

Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog otpreska

Godec, Damir

Doctoral thesis / Disertacija

2005

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:616066>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-02**

Repository / Repozitorij:

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

UTJECAJ HIBRIDNOG KALUPA NA SVOJSTVA
INJEKCIJSKI PREŠANOG PLASTOMERNOG OTPRESKA

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. MLADEN ŠERCER

DAMIR GODEC

ZAGREB, 2005.

PODATCI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 621.7, 678.027.7

Ključne riječi: injekcijsko prešanje plastomera, tankostjeno injekcijsko prešanje, brza izradba prototipova, brza izradba kalupa, hibridni kalup, računalna simulacija, eksperimentalna analiza

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb

Mentor: Prof. dr.sc. Mladen Šercer

Broj stranica: 248

Broj slika: 104

Broj tablica: 116

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 182

Datum obrane: 23.11.2005.

Povjerenstvo: Dr.sc. Igor Čatić, red. prof. (FSB, Zagreb)

Dr.sc. Mladen Šercer, red.prof. (FSB, Zagreb)

Dr.sc. Pero Raos, red.prof. (Strojarski fakultet, Sl. Brod)

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje,
Sveučilište u Zagrebu

ZAHVALE

Prof. dr.sc. Mladenu Šerceru zahvaljujem na stručnom vođenju kroz izradbu rada kao i na korisnim savjetima za oblikovanje rada.

Posebice se zahvaljujem prof. dr.sc. Igoru Čatiću na savjetima i podršci pri izradbi rada bez kojih bi rad bio daleko siromašniji.

Također se zahvaljujem prof. dr.sc. Peri Raosu na razumijevanju i korisnim primjedbama koje su povisile razinu kvalitete rada.

Eksperimentalni dio rada oblikovan je uz konzultacije s prof. dr.sc. Nikolom Šakićem na čemu mu se posebno zahvaljujem.

Gospodi Erichu Doetchu i Hervigu Knuthu (*3D System*) i Stépahneu Morvanu (*ExtrudeHone*) zahvaljujem se na donaciji prototipnih kalupnih umetaka s pomoću kojih su načinjeni pokusi. Tvrtkama *Drenoplast* i *Bra-Kom* zahvaljujem na izradbi klasičnih kalupnih umetaka, kao i na prilagodbi prototipnih umetaka kućištu kalupa.

Tvrtkama *Borealis A-S* i *Veson-plast* zahvaljujem na donaciji polipropilena s pomoću kojeg su načinjeni pokusi.

Prof. dr.sc. Janezu Indofu i kolegi Boži Bušetinčanu posebno se zahvaljujem na velikoj pomoći pri određivanju mehaničkih svojstava otpresaka.

Kolegama s Katedre za preradu polimera zahvaljujem na suradnji, korisnim savjetima, pomoći i razumijevanju tijekom izradbe rada. Posebno se zahvaljujem kolegi Miodragu Kataleniću na pomoći pri grafičkom uređivanju rada.

Konačno, posebno se zahvaljujem supruzi Željki na strpljenju te svojim roditeljima na velikoj podršci.

*Slika govori više od 1 000 riječi
- model priča cijelu priču*

Andreas Gebhardt

SADRŽAJ

PREDGOVOR	I
SAŽETAK	II
KLJUČNE RIJEČI	II
SUMMARY	III
KEYWORDS	III
POPIS OZNAKA	IV
POPIS SLIKA	IX
POPIS TABLICA	XII
1 UVOD	1
2 HIPOTEZA RADA	2
3 INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERA	4
3.1 KLASIČNO INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERA	4
3.1.1 Najvažniji parametri procesa injekcijskog prešanja	8
3.1.1.1 <i>Tlak ubrizgavanja</i>	8
3.1.1.2 <i>Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje</i>	8
3.1.1.3 <i>Tlak u kalupnoj šupljini</i>	10
3.1.1.4 <i>Preklapanje na naknadni tlak</i>	11
3.1.1.5 <i>Naknadni tlak (naknadni tlak u kalupnoj šupljini)</i>	12
3.1.1.6 <i>Temperatura taljevine</i>	13
3.1.1.7 <i>Temperatura stijenke kalupne šupljine</i>	13
3.1.1.8 <i>Temperatura medija za temperiranje</i>	15
3.1.1.9 <i>Brzina (protok) medija za temperiranje</i>	16
3.1.1.10 <i>Brzina ubrizgavanja (vrijeme ubrizgavanja)</i>	17
3.1.1.11 <i>Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka</i>	17
3.1.1.12 <i>Vrijeme hlađenja otpreska</i>	18
3.1.1.13 <i>Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja</i>	19
3.1.2 Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na svojstva otpreska	19
3.1.2.1 <i>Dimenzijska stabilnost otpreska</i>	21
3.1.2.2 <i>Mehanička svojstva otpreska</i>	21
3.2 TANKOSTJENO INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERA	25
4 OSNOVE RAČUNALNE SIMULACIJE PROCESA INJEKCIJSKOGA PREŠANJA	29
4.1 DEFINIRANJE SIMULACIJSKOG MODELA	30
4.2 DEFINIRANJE PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA	32
4.3 SIMULACIJA PROCESA INJEKCIJSKOGA PREŠANJA	34
4.4 ANALIZA I RASPRAVA O REZULTATIMA RAČUNALNE SIMULACIJE	35

4.4.1	Analiza rezultata simulacije faze punjenja kalupne šupljine	35
4.4.2	Analiza rezultata simulacije faze djelovanja naknadnog tlaka	37
4.4.3	Analiza rezultata simulacije faze očvršćivanja otpreska (hlađenje)	38
4.4.4	Analiza rezultata simulacije deformiranja otpreska u kalupu	40
4.4.4.1	Stežanje tijekom faze punjenja i djelovanja naknadnog tlaka	40
4.4.4.2	Stežanje tijekom procesa hlađenja otpreska	40
4.4.4.3	Stežanje nakon vađenja iz kalupne šupljine	41
4.4.4.4	Čimbenici koji utječu na stežanje otpreska	41
4.5	OPTIMIRANJE PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA	42
5	POSTUPCI BRZE PROIZVODNJE TVOREVINA	44
5.1	ULOGA POSTUPAKA BRZE PROIZVODNJE TVOREVINA PRI RAZVOJU PROIZVODA	44
5.2	POSTUPCI BRZE IZRADBE PROTOTIPOVA	50
5.2.1	Stereolitografija (e. <i>Stereolithography</i> - SL/SLA)	52
5.2.2	Selektivno lasersko srašćivanje (e. <i>Selective Laser Sintering</i> - SLS)	54
5.2.3	3D tiskanje (e. <i>3D Printing</i> - 3DP)	55
5.2.4	Višezlazno oblikovanje (e. <i>Multi Jet Modeling</i> - MJM)	56
5.2.5	Hibridni postupak 3D tiskanja i stereolitografije (OBJET)	57
5.2.6	Taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling</i> - FDM)	58
5.2.7	Laminiranje (e. <i>Laminated Object Manufacturing</i> - LOM)	60
5.2.8	Tonografski postupak (SGC)	61
5.2.9	Izrada taloženjem oblika (e. <i>Shape Deposition Manufacturing</i> - SDM)	63
5.3	POSTUPCI BRZE IZRADBE (ELEMENATA) KALUPA	64
5.3.1	Izravna izradba epoksidnih dijelova kalupa (e. <i>Direct ACES IM</i> - AIM)	65
5.3.2	3D Keltool postupak	66
5.3.3	Selektivno lasersko srašćivanje metala (SLS)	67
5.3.3.1.	<i>Copper-PA postupak</i>	69
5.3.3.2.	<i>DMLS i IMLS postupci</i>	70
5.3.4	3D tiskanje metala (ProMetal postupak)	73
5.3.5	Kontrolirana izradba metalnih dijelova (e. <i>Controlled Metal Build-up</i> - CMB)	74
5.3.6	Izravno taloženje metala (e. <i>Laser Engineering Net Shaping</i> - LENS)	75
5.3.7	Izravno taloženje metalnog praha (e. <i>Direct Metal Deposition</i> - DMD)	76
5.3.8	Izravna izrada kalupne ljuske (e. <i>Direct Shell Production Casting</i> - DSPC)	77
5.3.9	Taljenje s pomoću snopa elektrona (e. <i>Electron Beam Melting</i> - EBM)	77
5.3.10	Laminiranje (LOM)	78
5.3.11	Izradba kalupa od mješavina epoksidne smole i metala (e. <i>Metal Filled Epoxy Tooling</i>)	79
5.3.12	Višefazno mlazno očvršćivanje (e. <i>Multiphase Jet Solidification</i> - MJS)	80
5.3.13	Izradba kalupa naštrcavanjem metala (e. <i>Spray Metal Tooling</i> - SMT)	80
5.3.15	Lasersko generiranje (e. <i>Laser Generating</i> - LG)	81
5.3.16	Brzo očvršćivanje (e. <i>Rapid Solidification Process</i> - RSP)	81
5.3.17	OptoForm postupak izrade kalupa	82
5.3.18	Proizvodnja silikonskih kalupa (RTV kalupi)	83

5.3.19	Selektivno lasersko taljenje (e. <i>Selective Laser Melting - SLM</i>)	84
5.4	IZBOR OPTIMALNOG POSTUPKA BRZE PROIZVODNJE TVOREVINA	85
6	UTJECAJ MATERIJALA STIJENKE KALUPNE ŠUPLJINE NA PROCES INJEKCIJSKOG PREŠANJA	89
6.1	MATERIJALI ZA IZRADU ELEMENATA STIJENKI KALUPNE ŠUPLJINE	89
6.2	KRITERIJI IZBORA MATERIJALA STIJENKE KALUPNE ŠUPLJINE	91
6.2.1	Primarni faktori izbora materijala stijenke kalupne šupljine	92
6.2.2	Eksploatacijski faktori izbora materijala stijenke kalupne šupljine	93
6.2.3	Faktori izbora materijala stijenke kalupne šupljine ovisni o izradbenim postupcima	94
6.2.4	Utjecaj procesa injekcijskog prešanja na izbor materijala	95
6.2.4.1	<i>Potrebna svojstva otpreska</i>	95
6.2.4.2	<i>Toplinska prohodnost i specifični toplinski otpor materijala stijenke kalupne šupljine</i>	96
6.2.4.3	<i>Utjecaj materijala stijenke kalupne šupljine na vrijeme hlađenja otpreska ..</i>	97
6.2.4.4	<i>Osjetljivost temperaturnog polja kalupa na zastoje</i>	99
7	KRITIČKI OSVRT NA DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA UTJECAJA PROTOTIPNIH KALUPA NA SVOJSTVA OTPRESKA	100
8	SISTEMATIZACIJA POSTUPAKA BRZOG PRAVLJENJA TVOREVINA	104
9	EKSPERIMENTALNI I SIMULACIJSKI DIO	109
9.1	CILJ ISTRAŽIVANJA	109
9.2	OPIS SUSTAVA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE	110
9.2.1	Izbor karakterističnog predstavnika tankostjenog otpreska	110
9.2.2	Izbor plastomernog materijala	112
9.2.3	Kalup za injekcijsko prešanje	113
9.2.4	Prototipni kalupni umetci	115
9.2.5	Ubrizgavalica	117
9.2.6	Mjerna oprema	118
9.2.6.1	<i>Mjerna stanica</i>	118
9.2.6.2	<i>Osjetilo temperature</i>	118
9.2.6.3	<i>Programski paket za obradbu podataka</i>	118
9.2.6.4	<i>Instrument za mjerenje udarne radnje loma</i>	119
9.2.6.5	<i>Oprema za mjerenje izmjera otpreska</i>	119
9.2.6.6	<i>Oprema za mjerenje mase otpresaka</i>	119
9.3	IZBOR PODESIVIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA	120
9.4	IZBOR KARAKTERISTIČNIH SVOJSTAVA OTPRESKA	121
9.4.1	Masa otpreska	121
9.4.2	Dimenzijska stabilnost otpreska	121
9.4.3	Deformacija otpreska	122
9.4.4	Rastezna žilavost otpreska	122
9.5	POČETNA SIMULACIJA TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA	123
9.6	PROVEDBA POKUSA	128

