Dimenzioniranje uljevnog sustava za pješčani lijev

Gessert, René

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

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:235:471524

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

René Gessert

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Doc. sc. Branko Bauer René Gessert

Zagreb, 2012.

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

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Branku Baueru na savjetima, komentarima i stručnoj pomoći. Također se zahvaljujem svim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za ljevarstvo što su mi pomogli u praktičnom dijelu.

René Gessert

SADRŽAJ

POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
1. UVOD ..... - 1 -
2. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE ..... - 2 -
3. ULJEVNI SUSTAVI ..... - 4 -
3.1 Uljevni sutavi za aluminijske legure ..... - 5 -
3.2 Dijelovi uljevnog sustava ..... - 6 -
3.2.1 Uljevna čaša ..... - 7 -
3.2.2 Spust ..... - 8 -
3.2.3 Razvodnik ..... - 9 -
3.2.4 Ušće ..... - 10 -
3.2.5 Vrste uljevnih sustava ..... - 11 -
3.3 Dimenzioniranje uljevnog sustava ..... - 13 -
3.3.1 Bernoullijev zakon ..... - 13 -
3.3.2 Zakon o kontinuitetu strujanja ..... - 15 -
3.3.3 Vrijeme lijevanja ..... - 15 -
3.3.4 Dimenzioniranje kritičnog presjeka ..... - 18 -
4. EKSPERIMENTALNI DIO ..... - 20 -
4.1 Odljevak (model) ..... - 20 -
4.2 Proračun uljevnog sustava ..... - 21 -
4.2.1 Proračun za tlačnu uljevni sustav ..... - 21 -
4.2.2 Proračun za semitlačni uljevni sustav ..... - 24 -
4.3 Izrada kalupa za ljevanje ..... - 27 -
4.4 Probno lijevanje ..... - 37 -
4.5. Simulacija lijevanja i skrućivanja ..... - 41 -
4.5.1 Parametri korišteni u simulaciji semitlačnog uljevnog sustava ..... - 41 -
4.5.2 Parametri korišteni u simulaciji tlačnog uljevnog sustava ..... - 42 -
5. REZULTATI I RASPRAVA ..... - 44 -
5.1 Radiogram ..... - 45 -
5.2 Simulacija ..... - 47 -
5.2.1 Uljevanje pomoću semitlačnog uljevnog sustava ..... - 47 -
5.2.2 Uljevanje pomoću tlačnog uljevnog sustava ..... - 51 -
6. ZAKLJUČAK ..... - 55 -
PRILOZI ..... - 56 -
LITERATURA ..... - 57 -

POPIS SLIKA

SLIKA 1. KOMPONENTE ULJEVNOG SUSTAVA [3] ..... - 6 -
SLIKA 2. A) KORITASTA ULJEVNA ČAŠA, B) ULJEVNI SUSTAV S LJEVKASTOM ULJEVNOM ČAŠOM [3] ..... - 7 -
SLIKA 3. PRIKAZ TOKA TALJEVINE U SPUSTU KOJI SE SUŽAVA PREMA DOLJE (A) I RAVNOM SPUSTU (B) [3] ..... - 8 -
SLIKA 4. PODNOŽJE SPUSTA I KARAKTERISTIČNE DIMENZIJE ..... - 8 -
SLIKA 5. PRIKAZ MOGUĆIH POPREČNIH PRESJEKA RAZVODNIKA [3] ..... - 9 -
SLIKA 6. PRIKAZ MOGUĆIH POPREČNIH PRESJEKA UŠĆA [3] ..... - 10 -
SLIKA 7. NAČINI POVEZIVANJA RAZVODNIKA I UŠĆA U TLAČNOM ULJEVNOM SUSTAVU [3] ..... - 12 -
SLIKA 8. PRAVILAN I NEPRAVILAN SPOJ RAZVODNIKA I UŠĆA U SEMITLAČNOM ULJEVNOM SUSTAVU [3] ..... - 13 -
SLIKA 9. PRIMJENA BERNOULLIJEVOG ZAKONA NA ULJEVNI SUSTAV [3] ..... - 14 -
SLIKA 10. BRZINA TOKA TALJEVINE KROZ KANAL S RAZLIČITIM POVRŠINAMA POPREČNOG PRESJEKA [3] ..... - 15 -
SLIKA 11. VRIJEME LIJEVANJA ODLJEVAKA OD ALUMINIJA ..... - 16 -
SLIKA 12. VRIJEDNOST KOEFICIJENTA S OVISNO O DEBLJINI STJENKE ODLJEVKA I MASI TALJEVINE U KALUPU [3] .. - 17 -
SLIKA 13: TRODIMENZIONALNI PRIKAZ MODELA ..... - 20 -
SLIKA 14: KARAKTERISTIČNE DIMENZIJE LJEVKASTE ULJEVNE ČAŠE [3] ..... - 23 -
SLIKA 15: TRODIMENZIONALNI MODEL PRORAČUNATOG TLAČNOG ULJEVNOG SUSTAVA ..... - 24 -
SLIKA 16: TRODIMENZIONALNI MODEL PRORAČUNATOG SEMITLAČNOG ULJEVNOG SUSTAVA ..... - 26 -
SLIKA 17. MODEL TLAČNOG ULJEVNOG SUSTAVA IZRAĐEN OD DRVA ..... - 27 -
SLIKA 18. POZICIONIRANJE DRVENOG MODELA U GORNJAK (DIMENZIJA 300X200X90MM) ..... - 28 -
SLIKA 19. POSIPAVANJE MODELNIM PIJESKOM (SADRŽI VIŠE CEMENTA) ..... - 28 -
SLIKA 20. NASIPAVANJE CRNIM (DOPUNSKIM) PJESKOM ..... - 29 -
SLIKA 21. SABIJANJE KALUPNE MJEŠAVINE ..... - 29 -
SLIKA 22. RAVNANJE KALUPNE MJEŠAVINE NAKON SABIJANJA ..... - 30 -
SLIKA 23. VAĐENJE ULJEVNE ČAŠE I SPUSTA ..... - 30 -
SLIKA 24. PREVRTANJE GORNJAKA ..... - 31 -
SLIKA 25. STAVLJANJE DONJAKA NA GORNJAK (DIMENZIJE DONJAKA 300X200X65MM) ..... - 31 -
SLIKA 26. POSIPAVANJE ZAPRAŠKOM RADI LAKŠEG KASNIJEG ODVAJANJA ..... - 32 -
SLIKA 27. NASIPAVANJE DONJEG DIJELA KALUPA MODELNIM PIJESKOM ..... - 32 -
SLIKA 28. NASIPAVANJE DONJEG DIJELA KALUPA DOPUNSKIM PIJESKOM ..... - 33 -
SLIKA 29. SABIJANJE PJESKA ..... - 33 -
SLIKA 30. RAVNANJE DONJEG DIJELA KALUPA NAKON SABIJANJA ..... - 34 -
SLIKA 31. ODVAJANJE GORNJEG I DONJEG DIJELA KALUPA ..... - 34 -
SLIKA 32. IZDVAJANJE DRVENIH MODELA IZ KALUPA ..... - 35 -
SLIKA 33. OBLIKOVANJE ULJEVNOG SUSTAVA ALATOM ZA OBRADU KALUPNE ŠUPLJINE (LANCETOM) ..... - 35 -
SLIKA 34. PONOVNO SPAJANJE GORNJE I DONJEG DIJELA ..... - 36 -
SLIKA 35. PRIKAZ MODELA SEMITLAČNOG ULJEVNOG SUSTAVA U KALUPU ..... - 36 -
SLIKA 36. TALJENJE ALUMINIJA U PEĆI PRI 730°C ..... - 37 -
SLIKA 37. MJERENJE TEMPERATURE TALJEVINE ..... - 38 -
SLIKA 38. ULJEVANJE TALJEVINE U KALUP ..... - 38 -
SLIKA 39. PRESTANAK ULJEVANJA ..... - 39 -
SLIKA 40. ČEKANJE TALJEVINE DA SE OHLADI ..... - 39 -
SLIKA 41. OTVARANJE KALUPA ..... - 40 -
SLIKA 42. RASTRESANJE KALUPA ..... - 40 -
SLIKA 43. GENERIRANJE MREŽE I MJESTA ULJEVANJA ..... - 41 -
SLIKA 44. DIMENZIONIRANJE KALUPA ..... - 42 -
SLIKA 45. ZATVORENI KALUP ..... - 43 -
SLIKA 46. PRIKAZ ODLJEVKA SA ULJEVNIM SUSTAVIMA (LIJEVO-TLAČNI, DESNO-SEMITLAČNI) ..... - 44 -
SLIKA 47. RADIOGRAM ODLJEVKA LJEVANOG TLAČNIM ULJEVNIM SUSTAVOM ..... - 45 -
SLIKA 48. RADIOGRAM ODLJEVKA LJEVANOG SEMITLAČNIM ULJEVNIM SUSTAVOM ..... - 46 -
SLIKA 49. PRIKAZ PUNJENJA KALUPA ..... - 47 -
SLIKA 50. PRIKAZ MJESTA ZADNJEG SKRUČIVANJA, NAKON 194S ..... - 48 -
SLIKA 51. PRIKAZ MJESTA ZADNJEG SKRUČIVANJA, NAKON 210S ..... - 48 -
SLIKA 52. MJESTA POROZNOSTI IZNAD 0% MOGUČNOSTI ..... - 49 -
SLIKA 53. MJESTA POROZNOSTI IZNAD 30% MOGUČNOSTI ..... - 49 -
SLIKA 54. PRIKAZ POROZNOSTI (PRESJEK RAVNINOM) ..... - 50 -
SLIKA 55. PRIKAZ POROZNOSIT (PRESJEK ROTACIJOM RAVNINE) ..... - 50 -
SLIKA 56. PRIKAZ PUNJENJA KALUPA I PRIKAZ POJAVE NEDOLIVENOSTI ..... - 51 -

SLIKA 57. PRIKAZ MJESTA ZADNJEG SKRUČIVANJA, 173S ..... - 52 -
SLIKA 58. PRIKAZ MJESTA ZADNJEG SKRUČIVANJA, 207S ..... - 52 -
SLIKA 59. MJESTA POROZNOSTI IZNAD 0% MOGUČNOSTI ..... - 53 -
SLIKA 60. MJESTA POROZNOSTI IZNAD 20% MOGUČNOSTI ..... - 53 -
SLIKA 61. PRIKAZ POROZNOSTI (PRESJEK S DVIJE RAVNINE) ..... - 54 -

POPIS TABLICA

Tablica 1. Brzina podizanja nivoa taljevine u kalupu za sivi, čelični i aluminijski lijev [3] ..... - 18 -
Tablica 2. Dimenzije lijevka (čaše) [3] ..... - 23 -

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$V_{Č}$	dm³	Volumen čaše
t	s	Vrijeme lijevanja
m	kg	Masa taljevine u kalupu
ρ	kg/dm³	Gustoća taljevine
A_{ps}	cm²	Površina poprečnog presjeka podnožja spusta
A_u	cm²	Površina poprečnog presjeka ušća
A_s	cm²	Površina poprečnog presjeka spusta
A_r	cm²	Površina poprečnog presjekarazvodnika
h	mm	Visina
v	m/s	Brzina
g	m/s²	Gravitacijsko ubrzanje
p	N/mm²	Tlak
Q	m³/s	Intezitet strujanja
C	mm	Ukupna visina taljevine
v_p	mm/s	Brzina podizanja nivao taljevine u kalupu
δ	mm	Debljina stijenke odljevka
A_k	cm²	Površina kritičnog presjeka
v_k	m/s	Brzina taljevine kroz kritični presjek
H_R	mm	Računska visina, udaljenost od vrha uljevne čaše
h_{og}	mm	Visina odljevka u gornjoj polovici kalupa
h_o	mm	Ukupna visina odljevka
μ	-	Koeficijent brzine istjecanja
η	-	Koeficijent iskorištenja taljevine

SAŽETAK

U ovome radu opisana je tehnologija lijevanja aluminijskih legura u jednokratne, pješčane kalupe. Također su objašnjene osnovne komponente tlačnog i semitlačnog uljevnog sustava. Dodatno su izrađeni proračuni i trodimenzionalni modeli uljevnih sustava uz pomoć kojih su napravljen gornji i donji dio kalupa za oba uljevna sustava. Probna ljevanja su izvedena u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Opisani su postupci izrade kalupa.

U narednom dijelu opisan je aluminij kao i njegove legure. Zatim je opisan postupak proračuna i izrade uljevnog sustava bez pojila kao i lijevanja aluminijskih legura u pješćani kalup. Napravljene su simulacije lijevanja i skrućivanja u programu QuikCast za zadani odljevak uz korištenje tlačnog i semitlačnog uljevnog sustava. Usporedba rezultata i pokusa dala je dobre rezultate.

1. UVOD

Lijevanje je postupak (engl. Casting, njem. Giesserei) taljenja metala njegovog ulijevanja u kalup pod utjecajem gravitacije ili druge sile, te naknadnog skrućivanja. Kalupna šupljina oblikuje odljevak. [1]

Alati za lijevanje mogu biti pješćani kalupi za jednokratnu upotrebu i metalni (kokile) za višekratnu upotrebu. Najveća primjena odljevaka je u automobilskoj industriji u obliku lijevanog željeza ili aluminijskog lijeva. U jedan automobil ugrađeno je više od 100 odljevaka. Osim automobilske industrije, odljevci se koriste u strojogradnji, građevinskoj industriji, medicini, brodogradnji, za željeznička vozila, energetici, zračnoj i svemirskoj industriji, kod lijevanja umjetničkih skulptura.

Prednosti lijevanja su što se može dobiti složena geometrija odljevka, moguće je proizvesti vrlo velike odljevke, moguća masovna proizvodnja, velik raspon dimenzija odljevka: od 1 gram do 250 tona. Nedostaci lijevanja su ograničenja u mehaničkim svojstvima (često se javlja poroznost), često nedovoljna dimenzijska točnost i kvaliteta površine, opasnosti u proizvodnji, te nepovoljan utjecaj na okoliš. [2]

Proizvodnja metalnih predmeta lijevanjem je jako star postupak. Najstariji pronađeni lijevani predmedi su starij preko 6000 godina. Proizvodnja odljevaka se dugo vremena zasnivala na metodi pogreške i pokušaja jer nisu znali što se točno odvija tijekom taljenja, ljevanja i skrućivanja odljevaka u kalupu. Danas se zna mnogo više o tim procesima, ali se sam postupak nije puno promjenio.

Lijevanje metala je vrlo složen proces i nerijetko može rezultirati neočekivanim rezultatima jer obuhva vrlo velik broj varijabli. Najznačajnije su; kvaliteta materijala, proces taljenja, čistoća taljevine, temperatura i brzina lijevanja, kvaliteta kalupa, uljevni sustav, sustav napajanja itd. Iz navedenog se može vidjeti da su pravilno konstruiranje, dimenzioniranje uljevnog sustava i sustava napajanja važni faktori za postizanje dobre kvalitete odljevaka.[3]

2. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE

”Aluminij je kemijski element koji u periodnom sustavu elemenata nosi simbol Al, atomski (redni) broj mu je 13, atomska masa mu iznosi 26,9815386(13). Aluminat je naziv za aluminij u anionskom kompleksu. *Glinik* je stari hrvatski naziv za aluminij.” [4]

Aluminij je srebrno-bijeli metal. Mekana i žilava kovina male gustoće i jako rastezljiva. Postojan je u atmosferi suhog i vlažnog zraka. Otporan je na neke kiseline (poput dušične kiseline, organskih otapala) i koroziju. Dobar vodič topline i elektriciteta (samo srebro i bakar su bolji). Treći je najobilniji element u zemljinoj kori (8,1% težinski). Talište mu je oko 660°C, a vrelište 2519°C. Jako je rekativan, ali stvara tanki površinski prozirni sloj oksida (debljine oko 0,01...0,015mm) koji nastaje na zraku.

Zbog male težine,prirodne otpornosti na koroziju i fizikalnih svojstava pogodnih za kalupljenje aluminij ima široke primjene u industriji pakiranja, avioindustriji, brodogradnji, svemirskoj industriji, prijenos električne struje, automobilskoj industriji, građevinarstvu i informatičkoj industriji.

Aluminij se dobiva iz boksita, od kojeg se pročišćavanjem dobije aluminijev oksid (glinica, Al_2O_3). Zatim elektrolizom dobivamo aluminij kao metal. Dobiveni aluminij se drži na visokim temperaturama nekoliko sati da bi iz njega isparile primjese silicija, titanija, bakra i cinka. Najveća čistoća se dobije električnom rafinacijom (99.999%)

Neka od svojstva:

Gustoća: 2700kg/m^3

Specifični toplinski kapacitet: c_p (25 °C) 24,200 J mol–1 K–1

Talište: 660,32°C

Vrelište: 2519°C [4]

‘’Mehanička svojstva aluminija i lijevanom stanju su: vlačna čvrstoća 50-120MPa; modul elastičnosti 6,9-7,3GPa; tvrdoća HB 15-30’’ [5]

Aluminij je metal koji je moguće reciklirati. Za recikliranje je potrebno znatno manji utroška energije nego za samu proizvodnju. Pretaljivanjem aluminija i njegovih legura koje su već bile u uporabi dobiva se sekundarni aluminij koji se koristi za izradu odljevka. U Europi se reciklira oko 42% aluminija korištenog za limenke, 85% korištenog u građevinskom materijalu i 95% u prevoznim sredstvima. [4]

Ljevarska svojstva aluminija su slaba zbog velikog stezanja pri skrućivanju, zbog sklonosti oksidaciji i topljivosti plinova u njemu. Radi toga se čisti aluminij rijetko koristi u lijevanju. Zbog toga aluminij koristimo u obliku legura sa drugim elementima da mu se poboljšaju svojstva.

Legiranjem mu se bitno poboljšavaju mehanička svojstva. Mehanička svojstva se mogu značajno povećati legirajućim elementima tvoreći tako legure aluminija. Pri tome se razlikuju dvije grupe:

1. Al-legure bez strukturnog očvršćavanja tzv. "nekaljive legure"(Al-Mn, Al-Mg-Mn, Al-Mg)
2. Al-legure sa strukturnim očvršćavanjem tzv. "kaljive legure" (Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Li-Cu-Zr, Al-Li Cu-Mg-Zr)

Al - legure bez strukturnog očvršćavanja: očvršćavanje se u ovom slučaju postiže kombinacijom efekata dodavanja legirajućih elemenata (Mg, Si, Mn, Fe), hladne plastične deformacije i žarenja. Postižu se različita mehaničkih svojstava od mekog stanja s minimalnim mehaničkim vrijednostima i maksimalnom plastičnosti do tvrdih stanja s maksimalnom čvrstoćom i granicom razvlačenja, te minimalnom plastičnosti.

