

SIMULACIJA INJEKCIJSKOG PREŠANJA U POLIMERNI KALUP

Kapac, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:490979>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SIMULACIJA INJEKCIJSKOG PREŠANJA U POLIMERNI KALUP

Kapac, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:490979>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2023-02-10**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
Stručni studij Strojarsstva

Dario Kapac

**Simulacija injekcijskog prešanja u
polimerni kalup**

Završni rad

Karlovac, 2022.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
Stručni studij Strojarsstva

Dario Kapac

**Simulacija injekcijskog prešanja u
polimerni kalup**

Završni rad

Mentor:
Josip Groš, mag. ing. mech.

Karlovac, 2022.

PREDGOVOR

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

Zahvaljujem svom mentoru, Josipu Grošu mag. ing. mech., na pomoći tijekom izrade ovog rada, te tvrtkama P.E.S. d.o.o. i Infodata d.o.o.

Također zahvaljujem svojoj obitelji na njihovoj potpori tijekom studiranja.

Dario Kapac

SAŽETAK

U radu je prikazana usporedba između polimernog i aluminijskog kalupa za postupak injekcijskog prešanja.

Provedena je računalna simulacija te izrada kalupa na strojevima. U teoretskom dijelu je pojašnjen pojam injekcijskog prešanja kao i elementi koji čine cjelokupni sustav injekcijskog prešanja.

Najvažniji dio u sustavu za injekcijsko prešanje je kalup te su detaljno pojašnjene sve njegove komponente i funkcije. Također, kratko je opisan i postupak stereolitografije. Pri računalnoj simulaciji procesa injekcijskog prešanja korišten je programski paket Moldex3D te je opisana primjena istog.

Ključne riječi: injekcijsko prešanje, kalup, računalna simulacija, Moldex3D

SUMMARY

The paper presents a comparison between a polymer and an aluminum mold for the injection molding process.

Computer simulation and mold making on machines were performed. The theoretical part explains the concept of injection molding as well as the elements that make up the entire injection molding system.

The most important part of an injection molding system is the mold and all its components and functions are explained in detail. Also, the process of stereolithography is briefly described. The Moldex3D software package was used in the computer simulation of the injection molding process, and its application is described.

Key words: injection molding, mold, computer simulation, Moldex3D

SADRŽAJ

PREDGOVOR.....	I
SAŽETAK.....	II
SUMMARY	III
SADRŽAJ	IV
POPIS SLIKA.....	VI
1. UVOD.....	1
2. INJEKCIJSKO PREŠANJE.....	2
2.1. Općenito o postupku.....	2
2.2. Faze procesa injekcijskog prešanja	3
2.3. Kalup	4
2.3.1. Kućište kalupa.....	5
2.3.3. Uljevni sustav.....	6
2.3.4. Sustav za odzračivanje.....	7
2.3.5. Sustav za temperiranje.....	7
2.3.6. Sustav za vođenje i centriranje.....	7
2.3.7. Sustav za vađenje i izbacivanje otpresaka	8
2.3.8. Materijali za izradu kalupa za injekcijsko prešanje polimera.....	9
3. POLIMERNI KALUPI IZRAĐENI POMOĆU ADITIVNE TEHNOLOGIJE	10
3.1. Općenito o aditivnoj tehnologiji	10
3.2. Polimerni kalupi izrađeni pomoću aditivne tehnologije.....	11
4. STEREOLITOGRAFIJA.....	12
5. KALUPI ZA ISPITIVANJE POPUNJAVANJA POLIMERNE MASE	14
5.1. Izrada kalupa 1	15
5.2. Izrada kalupa 2	16
6. SIMULACIJA INJEKCIJSKOG PREŠANJA U PROGRAMU MOLDEX3D	17
6.1. Općenito o programu.....	17
6.2. Uljevni sustav.....	20
6.3. Mreža.....	21
6.4. Odabir materijala.....	22
6.5. Analiza simulacije	24
6.6. Vrijeme trajanja ciklusa injekcijskog prešanja	25
6.7. Procesi simulacije.....	26
6.7.1. Faza ubrizgavanja.....	26
6.7.2. Faza naknadnog tlaka	34
7. MODEL KALUPA NA ADITIVNOM UREĐAJU.....	42
7.1. Izrada kalupa postupkom aditivne tehnologije 1	43
7.2. Izrada kalupa postupkom aditivne tehnologije 2	45

8. INJEKCIJSKO PREŠANJE NA STROJU	47
8.1. Eksperimentalno injekcijsko prešanje 1	48
8.2. Eksperimentalno injekcijsko prešanje 2	50
8.3. Eksperimentalno injekcijsko prešanje 3	53
9. USPOREDBA INJEKCIJSKOG PREŠANJA I POSTUPKA ADITIVNE TEHNOLOGIJE.....	65
9.1. Usporedba polimernih i metalnih kalupa.....	65
9.2. Usporedba aluminijskih kalupa i kalupa aditivne tehnologije.....	66
10. PRORAČUN KALUPA	67
10.1. Numerički proračun kalupa	67
10.2. Analitički proračun kalupa	71
10.2.1. Reološki proračun.....	71
10.2.2. Mehanički proračun.....	73
11. ZAKLJUČAK	75
12. LITERATURA.....	76
13. PRILOG	78

POPIS SLIKA

Slika 1. Sustav za injekcijsko prešanje [2]	2
Slika 2. Elementi čvrstog uljevnog sustava [2]	6
Slika 3. Komponentne SLA 3D uređaja [20]	13
Slika 4. Oblik Arhimedovih spirala u programu Solidworks	14
Slika 5. Presjek kalupa za ispitivanje popunjavanja polimerne mase	15
Slika 6. Oblik alata za ispitivanje popunjavanja polimerne mase	15
Slika 7. Presjek punog kalupa za drugo i treće ispitivanje popunjavanja polimerne mase	16
Slika 8. Nepomični alat sa polimernim kalupom za drugi i treći postupak injekcijskog prešanja	16
Slika 9. Pomični alat sa polimernim kalupom za drugi i treći postupak injekcijskog prešanja	16
Slika 10. Vrste prešanja u programu Moldex3D	17
Slika 11. Odabir formata datoteke	17
Slika 12. Otpresak sa uljevnim sustavom – Arhimedova spirala u Moldexu3D	18
Slika 13. Naredba "Check geometry" za provjeru nepravilnosti modela	19
Slika 14. Definiranje spirale u naredbi "Attribute"	19
Slika 15. Prikaz naredbe "Model Thickness"	20
Slika 16. Prikaz konstrukcije uljevnog sustava	21
Slika 17. "Mesh" naredba otpreska Arhimedove spirale	22
Slika 18. Odabir materijala za popunjavanje kalupa Arhimedove spirale	23
Slika 19. Faze analize ciklusa injekcijskog prešanja kalupa Arhimedove spirale	24
Slika 20. Rezultati analize	24
Slika 21. Dijagram ciklusa injekcijskog prešanja [21]	25
Slika 22. Faza ubrizgavanja polimerne taljevine u jedinici vremena	26
Slika 23. Tlak uljevka kod ubrizgavanja taljevine polimernog materijala	27
Slika 24. Sila zatvaranja kalupa	28
Slika 25. Tijek ubrizgavanja taljevine polimernog materijala	29
Slika 26. Prikaz toka volumena u ciklusu prešanja	30
Slika 27. Masa otpreska s uljevkom kod faze ubrizgavanja	31
Slika 28. Masa Arhimedovih spirala kod faze ubrizgavanja	32
Slika 29. Tijek ubrizgavanja taljevine polimernog materijala kroz uljevak	33
Slika 30. Faza naknadnog tlaka u jedinici vremena	34
Slika 31. Tlak uljevka kod faze naknadnog tlaka	35
Slika 32. Sila zatvaranja kalupa kod faze naknadnog tlaka	36
Slika 33. Tijek taljevine polimernog materijala kod faze naknadnog tlaka	37
Slika 34. Volumen taljevine polimernog materijala kod faze naknadnog tlaka	38
Slika 35. Masa otpreska s uljevkom u fazi naknadnog tlaka	39
Slika 36. Masa Arhimedovih spirala u fazi naknadnog tlaka	40
Slika 37. Tijek taljevine polimernog materijala kroz uljevak	41
Slika 38. Aditivni uređaj "Formlabs 2"	42
Slika 39. Donja polovica polimernog kalupa za prvi eksperiment injekcijskog prešanja	43
Slika 40. Gornja polovica polimernog kalupa za prvi eksperiment injekcijskog prešanja	43
Slika 41. Model donje polovice kalupa aditivne tehnologije u softveru "PreForm"	44
Slika 42. Model gornje polovice kalupa aditivne tehnologije u softveru "PreForm"	44
Slika 43. "Cure" uređaj	45
Slika 44. Izgled drugog kalupa aditivne tehnologije u softveru "PreForm"	46

Slika 45. Izgled drugog kalupa aditivne tehnologije u fizičkom obliku	46
Slika 46. Stroj za injekcijsko prešanje "Ekou HS – 120 K3" [22]	47
Slika 47. Parametri stroja za prvi slučaj injekcijskog prešanja	48
Slika 48. Položaj alata na stroju	48
Slika 49. Oštećeni polimerni kalup prvog eksperimenta injekcijskog prešanja (1)	49
Slika 50. Oštećeni polimerni kalup prvog eksperimenta injekcijskog prešanja (2)	49
Slika 51. Parametri temperature drugog eksperimenta injekcijskog prešanja	50
Slika 52. Parametri tlaka drugog eksperimenta injekcijskog prešanja	50
Slika 53. Parametri simulacije drugog eksperimenta injekcijskog prešanja	51
Slika 54. Izgled otpreska u kalupu za drugi pokušaj injekcijskog prešanja	52
Slika 55. Primjer izvinutog otpreska iz polimernog kalupa	52
Slika 56. Primjer prvih devet otpresaka	54
Slika 57. Izgled kalupa nakon prvih deset otpresaka	55
Slika 58. Primjeri otpresaka od 10. do 19.	56
Slika 59. Izgled kalupa nakon dvadeset otpresaka	57
Slika 60. Primjeri otpresaka od 20. do 29.	58
Slika 61. Izgled kalupa nakon trideset otpresaka	59
Slika 62. Primjeri otpresaka od 30. do 40.	60
Slika 63. Izgled polimernog kalupa nakon četrdesetog otpreska (nepomični alat)	61
Slika 64. Izgled polimernog kalupa nakon četrdesetog otpreska (pomični alat)	61
Slika 65. Primjeri otpresaka od 41. do 47.	62
Slika 66. Izgled polimernog kalupa nakon pedeset otpresaka	63
Slika 67. Izgled polimernog kalupa nakon šezdeset otpresaka	63
Slika 68. Temperaturni prikaz popunjavanja kalupne šupljine	67
Slika 69. Vrijeme popunjavanja kalupne šupljine	68
Slika 70. Tlak na kraju faze ubrizgavanja	68
Slika 71. Raspon temperatura otpreska na kraju procesa	69
Slika 72. Mjesta mogućih uključina zraka	69
Slika 73. Linija spajanja	70
Slika 74. Maksimalno skupljanje otpreska prikazano u postocima	70
Slika 75. Karakteristike stroja za injekcijsko prešanje [23]	71
Slika 76. p, v, T dijagram	72

1. UVOD

Jedan od najvažnijih postupaka prerade polimera današnjice je postupak injekcijskog prešanja. Sustav injekcijskog prešanja čini više vrsta dijelova, no najbitniji dio je kalup čija je zadaća oblikovati taljevinu određenog materijala u željeni oblik. Proizvodi, odnosno otpresci koji nastaju mogu biti raznovrsnih oblika i dimenzija.

Uvelike su povećani zahtjevi na kvalitetu samih otpresaka te na smanjenje vremena ciklusa postupka injekcijskog prešanja. Odgovor na te zahtjeve daju razne računalne simulacije procesa uz pomoć kojih je moguće unaprijed uočiti teškoće koje se mogu javiti pri radu na strojevima za injekcijsko prešanje, te je moguće definirati optimalne parametre procesa koji će rezultirati kvalitetnijim proizvodima, odnosno otprescima.

Cilj rada je prikaz uporabe programskog paketa za računalnu simulaciju procesa injekcijskog prešanja pod nazivom Moldex3D, te izrada kalupa i rad na stroju za injekcijsko prešanje.

2. INJEKCIJSKO PREŠANJE

2.1. Općenito o postupku

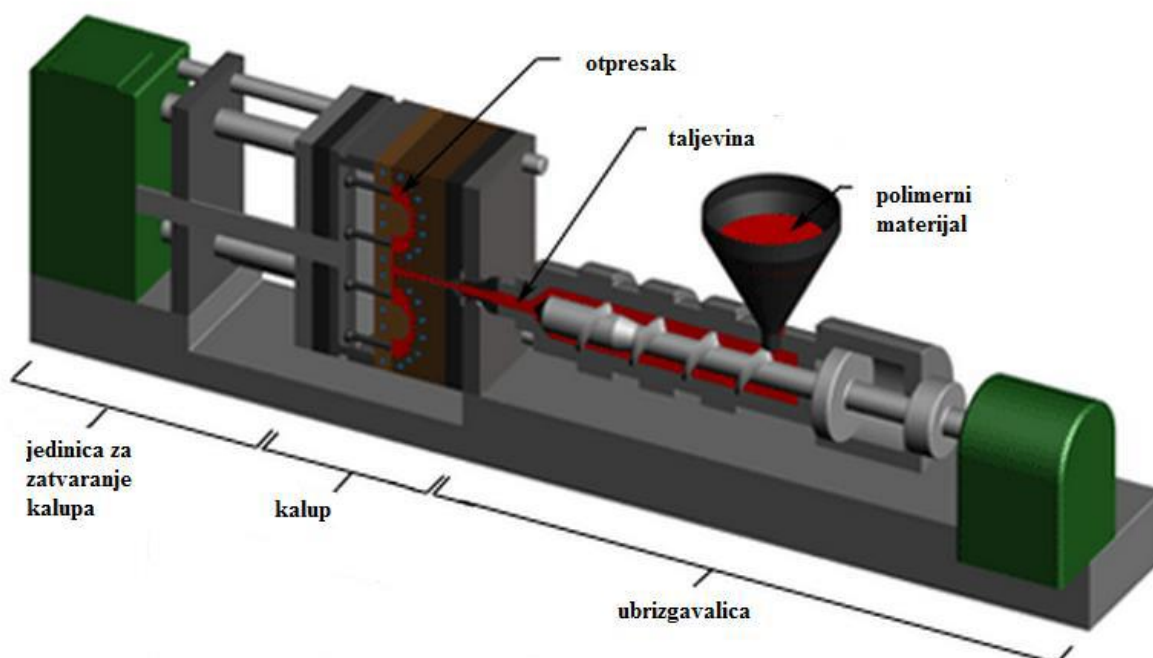
Injekcijsko prešanje polimera najbitniji je ciklički postupak brzog punjenja kalupa ubrizgavanjem polimernog materijala, očvršćivanja materijala u kalupnoj šupljini te izbacivanja gotovog proizvoda, tj. otpreska iz kalupa. Polimer poprima oblik kalupne šupljine te se nakon hlađenja vadi i moguća je daljnja upotreba proizvoda.

Ovim postupkom se mogu prerađivati sve vrste polimera ali i keramičke smjese, kombinacije različitih materijala te žive stanice. Otpresci mogu biti raznih veličina i masa, te se izrađuju primjeri kompliciranije geometrije uz zadržavanje visoke točnosti dimenzija.

Za postupak injekcijskog prešanja potrebna je linija koju čine sustav za injekcijsko prešanje te dopunska oprema. Dopunska oprema povećava djelotvornost procesa, a sastoji se od elemenata rukovanja materijalom i proizvodom.

Dijelovi sustava za injekcijsko prešanje su: [2]

- Ubrizgavalica
- Kalup
- Temperiralo kalupa



Slika 1. Sustav za injekcijsko prešanje [2]

2.2. Faze procesa injekcijskog prešanja

1) Priprema polimerne taljevine i zatvaranje kalupa:

U prvoj fazi procesa događa se plastificiranje plastomera radi postizanja potrebne smične viskoznosti, te postizanja odgovarajuće sposobnosti tečenja. Slijedi zatvaranje kalupa, gdje dvije polovice kalupa, prije ubrizgavanja polimera, moraju biti sigurno zatvorene. Svaka polovica kalupa vezana je za stroj injekcijskog prešanja, ali samo jedna se smije pomicati. Vrijeme potrebno za zatvaranje i držanje kalupa ovisi o vrsti i tipu stroja.

2) Ubrizgavanje:

Polimer, najčešće u obliku praha ili granulata, utječe u ubrizgavalicu te se kroz cilindar kreće prema kalupu pomoću pužnog vijka. Rastaljeni polimer se topi zbog djelovanja tlaka i topline te se ubrizgava u kalup.

3) Faza naknadnog tlaka:

Omogućuje zadržavanje dimenzija otpresaka, sprječava povratak taljevine iz kalupne šupljine, te kompenzira stezanje polimera tijekom hlađenja.

4) Hlađenje, otvaranje kalupa i izbacivanje otpreska:

Polimer koji se nalazi u kalupnoj šupljini počinje se hladiti usred kontakta sa stijenkom kalupne šupljine. Hlađenjem i očvrstnućem polimera, dobiva se željeni oblik otpreska. Kalup se ne bi trebao otvarati sve dok ne prođe potrebno vrijeme hlađenja, koje ovisi o termodinamičkim svojstvima polimera i debljini otpreska.

Nakon određenog vremena, ohlađeni otpresak se izbacuje iz kalupa. Kako bi se olakšalo izbacivanje, unutarnja površina kalupne šupljine se prije ubrizgavanja taljevine prska raznim odvajalima koji pospješuju samo vađenje i izbacivanje.

Nakon što je otpresak izbačen, kalup se može zatvoriti za početak sljedećeg ciklusa ubrizgavanja.

2.3. Kalup

Kalup predstavlja središnji dio sustava za injekcijsko prešanje koji istovremeno obavlja razne funkcije nametnute samim procesom. Glavna zadaća kalupa za injekcijsko prešanje je oblikovanje taljevine polimera u oblik otpreska u fazi punjenja kalupne šupljine. Također, kalup osigurava odgovarajuće očvrstnuće otpreska, te definira veličinu, oblik, kvalitetu površine, a često i mehanička i uporabna svojstva samog otpreska.

Kako se u današnje vrijeme teži prema maksimalnoj automatizaciji postupka injekcijskog prešanja, to dovodi do sve kompleksnijih rješenja konstruiranja radi ostvarenja maksimalne funkcije kalupa, što podrazumijeva potpuni automatski rad kalupa.

Dijelovi kalupa za injekcijsko prešanje su:

- Kućište kalupa
- Kalupna šupljina
- Uljevni sustav
- Sustav za odzračivanje
- Sustav za temperiranje
- Sustav za vođenje i centriranje
- Sustav za vađenje i izbacivanje otpresaka

2.3.1. Kućište kalupa

Kućište kalupa za injekcijsko prešanje čini skup ploča i elemenata za njihovo povezivanje a svi zajedno sačinjavaju kompletnu nosivu konstrukciju kalupa.

Kućište spaja sve dijelove i sustave kalupa u jednu cjelinu. Također, preko kućišta se ostvaruje veza kalupa na ubrizgavalicu te se na taj način prenose sile koje nastaju tijekom samog procesa injekcijskog prešanja.

Najčešće se koriste već postojeća standardna kućišta raznih proizvođača sa zajamčenim svojstvima na kojima se daljnjom obradom i nadogradnjom dobiva konačni oblik kalupa.

Kućište mora moći stati u jedinicu za otvaranje i zatvaranje kalupa te mora prenositi silu zatvaranja kalupa pri čemu treba obratiti pozornost na dimenzije temeljnih i steznih ploča koje kalupu preko kućišta daju potrebnu krutost.

Prema izvedbi, kućišta kalupa mogu biti: [2]

- Pravokutna
- Okrugla
- Posebna

2.3.2. Kalupna šupljina

Kalupna šupljina je definirana kao prazan prostor kojeg zatvaraju pomični i nepomični dijelovi kalupa te se u nju ubrizgava polimerna taljevina koja ju popunjava.

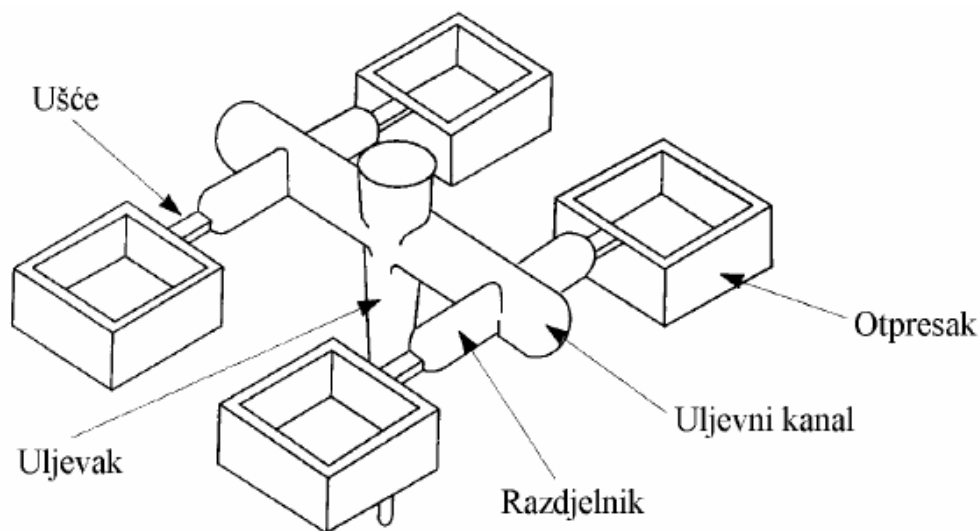
Kalup može imati jednu ili više kalupnu šupljinu istog ili različitog oblika. Ukoliko postoji više kalupnih šupljina, treba težiti tome da put tečenja taljevine do svake šupljine bude jednak i što kraći.

Temeljni slučajevi rasporeda kalupnih šupljina su: [2]

- Zvezdasti raspored
- Redni raspored
- Simetrični raspored

2.3.3. Uljevni sustav

Uljevni sustav se sastoji od jednog ili više kanala povezanih u cjelinu koji dovode polimernu taljevinu do kalupne šupljine.



Slika 2. Elementi čvrstog uljavnog sustava [2]

Prema postupku injekcijskog prešanja uljevni sustavi mogu biti:

- Hladni (čvrsti)
- Vrući (topli)
- Njihova kombinacija

Čvrsti uljevni sustav se zajedno hladi s otpreskom na temperaturu oblika otpreska te se u jednom komadu zajedno izbacuju iz kalupa gdje se naknadnom obradom odvajaju.

Materijal u vrućem uljevnom sustavu se konstantno održava na visokoj temperaturi i to u stanju taljevine, te se u fazi ubrizgavanja pušta kroz mlaznicu u kalupnu šupljinu. Sa vrućim uljevnim sustavom eliminira se utrošak materijala koji kod čvrstog uljavnog sustava otpada na njegov volumen.

2.3.4. Sustav za odzračivanje

Kod postupka injekcijskog prešanja, u fazi punjenja kalupa, polimerna taljevina popunjava kalupnu šupljinu u kojoj se nalazi zrak. Ako taj zrak nema gdje izaći iz kalupne šupljine, stlačuje se sve dok se njegov tlak ne izjednači sa tlakom punjenja šupljine. To se radi jer zaostali tlak u šupljini može uzrokovati pregrijavanje taljevine, nepopunjenost otpresaka te odstupanje dimenzija otpresaka.

Odzračivanje se mora izvesti tako da se propusti samo zrak ali ne i polimerna taljevina. To se postiže malom zračnosti između pojedinih elemenata kalupa, najčešće kroz provrte za vođenje izbacivala.

U pravilu, otvore za odzračivanje bi trebalo postaviti na ono mjesto koje će taljevina posljednje popuniti.

2.3.5. Sustav za temperiranje

Pod pojmom temperiranje podrazumijeva se postizanje određene odgovarajuće temperature u kalupu, bez obzira da li se toplina kalupu dovodi ili odvodi. Sustavom za temperiranje kalupu se dovodi ili odvodi toplina potrebna za postizanje propisane temperature.

Pravilna izmjena topline u kalupu utječe na trajanje i odvijanje ciklusa injekcijskog prešanja. Najčešće se sustav za temperiranje izvodi kao niz ravnih kanala spojenih serijski ili paralelno koji se nalaze na određenoj udaljenosti od kalupne šupljine.

Različitim rasporedom kanala te promjenom protoka ili temperature u pojedinim kanalima moguće je postići ujednačenije temperaturno polje kalupa.

2.3.6. Sustav za vođenje i centriranje

Ovaj sustav kalupa služi za osiguranje točnog nalijevanja jednog dijela kalupa na drugi dio, pritom rabeći različite podsustave. Postoje vanjsko i unutrašnje centriranje.

Unutrašnje centriranje kalupa služi za vođenje i centriranje kalupnih ploča i ostalih elemenata kalupa pri otvaranju i zatvaranju samog kalupa. Vanjsko centriranje postoji radi točnijeg pozicioniranja kalupa na nosače kalupa ubrizgavalice, a izvodi se pomoću prstena za centriranje.

2.3.7. Sustav za vađenje i izbacivanje otpresaka

Zadaća sustava za vađenje otpresaka je otvaranje kalupa te izbacivanje otpreska iz kalupne šupljine, najčešće automatski. Prema načinu djelovanja, podjela je na mehaničke, pneumatske i mješovite sustave za vađenje. Kod kalupa za injekcijsko prešanje polimera najčešće se koriste mehanički sustavi.

Sustavi za vađenje moraju ispuniti određene zahtjeve da bi bili učinkoviti:

- Izbacivanje otpreska bez oštećivanja
- Ostavljanje što manje vidljivih otisaka na otpresku
- Jednoliko vađenje otpreska
- Pravilno postavljeni elementi za vađenje otpresaka
- Pravilno koordinirani elementi sustava za vađenje otpresaka zajedno sa sustavom za temperiranje kalupa

Nakon očvršćivanja otpreska u kalupnoj šupljini, kalup se otvara, te se otpresak vadi iz kalupa. U kalup se ugrađuje sustav izbacivanja koji kontrolirano i ponovljivo automatski izbacuje otpresak iz kalupne šupljine.

Navedeni sustav se najčešće nalazi na pomičnoj strani kalupa. Povrat izbacivačkog sustava se ostvaruje pomoću raznih elemenata, najčešće oprugom, hidraulički ili pomoću određenih izbacivala.

