

UTICAJ HLADENJA ALATA ZA INJEKCIONO PRESOVANJE NA OTPRESAK INFLUENCE OF COOLING IN AN INJECTION MOLDING TOOL ON WARPAGE OF THE MOLDED PRODUCT

Nikola Tatarević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – MAŠINSTVO

Kratak sadržaj – Veliki uspeh injekcionog presovanja (IP) u najvećoj meri se zasniva na mogućnosti proizvodnje visokog broja kompleksnih delova u relativno malom vremenskom periodu. Glavni cilj ovog rada je ispitivanje uticaja hlađenja alata kako bi se procenile kvalitativne i ekonomske prednosti korišćenja umetka proizvedenog aditivnom tehnologijom.

Ključne reči: Injekciono presovanje plastike, Konformno hlađenje, Krivljenje

Abstract – Highly successful results of injection molding are mainly due to its ability to produce high amount of complex parts in a relatively short time. The main objective of this study was to examine the influence of mold cooling designs in order to evaluate the qualitative and economical benefits of using an additively manufactured core insert.

Keywords: Plastic injection molding, Conformal cooling, Warpage

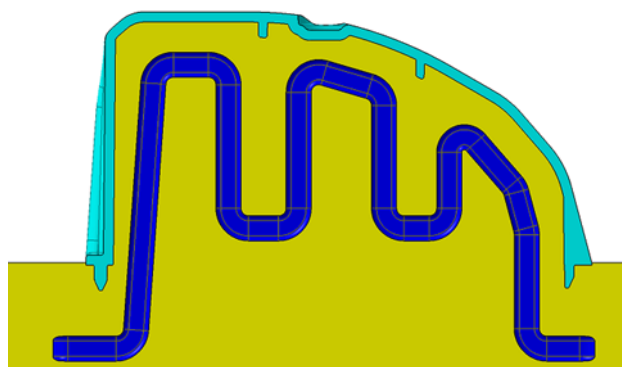
1. UVOD

Osnovni princip injekcionog presovanja jeste da se čvrsti polimer rastopi i ubrizga u šupljinu unutar kalupa i zatim se kao ohlađen deo izbacuje iz alata. Glavne faze u procesu injekcionog presovanja uključuju: punjenje, hlađenje i izbacivanje. Isplativost postupka, između ostalog, zavisi i od vremena provedenog u ciklusu presovanja. Pošto hlađenje predstavlja najduži deo ciklusa, jasno je da vreme hlađenja otpreska u najvećoj meri utiče na dužinu trajanja ciklusa, a samim tim i ekonomičnost proizvodnje. Sistem za hlađenje kod konvencionalnih alata sastoji se od sistema kanala i otvora unutar samog alata, kroz koje cirkuliše medijum za hlađenje (temperiranje) alata. Načini izrade ovih kanala oslanjaju se na konvencionalne metode izrade, npr. bušenje. Međutim, pomoću ovih tehnologija mogu se izraditi samo pravolinijski kanali što predstavlja veliki nedostatak u slučaju otpreska kompleksne geometrije. Konfiguracija kanala treba da prati geometriju otpreska (Slika 1).

U okviru ovog rada izvršena je analiza efikasnosti sistema za hlađenje alata za injekciono presovanje baziranog na primeni konformnih kanala i njegovo poređenje sa konvencionalnim tipom hlađenja. Radi se o alternativnom sistemu kod koga je geometrija kanala za hlađenje prilagođena obliku otpreska - prati liniju kalupne šupljine.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Mladimir Milutinović, vanr. prof.



Slika 1. Dizajn konformnih kanala na primeru alata kućišta antene

Pri definisanju kanala za hlađenje ovog sistema težilo se tome da kanali budu bliže površini kalupa, kako bi se toplota brže prenela na tečnost za temperiranje. Ovo osigurava da se deo hladi ravnomernije i efikasnije od konvencionalne metode. Analiza sistema hlađenja realizovana je na primeru alata za izradu kućišta antene putničkog automobila. Na osnovu funkcionalnog zahteva da štampana ploča, zbog orijentacije antene, bude postavljena vertikalno, dobijen je složeni oblik kućišta (Slika2) koji je veoma problematičan (netehnološki) za izradu postupkom injekcionog presovanja.