Al - legure sa strukturnim očvršćavanjem ("kaljive legure"): ova grupa Al-legura sadrži bakar (Cu), silicij (Si), magnezij (Mg), litij (Li), cink (Zn) i skandij (Sc). Ima mogućnost strukturnog očvršćavanja. To očvršćavanje se postiže određenim toplinskim postupkom. Prvu etapu toplinskog postupka predstavlja rastopno žarenje (solution treatment) koje ima za cilj da na povišenim temperaturama (450 - 550 °C) rastopi barem jedan od legirajućih elemenata u čvrstoj otopini aluminija. Slijedeću fazu toplinskog procesa predstavlja gašenje. Gašenjem se omogućava zadržavanje one strukture koju metal ima u zagrijanom stanju. Naglo hlađen metal je u nestabilnom stanju i teži stabilnijem stanju pri sobnim temeperaturama. Metal postepeno dozrijeva. Ova pojava popračena sa značajnim povećanjem čvrstoće nazvana je strukturno očvršćavanje. Treća faza toplinskog procesa može se odvijati pri sobnim temperaturama (prirodno dozrijevanje metala) ili pri nešto povišenim temperaturama (umjetno dozrijevanje). [6]

3. ULJEVNI SUSTAVI

Uljevni sustav je skup kanala preko kojih taljevina ulazi u kalup i popunjava kalupnu šupljinu, tako da se postigne popunjavanje u što kraćem vremenu, sa što manjim pregrijavanjem, što mirnijim strujanjem i uz što manji utrošak materijala. Konstrukcija uljevnog sustava mora biti takva da se osigura brzo popunjavanje kalupa. Ako se taj uvjet ne osigura moze doći do gubitka topline tekućeg metala tijekom punjenja kalupa, a to može rezultirati prijevremenim skručivanjem, nepotpunim popunjavanjem presjeka ili nastajanjem površinskih grešaka. To se posebno izražava kod tankostjenih odljevaka. Ukoliko se taljevina pregrije povećat će se sposobnost tečenja i livljivost te će se spriječiti prijevremeno skrućivanje. Ako se taljevina prekomjerno pregrije povećat će se opasnost od naplinjenja taljevine i povećat ce se toplinsko opterećenje kalupa. Turbulentno punjenje i tečenje u uljevnom sustavu i kalupnoj šupljini može povećati mehaničko i toplinsko opterrećenje kalupa stoga treba minimalizirati turbulencije. Turbulentnim strujanjem taljevine povećava se opasnost od zahvaćanja plinova tekućim metalom zbog čega može doći do nastajanja grešaka na odljevcima poput plinske poroznosti ili mjehuravosti. Plinovi mogu i reagirati s litinom što moze dovesti do stvaranja troske i uključaka u odljevcima.

Najvišu osjetljivost na oksidaciju pokazuju legure aluminija te legure magnezija. Kod tih legura turbulencije mogu dovesti do stvaranja značajnog oksidnog filma koji može biti zahvaćen tekućim metalom, što često rezultira nastajanjem prevelikih grešaka na odljevcima. Odljevci sa takvim greškama se odbacuju. Zbog tih je razloga jako bitno da se što prije uspostavi stacionamo tečenje taljevine tijekom punjenja kalupa. Visoka brzina tečenja ili nepravilno usmjereno tečenje naspram površine kalupa također može rezultirati greškama na odljevcima zbog erozije površine kalupa i zahvaćanja izdvojenih čestica tekućim metalom. Uljevni sustav mora omogućiti ukljanjanje troske, metalnih oksida i uključaka prije nego što uđu u kalupnu šupljinu i odljevku. Osim uključaka koji mogu nastati unutar kalupne šupljine, potrebno je ukloniti i uključke koji potječu od vanjskih. Zbog toga uljevni sustav mora bit konstruiran i dimenzioniran tako da omogući dovoljno viemena za isplivavanje uključaka iz mlaza taljevine prije nego što uđu u kalupnu šupljinu. Kod proizvodnje tankostjenih odljevaka je važno izbjegavanje deformacije odljevaka koje nastaju zbog nejednolične raspodjele topline i redoslijeda skručivanja kalupne šupljine. [7], [3]

Pri punjenju kalupne šupljine rastaljeni metal dolazi u kontakt s kalupnim materijalom. Temperatura taljevine u kalupu postepeno pada zbog odvođenja topline kroz stjenke kalupa prema okolini. Kada se dostigne likvidus temperatura započinje skrućivanje, odnosno fazna pretvorba iz tekuće u kruto stanje. Tijekom skrućivanja dolazi do diskontinuirane promjene volumena, odnosno smanjenja volumena. Zbog toga se na mjestu koje se zadnje skrućuje nastaje usahlina ili šupljina. Da bi se izbjegla prisutnost ove greške u odljevku na tom mjestu se stavlja pojilo. [3]

3.1 Uljevni sutavi za aluminijske legure

Aluminijske legure mogu se ulijevati u pješčane kalupe, u kokile i pod tlakom. Za ovaj završni rad je bitan pješčani kalup pa će bit objašnjen samo on.

Za pješčani kalup najbitniji materijal je pijesak. Pijesak je najjeftiniji i posjeduje najvažnije osobine kaluparskog materijala, dovoljnu vatrostalnost da izdrži visoku temperaturu rastopljenog materijala, mehaničku čvrstoću da izdrži statički pritisak metala, plinsku propustljivost koja omogućuje izlaz plinova iz kalupa, plastičnost koja omogućuje da primi oblik modela.

Za izradu kalupa neophodno je imati model. Model je kopija odljevka, koja služi za formiranje odgovarajuće šupljine u pijesku. Model može biti izrađen od drveta, gipsa, cementa, umjetne smole, aluminija, bronce, itd.

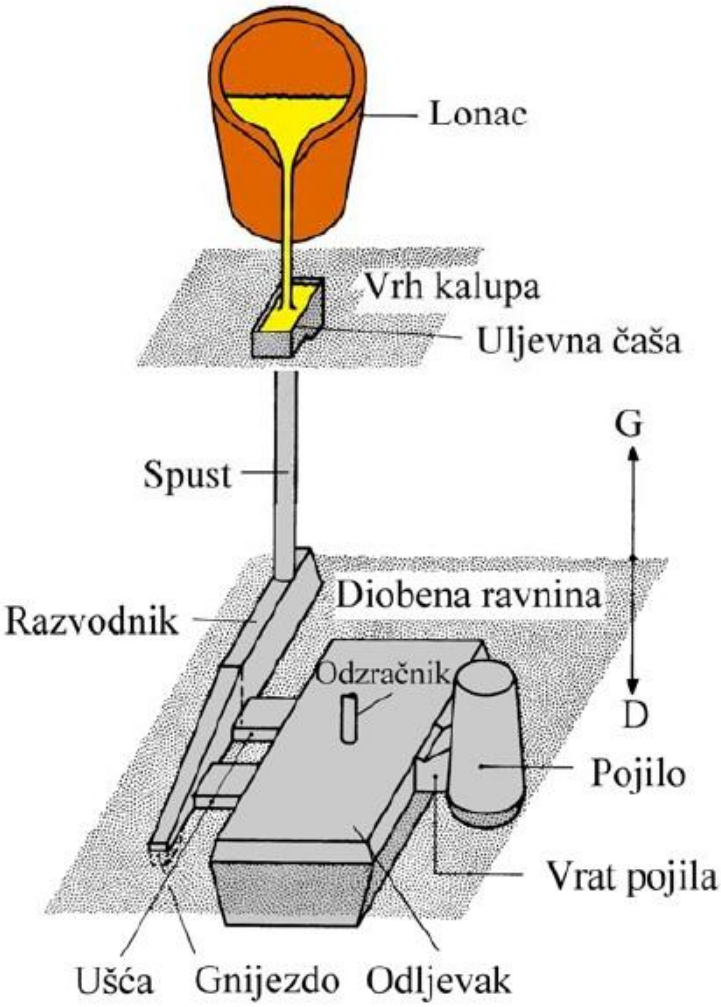
Za formiranje šupljine u odljevku služi jezgra. Jezgra je obavijena sa svih strana rastopljenim metalom. Zbog toga materijal za izradu jezgre treba imati veću vatrostalnost, čvrstoću i plinsku propustljivost nego materijal za izradu kalupa. Jezgre se izrađuju ručno ili strojno. Potreban alat za ručnu izradu je jednostavniji i jeftiniji, a sama izrada kalupa odnosno jezgre traje duže. Kod strojne izrade alat je kompliciraniji i skuplji, ali je vrijeme izrade mnogo kraće. Iz ovog proizlazi, da je u slučaju pojedinačne proizvodnje jeftinije raditi ručno, a u slučaju serijske i masovne proizvodnje rentabilnije je raditi strojno. Pored toga strojna izrada osigurava veću dimenzijsku točnost i ujednačeniju kvalitetu odljevka.

Pojednostavljeno, može se reći da je ljevarski kalup oblikovana šupljina u koju se ulijeva talina radi dobivanja željenog odljevka. Također se može reći da je sabijanje pijeska u izradi pješčanih kalupa s jednokratom uporabom jedna od najvažnijih operacija.

Iako su svojstva kalupne mješavine direktno razmjerna gustoći, gustoća i zbijenost pijeska u kalupu nikad nisu ujednačeni po cijelom volumenu i ovise o tehnici sabijanja. Postoje znatne razlike između načina sabijanja kalupa, osobito između ručne ili strojne izrade kalupa. [5], [8]

3.2 Dijelovi uljevnog sustava

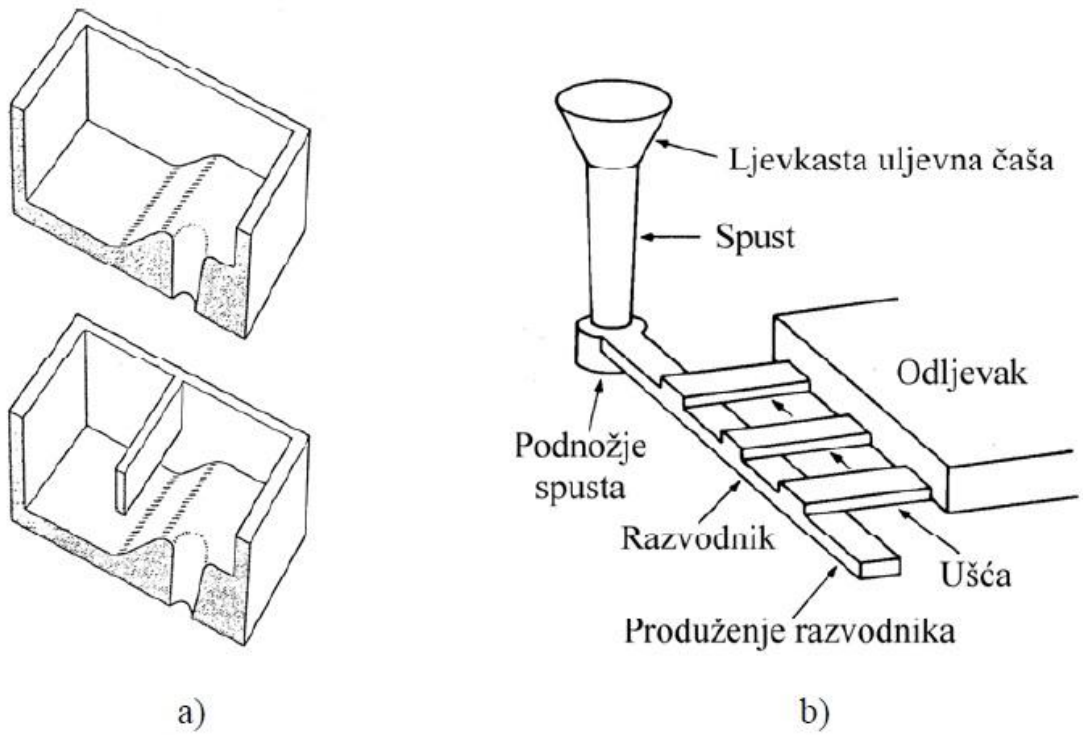
Dijelovi uljevnog sustava su, slika 1, uljevna čaša, spust, podnožje spusta, razvodnik, produžetak razvodnika (gnijezdo), ušće, odzračnik, pojilo i vrat pojila. Osnovne komponente su uljevna čaša, spust, razvodnik i ušće. Sve navedene komponente uljevnog sustava su međusobno povezane primjenom specifičnih pravila i omjera. [3]



Slika 1. Komponente uljevnog sustava [3]

3.2.1 Uljevna čaša

Uljevna čaša, slika 4, je prvi dio uljevnog sustava kroz kojega se uvodi taljevina u ostale dijelove sustava. Služi kao i rezervoar taljevina tijekom lijevanja, održavajući uljevni sustav punim, sprječava rasprskavanje taljevine pri izlijevanju iz lonca ta spriječava nasisavanje plinova i zraka te ulaz troske.



Slika 2. a) Koritasta uljevna čaša, b) Uljevni sustav s ljevkastom uljevnom čašom [3]

Dubina čaše mora biti 3-4 puta veća od promjera spusta da se nebi pojavio vrtlog koji uvlači zrak i trosku s površine taljevine. Prema obliku čaša može biti koritastra i ljevkasta. Koritasta čaša omogućuje izdvajanje metalnih oksida i troske iz taljevine prije ulaza u ostale dijelove uljevnog sustava. Prilikom lijevanja taljevina se ulijeva u dio uljevne čaše koji ima veću dubinu. Potrebno ju je uvijek držati punom. Ljevkasta čaša služi jedino da operateru olakša direktno lijevanje taljevine.

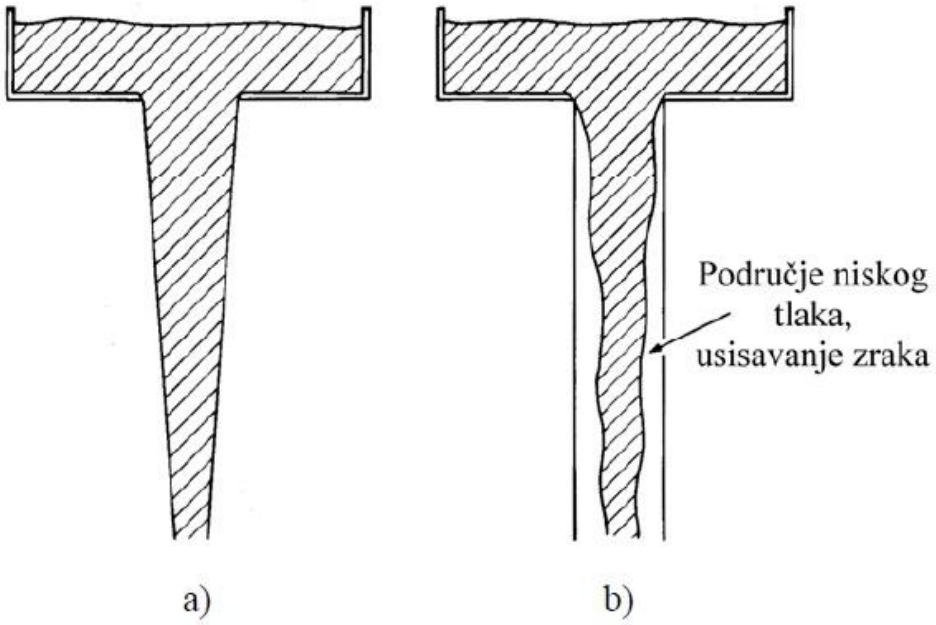
Volume čaše može se odrediti pomoću slijedećeg izraza (1):

$$V_č = k\frac{m}{t\rho} \qquad \textbf{(1)}$$

$V_č$ - volume čaše (dm³), k – koeficijent koji ovisi o masi taljevine u kalupu (k=1,5 – 2,0 za ljevkastu čašu, odnosno k = 3 – 8 za koritastu uljevnu čašu, m – masa taljevine (kg), t – vrijeme lijevanja (s), ρ – gustoća taljevine (kg/dm³). [3]

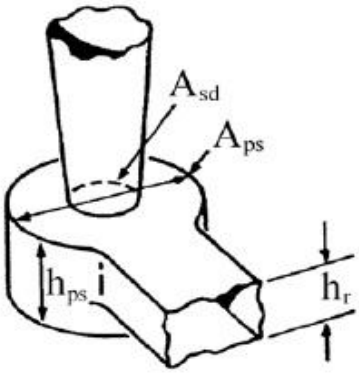
3.2.2 Spust

Spust je okomit kanal kružnog poprečnog presjeka putem kroz kojeg se taljevina iz uljevne čaše prenosi prema razvodniku. Pravilno konstruiran spust se sužava prema dolje. Zbog toga se smanjuju turbolencije i mogućnost ususavanja zraka. Ako se presjek nebi sužavao prema dolje došlo bi do nasisavanja plinova zbog područja niskog tlaka, slika 3, također tok taljevine bi bio turbolentan i neujednačen.



Slika 3. Shematski prikaz toka taljevine u spustu koji se sužava prema dolje (a) i ravnom spustu (b) **[3]**

Na dnu spusta se obično nalazi podnožje spusta (nije obavezan),slika 4, čija je uloga smanjenje turbolencija i ususavanja zraka. [3]



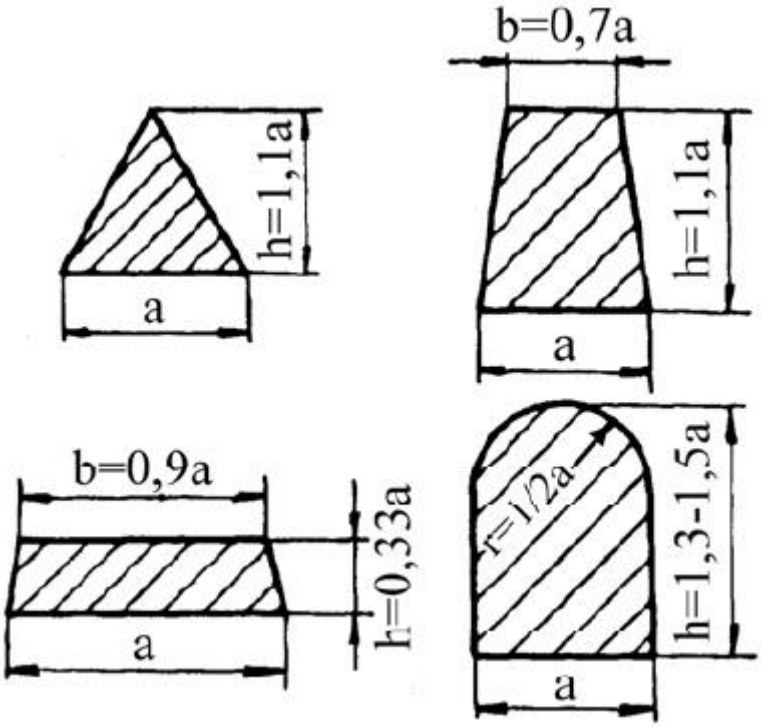
Slika 4. Podnožje spusta i karakteristične dimenzije

A_{ps} - površina poprečnog presjeka podnožja spusta, A_{sd} - površina poprečnog presjeka spusta, h_{ps} - visina podnožja spusta, h_r - visina razvodnika

3.2.3 Razvodnik

Razvodnik služi za daljnji transport taljevine iz spusta do ušča. On umiruje taljevinu iz spusta, omogućava izdvajanje uključaka i metalnih oksida. Razvodnik i uljevna čaša su jedine komponente u uljevnom sustavu (osim filtra) koje mogu spriječiti ulazak uključaka i metalnih oksida u kalupnu šupljinu. Najviše se upotrebljavaju razvodnici trapeznog i pravokutnog poprečnog presijeka kod kojih je visina veća od širine, jer time omogućuje izdvajanje troske i nečistoća iz taljevine. Prilikom lijevanja u kalupe s horizontalnom diobenom ravninom, razvodnik se postavlja vodoravno. Vrstu uljevnog sustava određuje položaj razvodnika u kalupu: ako je semitlačni uljevni sustav onda je razvodnik u donjoj polovici kalupa,dok seu tlačnom razvodnik nalazi u gornjoj polovici kalupa.