2.3.8. Materijali za izradu kalupa za injekcijsko prešanje polimera

Kalupi za injekcijsko prešanje polimera nastoje se izrađivati se od najkvalitetnijih vrsta materijala. S obzirom na svoje uvjete eksploatacije, zahtjevi koji se stavljaju pred njih su veliki. Velike serije prilikom proizvodnje, što manja potrošnja kalupa, te što veća efikasnost su samo neki od uvjeta koji moraju biti ispunjeni prilikom odabira materijala za izradu kalupa.

Odabir materijala za izradu kalupa se temelji na određenim kriterijima kao što su toplinska obrada kalupne šupljine, vrsta taljevine koja se koristi za ubrizgavanje, broj otpresaka, te dimenzije i oblik otpreska. Glavni cilj postavljanja ovih uvjeta je smanjenje trošenja kalupa tijekom vremena. Kvalitetnim odabirom materijala trošenje kalupa može biti svedeno na minimum.

Prema serijama proizvodnje kalupi se dijele na male i velike serije. Shodno tome i podjela materijala od kojih se izrađuju kalupi također se dijeli u dvije grupe:

Materijali za izradu kalupa koji se primjenjuju u malim serijama su:

- nikal
- bakar
- polimerni materijali
- berilijeva bronca
- litine na osnovi cinka i aluminijske

Materijali za izradu kalupa koji se primjenjuju u velikim serijama su:

- čelični ljevovi
- poboljšani čelici
- prokaljivi čelici
- čelici povišene tvrdoće

3. POLIMERNI KALUPI IZRAĐENI POMOĆU ADITIVNE TEHNOLOGIJE

3.1. Općenito o aditivnoj tehnologiji

Aditivna proizvodnja dio je proizvodnog strojarstva koja se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Proizvodni postupak aditivne tehnologije započinje konstruiranjem trodimenzionalnog oblika računalnim programima za konstruiranje ili digitalnim skeniranjem već postojećeg oblika. Model se zatim pretvara u niz horizontalnih presjeka, koji se aditivnim uređajem za proizvodnju, otiskuju sloj po sloj do konačnog oblika proizvoda.

Tim se postupcima jednako uspješno mogu izraditi prototipovi, kalupi te alati velike preciznosti ali i funkcionalni dijelovi koji su odmah spremni za upotrebu. No brzina izrade, izbor materijala i dimenzije modela zasad su ograničeni.

Ovisno o tehnologiji dobivanja slojeva i upotrijebljenim materijalima, koji mogu biti u krutom, tekućem i praškastom stanju, razvijeno je više postupaka aditivne tehnologije. Najčešće se upotrebljavaju polimerni materijali, kao akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamidi (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani (PUR), epoksidne smole, ali i kompozitni materijali, keramika, čelik, aluminij, titanij i druge lake litine.

Prema primijenjenoj tehnologiji postupci aditivne proizvodnje uobičajeno se razvrstavaju na fotopolimerizaciju (stereolitografija), raspršivanje veziva (trodimenzionalni ispis), raspršivanje materijala (PolyJet postupak), ekstrudiranje materijala (taložno srašćivanje), laminiranje (proizvodnja laminiranih objekata), stapanje praha (selektivno lasersko srašćivanje) te izravno taloženje materijala.

Temeljna značajka postupaka aditivne tehnologije je dodavanje materijala, najčešće sloj-po-sloj, do izrade traženog proizvoda. Takvo načelo proizvodnje omogućuje izradu vrlo komplicirane geometrije koje bi drugim klasičnim postupcima proizvodnje bilo vrlo teško ili gotovo nemoguće načiniti. Dodatna značajka aditivnih postupaka je da se proizvodi izrađuju izravno na opremi za aditivne tehnologije na temelju 3D računalnog modela, bez potrebe za dodatnim obradama.

3.2. Polimerni kalupi izrađeni pomoću aditivne tehnologije

Osim aditivne proizvodnje metalnih kalupa, izrađuju se i polimerni kalupi koji služe za male serije tvorevina, a primjenjuju se kod klasičnih postupaka prerade polimernih tvorevina.

Najzastupljeniji su kalupi za injekcijsko prešanje, dok se o polimernim kalupima za ostale klasične postupke prerade zasad premalo zna.

Proširivanjem izrade kalupa pomoću aditivne tehnologije, odrađen je prvi korak prema neograničenim mogućnostima proizvodnje. Takva proizvodnja omogućuje raznovrsnost materijala, veću proizvodnju i bolju kvalitetu proizvoda.

Povećanjem manevarskog prostora kod konstrukcije proizvoda, razina fleksibilnosti je višestruko bolja, razvojni ciklus proizvoda je pojednostavljen, vrijeme izrade je skraćeno, a troškovi izrade su smanjeni. Valja napomenuti izradu proizvoda prije planiranog vremena, no kao najveća prednost je mogućnost potpuno personalizirane konstrukcije kalupa i to na takav način da stvaranje proizvoda i u najmanjim sitnicama odgovara zahtjevu naručitelja, to jest kupca.

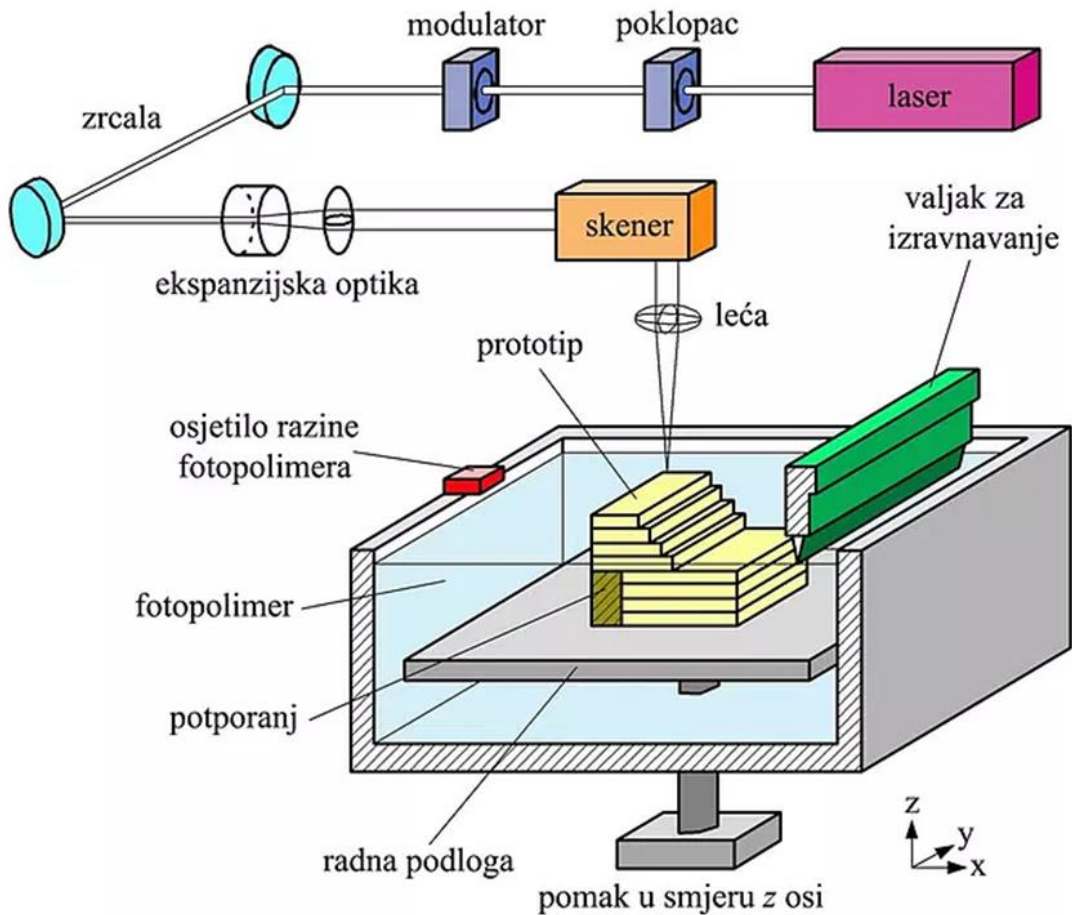
4. STEREOLITOGRAFIJA

Stereolitografija (ili skraćeno SLA postupak) je jedna od najpoznatijih tehnologija aditivne proizvodnje koja stvara čvrste prototipove, uzorke i proizvode iz računalnog nacрта. SLA prvenstveno omogućuje brzu izradu 3D modela i prototipova, gdje se manji dijelovi mogu stvoriti za nekoliko sati. Glavni princip rada se zasniva na fotopolimerizaciji (proces gdje molekule vežu polimer pod utjecajem svjetla), odnosno, sastoji se od printanja fotopolimerne tekućine, koristeći ultraljubičasto zračenje, a postupak se odvija tako da se isprintani slojevi slažu jedan na drugi.

Laser emitira ultraljubičastu svjetlost te osvjetljava slojeve tekućeg polimera zadanog oblika, koji se skrućuje iznad podloge. Radna se podloga zatim spušta za debljinu sloja i laser opet prati presjek objekta koji se ispisuje te se odmah povezuje sa skrućenim dijelom ispod njega. Proizvod se vadi iz tekućeg polimera, a višak polimera ispire se u otapalu. Gotovi dijelovi prolaze kroz proces hlađenja kako bi dobili što bolje očvršnuće.

Stereolitografija zahtjeva korištenje potpornih dijelova prilikom izrade kako ne bi došlo do deformacije tijekom samog postupka jer tijekom printanja ostaci smole mogu ostati na dijelovima predmeta, što je nužno očistiti nakon završetka. U slučaju da se dijelovi ne očiste, pri završnoj obradi dolazi do deformacije i oštećenja predmeta.

Ovaj oblik aditivne tehnologije se najčešće koristi kod proizvodnje šupljih dijelova s debljim stijenkama, posebice kod proizvodnje kalupa za lijevanje metala ili nekih drugih materijala. Neke od prednosti stereolitografije su kombinacija brzine, preciznosti i kvalitete završne površine. Najveći nedostatak ovakve vrste proizvodnje je visoka cijena izrade i održavanja.



Slika 3. Komponentne SLA 3D uređaja [20]

Postoje dvije vrste SLA uređaja, a glavna razlika među njima je orijentacija predmeta pri ispisu. Razlikujemo tzv. "bottom up" i "top down" SLA 3D "pisače.

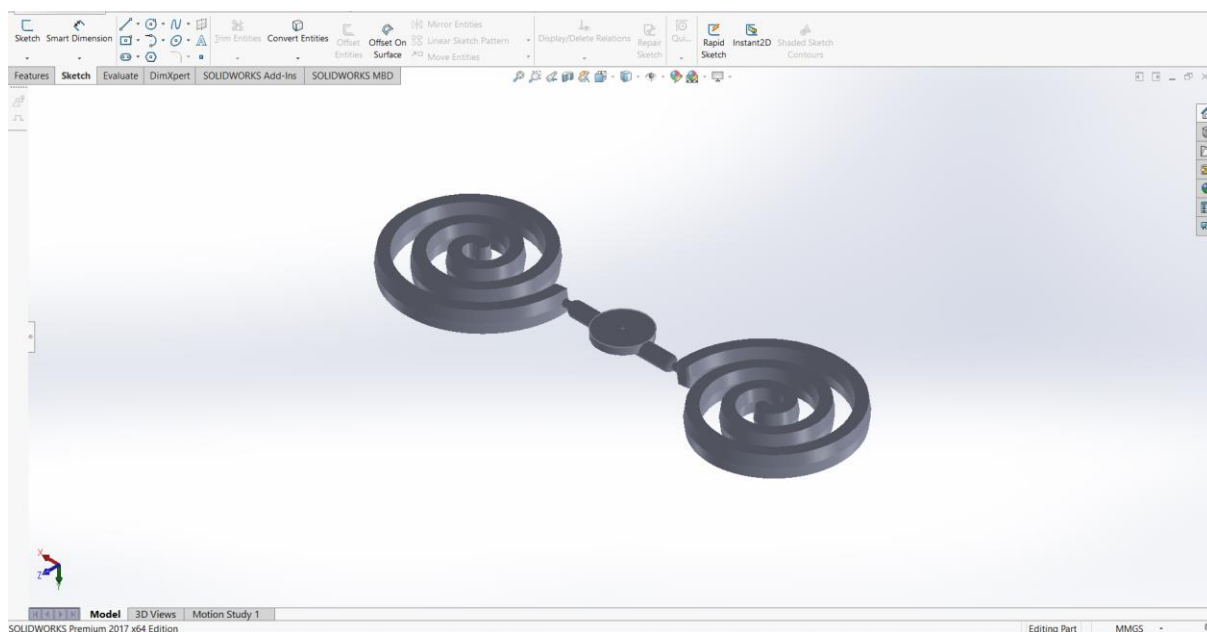
Za razliku od "bottom up" uređaja gdje se platforma za ispis izdiže iz posude sa viskoznom tekućinom, kod "top down" uređaja platforma za ispis postepeno uranja u posudu sa tekućinom. Pri samom početku isписа, platforma za ispis se nalazi na samom vrhu posude pri čemu ju jedan tanki sloj tekućine prekriva za visinu budućeg sloja.

Izvor svjetlosti potom započinje sa polimerizacijom prvog sloja, a kada završi, platforma za ispis se uranja u posudu za još jedan sloj. Zatim započinje polimerizacija drugog sloja te se taj proces ponavlja do završetka isписа. Kada ispis završi, željeni model biti će potpuno uronjen u tekućinu.

5. KALUPI ZA ISPITIVANJE POPUNJAVANJA POLIMERNE MASE

Zadatak rada bio je izvršiti simulaciju injekcijskog prešanja na temelju modela Arhimedove spirale, čije su dimenzije i oblik određene proizvoljno.

Pomoću računalnog softvera "Solidworks" (Slika 4.) napravljen je 3D model Arhimedove spirale koji se ubacuje u program za simulaciju injekcijskog prešanja pod nazivom "Moldex3D".



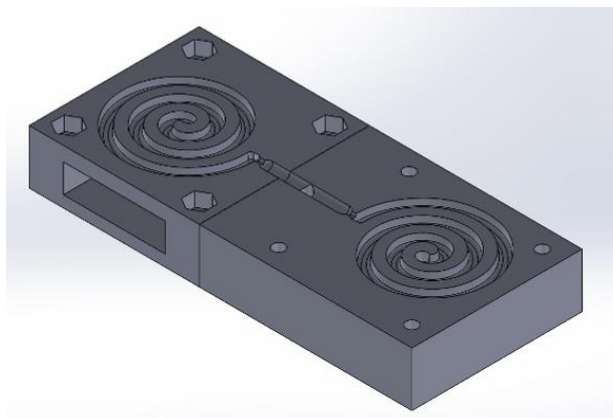
Slika 4. Oblik Arhimedovih spirala u programu Solidworks

Moldex3D je specijalizirani programski paket tvrtke "CoreTech System" koji služi za simulaciju injekcijskog prešanja. Podržava gotovo sve vrste prešanja polimera. Više detalja i opis rada na programu bit će navedeno u šestom poglavlju.

5.1. Izrada kalupa 1

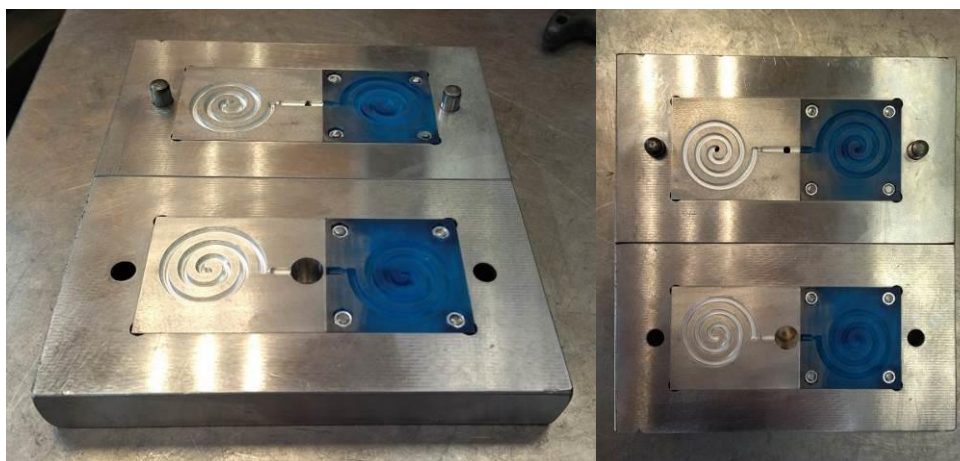
Za ispitivanje popunjavanja kalupa polimernom masom korišten je alat koji se sastoji od dvije skupine kalupa, polimernog kalupa načinjenog postupkom aditivne tehnologije te od aluminijskog kalupa, koji zajedno zatvaraju već spomenutu Arhimedovu spiralu namijenjenu za injekcijsko prešanje.

Slika 5. prikazuje računalni presjek donje dvije polovice polimernog i aluminijskog kalupa za prvi eksperiment injekcijskog prešanja. Polimerni kalup je konstruiran sa unutarnjom šupljinom radi kraćeg vremena izrade i uštede materijala. Dužina obje polovice kalupa u sklopu alata je 135 mm, širina je 60 mm, dok je visina 38 mm.



Slika 5. Presjek kalupa za ispitivanje popunjavanja polimerne mase

Aluminijski i polimerni kalup su zajedno postavljeni u željeznu ploču što prikazuje slika 6. jer, kako će se vidjeti u osmom poglavlju, stroj za injekcijsko prešanje polimera radi sa iznimno visokim temperaturama i velikim silama brizganja, pa željezna ploča služi kao svojevrsno očvršćenje i dodatna sigurnost.

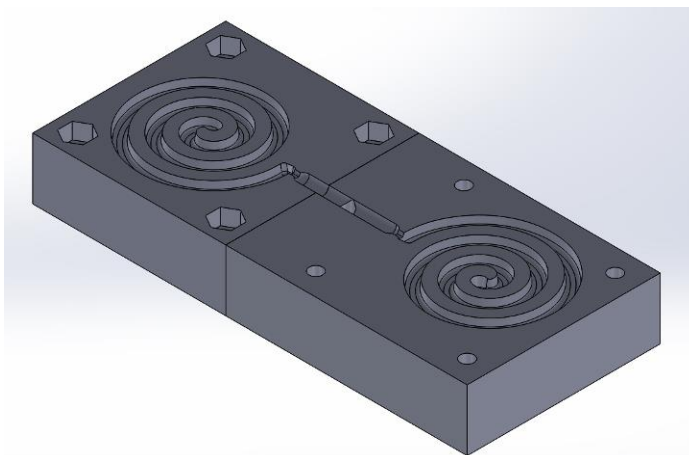


Slika 6. Oblik alata za ispitivanje popunjavanja polimerne mase

5.2. Izrada kalupa 2

U ovom primjeru izrade kalupa radilo se sa punim oblikom kalupa aditivne tehnologije. Svi drugi parametri, dimenzije te aluminijski kalupi ostali su nepromijenjeni. (Slika 7.)

Kalupi prikazani na slici su se koristili za drugi i treći postupak injekcijskog prešanja Arhimedove spirale.



Slika 7. Presjek punog kalupa za drugi i treće ispitivanje popunjavanja polimerne mase

Slike 8. i 9. prikazuju izgled kalupa aditivne tehnologije za drugi i treći pokušaj injekcijskog prešanja u fizičkom obliku. Svojstva polimernog kalupa za drugi i treći eksperiment injekcijskog prešanja su prikazani i opisani u poglavlju 7.2. Slika 8. prikazuje alat koji ide na nepomičnu stranu kalupa, dok slika 9. prikazuje alat koji ide na pomičnu stranu kalupa.



Slika 8. Nepomični alat sa polimernim kalupom za drugi i treći postupak injekcijskog prešanja

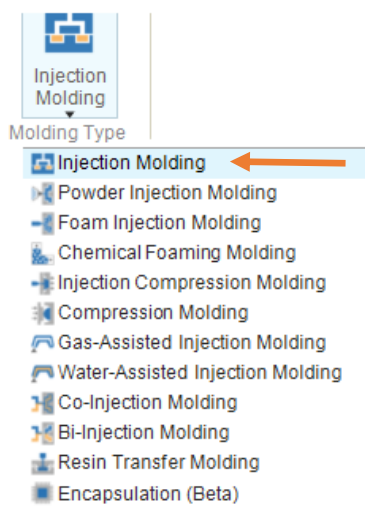


Slika 9. Pomični alat sa polimernim kalupom za drugi i treći postupak injekcijskog prešanja

6. SIMULACIJA INJEKCIJSKOG PREŠANJA U PROGRAMU MOLDEX3D

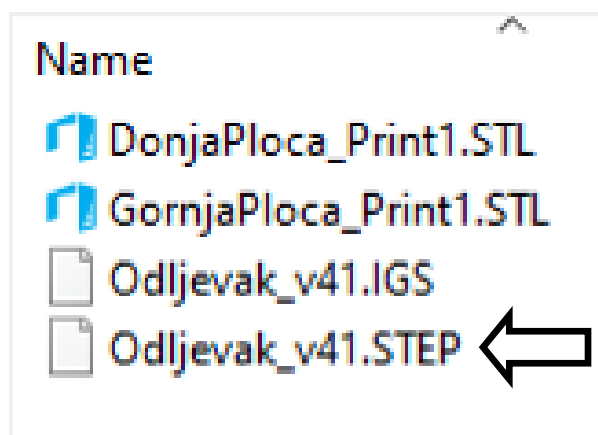
6.1. Općenito o programu

Proces simulacije u Moldexu3D započinje otvaranjem samog programa i odabirom vrste prešanja polimera koja nam je potrebna za simulaciju što prikazuje slika 10. Odabire se "Injection Molding", odnosno injekcijsko prešanje.



Slika 10. Vrste prešanja u programu Moldex3D

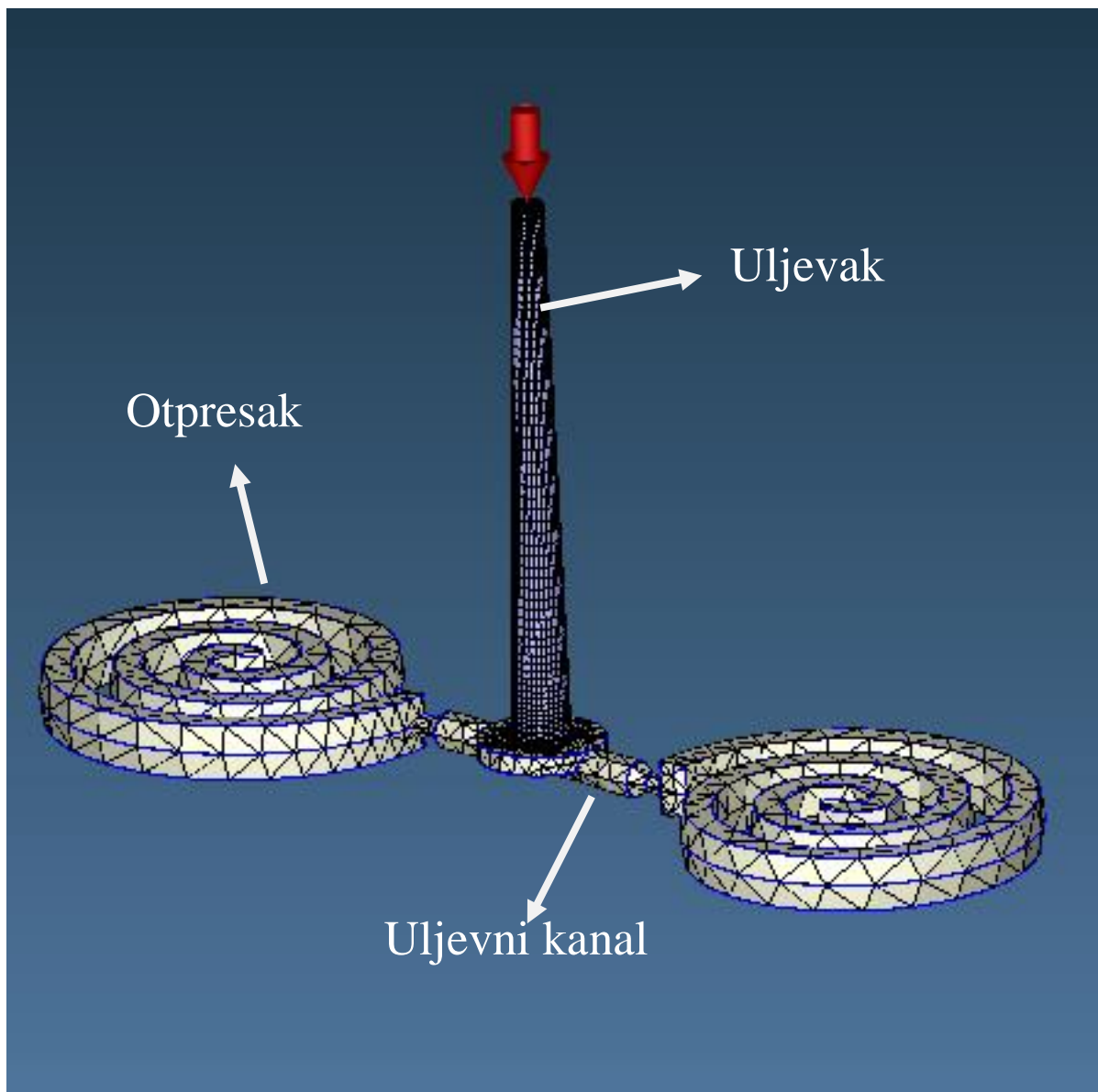
Slika 11. prikazuje format datoteke koji je potreban za ispravno prepoznavanje i otvaranje datoteke modela kalupa u Moldexu3D. Najčešće vrste datoteka za simulaciju injekcijskog prešanja su .step i .igs vrste datoteka.



Slika 11. Odabir formata datoteke

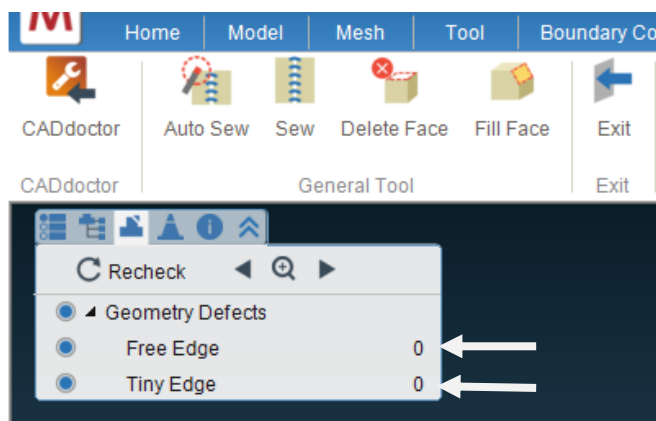
Odabirom i otvaranjem ispravne vrste datoteke, u ovom slučaju .step vrste datoteke, program nas stavlja u naredbu "Model" gdje započinje konstrukcija dijela na kojem će se provesti simulacija injekcijskog prešanja.