Slika 2. Kućište antene

Dimenzije dela od plastike igraju bitnu ulogu, pogotovo ukoliko će taj deo biti komponenta nekog sklopa. Kritične dimenzije, završni kvalitet površina, ravnost i drugi slični zahtevi moraju biti definisani zajedno sa realnim tolerancijama kako bi se obezbedio kvalitet otpreska. Cena izrade alata umnogome zavisi od veličine tolerancijskih polja. Pored kriterijuma ekonomičnosti procesa, u obzir je uzet i kvalitet proizvedenog dela.

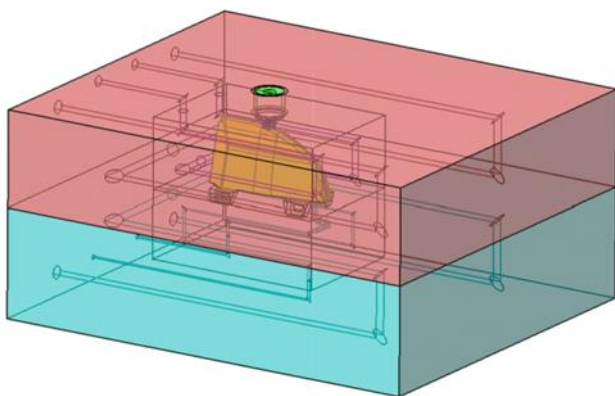
3. PRIPREMA CAE MODELA

Sprovedene analize bazirane su na primeni računarom podržanog inženjeringa (CAE) što je realizovano pomoću programskog paketa *Autodesk Moldflow Insight* u vidu simulacija. Ove simulacije bazirane su na metodi konačnih elemenata. MKE se zasniva na fizičkoj diskretizaciji razmatranog domena [1]. Tako se umesto elemenata diferencijalno malih dimenzija razmatra deo domena konačnih dimenzija tzv. konačni element.

Prvi postupak u analizi je formiranje modela u pripremnoj fazi. Ovim putem se stvara osmišljena, usklađena i povezana grupa konačnih elemenata kojom je opisan ispitivani kontinuum. Postoje četiri faze formiranja modela za analizu: formiranje geometrijskog modela, formiranje idealizovanog modela, formiranje modela zone i formiranje diskretnog modela.

Geometrijski model formira projektant alata. Ovaj model može da sadrži geometrijske elemente koji nemaju značaja za analizu jer ne utiču na ispitivan aspekt otpreska ili alata. Kako bi se smanjila potrebna snaga računara i postigla znatna ušteda vremena trajanja analize, formiraju se idealizovani modeli u kojima su odbačeni nevažni detalji.

Idealizovan model je uprošćen model koji ne mora da predstavlja celinu objekta ukoliko može da se njegovim simetričnim formama predstavi funkcija i način opterećenja celine (Slika 3). Idealizovan model se uvek formira sa zahtevom manjeg obima kontinuuma za analizu. Osnova razvoja racionalnih idealizovanih modela je apstrakcija. Apstrakcija je sagledavanje modela od strane analitičara kojom se postavlja koncept modela, uklanjaju detalji, prepoznaje simetrija, redukuje model i postavlja odgovarajuća opterećenja.



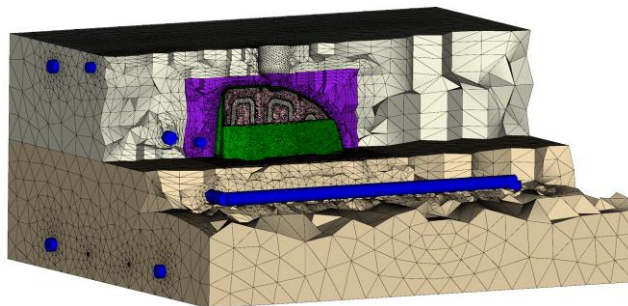
Slika 3. Idealizovan model alata korišćen za analizu

Model zona predstavlja idealizovan model raščlanjen na odgovarajuće segmente - zone koje dozvoljavaju podelu kontinuuma na konačne elemente prema standardnom-poznatom algoritmu generisanja ili preslikavanja.

Diskretni model se razvija na bazi modela zona i usklađenog broja elemenata konkretnih površina zona (Slika 4). On podrazumeva određivanje čvorova, konačnih elemenata, podataka o materijalu, opterećenju i graničnim uslovima. Diskretni model podrazumeva sva potrebna prilagođavanja mreže konačnih elemenata graničnim uslovima. Kao osnova za diskretizaciju u ovom radu izabrana je zapreminska vrsta konačnog elementa. Ova mreža se sastoji od čvrstih tetraedarskih (tetra)

elemenata gde svaki tetra element ima četiri trouglasta lica i šest stranica. Gde je bilo moguće, radi pojednostavljenja diskretizovanog modela, izabrani su elementi vrste grede za diskretizaciju kanala za hlađenje.