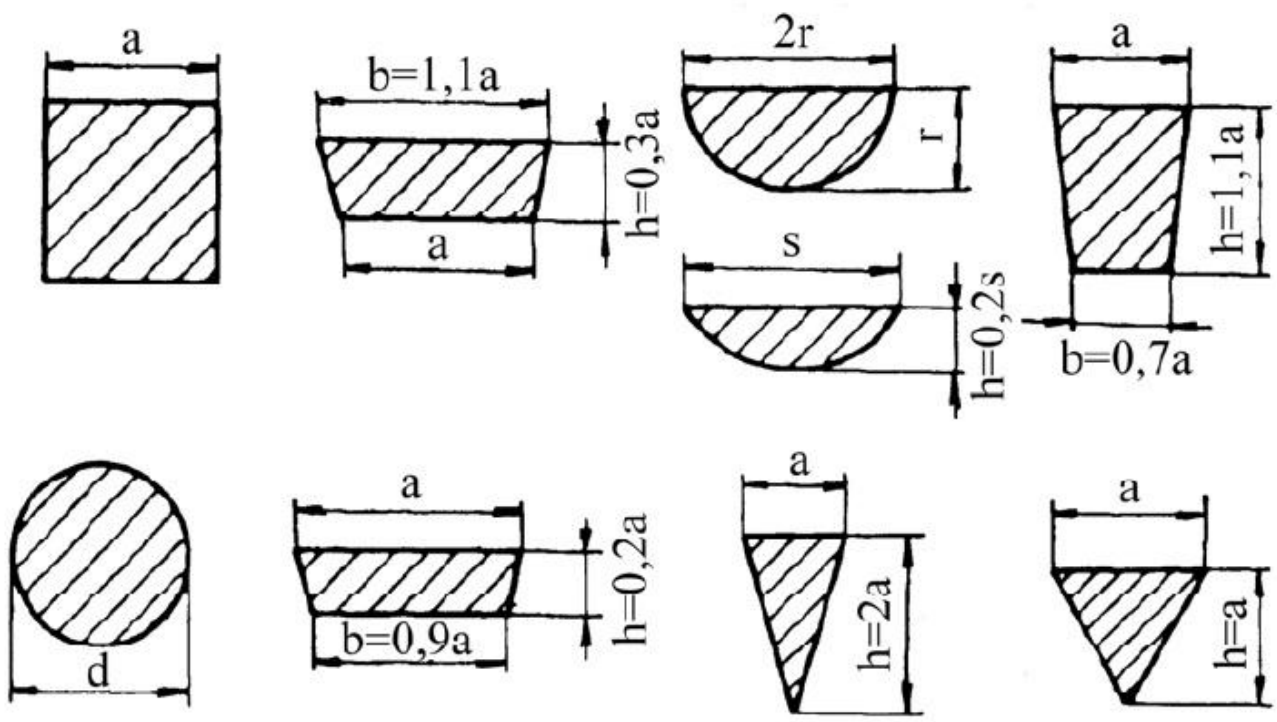
Uljevni sustav može imati jedan ili više razvodnika, što ovisi o veličini, obliku i broju odljevaka u kalupu. Razvodnici moraju biti tako konstruirani da se izbjegnu nagle promjene smjera tečenja taljevine jer uzrokuju stvaranje zona niskog tlaka i usisavanje zraka. Slika 5 prikazuje moguće poprečne presjeke razvodnika. [3]



Slika 5. Prikaz mogućih poprečnih presjeka razvodnika [3]

3.2.4 Ušće

Ušća su zadnji element uljevnog sustava i povezuju razvodnik s kalupnom šupljinom. Dimenzije i oblik ušća treba prilagodit debljini stjenke odljevka i načinu njegovog odstranjivanja. Ukoliko se odstranjuje odlamanjem onda debljina ušća nesmije preći 60 – 70 % debljine stjenke odljevka, kako se odljevak nebi zalomio pri odstranjivanju uljevnog sustava. Ako se uljevni sustav odstranjuje rezanjem, debljina ušća može biti čak i veća od debljine stjenke odljevka. Najčešće se upotrebljavaju ušća pravokutnog poprečnog presjeka. Slika 6 prikazuje moguće poprečne presjeke ušća. [3]



Slika 6. Prikaz mogućih poprečnih presjeka ušća [3]

3.2.5 Vrste uljevnih sustava

Prema položaju ušća uljevni sustavi se mogu podjeliti u tri snovne grupe:

1. Direktni uljevni sustavi sa ušćem odozgo (omogućuju brzo lijevanje, pravilno skrućivanje odljevaka i postepeno hlađenje)
2. Indirektni uljevni sustavi sa ušćem na diobenoj ravnini (primjenjuje se kad to zahtjeva konfiguracija odljevka i jednostavnost kalupovanja)
3. Uljevni sustavi sa ušćem odozdo (mirniji način punjenja kalupne šupljine, neprirodan slijed skrućivanja i zahtjeva veća pojila) [3]

Prema položaju kritičnog presjeka uljevni sustavi se dijele na dvije osnovne skupine:

1. Tlačni uljevni sutavi ili sustavi s prigušenjem – po obliku su konvergentni jer se presjeci kanala sužavaju od spusta prema kalupnoj šupljini. Vrijedi odnos $A_s>A_r>A_u$ (gdje je A_s – površina poprečnog presjeka spusta, A_r – površina poprečnog presjeka razvodnika, A_u – površina poprečnog presjeka ušća)
2. Semitlačni uljevni sustav ili uljevni sustavi bez prigušenja – po obliku su divergentni jer se u smjeru toka taljevine šire. Vrijedi odnos $A_s<A_r<A_u$

Dio uljevnog sustava koji ima najmanji poprečni presjek određuje brzinu strujanja taljevine, odnosno vrijeme punjenja kalupa. Naziva se kritični presjek ili prigušenje. Kod tlačnih uljevnih sustava to je presjek ušća, a kod semitlačnih uljevnih sustava to je presjek na izlazu iz spusta ili presjek razvodnika u blizini spusta. [3]

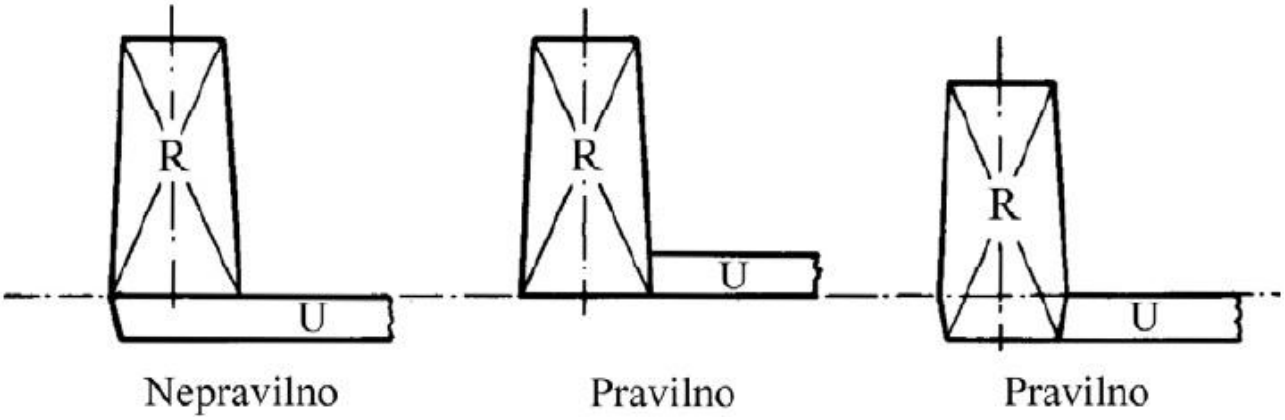
Kod semitlačnih uljevnih sustava razvodnik se smješta u donju polovicu kalupa ispod diobene ravnine, a ušća u gornju polovicu kalupa, slika 8. Time se smanjuje mogućnost ulaska troske. Kod tlačnih uljevnih sustava razvodnik se smješta u gornju polovicu kalupa, a ušća u donju ili gornju polovicu kalupa, slika 7, s time da donja stranica ušća i razvodnika moraju biti u istom nivou.

Najvažnije karakteristike tlačnih uljevnih sustava ili sustava s prigušenjem su:

- Svi dijelovi uljevnog sustava su puni tijekom lijevanja
- Uljevni sustav tijekom lijevanja je pod većim tlakom od atmosferskog
- Ako ima više ušća na jednom razvodniku, kroz svako ušće približno prolazi jednaka količina taljevine

- Masa taljevina u uljevnom sustavu je manja nego kod semitlačnih uljevnih sustava
- Zbog većih brzina strujanja taljevine u ušću može se dogoditi rasprskavanje, oksidacija taljevine i stvaranje vrtloga oko ušća
- Odstranjivanje uljevnog sustava sa odljevka zahtjeva manje rada i kraće vrijeme brušenja u odnosu na semitlačni uljevni sustav
- Najčešći omjer površine poprečnog presjeka su $A_s : A_r : A_u = 2 : 1,5 : 1$, $A_s : A_r : A_u = 1,4 : 1,2 : 1$ i $A_s : A_r : A_u = 1,2 : 1,1 : 1$

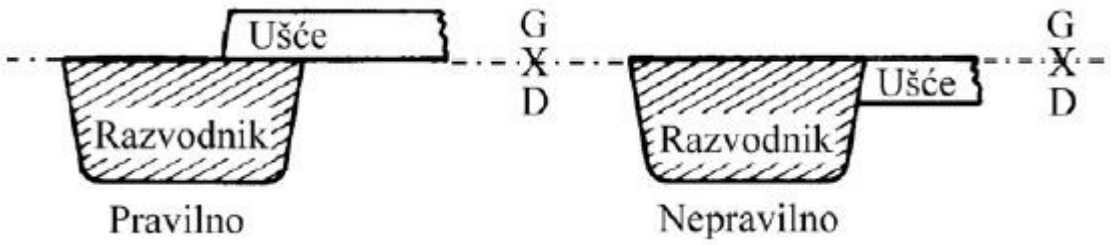
  (A_s – površina poprečnog presjeka spusta, A_r – površina poprečnog presjeka razvodnika, A_u – površina poprečnog presjeka ušća)



Slika 7. Nepravilan i pravilni načini povezivanja razvodnika i ušća u tlačnom uljevnom sustavu [3]

Najvažnije karakteristike semitlačnih uljevnih sustava ili sustava bez prigušenja su:

- Zbog velike površine poprečnog presjeka ušća, taljevina sporije ulazi u kalupnu šupljinu, pa je manja mogućnost rasprskavanja, oksidacije taljevine i stvaranja vrtloga oko ušća
- Kinetička energija duž razvodnika pada, zbog lega neprotječe ista količina taljevina kroz sva ušća
- Uljevni sustav nije uvijek pun
- Masa taljevine je veća nego kod tlačnih uljevnih sustava, zbog čega je iskorištenje taljevine manje
- Najčešći omjer površine poprečnog presjeka su $A_s : A_r : A_u = 1 : 2 : 2$, $A_s : A_r : A_u = 1 : 3 : 3$, $A_s : A_r : A_u = 1 : 4 : 4$ i $A_s : A_r : A_u = 1 : 6 : 6$ [3]



Slika 8. Pravilan i nepravilan spoj razvodnika i ušća u semitlačnom uljevnom sustavu [3]

3.3 Dimenzioniranje uljevnog sustava

Prije izračunavanja dimenzija pojedinih komponenti uljevnog sustava, potrebno je odabrati tip uljevnog sustava (tlačni ili semitlačni). Uljevni sustav se dimenzionira počevši od dijela koji ima najmanji poprečni presjek. On određuje brzinu strujanja u uljevnom sustavu. Vrijeme punjenja kalupne šupljine također ovisi o kritičnom presjeku. Za pravilno dimenzioniranje uljevnog sustava potrebno je poznavati nekoliko temeljnih principa dinamike fluida. [3]

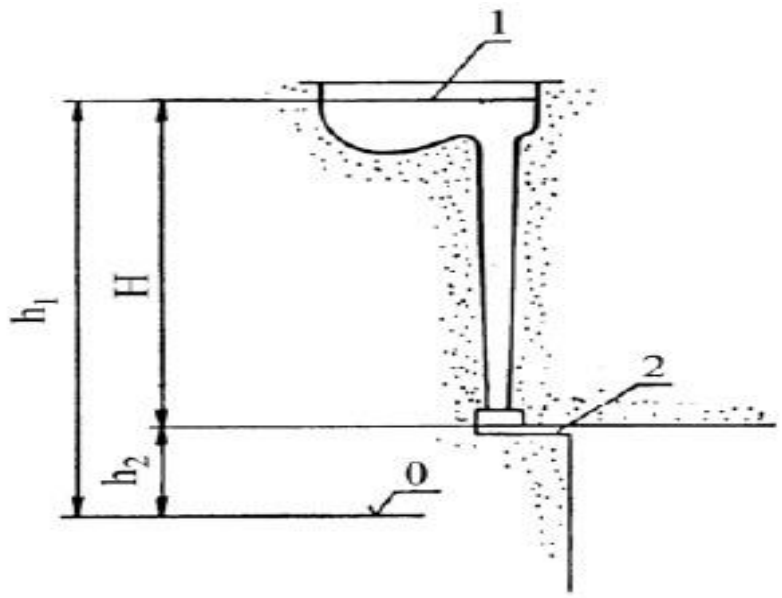
3.3.1 Bernoullijev zakon

Uljevni sustav se može promatrati kao posudu iz koje istječe taljevina. Brzina istjecanja tekućine se može odrediti primjenom Bernoullijevog zakona (poseban oblik zakona očuvanja energije). Prema tom zakonu u svakoj točci punog sustava ukupna energija je konstantna, odnosno zbroj potencijalne energije, kinetičke energije i energije tlaka u svim presjecima je konstantan. To je prikazano jednadžbom (2).

$$h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho} = konst. \qquad \textbf{(2)}$$

Gdje je: h – visina, v – brzina, g – gravitacijsko ubrzanje, p – tlak i ρ – gustoća

Primjenom Bernoullijevog teorema na presjek 1 i na presjek 2 u tlačnom uljevnom sustavu može se napisati slijedeća jednadžba, slika 9:



Slika 9. Primjena Bernoullijevog zakona na uljevni sustav [3]

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho} \qquad \textbf{(3)}$$

Gdje je: h_1 – visina taljevine u uljevnoj čaši u odnosu na referentni nivo, v_1 – brzina taljevine u uljevnoj čaši, g – gravitacijsko ubrzanje, p_1 – tlak na površini taljevine u uljevnoj čaši, ρ – gustoća taljevine, h_2 – visina ušća u odnosu na referentni nivo,
v_2 – brzina taljevine u ušću, p_2 – tlak taljevine u ušću

Na površini taljevine u čaši i u ušću djelujeatmosferski tlak, zbog čega je $p_1 = p_2$
Brzina v_1 u odnosu na brzinu v_2 je vrlo mala pa čemo brzinu v_1 zanemariti (4):

$$h_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \qquad \textbf{(4)}$$

Daljnjim uvrštavanjem $H = h_1 - h_2$ dobiva se Torricellijeva formula za brzinu istjecanja idealnih fluida (5):

$$v_2 = \sqrt{2gH} \qquad \textbf{(5)}$$

Gdje je: v_2 – brzina istjecanja [brzina taljevine u ušću (cm/s)] i H – vertikalna udaljenost između nivoa taljevine u uljevnoj čaši i nivao ušća.