9.6.1	Strategija provedbe analiza i pokusa	128
9.6.1.1	<i>Analiza sposobnosti procesa</i>	130
9.6.1.2	<i>Frakcionirani faktorski plan pokusa (na dvije razine)</i>	132
9.6.1.3	<i>Centralno-kompozitni plan pokusa</i>	133
9.6.2	Analiza sposobnosti injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu	135
9.6.2.1	<i>Provedba analize sposobnosti injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu</i> ...	135
9.6.2.2	<i>Rezultati analize sposobnosti injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu</i> ...	135
9.6.3	Pretpokus - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu	138
9.6.3.1	<i>Provedba pretpokusa - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu</i>	138
9.6.3.2	<i>Rezultati pretpokusa - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu</i>	140
9.6.4	Pokus - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (hibridni kalup) ...	143
9.6.4.1	<i>Provedba pokusa - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (hibridni kalup)</i>	144
9.6.4.2	<i>Rezultati pretpokusa - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (hibridni kalup)</i>	145
9.6.5	Pokus - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu	145
9.6.5.1	<i>Provedba pokusa - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu</i>	145
9.6.5.2	<i>Rezultati pokusa - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu</i>	147
9.6.6	Računalna simulacija - pokus (hibridni kalup)	152
9.6.7	Pokus - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (klasični kalup)	154
9.6.7.1	<i>Provedba pokusa - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (klasični kalup)</i>	154
9.6.7.2	<i>Rezultati pokusa - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (klasični kalup)</i>	154
9.6.8	Pokus - injekcijsko prešanje u klasičnom kalupu	155
9.6.8.1	<i>Provedba pokusa - injekcijsko prešanje u klasičnom kalupu</i>	156
9.6.8.2	<i>Rezultati pokusa - injekcijsko prešanje u klasičnom kalupu</i>	156
9.6.9	Računalna simulacija - pokus (klasični kalup)	161
9.6.10	Optimiranje parametara prerade	163
9.6.10.1	<i>Optimiranje parametara prerade u klasičnom kalupu</i>	163
9.6.10.2	<i>Optimiranje parametara prerade u hibridnom kalupu (prema klasičnom kalupu)</i>	165
9.6.11	Analiza osjetljivosti hibridnog i klasičnog kalupa na zastoje	168
9.6.11.1	<i>Provedba analize osjetljivosti kalupa na zastoje</i>	168
9.6.11.2	<i>Rezultati analize osjetljivosti kalupa na zastoje</i>	169
10	RASPRAVA	170
10.1	RASPRAVA O REZULTATIMA ANALIZE SPOSOBNOSTI TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA U HIBRIDNOM KALUPU	170
10.2	RASPRAVA O REZULTATIMA PRETPOKUSA - TANKOSTJENO INJEKCIJSKO PREŠANJE U HIBRIDNOM KALUPU	171
10.3	RASPRAVA O REZULTATIMA POKUSA - TANKOSTJENO INJEKCIJSKO PREŠANJE U HIBRIDNOM KALUPU	175
10.4	RASPRAVA O REZULTATIMA POKUSA - TANKOSTJENO INJEKCIJSKO PREŠANJE U KLASIČNOM KALUPU	179

10.5 RASPRAVA O PRIMJENJIVOSTI RAČUNALNE SIMULACIJE TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA U HIBRIDNOM I KLASIČNOM KALUPU	185
10.6 RASPRAVA O OPTMIRANJU PARAMETARA TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA U HIBRIDNOM I KLASIČNOM KALUPU	192
10.7 RASPRAVA O REZULTATIMA ANALIZE OSJETLJIVOSTI HIBRIDNOG I KLASIČNOG KALUPA NA ZASTOJE	196
10.8 KRITIKA VLASTITOG RADA I POTICAJ BUDUĆEM RADU	197
11 ZAKLJUČAK	201
12 LITERATURA	203
13 PRILOZI	212
13.1 EKSPERIMENTALNI OTPRESAK I KALUP	213
13.2 VRIJEDNOSTI MJERENJA IZ ANALIZE SPOSOBNOSTI PROCESA.....	215
13.3 VRIJEDNOSTI MJERENJA IZ PRETPOKUSA - HIBRIDNI KALUP	218
13.4 VRIJEDNOSTI MJERENJA PRI ODREĐIVANJU MAKSIMALNOG VREMENA DJELOVANJA NAKNADNOG TLAKA (HIBRIDNI KALUP)	223
13.5 VRIJEDNOSTI MJERENJA IZ POKUSA - HIBRIDNI KALUP	224
13.6 VRIJEDNOSTI MJERENJA PRI ODREĐIVANJU MAKSIMALNOG VREMENA DJELOVANJA NAKNADNOG TLAKA (KLASIČNI KALUP).....	235
13.7 VRIJEDNOSTI MJERENJA IZ POKUSA - KLASIČNI KALUP	236
13.8 REZULTATI MJERENJA PRI OPTIMIRANJU PARAMETARA PRERADE (HIBRIDNI KALUP)	246
13.9 ANALIZA OSJETLJIVOSTI KALUPA NA ZASTOJE.....	247
ŽIVOTOPIS	249
BIOGRAPHY	250

PREDGOVOR

Područje brze proizvodnje tvorevina predstavlja jedan od pokušaja odgovora na zahtjeve tržišta koja su sve više orijentirana potrebama i zahtjevima kupaca nego li masovnoj proizvodnji. Pri tome je ključni parametar vrijeme potrebno za uspješnim udovoljavanjem tih zahtjeva. Pri razvoju proizvoda postupci brze izradbe prototipova omogućili su bitno skraćenje vremena razvoja proizvoda te razvoj većeg broja inačica proizvoda. Međutim kada je u pitanju potreba za prototipnom ili maloserijskom proizvodnjom, ti postupci su još uvijek prespori, a način izradbe prototipova uglavnom se razlikuje od stvarnih procesa izradbe tvorevina (npr. injekcijskog prešanja) što dovodi do razlika u svojstvima tvorevina. Stoga se nameće potreba za primjenom postupaka brze proizvodnje tvorevina u cilju izradbe prototipnih alata (kalupa) u kojima je omogućena brža izradba uz parametre slične klasičnim postupcima izradbe. Kako su zahtjevi koji se nameću pri razvoju prototipnih alata daleko oštriji nego li pri razvoju prototipova, danas je na tržištu prisutno vrlo malo postupaka brze izradbe alata koji udovoljavaju tim zahtjevima.

Kada se analiziraju prototipni alati uglavnom su istraživanja usmjerena ka procjeni trajnosti alata, brzini izradbe, kvaliteti površinâ i dimenzijskoj točnosti i preciznosti. Na području brze izradbe kalupa za injekcijsko prešanje polimera vrlo je malo istraživanja usmjereno ka analizi utjecaja prototipnih kalupa na svojstva otpresaka. Većina tih istraživanja bavi se analizom utjecaja prototipnih kalupa načinjenih od materijala bitno različitih svojstava od klasičnih kalupnih materijala (čelika). S druge strane razvoj na području brze izradbe kalupa rezultirao je izdvajanjem nekoliko postupaka kao najprihvatljivijih u tu svrhu, pri čemu se u svim slučajevima rabe materijali na bazi čelika.

Analizom dostupne literature utvrđeno je kako su podatci o utjecaju metalnih prototipnih kalupa na svojstva otpresaka vrlo ograničeni što je bio temeljni poticaj izradbi doktorske disertacije. Na temelju usporedbe s rezultatima dobivenim s pomoću klasičnog kalupa pokušalo se također definirati smjernice za podešavanje parametara preradbe s pomoću prototipnih kalupa u cilju postizanja otpresaka usporedive kvalitete. Analizom je obuhvaćen postupak tankostjenog injekcijskog prešanja plastomera.

Zagreb, listopad 2005.

Mr.sc. Damir Godec

SAŽETAK

Tema disertacije je analiza utjecaja hibridnog (prototipnog) kalupa na svojstva plastomernog tankostjenog otpreska načinjenog injekcijskim prešanjem. Postupci brze izradbe kalupa omogućuju izradbu prototipnih kalupnih umetaka u vrlo kratkom vremenu, no uslijed razlike u svojstvima materijala tih umetaka i načinu njihove izradbe dolazi do odstupanja u svojstvima otpresaka u usporedbi s otprescima načinjenim u klasičnom kalupu. Stoga disertacija obuhvaća usporednu analizu utjecaja oba kalupa na svojstva otpresaka i zavisne parametre preradbe. Računalna simulacija postupka klasičnog injekcijskog provjerena je kao učinkovit alat za predviđanje parametara preradbe te nekih svojstava otpresaka. Područje njene primjene pri tankostjenom injekcijskom prešanju nedovoljno je istraženo pa je u okviru rada analizirana njena primjenjivost u tom slučaju. S pomoću računalne simulacije predviđana su zbivanja u oba kalupa, te su definirani početni parametri preradbe za provedbu pokusa. S pomoću eksperimentalne analize utvrđen je utjecaj pojedinih parametara preradbe i vrste kalupnih umetaka na svojstva otpreska pri čemu su postignuta svojstva otpresaka načinjenih u hibridnim kalupu nešto niža u usporedbi sa svojstvima otpresaka načinjenih u klasičnom kalupu (deformacije otpresaka i rastezna žilavost). U cilju približavanja svojstava otpresaka načinjenih u hibridnom i klasičnom kalupu, provedeno je optimiranje signifikantnih nezavisno podesivih parametara u slučaju hibridnog kalupa. Rezultat optimiranja je bitno smanjenje početno postignutih razlika u svojstvima otpresaka. Eksperimentalna analiza također je omogućila uvid u primjenjivost računalne simulacije za tankostjeno injekcijsko prešanje u klasičnom i hibridnom kalupu. Općenito simulacija rezultira zadovoljavajućim rezultatima osim pri predviđanju deformacija otpreska. Disertacija je obuhvatila i analizu osjetljivosti oba kalupa na zastoje u radu, pri čemu se kao neznatno osjetljivijim pokazao hibridni kalup.

KLJUČNE RIJEČI

injekcijsko prešanje plastomera, tankostjeno injekcijsko prešanje, brza izradba prototipova, brza izradba kalupa, hibridni kalup, računalna simulacija, eksperimentalna analiza

SUMMARY

The subject of this thesis is the analysis of the influence of a hybrid (prototype) mould on thin-wall thermoplastic moulded parts produced by injection moulding. Rapid Tooling procedures enable the manufacturing of mould inserts in very short time, but due to differences in material properties of these inserts as well as in the way of their manufacturing, there are certain deviations in the properties of moulded parts in comparison with parts produced in a classical mould. Therefore, this thesis emphasizes a comparative analysis of the influence of both moulds on moulded part properties and dependent processing parameters. Computer simulation of the classical injection moulding process has already been proved as a very useful tool for the prediction of processing parameters and some moulded part properties. The field of application of simulation in the case of thin-wall injection moulding has not been enough investigated yet, so the analysis of its application in this field was performed in the thesis. Computer simulation was used for the prediction of occurrences in both moulds as well as for the definition of initial processing parameters. Experimental analysis was used for the determination of the influence of a single injection moulding parameter on moulded part properties. The analysis has shown that the application of a hybrid mould results in lower moulded part properties in comparison with properties of parts produced in a classical mould (moulded part deformation and impact resistance). In order to make the properties of parts produced in a hybrid mould closer to those produced in a classical mould, in the case of a hybrid mould, an optimization of significant independent adjustable processing parameters has been performed. The optimization results in an obvious decreasing of initial differences in moulded part properties. Experimental analysis also enabled a review of the applicability of computer simulation for thin-wall injection moulding in classic and hybrid moulds. Generally, simulation results with satisfactory data, except in the prediction of moulded part deformation. This thesis also emphasizes the analysis of the sensitivity of both mould types on delays during mould operation. A hybrid mould was recognized as slightly more sensitive in comparison with a classic mould.