Nakon definisanja mreže konačnih elemenata, deo softvera (solver), rešava sistem jednačina koje se formiraju pomoću mreže konačnih elemenata. Nakon završenog proračuna saposst procesorskim operacijama mogu se vizualizovati rezultati analize (Slika 5). Kada je potrebno izdvojiti temperaturno kritične zone objekta (čiji model je rešen solverom) zadaje se kao uslov post - obrade rezultata analize. Na bazi ovog zahteva formira se slika kritičnih temperatura objekta sa obojenim kritičnim zonama.



Slika 4. Presek diskretizovanog modela alata sa integrisanim konformnim kanalima za hlađenje

3.2. Redosled analiza

Postupak dizajniranja kalupa započinje sa šupljinom, ispitivanjem mogućnosti položaja ušća i optimizacijom uslova unutar šupljine. Korišćenjem tog rasporeda ušća unose se korekcije sve dok uslovi unutar šupljine ne budu prihvatljivi.

Kada se optimizuje punjenje šupljine, može se analizirati sistem hlađenja otpreska. Generalno je cilj da se osmisli sistem hlađenja kalupa za ravnomerno izvlačenje toplote iz otpreska. Ovo će smanjiti vreme ciklusa dok se proizvode visokokvalitetni delovi.

Iako su punjenje i pakovanje (naknadni pritisak) usko povezani, pakovanje je najbolje optimizovati nakon analize hlađenja [2]. U fazi pakovanja dominira prenos toplote, dok u fazi punjenja dominira tok rastopa. Analiza hlađenja daje tačnu sliku o tome kako se toplota dela izdvaja, pa je najbolje optimizovati pakovanje dela nakon hlađenja.

Poslednji korak je utvrđivanje vitoperenja dela. Kada se deo pravilno analizira u prethodnim koracima, analiza vitoperenja potvrda je da je optimizacija dela i procesa dobro urađena.

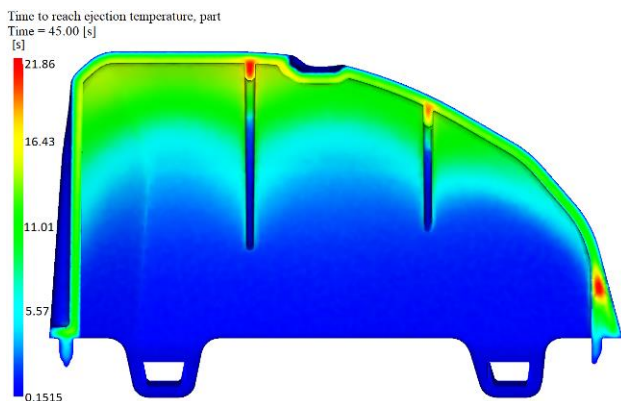
4. REZULTATI CAE ANALIZE

4.1 Analiza hlađenja alata za kućište antene

Kao jedan od rezultata analize hlađenja alata razmotriće se vreme potrebno da se dostigne temperatura izbacivanja (Slika 5 i Slika 6). U poprečnom preseku simuliranog otpreska prikazane su različitim bojama potrebna vremena za očvršćavanje dela.

Kod rezultata simulacije alata sa konvencionalnim sistemom hlađenja bitno je uočiti vreme potrebno za dostizanje temperature izbacivanja na vrhu umetka jezgra (Slika 5). Potrebno je preko 13 sekundi da očvrstne

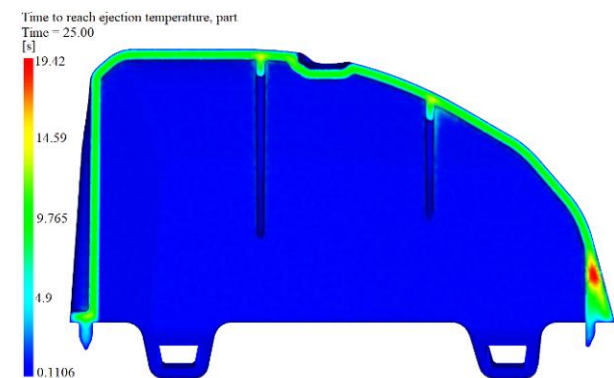
površinski sloj otpreska, dok je sa suprotne strane alata potrebno svega 0,3 sekunde. Na određenim mestima sa povećanom debljinom materijala potrebno je i preko 25 sekundi da otpresak očvrstne. Ove zone nisu glavni problem, jer je generalno moguće izbaciti otpresak nakon očvršćavanja više od 98% zapremine rastopa.



