakon čišćenja i hlađenja odrezuje od odljevka, slika 15. [2]



Slika 15. Pomak usahline u pojilo [2]

Kako bi pojilo dopajalo odljevak, mora postojati potrebna sila dopajanja, te smjer skrućivanja odljevka mora biti usmjeren prema pojilu. Ako pojilo nebi bilo prisutno, usahlina bi se pojavila na mjestu koje se zadnje skrutne. Izbjegavanje usahlina bitan je zahtjev za kvalitetu odljevka. Vrlo često se mora koristiti pojilo većih dimenzija kako bi se ispunio taj zahtjev, iako bi veliko pojilo značilo veliki utrošak litine, odnosno materijala i energije. Ako se uračuna trošak za odstranjivanje takvog pojila s odljevka, razumljivo je da će izbor pojila često puta biti kompromis između zahtjeva za kvalitetom i ekonomičnošću. [2]

Pojilo je pravilno postavljeno onda kada bude postignuto usmjereno skrućivanje. Tako se osigurava da poroznost skupljanja (usahlina) bude prisutna u pojilu, a ne u odljevku. Bitno je da pojilo najdulje ostane tekuće, da zadnje skrutne. Temperaturni gradijent prema pojilu mora biti dovoljno velik, kako progresivno skrućivanje ne bi prekinulo napajanje, tj. zatvorilo kanal kao što možemo vidjeti na slici 16. [7]

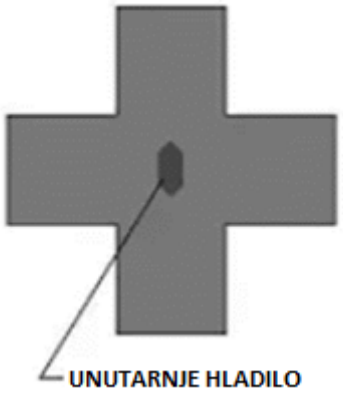


Slika 16. Shematski prikaz usmjerenog i progresivnog skrućivanja [7]

6. HLADILO

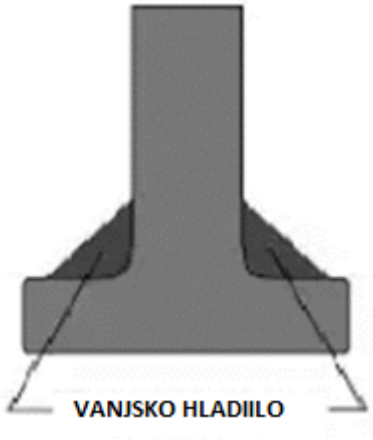
Često puta iz tehnoloških razloga nije pogodno pojilo postaviti na najpovoljnije mjesto jer bi ga kasnije bilo teško odstraniti. Iz tog razloga se na određenim mjestima povećava vodljivost kalupa metalnim umetkom i time korigira temperaturni gradijent. [2]

Hladilo je predmet koji ubrzava skrućivanje na specifičnom mjestu odljevka. Metal se inače hladi određenom brzinom relativno prema svojoj debljini. Kada geometrija šupljine otežava skrućivanje, može se postaviti hladilo kako bi se ubrzao taj proces. Postoje dvije vrste hladila: unutarnje, slika 17. i vanjsko hladilo. Unutarnja hladila su komadi metala koji su postavljeni u šupljini kalupa. Kada je šupljina kalupa ispunjena taljevinom, dio hladila se topi i postaje dio odljevka. Iz tog razloga hladilo treba biti istog materijala kao taljevina. [12]



Slika 17. Unutarnje hladilo [13]

Vanjska hladila, slika 18., imaju visok toplinski kapacitet i toplinsku provodljivost. Oni su postavljeni na rub šupljine kalupa i postaju dio zida šupljine za oblikovanje. Hladila koja se često koriste u pješčanim kalupima su izrađena od čelika, jer imaju veću gustoću, toplinsku vodljivost i toplinski kapacitet od materijala kalupa. Mogu biti izrađena od mnogo materijala uključujući željezo, bakar, broncu, aluminij, grafit i silikonski karbid. Druge vrste pijesaka sa većom gustoćom, toplinskom vodljivosti ili toplinskim kapacitetom se isto tako mogu upotrebljavati kao hladilo, npr. kromski i cirkonski pijesak. [12]



Slika 18. Vanjsko hladilo [13]

Iako je primjena hladila prihvatljiva mjera za poboljšanje efikasnosti pojila, u ljevaonicama se slabo koriste. Kod vanjskih hladila naglo odvođenje topline može uzrokovati naglo skrućivanje na tom mjestu i naglo stezanje. Zbog toga mogu nastati napetosti i tople napukline. Izuzetno je važno da površina hladila bude čista od vlage i oksida. Vlaga uzrokuje otapanje plina u litini, a ako je hladilo korodiralo, kod čeličnog lijeva može doći do reakcije oksida s ugljikom iz litine što može izazvati zavarivanje hladila i pojavu mjehuravosti. [2]

7.KONTROLA KVALITETE ODLJEVAKA

Nakon završetka faze izrade, kontroliraju se karakteristike odljevaka koje utječu na njegovu upotrebljivost. Ovisno o namjeni odljevka, različiti su i zahtjevi kvalitete. Vizualna kontrola se provodi kod odljevaka kod kojih je bitna samo točnost osnovnog oblika. Ako postoje zahtjevi za dimenzijsku točnost, provodi se kontrola mjerenjem, dok za ostala svojstva, kao što su kemijski sastav, mehanička svojstva, struktura, nepropusnost, potrebno je provesti laboratorijska ispitivanja. [6]

7.1. Greške na odljevcima

U tehnološkom procesu proizvodnje odljevaka, postupcima koji se provode i materijalima koji se koriste nalazi se mnogo potencijalnih mjesta nastanka greške. Veze između uzroka i posljedica, te mogućnost međudjelovanja različitih uzroka nastanka škarta vrlo su složene. Jedan uzrok može izazvati više različitih pogrešaka, a ista greška može biti prouzrokovana djelovanjem različitih uzorka ili njihovom kombinacijom. Zadatak ispitivanja grešaka sastoji se u što jasnijem definiranju vrste greške, uzroka njezinog nastajanja i sukladno tome razvijanje potrebnih protumjera. Današnjim razvijenim metodama simulacija ulijevanja i skrućivanja, moguće je ostvariti znatne uštede, jer se potencijalna greška uočava već na virtualnom modelu u fazi tehnološke razrade, te ju je moguće izbjeći pravilnim preoblikovanjem uljevnog sustava. Postoji više klasifikacija vrsta grešaka. Tako greške možemo podijeliti prema postupku lijevanja ili njezinu izgledu. Greške na odljevcima prema postupcima lijevanja dijele se na greške do kojih može doći kod bilo kojeg postupka lijevanja, te na greške karakteristične za lijevanje u pijesak. [6]

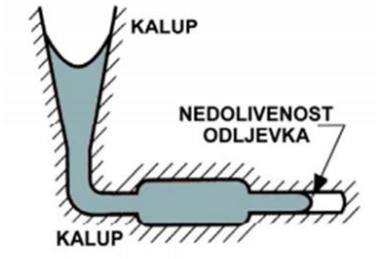
7.1.1. Podjela grešaka na odljevcima

Greške na odljevcima dijelimo na:

1) Nedolivenost odljevka
2) Nestaljeno područje
3) Nemetalni uključci
4) Usahlina [14]

7.1.1.1. Nedolivenost odljevka

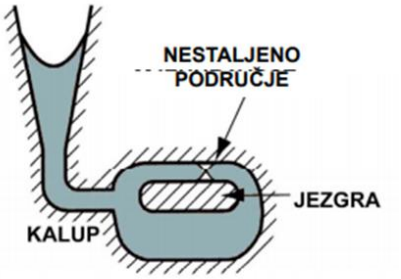
Odljevak se skrutnuo prije nego je taljevina u potpunosti ispunila kalupnu šupljinu, slika 19.
MJERE POMOĆI: povišenje temperature ulijevanja, promjena oblika ili veličine ušća, koristiti legure bolje livljivosti. [14]



Slika 19. Primjer nedolivenosti odljevka [14]

7.1.1.2. Nestaljeno područje

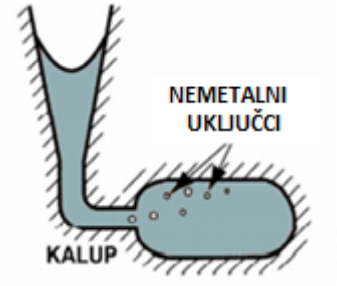
Taljevina s više strana teče u kalupu, ali zbog preranog skrućivanja nije došlo do potpunog staljivanja metala, slika 20.
MJERE POMOĆI: povišenje temperature ulijevanja, promjena oblika ili veličine ušća, koristiti legure bolje livljivosti. [14]



Slika 20. Primjer nestaljenog područja [14]