KEYWORDS

injection moulding of thermoplastics, thin-wall injection moulding, rapid prototyping, rapid tooling, hybrid mould, computer simulation, experimental analysis

POPIS OZNAKA I KRATICA

OZNAKE

Oznaka	Opis	Jedinica
a	- toplinska difuzivnost	m^2/s
a_{ef}	- efektivna toplinska difuzivnost	m^2/s
b	- toplinska prodornost	$Ws^{1/2}/m^2K$
b_h	- toplinska prodornost materijala hibridnog kalupa	$Ws^{1/2}/m^2K$
b_k	- toplinska prodornost materijala klasičnog kalupa	$Ws^{1/2}/m^2K$
C_p	- indeks sposobnosti procesa	-
C_{pk}	- indeks sposobnosti procesa	-
c_p	- specifični toplinski kapacitet	J/kgK
d_1	- deformacija otpreska u smjeru dulje osi	m
d_2	- deformacija otpreska u smjeru kraće osi	m
d_{pv}	- promjer pužnog vijka	m
E_r	- modul rastezljivosti	N/m^2
F	- broj faktorskih stanja pokusa	-
F_d	- sila držanja kalupa	N
H_K	- ugradbena visina kalupa	m
h_{OK}	- hod otvaranja kalupa	m
K_O	- koeficijent oblika otpreska	-
K_U	- koeficijent unutrašnjosti otpreska	-
k	- broj faktora u faktorskom planu pokusa	-
k_K	- toplinska prohodnost materijala kalupa	W/m^2K
L	- donja granica dopuštenih odstupanja	-
m_K	- masa kalupa	kg
m_g	- masa grozda	kg
m_o	- masa otpreska	kg
N	- broj ukupnih stanja pokusa	-
N_p	- pogonska snaga pumpe ubrizgavalice	W
n	- razina frakcioniranja pokusa	-
n_c	- broj stanja pokusa u centru	-
n_i	- broj ispitaka	-
p	- tlak	bar
p_H	- tlak u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice	bar
p_{Hn}	- naknadni tlak u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice	bar
p_{Hs}	- tlak stlačivanja u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice	bar
p_{Hu}	- tlak ubrizgavanja u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice	bar
p_K	- tlak u kalupnoj šupljini	bar
p_u	- tlak ubrizgavanja	bar
q_M	- protok medija za temperiranje	l/s
R_a	- hrapavost	μm
R_m	- rastezna čvrstoća	N/m^2
R_p	- pritisna čvrstoća	N/m^2
S_L	- skupljanje	%
s_i	- debljina i-tog sloja koji se nalazi između stijenke kalupne šupljine i stijenke kanala za temperiranje	m

Oznaka	Opis	Jedinica
s_o	- karakteristična izmjera otpreska (debljina stijenke)	m
T	- temperatura	K
t_c	- vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja	s
t_d	- dopunsko vrijeme hlađenja otpreska	s
t_h	- vrijeme hlađenja otpreska u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice	s
t_{np}	- vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	s
t_p	- pomoćno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja	s
t_u	- vrijeme ubrizgavanja	s
U	- gornja granica dopuštenih odstupanja	-
V_u	- obujam ubrizgavanja	m ³
v	- specifični obujam	m ³ /kg
v_u	- brzina ubrizgavanja	m/s
\bar{x}	- aritmetička sredina skupa pojedinačnih podataka	-
$x_1 \dots x_6$	- nezavisni (podesivi) parametri injekcijskog prešanja	-
α	- osna udaljenost od centra pri centralno kompozitnom planu pokusa	-
α_M	- toplinska prijelaznost sa stijenke kanala za temperiranje na medij za temperiranje	W/m ² K
α_T	- toplinska rastezljivost	m/mK
δ	- rastezna žilavost	J/m ²
ϑ_D	- dodirna temperatura	°C
ϑ_G	- temperatura staklastog prijelaza	°C
ϑ_K	- temperatura stijenke kalupne šupljine	°C
ϑ_M	- temperatura medija za temperiranje	°C
ϑ_O	- temperatura okoline	°C
ϑ_{OK}	- temperatura otvaranja kalupa	°C
ϑ_P	- početna temperatura stijenke kalupne šupljine	°C
ϑ_{PO}	- temperatura postojanosti oblika otpreska	°C
ϑ_T	- temperatura taljevine	°C
ϑ_{PK}	- površinska temperatura stijenke kalupa	°C
λ	- toplinska provodnost	W/mK
λ_i	- toplinska provodnost i-tog sloja između stijenke kalupne šupljine i stijenke kanala za temperiranje	W/mK
$\hat{\sigma}$	- procjena standardnog odstupanja	-
ω_{pv}	- frekvencija vrtnje pužnog vijka	1/min

INDEKSI

Indeks Opis

a	- prosječna vrijednost (neravnina)
c	- centar pokusa - ciklus injekcijskog prešanja
D	- dodirno
d	- držanje
ef	- efektivno
G	- staklište
g	- grozd
H	- hidraulički sustav
h	- hibridni kalup
i	- ispitak
K	- kalup
k	- klasični kalup
L	- donja granica
M	- medij za temperiranje
m	- maksimalno
min	- minimalno
n	- naknadno (naknadni tlak)
np	- naknadni tlak
O	- oblik otpreska - okolina
OK	- otvaranje kalupa
o	- otpresak
P	- pumpa ubrizgavalice - plastomer - početno
PK	- površina kalupa
PO	- postojanost oblika
p	- tlak - pritisno
p _v	- pužni vijak
r	- rastezljivost
s	- stlačivanje
T	- toplinsko - taljevina
U	- unutrašnjost otpreska - gornja granica
u	- ubrizgavanje

AKCENTI

($\bar{\quad}$)	- prosječna vrijednost
(\wedge)	- vrijednost u središtu (otpreska)

KRATICE

Kratica	Opis
3DP	- 3D tiskanje (e. <i>3D Printing</i>)
ABS	- akrilonitril/butadien/stiren
ACES-IM	- izravna proizvodnja epoksidnih dijelova kalupa (e. <i>Direct Accurate Clear Epoxy Solid for Injection Moulding</i>)
BPM	- balističko oblikovanje (e. <i>Ballistic Particle Manufacturing</i>)
CAD	- konstruiranje s pomoću računala (e. <i>Computer Aided Design</i>)
CAE	- proračunavanje s pomoću računala (e. <i>Computer Aided Engineering</i>)
CAM	- izradba s pomoću računala (e. <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CAM-LEM	- obradba laminata s pomoću računala (e. <i>Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials</i>)
CC	- konturno građenje (e. <i>Contour Crafting</i>)
CMB	- kontrolirana izradba metalnih dijelova (e. <i>Controlled Metal Build-up</i>)
CNC	- računalno numeričko upravljane (e. <i>Computer Numerical Control</i>)
DESCAF	- proizvodnja s pomoću računalom kontrolirane konstrukcije (e. <i>Design-Controlled Automated Fabrication</i>)
DLF	- izradba s pomoću usmjerenog svjetla (e. <i>Directed Light Fabrication</i>)
DMD	- izravno taloženje metalnog praha (e. <i>Direct Metal Deposition</i>)
DMF	- izravna preradba metala (e. <i>Direct Metal Fabrication</i>)
DMLS	- izravno srašćivanje metala s pomoću lasera (e. <i>Direct Metal Laser Sintering</i>)
DPS	- izravno foto-oblikovanje (e. <i>Direct Photo Shaping</i>)
DROW	- zavarivanje kapljica (e. <i>Droplet Welding</i>)
DSPC	- izravna izradba kalupne ljuske (e. <i>Direct Shell Production Casting</i>)
EBM	- taljenje s pomoću snopa elektrona (e. <i>Electron Beam Melting</i>)
EFAB	- elektrokemijska proizvodnja prototipova (e. <i>Electrochemical Fabrication</i>)
ERP	- elektrofotografska proizvodnja prototipa (e. <i>Electrophotographic Rapid Prototyping</i>)
FDC	- taložno očvršćivanje keramike (e. <i>Fused Deposition of Ceramics</i>)
FDM	- taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling</i>)
GPD	- taloženje plinske faze (e. <i>Gas Phase Deposition</i>)
IMLS	- posredno srašćivanje metala s pomoću lasera (e. <i>Indirect Metal Laser Sintering</i>)
LADRP	- izravna izradba prototipova s pomoću lasera (e. <i>Laser Aided Direct Rapid Prototyping</i>)
LAM	- izradba s pomoću lasera dodavanjem čestica (e. <i>Laser Additive Manufacturing</i>)
LAPS-J	- postupak očvršćivanja praha s pomoću lasera (e. <i>Laser-aided Powder Solidification / Powder Jet</i>)
LASAMOCVD	- selektivno lasersko organsko kemijsko taloženje metala (e. <i>Laser Assisted Selective Area Metal Organic Chemical Vapour Deposition</i>)
LCVD	- kemijsko taloženje s pomoću lasera (e. <i>Laser-Assisted Chemical Vapour Deposition</i>)
LENS	- izravno taloženje metala (e. <i>Laser Engineering Net Shaping</i>)
LG	- lasersko generiranje (e. <i>Laser Generating</i>)
LLCC	- lasersko laminiranje i rezanje kalupnih šupljina (e. <i>Laser Laminated Cut Cavities</i>)
LMJP	- tiskanje mlaza kapljevitog metala (e. <i>Liquid Metal Jet Printing</i>)
LOM	- laminiranje (e. <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
MEM	- ekstrudiranje prototipova (e. <i>Melted Extrusion Manufacturing</i>)

Kratica	Opis
MFET	- proizvodnja kalupa od smjese epoksidne smole i metala (e. <i>Metal Filled Epoxy Tooling</i>)
MFR	- maseni protok taljevine (e. <i>Melt Flow Rate</i>)
MJM	- višezlazno oblikovanje (e. <i>Multi Jet Modeling</i>)
MJS	- višefazno mlazno očvršćivanje (e. <i>Multiphase Jet Solidification</i>)
MSLA	- mikrostereolitografija (e. <i>Microstereolithography</i>)
OBJET	- hibridni postupak 3D tiskanja i stereolitografije
PA	- poliamid
PA 6,6	- poliamid 6,6
PC	- polikarbonat
PCM	- fotokemijska obradba (e. <i>Photo Chemical Machining</i>)
PCT	- 3D tiskanje voska (e. <i>Printed Computer Tomography</i>)
PE	- polietilen
PE-HD	- polietilen visoke gustoće
PLT	- postupak laminiranja s papirom (e. <i>Paper Lamination Technology</i>)
PP	- polipropilen
PS	- polistiren
PVC	- poli(vinil-klorid)
RFP	- brza izradba ledenih prototipova (e. <i>Rapid Freeze Prototyping</i>)
RM	- brza (izravna) izradba (e. <i>Rapid Manufacturing</i>)
RMPD	- brza proizvodnja mikroproizvoda (e. <i>Rapid Micro Product Development</i>)
RP	- brza izradba prototipova (e. <i>Rapid Prototyping</i>)
RPD	- brzi razvoj proizvoda (e. <i>Rapid Product Development</i>)
RSM	- metoda odzivne površine (e. <i>Response Surface Method</i>)
RSP	- brzo očvršćivanje (e. <i>Rapid Solidification Process</i>)
RT	- brza izradba kalupa (e. <i>Rapid Tooling</i>)
RTR	- brzi toplinski odziv (e. <i>Rapid Thermal Response</i>)
RTV	- umreživanje kaučuka pri sobnoj temperaturi (e. <i>Room Temperature Vulcanisation</i>)
SALD	- selektivno lasersko taloženje (e. <i>Selective Area Laser Deposition</i>)
SCP	- sustav za proizvodnju objekata (e. <i>Solid Creation System</i>)
SDM	- proizvodnja taloženjem oblika (e. <i>Shape Deposition Manufacturing</i>)
SGC	- tonografski postupak (e. <i>Solid Ground Curing</i>)
SL/SLA	- stereolitografija (e. <i>Stereolithography</i>)
SLM	- selektivno lasersko taljenje (e. <i>Selective Laser Melting</i>)
SLP	- sustav za lasersko diodno tiskanje (e. <i>Solid Laser Diode Plotter System</i>)
SLRS	- selektivno lasersko reakcijsko srašćivanje (e. <i>Selective Laser Reaction Sintering</i>)
SLS	- selektivno lasersko srašćivanje (e. <i>Selective Laser Sintering</i>)
SMT	- izradba kalupa naštrecavanjem metala (e. <i>Spray Metal Tooling</i>)
SOUP	- tiskanje objekta s pomoću UV-lasera (e. <i>Solid Object Ultra-Violet Laser Plotting</i>)
SPC	- statističko upravljanje procesom (e. <i>Statistical Process Control</i>)
SPL	- stereofotolitografija (e. <i>Stereophotolithography</i>)
SSM	- izradba slojevitog objekta (e. <i>Slicing Solid Manufacturing</i>)
STLG	- stereo-toplinska-litografija (e. <i>Stereo-thermal-lithography</i>)
TSF	- topografsko oblikovanje ljuske (e. <i>Topographic Shell Fabrication</i>)
TSMD	- oslojavanje metala naštrecavanjem (e. <i>Thermal Spray Metal Deposition</i>)