Radi se o već spomenutom modelu Arhimedove spirale (slika 12.) u koju se ubrizgava materijal i oko koje je konstruiran kalup prikazan u petom poglavlju.



Slika 12. Otpresak sa uljevnim sustavom – Arhimedova spirala u Moldexu3D

Naredbom "Check geometry" (Slika 13.) program provjerava i pretražuje bilo kakve nesavršenosti ili nepravilnosti, odnosno geometrijske defekte, koji su mogli nastati konstrukcijom modela. Pokazano je da je model u redu, tj. da nema nikakvih nepravilnosti te da se može nastaviti dalje sa računalnom simulacijom.



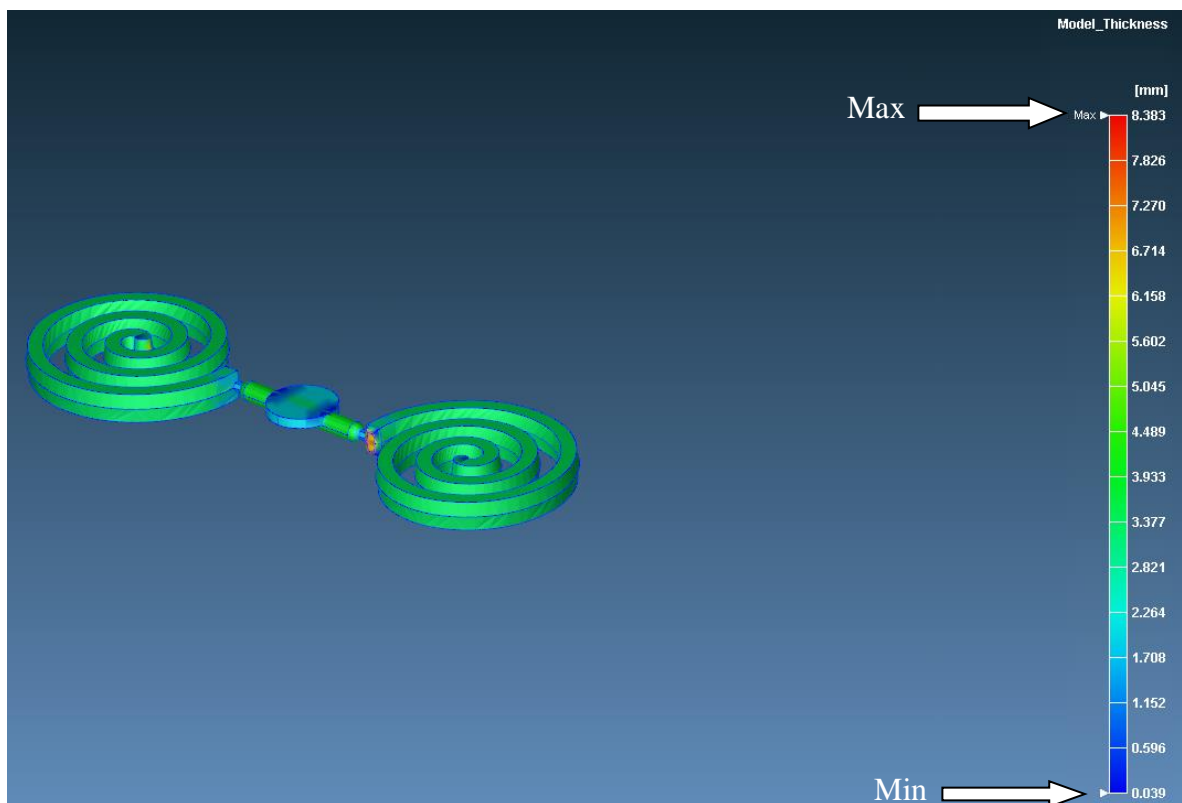
Slika 13. Naredba "Check geometry" za provjeru nepravilnosti modela

Dalje slijedi definiranje modela spirale u naredbi "Attribute" gdje se spirala definira kao jedan dio, odnosno "Part". (Slika 14.)



Slika 14. Definiranje spirale u naredbi "Attribute"

Naredbom "Model Thickness" (Slika 15.) dobivamo dimenziju Arhimedove spirale te slikovit prikaz utjecaja polimera nakon ubrizgavanja. Vidljivo je da prevladava zelena boja, što znači da je otpresak pravilno konstruiran. Minimalna debljina modela spirale iznosi 0,039 mm, dok maksimalna iznosi 8,383 mm.



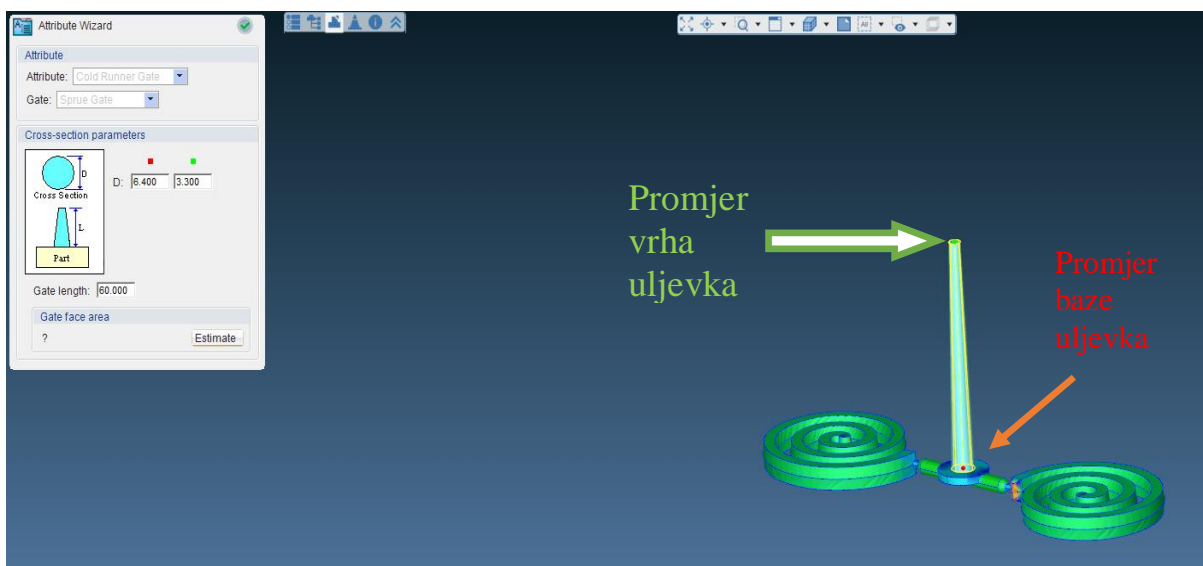
Slika 15. Prikaz naredbe "Model Thickness"

6.2. Uljevni sustav

Uljevni sustav sastoji se od uljevka i uljevnog kanala a konstrukcija ta dva elementa vrši se naredbom "Gate" gdje se odabiru određeni parametri za uspješno ubrizgavanje polimera u model spirale. (Slika 16.)

Ti parametri uključuju oblik i dimenzije uljevnog sustava koji u ovom slučaju iznose 60 mm za dužinu uljevka te 6.4 mm za promjer baze uljevka i 3.3 mm za promjer vrha uljevka.

Treba napomenuti da je uljevni sustav konstruiran na način da je smješten u aluminijskom dijelu kalupa.



Slika 16. Prikaz konstrukcije uljevnog sustava

6.3. Mreža

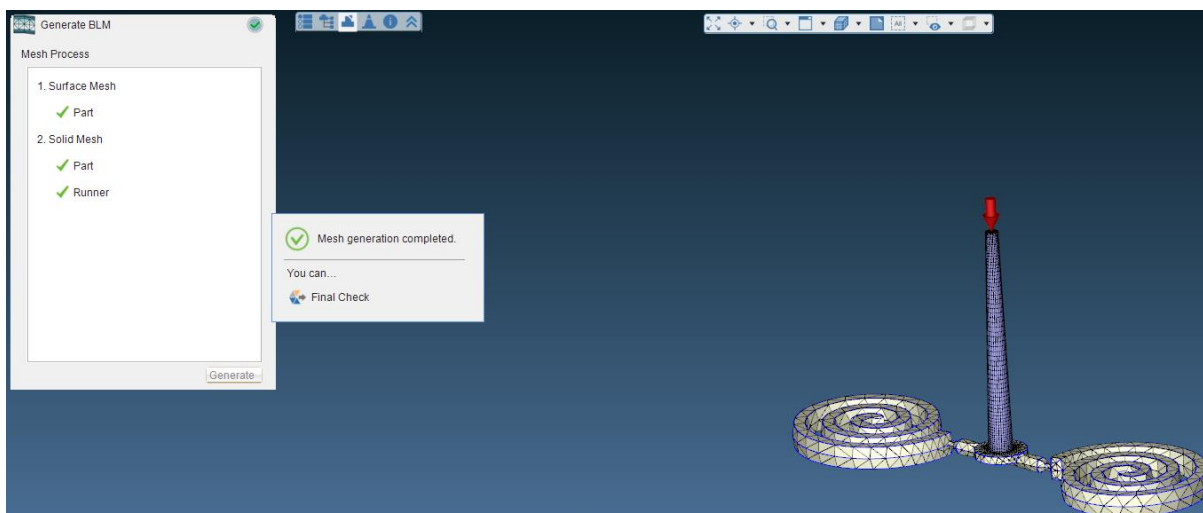
Moldex3D u svom radu koristi tzv. elemente mreže koji se nalaze na površini modela nad kojim se vrši simulacija. Elementi mreže moraju biti odgovarajuće veličine i oblika u skladu sa karakteristikama koje opisuju, željenim rezultatima te veličinama koje se proračunavaju. Povrh toga, postoje obrasci kojima se program vodi prilikom diskretizacije s obzirom na primjenu numeričke metode. Tako se za injekcijsko prešanje često koristi "BLM" obrazac (engl. *Boundary Layer Mesh*) [1]

Takva vrsta obrasca koristi elemente u obliku trostranih prizmi za izradu mreže na površini otpreska. Ti elementi se pravilno slažu jedan na drugi u stupce. Moldex3D dopušta do pet elemenata u stupcu gdje svi elementi na istoj razini tvore jedan sloj elemenata. Na sredini sastavljanja gornjeg i donjeg sloja ostavlja se mali prostor koji se, ukoliko mreže nisu kompatibilne, povezuje klasičnom tetraedarskom mrežom koja daje znatno nižu kvalitetu rezultata. Niža kvaliteta mreže po sredini presjeka pri simuliranju injekcijskog prešanja ne smeta ukoliko se dijelovi presjeka gdje postoji najveća razlika veličine stanja, odnosno tamo gdje se događaju najveće promjene, pokriju sa kvalitetnijim prizmatičnim elementima. [1]

Elementi u obliku četverostrane prizme imaju još veću kvalitetu od elemenata u obliku trostrane prizme, no površine otpresaka je vrlo teško opisati na takav način pa se vrlo rijetko koriste za diskretizaciju otpresaka. Takvi elementi se mogu posložiti u unaprijed određene konfiguracije za određene oblike poprečnih presjeka. [1]

Konfiguracije postoje za najčešće oblike poprečnih presjeka uljavnog sustava i kanala za temperiranje pa kad god je to moguće te kanale je poželjno prvo zadati linijom pa tek onda odabrati poprečni presjek. [1]

Slika 17. prikazuje sustav mreže u slučaju Arhimedove spirale. Moldex3D u tom slučaju obuhvaća oblik spirale te uljevni sustav kojeg čine uljevak i uljevni kanal te tako automatski provjerava i osigurava kvalitetu sustava mreže otpreska za što bolju točnost analize.



Slika 17. "Mesh" naredba otpreska Arhimedove spirale

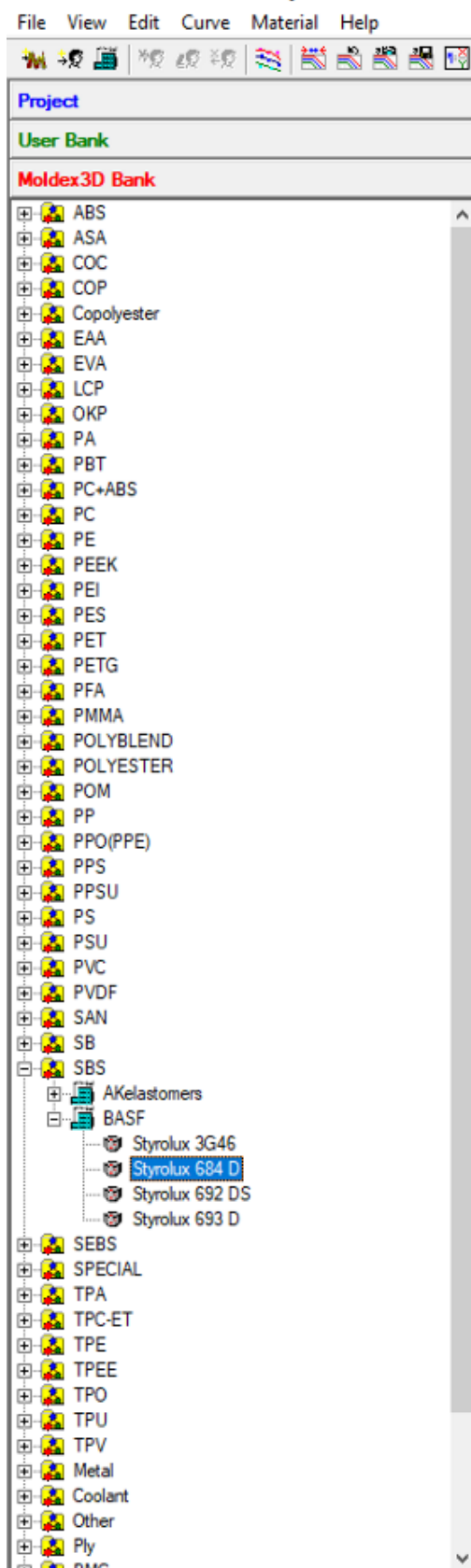
6.4. Odabir materijala

Nakon određivanja dimenzija kalupa, sljedeći korak je odabir materijala koji se ubrizgava u samu spiralu. U dijelu programa za simulaciju injekcijskog prešanja postoji katalog za odabir materijala pod nazivom "Moldex3D Material Wizard" što prikazuje slika 18.

"Material Wizard" u svojoj bazi podataka posjeduje veliki broj vrsta materijala koji se koriste u raznim industrijama, no najveći fokus je stavljen na polimere i polimerne materijale. Uz to, katalog posjeduje i razne korisne informacije koje svaki materijal veže uz sebe.

Za simulacijski proces injekcijskog prešanja Arhimedove spirale odabran je "Styrolux 684 D" proizvođača BASF. Radi se o prozirnog stiren-butadien kopolimeru (engl. *Styrene-Butadiene Copolymer*) koji se koristi za injekcijsko prešanje otpresaka sa povišenim svojstvom čvrstoće.

Prema Moldexu3D i prema svojstvima proizvođača materijala temperatura taljevine materijala iznosi 230° C, dok pretpostavljena temperatura kalupa prema programskoj analizi iznosi 50° C.



Slika 18. Odabir materijala za popunjavanje kalupa Arhimedove spirale

6.5. Analiza simulacije

Svaka analiza procesa injekcijskog prešanja započinje odabirom one vrste simulacije koja nam je u tom trenutku potrebna. Za model Arhimedove spirale odabrane su simulacije punjenja, odnosno ubrizgavanja (engl. *Filling*), te faze naknadnog tlaka (engl. *Packing*) što prikazuje slika 19.

2022-03-25-1	MDXProject20220325	Finished		00:07:32
001-Filling	MDXProject20220325	Finished		00:04:06
002-Packing	MDXProject20220325	Finished		00:03:25
003-Project Comp	MDXProject20220325	Finished		00:00:01

Slika 19. Faze analize ciklusa injekcijskog prešanja kalupa Arhimedove spirale

Sukladno tome dobiveni su rezultati iz svake navedene grupe za analizu. Simulacija je trajala 7 minuta i 32 sekunde i dala je sljedeće rezultate:

U tablici na slici 20. vidimo osnovne vrste rezultata poput dimenzija spirale i kalupa, vrste upotrijebljenog materijala, ali i vremena trajanja simulacije te iznose temperatura kod pojedinih faza simulacije.

Case	
Project Name	MDXProject20220325
Run ID	1
Remark	
Model Details	
Mesh Type	Solid
Solid Mesh Element Count	24,906
Part	9,898
Cold Runner	15,008
Surface Mesh Element Count	1,416
Part	1,416
Dimension	(mm)
Part	123.41x6.04x48.11
Volume	(cc)
Part	9.16
Cold Runner	1.14
Material	
Part	SBS_Styrolux684D.mtr
Temperature	°C
Freeze	99.850
Process Condition	
Time	sec
Filling	0.510
Packing	4.900
Cooling	13.700
Mold Open	5.000
Cycle	24.110
Temperature	°C
Melt	230.000
Mold	50.000
Ejection	79.850
Air	25.000
VP Switch-Over	MPa
By Injection Pressure	250.000

Slika 20. Rezultati analize

6.6. Vrijeme trajanja ciklusa injekcijskog prešanja

Ciklus injekcijskog prešanja, t_c , se sastoji od vremena hlađenja otpreska, t_h , te od pomoćnih vremena trajanja procesa, t_p . U vrijeme hlađenja otpreska ulaze faze ubrizgavanja, naknadnog tlaka, plastificiranja i odmicanja mlaznice, te hlađenje i dopunsko hlađenje otpreska.

Pod pomoćna vremena ubrajamo fazu zatvaranja kalupa, približavanje mlaznice, otvaranje kalupa i vađenje otpreska te fazu posluživanja otvorenog kalupa.

U dijagramu na slici 21. vidi se općenit prikaz trajanja jednog ciklusa injekcijskog prešanja:



Slika 21. Dijagram ciklusa injekcijskog prešanja [21]

Na primjeru Arhimedove spirale možemo točno odrediti vrijeme trajanja procesa injekcijskog prešanja u sekundama:

$$t_c = t_h + t_p \quad (1)$$

gdje je:

t_c – jedan vremenski ciklus injekcijskog prešanja

$$t_h = \text{ubrizgavanje} + \text{naknadni tlak} + \text{hlađenje} = 0.51 \text{ s} + 4.9 \text{ s} + 13.7 \text{ s} = 19.11 \text{ s}$$

$$t_p = 5 \text{ s} \text{ (} t_p \text{ – pomoćna vremena procesa injekcijskog prešanja)}$$

$$t_c = t_h + t_p = \mathbf{24.11 \text{ s}}$$

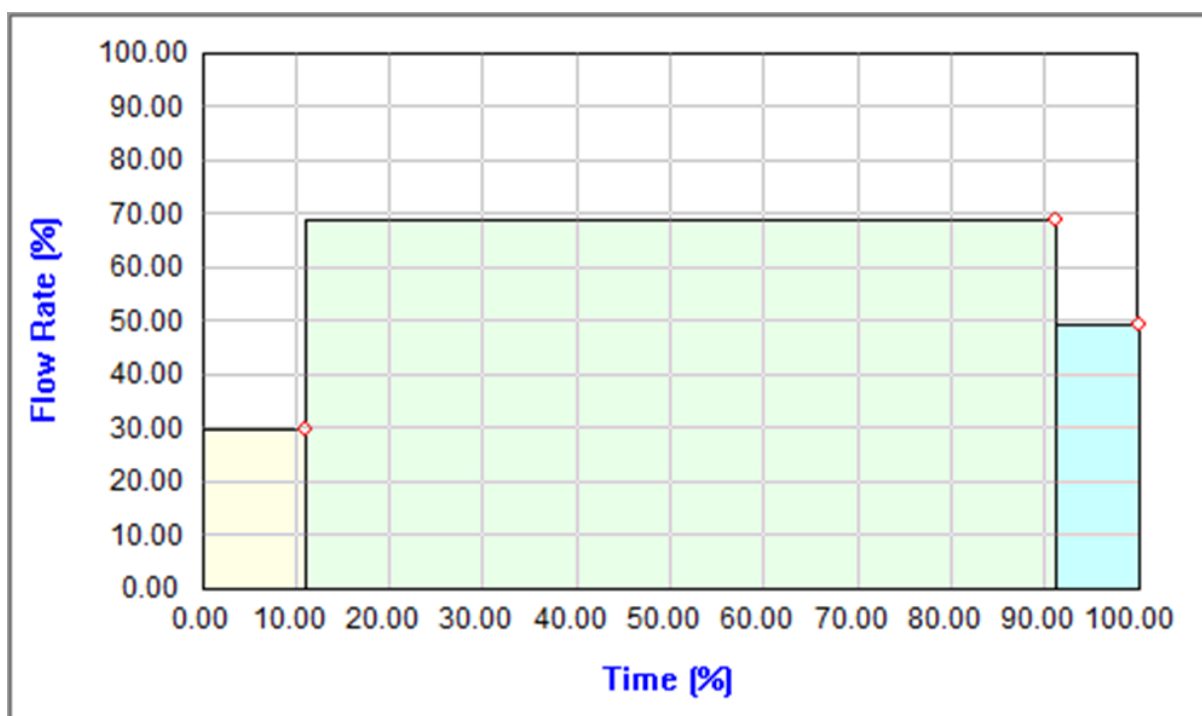
6.7. Procesi simulacije

Programski paket Moldex3D u svom radu detaljno prikazuje procese analize simulacije u formi dijagrama. Kao što je već pojašnjeno u poglavlju 6.5., za slučaj injekcijskog prešanja Arhimedovih spirala gledaju se samo dvije faze, faza ubrizgavanja te faza naknadnog tlaka:

6.7.1. Faza ubrizgavanja

Slika 22. prikazuje dijagram kretanja rastaljenog polimera kroz ukupno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. Dijagram je podijeljen u tri dijela koja opisuju popunjavanje kalupne šupljine Arhimedovih spirala.

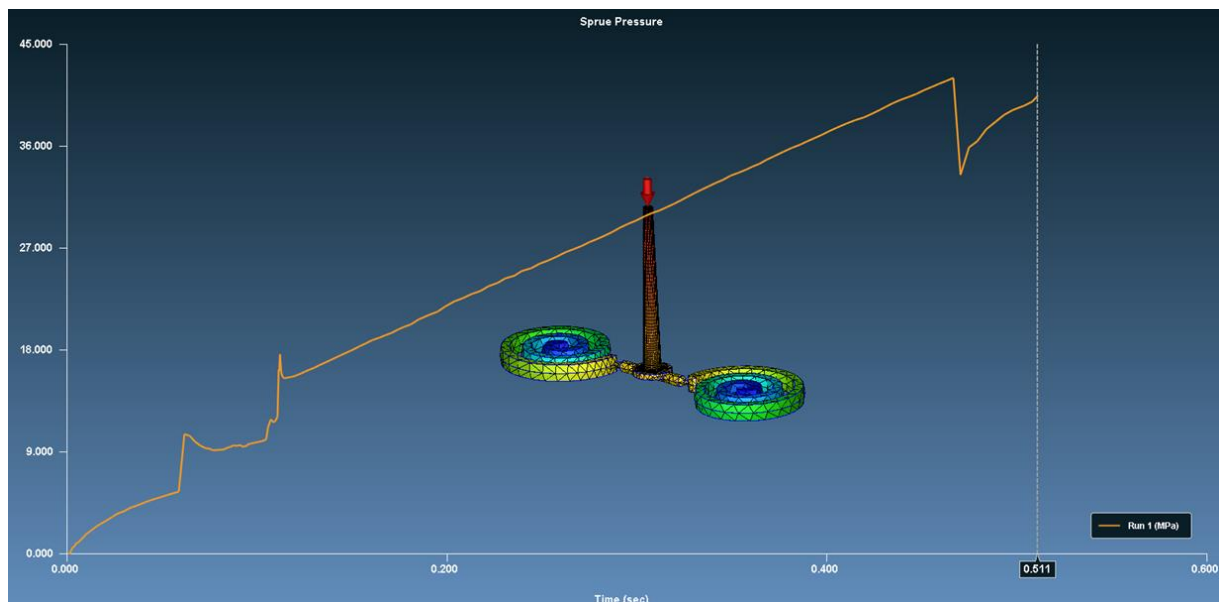
Prvi dio je popunjavanje 30% kalupne šupljine za 11,06% vremena faze ubrizgavanja. Drugo popunjavanje iznosi 69,3% u 91,11% vremena ubrizgavanja. Naposljetku, u 100% vremena, odnosno u preostalih 8,89% popunjavanja u fazi ubrizgavanja kalupna šupljina se popuni za 49.5%.



Section		Section-1	Section-2	Section-3
Time (%)	0	11.06	91.11	100
Flow Rate (%)	30	30	69.3	49.5

Slika 22. Faza ubrizgavanja polimerne taljevine u jedinici vremena

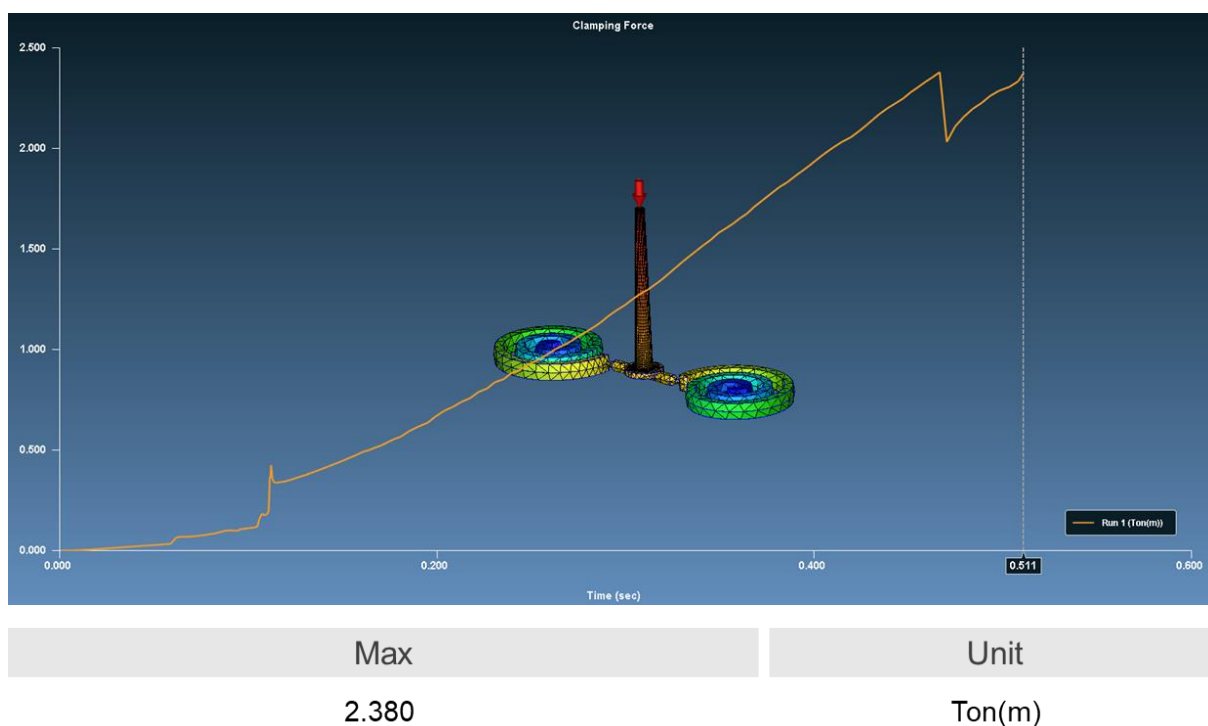
Slika 23. opisuje kretanje vrijednosti tlaka prisutnog u uljevku u vremenu popunjavanja kalupne šupljine Arhimedovih spirala. Najveća izmjerena vrijednost tlaka u uljevku u fazi ubrizgavanja iznosi 42,04 Mpa.