Stvarna brzina je nešto manja od vrijednosti određene jednadžbom zbog energetskih gubitaka koji nastaju radi trenja:

$$v_2 = \mu\sqrt{2gH} \quad \textbf{(6)}$$

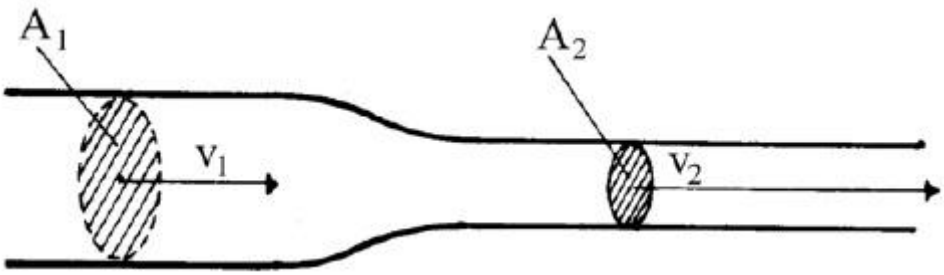
μ – koeficijent brzine istjecanja [3]

3.3.2 Zakon o kontinuitetu strujanja

Zakon o kontinuitetu strujanja kaže da u sustavu s nepropusnim stjenkama koji je ispunjen nestlačivom tekućinom intenzitet strujanja (Q) je konstantan u svim točkama sustava (7):

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 = konst. \quad \textbf{(7)}$$

U jednadžbi (7) Q je intezitet strujanja (m^3/s), A_1 i A_2 su površine poprečnog presjeka u točki 1 i 2 (m^2), v_1 i v_2 su brzine strujanja fluida u točki 1 i 2 (m/s^2)



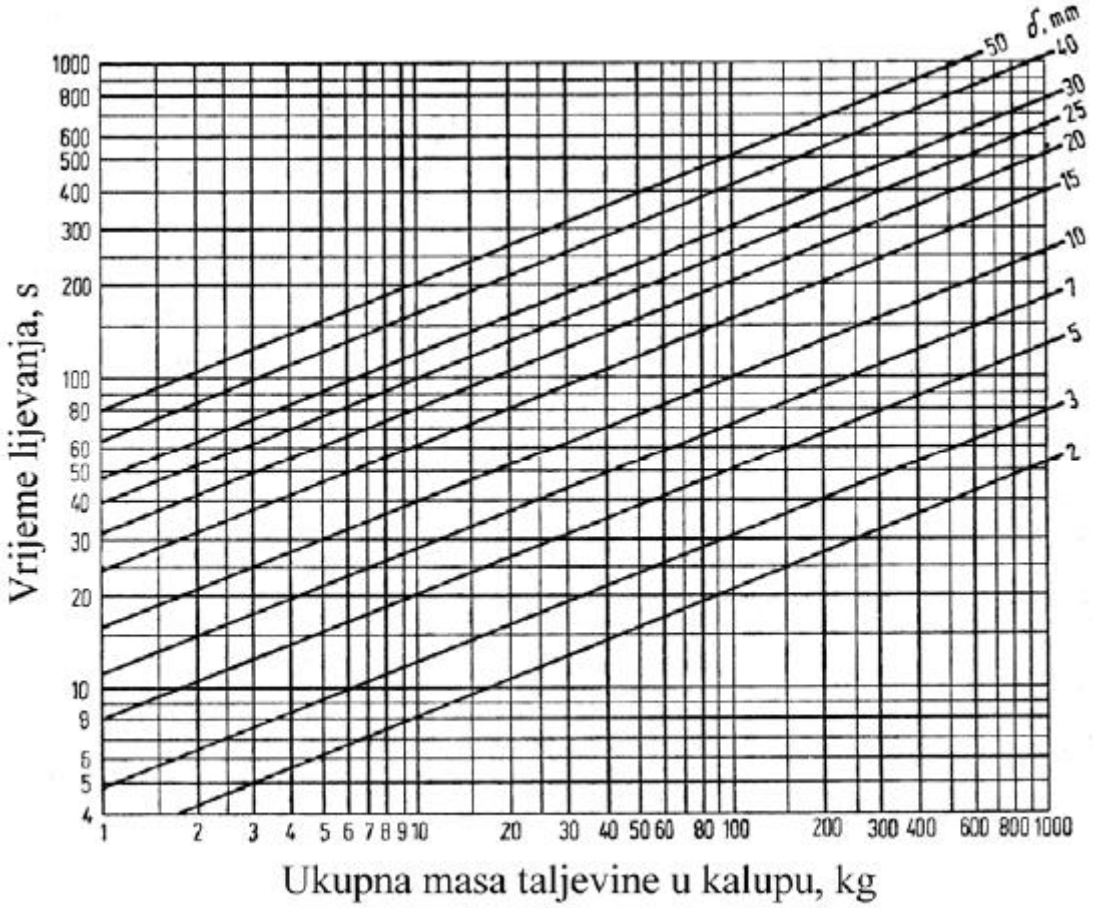
Slika 10. Brzina toka taljevine kroz kanal s različitim površinama poprečnog presjeka [3]

Volume tekućine koji protječe u jedinici vremena kroz bilo koji presjek u sustavu je konstantan, slika 10, to znači da brzina tekućine raste sa smanjenjem površine poprečnog presjeka i obrnuto. [3]

3.3.3 Vrijeme lijevanja

Vrijeme (brzina) ulijevanja ovisi o mnogo parametara. Neki od njih su debljina stjenke, masa odljevka, vrsta legure, vrsta kalupa itd. Dva odljevka istih masa, ali različitih oblika se hlade posve različito. Tankostjeni odljevci se brže hlade od debelostjenih, zbog čega se moraju brže lijevati Za određivanje optimalnog vremena lijevanja postoji više različitih izraza. [3]

U cilju bržeg određivanja vremena lijevanja mogu se na osnovi prethodno navedenih formula konstruirati dijagrami. Na slici 11 je prikazan dijagram za određivanje vremena lijevanja odljevka od Al-legura.

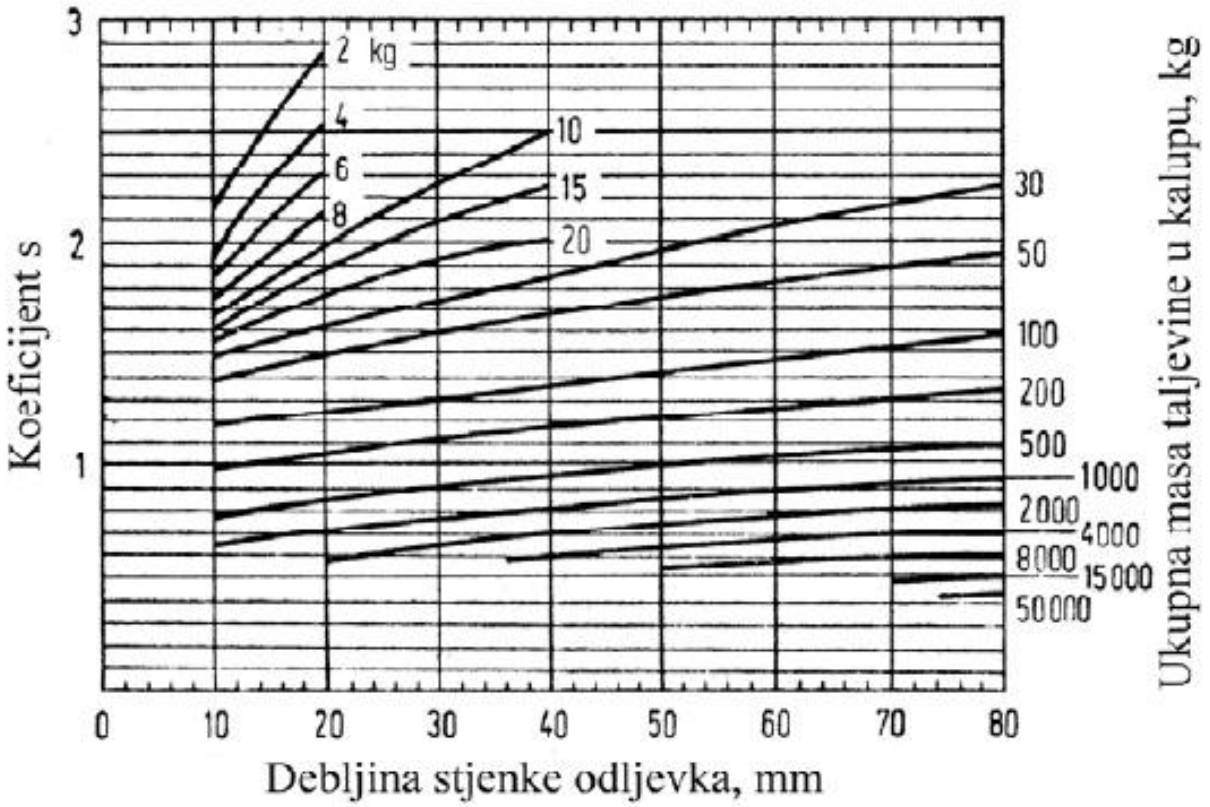


Slika 11. Vrijeme lijevanja odljevaka od Aluminija ovisno o ukupnoj masi taljevine u kalupu i debljini stjenke odljevka

Prema H. W. Dieteru vrijeme lijevanja se određuje pomoću formule (8):

$$t = s\sqrt{m} \qquad \textbf{(8)}$$

Gdje je: t – vrijeme lijevanja (s), s – koeficijent ovisan o debljini stjenke i masi odljevka,slika 12, m – ukupna masa taljevine u kalupu zajedno s uljevnim sustavom (kg) [3]



Slika 12. Vrijednost koeficijenta s ovisno o debljini stjenke odljevka i masi taljevine u kalupu [3]

Ponekad se primjenjuje i korigirana Dieterova formula (u većoj mjeri uzima u obzir debljinu stjenke). To je prikazano jednadžbom (9):

$$t = 1{,}4m^{0,5} + 0{,}7\delta m^{0,5} \qquad \textbf{(9)}$$

Gdje je: t – vrijeme lijevanja (s), m – ukupna masa taljevine u kalupu (kg), a δ – debljina stjenke odljevka (cm) [3]

Prema M. G. Hènonu vrijeme lijevanja se određuje pomoću formule (10):

$$t = \frac{C}{v_p} \qquad \textbf{(10)}$$

Gdje je: t – vrijeme lijevanja (s), C – ukupna visina kalupne šupljine (mm), a v_p - najpovoljnija brzina podizanja nivoa taljevine u kalupu (mm/s) [3]

U tablici 1 prikazana je najpovoljnija brzina podizanja taljevine u kalupu.

Tablica 1. Najpovoljnija brzina podizanja nivoa taljevine u kalupu za sivi, čelični i aluminijski lijev [3]

Debljina stjenke, mm	Najpovoljnija brzina podizanja nivoa taljevine, mm/s		
	Sivi lijev	Čelični lijev	Aluminijski lijev
< 4	30 – 100	-	-
4 - 10	20 – 30	20 – 30	5 – 20
10 - 30	10 – 20	10 – 20	1 – 5
> 40	8 - 10	8 - 10	-

Prema F. Nielsenu vrijeme lijevanja za Al-legure se određuje pomoću formule (11):

$$t = 1{,}6\delta m^{0,4} \quad \textbf{(11)}$$

Gdje je: t – vrijeme lijevanja (s), m – ukupna masa taljevine u kalupu (kg), a δ - debljina stjenke odljevka (mm) [3]

U sovjetkoj literaturi se može naći formula (12):

$$t = 1{,}11 \cdot s \cdot \sqrt{m} \quad \textbf{(12)}$$

Gdje je: t – vrijeme ulijevanja (s), s – koeficijent ovisan o debljini stijenke odljevka, m – ukupna masa taline u kalupu (kg) [5]

3.3.4 Dimenzioniranje kritičnog presjeka

Uljevni sustav se dimenzonira počevši od dijela koji najmanji poprečni presjek. On određuje brzinu strujanja u uljevnom sustavu. Za dimenzioniranje kritičnog presjeka upotrebljava se jednadžba kontinuiteta (13) primijenjena na najuži presjek:

$$Q_k = A_k v_k \quad \textbf{(13)}$$

Gdje je: Q_k - intezitet strujanja kroz kritičkni presjek (cm³/s), A_k - površina kritičnog presjeka (cm²), a v_k - brzina taljevine kroz kritični presjek (cm/s)

Intezitet strujanja kroz kritični presjek može se definirati kao omjer volumena taljevine i vremena potrebnog za istjecanje kroz dani presjek, a volumen taljevine kao omjer mase i gustoće taljevine. Na osnovi toga se dobiva izraz (14):

$$A_K = \frac{m}{t\rho v} \quad \textbf{(14)}$$

Za vrijeme punjenja kalupne šupljine u donjem dijelu kalupa djeluje visina H, a za vrijeme punjenja kalupne šupljine u gornjem dijejelu kalupa visina se smanjuje i na kraju lijevanja djeluje visina H - h_{og}. Zbog toga se u formuli unosi prosječna računska vrijednost visine H_R. Računska vrijednost visine se može izračunati prema formuli (15) B. Osanna:

$$H_R = H - \frac{h_{og}^2}{2h_o} \qquad \textbf{(15)}$$

Gdje je: H_R - računska visina, H – vertikalna udaljenost od vrha uljevne čaše do razine ušća, h_{og} - visina odljevka u gornjoj polovici kalupa, a h_o - ukupna visina odljevka

Na osnovi izraza (14) može se izvesti formula (16) za izračunavanje površine kritičnog presjeka:

$$A_K = \frac{m}{\rho \cdot t \cdot \mu \sqrt{2gH_R}} \qquad \textbf{(16)}$$

Gdje je: A_K - površina kritičnog presjeka (cm²), m – ukupna masa taljevine u kalupu (kg), ρ – gustoća taljevine na temperaturi lijevanja (kg/cm³), t – vrijeme lijevanja (s),
μ - koeficijent brzine istjecanja, g – gravitacijsko ubrzanje (cm/s²) i H_R računska visina (cm)

Ako se u izraz (16) uvrsti odgovarajuća vrijednost $\rho \cdot \sqrt{2g}$ za aluminij dobije se jednostavnija formula (17) za određivanje površine kritičnog presjeka:

$$A_K = \frac{m}{t \cdot \mu \cdot 0{,}105 \sqrt{H_R}} \qquad \textbf{(17)}$$

Ako se kritični presjek odnosi na poprečni presjek ušća tada se dobivena površina kritičnog poprečnog presjeka mora podijeliti s brojem ušća. To je prikazano jednadžbom (18):

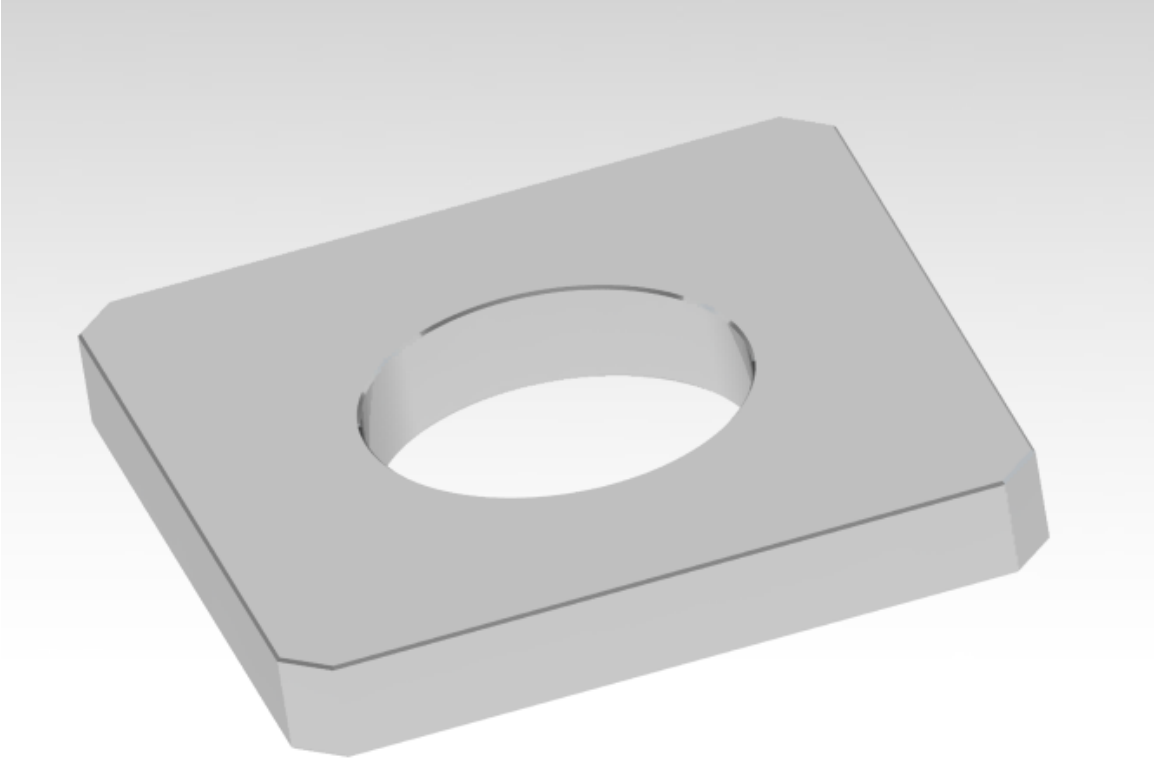
$$A_u = \frac{A_K}{n} \qquad \textbf{(18)}$$

A_u - površina poprečnog presjeka jednog ušća, n – broj ušća

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1 Odljevak (model)

Jedan od ciljeva završnog rada je za zadani odljevak dimenzionirati uljevni sustav uz pretpostavku da napajanje nije potrebno. Vanjske dimenzije odljevka su 123x123mm i visine 16,5mm, s provrtom od 61mm u središtu odljevka. Slika 13 prikazuje trodimenzionalni prikaz modela.



Slika 13: Trodimenzionalni prikaz modela

4.2 Proračun uljevnog sustava

Napravljeni su proračuni za tlačni i semitlačni uljevni sustav na temelju već poznatih podataka i podataka dobivenih iz trodimenzionalnog modela u programu Catia V5.

Poznati podaci:

Gustoća odljevka: ρ_{od} =2,7 kg/dm³

Gustoća taljevine: ρ =2,4 kg/dm³

Volume odljevka: V = 0,02 m³

Masa odljevka: m_o =0,479 kg

Koeficijent brzine istjecanja: μ =0,5

Vertikalna udaljenost od vrha uljevne čaše do razine ušća: H =90mm

4.2.1 Proračun za tlačnu uljevni sustav

Koeficijent iskorištenja taljevine: η =0,9

Masa taljevine u kalupu:

$$m_f = \frac{0,479}{0,9} = 0,532kg$$

Računska visina:

$$H_R = H - \frac{h_0}{2} = 90 - \frac{16,5}{2} = 81,75mm$$

Vrijeme uljevanja:

Dieter:

$$t = s\sqrt{m}_f = 3\sqrt{0,532} = 2,19s$$

Dieter (korigirana):

$$t = 1,4m^{0,5} + 0,7\delta m^{0,5} = 1,4 \cdot 0,532^{0,5} + 0,7 \cdot 1,65 \cdot 0,532^{0,5} = 1,86s$$

Hènon:

$$t = \frac{C}{v_p} = \frac{16,5}{2,3} = 7,174s$$

Sovjetska:

$$t = 1,11 \cdot s \cdot \sqrt{m} = 1,11 \cdot 1,4 \cdot \sqrt{0,532} = 1,13s$$

Nielsen (za Al-legure):

$$t = 1,6 \cdot \delta \cdot m^{0,4} = 1,6 \cdot 16,4 \cdot 0,532^{0,4} = 20,38s$$

Na temelju dobivenih brzina i preporučenih (iskustvenih) podataka određena je brzina ljevanja od 4s.