POPIS SLIKA

<i>Slika 3.1</i>	Sustav za injekcijsko prešanje plastomera	5
<i>Slika 3.2</i>	Tijek tlaka u dijagramu $p-v-T$	7
<i>Slika 3.3</i>	Informacije koje je moguće prikupiti bilježenjem tlakova u hidrauličkom sustavu i kalupnoj šupljini.....	9
<i>Slika 3.4</i>	Utjecaj faza tijeka tlaka u kalupnoj šupljini na otpresak.....	10
<i>Slika 3.5</i>	Korelacija između naknadnog tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i u kalupnoj šupljini	12
<i>Slika 3.6</i>	Utjecaj temperature taljevine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i kalupnoj šupljini	13
<i>Slika 3.7</i>	Temperaturno polje u kalupu	14
<i>Slika 3.8</i>	Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i tlaka u kalupnoj šupljini.....	15
<i>Slika 3.9</i>	Temperaturni gradijent kroz stijenku kalupa.....	16
<i>Slika 3.10</i>	Određivanje optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka	17
<i>Slika 3.11</i>	Analiza ciklusa injekcijskog prešanja	18
<i>Slika 3.12</i>	Kvaliteta otpreska u ovisnosti o parametrima preradbe	20
<i>Slika 3.13</i>	Napetosti u pločastom otpresku	22
<i>Slika 3.14</i>	Potreban tlak ubrizgavanja pri različitim debljinama stijenki i brzinama ubrizgavanja	26
<i>Slika 3.15</i>	Usporedba klasičnog i tankostjenog injekcijskog prešanja.....	27
<i>Slika 4.1</i>	Koraci pri simuliranju injekcijskog prešanja plastomera	30
<i>Slika 4.2</i>	Faza definiranja simulacijskog modela	31
<i>Slika 4.3</i>	Razlika između plošne i obujamne analize punjenja kalupne šupljine	31
<i>Slika 4.4</i>	Pojave u smjeru treće osi pri tečenju taljevine	32
<i>Slika 4.5</i>	Faza definiranja parametara injekcijskog prešanja	33
<i>Slika 4.6</i>	Ulazni parametri za računalnu simulaciju postupka injekcijskog prešanja.....	33
<i>Slika 4.7</i>	Faze simuliranja injekcijskog prešanja.....	34
<i>Slika 4.8</i>	Temperaturno polje kalupa.....	40
<i>Slika 5.1</i>	Novi zahtjevi pri razvoju proizvoda.....	44
<i>Slika 5.2</i>	Utjecaj različitih čimbenika na gubitke tijekom razvoja proizvoda.....	45
<i>Slika 5.3</i>	Podjela modela prema VDI 2221	46
<i>Slika 5.4</i>	Korelacija između definicije razvoja proizvoda prema DIN VDI 2221 i brze proizvodnje prototipova	47
<i>Slika 5.5</i>	Moguće primjene RP/RT postupaka	49
<i>Slika 5.6</i>	Područja uporabe brze proizvodnje prototipova, kalupa i izravne brze proizvodnje.....	50
<i>Slika 5.7</i>	Faze slojevitih postupaka brze izradbe prototipova	50
<i>Slika 5.8</i>	Područja primjene prototipova	51
<i>Slika 5.9</i>	Raščlamba primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina.....	51
<i>Slika 5.10</i>	Oprema za stereolitografiju (SLA).....	52
<i>Slika 5.11</i>	Oprema za selektivno lasersko srašćivanje (SLS).....	54
<i>Slika 5.12</i>	Oprema za 3D tiskanje (3DP)	56
<i>Slika 5.13</i>	Oprema za višeslojno oblikovanje (MJM)	57
<i>Slika 5.14</i>	Oprema za hibridni OBJET postupak	58
<i>Slika 5.15</i>	Oprema za taložno srašćivanje (FDM).....	59

<i>Slika 5.16</i>	Oprema za laminiranje (LOM).....	60
<i>Slika 5.17</i>	Oprema za tonografski postupak (SGC)	62
<i>Slika 5.18</i>	Postupak taloženja oblika (SDM)	63
<i>Slika 5.19</i>	Mogućnosti legiranja pri SLS postupcima.....	67
<i>Slika 5.20</i>	Postupak izradbe kalupa srašćivanjem metala s pomoću lasera	72
<i>Slika 5.21</i>	<i>Prometal</i> postupak	73
<i>Slika 5.22</i>	Izravno taloženje (LENS postupak).....	75
<i>Slika 5.23</i>	Izravno taloženje metalnog praha (DMD postupak).....	76
<i>Slika 5.24</i>	Taljenje s pomoću snopa elektrona (EBM postupak)	78
<i>Slika 5.25</i>	<i>Stratoconcept</i> postupak laminiranja	79
<i>Slika 5.26</i>	Postupak naštrcavanja metala	81
<i>Slika 5.27</i>	Postupak brzog očvršćivanja (RSP).....	82
<i>Slika 5.28</i>	<i>OptoForm</i> postupak	83
<i>Slika 5.29</i>	Jednodjelni silikonski kalup.....	84
<i>Slika 5.30</i>	Dvodijelni silikonski kalup	84
<i>Slika 5.31</i>	Vrednovanje funkcija cilja pri brzjoj proizvodnji tvorevina.....	88
<i>Slika 5.32</i>	Primjer usporedbe postupaka brze proizvodnje tvorevina	88
<i>Slika 6.1</i>	Povezanost utjecajnih čimbenika i kriterija izbora materijala stijenke kalupne šupljine	92
<i>Slika 6.2</i>	Utjecaj vrste materijala kalupne šupljine na vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja	98
<i>Slika 6.3</i>	Presjek elemenata kalupne šupljine <i>Ulpac</i> -kalupa.....	98
<i>Slika 9.1</i>	Osnovni tipovi otpresaka.....	111
<i>Slika 9.2</i>	Tankostjeni pločasto-kutijasti otpresak (3D računalni model)	112
<i>Slika 9.3</i>	Računalni model eksperimentalnog kalupa	114
<i>Slika 9.4</i>	Eksperimentalni kalup s klasičnim umetcima.....	115
<i>Slika 9.5</i>	Prototipnih kalupni umetci.....	116
<i>Slika 9.6</i>	Prototipni umetci ugrađeni u kućište kalupa.....	117
<i>Slika 9.7</i>	Prilagođen uljevni sustav prototipne matrice	117
<i>Slika 9.8</i>	Instrument za mjerenje udarne radnje loma (DIN 51 222)	119
<i>Slika 9.9</i>	Određivanje stabilnosti izmjera otpreska	122
<i>Slika 9.10</i>	Područje izrezivanja ispitnih tijela pri određivanju rastezne žilavosti.....	123
<i>Slika 9.11</i>	Simulacijski model tankostjenog otpreska i odgovarajućeg kalupa	123
<i>Slika 9.12</i>	Usporedba simulacije napredovanja čela taljevine i stvarnog tečenja u kalupnoj šupljini.....	125
<i>Slika 9.13</i>	Temperaturno polje stijenke kalupne šupljine (prototipna matrica)	127
<i>Slika 9.14</i>	Plan provedbe pokusa i analiza pri istraživanju.....	129
<i>Slika 9.15</i>	Statistička obilježja procesa	131
<i>Slika 9.16</i>	Model faktorskog plana pokusa 2^3 i dva nepotpuna faktorska plana 2^{3-1}	132
<i>Slika 9.17</i>	Modeli pokusa	133
<i>Slika 9.18</i>	Analiza sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja (<i>Masa</i>)	136
<i>Slika 9.19</i>	Analiza sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja (<i>Izmjera_1</i>).....	137
<i>Slika 9.20</i>	Analiza sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja (<i>Izmjera_2</i>).....	137
<i>Slika 9.21</i>	Model pretpokusa.....	139
<i>Slika 9.22</i>	Pojava srha na otpresku (hibridni kalup)	144
<i>Slika 9.23</i>	Model centralno kompozitnog pokusa	146
<i>Slika 9.24</i>	Pojava srha na otpresku (klasični kalup).....	154
<i>Slika 10.1</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>masa</i> (hibridni kalup)	175
<i>Slika 10.2</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>deformacija 1</i> (hibridni kalup).....	176

<i>Slika 10.3</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>deformacija 2</i> (hibridni kalup).....	177
<i>Slika 10.4</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>rastezna žilavost</i> (hibridni kalup).....	178
<i>Slika 10.5</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>dodirna temperatura</i> (hibridni kalup).....	178
<i>Slika 10.6</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>masa</i> (klasični kalup).....	180
<i>Slika 10.7</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>deformacija_1</i> (klasični kalup).....	181
<i>Slika 10.8</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>deformacija_2</i> (klasični kalup).....	182
<i>Slika 10.9</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>rastezna žilavost</i> (klasični kalup).....	183
<i>Slika 10.10</i>	Razina signifikantnosti faktora i interakcija - <i>dodirna temperatura</i> (klasični kalup).....	184
<i>Slika 10.11</i>	Temperaturna polja stijenki kalupne šupljine - stanje pokusa 11	187
<i>Slika 10.12</i>	Temperaturna polja stijenki kalupne šupljine - stanje pokusa 12	188
<i>Slika 13.1</i>	Eksperimentalni otpresak	212
<i>Slika 13.2</i>	Matrica eksperimentalnog kalupa	213
<i>Slika 13.3</i>	Žig eksperimentalnog kalupa	214
<i>Slika 13.4</i>	Rezultati mjerenja duljine otpresaka (<i>Izmjera_1</i>)	215
<i>Slika 13.5</i>	Rezultati mjerenja duljine otpresaka (<i>Izmjera_2</i>)	216
<i>Slika 13.6</i>	Rezultati određivanja mase otpresaka	217
<i>Slika 13.7</i>	Temperaturna polja kalupa (parametri <i>Skupina I</i>).....	247
<i>Slika 13.8</i>	Temperaturna polja kalupa (parametri <i>Skupina II</i>)	247
<i>Slika 13.9</i>	Temperaturna polja kalupa (parametri <i>Skupina III</i>)	248
<i>Slika 13.10</i>	Temperaturna polja kalupa (parametri <i>Skupina IV</i>)	248

POPIS TABLICA

<i>Tablica 3.1</i>	Faze injekcijskog prešanja plastomera.....	6
<i>Tablica 3.2</i>	Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na izmjere otpreska	21
<i>Tablica 3.3</i>	Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na neka svojstva otpreska ..	24
<i>Tablica 5.1</i>	Mogućnosti primjene pojedinih RP/RT postupaka pri razvoju i proizvodnji	85
<i>Tablica 6.1</i>	Najčešći materijali za brzo pravljenje elemenata kalupa	91
<i>Tablica 8.1</i>	Sistematizacija postupaka brzog pravljenja tvorevina	104
<i>Tablica 9.1</i>	Karakteristike otpreska	111
<i>Tablica 9.2</i>	Svojstva materijala PP HJ325 MO tvrtke <i>Borealis</i>	113
<i>Tablica 9.3</i>	Važnija svojstva čelika Č4742 (1.2312)	114
<i>Tablica 9.4</i>	Važnija svojstva materijala <i>LaserForm A6</i>	116
<i>Tablica 9.5</i>	Važnije karakteristike ubrizgavalice ENGEL Victory 330/60 Power	118
<i>Tablica 9.6</i>	Važniji rezultati početne simulacije tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu	124
<i>Tablica 9.7</i>	Podatci potrebni za proračun vremena hlađenja otpreska načinjenog od PP HJ325 MO	126
<i>Tablica 9.8</i>	Vrijednosti osne udaljenosti α	134
<i>Tablica 9.9</i>	Parametri injekcijskog prešanja pri analizi sposobnosti procesa u hibridnom kalupu	135
<i>Tablica 9.10</i>	Razine podesivih parametara pretpokusa	139
<i>Tablica 9.11</i>	Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja promatranih svojstava	140
<i>Tablica 9.12</i>	Procjena utjecaja faktora pravcem prema normalnoj razdiobi.....	141
<i>Tablica 9.13</i>	Sažetak utjecaja pojedinih faktora i interakcija	142
<i>Tablica 9.14</i>	Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja temperaturnog polja kalupa	142
<i>Tablica 9.15</i>	Podatci potrebni za proračun vremena djelovanja naknadnog tlaka (PP HJ 325 MO).....	143
<i>Tablica 9.16</i>	Parametri preradbe - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (hibridni kalup)	145
<i>Tablica 9.17</i>	Nepromjenjivi parametri injekcijskog prešanja (pokusi u hibridnom kalupu)	146
<i>Tablica 9.18</i>	Razine promjenjivih parametara injekcijskog prešanja (pokusi u hibridnom kalupu).....	147
<i>Tablica 9.19</i>	Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja promatranih svojstava	147
<i>Tablica 9.20</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska <i>masa</i>	148
<i>Tablica 9.21</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska <i>deformacija_1</i> (hibridni kalup)	149
<i>Tablica 9.22</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska <i>deformacija_2</i> (hibridni kalup)	150