Slika 5. Vreme potrebno za očvršćavanje plastike, poprečni presek konvencionalno hlađenog otpreska

Kod rezultata simulacije alata sa konformnim sistemom hlađenja korišćene su isti polazni uslovi, s tim da je vreme ciklusa 25 s. Vreme ciklusa moguće je smanjiti zbog mnogo efikasnijeg odvođenja toplote koja se u ovoj izvedbi alata mnogo kraće zadržava na vrhu umetka jezgra.

Kao i kod analize prelazne temperature alata sa konvencionalnim hlađenjem, i kod konformno hlađenog alata prikazano je vreme potrebno za dostizanje temperature izbacivanja. Slika 6 ilustruje da je prosečno vreme za očvršćavanje otpreska oko 10 sekundi i da se ono dešava ravnomerno sa obe strane alata. Još uvek je na određenim mestima sa povećanom debljinom materijala potrebno znatno više vremena od proseka (25 sekundi) da otpresak očvrstne.



Slika 6. Vreme potrebno za očvršćavanje plastike, poprečni presek konformno hlađenog otpreska

4.2 Analiza skupljanja i vitoperenja kućišta antene

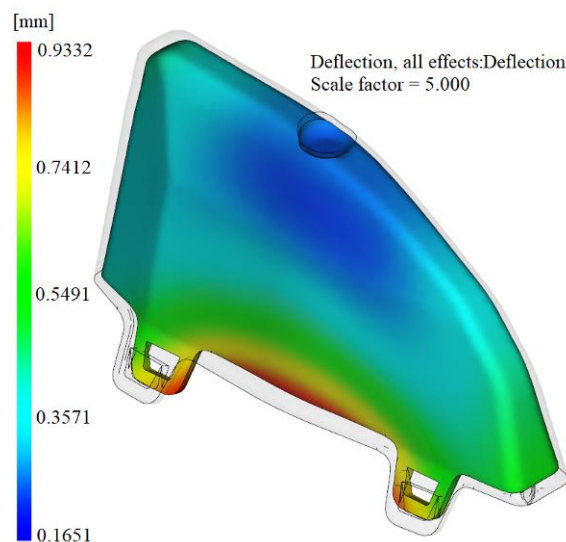
Za ulazne podatke ove analize, pored svojstva materijala preuzetih iz baze podataka programa, korišćene su i vrednosti iz prethodnih analiza. Iz analize *Prelazna temperatura unutar ciklusa* (Eng. *Transient within cycle* [2]) preuzete su temperaturne vrednosti alata, rastopa i okoline, dok su iz analize punjenja uzete vrednosti pritiska, naknadnog pritiska i dužine procesa ubrizgavanja.

Kao rezultat analize dobija se vrednost odstupanja od geometrije alata. Prilikom pripreme simulacije izabrana je opcija dekompozicije odstupanja na svoje uzroke, stoga se ukupno odstupanje može razložiti na vitoperenje usled diferencijalnog skupljanja i na vitoperenje usled diferencijalnog hlađenja.

Kada je u pitanju vitoperenje usled diferencijalnog skupljanja, rezultat prikazuje već sabrano standardno zapreminsko skupljanje sa skupljanjem usled promene geometrije otpreska. Pošto izabrani materijal u sebi ne sadrži nikakve dodatke (poput staklenih ili ugljeničnih vlakana), nije potrebno raditi analizu vitoperenja usled efekta orijentacije.

Slika 7 prikazuje celokupno odstupanje geometrije otpreska u odnosu na geometriju alata sa konvencionalnim sistemom hlađenja. Može se zaključiti da maksimalno odstupanje dostiže vrednost i do 0,93mm na sredini dela, pretežno usled diferencijalnog hlađenja alata.

Mora se proveriti da li dobijene dimenzije ispunjavaju dozvoljene tolerancije zadate od strane konstruktora plastičnog dela. U nekim slučajevima, kada se ove devijacije ne mogu umanjiti, konstruktori alata namerno konstruišu dodatno odstupanje alata u suprotnom smeru od očekivanog vitoperenja kako bi se otpresak nakon proizvodnje deformisao u željeni oblik. Ova metoda se zove kontra-vitoperenje (Eng. *Pre-warpage*).