7.1.1.3. Nemetalni uključci

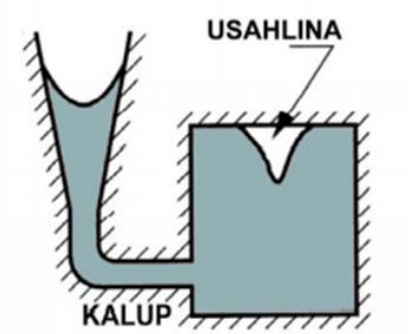
Uključci imaju sastav troske, odnosno sastoje se od oksida sulfida i drugih nemetalnih spojeva, netopivih u taljevini. Mogu biti okruglasti ili u obliku strija, slika 21.
MJERE POMOĆI: Smanjenje udjela elemenata sklonih oksidaciji, skraćivanje trajanja skrućivanja, uklanjanje troske prije ulijevanja. [14]



Slika 21. Primjer nemetalnih uključaka [14]

7.1.1.4. Usahlina

Usahlina se može pojaviti kao ulegnuće na površini odljevka ili unutar odljevka, a nastaje zbog stezanja materijala prilikom skrućivanja i hlađenja te nedostatka taljevine koja bi kompenzirala razliku volumena u području koje posljednje skrućuje, slika 22.
MJERE POMOĆI: Osiguranje usmjerenog skrućivanja prema mjestu posljednjeg skrućivanja proračunavanje pojila, uporaba egzotermnih pojila, postavljanje hladila. [14]



Slika 22. Primjer usahlina [14]

7.1.2. Podjela greškaka na odljevcima karakteristične za lijev u pijesak

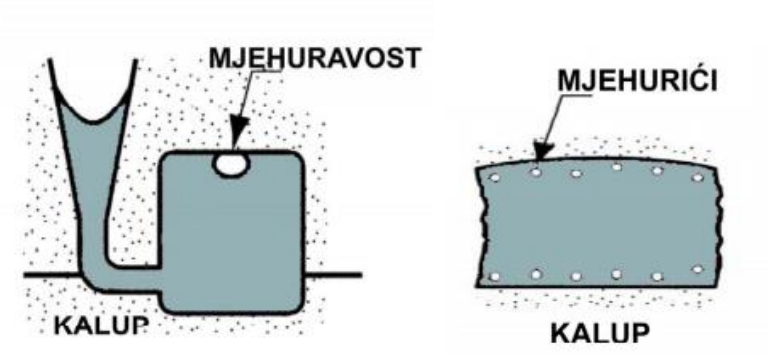
Greške na odljevcima karakteristične za lijev u pijesak dijelimo na:

1) Mjehuravost
2) Penetracija litine
3) Pomak [14]

7.1.2.1 Mjehuravost

Zbog visoke temperature ulijevanja metala dolazi do otpuštanja plinova iz kalupne mješavine koji ostaju zarobljeni ispod površine odljevka. Može doći do formiranja većih mjehura ili puno sitnih mjehurića, slika 23.

MJERE POMOĆI: Upotrebljavati čišće kalupne materijale, smanjiti udio čeličnog otpada u zasipu, smanjiti udio vlage u pijesku... [14]

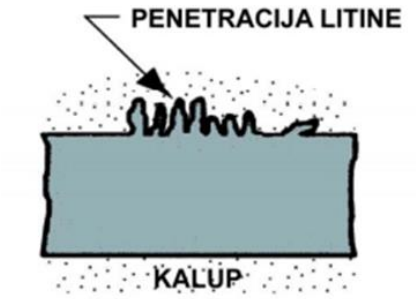


Slika 23. Primjer mjehuravosti [14]

7.1.2.2. Penetracija litine

Kod metala visoke tečljivosti (malog viskoziteta), na mjestima jakog zagrijavanja kalupa i slabe zbijenosti pjeska, može doći do penetracije litine u pijesak kalupa ili jezgre, pa se materijal odljevka na kraju sastoji od mješavine metala i pijeska, slika 24.

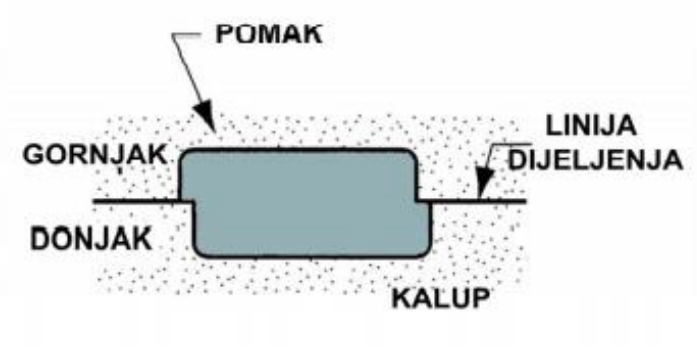
MJERE POMOĆI: Uporaba finijeg pijeska, povećanje udjela veziva, premazivanje kalupa, sniženje temperature ulijevanja... [14]



Slika 24. Primjer penetracije taljevine [14]

7.1.2.3. Pomak

Prilikom sklapanja donjaka i gornjaka može doći do bočnog pomaka dvaju dijelova modela, kalupa ili pomaka jezgre uzrokujući tako na liniji dijeljenja stepenasti oblik pogreške na odljevku, slika 25. MJERE POMOĆI: Tehnološka disciplina pri centriranju modela, kalupa i jezgri. [14]



Slika 25. Primjer pomaka [14]

7.2. Podjela grešaka na odljevcima prema izgledu

Prema izgledu, pogreške klasificiramo u 7 osnovnih razreda (oznakama od A do G), svaki razred je podjeljen u skupine, skupine pogrešaka u podskupine, a unutar podskupina navedene su pojedinačne greške. [14]

Razredi grešaka:

- A– Metalne izrasline
- B – Šupljine
- C – Prekinuti odljevak
- D – Površinski nedostaci
- E – Nepotpuni odljevak
- F – Netočnost mjera i oblika
- G – Uključci i heterogenosti [14]

8. ALUMINIJ

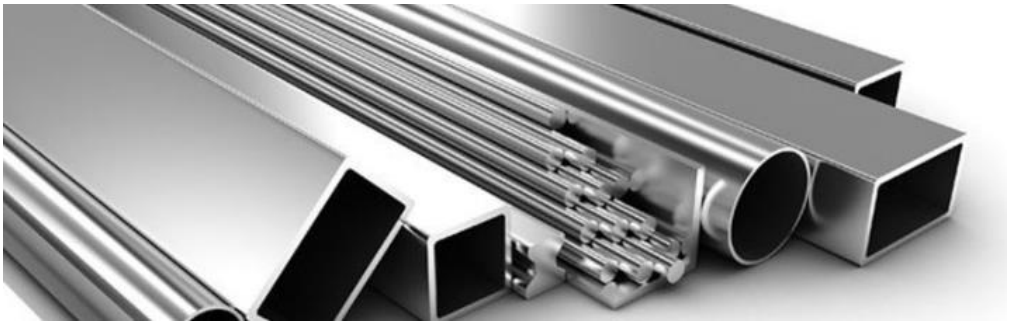
8.1 Općenito o aluminiju

Aluminij je metal srebrno-bijele boje, 13. element u periodnom sustavu elemenata. Najrašireniji je metal na svijetu i čini više od 8% zemljine kore. Također je treći najrašireniji element nakon kisika i silicija. Čisti aluminij se ne pojavljuje u prirodi. Iz tog razloga je tek relativno nedavno otkriven. Prvi put je proizveden 1824. godine i nakon 50 godina je krenuo u industrijsku proizvodnju. Najčešći oblik aluminija u prirodi je aluminijev sulfat i koristi se u razne svrhe. [15]

8.2 Aluminijeve legure

Aluminijski ljevovi dominiraju u autoindustriji. Otprilike dvije trećine svih aluminijskih ljevova se proizviode u automobilskoj industriji, gdje njihova uporaba i dalje raste u usporedbi sa željeznim odljevcima. Kod aluminijevih legura najbitniji legirni elementi su bakar, magnezij, silicij, cink i mangan. U manjoj količini mogu biti prisutni željezo, krom i titan. Mogu se upotrebljavati u lijevanom i gnječenom stanju. Mehanička svojstva se mogu poboljšati precipitacijskim očvrsnućem, iako se brojne legure upotrebljuju bez daljne obrade. [16]

Na slici 26. prikazani su poluproizvodi od aluminijevih legura.



Slika 26. Poluproizvodi od aluminijevih legura [17]

8.2.1 Svojstva aluminija i njegovih legura

Aluminij se dodaje u malim količinama drugim metalima kako bi se poboljšala njihova svojstva, kao u aluminijskim broncama i većini legura na bazi magnezija, a za legure na bazi aluminija dodaju se umjerene količine drugih metala i silicija. Često se koriste za konstrukciju zrakoplova, građevinske materijale, trajne potrošne robe, električne vodiče, kemijsku i prehrambenu opremu. [18]

U tablici 3. prikazana su fizikalna svojstva aluminija.

Tablica 3. Fizikalna svojstva aluminija [19]

Temperatura tališta [Tt]	660 °C
Gustoća [ρ], pri 20 °C	2,70 $\mathrm{g\,cm^{-3}}$
Koeficijent linearnog istezanja [α_L], (0-100 °C)	$23{,}5 \times 10^{-6}\ \mathrm{°C^{-1}}$
Specifični topl. kapacitet [c], (0-100 °C)	920 $\mathrm{J\,kg^{-1}\,°C^{-1}}$
Toplinska vodljivost [λ], (0-100 °C)	240 $\mathrm{J\,s^{-1}m^{-1}}$
Specifični električni otpor [ρ_E], (20°C)	0,0269 $\mathrm{Wmm^2m^{-1}}$
Modul elastičnosti [E], (20°C)	71 900 $\mathrm{N/mm^2}$

Ostala svojstva:

• Oko 2,9 puta lakši od čelika.