Površina kritičnog presjeka:

$$A_K = \frac{m}{qt\mu\sqrt{2gH_R}} = \frac{0{,}532}{0{,}0024 \cdot 4 \cdot 0{,}5\sqrt{2 \cdot 981 \cdot 8{,}175}} = 0{,}875cm^2$$

Odabrani omjeri površina poprečnih presjeka:

$A_s : A_r : A_u = 1{,}2 : 1{,}1 : 1$

$A_K = A_u$

A_u - površina presjeka svih ušća

$$A^*_u = \frac{A_K}{n} = \frac{0{,}875}{2} = 0{,}4375cm^2$$

A^*_u - površina presjeka jednog ušća, odabran je uljevni sustav s 2 ušća

Odabrana su pravokutna ušća:

$a = 2b$

$$b = \sqrt{\frac{A^*_u}{2}} = \sqrt{\frac{0{,}4375}{2}} = 0{,}4677cm \approx 5mm$$

$a = 2b = 2 \cdot 5 = 10mm$

Odabran je trapezni razvodnik:

$A_r = 1{,}1 \cdot A_u = 1{,}1 \cdot 0{,}875 = 0{,}9625cm$

$h = \sqrt{A_r} = \sqrt{0{,}9625} = 0{,}9811 \approx 1cm$

$a = 1{,}2 \cdot h = 1{,}2 \cdot 1 = 1{,}2cm$

$b = 0{,}8 \cdot h = 0{,}8 \cdot 1 = 0{,}8cm$

a – veća paralelna stranica, *b* – manja paralelna stranica, *h* – *visina*

Promjer spusta:

$A_S = 1{,}2 \cdot A_u = 1{,}2 \cdot 0{,}875 = 1{,}05cm^2$

$$d_{SD} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}05}{3{,}14}} = 1{,}156cm \approx 1{,}2cm$$

d_{SD} - promjer doljnjeg kraja spusta

Dimenzioniranje čaše:

$$V_č = k\frac{m}{t\rho} = 1{,}5\cdot\frac{0{,}532}{4\cdot 2{,}4} = 0{,}083dm^3$$

Tablica 2. Dimenzije lijevka (čaše) [3]

Redni broj	Masa taljevine, kg	Volumen čaše, dm^3	D, mm	D_1, mm	H_1, mm	Najveći promjer spusta, mm
1	0,8	0,12	60,0	40,0	60,0	16,0
2	1,3	0,20	70,0	50,0	70,0	20,0
3	2,0	0,30	80,0	60,0	80,0	25,0

Dimenzije lijevka čaše dobit čemo iz tablice 2 tako da odaberemo čašu čiji je prvi veći volumen od izračunatog. Odabrana je čaša pod rednim brojem 1.

Dimenzije ljevkaste čaše (tablica 2):

$D = 60mm$

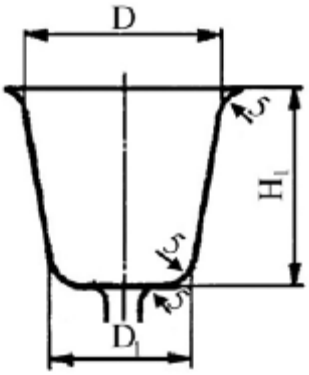
$D_1 = 40mm$

$H_1 = 60mm$

$$d_{SG} = d_{SD}\sqrt{\frac{H_R}{H_1}} = 1{,}2\sqrt{\frac{81{,}75}{60}} = 1{,}4cm$$

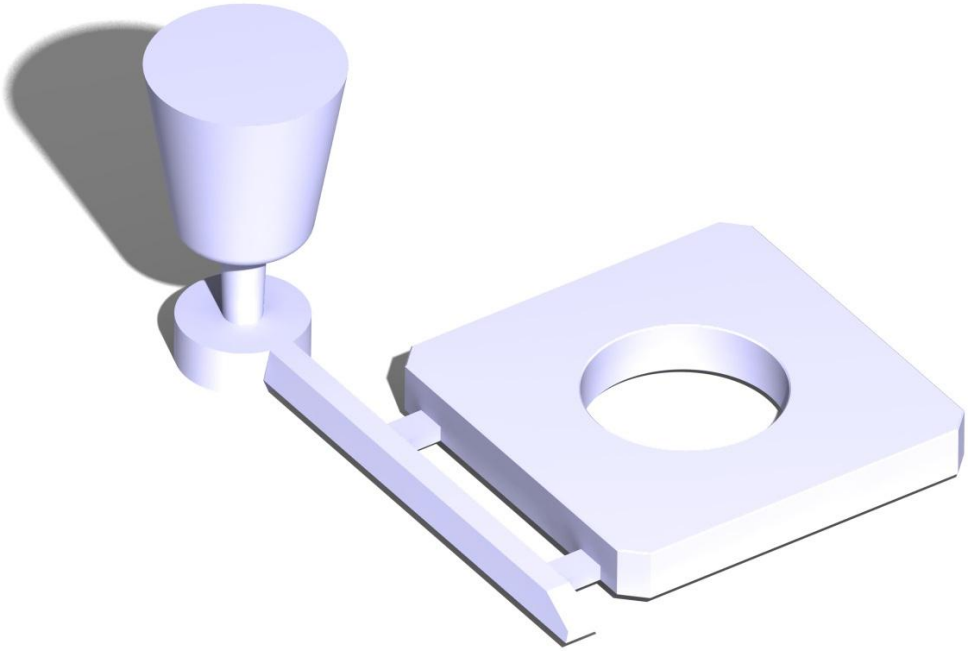
d_{SG} - promjer gornjeg kraja spusta

Slika 14 prikazuje karakteristične dimenzije ljevkaste uljevne čaše:



Slika 14: Karakteristične dimenzije ljevkaste uljevne čaše [3]

Uz pomoć dobivenih podataka izrađen je trodimenzionalni model tlačnog uljevnog sustava u programu CatiaV5 (slika 15):



Slika 15: Trodimenzionalni model proračunatog tlačnog uljevnog sustava

4.2.2 Proračun za semitlačni uljevni sustav

Koeficijent iskorištenja taljevine: η =0,7

Masa taljevine u kalupu:

$$m_f = \frac{0,479}{0,7} = 0,684kg$$

Računska visina:

$$H_R = H - \frac{h_0}{2} = 90 - \frac{16,5}{2} = 81,75mm$$

Vrijeme uljevanja:

Dieter:

$$t = s\sqrt{m}_f = 3\sqrt{0,684} = 2,48s$$

Dieter (korigirana):

$$t = 1,4m^{0,5} + 0,7\delta m^{0,5} = 1,4 \cdot 0,684^{0,5} + 0,7 \cdot 1,65 \cdot 0,684^{0,5} = 2,11s$$

Hènon:

$$t = \frac{C}{v_p} = \frac{16,5}{2,3} = 7,174s$$

Sovjetska:

$t = 1{,}11 \cdot s \cdot \sqrt{m} = 1{,}11 \cdot 1{,}4 \cdot \sqrt{0{,}684} = 1{,}285s$

Nielsen (za Al-legure):

$t = 1{,}6 \cdot \delta \cdot m^{0,4} = 1{,}6 \cdot 16{,}4 \cdot 0{,}684^{0,4} = 22{,}54s$

Na temelju dobivenih brzina i preporučenih (iskustvenih) podataka određena je brzina ljevanja od 4s.

Površina kritičnog presjeka:

$$A_K = \frac{m}{qt\mu\sqrt{2gH_R}} = \frac{0{,}684}{0{,}0024 \cdot 4 \cdot 0{,}5\sqrt{2 \cdot 981 \cdot 8{,}175}} = 1{,}125cm^2$$

Odabrani omjeri površina poprečnih presjeka:

$A_s : A_r : A_u = 1 : 2 : 2$

$A_K = A_S$

A_u - površina presjeka svih ušća

$A_u = 2 \cdot A_S = 2 \cdot 1{,}125 = 2{,}25cm$

$$A^*_u = \frac{A_u}{n} = \frac{2{,}25}{2} = 1{,}125m^2$$

A^*_u - površina presjeka jednog ušća, odabran je uljevni sustav s 2 ušća

Odabrana su pravokutna ušća:

$a = 3b$

$$b = \sqrt{\frac{A_u^*}{3}} = \sqrt{\frac{1{,}125}{3}} = 0{,}61cm \approx 6mm$$

$a = 3b = 3 \cdot 6{,}1 = 18{,}3mm \approx 18{,}5mm$

Odabran je trapezni razvodnik:

$A_r = 2 \cdot A_S = 2 \cdot 1{,}125 = 2{,}25cm$

$h = \sqrt{A_r} = \sqrt{2{,}25} = 1{,}5cm$

$a = 1{,}2 \cdot h = 1{,}2 \cdot 1{,}5 = 1{,}8cm$

$b = 0{,}8 \cdot h = 0{,}8 \cdot 1{,}5 = 1{,}2cm$

a – veća paralelna stranica, *b* – manja paralelna stranica, *h* – *visina*

Promjer spusta:

$$A_S = 1{,}125cm^2$$

$$d_{SD} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}125}{3{,}14}} = 1{,}19cm \approx 1{,}2cm$$

d_{SD} - promjer doljnjeg kraja spusta

Dimenzioniranje čaše:

$$V_č = k\frac{m}{t\rho} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}684}{4 \cdot 2{,}4} = 0{,}107dm^3$$

Odabrana je čaša pod rednim brojem 1 (tablica 2).

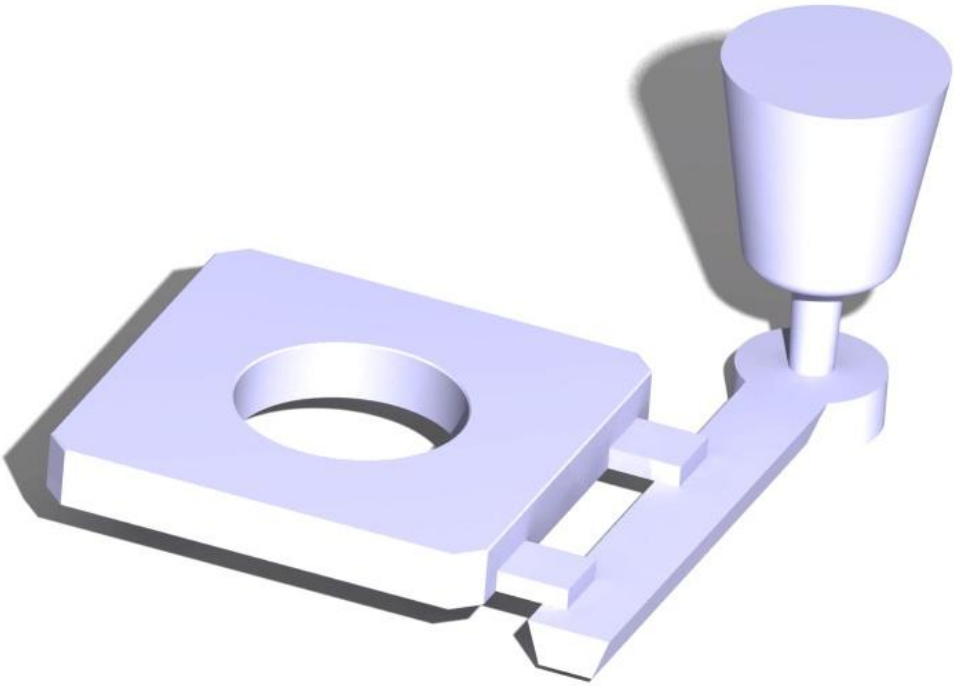
$$D = 60mm$$

$$D_1 = 40mm$$

$$H_1 = 60mm$$

$$d_{SG} = d_{SD}\sqrt{\frac{H_R}{H_1}} = 1{,}2\sqrt{\frac{81{,}75}{60}} = 1{,}4cm$$

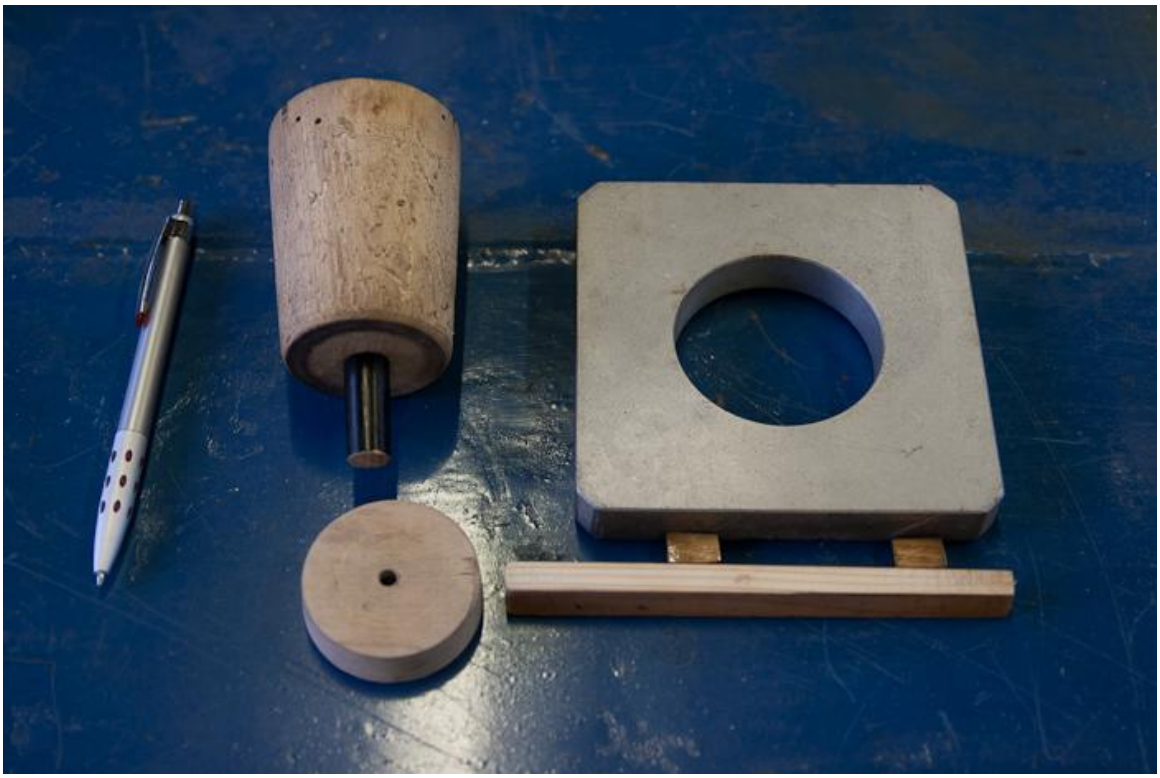
Uz pomoć dobivenih podataka izrađen je trodimenzionalni model semitlačnog uljevnog sustava u programu Catia V5 (slika 16):



Slika 16: Trodimenzionalni model proračunatog semitlačnog uljevnog sustava

4.3 Izrada kalupa za ljevanje

Izrađena su 2 odljevka uz pomoć već ranije dimenzioniranih uljevnih sustava u jednokratnom pješčanom kalupu. Postupak izrade kalupa je obješnjen uz pomoć slika 17 do 34. Slike sadrže izradu tlačnog uljevnog sustava radi lakše vizualizacije.



Slika 17. Model tlačnog uljevnog sustava izrađen od drva

Slika 18. Pozicioniranje drvenog modela u gornjak (dimenzija 300x200x90mm)

Slika 19. Posipavanje modelnim pijeskom (sadrži više cementa)

Slika 20. Nasipavanje crnim (dopunskim) pjeskom

Slika 21. Sabijanje kalupne mješavine

Slika 22. Ravnanje kalupne mješavine nakon sabijanja

Slika 23. Vađenje uljevne čaše i spusta

Slika 24. Prevrtanje gornjaka

Slika 25. Stavljanje donjaka na gornjak (dimenzije donjaka 300x200x65mm)

Slika 26. Posipavanje zapraškom radi lakšeg kasnijeg odvajanja

Slika 27. Nasipavanje donjeg dijela kalupa modelnim pijeskom

Slika 28. Nasipavanje donjeg dijela kalupa dopunskim pijeskom

Slika 29. Sabijanje pjeska

Slika 30. Ravnanje donjeg dijela kalupa nakon sabijanja

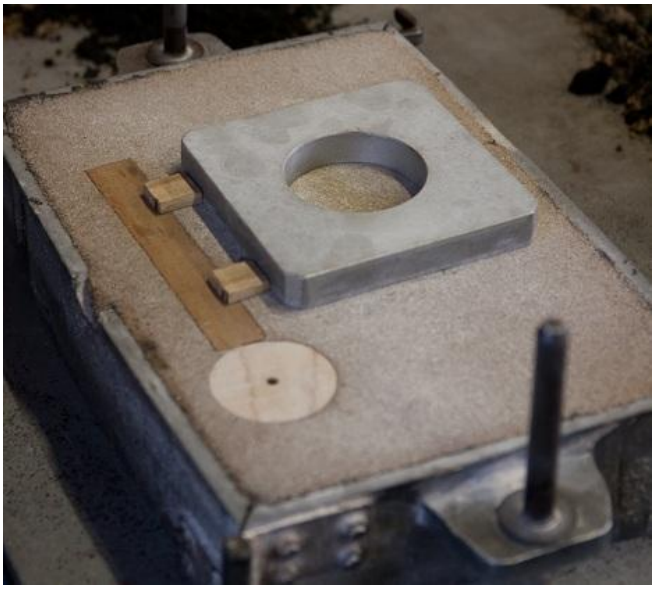
Slika 31. Odvajanje gornjeg i donjeg dijela kalupa

Slika 32. Izdvajanje drvenih modela iz kalupa

Slika 33. Oblikovanje uljevnog sustava alatom za obradu kalupne šupljine (lancetom)

Slika 34. Ponovno spajanje gornje i donjeg dijela

Najveće razlike između izrade tlačnog i semitlačnog uljevnog sustava su da kod tlačnog sustava cijeli model se nalazi u gornjaku, dok se kod semitlačnog razvodnik i dno spusta nalaze u donjaku, slika 35.



Slika 35. Prikaz modela semitlačnog uljevnog sustava u kalupu

4.4 Probno lijevanje

Probno lijevanje je učinjeno u laboratoriju za ljevanje na Fakultetu strojastva i brodogranje. Nakon izrade kalupa može se izvesti lijevanje odljevka. Lijevali smo leguru aluminija AlSi12. Legura aluminija se grije i tali u peći na temperaturi oko 730°C, slika 36. Nakon ugrijavanja taljevini se mjeri temperatura, slika 37. Aluminij se lijeva pri temperaturi 700°C, slika 38 i 39. Talinu ulijevamo u već izrađene kalupe. Vrijeme ulijevanja iznosilo je 4,5s za semitlačni i 6s za tlačni uljevni sustav. Nakon uljevanja taljevine čekamo nekoliko minuta da se taljevina skrutne, slika 40. Slijedi rastresavanje i daljnja obrada, slika 41 i 42.