Max	Unit
42.044	MPa

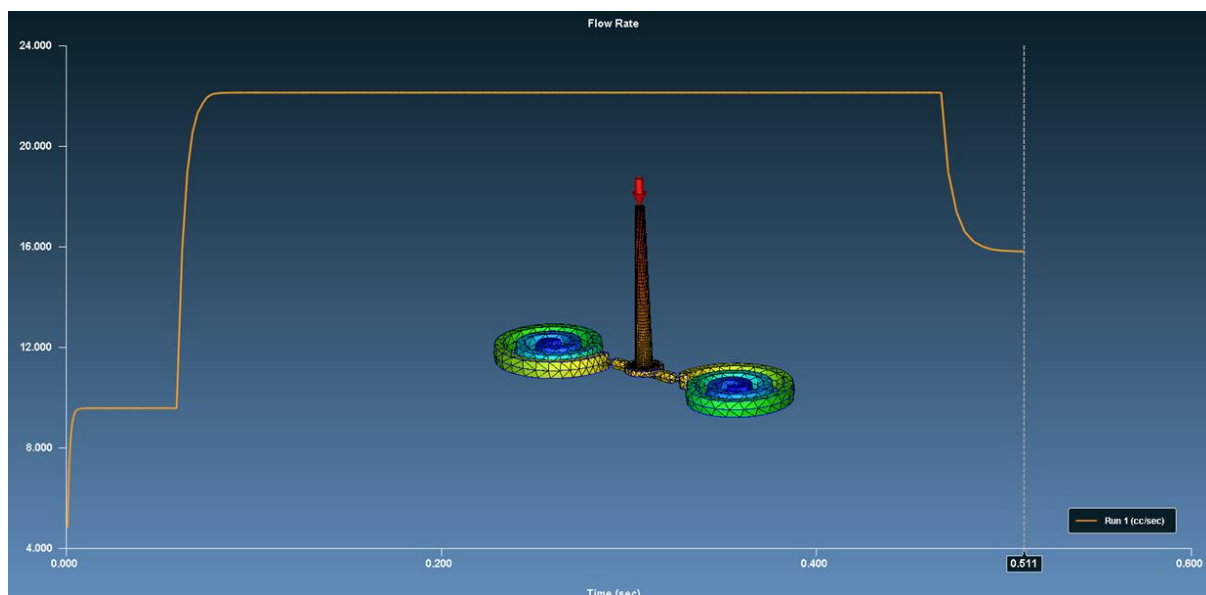
Slika 23. Tlak uljevka kod ubrizgavanja taljevine polimernog materijala

Na slici 24. je vidljivo kretanje grafa koji opisuje maksimalnu vrijednost zatvaranja kalupa pri fazi ubrizgavanja koja iznosi 2,38 tone.



Slika 24. Sila zatvaranja kalupa

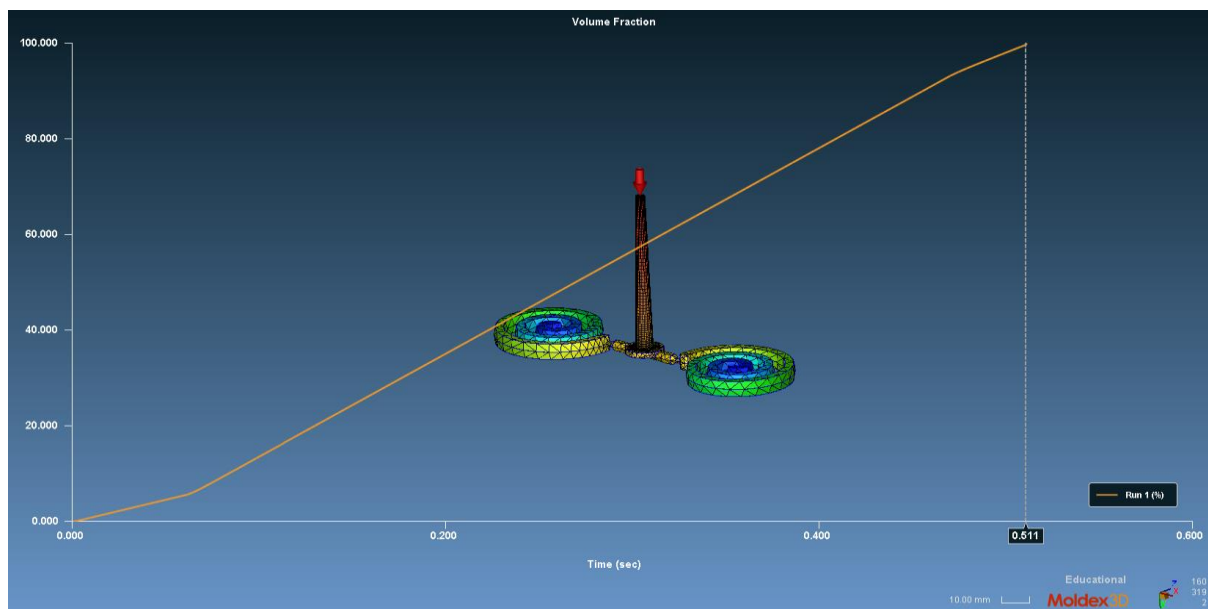
Slika 25. opisuje kretanje volumena rastaljenog polimernog materijala u kalupnoj šupljini Arhimedovih spirala u vremenu ciklusa injekcijskog prešanja od 0,511 sekunde. Maksimalna vrijednost u fazi ubrizgavanja je 22,141 cm³/s.



Max	Unit
22.141	cc/sec

Slika 25. Tijek ubrizgavanja taljevine polimernog materijala

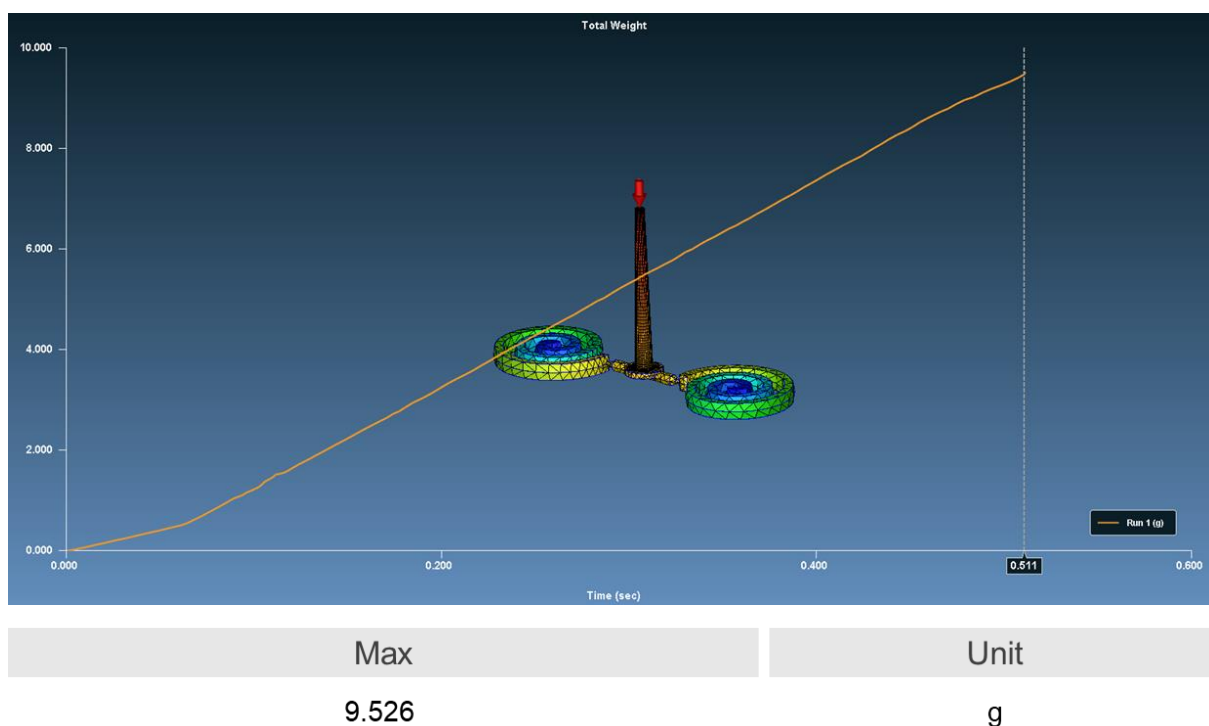
Slika 26. opisuje tok volumena rastaljenog polimernog materijala u fazi ubrizgavanja u vremenu ciklusa injekcijskog prešanja od 0,511 sekunde. Vidljivo je da se polimerna taljevina kreće jednolično.



Max	Unit
100.000	%

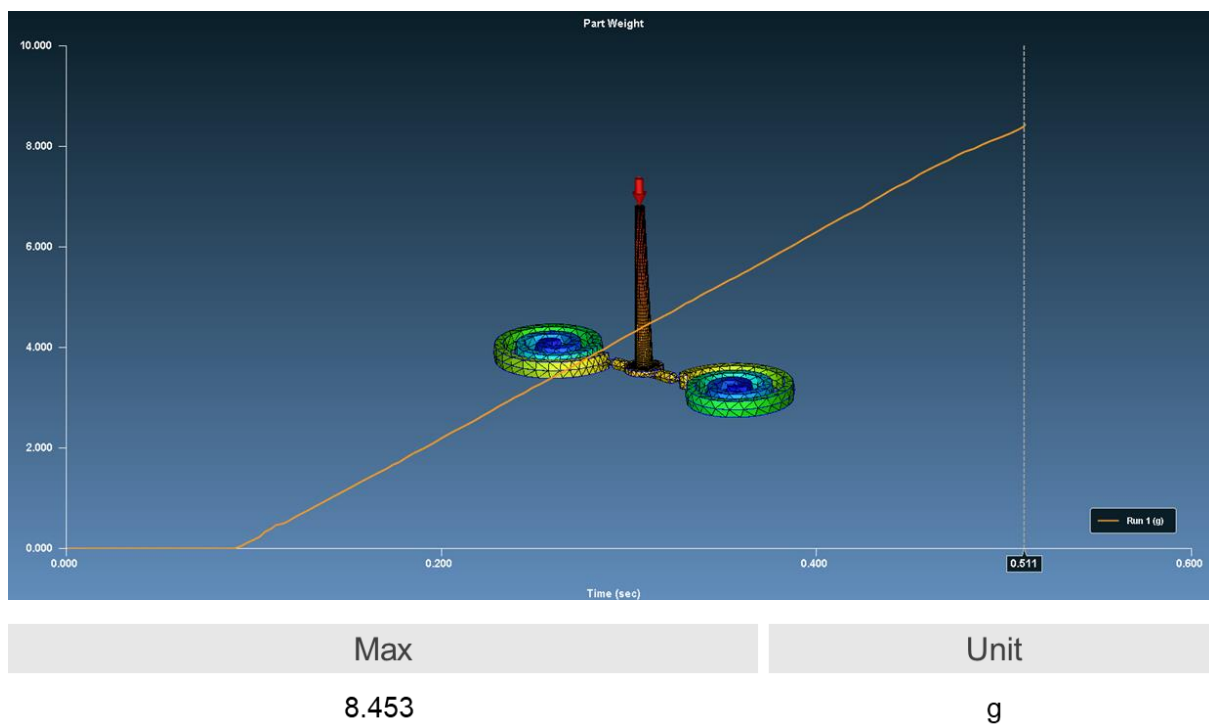
Slika 26. Prikaz toka volumena u ciklusu prešanja

Slika 27. prikazuje ukupnu masu otpreska u fazi ubrizgavanja zajedno sa uljevkom i uljevnim kanalom koja iznosi 9,526 grama.



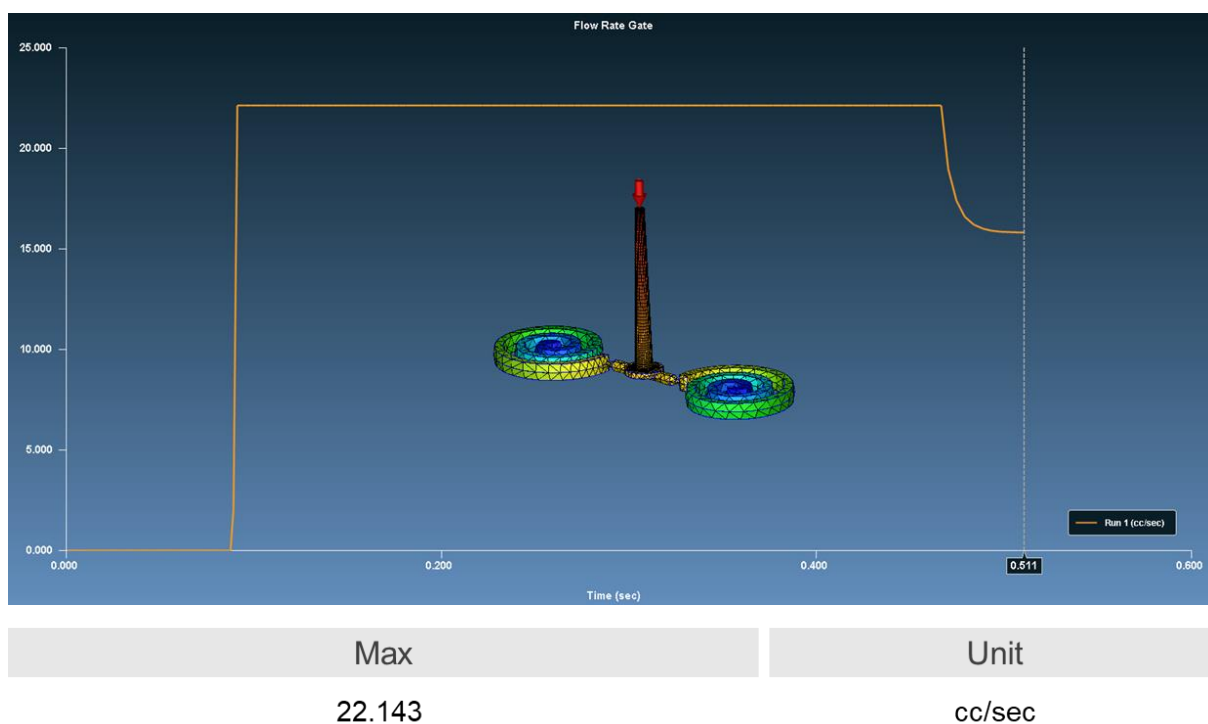
Slika 27. Masa otpreska s uljevkom kod faze ubrizgavanja

Slika 28. prikazuje masu Arhimedovih spirala u fazi ubrizgavanja, bez uljavnog sustava, koja iznosi 8,453 grama.



Slika 28. Masa Arhimedovih spirala kod faze ubrizgavanja

Slika 29. prikazuje tok volumena rastaljenog polimernog materijala kroz uljevak u fazi ubrizgavanja u vremenu ciklusa injekcijskog prešanja od 0,511 sekunde.

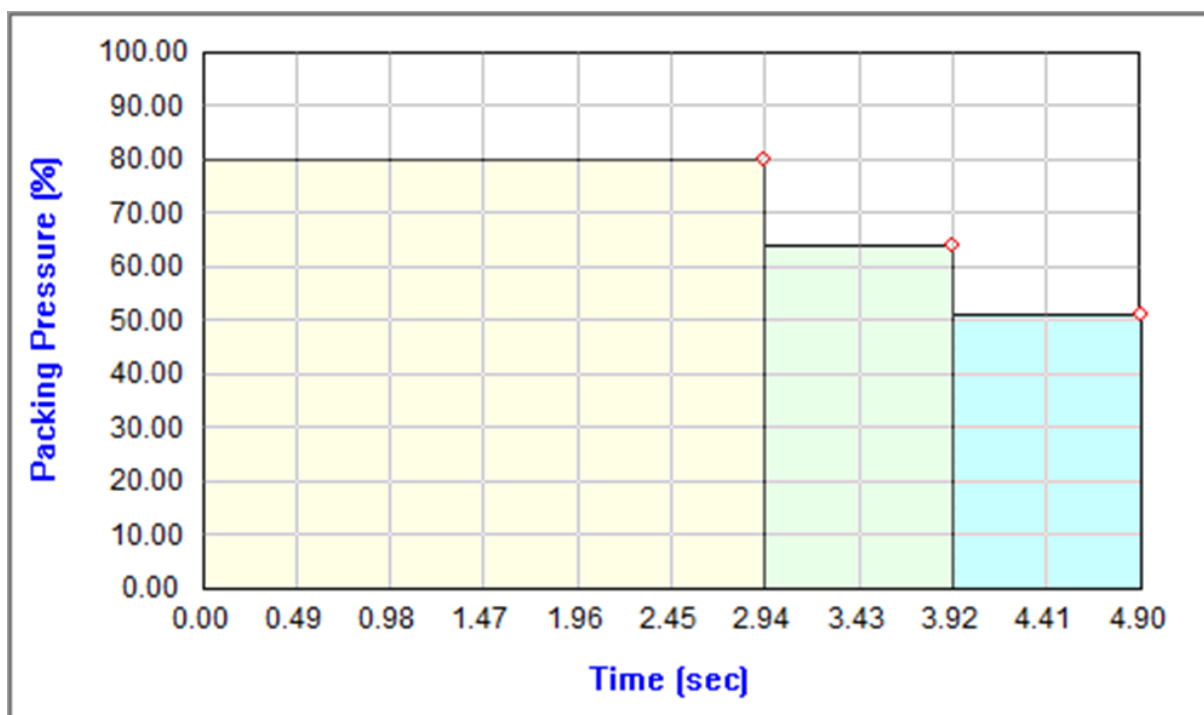


Slika 29. Tijek ubrizgavanja taljevine polimernog materijala kroz uljevak

6.7.2. Faza naknadnog tlaka

Slika 30. prikazuje ciklus faze naknadnog tlaka u procesu injekcijskog prešanja Arhimedove spirale. Faza traje 4,9 sekunde. Dijagram je podijeljen u tri dijela koji opisuju postotak tlaka u periodu od 4,9 sekunde koliko traje sama faza naknadnog tlaka.

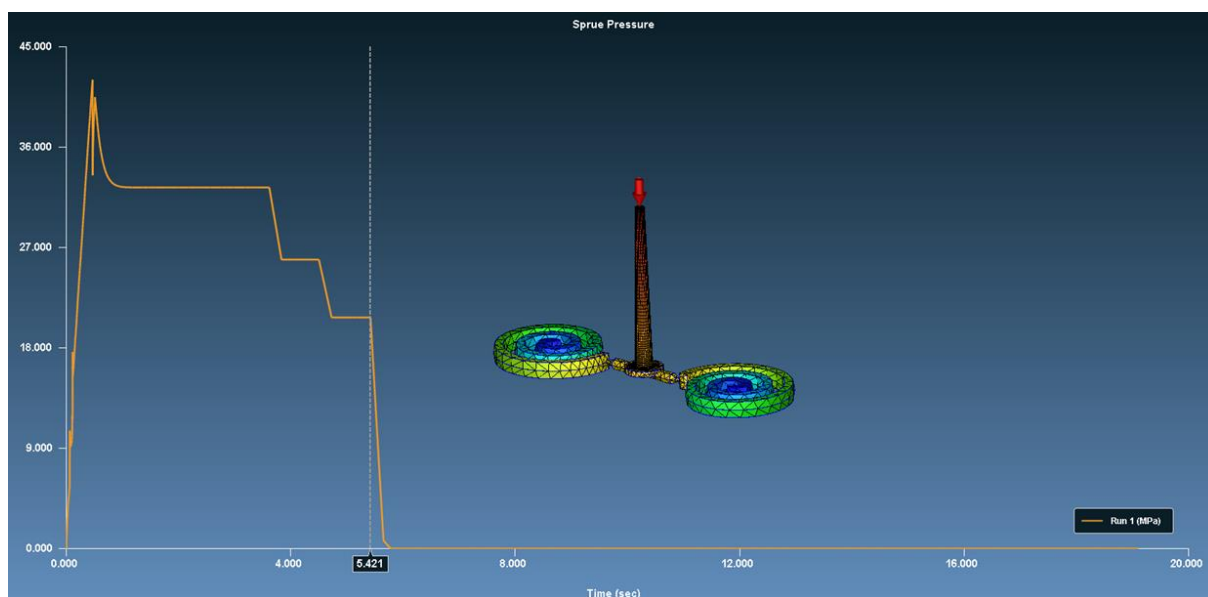
U prvom dijelu faze pad tlaka se kreće od 80% do 64%. U drugom dijelu pad tlaka je sa 64% na 51,2% gdje se i zadržava do završetka faze.



Section		Section-1	Section-2	Section-3
Time (sec)	0	2.94	3.92	4.9
Packing Pressure (%)	80	80	64	51.2

Slika 30. Faza naknadnog tlaka u jedinici vremena

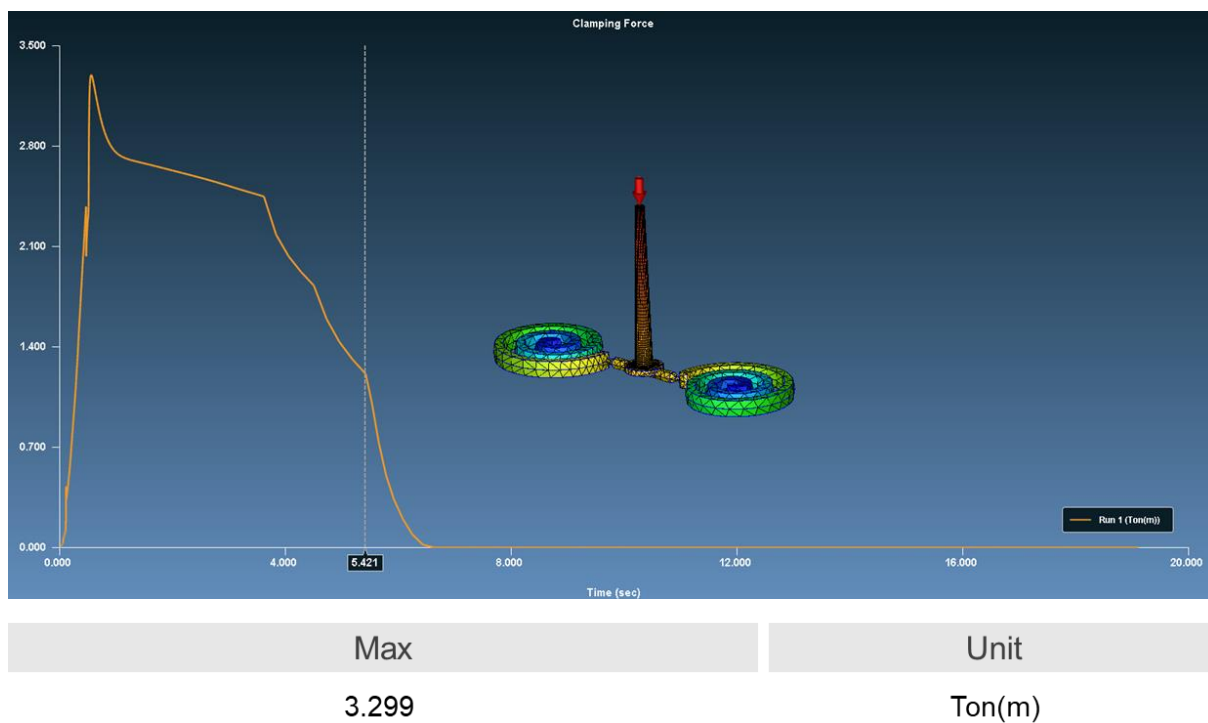
Slika 31. opisuje kretanje vrijednosti tlaka prisutnog u uljevku u vremenu faze naknadnog tlaka od 5,421 sekunde. Najveća izmjerena vrijednost tlaka u uljevku u fazi naknadnog tlaka iznosi 42,04 Mpa.



Max	Unit
42.044	MPa

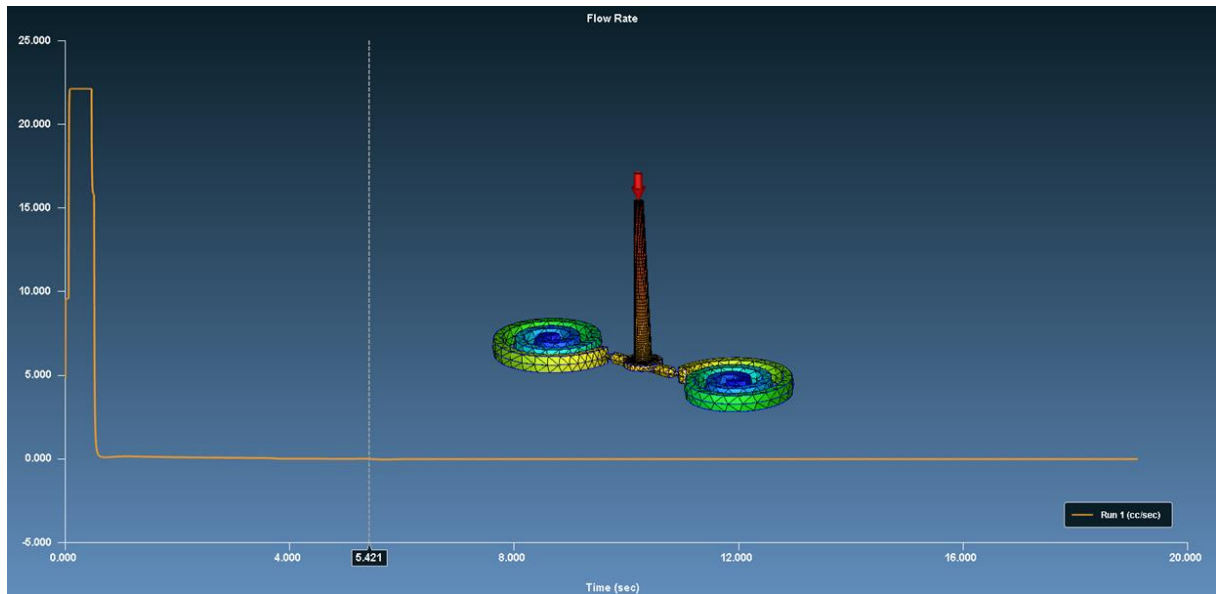
Slika 31. Tlak uljevka kod faze naknadnog tlaka

Na slici 32. je vidljivo kretanje grafa koji opisuje maksimalnu vrijednost zatvaranja kalupa kod faze naknadnog tlaka koja iznosi 2,38 tone pri vremenu od 5,421 sekunde.