• Prekidna čvrstoća, maksimalno do 700 $\mathrm{N/mm^2}$, uz dobru istezljivost.

• Dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama.

• Toplinska vodljivost 13 puta veća nego kod nerđajućeg čelika, 4 puta veća od običnog čelika.

• Elektrovodljivost slična bakru, ali pri istoj težini dvostruko veća nego kod bakra.

• Dobro reflektira svjetlost i toplinu.

• Dobra otpornost na koroziju i dekorativnost površine. Prirodno se zaštićuje slojem oksida čime se postiže samozaštita u normalnoj atmosferi. Anodizacijom i lakiranjem se postiže izvanredan dekorativni efekt.

• Nije magnetičan.

• Dobro se obrađuju raznim načinima. [19]

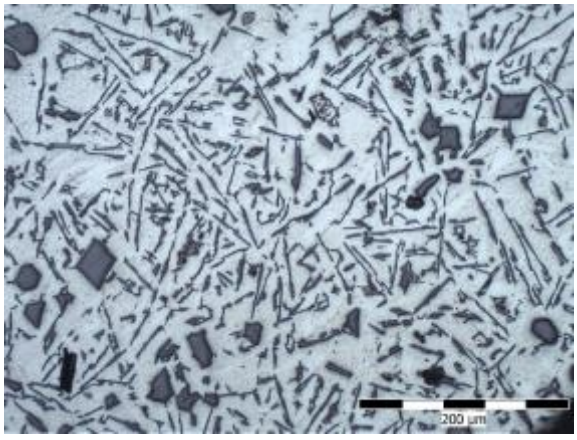
8.2.2. Al-Si legure

Al-Si legure su najraširenije legure u grupi lijevanih legura. Glavni legirni element je silicij I on je odgovoran za dobru livljivost. Sadržaj silicija varira od 5 do 12%. Pogodni su za tlačni lijev, zbog njihovog kratkog intervala skrućivanja. Ima mogućnost skrućivanja bez pucanja i ispunjavanja malih šupljina zbog svoje livljivosti. Karakterizira ih dobra livljivost, dobra mehanička svojstva, izuzetna otpornost na koroziju te dobra zavarljivost. [20]

8.2.2.1. Al-Si 12 legura

Jedna od najpopularnijih Al-Si legura. Poznata je zbog niskog tališta, niske cijene, dobre otpornosti na koroziju, visoke vlačne čvrstoće i jednostavnosti izvođenja ljevačkog procesa. Zbog spomenutih značajki ove legure često se upotrebljavaju u proizvodnji klipova motora s unutarnjim izgaranjem. [21]

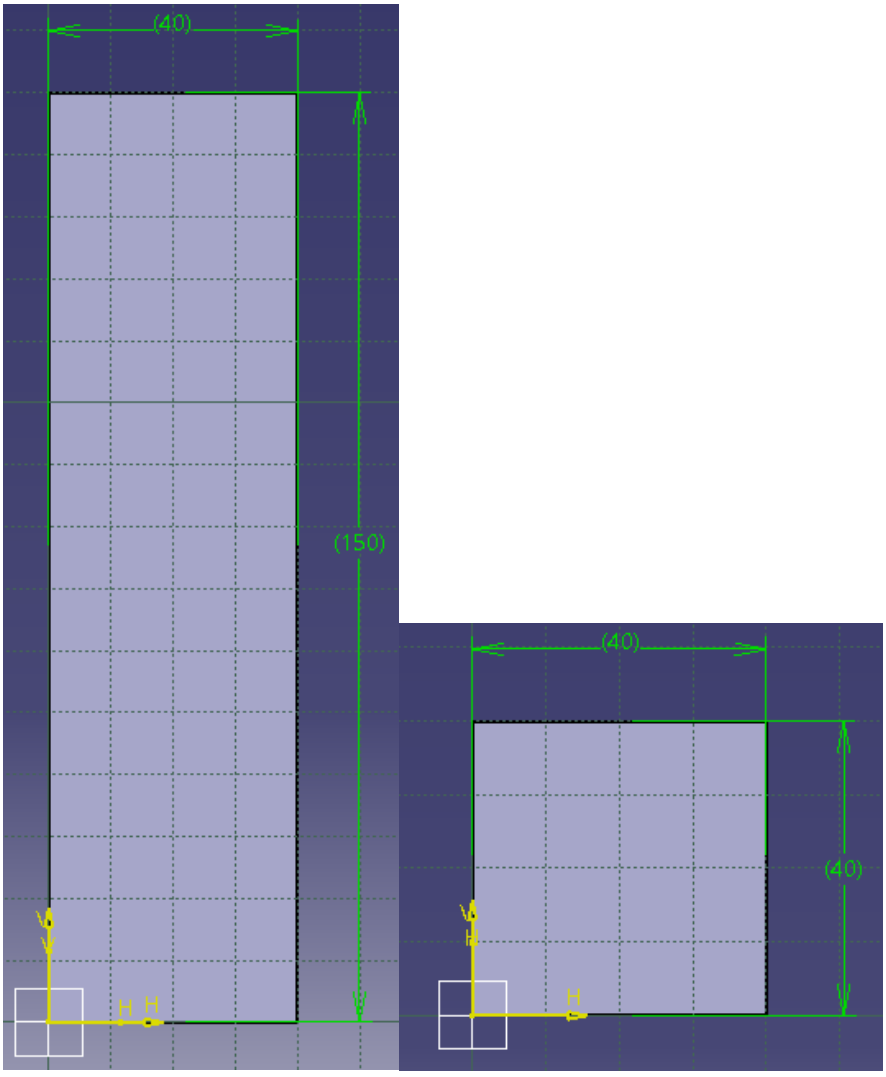
Na slici 27. prikazana je mikrostruktura AlSi12 legure.



Slika 27. Mikrostruktura AlSi12 legure [21]

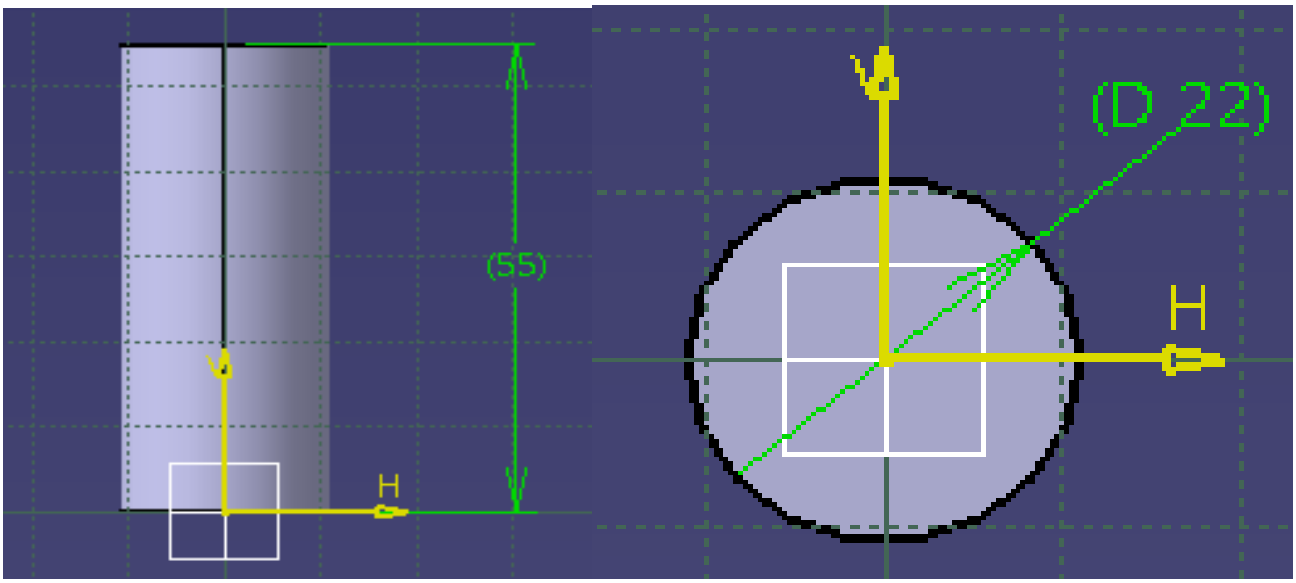
9. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentanom dijelu rada provedeno je lijevanje odljevaka od aluminijske legure AlSi13 kroz pojila različitih dimenzija, te je analizirana pojava usahlina. Hladilo je postavljeno na drugi kraj odljevka i oodređivan je njegov utjecaj na veličinu zone napajanja. Pomoću CAD modela odljevaka konstruiranih u CATIA-i su provedene simulacije lijevanja u programskom paketu QuikCAST radi kasnijeg uspoređivanja kvalitete simuliranih i stvarnih odljevaka. Cilj je bio pokazati na koji način različite veličine pojila i hladilo utječu na pojavljivanje usahlina. Na slici 28. su prikazane dimenzije odljevka.