<i>Tablica 9.23</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska <i>rastezna žilavost</i> (hibridni kalup)	151
<i>Tablica 9.24</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine (hibridni kalup)	152
<i>Tablica 9.25</i>	Važniji rezultati simulacije tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu (centralno kompozitni pokus - stanje u centru pokusa) .	153
<i>Tablica 9.26</i>	Razlike u izmjerama matrica hibridnog i klasičnog kalupa	155
<i>Tablica 9.27</i>	Razlike u izmjerama otpresaka načinjenih u hibridnom i klasičnom kalupu	155
<i>Tablica 9.28</i>	Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja promatranih svojstava	156
<i>Tablica 9.29</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska <i>deformacija_1</i> (klasični kalup)	157
<i>Tablica 9.30</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska <i>deformacija_1</i> (klasični kalup)	158
<i>Tablica 9.31</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska <i>deformacija_2</i> (klasični kalup)	159
<i>Tablica 9.32</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska <i>rastezna žilavost</i> (hibridni kalup)	160
<i>Tablica 9.33</i>	Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine (klasični kalup)	161
<i>Tablica 9.34</i>	Važniji rezultati simulacije tankostjenog injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu (centralno kompozitni pokus - stanje u centru pokusa) .	162
<i>Tablica 9.35</i>	Podatci za optimiranje injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu	163
<i>Tablica 9.36</i>	Rješenja kompleksnog optimiranja injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu	164
<i>Tablica 9.37</i>	Rješenja parcijalnog optimiranja (klasični kalup) - <i>masa</i>	164
<i>Tablica 9.38</i>	Rješenja parcijalnog optimiranja (klasični kalup) - <i>deformacije</i>	164
<i>Tablica 9.39</i>	Rješenja parcijalnog optimiranja (klasični kalup) - <i>rastezna žilavost</i>	165
<i>Tablica 9.40</i>	Podatci za optimiranje injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu	165
<i>Tablica 9.41</i>	Rješenja kompleksnog optimiranja injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu	165
<i>Tablica 9.42</i>	Rješenja postupka kompleksnog optimiranja injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu (područje parametara preradbe -2 do 2)	166
<i>Tablica 9.43</i>	Rješenja parcijalnog optimiranja (hibridni kalup) - <i>masa</i>	166
<i>Tablica 9.44</i>	Rješenja parcijalnog optimiranja (hibridni kalup) - <i>masa</i> (područje parametara -2 do 2)	167
<i>Tablica 9.45</i>	Rješenja parcijalnog optimiranja (hibridni kalup) - <i>deformacije</i>	167
<i>Tablica 9.46</i>	Rješenja parcijalnog optimiranja (hibridni kalup) - <i>rastezna žilavost</i>	167
<i>Tablica 9.47</i>	Parametri preradbe - optimiranje (hibridni kalup)	167
<i>Tablica 9.48</i>	Nepromjenjivi parametri preradbe za analizu osjetljivosti kalupa na zastoje	168
<i>Tablica 9.49</i>	Skupine promjenjivih parametara preradbe za analizu osjetljivosti kalupa na zastoje	169
<i>Tablica 9.50</i>	Razlike u parametrima pri analizi osjetljivosti kalupa na zastoje	169
<i>Tablica 9.51</i>	Broj ciklusa do postizanja toplinske ravnoteže kalupa	169
<i>Tablica 10.1</i>	Sažetak utjecaja pojedinih faktora i interakcija (glavni pokusi)	184
<i>Tablica 10.2</i>	Temperature stijenki kalupne šupljine (stanje pokusa 11)	187
<i>Tablica 10.3</i>	Temperature stijenki kalupne šupljine (stanje pokusa 12)	189
<i>Tablica 10.4</i>	Rezultati analize temperaturnog polja kalupa (stanja pokusa 11 i 12)	190
<i>Tablica 10.5</i>	Rezultati testa signifikantnosti - dodirna temperatura (hibridni kalup)	190

<i>Tablica 10.6</i>	Rezultati testa signifikantnosti - dodirna temperatura (klasični kalup)	190
<i>Tablica 10.7</i>	Rezultati testa signifikantnosti - temperaturni gradijent (hibridni kalup)...	190
<i>Tablica 10.8</i>	Rezultati testa signifikantnosti - temperaturni gradijent (klasični kalup)...	191
<i>Tablica 10.9</i>	Toplinska svojstva materijala kalupnih umetaka	191
<i>Tablica 10.10</i>	Rezultati kompleksnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -1 do 1).....	193
<i>Tablica 10.11</i>	Rezultati kompleksnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -2 do 2 za hibridni kalup).....	193
<i>Tablica 10.12</i>	Rezultati kompleksnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -2 do 2 za hibridni kalup, vrijeme djelovanja naknadnog tlaka 3,0 s)	193
<i>Tablica 10.13</i>	Rezultati parcijalnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -1 do 1) - svojstvo <i>masa</i>	194
<i>Tablica 10.14</i>	Rezultati parcijalnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -1 do 1) - svojstvo <i>deformacije</i>	195
<i>Tablica 10.15</i>	Rezultati parcijalnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -1 do 1) - svojstvo <i>rastezna žilavost</i>	195
<i>Tablica 10.16</i>	Smjernice za podešavanje parametara injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu.....	195
<i>Tablica 13.1</i>	Rezultati mjerenja duljine otpresaka (<i>Izmjera_1</i>).....	215
<i>Tablica 13.2</i>	Rezultati mjerenja širine otpresaka (<i>Izmjera_2</i>)	216
<i>Tablica 13.3</i>	Rezultati određivanja mase otpresaka	217
<i>Tablica 13.4</i>	Vrijednosti podesivih faktora (pretpokus - hibridni kalup)	218
<i>Tablica 13.5</i>	Rezultati određivanja <i>mase</i> otpresaka	219
<i>Tablica 13.6</i>	Rezultati određivanja <i>Deformacije_1</i> otpresaka	220
<i>Tablica 13.7</i>	Rezultati određivanja <i>Deformacije_2</i> otpresaka	221
<i>Tablica 13.8</i>	Rezultati određivanja <i>rastezne žilavosti</i> otpresaka	222
<i>Tablica 13.9</i>	Rezultati određivanja mase otpresaka - <i>parametri prerade I</i>	223
<i>Tablica 13.10</i>	Rezultati određivanja mase otpresaka - <i>parametri prerade II</i>	223
<i>Tablica 13.11</i>	Plan pokusa s redosljedom stanja izvođenja - hibridni kalup	224
<i>Tablica 13.12</i>	Rezultati određivanja <i>mase</i> otpresaka - hibridni kalup	225
<i>Tablica 13.13</i>	Rezultati određivanja <i>Deformacije_1</i> otpresaka - hibridni kalup	226
<i>Tablica 13.14</i>	Rezultati određivanja <i>Deformacije_2</i> otpresaka - hibridni kalup	227
<i>Tablica 13.15</i>	Rezultati određivanja <i>rastezne žilavosti</i> otpresaka - hibridni kalup	228
<i>Tablica 13.16</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>masa</i> otpresaka	229
<i>Tablica 13.17</i>	Koeficijenti regresije - <i>masa</i> otpresaka.....	229
<i>Tablica 13.18</i>	Kodirane vrijednosti faktora pokusa x_1 , x_2 i x_3	230
<i>Tablica 13.19</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>Deformacija_1</i> otpresaka.....	231
<i>Tablica 13.20</i>	Koeficijenti regresije - <i>Deformacija_1</i> otpresaka	231
<i>Tablica 13.21</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>Deformacija_2</i> otpresaka.....	232
<i>Tablica 13.22</i>	Koeficijenti regresije - <i>Deformacija_2</i> otpresaka	232
<i>Tablica 13.23</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>rastezna žilavost</i> otpresaka	233
<i>Tablica 13.24</i>	Koeficijenti regresije - <i>rastezna žilavost</i> otpresaka	233
<i>Tablica 13.25</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>dodirna temperatura</i>	234
<i>Tablica 13.26</i>	Koeficijenti regresije - <i>dodirna temperatura</i>	234
<i>Tablica 13.27</i>	Rezultati određivanja mase otpresaka - <i>parametri prerade I</i>	235
<i>Tablica 13.28</i>	Rezultati određivanja mase otpresaka - <i>parametri prerade II</i>	235
<i>Tablica 13.29</i>	Plan pokusa s redosljedom stanja izvođenja - klasični kalup	236
<i>Tablica 13.30</i>	Rezultati određivanja <i>mase</i> otpresaka - klasični kalup	237
<i>Tablica 13.31</i>	Rezultati određivanja <i>Deformacije_1</i> otpresaka - klasični kalup	238
<i>Tablica 13.32</i>	Rezultati određivanja <i>Deformacije_2</i> otpresaka - klasični kalup	239

<i>Tablica 13.33</i>	Rezultati određivanja <i>rastezne žilavosti</i> otpresaka - klasični kalup	240
<i>Tablica 13.34</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>masa</i> otpresaka.....	241
<i>Tablica 13.35</i>	Koeficijenti regresije - <i>masa</i> otpresaka	241
<i>Tablica 13.36</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>Deformacija_1</i> otpresaka.....	242
<i>Tablica 13.37</i>	Koeficijenti regresije - <i>Deformacija_1</i> otpresaka	242
<i>Tablica 13.38</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>Deformacija_2</i> otpresaka.....	243
<i>Tablica 13.39</i>	Koeficijenti regresije - <i>Deformacija_2</i> otpresaka	243
<i>Tablica 13.40</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>rastezna žilavost</i> otpresaka	244
<i>Tablica 13.41</i>	Koeficijenti regresije - <i>rastezna žilavost</i> otpresaka.....	244
<i>Tablica 13.42</i>	Rezultati obrade analize varijance - <i>dodirna temperatura</i>	245
<i>Tablica 13.43</i>	Koeficijenti regresije - <i>dodirna temperatura</i>	245
<i>Tablica 13.44</i>	Svojstva otpresaka - optimiranje (hibridni kalup).....	246

1 UVOD

Suvremeni trendovi na tržištu postavljaju sve oštrije zahtjeve na proces razvoja proizvoda, pa i plastomernih otpresaka i odgovarajućih kalupa. Jedno od mogućih rješenja je uporaba postupaka obuhvaćenih nazivom brza proizvodnja tvorevina koja se ostvaruje se na tri načina. To su postupci brze proizvodnje prototipova (e. *Rapid Prototyping* - RP), brze proizvodnje alata ili kalupa (e. *Rapid Tooling* - RT) i brze (izravne) proizvodnje u slučaju pojedinačne i maloserijske proizvodnje (e. *Rapid, Direct Manufacturing* - RM). [1-3]

Brza proizvodnja prototipnih kalupa podrazumijeva uporabu niza postupaka brze proizvodnje prototipova, s pomoću kojih se izrađuju čitavi kalupi ili elementi koji oblikuju kalupne šupljine (tzv. hibridni kalupi) u kojima će se izraditi odgovarajući, u pravilu ograničeni broj otpresaka (prototipova). Priprema i izradba kompliciranih i kompleksnih alata kao što su kalupi za injekcijsko prešanje polimera obično su na kritičnom putu u projektima razvoja i proizvodnje polimernih otpresaka, te imaju izravni i snažni utjecaj na vrijeme izlaska proizvoda na tržište. Postupci brze proizvodnje kalupa omogućuju skraćanje pravljenja kalupa čime je omogućen brzi odgovor na zahtjeve tržišta koje je sve orijentirano pojedinačnim zahtjevima potrošača. Namjena tih postupaka nije izradba gotovih proizvoda, već brzo pravljenje potrebnih alata i kalupa. [4]

Tehnički razlozi izradbe prototipnih kalupa su višestruki, a uključuju procjenu preradljivosti pojedinih materijala injekcijskim prešanjem, mehaničkih svojstava proizvoda, dimenzijske stabilnosti, procesa injekcijskog prešanja zahtjevnijih otpresaka, certificiranje, a sve to prije početka izradbe uglavnom skupih kalupa. [5]

Pri izradbi hibridnih kalupa postupcima brze proizvodnje kalupa uglavnom se rabe materijali koji u pravilu imaju bitno različita toplinska i mehanička svojstva u usporedbi s klasičnim kalupnim materijalima. Kao posljedica takvih razlika javljaju se razlike u svojstvima otpresaka načinjenih u hibridnom i klasičnom kalupu. Pri tome se pod klasičnim kalupom podrazumijeva kalup načinjen klasičnim postupcima obradbe odvajanjem čestica od klasičnih kalupnih materijala (čelici, aluminij, berilijeva bronca). Ukoliko se radi o proizvodnji funkcijskih prototipova ili maloserijskoj proizvodnji, bitna odstupanja u svojstvima prototipova nisu

prihvatljiva. Mogućnost integracije procesa injekcijskog prešanja i postupaka brze proizvodnje kalupa provjerena je u nizu primjera. Međutim, ono što nedostaje je temeljno razumijevanje kako promjene materijala kalupa i postupaka izradbe kalupa utječu na svojstva otpreska i parametre injekcijskog prešanja. Stoga valja definirati metodologiju kojom će se omogućiti pouzdanije predviđanje ulaznih podesivih parametara injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu. Također je potrebno istražiti i analizirati utjecaj hibridnih kalupa na svojstva otpresaka načinjenih u hibridnim kalupima. [6]

Pri tome treba nastojati dobivene rezultate poopćiti u cilju stvaranja baza znanja kao preduvjeta za računalno predviđanje zbijanja u hibridnim kalupima i svojstava otpresaka načinjenih u tim kalupima. Stoga se kao problem postavlja istraživanje utjecaja materijala hibridnog kalupa na zbijanja u kalupnoj šupljini te istraživanje mogućnosti postizanja odgovarajućih svojstava posebne skupine tzv. tankostjenih plastomernih otpresaka načinjenih u hibridnom kalupu. Kao konačni cilj istraživanja postavlja se podešavanje parametara injekcijskog prešanja u cilju postizanja usporedivih svojstava otpresaka načinjenih u klasičnim i prototipnim (hibridnim) kalupima.