Slika 32. Sila zatvaranja kalupa kod faze naknadnog tlaka

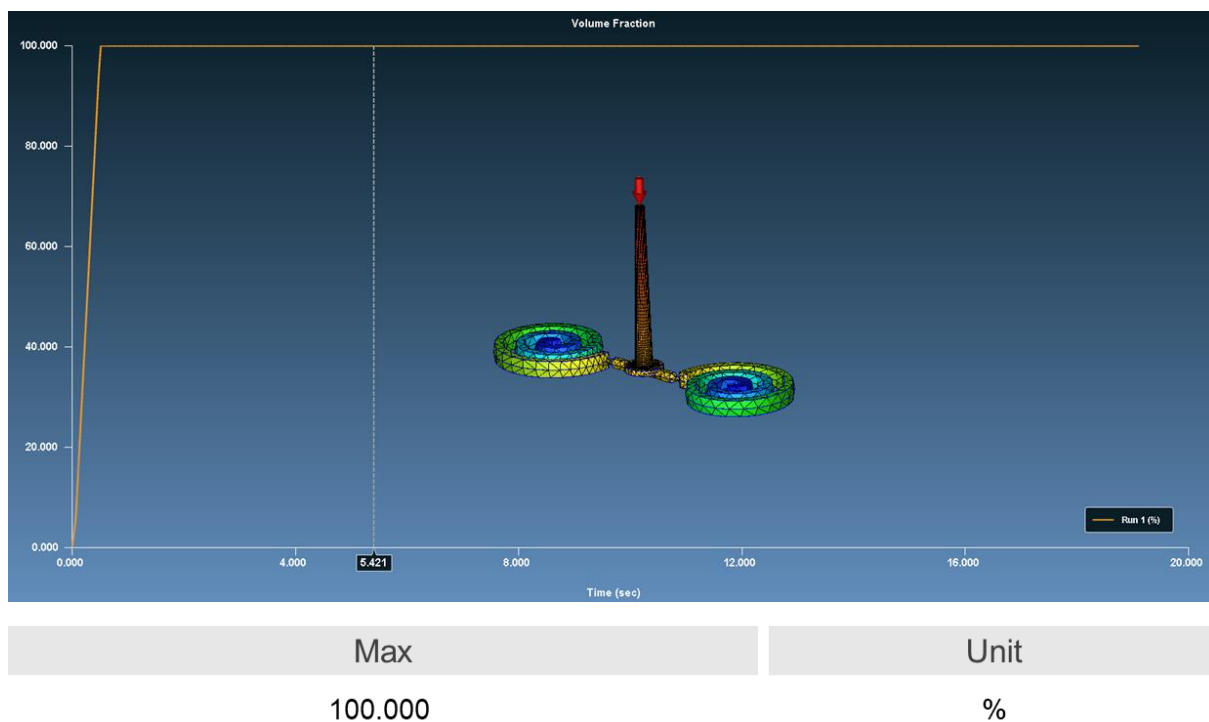
Slika 33. opisuje kretanje volumena rastaljenog polimernog materijala u kalupnoj šupljini Arhimedovih spirala u vremenu faze naknadnog tlaka od 5,421 sekunde. Maksimalna vrijednost volumena je 22,141 cm³/s.



Max	Unit
22.141	cc/sec

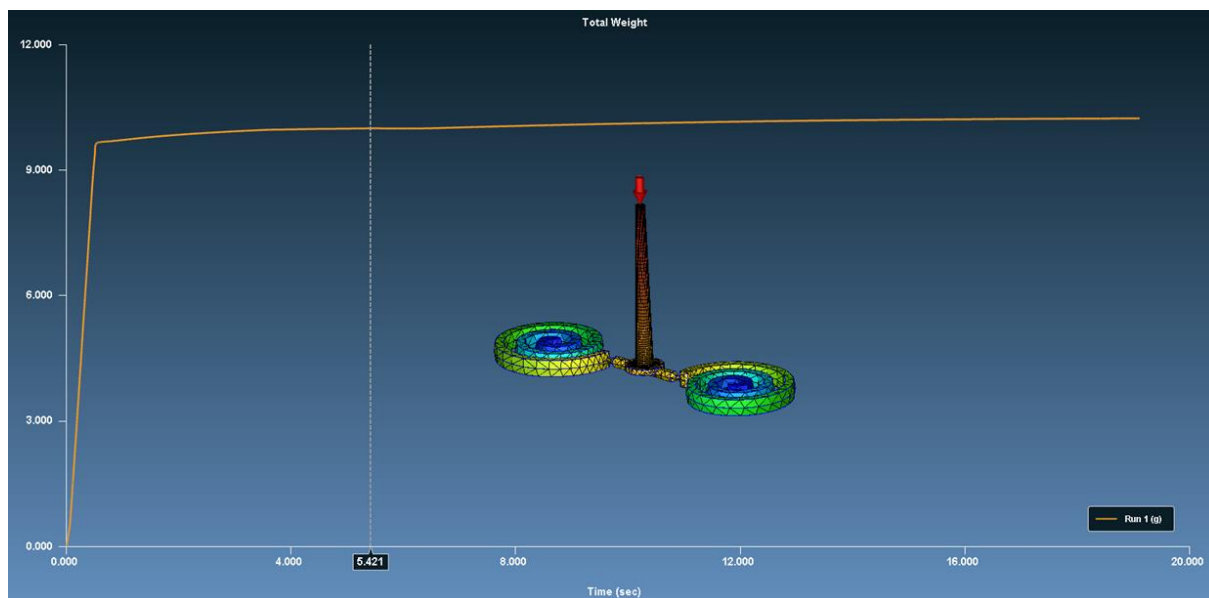
Slika 33. Tijek taljevine polimernog materijala kod faze naknadnog tlaka

Slika 34. opisuje tok volumena rastaljenog polimernog materijala u fazi naknadnog tlaka u vremenu od 5,421 sekunde.



Slika 34. Volumen taljevine polimernog materijala kod faze naknadnog tlaka

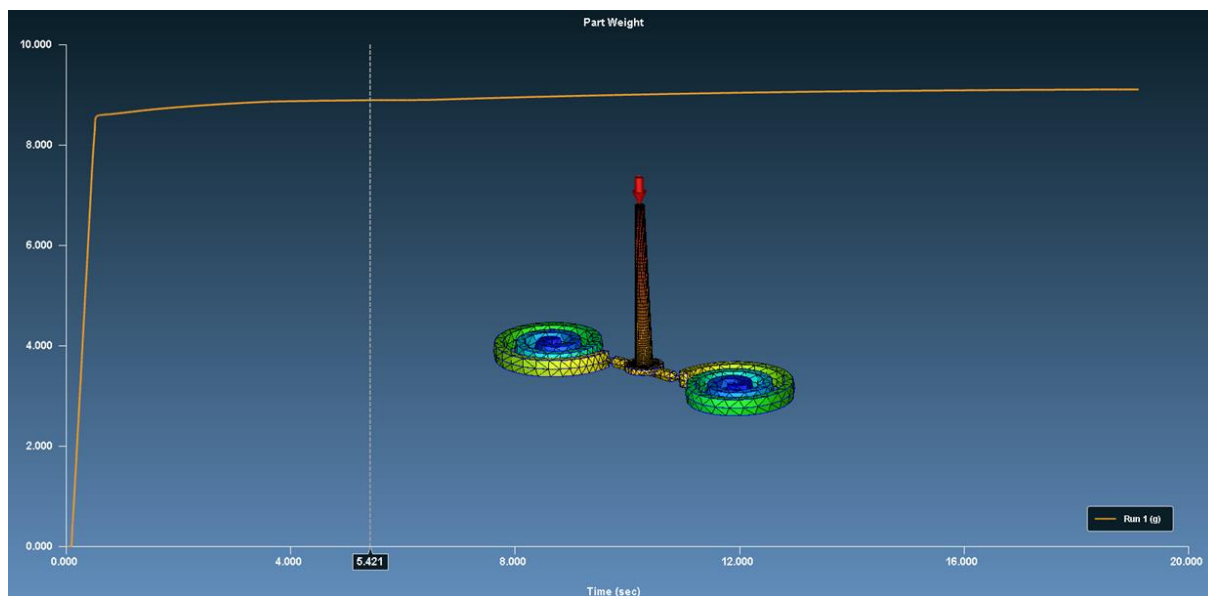
Slika 35. prikazuje masu otpreska kod faze naknadnog tlaka zajedno sa uljevnim sustavom. Masa otpreska iznosi 10,243 grama. Nakon usporedbe sa fazom ubrizgavanja, vidljivo je da je otpresak veće mase nakon faze naknadnog tlaka.



Max	Unit
10.243	g

Slika 35. Masa otpreska s uljevkom u fazi naknadnog tlaka

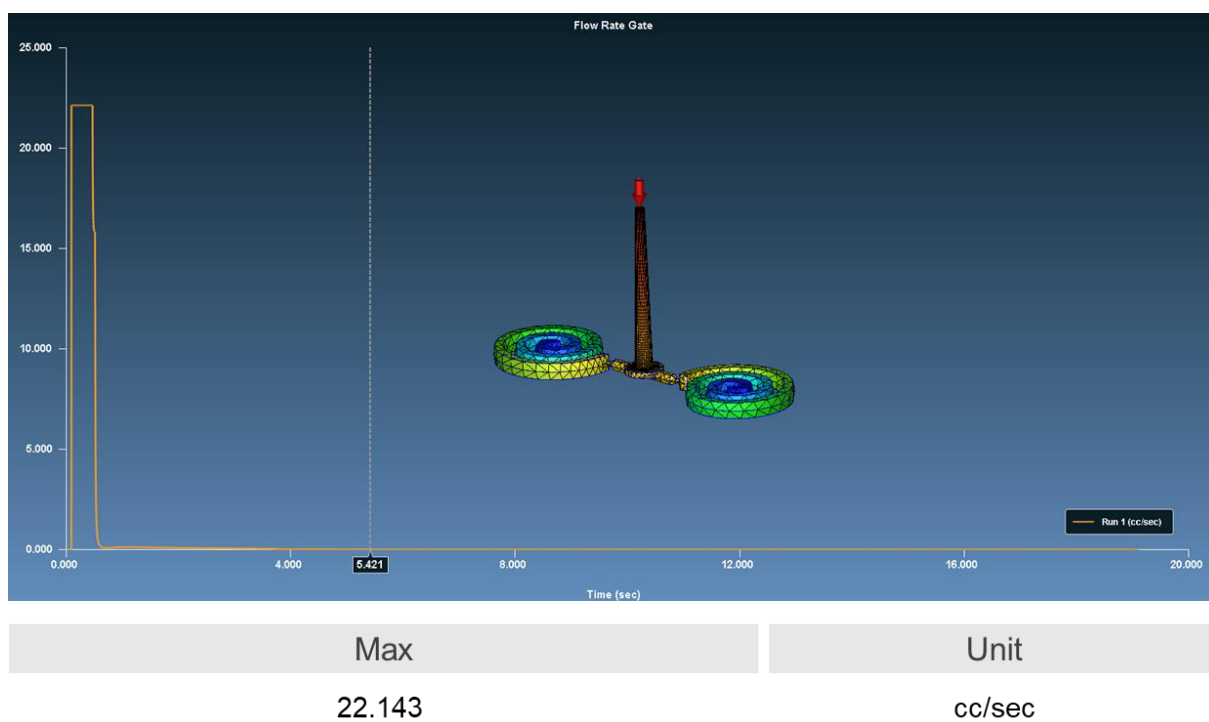
Slika 36. prikazuje masu Arhimedovih spirala u fazi naknadnog tlaka od 9,113 grama. U usporedbi sa fazom ubrizgavanja, vidljivo je da je masa Arhimedovih spirala veća nakon faze naknadnog tlaka.



Max	Unit
9.113	g

Slika 36. Masa Arhimedovih spirala u fazi naknadnog tlaka

Slika 37. opisuje tok volumena rastaljenog polimernog materijala kroz uljevak u fazi naknadnog tlaka u vremenu od 5,421 sekunde.



Slika 37. Tijek taljevine polimernog materijala kroz uljevak

7. MODEL KALUPA NA ADITIVNOM UREĐAJU

Uz proizvodnju aluminijskog kalupa za injekcijsko prešanje Arhimedove spirale, napravljeni su i polimerni kalupi pomoću postupka aditivne tehnologije sa istom funkcijom. Rad se obavljao u tvrtki „Infodata“, na 3D SLA uređaju pod imenom „Formlabs 2“. (Slika 38.)



Slika 38. Aditivni uređaj "Formlabs 2"

Neke od osnovnih karakteristika Formlabs 2 aditivnog uređaja su odlična kvaliteta printanja, lako postavljanje i održavanje, pouzdani i predvidljivi rezultati te relativno tih rad uređaja. Najveći nedostatak ovog tipa stroja je cijena i vrijeme izrade te operacije koje je potrebno obaviti nakon samog procesa printanja.

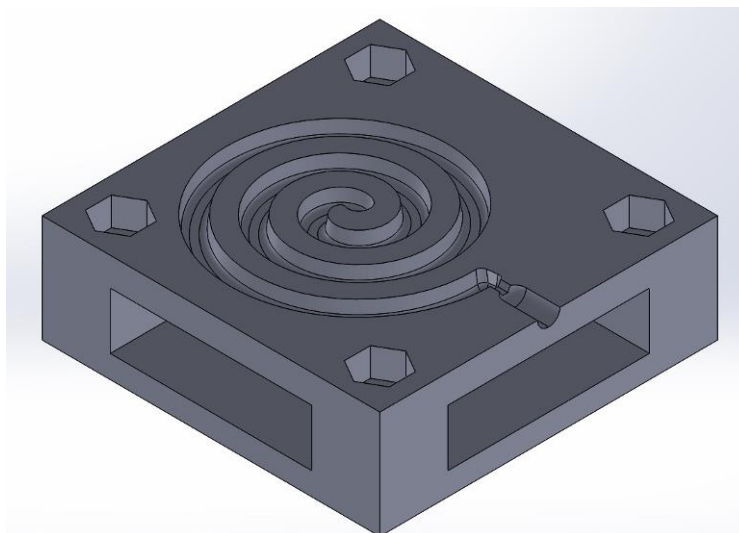
Proces aditivne tehnologije započinje dizajnom i konstruiranjem modela u programu Solidworks. Nakon toga, modelirane kalupe se prebacuje u .stl oblik datoteke i prenose u softver aditivnog uređaja.

Zadnji korak je odlaganje polimernih kalupa u tzv. „Cure“ uređaj čija je funkcija izradene modele dodatno učvrstiti te očistiti.

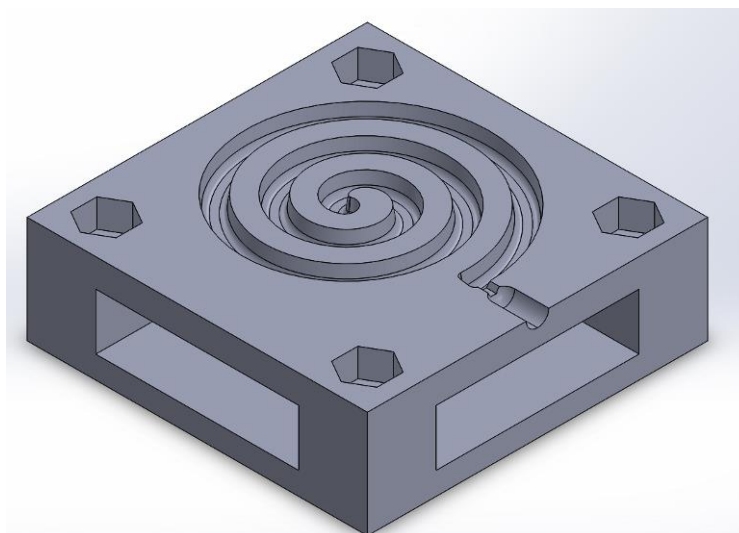
7.1. Izrada kalupa postupkom aditivne tehnologije 1

Kao što je već objašnjeno u petom poglavlju, model za izradu kalupa od aditivne tehnologije za prvi eksperiment injekcijskog prešanja konstruiran je sa unutarnjom šupljinom, radi kraćeg vremena i manjih troškova izrade.

Slike 39. i 40. prikazuju donju i gornju polovicu kalupa, konstruirane u programu Solidworks.



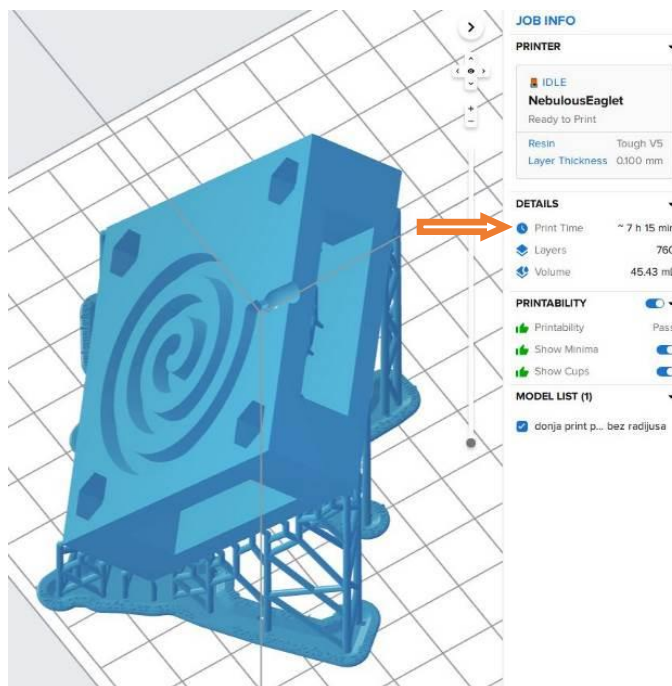
Slika 39. Donja polovica polimernog kalupa za prvi eksperiment injekcijskog prešanja



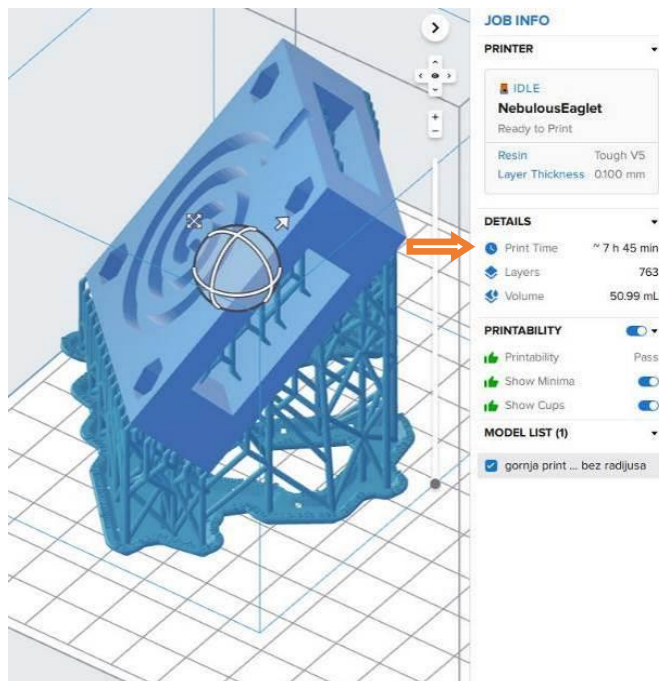
Slika 40. Gornja polovica polimernog kalupa za prvi eksperiment injekcijskog prešanja

Na slikama 41. i 42. vidljiv je prikaz modela kalupa u programu aditivnog uređaja pod imenom "PreForm" koji, na temelju dimenzija i oblika kalupa te vrste materijala od kojeg se sastoji kalup, izračunava vrijeme trajanja izrade.

Izrada jednog kalupa je u prosjeku trajala malo manje od 8 sati i koristio se najčvršći rezin (materijal) koji se obično koristi za izradu čvršćih prototipova. Dužina jednog kalupa je 60 mm, širina je 60 mm, dok je visina 19 mm.

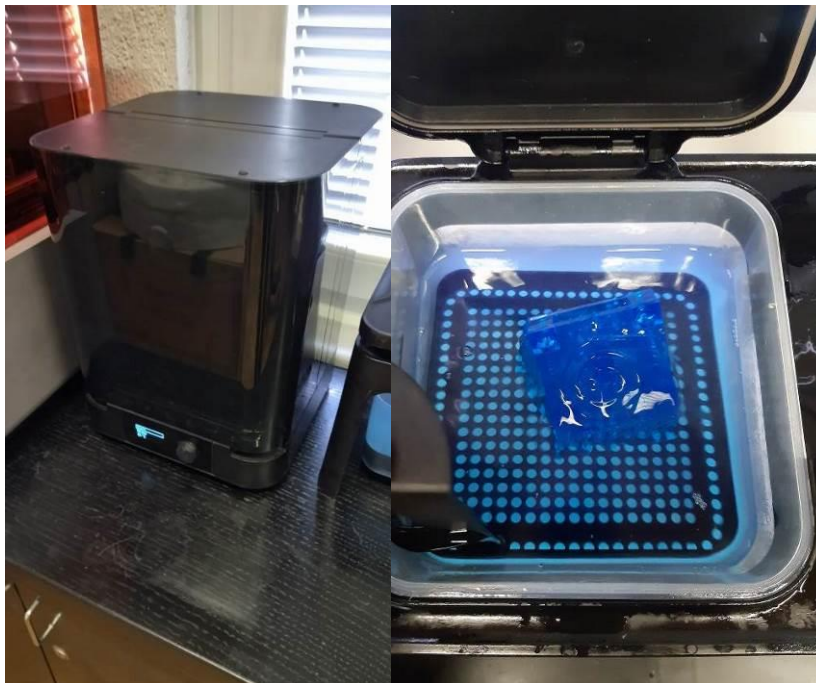


Slika 41. Model donje polovice kalupa aditivne tehnologije u softveru "PreForm"



Slika 42. Model gornje polovice kalupa aditivne tehnologije u softveru "PreForm"

Na slici 43. prikazan je već spomenuti "Cure" uređaj, čija je zadaća izrađene kalupe dodatno očvrstiti i očistiti. Kalupi su se pri prvoj izradi u "Cure" uređaju zadržavali 60 minuta na 60° Celzijevih.

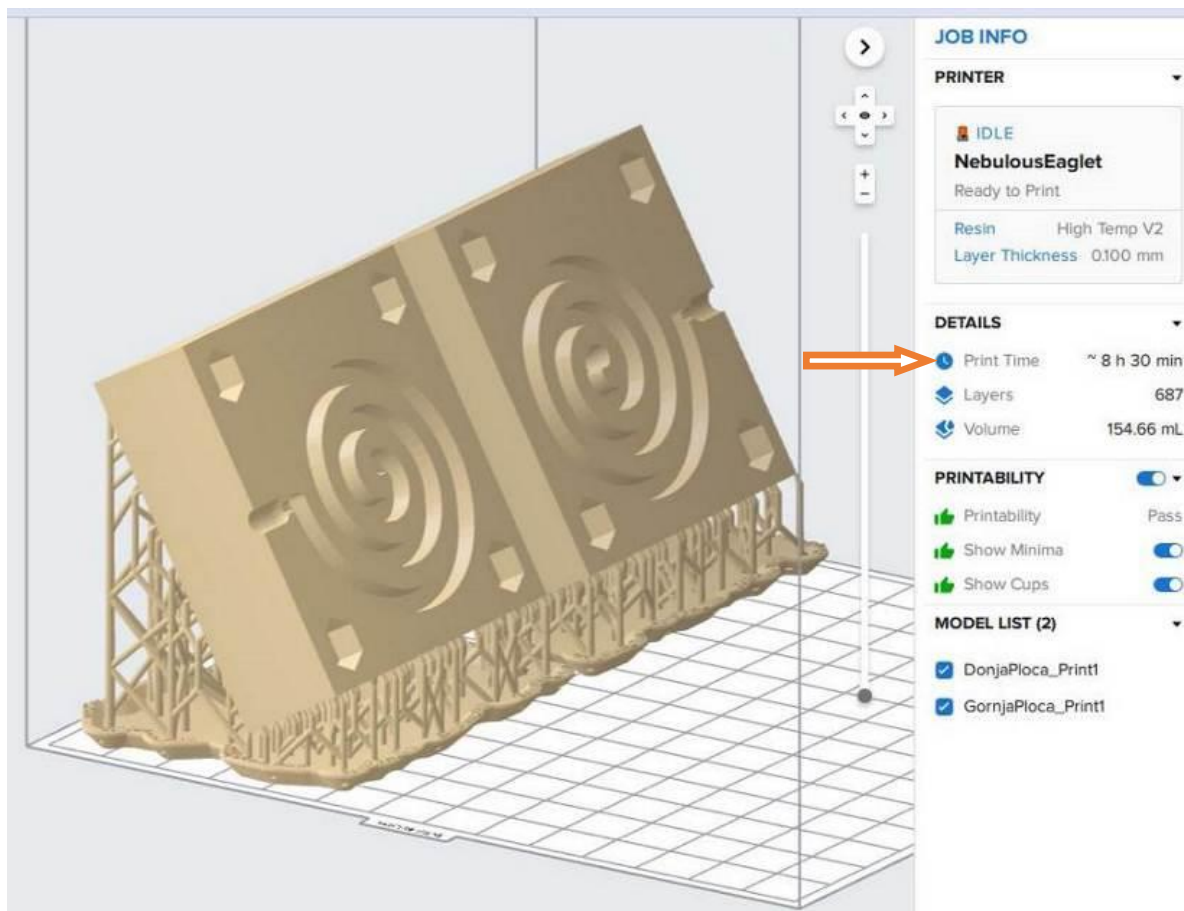


Slika 43. "Cure" uređaj

7.2. Izrada kalupa postupkom aditivne tehnologije 2

Izrada drugog kalupa pomoću aditivne tehnologije trajala je osam i pol sati te se koristio materijal koji pri radu podnosi visoke temperature, tzv. "High Temperature Resin". Dimenzije kalupa su ostale iste, no u ovom slučaju, kalup je modeliran bez unutarnje šupljine. Modeli su nakon izrade, pranja i sušenja tretirani u "Cure" uređaju na temperaturi od 80°C, pri 120 minuta.