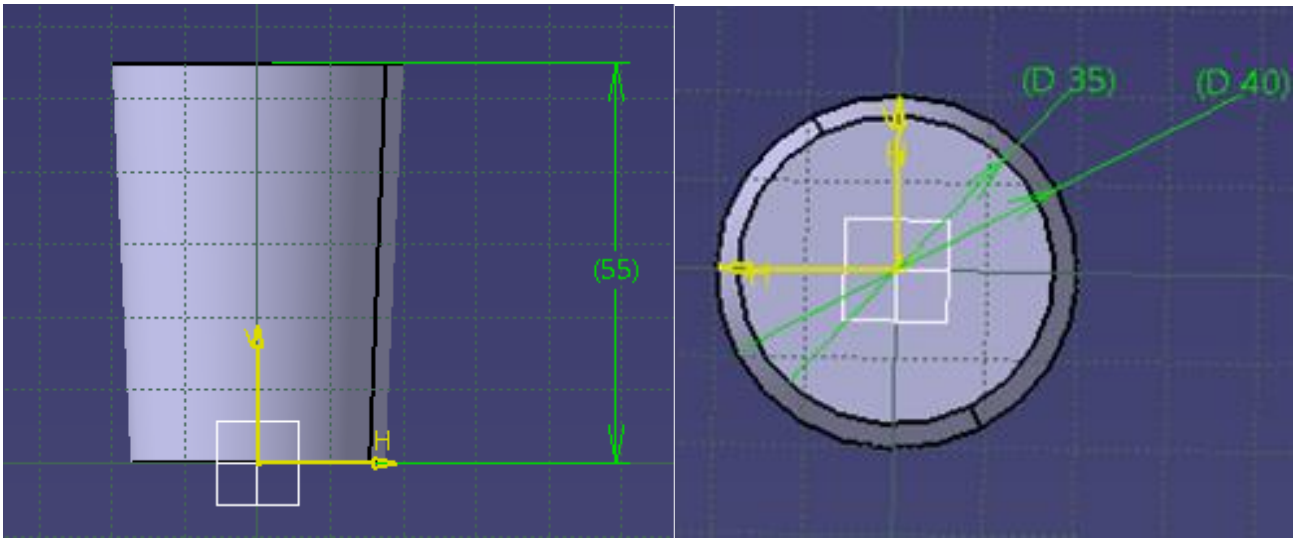


Slika 28. Dimenzije odljevka

Slika 29. i slika 30. prikazuju dimenzije manjeg i većeg pojila.

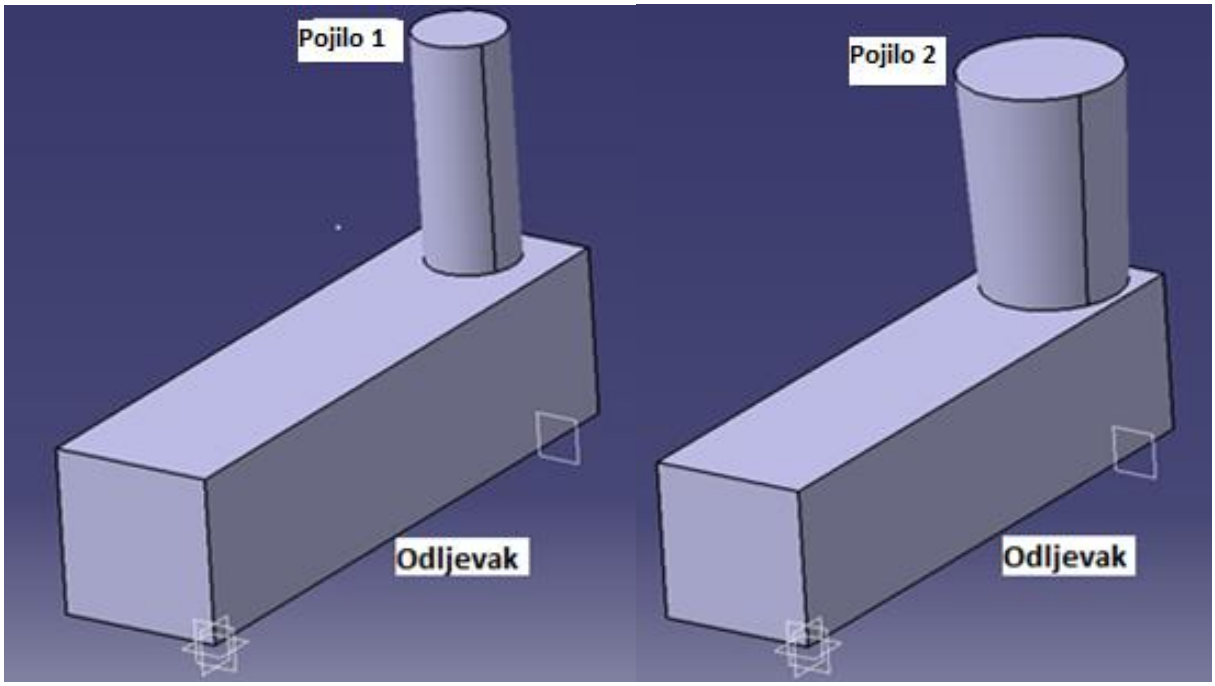


Slika 29. Dimenzije pojila broj 1



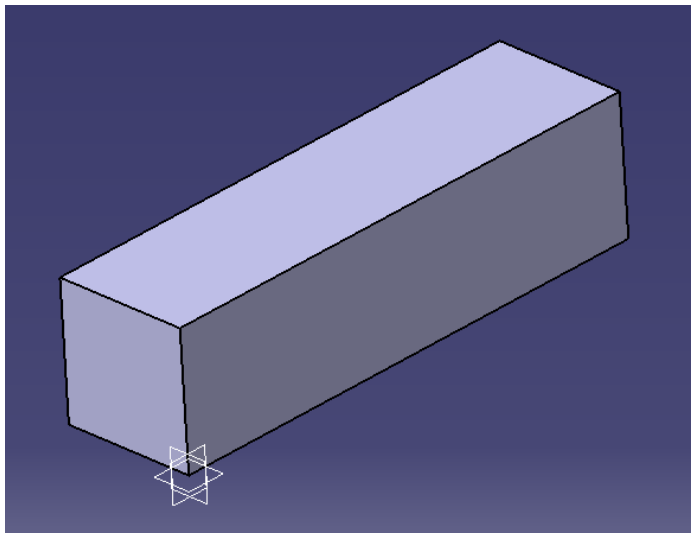
Slika 30. Dimenzije pojila broj 2

Slika 31. prikazuje CAD modele odljevka sa različitim pojilima kroz koje se ulijeva litina.



Slika 31. CAD modeli sa različitim vratovima pojila

Slika 32. prikazuje CAD model odljevka.



Slika 32. CAD model odljevka

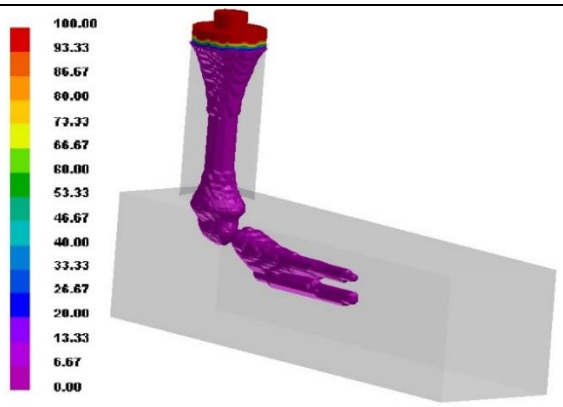
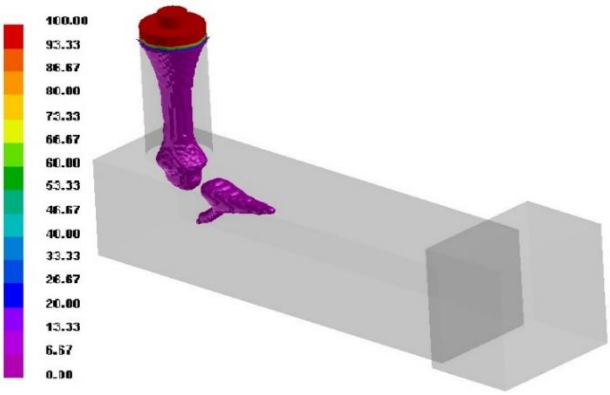
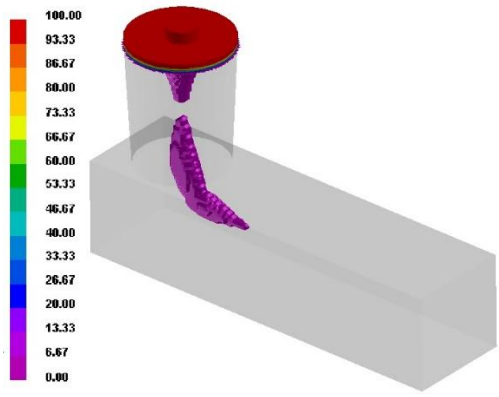
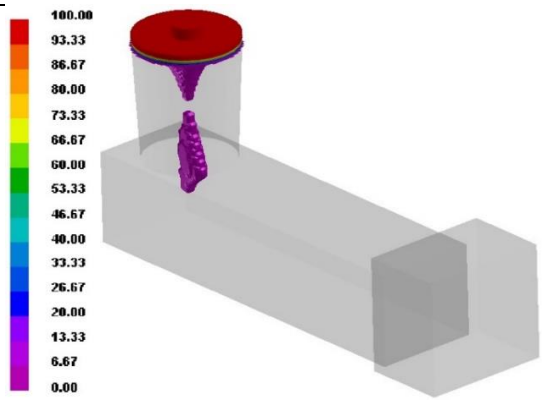
8.1. Simulacija lijevanja

Za sva četiri odljevka napravljena je simulacija ulijevanja koja nam prikazuje zbivanja u kalupnoj šupljini tijekom lijevanja. Dobiveni su podatci o poroznosti, potrebnom vremenu do postizanja solidus temperature, završetku skrućivanja i stanju skrućivanja nakon 220 sekundi.