2 HIPOTEZA RADA

Većina istraživanja na području utjecaja parametara injekcijskog prešanja temelji se na eksperimentalnoj analizi ili na uporabi računalne simulacije. Pri injekcijskom prešanju plastomera u klasičnim kalupima za serijsku proizvodnju, zbivanja u kalupnoj šupljini tijekom ciklusa injekcijskog prešanja, kao i neka svojstva otpreska moguće je sa zadovoljavajućom točnošću i preciznošću predvidjeti s pomoću računalne simulacije. Međutim, na temelju do sada provedenih istraživanja nije moguće zaključiti da li, uz promjenu podataka o materijalu hibridnog kalupa (toplinska provodnost, specifični toplinski kapacitet i gustoća), simulacija punjenja kalupne šupljine u hibridnim kalupima daje zadovoljavajuće rezultate.

Stoga valja definirati metodologiju kojom će se omogućiti pouzdanije predviđanje zbivanja u kalupnoj šupljini tijekom injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu. Također je potrebno istražiti i analizirati utjecaj hibridnog kalupa na svojstva otpresaka načinjenih u tom kalupu. Pri tome treba nastojati dobivene rezultate poopćiti u cilju stvaranja baza znanja kao preduvjeta za računalno predviđanje zbivanja u hibridnim kalupima i svojstava u njima načinjenih otpresaka.

Hipoteza rada polazi od činjenice da je proces praoblikovanja plastomera injekcijskim prešanjem moguće opisati i analizirati s pomoću sustavnosne i eksperimentalne analize. Istodobno je sve prisutnija računalna simulacija procesa injekcijskog prešanja koja omogućuje predviđanje zbivanja u kalupnoj šupljini klasičnih kalupa, te predviđanje svojstava otpresaka načinjenih u tim kalupima. Pri tome, u okviru istraživanja želi se obuhvatiti specifična skupina tankostjenih plastomernih otpresaka. Na temelju tih činjenica i definicije problema postavlja se sljedeća hipoteza disertacije:

S pomoću računalne simulacije te sustavnosne i eksperimentalne analize moguće je u hibridnom kalupu podesiti uvjete preradbe injekcijskog prešanja plastomera, u cilju postizanja usporedivih svojstava tankostjenih otpresaka načinjenih u kalupu za serijsku proizvodnju i tankostjenih prototipnih otpresaka načinjenih hibridnim kalupom.

3 INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERA

3.1 KLASIČNO INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERA

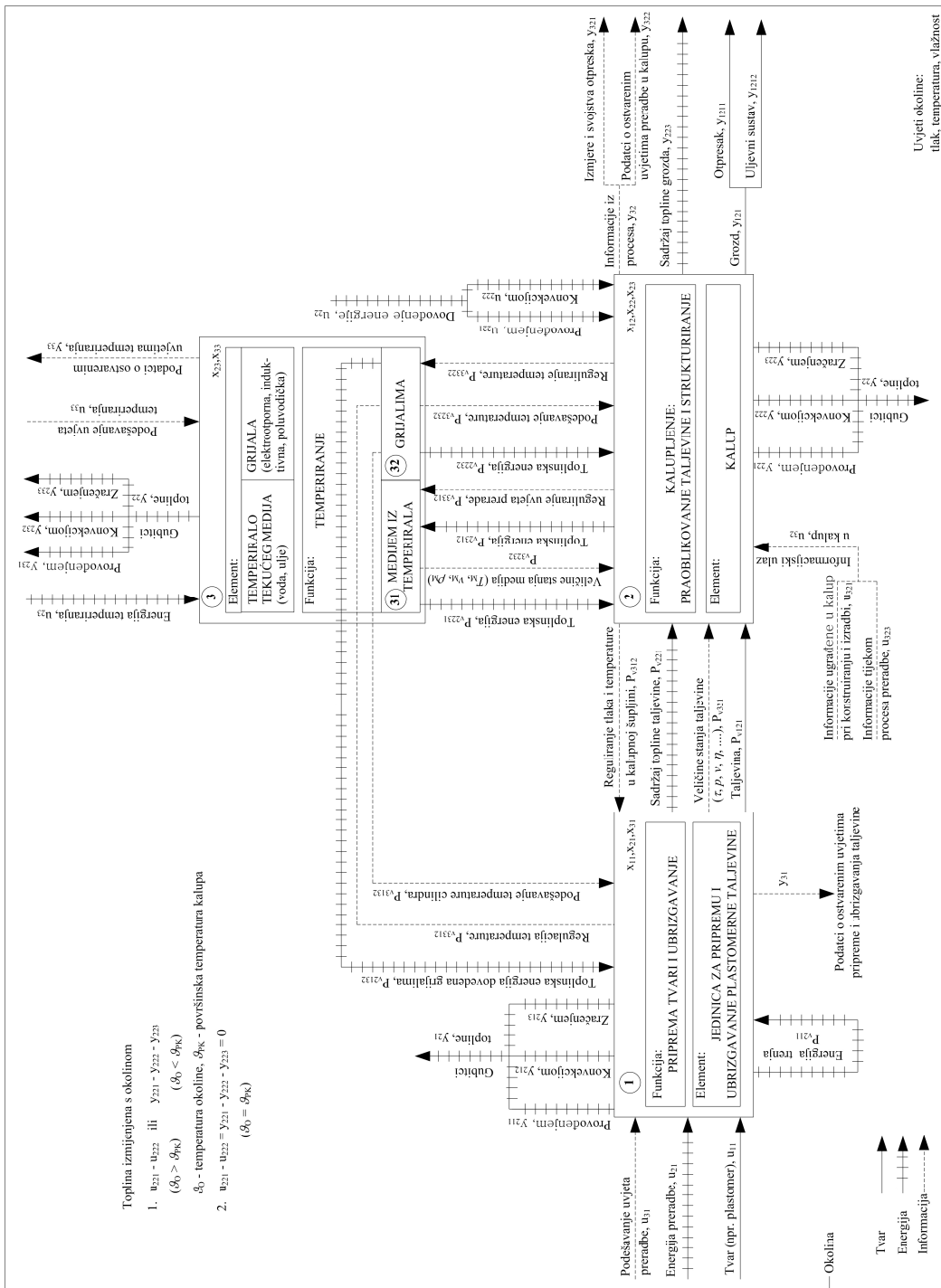
Injekcijsko prešanje najvažniji je ciklički postupak preradbe polimera. Injekcijsko prešanje plastomera pripada postupcima praoblikovanja ili pravljenja čvrstog tijela od bezobličnih tvari, pri čemu se postiže povezanost među česticama, stvara se građa materijala. Općenito, injekcijsko prešanje plastomera definira se kao ciklički postupak praoblikovanja ubrizgavanjem plastomerne tvari potrebne smične viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje ubrizgavalice u temperiranu kalupnu šupljinu. Tvorevina, otpresak, postaje hlađenjem podobna za vađenje iz kalupne šupljine. [7]

Za ostvarenje injekcijskog prešanja plastomera potreban je sustav za injekcijsko prešanje plastomera koji se sastoji od nužne i dopunske opreme. Pod nužnom opremom se ubrajaju ubrizgavalica, kalup i temperiralo (slika 3.1), dok dopunsku opremu predstavlja oprema za manipulaciju materijalom (npr. podtlačna dobava materijala u lijevak ubrizgavalice) i otprescima (razni roboti i manipulatori). [7-9]

Svaki sustav za injekcijsko prešanje mora ispuniti sljedeće funkcije: priprema tvari potrebne smične viskoznosti, ubrizgavanje i stvaranje praoblika i strukture tvorevine pri propisanoj temperaturi elemenata kalupne šupljine. Ubrižgavalica služi za ostvarenje funkcije pripreme tvari i ubrizgavanja, kalup za praoblikovanje i strukturiranje, a temperiralo za održavanje propisanog temperaturnog polja u kalupu. [7-9]

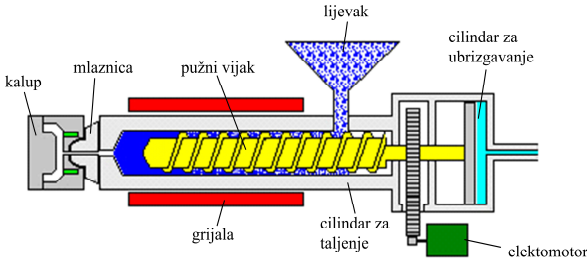
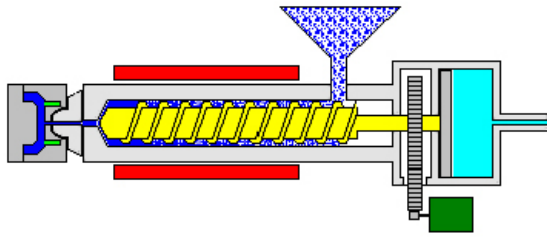
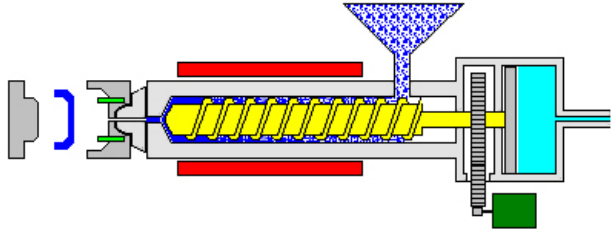
Detaljniji opisi procesa injekcijskog prešanja i opreme nalaze se u [7-11].