Polimerni kalupi koji su se izradili pri drugom postupku aditivne proizvodnje korišteni su za drugi i treći eksperiment injekcijskog prešanja Arhimedovih spirala.



Slika 44. Izgled drugog kalupa aditivne tehnologije u softveru "PreForm"



Slika 45. Izgled drugog kalupa aditivne tehnologije u fizičkom obliku

8. INJEKCIJSKO PREŠANJE NA STROJU

Eksperimenti injekcijskog prešanja opisani u radu odrađeni su na stroju vrste "Ekou HS – 120 K3" (Slika 47.)

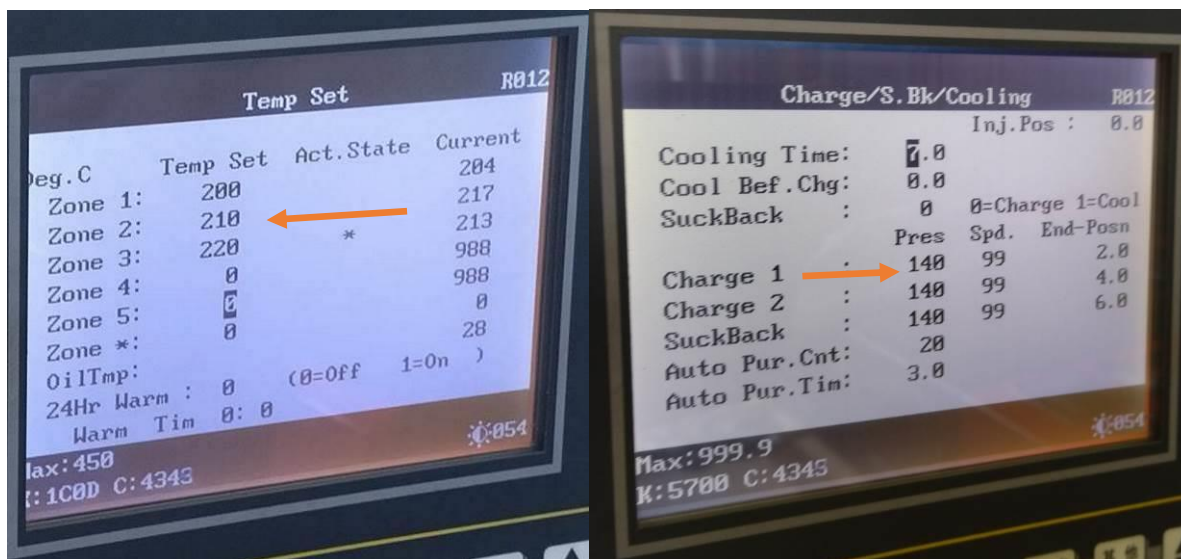
Specifikacije stroja poput balansiranog dvostrukog cilindarskog injekcijskog sustava, elektro - hidrauličnog proporcionalnog ventila, te funkcije višestrukog izbacivanja sa podesivim postavkama tlaka, brzine prešanja, pozicije alata te vremena odgode, kao i rad s brojnim vrstama materijala poput polietilena, polipropilena, polivinilklorida, polistirena, polikarbonata, akrilonitril - butadien – stirena i drugih, omogućuju olakšan rad sa većinom vrsta kalupa i alata.



Slika 46. Stroj za injekcijsko prešanje "Ekou HS – 120 K3" [22]

8.1. Eksperimentalno injekcijsko prešanje 1

Slika 47. prikazuje postavke parametara koji su se koristili za prvi slučaj injekcijskog prešanja kalupa Arhimedovih spirala. Pri radu je korištena mješavina materijala polistirena i styroluxa, koja daje podjednaka svojstva kao i materijal odabran u računalnoj simulaciji Moldexa3D. Srednja temperatura rastaljenog polimernog materijala je iznosila 210°C (slika lijevo), dok je tlak injekcijskog prešanja iznosio 140 bara (slika desno).

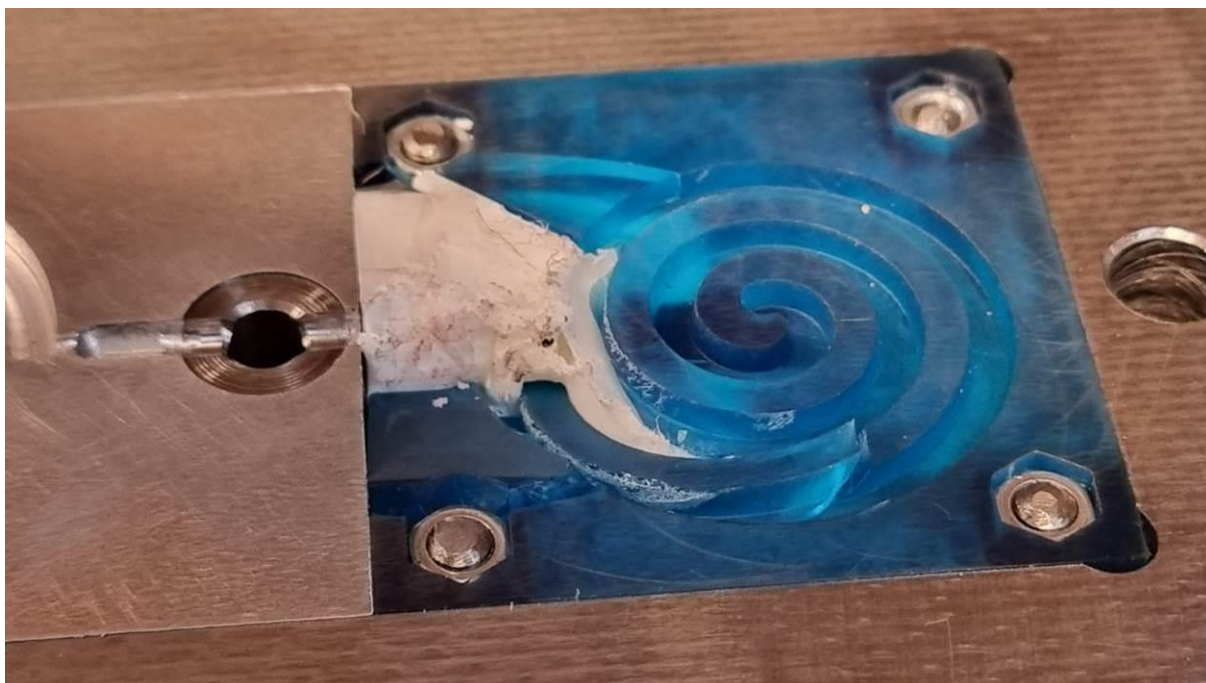


Slika 47. Parametri stroja za prvi slučaj injekcijskog prešanja

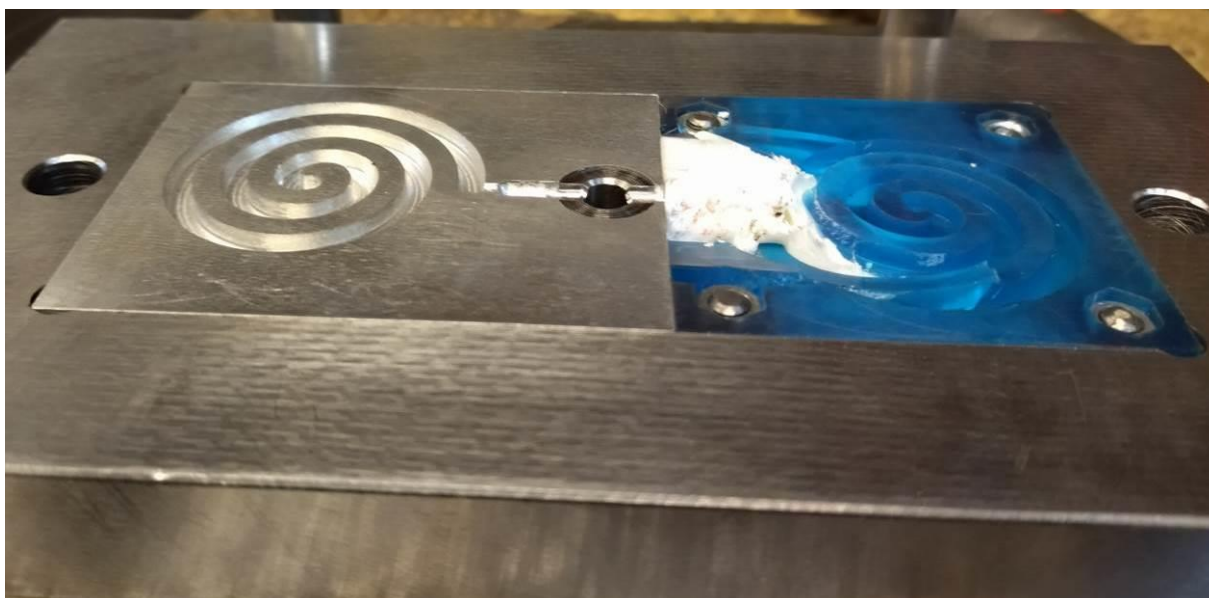


Slika 48. Položaj alata na stroju

Zbog parametara visokog tlaka stroja za injekcijsko prešanje te visokih temperatura rastaljenog materijala dogodilo se pucanje kalupa aditivne tehnologije pri prvom pokušaju injekcijskog prešanja te se daljnja prešanja nisu mogla odviti. Oštećeni kalup se nalazi na nepomičnoj strani alata.



Slika 49. Oštećeni polimerni kalup prvog eksperimenta injekcijskog prešanja (1)

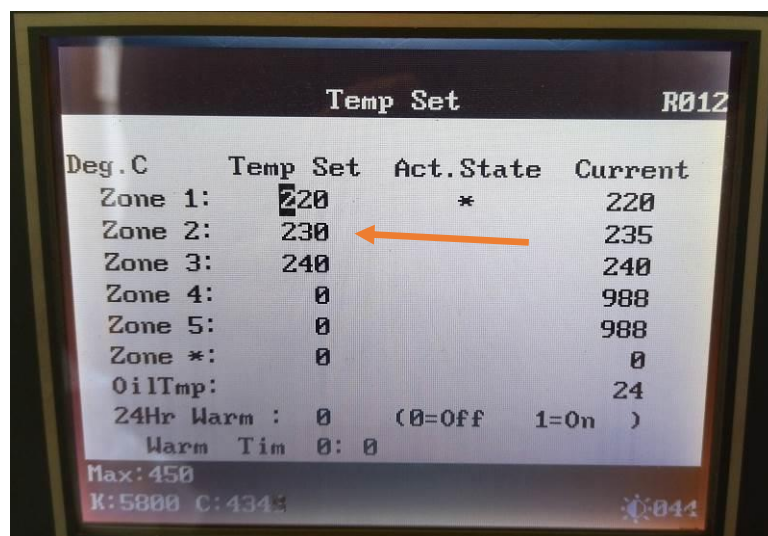


Slika 50. Oštećeni polimerni kalup prvog eksperimenta injekcijskog prešanja (2)

8.2. Eksperimentalno injekcijsko prešanje 2

Drugi pokušaj injekcijskog prešanja polimernog i aluminijskog kalupa je bio uspješan pošto nije došlo do nikakvog oštećenja kalupa. Parametri stroja su postepeno namještani od najnižih vrijednosti do onih s kojima se na kraju proveo eksperiment. Uspoređujući softversku simulaciju u programskom paketu Moldex3D i rad na stroju za injekcijsko prešanje, vidljivo je da su podaci uglavnom podjednaki.

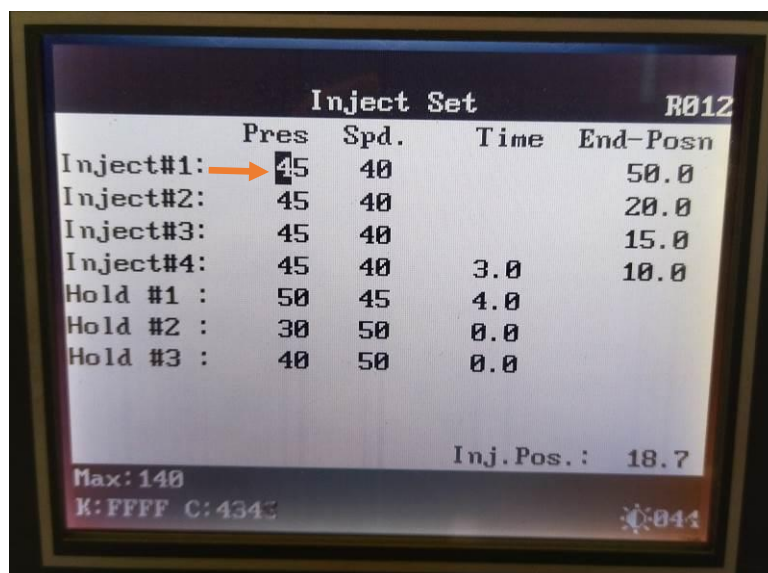
Srednja temperatura rastaljenog materijala pri injekcijskom prešanju iznosila je 230°C (Slika 51.), dok je tlak na vrijednosti 45 bara. (Slika 52.)



Deg.C	Temp Set	Act.State	Current
Zone 1:	220	*	220
Zone 2:	230		235
Zone 3:	240		240
Zone 4:	0		988
Zone 5:	0		988
Zone *:	0		0
OilTmp:			24
24Hr Warm :	0	(0=Off 1=On)	
Warm Tim	0: 0		

Max: 450
K: 5800 C: 4343

Slika 51. Parametri temperature drugog eksperimenta injekcijskog prešanja



	Pres	Spd.	Time	End-Posn
Inject#1:	45	40		50.0
Inject#2:	45	40		20.0
Inject#3:	45	40		15.0
Inject#4:	45	40	3.0	10.0
Hold #1 :	50	45	4.0	
Hold #2 :	30	50	0.0	
Hold #3 :	40	50	0.0	

Inj. Pos. : 18.7
Max: 140
K: FFFF C: 4343

Slika 52. Parametri tlaka drugog eksperimenta injekcijskog prešanja

Slika 53. prikazuje parametre računalne simulacije za drugi eksperiment injekcijskog prešanja. Srednja temperatura rastaljenog materijala iznosi 230°C, kao i pri radu na stroju za prešanje, dok je srednja temperatura kalupa 50°C.

Process condition	
Melt temperature (minimum)	210 °C
Melt temperature (normal)	230 °C
Melt temperature (maximum)	250 °C
Mold temperature (minimum)	30 °C
Mold temperature (normal)	50 °C
Mold temperature (maximum)	70 °C
Ejection temperature	79.85 °C
Freeze temperature	99.85 °C

Slika 53. Parametri simulacije drugog eksperimenta injekcijskog prešanja

Vrijeme ciklusa prešanja u računalnoj simulaciji je 24,11 sekunde, dok je vrijeme ciklusa na stroju oko 95 sekundi. Faze ubrizgavanja i naknadnog tlaka kod simulacije i rada na stroju su podjednako trajanja no, jedina razlika je u vremenu hlađenja alata.

Vrijeme hlađenja na stroju je postavljeno na 70 sekundi, zbog toga što se otpresak, pri vremenu hlađenja od 24,11 sekundi (koje je proračunao Moldex3D) te pri otvaranju alata, u nekim slučajevima uvijao iz polimernog kalupa. Da bi se spriječilo uvijanje, vrijeme hlađenja je povećano te je i položaj samog alata izmijenjen tako da je kalup ostajao zatvoren dok se ne završi faza hlađenja.

Također treba napomenuti da se postupak hlađenja u nekim slučajevima vršio zrakom. Broj otpresaka koji je proveden u drugom eksperimentu injekcijskog prešanja je iznosio 25 komada.

Slika 54. prikazuje izgled otpreska u kalupu kod drugog eksperimenta injekcijskog prešanja kalupa Arhimedovih spirala.



Slika 54. Izgled otpreska u kalupu za drugi pokušaj injekcijskog prešanja

Slika 55. prikazuje izgled izvinutog otpreska iz polimernog kalupa pri drugom eksperimentu injekcijskog prešanja Arhimedovih spirala.



Slika 55. Primjer izvinutog otpreska iz polimernog kalupa

8.3. Eksperimentalno injekcijsko prešanje 3

Pri trećem ispitivanju injekcijskog prešanja pokušao se utvrditi broj otpresaka pri kojem će doći do pucanja polimernog kalupa. Za rad su korišteni su aluminijski i polimerni kalupi iz eksperimentalnog injekcijskog prešanja 2.

Parametri stroja s kojima se započeo treći eksperiment su iznosili 230°C za srednju temperaturu polimerne taljevine te 45 bara za tlak ubrizgavanja. Vrijeme hlađenja otpreska postavljeno je na 70 sekundi.

Nakon pet ciklusa injekcijskog prešanja, otpresci iz polimernog kalupa su se počeli uvijati zbog niske temperature samog kalupa, pa je vrijeme hlađenja smanjeno na 10 sekundi na šestom ciklusu, a zatim povećano na 90 sekundi na sedmom i osmom ciklusu prešanja, te na 100 sekundi za deveti ciklus injekcijskog prešanja. (Slika 56.)



Slika 56. Primjer prvih devet otpresaka

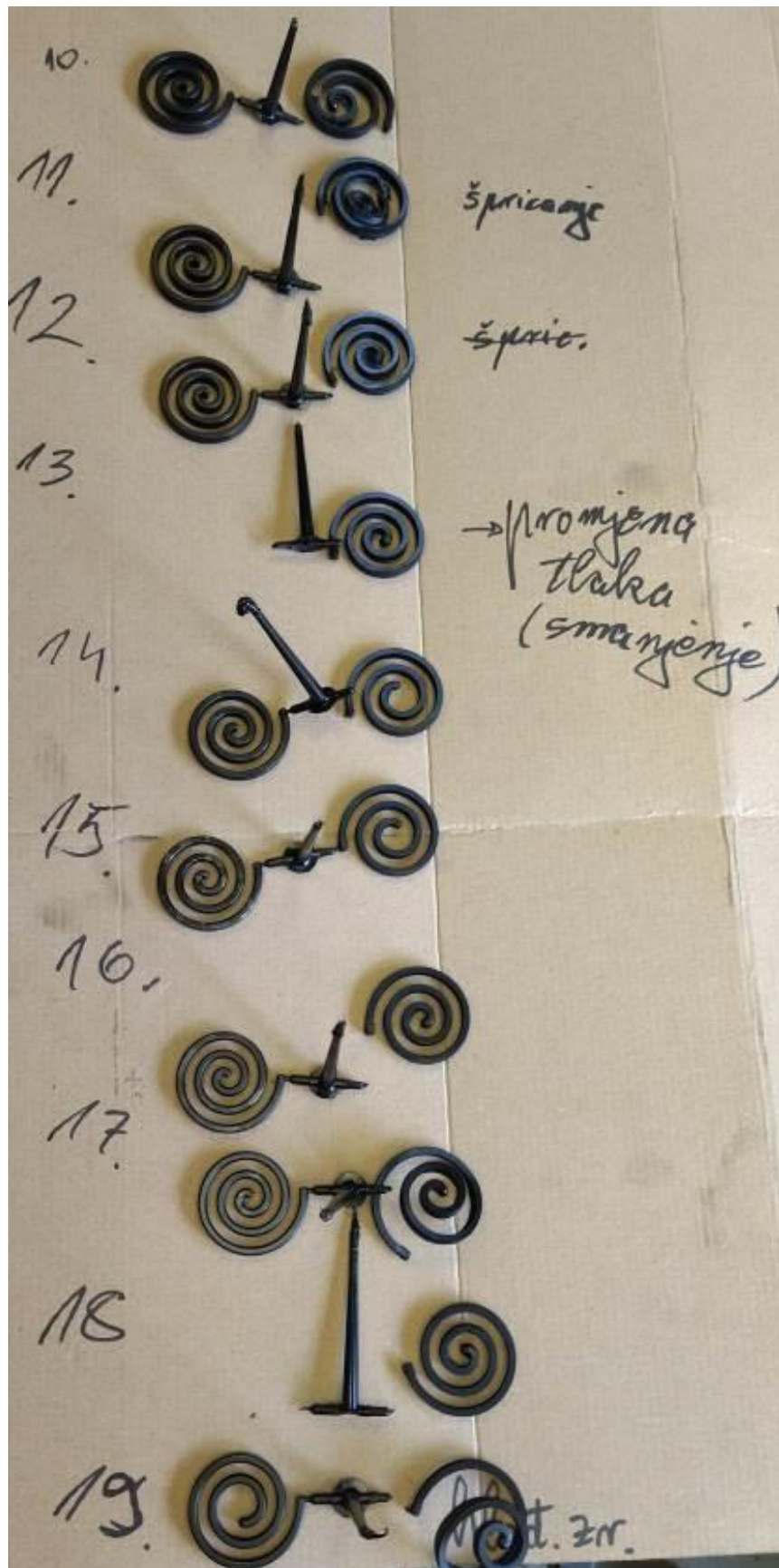
Slika 57. prikazuje izgled polimernog kalupa nakon deset ciklusa injekcijskog prešanja. Vidljivo je da je oblik spirale postojan te je kalup ostao netaknut.



Slika 57. Izgled kalupa nakon prvih deset otpresaka

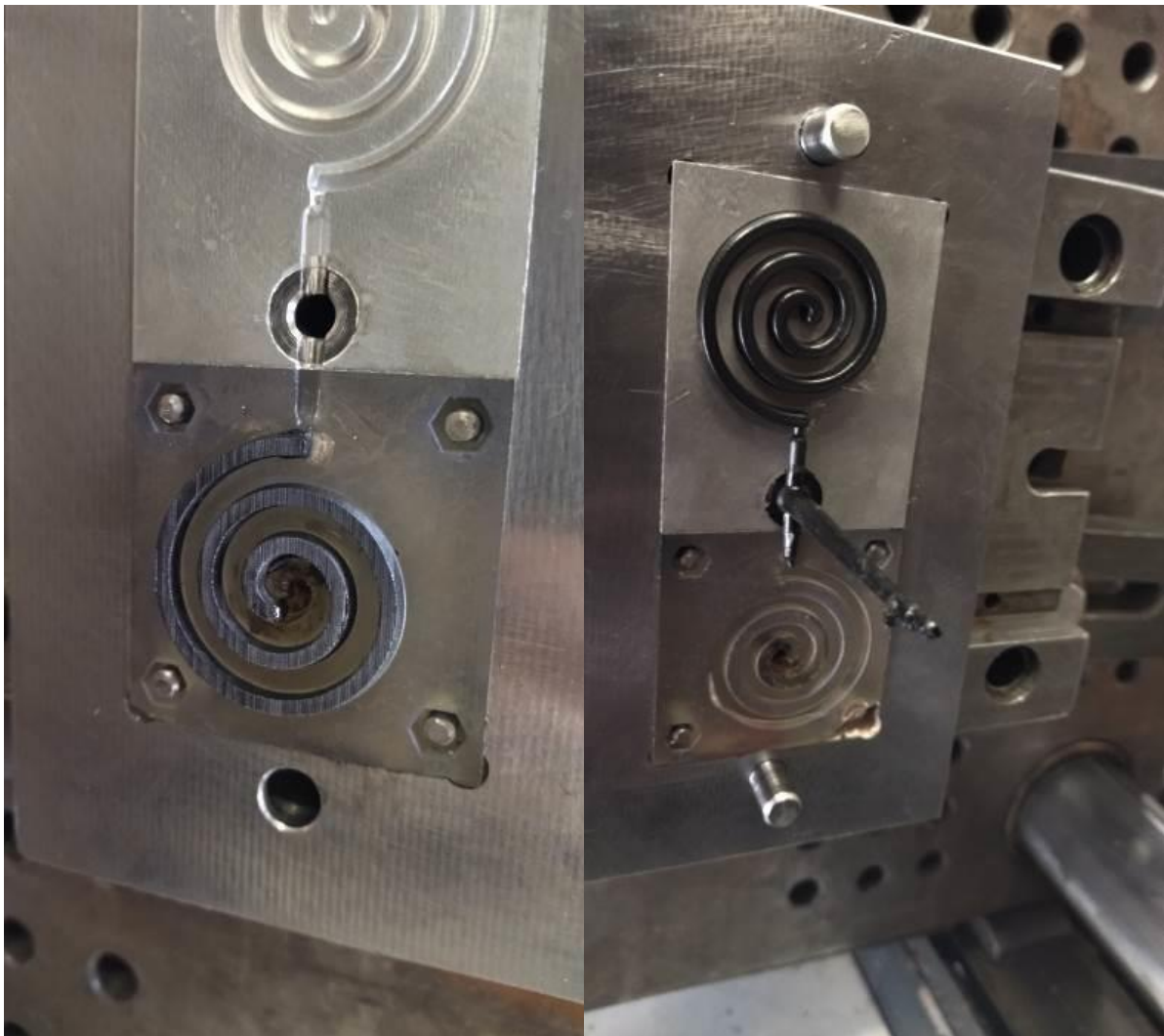
U idućih deset ciklusa injekcijskog prešanja, vrijeme hlađenja je ostalo na 100 sekundi, no eksperimentiralo se sa podmazivanjem polimernog kalupa na 11. i 12. otpresku, te promjenom tlaka nakon 13. ciklusa prešanja, gdje se vrijednost tlaka smanjila sa 45 bara na 40 bara. (Slika 58.)

Također, uz podmazivanje kalupa koje se vršilo silikonskim sprejom, na 19. otpresku je provedeno hlađenje zrakom.