8.1.1. Simulacije lijevanja sa pojilom 1 (bez hladila), pojilom 1 (sa hladilom), pojilom 2 (bez hladila) i pojilom 2 (sa hladilom)

U tablici 4. su prikazane simulacije poroznosti za sva četiri odljevka, i već se može uočiti kako različite dimenzije pojila i dodavanje hladila znatno utječu na oblik poroznosti.

Tablica 4. Poroznost u trodimenzionalnom prikazu

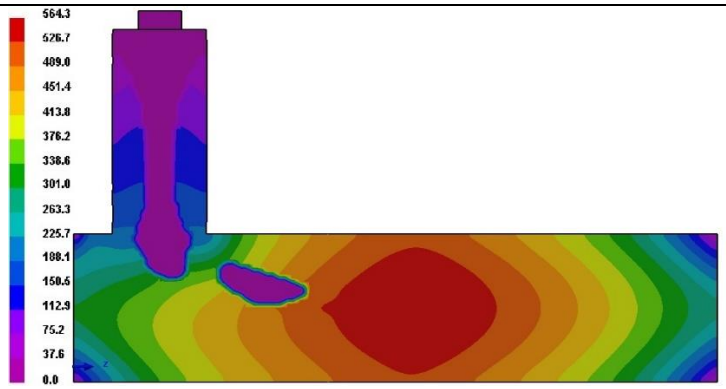
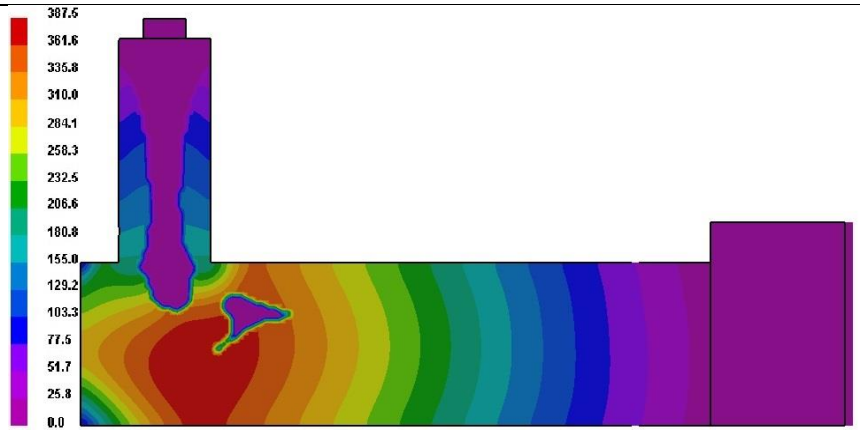
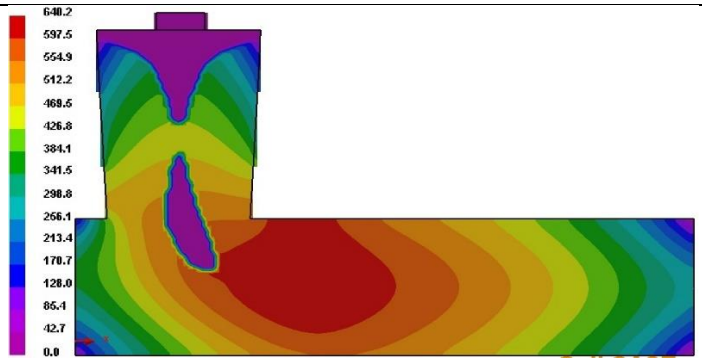
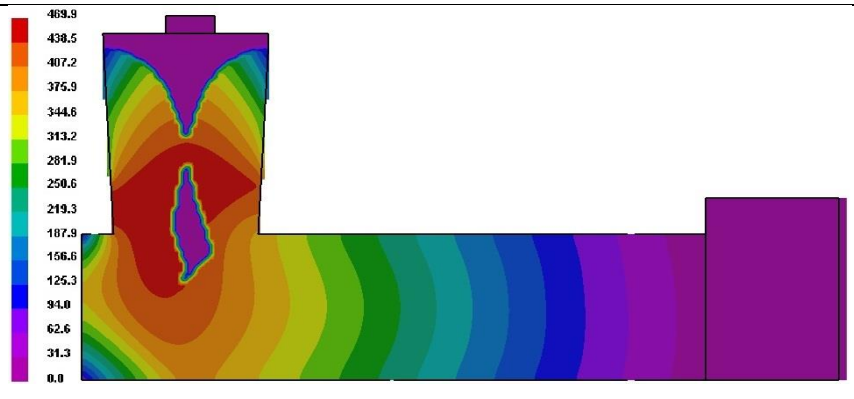
Pojilo 1 (bez hladila)	
Pojilo 1 (sa hladilom)	
Pojilo 2 (bez hladila)	
Pojilo 2 (sa hladilom)	

U tablici 5. su prikazana vremena do postizanja solidusa u sekundama, za pojilo 1 (bez hladila), pojilo 1 (sa hladilom), pojilo 2 (bez hladila) i pojilo 2 (sa hladilom).

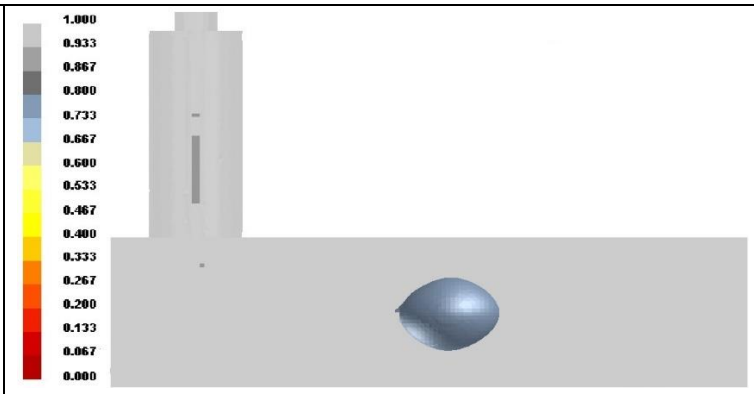
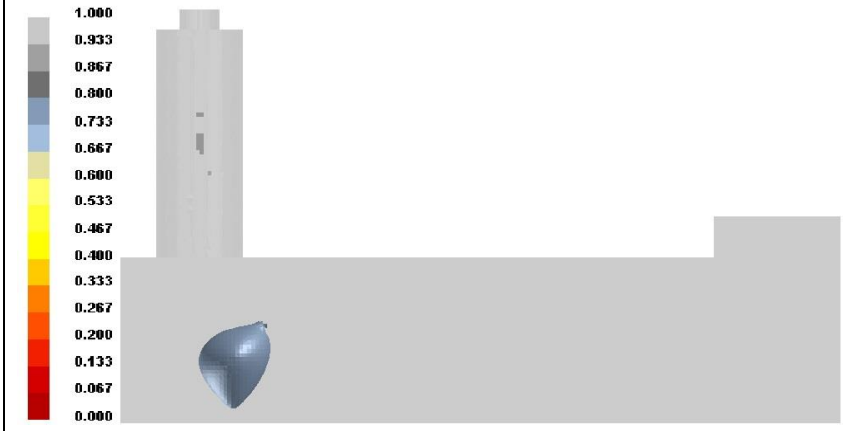
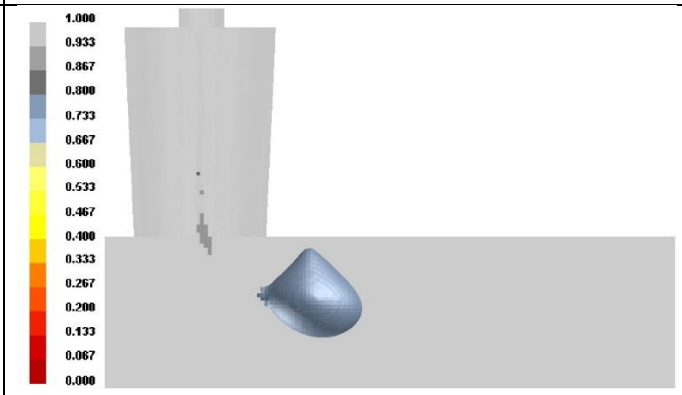
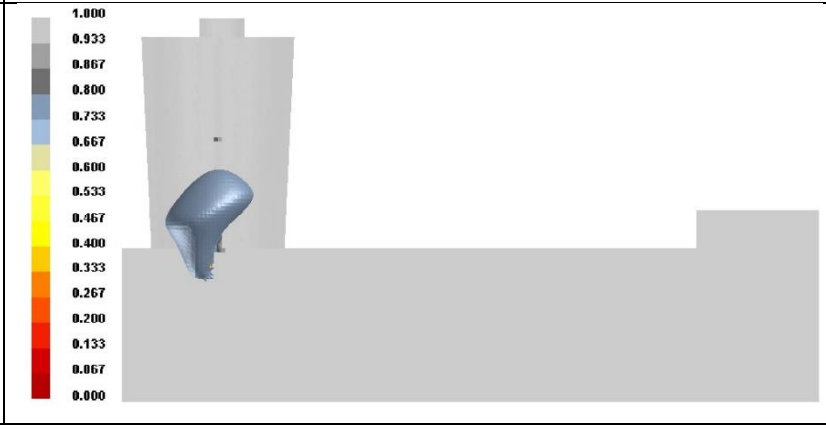
Kod pojila 1 (bez hladila) je vidljivo da do skrućivanja ne dolazi brzo. Pojilo skrutne za 150 sekundi, ali do potpunog skrućivanja odljevka dolazi tek između 527 i 564 sekunde. Odljevak skrutne znatno kasnije nego pojilo što nije pogodno jer dolazi do poroznosti u samom odljevku. U tablici 6. je vidljivo da je završetak skrućivanja u sredini odljevka. Dodavanjem hladila se znatno smanjuje vrijeme do skrućivanja u odljevku i kao što je vidljivo u tablici 6., završetak skrućivanja više nije u sredini odljevka nego je bliže pojilu. Do skrućivanja pojila dolazi nakon 180 sekunde, a do potpunog skrućivanja odljevka dolazi između 361 i 387 sekunde.