Injekcijsko prešanje plastomera dinamički je, nelinearni proces koji se sastoji od 4 temeljne faze (tablica 3.1): pripreme plastomerne taljevine (plastificiranja), punjenja kalupne šupljine, djelovanja naknadnog tlaka i vađenja otpreska iz kalupne šupljine. [10,12]



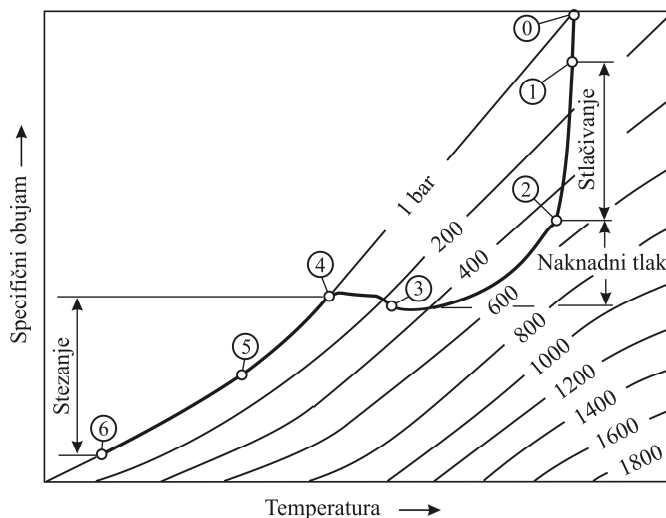
Slika 3.1 Sustav za injekcijsko prešanje plastomera [9]

Tablica 3.1 Faze injekcijskog prešanja plastomera [11,12]

 <p style="text-align: center;">plastificiranje</p>	<p>Plastomerne granule se dobavljaju kroz lijevak ubrizgavalice u cilindar gdje ih zahvaća pužni vijak. Toplina dovedena grijalima i razvijena vrtnjom pužnog vijka pri čemu se mehanički rad trenja pretvara u toplinu dovodi do taljenja plastomera. Tijekom pripreme plastomerna taljevina sakuplja se ispred vrha pužnog vijka (sabirnica) koji biva potisnut unatrag.</p>
 <p style="text-align: center;">ubrizgavanje i djelovanje naknadnog tlaka</p>	<p>Kada se u sabirnici pripremi dovoljno plastomerne taljevine, rotacija pužnog vijka se zaustavlja. Nakon toga hidraulički sustav potiskuje pužni vijak i dolazi do ubrizgavanja taljevine u kalupnu šupljinu. Nakon ubrizgavanja slijedi faza djelovanja naknadnog tlaka, tijekom koje se tlak u kalupnoj šupljini održava pri propisanoj vrijednosti dok plastomerna taljevina očvršćuje. S pomoću održavanja naknadnog tlaka u kalupnoj šupljini nastoji se nadoknaditi stezanje materijala. Faza djelovanja naknadnog tlaka nastavlja se sve dok ne očvrstne područje ušća nakon čega tlak u kalupnoj šupljini pada na okolišni tlak.</p>
 <p style="text-align: center;">hlađenje i vađenje otpreska iz kalupa (istodobno plastificiranje za novi ciklus)</p>	<p>U trenutku očvršćivanja ušća otpresak poprima svoj konačni oblik u kalupu, no temperatura otpreska je još uvijek previsoka da bi se otpresak mogao sigurno izvaditi iz kalupne šupljine. Stoga je otpresku potrebno osigurati nužno vrijeme hlađenja do postizanja temperature postojanosti oblika. Ta faza ciklusa injekcijskog prešanja naziva se fazom hlađenja otpreska, a ujedno uključuje i fazu plastificiranja, tijekom koje se u cilindru za taljenje priprema nova količina plastomerne taljevine za idući ciklus. Nakon što otpresak dovoljno očvrstne za sigurno vađenje iz kalupne šupljine, nastupa faza vađenja otpreska iz kalupa.</p>

Zbivanja u kalupnoj šupljini tijekom svih faza injekcijskog prešanja imaju presudnu ulogu pri određivanju svojstava gotovih otpresaka. Radi što boljeg razumijevanja zbivanja u kalupnoj šupljini tijekom procesa injekcijskog prešanja potrebno je poznavati termodinamičko ponašanje plastomernih materijala. Temeljno termodinamičko svojstvo plastomera je ovisnost specifičnog obujma o tlaku i temperaturi koje se opisuje s pomoću dijagrama $p-v-T$. Dijagram $p-v-T$ od ključne je važnosti za teorijsko razumijevanje procesa injekcijskog prešanja, ali i za poslužitelja

ubrizgavalice radi optimalnog podešavanja parametara preradbe. [10] Promjene stanja taljevine u kalupnoj šupljini moguće je u $p-v-T$ dijagramu pratiti kroz nekoliko faza (slika 3.2). [10,11]



Slika 3.2 Tijek tlaka u dijagramu $p-v-T$ [11]

- 0-1 *Volumno punjenje kalupne šupljine.* U trenutku 0 taljevina dolazi u nadzornu točku u kalupnoj šupljini, a tlak u kalupnoj šupljini mjesno raste. Porast tlaka popraćen je laganim hlađenjem taljevine do trenutka potpunog ispunjavanja kalupne šupljine.
- 1-2 *Stlačivanje.* Nakon faze punjenja kalupne šupljine, taljevina se stlačuje s pomoću naknadnog tlaka. U toj fazi tlak u kalupnoj šupljini postiže maksimum. Efekti hlađenja taljevine još su uvijek vrlo mali.
- 2-3 *Djelovanje naknadnog tlaka.* Otpresak očvršćuje te se steže i odvaja od stijenki kalupne šupljine. Smanjenje obujma moguće je nadoknaditi ubrizgavanjem dodatne taljevine u kalupnu šupljinu. Uslijed povećanih efekata hlađenja, efektivni presjek kroz kojeg je moguće tečenje taljevine je smanjen, pa je pad tlaka kroz uljevni sustav veći.
- 3-4 *Izohorno sniženje tlaka.* Kada dođe do potpunog očvršćivanja ušća i taljevine u području kalupne šupljine oko ušća, ubrizgavanje dodatne taljevine više nije moguće. Stoga dolazi do daljnjeg izohornog pada tlaka u kalupnoj šupljini (bez promjena u specifičnom obujmu).
- 4-5 *Hlađenje do vađenja iz kalupne šupljine.* Nakon postizanja tlaka u kalupnoj šupljini od 1 bar, daljnje sniženje tlaka nije moguće (izjednačio se s okolišnim tlakom), pa se daljnje hlađenje otpreska odvija pri izobarnim uvjetima.
- 5-6 *Hlađenje do okolišne temperature.* Otpresak se vadi iz kalupne šupljine u točki 5, te se nastavlja hladiti do okolišne temperature izvan kalupa.

Iz dijagrama je očigledno kako se najvažnije promjene dijagramu u p - v - T javljaju tijekom djelovanja naknadnog tlaka (2-4). Stoga se većina svojstava otpreska kao što su specifični obujam, masa, stezanje, zaostala naprezanja i dimenzijska stabilnost uglavnom određuju tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka. Točka pri kojoj tlak u kalupnoj šupljini dostiže okolišni tlak (4) ključna je u definiranju stezanja otpreska, tj. postizanja odgovarajuće dimenzijske stabilnosti. U toj točki otpresak počinje gubiti dodir sa stijenkama kalupne šupljine. U praksi, stezanje otpreska obično završava po postizanju okolišne temperature (6), no pri preradbi kristalastih plastomera valja računati s naknadnim stezanjem kao funkcijom naknadne kristalizacije plastomera. [10,11,13,14]

3.1.1 Najvažniji parametri procesa injekcijskog prešanja

Brojni parametri procesa injekcijskog prešanja utječu na stvaranje otpreska. Uglavnom se pri tome razmatraju tlakovi, temperature i vremena. [10,11,13,14] Pri analizi injekcijskog prešanja moguće je razmatrati preko 60 različitih parametara procesa. Međutim, najčešće se razmatra manji broj najutjecajnijih parametara koji će biti ukratko opisani u nastavku.

3.1.1.1 Tlak ubrizgavanja [10,11]

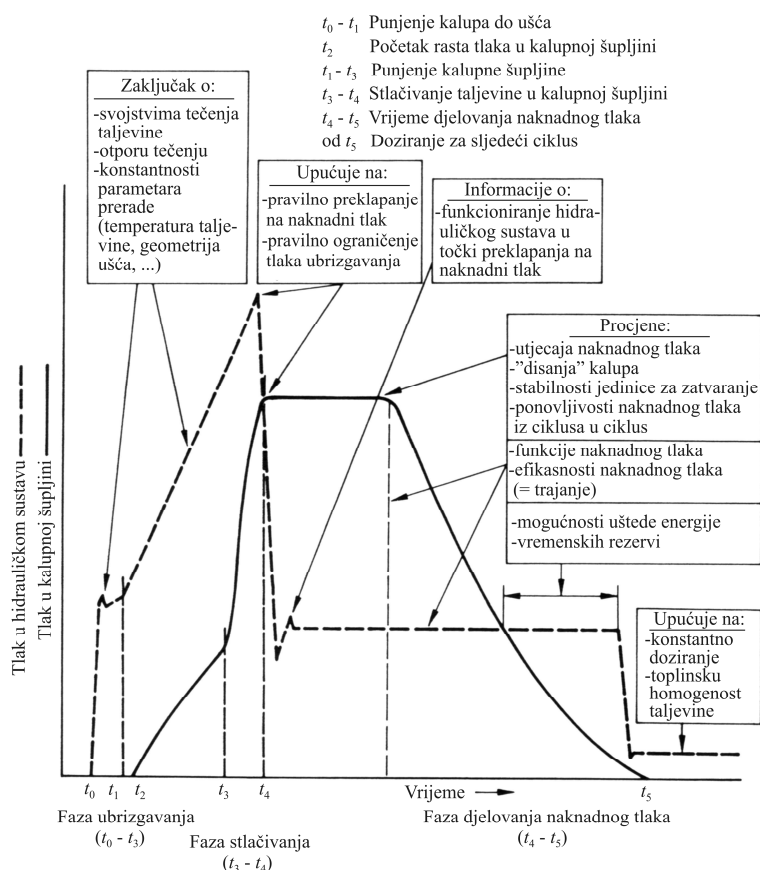
Tlak ubrizgavanja često se poistovjećuje s hidrauličkim tlakom ubrizgavalice ili se miješa s naknadnim tlakom. Ponekad se smatra konstantom, a ponekad promjenjivim parametrom, uz pogrešno dovođenje u relaciju s vremenom i prostorom. U mnogim se slučajevima smatra kako je tlak ubrizgavanja moguće podesiti na ubrizgavalici. To je u praksi nemoguće radi otpora tečenju taljevine u uljevnom sustavu te kroz kalupnu šupljinu. Stoga taj tlak nije moguće smatrati konstantom tijekom ciklusa injekcijskog prešanja. Tlak ubrizgavanja raste od vrijednosti okolnog tlaka na maksimalni iznos kojeg je moguće samo predvidjeti primjerice s pomoću računalne simulacije. Stoga je pri opisu tog parametra potrebno raspolagati podacima o minimalnom, maksimalnom ili raspoloživom tlaku ubrizgavanja.

3.1.1.2 Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje

Hidraulički tlak u pogonskoj jedinici potreban je za savladavanje otpora tečenju materijala u mlaznici ubrizgavalice, uljevnom sustavu kalupa te kalupnoj šupljini. Tijek hidrauličkog tlaka vrlo se dobro poklapa s tijekom tlaka taljevine na vrhu pužnog vijka. Visoki otpor tečenju uzrokuje nagli porast hidrauličkog tlaka tijekom faze obujamnog punjenja kalupne šupljine.

Viskoznost ulja u hidrauličkom sustavu je ovisna o temperaturi i utječe na vrijednost tlaka u hidrauličkom sustavu. Stoga je nezagrijanu ubrizgavalicu potrebno zagrijati kako bi ulje u hidrauličkom sustavu postiglo potrebnu radnu temperaturu. [11]

Ukoliko dolazi do bitnijih promjena u hidrauličkom tlaku tijekom faze ubrizgavanja, to je pokazatelj određenih poteškoća pri popunjavanju kalupne šupljine. Općenito se preporučuje mjerenje tlaka u hidrauličkom sustavu tijekom ciklusa injekcijskog prešanja. Mjerenje tog tlaka je jednostavno, a daje osnovne informacije o popunjavanju kalupne šupljine. Tlak taljevine na vrhu pužnog vijka ima profil sličan tlaku u hidrauličkom sustavu, no samo tijekom faze ubrizgavanja. Tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka, profili im se bitno razlikuju (slika 3.3). Tlak u hidrauličkom sustavu stoga omogućuje uvid u zbivanja tijekom faze punjenja kalupne šupljine, no ne daje nikakve podatke o tijeku naknadnog tlaka i tijeku tlaka u kalupnoj šupljini. [10,11]

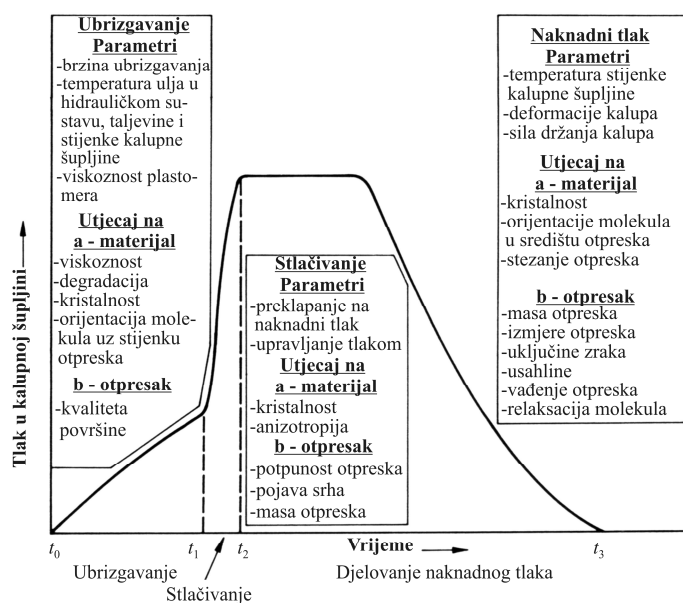


Slika 3.3 Informacije koje je moguće prikupiti bilježenjem tlakova u hidrauličkom sustavu i kalupnoj šupljini [11]

Profil tlaka u hidrauličkom sustavu omogućuje dobivanje uvida u pojavu otpora tečenju taljevine u mlaznici ubrizgavalice i uljevnom sustavu kalupa prije nego li taljevina dosegne eventualna osjetila tlaka postavljena u kalupnoj šupljini. Tlak u hidrauličkom sustavu raste s porastom otpora tečenju plastomerne taljevine tijekom punjenja kalupne šupljine. [10,11]

3.1.1.3 Tlak u kalupnoj šupljini [11]

Analiza procesa injekcijskog prešanja trajno doprinosi njegovu učinkovitijem vođenju. Pri tome je tlak u kalupnoj šupljini središnja zavisna procesna varijabla. Profil tlaka mjereno u kalupnoj šupljini ovisi prvenstveno o položaju osjetila tlaka u kalupnoj šupljini (blizu ili dalje od ušća). Osjetila ne bilježe nikakav tlak tijekom faze ubrizgavanja do trenutka kada taljevina dođe u kontakt s osjetilom. Tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka, tlak u kalupnoj šupljini moguće je mjeriti samo do trenutka kada se stijenka otpreska uslijed stezanja odvoji od stijenke kalupne šupljine, tj. osjetila tlaka. Stoga je osjetilo tlaka najuputnije postaviti u blizini ušća jer je na tom području moguće prikupiti najkvalitetnije podatke o otpresku, a vrijeme mogućeg mjerenja tlaka je najdulje (najmanje stezanje uslijed djelovanja naknadnog tlaka).