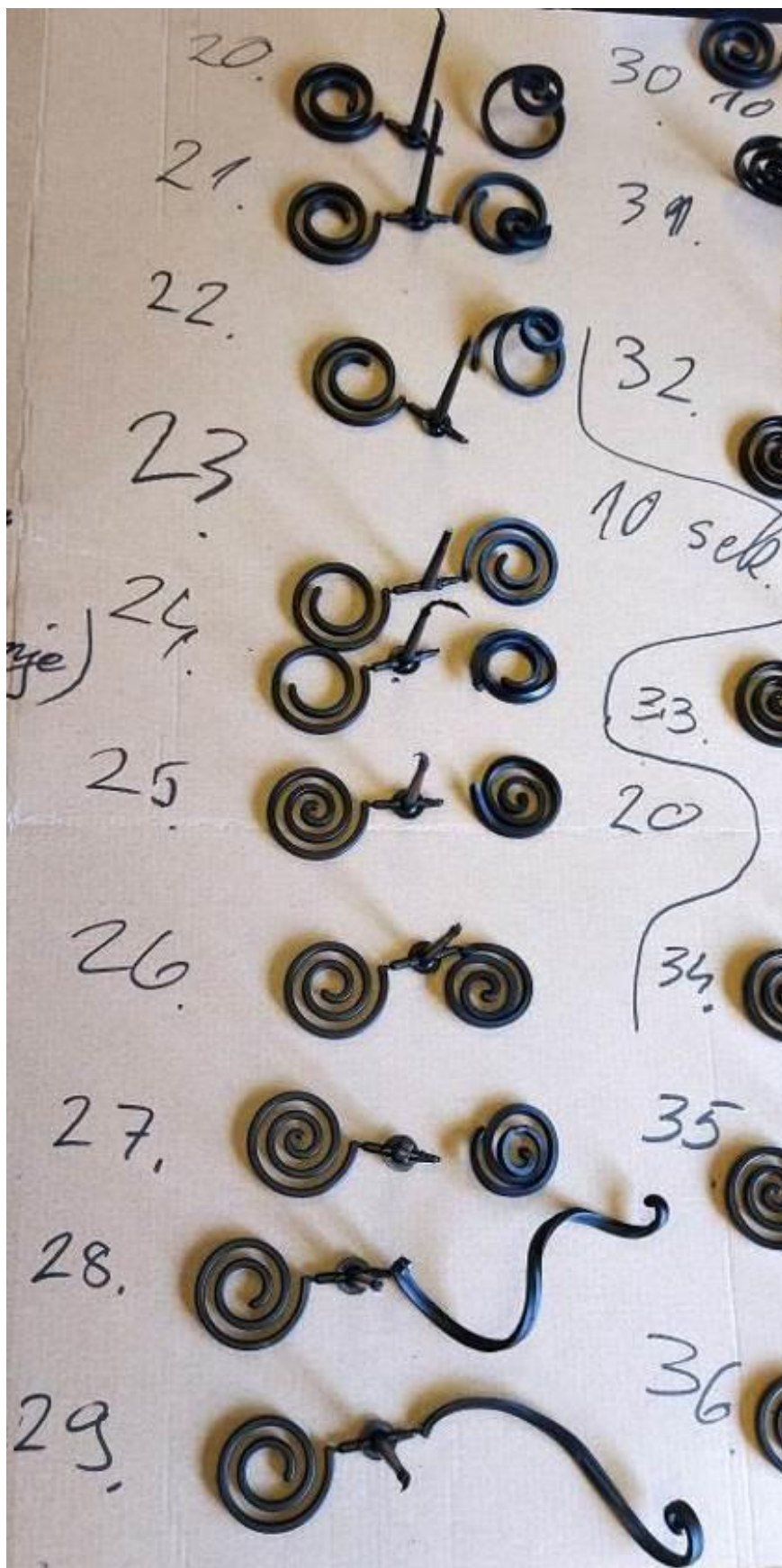
Slika 58. Primjeri otpresaka od 10. do 19.

Na slici 59. vidljiv je izgled i oblik polimernog kalupa nakon dvadeset ciklusa injekcijskog prešanja. Kalup je i dalje bez oštećenja.



Slika 59. Izgled kalupa nakon dvadeset otpresaka

Na broju ciklusa od 20. do 29., otpresci nisu ispunjavali kalupne šupljine u aluminijskom i polimernom kalupu pa je vrijeme hlađenja smanjeno na 10 sekundi za 23. otpresak, te na 20 sekundi nakon 25. otpreska. (Slika 60.)



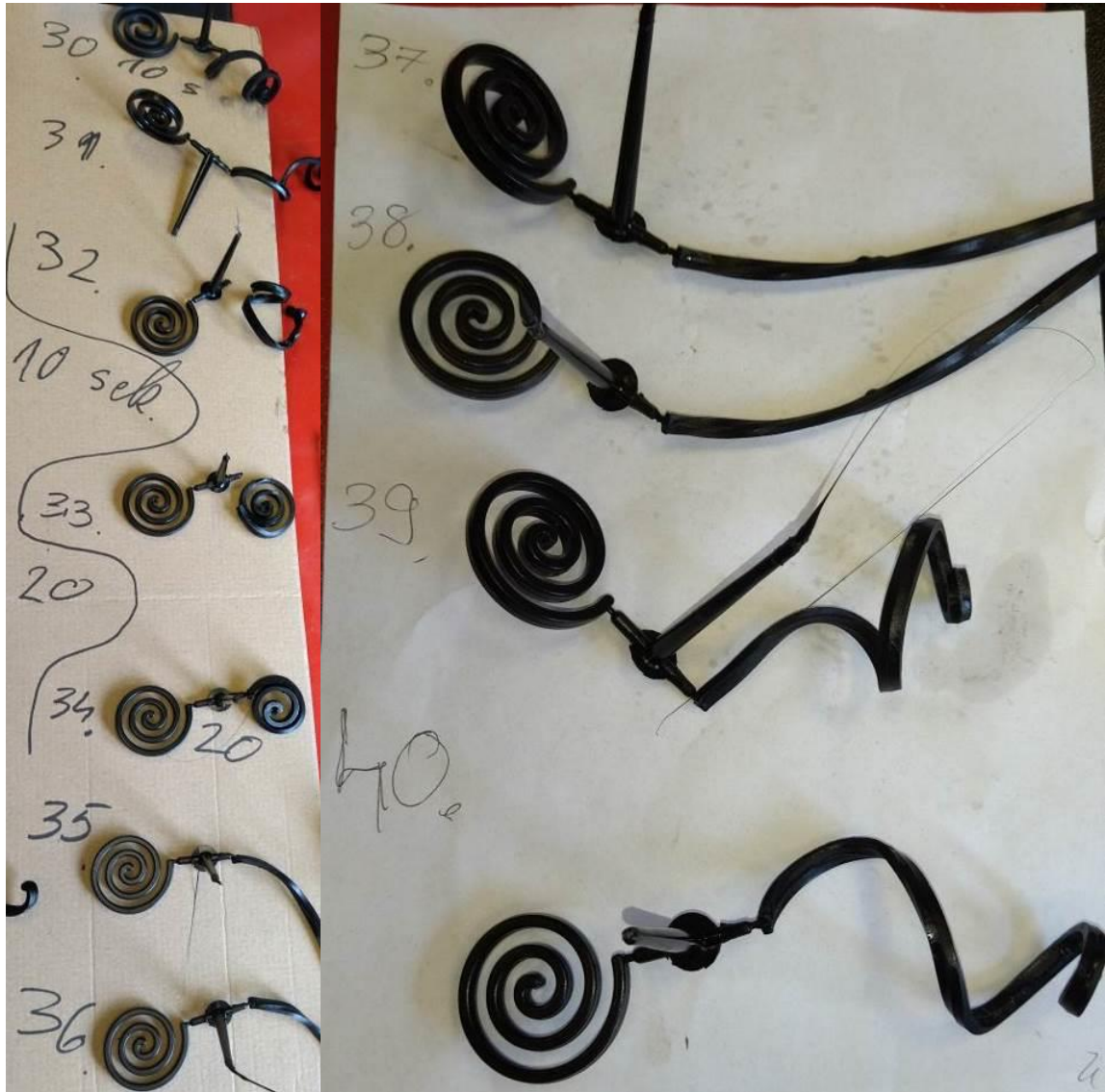
Slika 60. Primjeri otpresaka od 20. do 29.

Slika 61. prikazuje izgled polimernog kalupa nakon 30 ciklusa injekcijskog prešanja. Kalup je i dalje netaknut, no počinju se nazirati otisci taljevine.



Slika 61. Izgled kalupa nakon trideset otpresaka

Parametri, koji čine iznos tlaka od 40 bara, te vrijeme hlađenja od 20 sekundi su ostali isti na broju otpresaka od 30. do 40. Podmazivanje kalupa te hlađenje zrakom nije se vršilo. (Slika 62.)

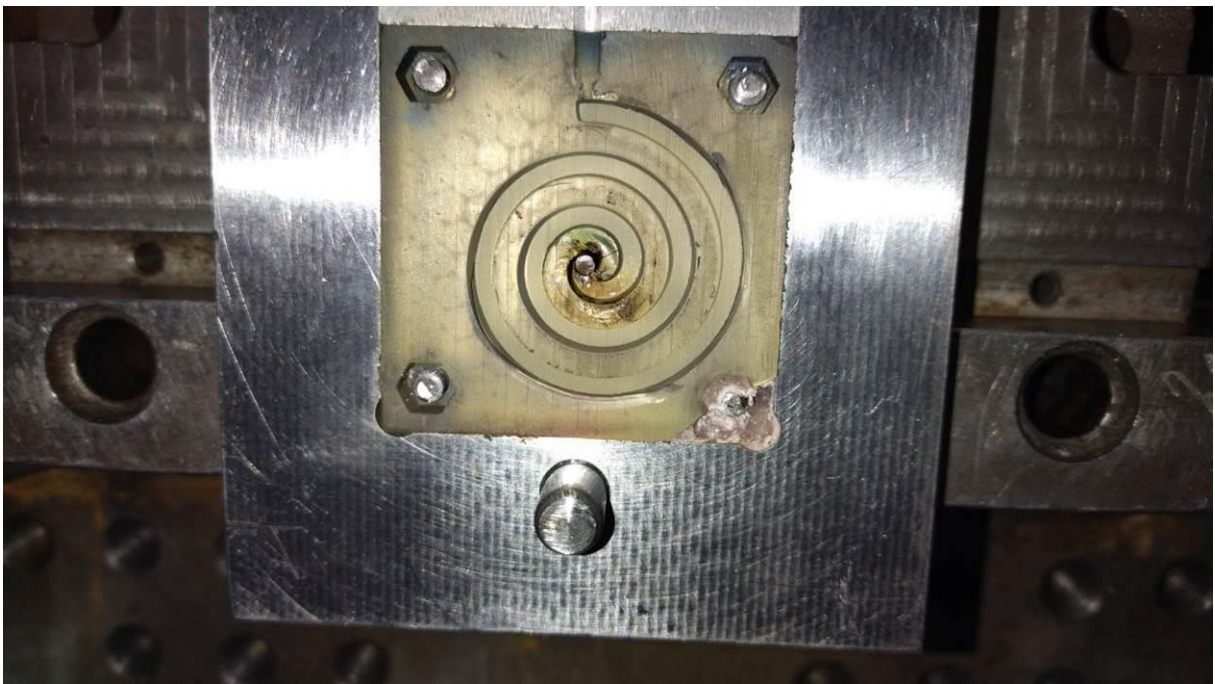


Slika 62. Primjeri otpresaka od 30. do 40.

Slike 63. i 64. pokazuju izgled obje polovice polimernog kalupa nakon 40 ciklusa injekcijskog prešanja. Nema promjene u obliku kalupa u odnosu na prethodnih 10 otpresaka te je kalup i dalje neoštećen. Slika 63. prikazuje kalup na nepomičnoj strani alata, dok slika 64. prikazuje kalup na pomičnoj strani alata.



Slika 63. Izgled polimernog kalupa nakon četrdesetog otpreska (nepomični alat)



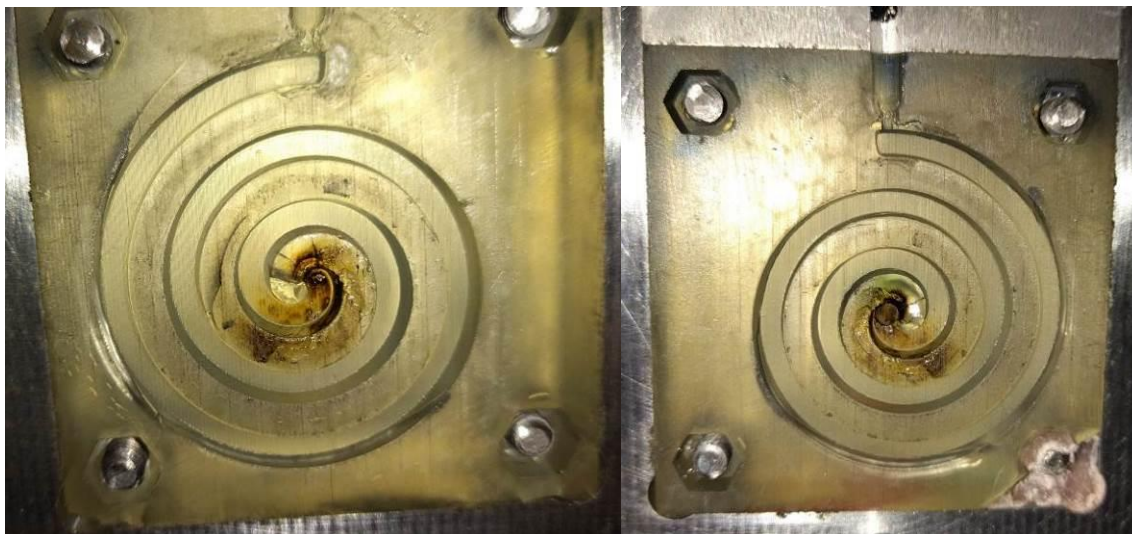
Slika 64. Izgled polimernog kalupa nakon četrdesetog otpreska (pomični alat)

U ciklusu injekcijskog prešanja od otpreska broj 41. do otpreska broj 50., vrijeme hlađenja je postavljeno na 60 sekundi, odnosno jednu minutu. Vrijednost tlaka je ostala ista u iznosu od 40 bara. Podmazivanje kalupa te hlađenje zrakom nije provedeno. (Slika 65.)



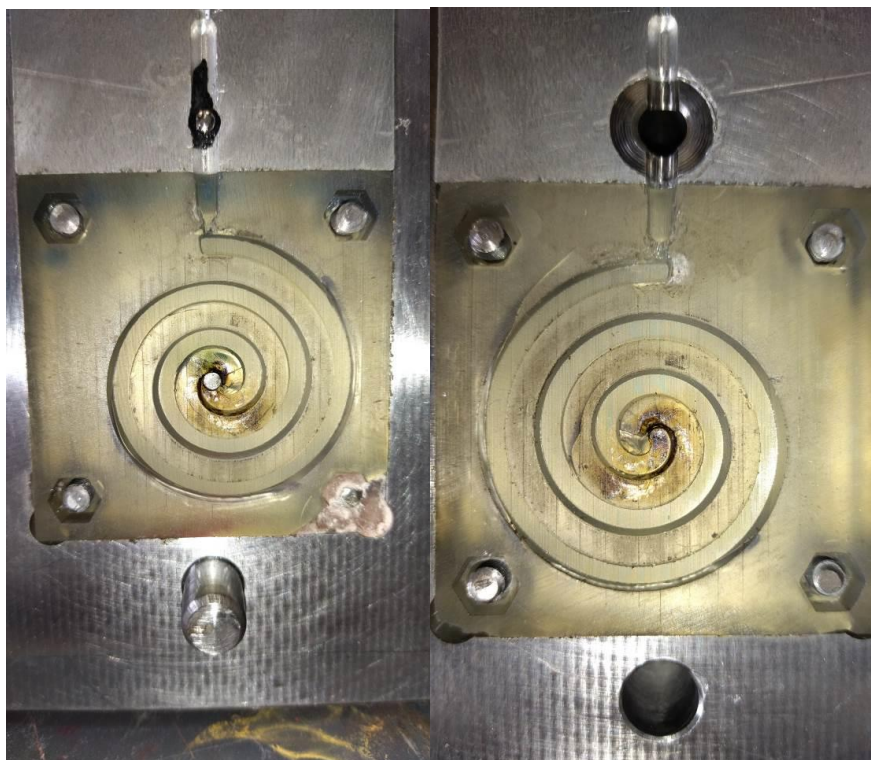
Slika 65. Primjeri otpresaka od 41. do 47.

Na slici 66. su prikazane obje polovice polimernog kalupa nakon pedeset ciklusa injekcijskog prešanja. Na kalupu su vidljivi tragovi korištenja no, oblik Arhimedove spirale je i dalje neoštećen te je kalup prikladan za daljnje ispitivanje.



Slika 66. Izgled polimernog kalupa nakon pedeset otpresaka

Slika 67. pokazuje oblik i izgled spirale polimernog kalupa nakon šezdeset ciklusa injekcijskog prešanja, što je ujedno i konačan broj otpresaka pri trećem eksperimentu ispitivanja otpornosti polimernog kalupa. Na slici je vidljivo da je kalup i dalje ostao neoštećen.



Slika 67. Izgled polimernog kalupa nakon šezdeset otpresaka

Kako je treći eksperiment injekcijskog prešanja Arhimedove spirale polimernog kalupa ujedno bio i posljednji, može se zaključiti da bi, pod parametrima tlaka od 40 bara, vremenom hlađenja od 1 minute, te srednjoj temperaturi rastaljenog materijala od 230°C, polimerni kalup mogao izdržati 100 ciklusa injekcijskog prešanja, odnosno 100 otpresaka prije oštećenja i pucanja, kolika je pretpostavka otpornosti kalupa.

Valja napomenuti kako uvjeti rada nisu bili idealni, što znači da je sobna temperatura bila viša od uobičajene uz veliku prisutnost vlage koja je utjecala na ponašanje taljevine polimernog materijala. Također, temperatura kalupa na stroju se nije mogla točno utvrditi kako bi se provela usporedba sa prosječnom temperaturom kalupa računalne simulacije programa Moldex3D.

9. USPOREDBA INJEKCIJSKOG PREŠANJA I POSTUPKA ADITIVNE TEHNOLOGIJE

9.1. Usporedba polimernih i metalnih kalupa

Rad s metalnim i polimernim kalupima pomogao je pri prihvaćanju aditivnih 3D tehnologija kao cjenovno prihvatljivijih i općenito bržih proizvodnih postupaka. Uz to, korištenje polimernih kalupa ima veći utjecaj na vrijeme proizvodnje jer ovakva vrsta kalupa od procesa konstrukcije do procesa proizvodnje zahtjeva znatno kraći vremenski period.

Također, višestruke konstrukcijske iteracije mogu se primijeniti vrlo kratko nakon proizvodnje. Proizvođači i konstruktori mogu smanjiti vrijeme do izlaska novih proizvoda. Nedostatak kod polimernih vrsta kalupa može biti taj da ponekad ipak ostvaruju duže vrijeme ciklusa proizvodnje jer se takva vrsta kalupa ne hladi dovoljno brzo. No ti duži ciklusi se kompenziraju manjim brojem dijelova koji su potrebni u ranim fazama prototipne proizvodnje.

S druge strane, kod metalnih kalupa glavna prednost je u sposobnosti konstruiranja sofisticiranih konformalnih kanala za hlađenje koji dozvoljavaju kraće vrijeme ciklusa trajanja procesa proizvodnje.

Nedostatak ove vrste kalupa su cijena i potreba za značajnijim strojnim obradama i doradama prije nego li se mogu pustiti u proizvodni proces.

Radom na simulacijskom programu Moldex3D uspoređeni su podaci između ove dvije vrste kalupa, polimernog i metalnog, konkretno aluminijskog.

9.2. Usporedba aluminijskih kalupa i kalupa aditivne tehnologije

Kada govorimo o uspoređivanju aluminijskih kalupa sa kalupima izrađenim pomoću postupka aditivne tehnologije možemo se okrenuti konkretnom primjeru koji je opisan u radu.

U oba slučaja, izrada kalupa započinje konstruiranjem modela u CAD (engl. *Computer Aided Design*) softverskim programima. U izradu aluminijskih kalupa uključeni su procesi prebacivanja modela kalupa iz softverskog programa za konstruiranje u program izračuna numeričkih vrijednosti putanja alata za CNC (engl. *Computer Numerical Control*) stroj. Kod izrade polimernih kalupa, proces prebacivanja modela kalupa iz CAD programa za konstruiranje također je sličan procesu izrade aluminijskih kalupa, gdje se, kako je opisano u sedmom poglavlju, modeli polimernih kalupa prebacuju u poseban program aditivnog uređaja.

Nadalje, kad govorimo o trajanju i trošenju samih kalupa, odnosno, broju otpresaka koji aluminijski i polimerni kalupi načinjeni od procesa aditivne tehnologije mogu izdržati, prednost možemo dati aluminijskim kalupima. U eksperimentima u poglavlju osam, broj otpresaka koji su prošli ciklus injekcijskog prešanja je iznosio oko osamdesetak komada. Pretpostavka je da kalupi načinjeni pomoću postupka aditivne tehnologije mogu izdržati znatno manji broj ciklusa injekcijskog prešanja od aluminijskih kalupa (u nekim slučajevima i do deset puta manji broj ciklusa), no, u osmom poglavlju vidljivo je da je polimerni kalup zadržao oblik Arhimedove spirale, odnosno kalup nije puknuo pod pritiskom i temperaturama stroja za injekcijsko prešanje.

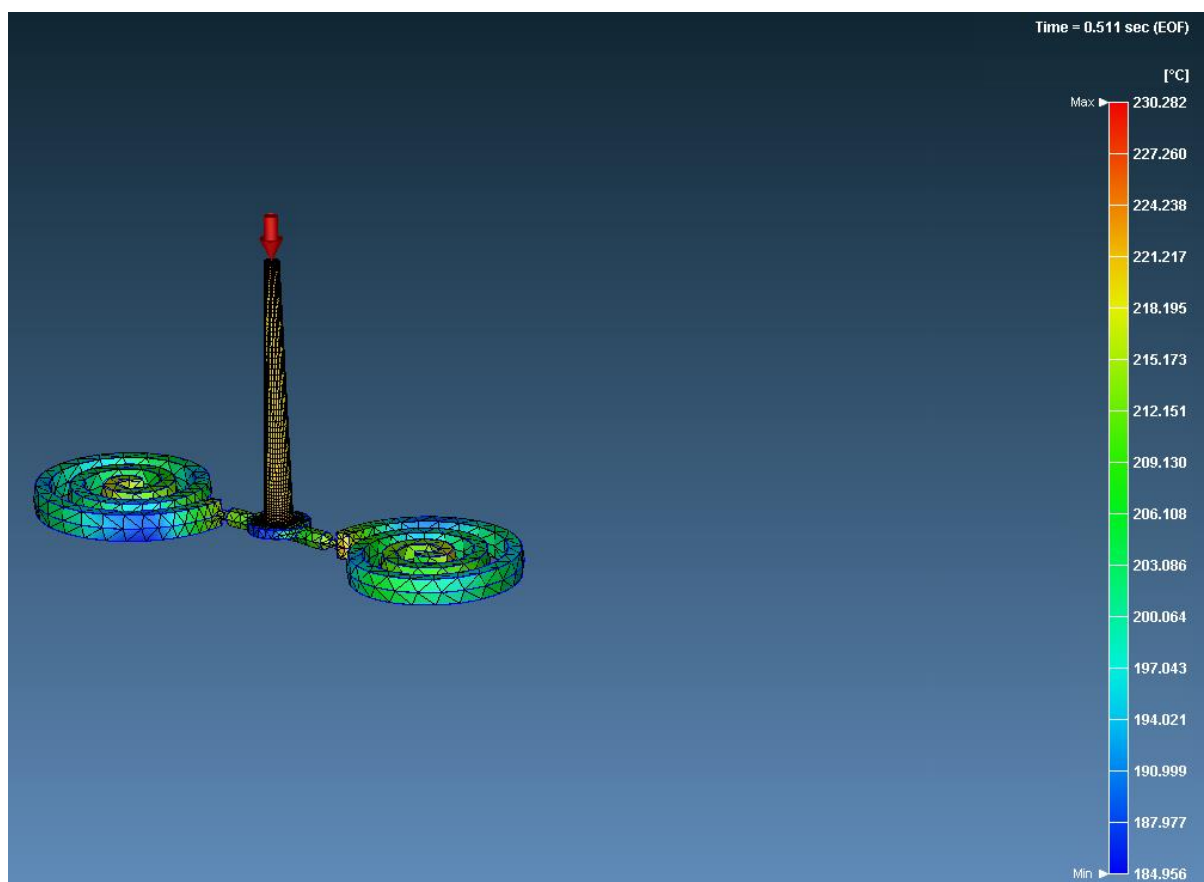
Općenito govoreći, otpresci aluminijskih kalupa se mogu izrađivati u bilo kojim dimenzijama te je broj otpresaka znatno veći, bez obzira na taljevinu materijala koja se koristi (više od 1000 komada). No, s druge strane, vrijeme izrade aluminijskih kalupa je znatno duže. Kod polimernih kalupa, vrijeme izrade je znatno kraće, mjeri se u satima i danima, a ne u tjednima kao kod aluminijskih kalupa, no, broj ciklusa injekcijskog prešanja kojeg kalupi načinjeni pomoću aditivne tehnologije mogu izdržati mnogo je manji (manje od 100 komada).

10. PRORAČUN KALUPA

10.1. Numerički proračun kalupa

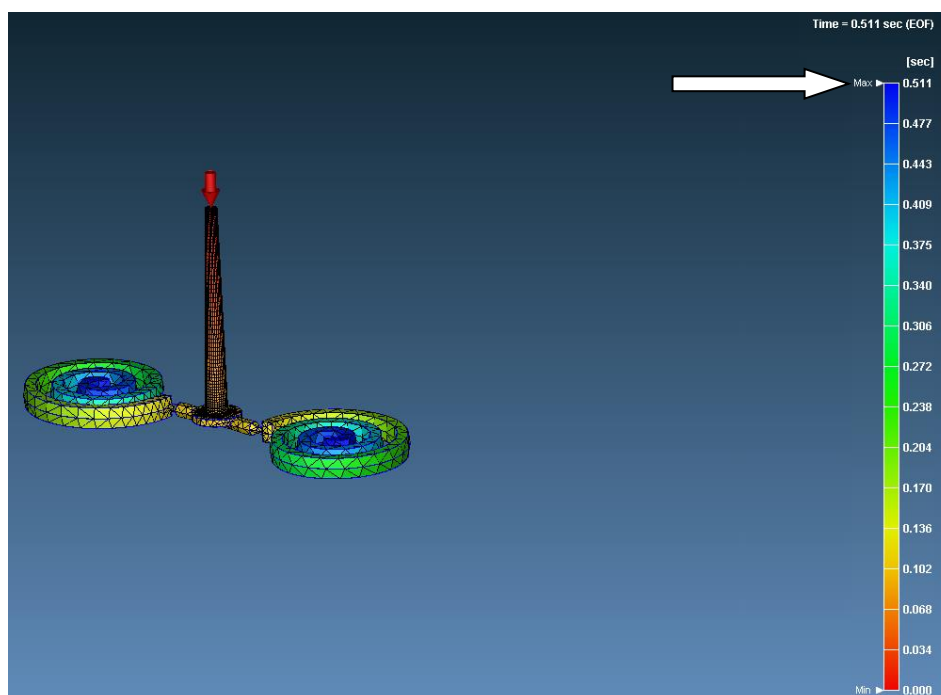
Numerički proračun kalupa je niz programskih simulacija koje su se izvele pomoću programskog paketa Moldex3D. Rezultate tih simulacija treba razmatrati sa određenom dozom rezerve zbog toga što softver prikazuje samo najnepovoljnije rezultate analize, odnosno, implicira na mjesta na kojima se mogu pojaviti problemi kako bi ih se tijekom konstruiranja kalupa uzelo u obzir. [8]

Proračun započinje slikom 68. koja prikazuje popunjavanje kalupne šupljine. Promatrajući boju otpreska možemo zaključiti da je kvaliteta popunjavanja Arhimedove spirale dobra jer pretežno prevladavaju plava i zelena boja.