Kod pojila 2 bez hladila također je vidljivo da ne dolazi brzo do skrućivanja. Pojilo u ovom slučaju skrutne u vremenu od 512 do 554 sekunde, a do potpunog skrućivanja odljevka dolazi između 597 i 640 sekunde. Do skrućivanja pojila dolazi znatno kasnije jer sam završetak skrućivanja odljevka bliže pojilu. Dodavanje hladila u ovom slučaju uzrokuje da odljevak potpuno skrutne između 438 i 469 sekundi, a završetak skrućivanja se događa gotovo sasvim u pojilu što je vidljivo u tablici 6. i to je poželjno kako bi se izbjegla pojava poroznosti u samom odljevku.

Tablica 5. Vrijeme do solidusa

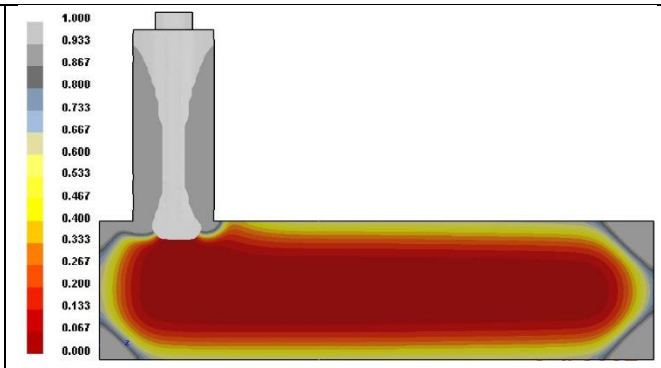
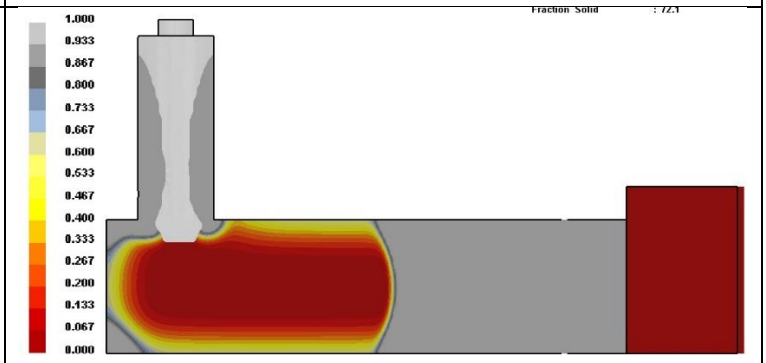
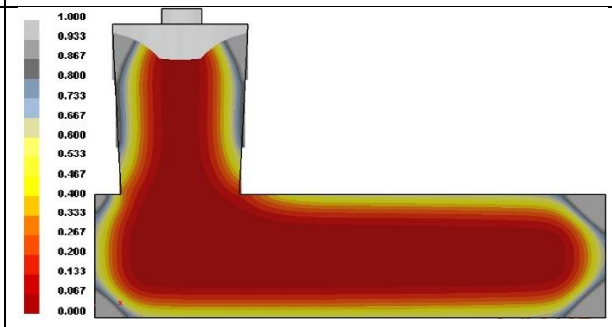
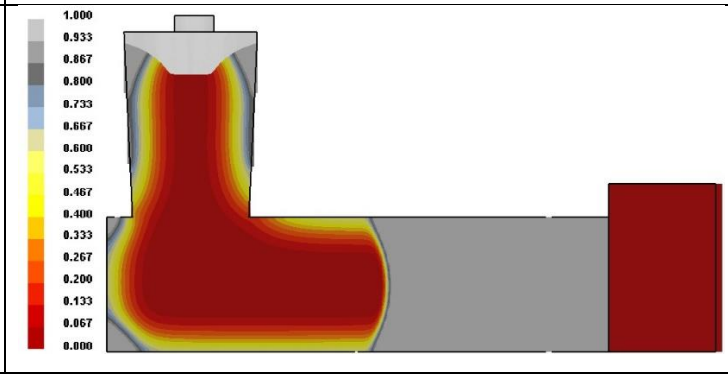
Pojilo 1 (bez hladila)	
Pojilo 1 (sa hladilom)	
Pojilo 2 (bez hladila)	
Pojilo 2 (sa hladilom)	

Tablica 6. Završetak skrućivanja

Pojilo 1 (bez hladila)	
Pojilo 1 (sa hladilom)	
Pojilo 2 (bez hladila)	
Pojilo 2 (sa hladilom)	

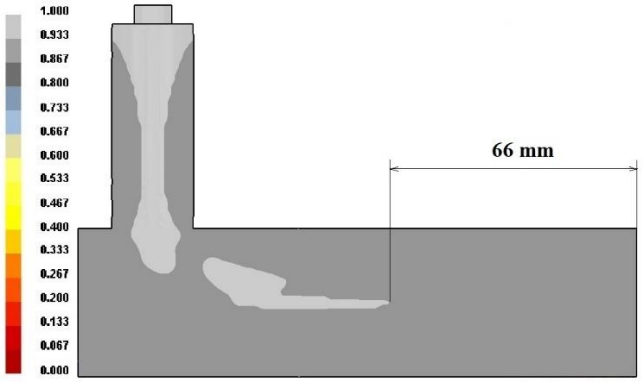
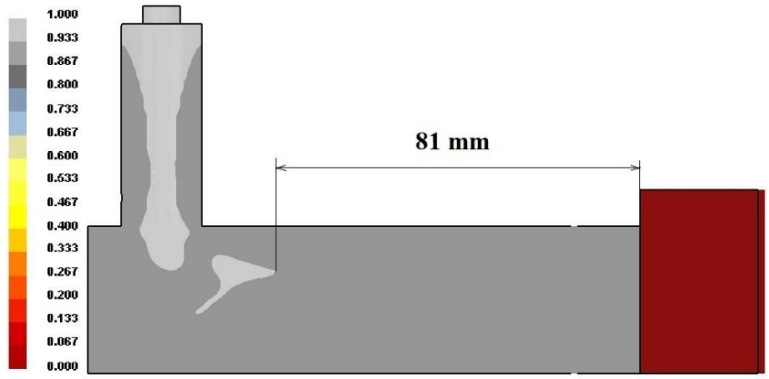
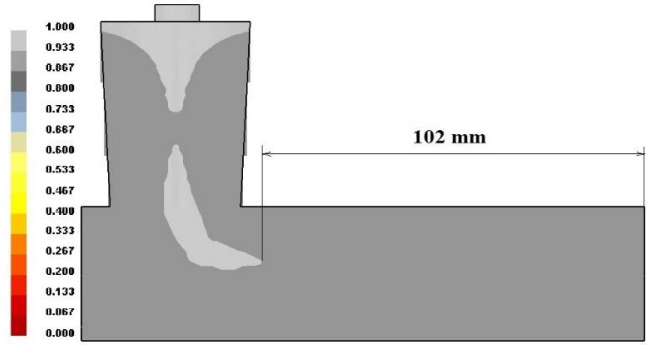
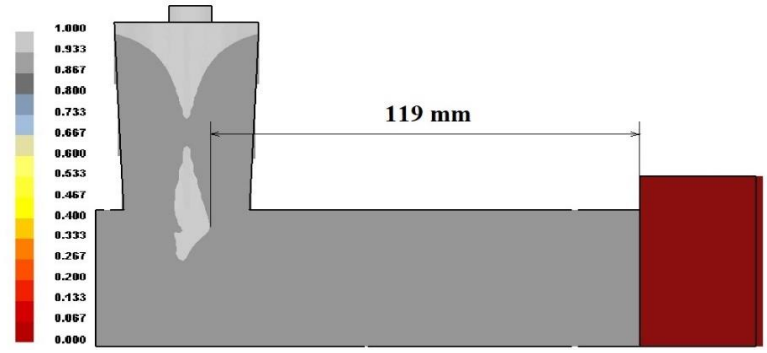
U tablici 7. su prikazani postotci skrućivanja u vremenu 220 sekundi nakon ulijevanja, za pojilo 1 (bez hladila), pojilo 1 (sa hladilom), pojilo 2 (bez hladila) i pojilo 2 (sa hladilom). Vidljivo je kako se dodavanjem hladila znatno ubrzava proces skrućivanja odljevka.