Slika 36. Taljenje aluminija u peći pri 730°C

Slika 37. Mjerenje temperature taljevine

Slika 38. Uljevanje taljevine u kalup

Slika 39. Prestanak uljevanja

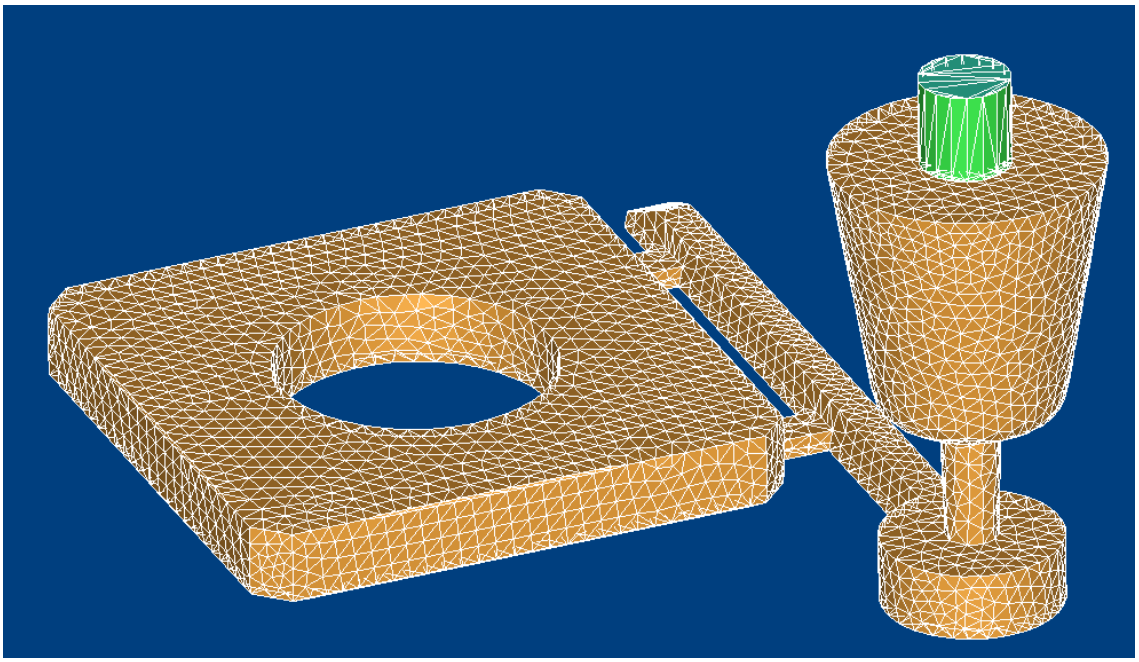
Slika 40. Čekanje taljevine da se ohladi

Slika 41. Otvaranje kalupa

Slika 42. Rastresanje kalupa

4.5. Simulacija lijevanja i skrućivanja

Za simulaciju lijevanja i skrućivanja korišten je program QuikCast. Simulirano je s legurom AlSi13 pošto legure AlSi12 nema u bazi podataka. Izradu simulacije počinjemo učitavanjem STL datoteke i generiranjem mreže, slika 43. Zatim smo dimenzionirali kalup, slika 44 i zatvorili kalup, slika 45.



Slika 43. Generiranje mreže i mjesta uljevanja

4.5.1 Parametri korišteni u simulaciji semitlačnog uljevnog sustava

Broj ćelija u simulaciji: 940500

Hidraulički parametri:

- Brzina uljevanja: 0,275 m/s
- Vrijeme uljevanja: 4,5s

Permeabilnost:

- GF index: 120
- Prosječna debljina kalupa: 7cm

Index hrapavosti: 0,05 (za pješčane kalupe)

Toplinksi parametri:

- Temperatura ulijevanja: 700°C
- Koeficijent emisivnosti: 0,9 (za pješčane kalupe)
- Početna temperatura kalupa: 20°C

4.5.2 Parametri korišteni u simulaciji tlačnog uljevnog sustava

Broj ćelija u simulaciji: 991452

Hidraulički parametri:

Brzina uljevanja: 0,18 m/s

Vrijeme uljevanja: 6,5s

Permeabilnost:

GF index: 120

Prosječna debljina kalupa: 7cm

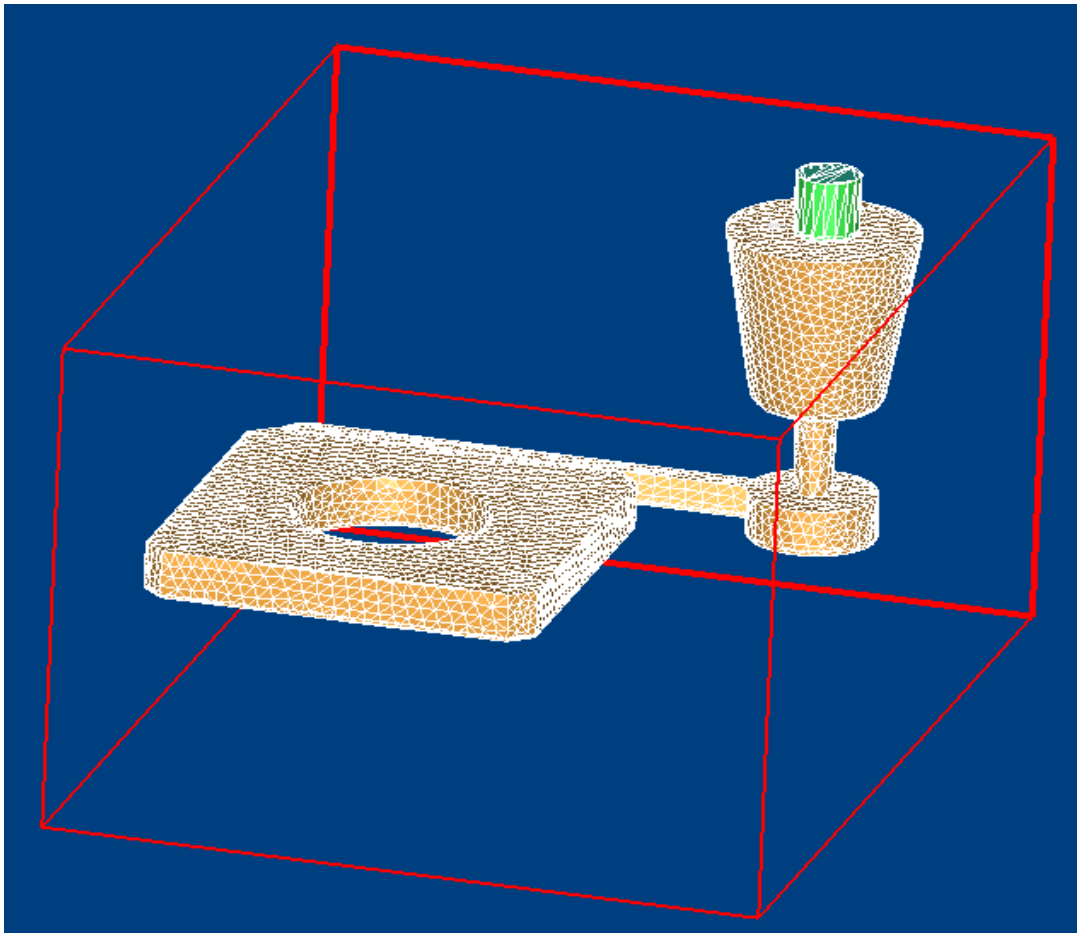
Index hrapavosti: 0,05 (za pješčane kalupe)

Toplinksi parametri:

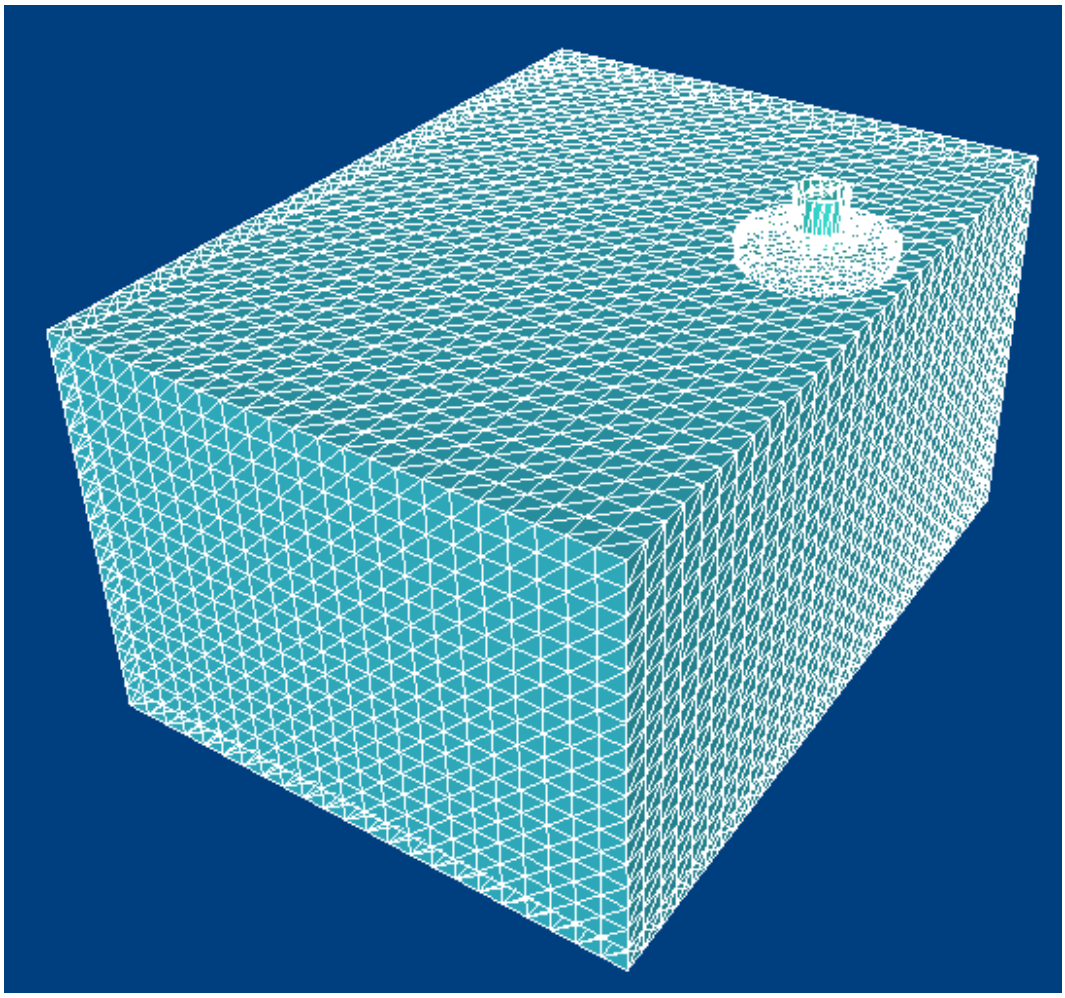
Temperatura ulijevanja: 700°C

Koeficijent emisivnosti: 0,9 (za pješčane kalupe)

Početna temperatura kalupa: 20°C



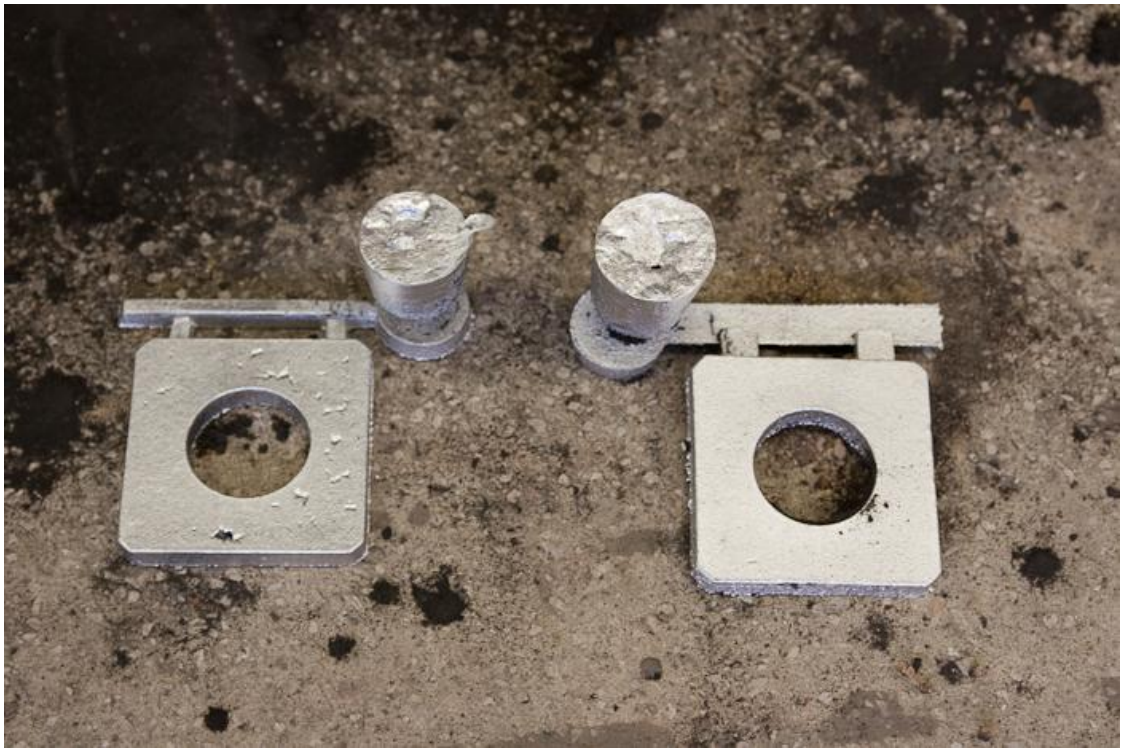
Slika 44. Dimenzioniranje kalupa



Slika 45. Zatvoreni kalup

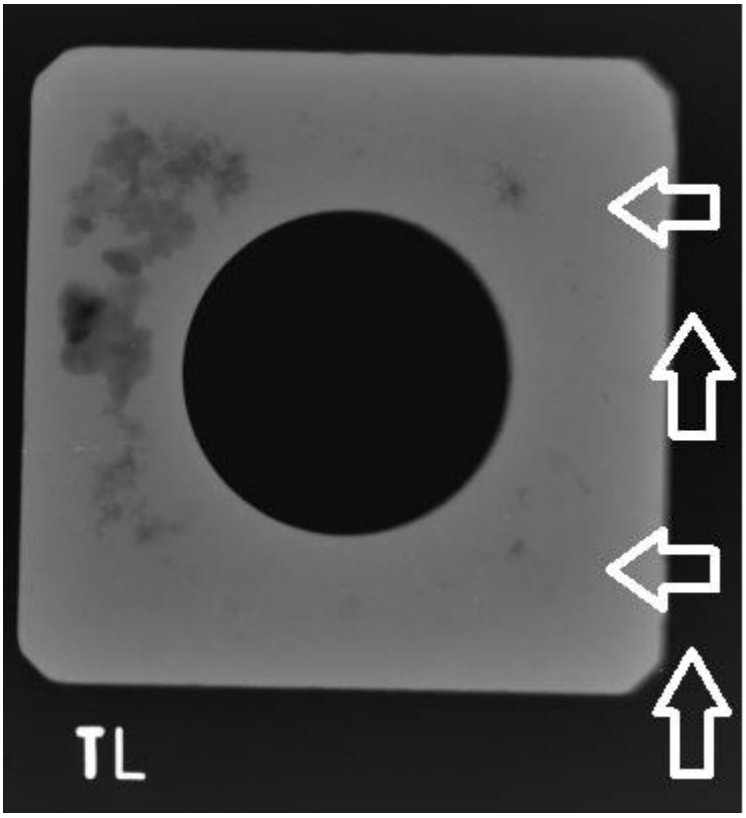
5. REZULTATI I RASPRAVA

Na slici 46 možemo vidjeti pojavu praznine i površinskih ulegnuća na gornjoj strani odljevka ljevanog tlačnim uljevnim sustavom. Daljnom vizualnom provjerom odljevka vidjeli smo površinska ulegnuća na svim stranicama odljevka ljevanog tlačnim uljevnim sustavom. Na slici se nemože vidjeti nikakva nepoželjna deformacija odljevka ljevanog semitlačnim uljevnim sustavom. Detaljnijom vizualnom provjerom odljevka ljevanog semitlačnim uljevnim sustavom uočena je praznina iznad ušća bližeg spustu. Daljnim testovima smo ustanovili razlog pojava tih deformacija.



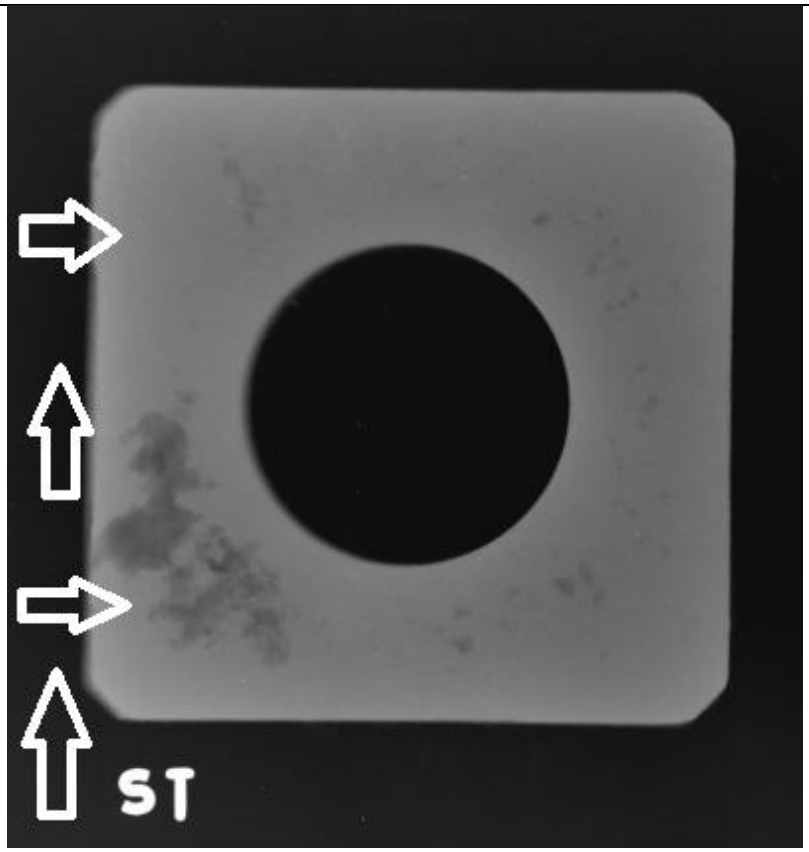
Slika 46. Prikaz odljevka sa uljevnim sustavima (lijevo-tlačni, desno-semitlačni)

5.1 Radiogram



Slika 47. Radiogram odljevka ljevanog tlačnim uljevnim sustavom

Strelicama je prikazan tok taljevine kroz uljevni sustav. Iz radiograma odljevka ljevanog tlačnim uljevnim sustavom uočavamo prazninu koju smo već vidjeli vizualnom provjerom odljevka, ali i mnogo podpovršinskih usahlina. Najveća podpovršinska usahlina je vidljiva na gronjoj lijevoj strani slike 47. Vidljive su i manje podpovršinske usahline.