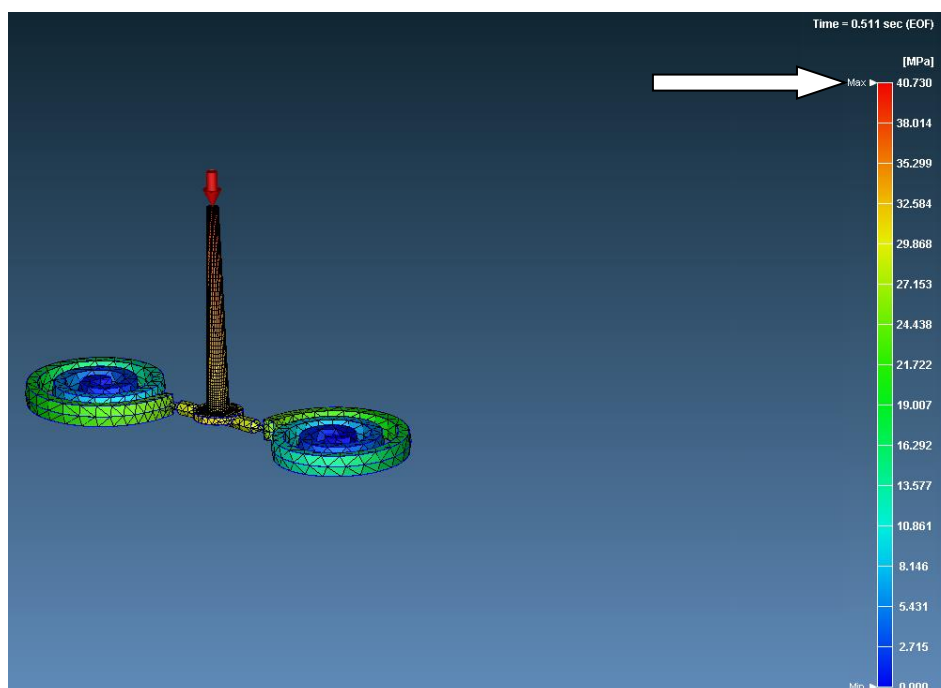
Slika 68. Temperaturni prikaz popunjavanja kalupne šupljine

Slika 69. prikazuje vrijeme ispunjavanja kalupne šupljine koje iznosi 0,511 sekundi.



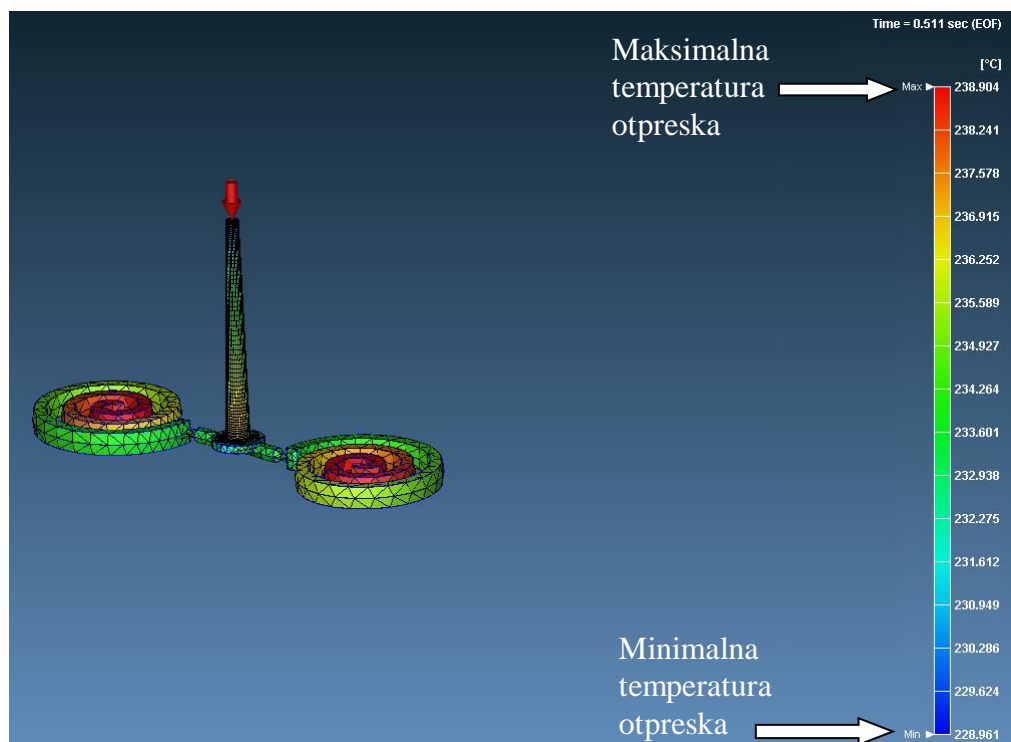
Slika 69. Vrijeme popunjavanja kalupne šupljine

Na slici 70. vidimo pad tlaka u kalupnoj šupljini koji iznosi 40,73 MPa.



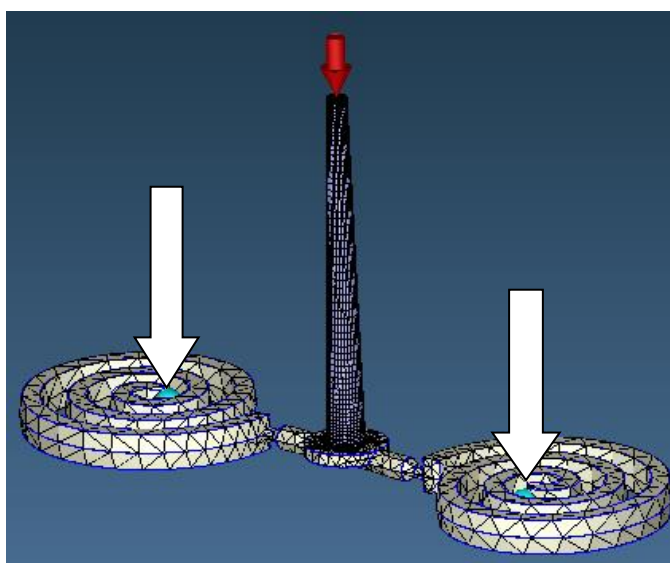
Slika 70. Tlak na kraju faze ubrizgavanja

Slika 71. prikazuje raspon temperatura otpreska na kraju faze ubrizgavanja.



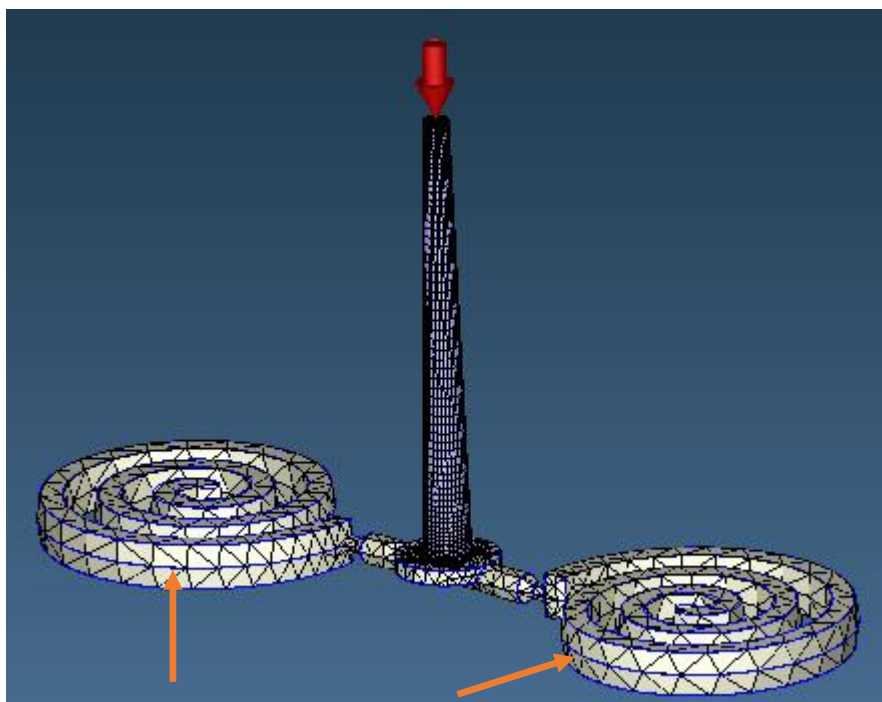
Slika 71. Raspon temperatura otpreska na kraju procesa

Slika 72. pokazuje pozicije mogućih uključina zraka na primjeru modela Arhimedovih spirala. Uključine zraka obično se javljaju na mjestima do kojih taljevina materijala dolazi zadnja te one mogu utjecati na kvalitetu otpreska.



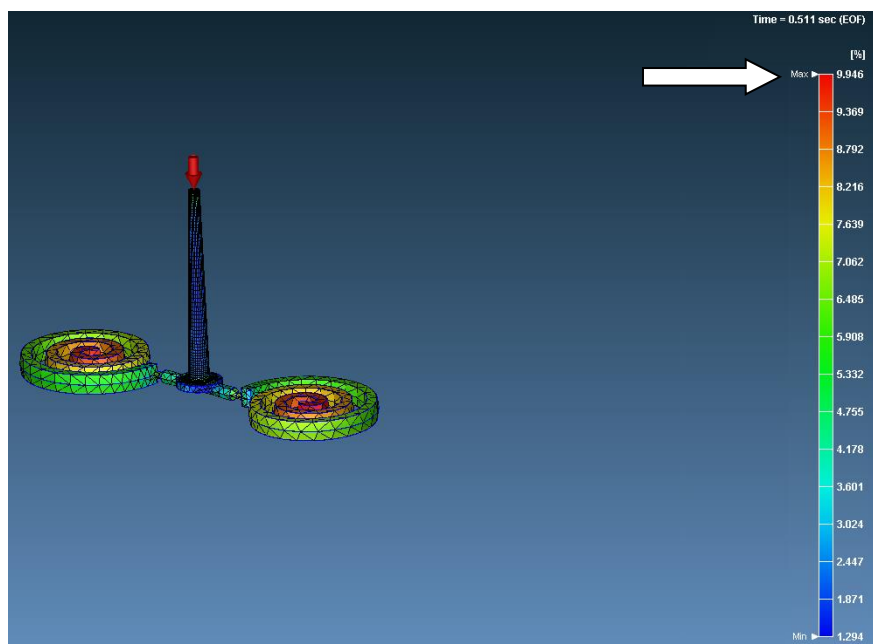
Slika 72. Mjesta mogućih uključina zraka

Slika 73. prikazuje linije spajanja odnosno moguća mjesta slabije strukture. Što je linija spajanja više, slabija je struktura otpreska.



Slika 73. Linija spajanja

Maksimalno skupljanje ovisno o debljini stjenke prikazano je na slici 74. Skupljanje otpreska u ovom slučaju iznosi 9,946%. Velika vrijednost skupljanja može rezultirati pojavom udubina na otpresku.



Slika 74. Maksimalno skupljanje otpreska prikazano u postocima

10.2. Analitički proračun kalupa

Analitički proračun se sastoji od tri dijela: reološkog, toplinskog i mehaničkog proračuna. Za ovaj dio proračuna potrebno je znati podatke o materijalu, obliku otpreska te dimenzijama i izmjerama kalupne šupljine. [8]

10.2.1. Reološki proračun

U ovom dijelu proračunavaju se tlakovi u uljevnim i kalupnim šupljinama. Tlak u kalupnoj šupljini je aktivno opterećenje koje djeluje na stijenke kalupne šupljine i ostale elemente kalupa. [8]

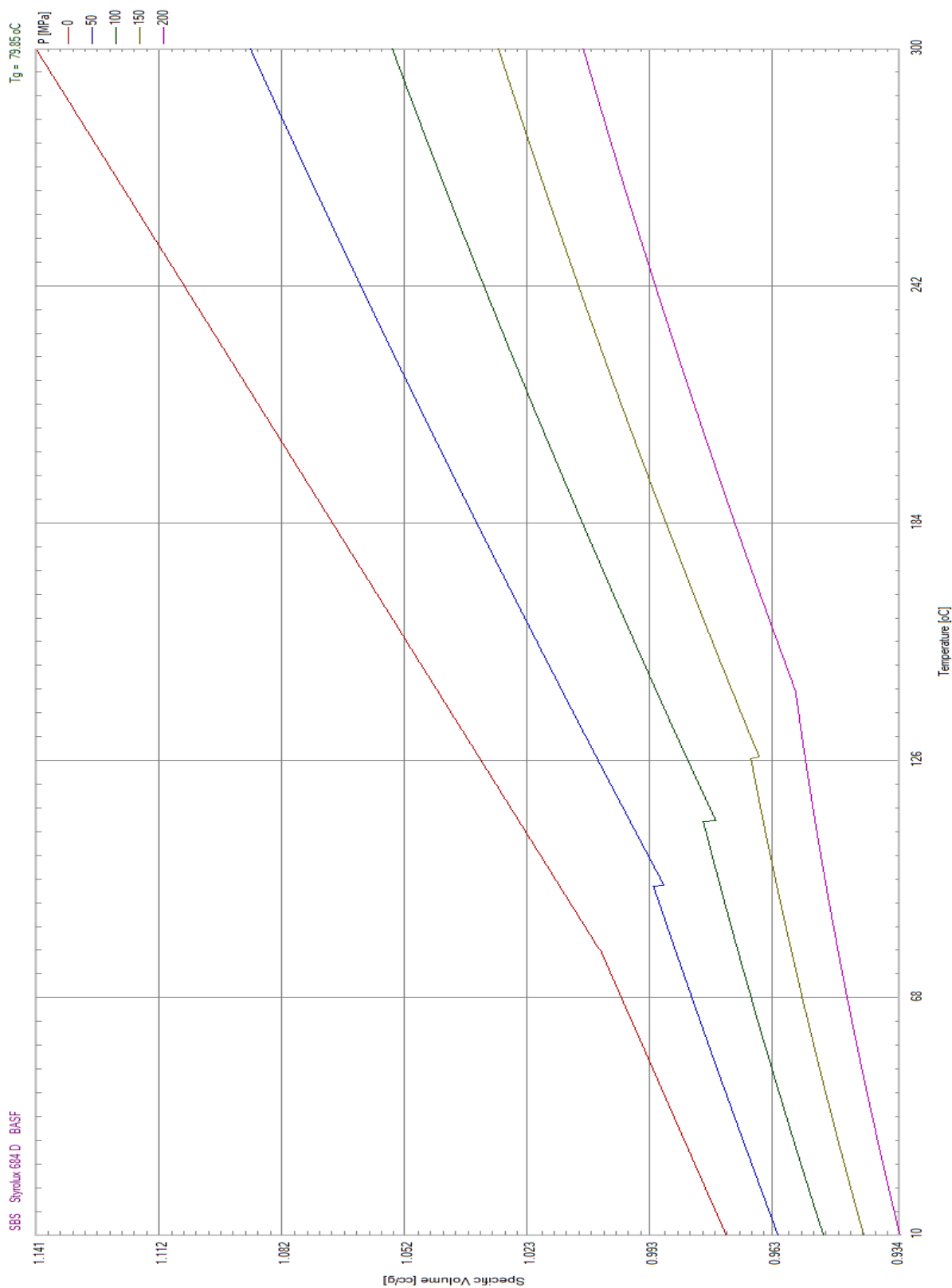
Kod njegovog određivanja rabi se p-V-T dijagram materijala. Dijagram je generiran iz podataka programskog paketa Moldex3D. (slika 76.)

Tlak u kalupnoj šupljini se određuje prema temperaturi otvaranja kalupa i temperaturi postojanosti oblika preporučenoj od strane proizvođača materijala. Pri otvaranju kalupa pretpostavlja se temperatura kalupne šupljine od 50°C. Pri toj temperaturi i tlaku od 0,1 MPa (1 bar), taljevina ima specifični volumen 1 cm³/g. Kod temperature postojanosti oblika od 99,85°C uz isti specifični volumen, nužno je u kalupu ostvariti tlak od 25 MPa (250 bar).

Minimalni potrebni tlak ubrizgavanja očitava se sa slike 76. te on iznosi 40,73 MPa. Stroj za injekcijsko prešanje "Ekou HS – 120 K3" prema slici 75. može ostvariti maksimalni tlak od 210 MPa te se time zadovoljava ovaj kriterij.

HS-150		A	B	C	
Jedinica za injekcijsko prešanje	Promjer vijka	mm	42	45	50
	Omjer L/D za vijak	L/D	19.8	18.5	16.7
	Teoretski volumen	cm ³	215	246	304
	Injekcijska masa(PS)	g	195	224	276
	Injekcijski tlak	Mpa	210	183	148
	Injekcijski tijek(PS)	g/s	90	103	127
	Kapacitet plastificiranja	g/s	14.8	18.6	24.2
Jedinica za stezanje	Brzina vijka	rpm	0-200		
	Sila zatvaranja	KN	1500		
	Osovinski razmak	mm	410X375		
	Put otvaranja	mm	350		
	Max.kalupna debljina	mm	400		
	Min.kalupna debljina	mm	175		
	Snaga izbacivača	KN	28		
Drugo	Put izbacivača	mm	110		
	Snaga motora	kW	15		
	Snaga zagrijavanja	kW	8.25		
	Volumen uljnog spremnika	L	270		
	Masa stroja	Ton	4.3		
Dimenzije stroja	m	4.5x1.2x1.8			

Slika 75. Karakteristike stroja za injekcijsko prešanje [23]



Slika 76. p, v, T dijagram

Proračun sile držanja kalupa: [8]

Sila držanja kalupa je sila kojom ubrizgavalica drži kalup zatvorenim tijekom ciklusa injekcijskog prešanja kako ne bi došlo do istjecanja taljevine iz kalupa i stvaranja neispravnih otpresaka. Računa se prema jednadžbi:

$$F = pK \cdot (S_{ot} + S_{us}) \cdot k \quad (2)$$

gdje je: F - sila držanja kalupa (N), pK - pritisak u kalupnoj šupljini u smjeru otvaranja kalupa (N/mm²), S_{ot} - površina otpreska (mm²), S_{us} - površina uljevnog sustava (mm²), k - faktor sigurnosti (1,1 do 1,2)

-tlak u kalupnoj šupljini, $pK = 25 \text{ N/mm}^2$

-površina otpresaka, $S_{ot} = 8430,81 \text{ mm}^2$

-površina uljevnog sustava, $S_{us} = 1993,9 \text{ mm}^2$

-faktor sigurnosti, $k = 1,1$

$$F = 25 \cdot (8430,81 + 1993,9) \cdot 1,1 = 286\,679,525 \text{ N} = 286,68 \text{ kN}$$

10.2.2. Mehanički proračun

Ovaj dio proračuna se sastoji od izračunavanja kinematike kalupa, dimenzioniranja pojedinih elemenata kalupa te određivanja pojedinih dijelova koji podnose mehanička opterećenja.

Proračun kinematike kalupa: [8]

Ovdje će se odrediti hod otvaranja kalupa za neometano vađenje otpreska kao i hod elemenata koji će izbacivati otpresak iz kalupne šupljine. Hod otvaranja kalupa se računa pomoću izraza:

$$h_{ok} = h_g + h_{op} + h_d \quad (3)$$

gdje je: h_g - visina grozda (mm), h_{op} - visina otpreska u pomičnom dijelu kalupa (mm), h_d - dodatno otvaranje kalupa (mm)

Visinu grozda h_g računamo pomoću:

$$h_g = h_o + h_u \quad (4)$$

gdje je: h_o - visina otpreska (m), h_u - visina uljevka (m)

Traženi podaci su:

$$h_o = 6.04 \text{ mm}$$

$$h_u = 60 \text{ mm}$$

$$h_{op} = 3.02 \text{ mm}$$

$$h_d = 4 \text{ mm}$$

Visina grozda je:

$$h_g = 6.04 + 60 = 66.04 \text{ mm}$$

Hod otvaranja kalupa iznosi:

$$h_{ok} = 66.04 + 3.02 + 4 = 73.06 \text{ mm}$$

Na temelju potrebnog hoda otvaranja kalupa i visine kalupa moguće je izračunati minimalni potrebni razmak između steznih ploča ubrizgavalice. Visina kalupa (ukupna visina svih kalupnih ploča) u ovom slučaju iznosi 186 mm. Minimalni potrebni razmak između steznih ploča tada iznosi:

$$H_{Umi} = h_{ok} + L_k \tag{5}$$

$$H_{Umi} = 73.06 + 186 = 259.06 \text{ mm}$$

11. ZAKLJUČAK

Injekcijsko prešanje jedan je od najvažnijih procesa prerade polimera u kojem postoji veliki broj faktora koji utječu na samu izradu ali i kvalitetu proizvoda, odnosno otpresaka. Promatrajući eksperimente ispitivanja koji su se proveli u radu može se zaključiti da je kalup jedan od najbitnijih faktora koji utječe na ponašanje polimerne taljevine za dobivanje proizvoda željenog oblika.

U radu je opisana izrada kalupa za ispitivanje popunjavanja polimerne mase na stroju za injekcijsko prešanje. Pri proizvodnji, veći fokus je stavljen na konstrukciju i izradu polimernih kalupa načinjenih pomoću postupka aditivne tehnologije. Također, provedena je računalna simulacija postupka injekcijskog prešanja u programskom paketu Moldex3D koja se koncentrirala na faze punjenja i naknadnog tlaka, te je detaljno opisan rad na programu. Prikazani su dijagrami navedenih faza simulacije te numerički proračun otpreska Arhimedove spirale.

Na stroju za injekcijsko prešanje pokušao se utvrditi vijek trajanja te trošenje polimernog kalupa. Kroz dva od ukupno tri slučaja ispitivanja popunjavanja polimerne mase, proučavala se pretpostavka o otpornosti kalupa aditivne tehnologije. U osamdesetak ciklusa prešanja i isto toliko otpresaka, polimerni kalup nije doživio neka značajnija oštećenja, te nije došlo do pucanja istog. Proučavajući navedenu literaturu može se reći da bi prosječni vijek trajanja kalupa načinjenog od postupka aditivne tehnologije iznosio ugrubo 100 ciklusa injekcijskog prešanja. Kod polimernih kalupa, vrijeme izrade je znatno kraće u usporedbi sa izradom aluminijskih kalupa, no, broj ciklusa injekcijskog prešanja kojeg aluminijski kalupi mogu izdržati puno je veći, teoretski čak i do deset puta više.

U današnje doba uvelike se teži razvitku i napretku proizvodnje, te se može zaključiti da prolaskom vremena konstruktori dolaze do sve boljih i kvalitetnijih rješenja izrade kalupa, kako standardnih metalnih, tako i novijih vrsta u vidu polimernih kalupa.

12. LITERATURA

- [1] Marijić, L.: Optimiranje konstrukcije kalupa za injekcijsko prešanje s pomoću računalne simulacije [diplomski rad], Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [2] Šimunić, N.: Završni rad, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2009.
- [3] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979> 8. 2021.
- [4] <https://hr.continuousdev.com/29381-stereolithography-sla-9290> 8. 2021.
- [5] Marinković, N.: Razvoj kalupa za injekcijsko prešanje polimernog ispitka [završni zadatak], Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2010.
- [6] Kućan, M.: Diplomski rad, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2010.
- [7] Vulinović, A.: Metodičko konstruiranje kalupa za injekcijsko prešanje postolja tabletnog računala [diplomski zadatak], Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.
- [8] Jelušić, B.: Metodičko konstruiranje kalupa za injekcijsko prešanje karike [diplomski rad], Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2020.
- [9] Briševac, D.: Proizvodnja gotovih proizvoda aditivnom tehnologijom [završni rad], Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2018.
- [10] Jurman, F.: Primjena aditivne proizvodnje u procesu razvoja novih proizvoda [završni rad], Pula: Politehnika Pula – Visoka tehničko – poslovna škola s pravom javnosti; 2017.
- [11] Netretić, D.: Aditivna proizvodnja [završni rad], Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2018.
- [12] Horvat, M.: Pregled aditivnih postupka proizvodnje [završni rad], Varaždin: Sveučilište Sjever; 2016.
- [13] Cernić, K. H.: 3D Printanje [završni rad], Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2018.
- [14] Godec, D.: Računalna simulacija procesa injekcijskog prešanja, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2006.
- [15] <https://3dglobesite.wordpress.com/2018/06/22/sto-je-sla-dlp-tehnologije-3d-ispisa/> 8.2021.
- [16] <https://www.ptonline.com/blog/post/metal-vs-polymer-3d-printed-mold-tooling-which-is-better> 9. 2021.
- [17] <https://diecasting.com/blog/die-casting-vs-injection-molding/> 9. 2021.

- [18] <https://all3dp.com/formlabs-form-2-review-price-sla-3d-printer/> 1. 2022.
- [19] Ljeljak, B.: Naprava za injekcijsko prešanje manjih polimernih dijelova, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [20] Milinković, J.: Hrapavost prototipova izrađenih SLS postupkom [završni rad], Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2019.
- [21] Magaš, D.: Optimiranje parametara pretrage, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [22] <http://www.ekou.com/mach1-2.asp> 6. 2022.
- [23] <http://www.ekou.com/hs1/hs-150.htm> 6. 2022.

13. PRILOG

1. Nacrt donje polovice aluminijskog kalupa
2. Nacrt gornje polovice aluminijskog kalupa
3. Nacrt donje polovice kalupa napravljenog pomoću postupka aditivne tehnologije za prvi slučaj injekcijskog prešanja
4. Nacrt gornje polovice kalupa napravljenog pomoću postupka aditivne tehnologije za prvi slučaj injekcijskog prešanja
5. Nacrt donje polovice kalupa napravljenog pomoću postupka aditivne tehnologije za drugi i treći slučaj injekcijskog prešanja
6. Nacrt gornje polovice kalupa napravljenog pomoću postupka aditivne tehnologije za drugi i treći slučaj injekcijskog prešanja