Tablica 7. Skrućivanje 220 sekundi nakon ulijevanja

Pojilo 1 (bez hladila)	
Pojilo 1 (sa hladilom)	
Pojilo 2 (bez hladila)	
Pojilo 2 (sa hladilom)	

U tablici 8 su prikazani presjeci odljevka na završetku skrućivanja.

Tablica 8. Presjeci odljevka na završetku skrućivanja

Pojilo 1 (bez hladila)	
Pojilo 1 (sa hladilom)	
Pojilo 2 (bez hladila)	
Pojilo 2 (sa hladilom)	

Korištenjem hladila zona napajanja povećala se za 15 mm, korištenjem većeg pojila zona napajanja povećala se za 36 mm, a korištenjem većeg pojila i hladila zona napajanja povećala se za 53 mm.

9.2. Izrada kalupa za lijevanje

Postupak izrade jednokratnih pješčanih kalupa prikazan je slikama 33 do 41. Izrađena su četiri kalupa. Koristila su se dva pojila različitih dimenzija, i za oba pojila napravljen je kalup sa i bez hladila kako bi se mogla analizirati pojava usahlina.



Slika 33. Modeli korišteni za izradu kalupa



Slika 34. Postavljanje donjaka i nanošenje sredstva za razdvajanje



Slika 35. Dodavanje modelne i punidbene kalupne mješavine



Slika 36. Sabijanje kalupne mješavine i dodavanje sredstva za razdvajenje



Slika 37. Postavljanje modela u gornjak



Slika 38. Kalupljenje gornjaka



Slika 39. Sabijanje kalupne mješavine i vađenje modela pojila



Slika 40. Otvaranje kalupa i uklanjanje modela



Slika 41. Zatvaranje kalupa

9.3. Lijevanje

Lijevanje je izvedeno u laboratoriju za ljevarsvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Korištena je aluminijeva legura AlSi13. Za taljenje je korištena elektrootporna peć na temperaturi od 777 ˚C, slika 42.

Kemijski sastav legure prikazan je u tablici 9.

Tablica 9. Kemijski sastav legure AlSi13

ELEMENT	min. (%)	max. (%)	15404/00
Si	12,8	13,5	13,1
Fe		0,15	0,11
Cu		0,10	<0,01
Mn		0,005	0,002
Mg		0,05	<0,01
Zn		0,10	0,01
Ti		0,15	<0,01
Al			86,778



Slika 42. Elektrootporna peć i zagrijavanje ljevačkog lonca

Ljevački lonac zagrijan je prije ulijevanja taljevine kako ne bi došlo do značajnog pada temperature, slika 42.

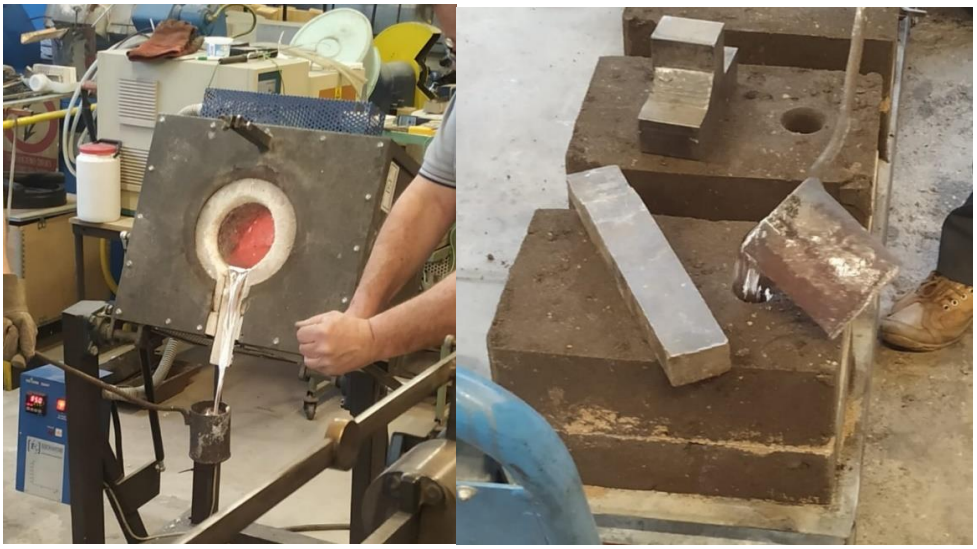
Na slici 43. prikazano je mjerenje temperature taljevine u loncu peći pomoću kontaktnog pirometra.



Slika 43. Mjerenje temperature taljevine pirometrom

Temperatura taljevine nije jednaka temperaturi koja je namještena na peći zbog gubitaka u loncu peći.

Na slici 44. je prikazano ulijevanje taljevine iz peći u ljevački lonac i u kalup. Temperatura taljevine u ljevačkom loncu prije lijevanja bila je nešto manja od izmjerene temperature zbog gubitaka. Lijevanje odljevka s manjim pojilom iznosilo je 3 sekunde, a lijevanje odljevka s velikim pojilom 4 sekunde. Vremena lijevanja su izmjerena pomoću štoperice.



Slika 44. Ulijevanje taljevine u kalup

Na slici 45. su prikazani kalupi nakon skrućivanja.



Slika 45. Kalupi nakon skrućivanja odljevka

Nakon hlađenja odljevaka do temperature 300 °C kalupi su razrušeni te su izvađeni i očišćeni odljevci.

Na slici 46. su prikazani gotovi odljevci sa uljevnim sustavom. Br. 1 je odljevak s pojilom 1 (sa hladilom), br. 2 je odljevak s pojilom 2 (sa hladilom), br. 3 je odljevak s pojilom 1 (bez hladila) i br. 4 je odljevak s pojilom 2 (bez hladila).

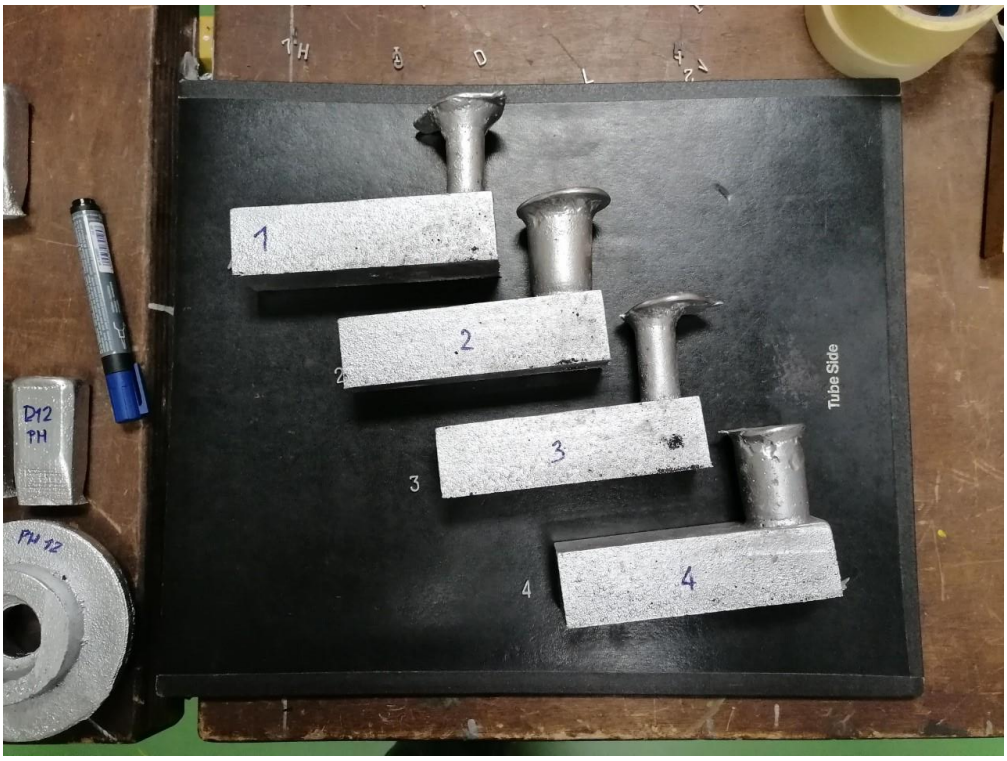


Slika 46. Gotovi odljevci

9.4. Analiza rezultata

Uzorci su snimljeni rentgenom kako bi vidjeli izgled usahlina unutar odljevka.