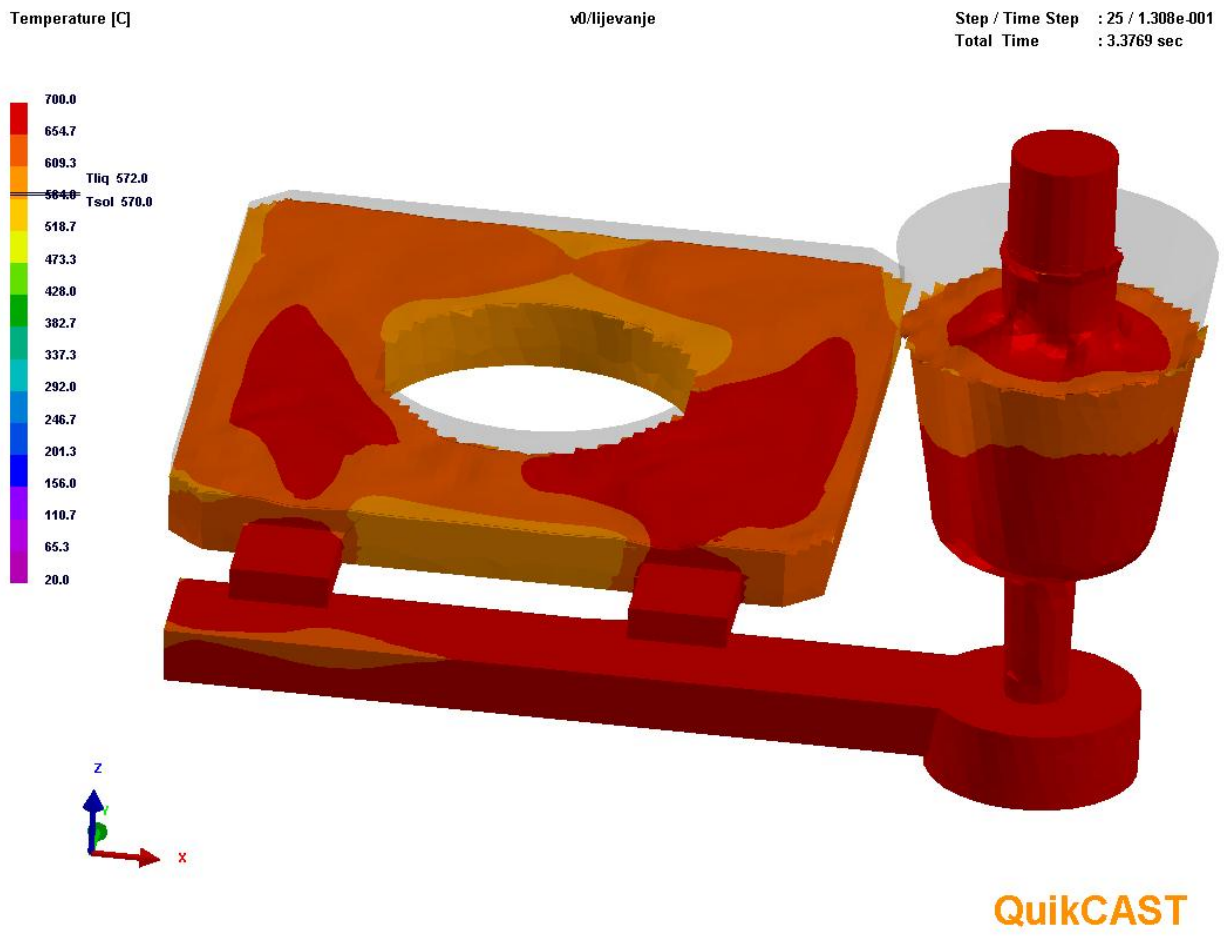
Slika 48. Radiogram odljevka ljevanog semitlačnim uljevnim sustavom

Strelicama je prikazan tok taljevine kroz uljevni sustav. Iz radiograma odljevka ljevanog semitlačnim uljevnim sustavom, slika 48, uočavamo prazninu viđenu detaljnom vizualnom provjerom odljevka. Također se može vidjeti da pored praznine ima većih usahlina. Uočava se i pojava manjih usahlina na odljevku.

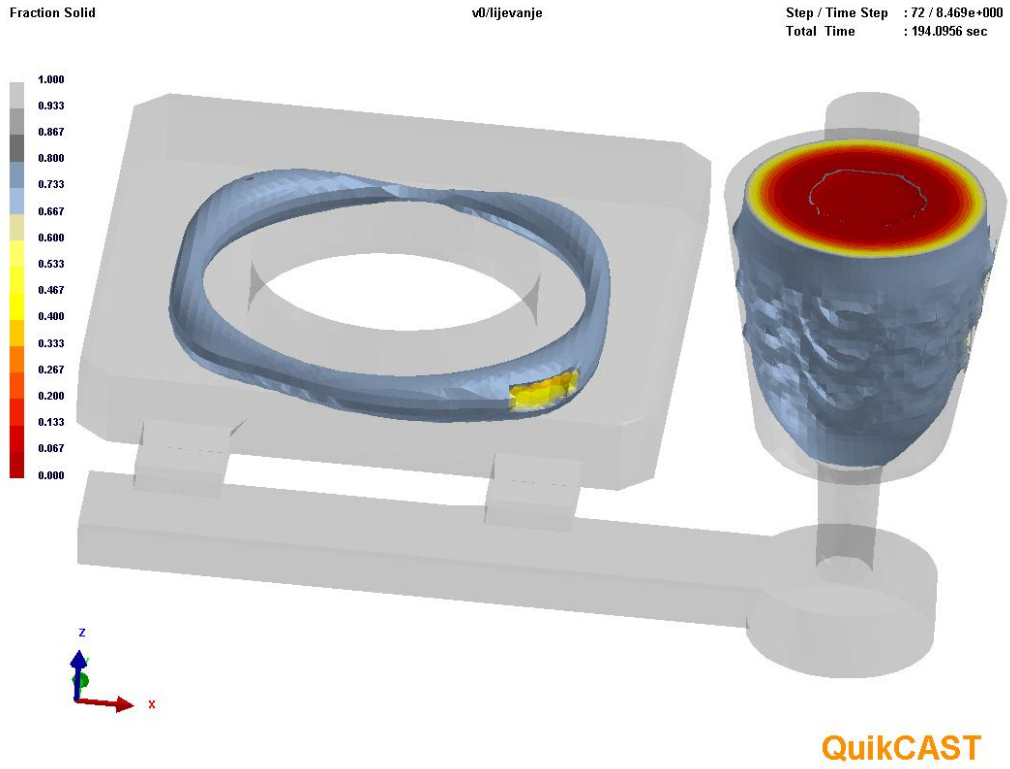
5.2 Simulacija

5.2.1 Uljevanje pomoću semitlačnog uljevnog sustava

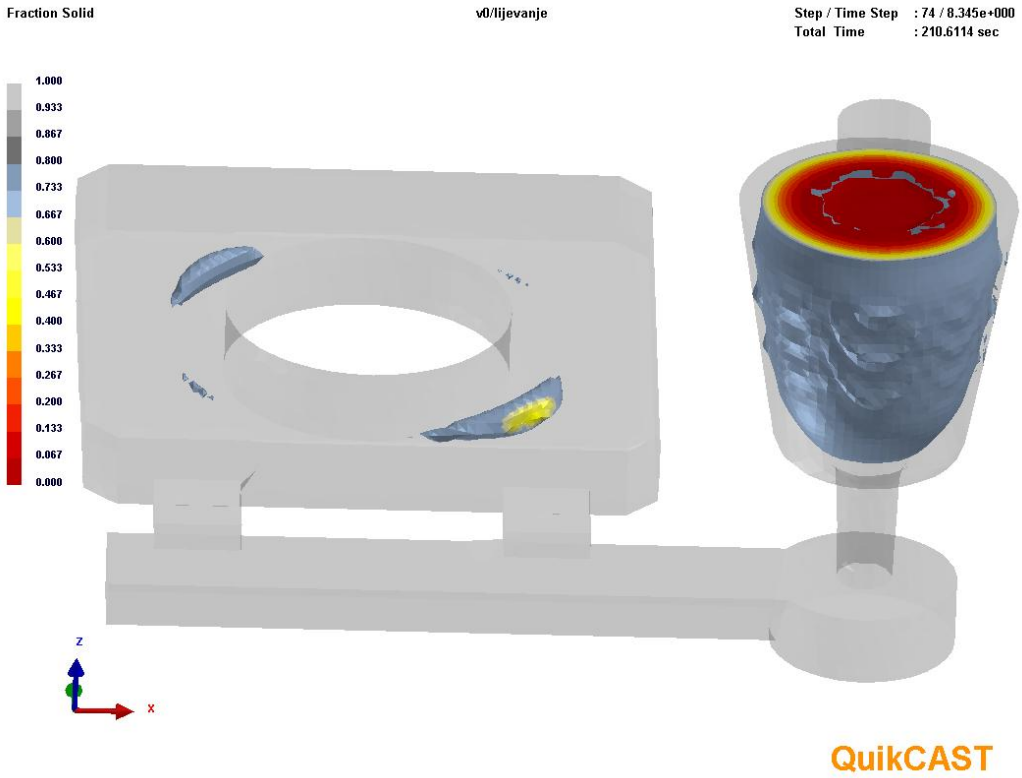
Prikazom punjenja kalupa (slika 49) možemo vidjeti najtoplija mjesta tijekom ulijevanja ('hot spot'). Ujedno se može pretpostaviti da će se na tim mjestima odljevak zadnje skrutnuti. To znaći da je najveća vjerojatnost da će se na tim mjestima pojaviti usahlina. Prikazima mjesta zadnjeg skrućivanja (slike 50 i 51) daljnje dokazujemo da se na tim mjestima odljevak zadnje skrućuje.



Slika 49. Prikaz punjenja kalupa

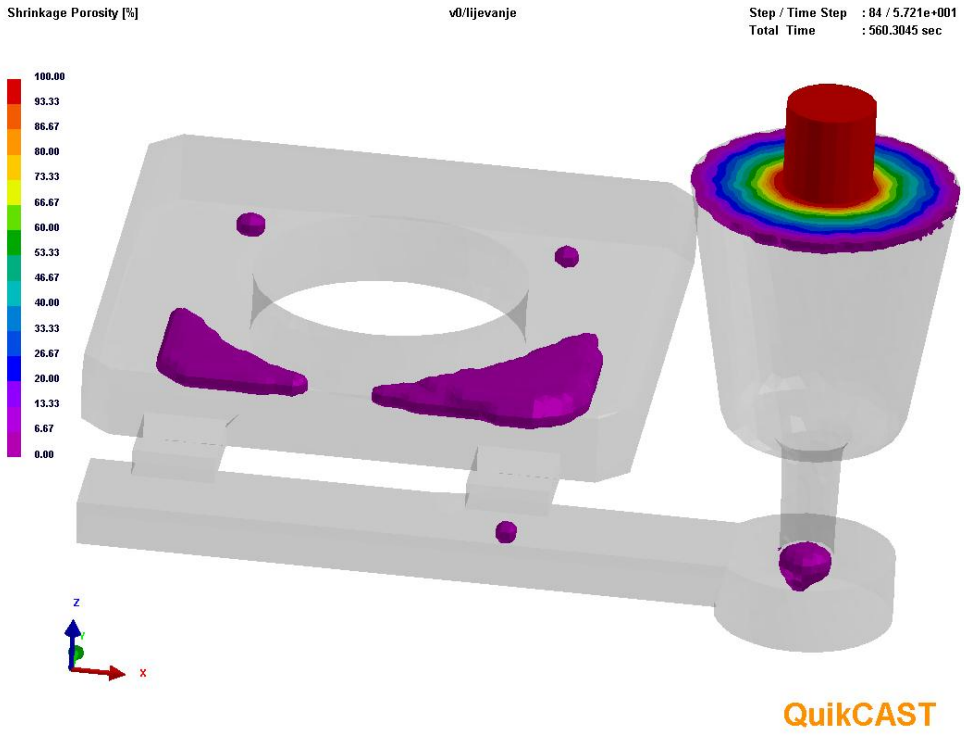


Slika 50. Prikaz mjesta zadnjeg skručivanja, nakon 194s

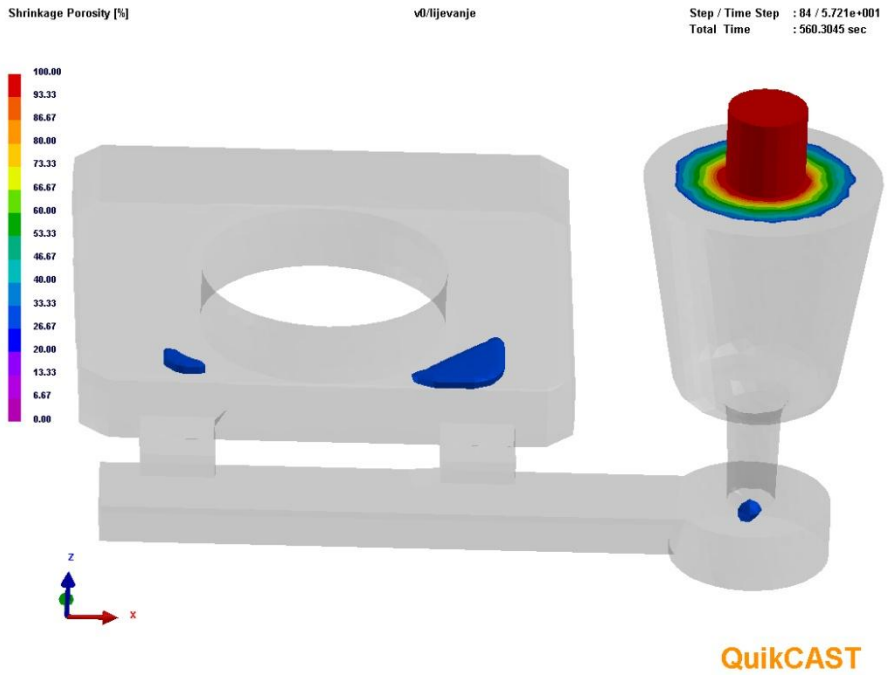


Slika 51. Prikaz mjesta zadnjeg skručivanja, nakon 210s

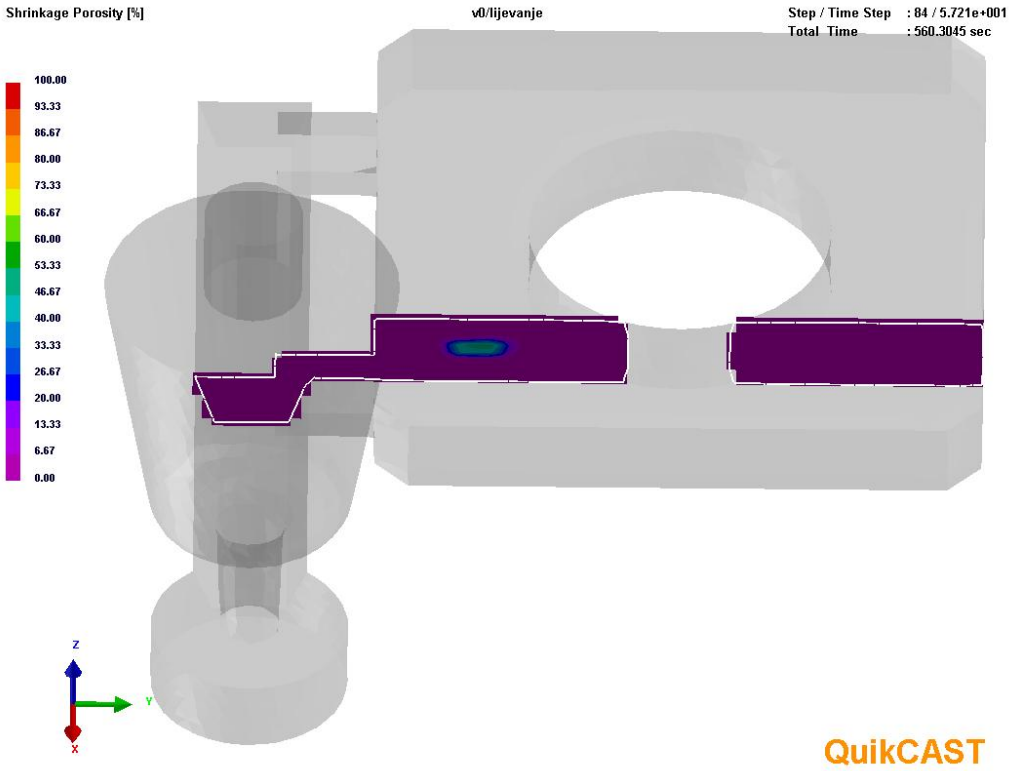
Daljnom analizom simulacije (slike 52 i 53) možemo dodatno potvrditi pojavu poroznosti kod ušća uljevnog sustava. Poroznost se pojavila usred skručivanja legure radi smanjenja volumena. Radi toga se usahline (pore) najčešće pojavljuju na mjestima zadnjeg skručivanja. Na slikama 54 i 55 možemo vidjeti prikaz poroznosti presjekom.