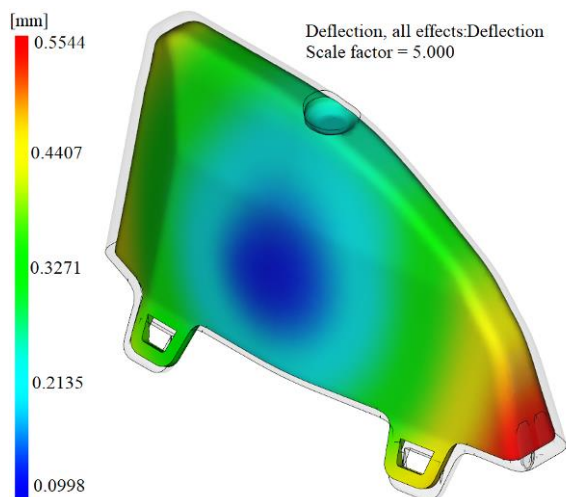


Slika 7. Prikaz svih odstupanja u odnosu na model konvencionalno hlađenog alata

Slika 8 prikazuje celokupno odstupanje geometrije otpreska u odnosu na geometriju alata sa konformnim sistemom hlađenja. Međutim, za razliku od rezultata konvencionalno hlađenog alata, najveće odstupanje se uočava na prednjem delu otpreska.

Razlog je to što se kod ove uvedbe alata gotovo potpuno eliminiše vitoperenje usled diferencijalnog hlađenja.

U tabeli 1 mogu se videti rezultati analize skupljanja i vitoperenja. Može se videti da je u slučaju konformnog hlađenja značajno redukovano vitoperenje otpreska nakon hlađenja i vađenja iz alata čime se obezbeđuje i bolji kvalitet otpreska u odnosu na konvencionalno hlađenje.



Slika 8. Prikaz svih odstupanja u odnosu na model konformno hlađenog alata

Tabela 1. Poređenje rezultata deformacije otpreska

Vrsta analize	Konvencionalno hlađen alat [mm]	Konformno hlađen alat [mm]
Maksimalno odstupanje usled diferencijalnog hlađenja	0,42	0,05
Maksimalno odstupanje usled diferencijalnog skupljanja	0,59	0,55
Ukupno odstupanje	0,93	0,55

5. ZAKLJUČAK

Konformno hlađenje alata za injekciono presovanje može biti atraktivna alternativa za poboljšanje kvaliteta otpreska, smanjenje vremena ciklusa i potrošnje energije. Međutim, upotreba ovakvog sistema za hlađenje je opravdana pri visokoserijskoj proizvodnji zbog visokih troškova izrade.

U radu je prikazan dizajn alata sa konformnim kanalima i upoređen je sa konvencionalnim sistemom hlađenja alata. Analizirana je efikasnost ova dva sistema i razmotreni su rezultati. Bitno je posebno napomenuti sledeće:

- Prednosti konformnog hlađenja najbolje se ističu kada otpresak ima duboku geometriju jer pravolinijski kanali za hlađenje ne mogu postići adekvatnu razmenu toplote.
- Srednje temperaturne vrednosti alata znatno su niže kod izvedbe alata sa konformnim kanalima za hlađenje.
- Vreme ciklusa je kraće za približno 44% ukoliko se koristi dizajn sa konformnim kanalima. Takođe je potreban manji broj ciklusa od početka proizvodnje da bi se postigla temperaturna stabilnost alata.
- Predloženi dizajn alata sa konformnim kanalima za hlađenje pokazao se kao optimalnije rešenje za postizanje visokog kvaliteta otpreska. Celokupna deformacija otpreska smanjena je zbog znatno nižih deformacija uzrokovanih diferencijalnim hlađenjem.

Na osnovu rezultata može se zaključiti da je ova metoda hlađenja alata optimalnije rešenje u pogledu troškova proizvodnje i kvaliteta otpreska. Sledeći korak bio bi izrada ovog alata kako bi se potvrdili rezultati simulacija i dodatno optimizovala simulacija sa realnijim ulaznim podacima.

6. LITERATURA

- [1] Vladić, J., (2011) Kompjutersko projektovanje (skripta), Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
 [2] Shoemaker, J., (2006) Moldflow Design Guide

Kratka biografija:



Nikola Tatarević rođen je u Novom Sadu 1993. god. Diplomski-master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mašinstva – Proizvodno mašinstvo odbranio je 2021. god.