Na slici 47. je prikazan raspored odljevaka na slikovnoj ploči.



Slika 47. Raspored odljevaka na slikovnoj ploči

Korištena oprema:

- RTG uređaj - Balteau 300D
- Skener- VMI 5100
- Slikovna ploča - Kodak industrex flex Blue

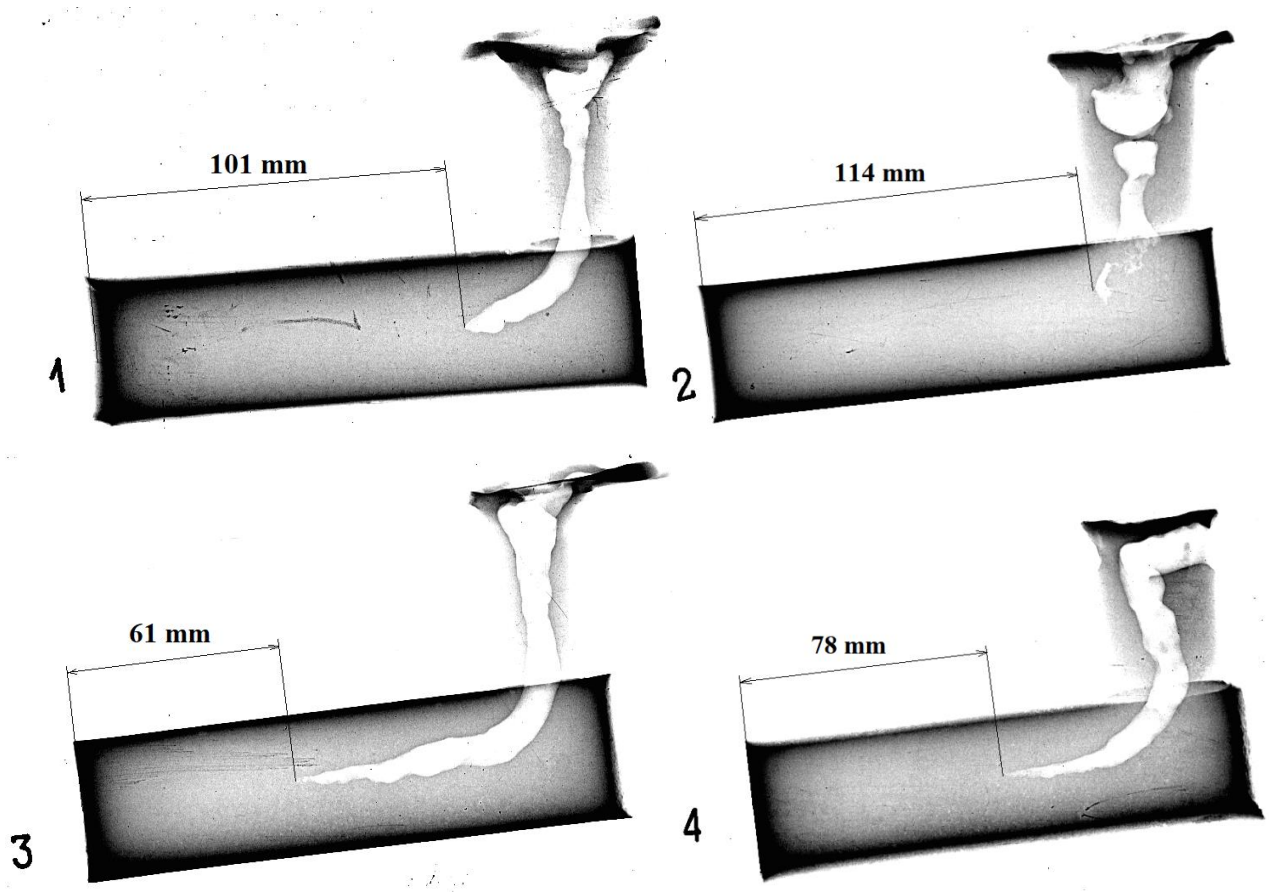
Parametri snimanja :

- Napon - 125 kV
- Struja - 4 mA
- Film fokus udaljenost - 1000 mm
- Vrijeme – 3 min

Parametri skeniranja:

- Napon lasera - 15 V
- Napon fotomultiplikatora - 5.25 V
- Rezolucija skeniranja - 50 um

Na slici 48. su prikazani radiogrami odljevaka.



Slika 48. Radiogrami odljevaka, 1-malo pojilo sa hladilom, 2-veliko pojilo sa hladilom, 3-malo pojilo bez hladila, 4-veliko pojilo bez hladila.

Korištenjem hladila zona napajanja povećala se za 40 mm, korištenjem većeg pojila zona napajanja povećala se za 17 mm, a korištenjem većeg pojila i hladila zona napajanja povećala se za 53 mm.

U tablici 10. su prikazani poprečni presjeci odljevaka i može se uočiti da se relativno dobro poklapaju sa simulacijom.

Tablica 10. Prikaz poroznosti u poprečnom presjeku odljevaka

Pojilo 1 (sa hladilom)	
Pojilo 2 (sa hladilom)	
Pojilo 1 (bez hladila)	
Pojilo 2 (bez hladila)	

10. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog rada provedeno je lijevanje aluminijske legure AlSi13 u pješčani kalup kroz pojila različitih dimenzija. Odljevci su bili u obliku palice kvadratnog presjeka. Promatran je i utjecaj hladila. Napravljeni su CAD modeli odljevaka s pojilima i hladilima, te je provedena simulacija lijevanja i skrućivanja u programu QuikCAST. Dobiveni rezultati lijevanja se relativno dobro poklapaju sa simulacijom u slučaju malog pojila bez hladila i u slučaju velikog pojila s hladilom. U slučaju malog pojila s hladilom i velikog pojila bez hladila razlike u zoni napajanja dobivene simulacijom i stvarnim lijevanjem su veće. Iz rezultata lijevanja i simulacija možemo vidjeti da je izbor pojila bitan pri sprječavanju usahlina, jer će se sa pojilom većih dimenzija završetak skrućivanja dogoditi bliže pojilu. Dodavanjem hladila se ubrzava hlađenje odljevka, te se završetak skrućivanja događa u pojilu što je poželjno jer se usahline javljaju na mjestima gdje talina posljednje skrutne. Preporučeno je koristiti hladilo i izabrati pojilo većih dimenzija kako bi povećali zonu napajanja pojila odnosno spriječili pojavu usahlina u odljevku.

11. LITERATURA

[1] Budić, I.: Posebni ljevački postupci II. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, 2009.

[2] Z. Bonačić Mandinić, I. Budić: Osnove tehnologije kalupljenja, jednokratni kalupi I. dio, Slavonski brod, 2001.

[3] Budić, I.: Posebni ljevački postupci I. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, 2006.

[4] Unkić, F., Glavaš, Z.: Osnove lijevanja metala, Zbirka riješenih zadataka, Sisak, 2009.

[5] dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Lijevanje (preuzeto 10.12. 2020.)

[6] dostupnno na: https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/20_10_2011__15683_ljevarstvo-2011.pdf (28.12.2020)

[7] B. Bauer, I. Mihalic Pokopec, Ljevarstvo, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultetski udžbenik, 2017.

[8] dostupno na: https://mlfree.com/blok-motora-tehnika/ (Preuzeto 12.12.2020)

[9] C. W. Ammen, THE COMPLETE HANDBOOK OF SAND CASTING, TAB Books,1979.

[10] dostupno na: https://www.edinburghsculpture.org/tag/iron-casting/ (Preuzeto 12.12.2020)

[11] dostupno na: http://www.buycastings.com/index.php?page=permanent-mold-casting (Preuzeto 15.12.2020)

[12] dostupno na: http://www.industrialmetalcastings.com/casting_chill_casting.html (2.2.2021)

[13] dostupno na: https://www.quora.com/What-is-chills-and-chaplet-in-moulding (2.2.2021)

[14] B. Bauer, I. Mihalic Pokopec, Osnove tehnologije lijevanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultetski udžbenik, 2017.

[15] dostupno na: https://www.aluminiumleader.com/about_aluminium/what_is_aluminum/ (14.2.2021)

[16] dostupno na:
http://www.eurospares.com/graphics/metalwork/Foseco-Non-Ferrous-Foundry-Man.pdf
(15.2.2021)

[17] dostupno na:
https://www.shantimetal.com/aluminium-alloys-supplier-exporter.html (Preuzeto 15.2.2021)

[18] dostupno na:
https://www.britannica.com/science/aluminum (14.2.2021)

[19] dostupno na:
https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf (15.2.2021)

[20] dostupno na:
https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:814885/FULLTEXT01.pdf (14.2.2021)

[21] dostupno na:
https://www.researchgate.net/profile/Tomasz_Lipinski2/publication/317256094_Mechanical_properties_of_AlSi12_alloy_with_aluminium_bronze/links/59485656aca272f02e0afc79/Mechanical-properties-of-AlSi12-alloy-with-aluminium-bronze.pdf (16.2.2021)