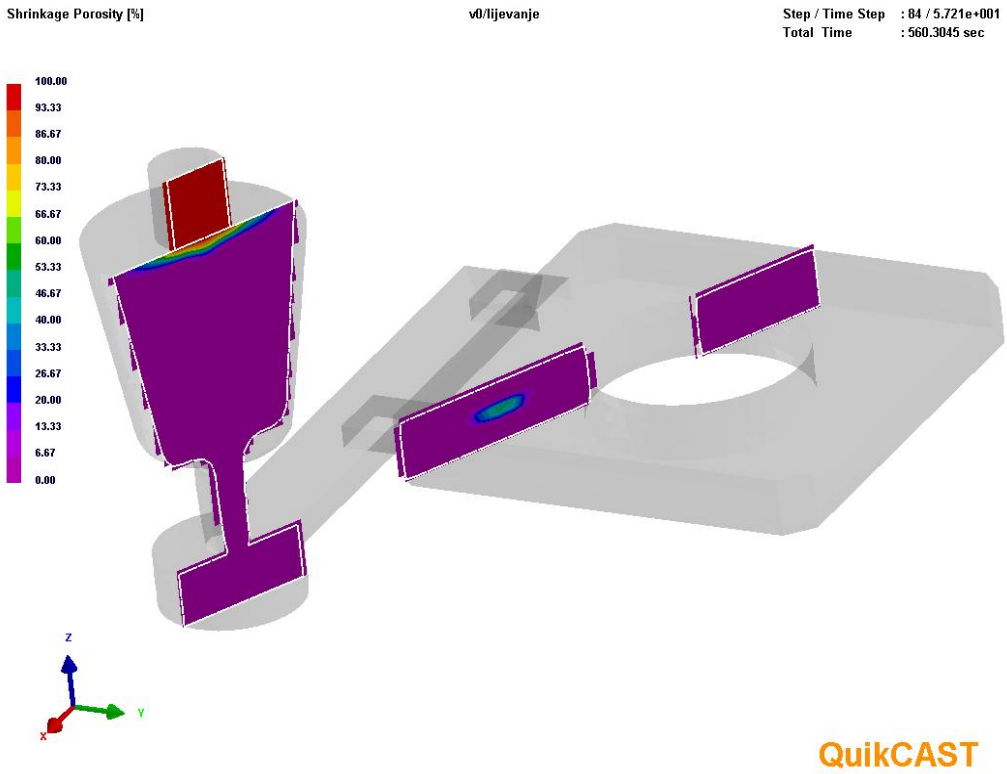
Slika 52. Mjesta poroznosti iznad 0% mogučnosti



Slika 53. Mjesta poroznosti iznad 30% mogučnosti

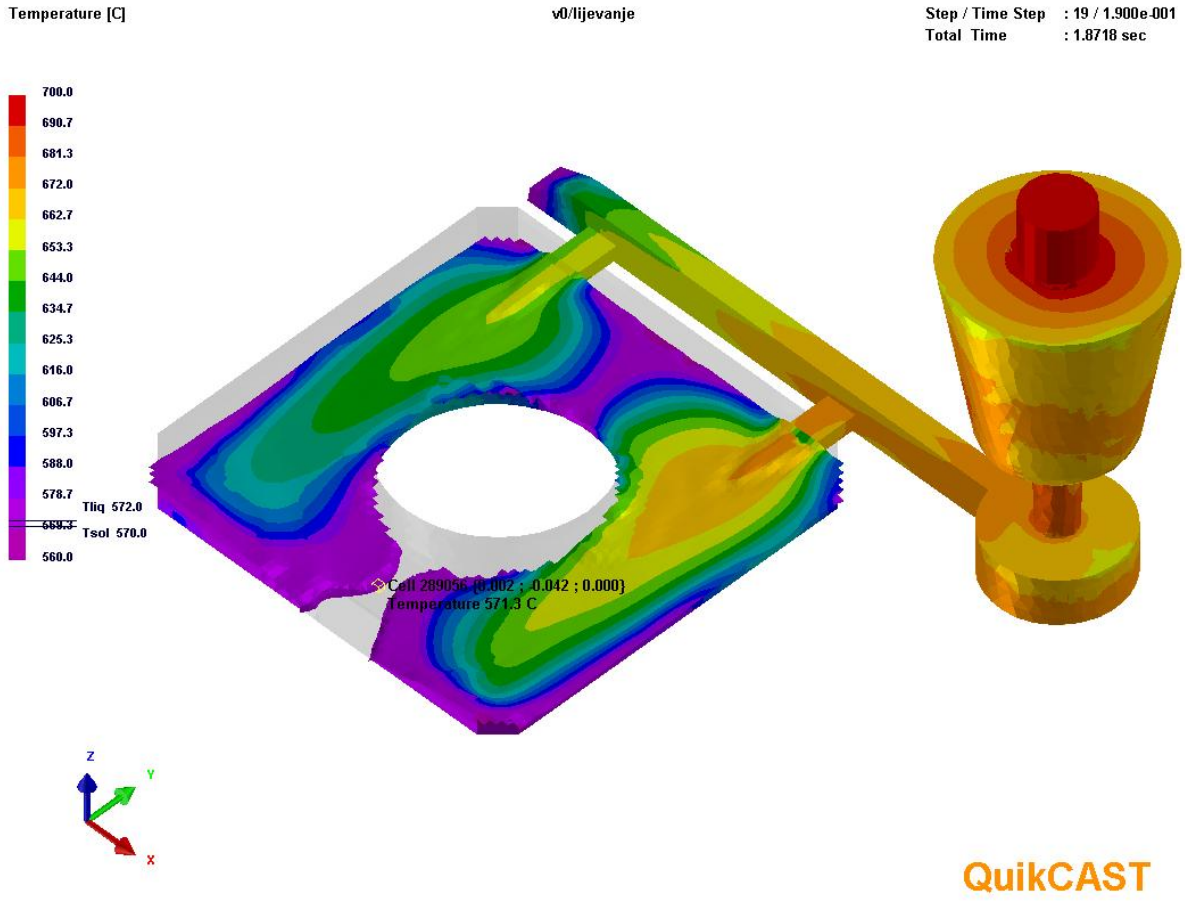


Slika 54. Prikaz poroznosti (presjek ravninom)



Slika 55. Prikaz poroznosit (presjek rotacijom ravnine)

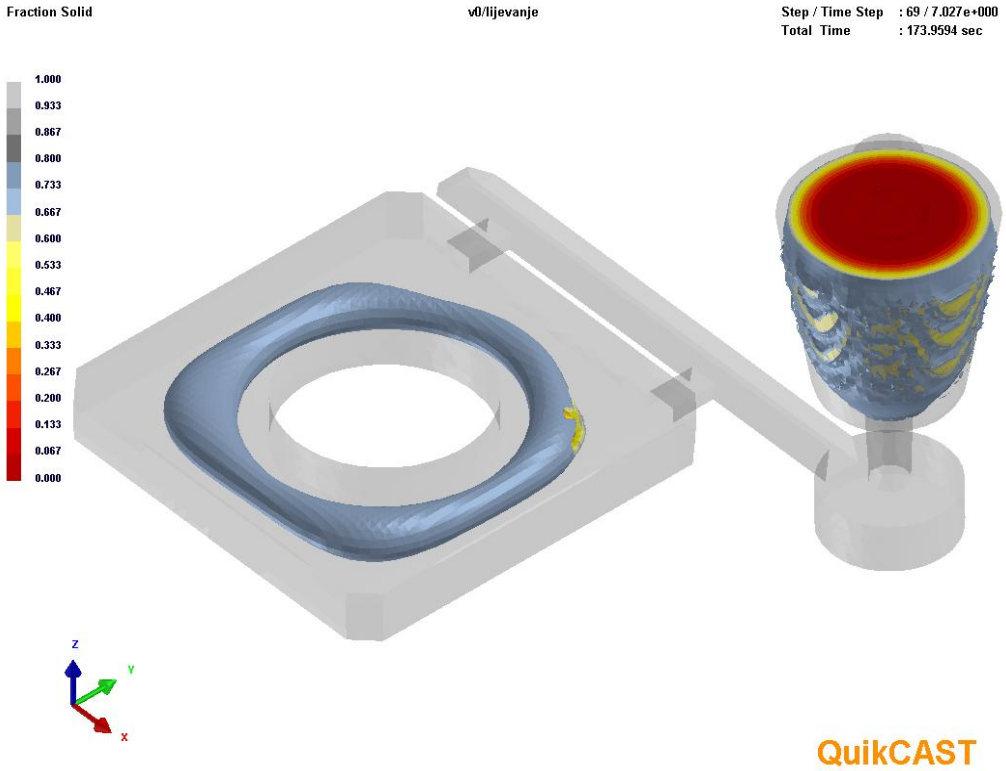
5.2.2 Uljevanje pomoću tlačnog uljevnog sustava



Slika 56. Prikaz punjenja kalupa i prikaz pojave nedolivenosti

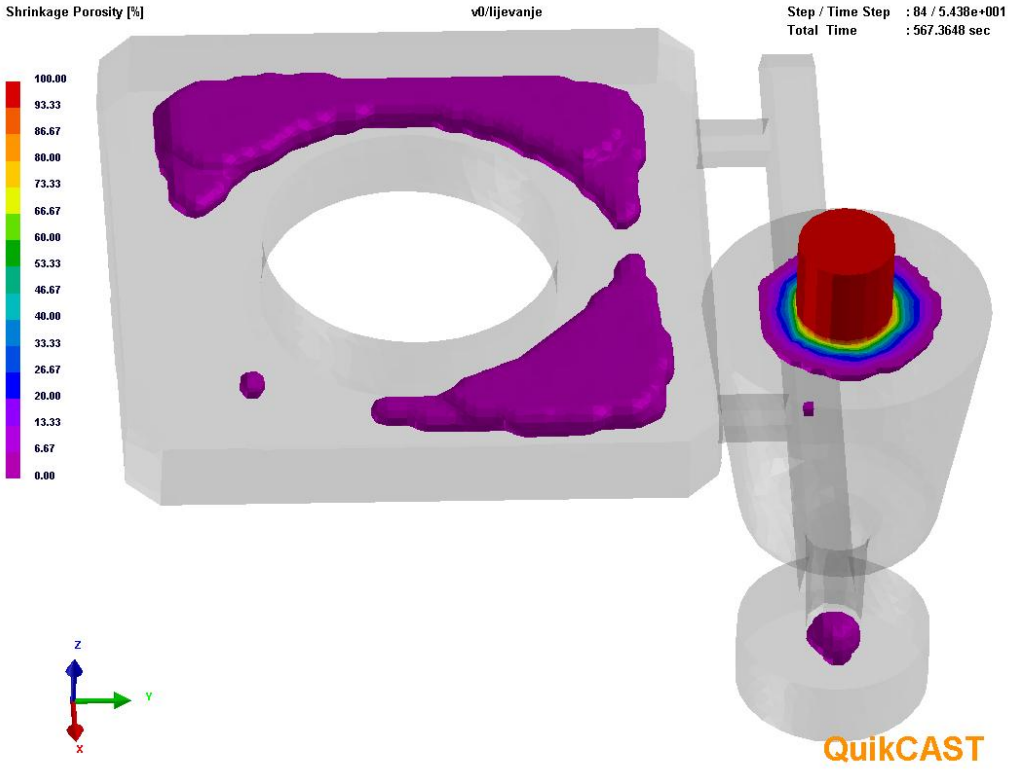
Prikazom punjenja kalupa (slika 56) možemo uočiti da bi moglo doći do pojave nedolivenosti. Na sudaru dvije struje taljevine temperatura taljevine je 1,3°C veća od granice solidusa. Ovime dokazujemo da je praznina koja je uočena vizualnim pregledom odljevka nastala radi nedolivenosti. Na slikama 57 i 58 pokazujemo mjesta zadnjeg skrućivanja.

Daljnom analizom simulacije (slike 59 i 60) možemo dodatno potvrditi pojavu poroznosti na gornjem lijevom dijelu odljevka. Poroznost se pojavila usred skručivanja legure radi smanjenja volumena. Na slici 61 možemo vidjeti prikaz poroznosti presjekom uz pomoć dvije ravnine.

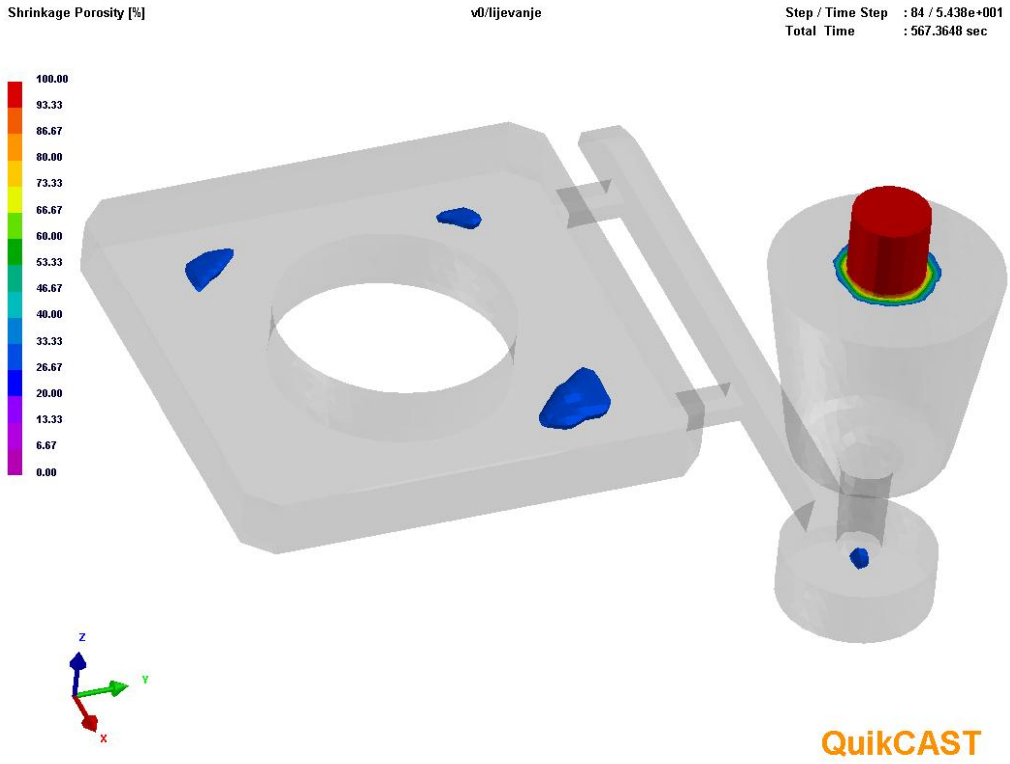


Slika 57. Prikaz mjesta zadnjeg skručivanja, 173s

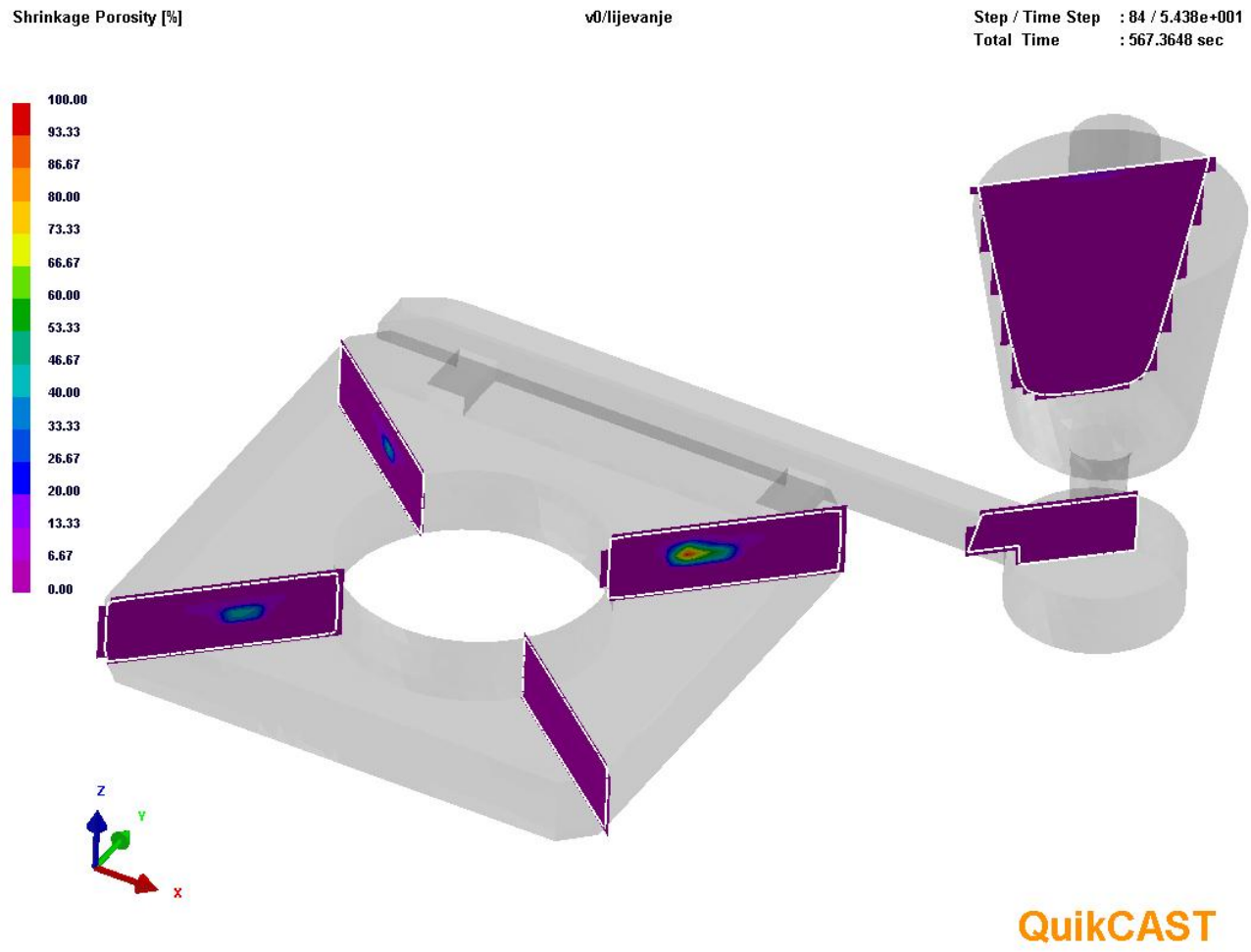
Slika 58. Prikaz mjesta zadnjeg skručivanja, 207s



Slika 59. Mjesta poroznosti iznad 0% mogučnosti



Slika 60. Mjesta poroznosti iznad 20% mogučnosti



Slika 61. Prikaz poroznosti (presjek s dvije ravnine)

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazano kako proračunati i dizajnirati uljevni sustav za zadani jednostavni odljevak. Provedeno je probno lijevanje u laboratoriju i simulacija lijevanja i skručivanja u programu QuikCast.

Usporedba simulacije kod semitlačnog uljevnog sustava u poptunosti se poklapa sa rezultatima ljevanja, jer se poroznost pojavila na istim mjestima. Kod tlačnog uljevnog sustava rezultati poroznosti se poklapaju, dok simulacija ne prepoznaje nedolivenost.

Pojavu usahlina i ulegnuća površine bi se moglo izbjeći izradom uljevnog sustava sa pojilima i dodatnim povečanjem uljevnog sustava, a problem nedolivenosti riješili bi povećanjem dimenzija ušća i cijelog uljevnog sustava.

PRILOZI

1. CD-R disc

LITERATURA

[1] http://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/30_09_2011__15683_ljevarstvo-2011.pdf 28.6.2012.

[2] http://hr.wikipedia.org/wiki/Lijevanje 28.6.2012.

[3] Unkić F., Glavaš Z. : Osnove lijevanja metala – zbirka riješenih zadataka Sisak, 2009.

[4] http://hr.wikipedia.org/wiki/Aluminij 28.6.2012.

[5] Savez ljevača Hrvatske: Ljevački priručnik,Grafički zavod Hrvatske, Zagreb, 1985.

[6] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf 30.6.2012.

[7] Mandić B. Z., Budić I.: Osnove tehnologije kalupljenja – jednokratni kalupi I.dio, Tiskara Vidić Slavonski Brod, 2001.

[8] I. Budić, predavanja, na Strojarskom fakultetu u Zagrebu, Zagreb, 2006.