Slika 3.4 Utjecaj faza tijekom tlaka u kalupnoj šupljini na otpresak [11]

Slika 3.4 prikazuje tijek tlaka u kalupnoj šupljini te njegov utjecaj na svojstva otpreska. Prateći krivulju tlaka u kalupnoj šupljini moguće je uočiti tri različite faze: obujamno punjenje kalupne

šupljine (faza punjenja), stlačivanje taljevine (faza stlačivanja) i održavanje plastomernog materijala tijekom očvršćivanja pri povišenom - naknadnom tlaku (faza djelovanja naknadnog tlaka).

Faza ubrizgavanja ima najviše utjecaja na pojavnost otpreska, dok faza djelovanja naknadnog tlaka najviše utječe na dimenzijsku stabilnost otpreska. Moguće je uočiti kako tlak u fazi punjenja uglavnom ima ulogu svladavanja otpora tečenju taljevine kroz uljevni sustav i kalupnu šupljinu, dok je utjecaj na kvalitetu otpreska vrlo mali. S druge strane, tlak u fazi stlačivanja, a posebice naknadni tlak, učinkovitije utječu na kvalitetu otpreska.

Profil tlaka u kalupnoj šupljini može upozoriti na tipične pogreške u procesu injekcijskog prešanja. Izražena vršna vrijednost tlaka tijekom faze stlačivanja rezultat je ozbiljne greške u procesu. Najčešće uzrok leži u netočno podešenoj točki preklapanja na naknadni tlak. Takva greška u pravilu rezultira pojavom srha na otpresku, te napetostima uslijed prekomjernog stlačivanja taljevine, odnosno smanjenom dimenzijskom stabilnošću otpreska i razlikama u postignutim težinama otpresakâ iz ciklusa u ciklus.

3.1.1.4 Preklapanje na naknadni tlak

Kako se u praksi rijetko rabe osjetila tlaka u kalupnim šupljinama vrlo se često griješi u izboru točke preklapanja na naknadni tlak. Pri tome postoji nekoliko mogućnosti [10,11,13,15]: ubrizgavanje bez preklapanja (a), ubrizgavanje s prekasnim preklapanjem (b), ubrizgavanje s preranim preklapanjem (c) i ubrizgavanje s optimalnim preklapanjem (d).

Ubrizgavanje bez preklapanja na naknadni tlak je primjenjivo u slučajevima kada je konačni potrebni tlak u kalupnoj šupljini blizak tlaku tijekom ubrizgavanja. To je čest slučaj kada kalup ima malo ušće ili kada otpresak ima veliki omjer put tečenja/debljina stijenke. [10,11]

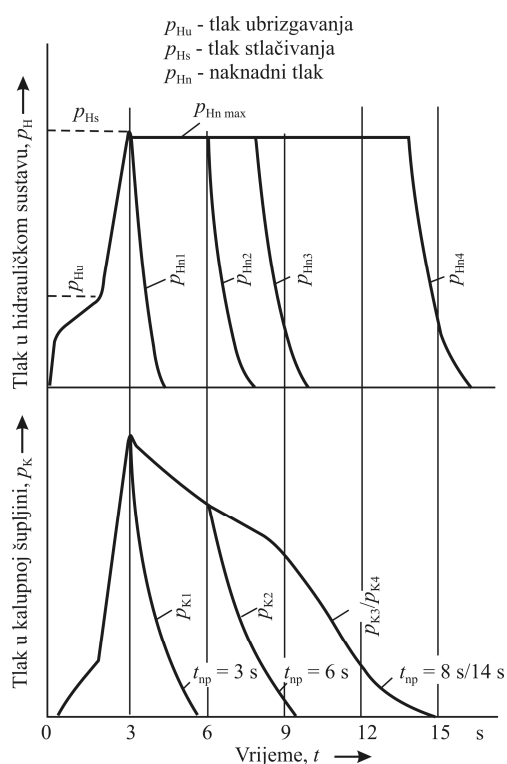
Pri određivanju točke preklapanja na naknadni tlak, uobičajena su četiri pristupa [10,11,13,15]:

- preklapanje ovisno o vremenu
- preklapanje ovisno o prijedrenom putu pužnog vijka
- preklapanje ovisno o tlaku u kalupnoj šupljini
- preklapanje ovisno o sili držanja kalupa.

Najčešće se rabi preklapanje na naknadni tlak ovisno o prijašnjem putu pužnog vijka. Tim se pristupom omogućuje preklapanje na naknadni tlak pri istoj popunjenosti kalupne šupljine u svakom ciklusu. [10,11,13]

3.1.1.5 Naknadni tlak (naknadni tlak u kalupnoj šupljini)

Najvažniji razlog uporabe naknadnog tlaka tijekom ciklusa injekcijskog prešanja je dodavanje novog materijala u kalupnu šupljinu u cilju smanjenja stezanja materijala nastalog uslijed hlađenja. Time se sprječavaju pojave grešaka na otpresku kao što su mjehuravost i usahline, a stezanje i vitoperenje se minimiraju. Faza djelovanja naknadnog tlaka počinje točkom preklapanja s tlaka ubrizgavanja, a završava na kraju djelovanja naknadnog tlaka kada dolazi do pečačenja ušća. Tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka, mala je korelacija između tijeka tlaka u hidrauličkom sustavu i u kalupnoj šupljini (slika 3.5). [10,11]

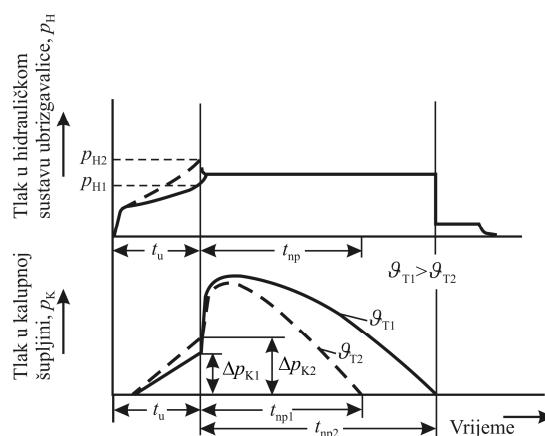


Slika 3.5 Korelacija između naknadnog tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i u kalupnoj šupljini: p_H - tlak u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice, p_K - tlak u kalupnoj šupljini, t_{np} - vrijeme djelovanja naknadnog tlaka [11]

Vrijednost i trajanje naknadnog tlaka imaju bitan utjecaj na dimenzijsku stabilnost te optička svojstva otpreska. Određivanje vrijednosti naknadnog tlaka temelji se na jednostavnom mjerenju izmjera otpreska, kao i na vizualnom pregledu (izostanak usahlina). [11]

3.1.1.6 Temperatura taljevine

Temperatura taljevine izravno određuje termodinamička svojstva plastomerne taljevine kao što su viskoznost, entalpija i specifični obujam. Stoga temperatura taljevine ima izravan utjecaj i na neke parametre injekcijskog prešanja. Slika 3.6 prikazuje kako tlak u kalupnoj šupljini opada sa sniženjem temperature taljevine. Istodobno se skraćuje i vrijeme očvršćivanja ušća. To znači kako se skraćuje vrijeme tijekom kojeg se može utjecati na svojstva otpreska, ali se istodobno skraćuje i vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. [10,11]



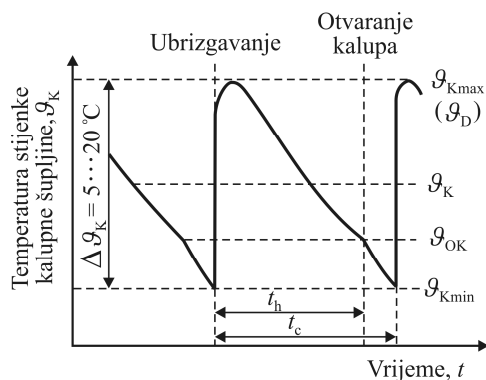
Slika 3.6 Utjecaj temperature taljevine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i kalupnoj šupljini: θ_T - temperatura taljevine, t_u - vrijeme ubrizgavanja [11]

3.1.1.7 Temperatura stijenke kalupne šupljine

Temperatura stijenke kalupne šupljine zavisna je procesna varijabla i predstavlja glavni parametar koji utječe na svojstva otpreska, proizvodnost procesa, točnost i preciznost izmjera otpreska, ponovljivost procesa itd. [11]

Kada se govori o temperaturi stijenke kalupne šupljine, potrebno je naglasiti kako se ne radi samo o jednoj temperaturi već o temperaturnom polju (slika 3.7) koje se ciklički mijenja (od ciklusa do ciklusa). [16]

U trenutku dodira plastomerne taljevine sa stijenkom kalupne šupljine, na njoj se uspostavlja maksimalna temperatura u ciklusu, dodirna temperatura (ϑ_D). Kako medij za temperiranje, a često i okolina kalupu odvođe toplinu, temperatura stijenke kalupne šupljine pada do trenutka otvaranja kalupa, kada se na stijenci kalupne šupljine uspostavlja temperatura otvaranja kalupa (ϑ_{OK}).



Slika 3.7 Temperaturno polje u kalupu: ϑ_K - temperatura stijenke kalupne šupljine, ϑ_D - dodirna temperatura, ϑ_{OK} - temperatura otvaranja kalupa, t_c - vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja, t_h - vrijeme hlađenja otpreska [16]

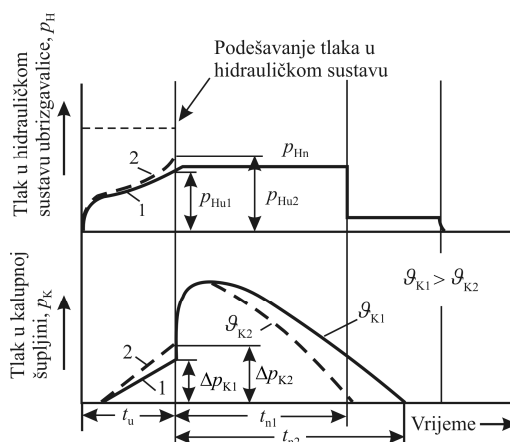
Nakon otvaranja kalupa slijedi vađenje otpreska iz kalupne šupljine tijekom kojeg temperatura stijenke kalupne šupljine dodatno pada do svoje minimalne vrijednosti (ϑ_{Kmin}). Temperatura stijenke kalupne šupljine koja se rabi tijekom proračuna (analitičkih i numeričkih), te koju propisuju proizvođači polimernih materijala je u stvari računski vrijednost koja predstavlja aritmetičku sredinu između dodirne temperature i temperature stijenke u trenutku otvaranja kalupa. Pri tome valja napomenuti kako prethodno objašnjenje temperature stijenke kalupne šupljine vrijedi samo za određenu točku na stijenci kalupne šupljine. Kako se tijekom procesa injekcijskog prešanja u kalupnoj šupljini na različitim mjestima postižu i različita toplinska stanja, to znači kako u kalupnoj šupljini također postoji čitavo prostorno polje temperatura stijenke kalupne šupljine. [16]

Općenito temperaturu stijenke kalupne šupljine smatra se jednim od najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja za postizanje odgovarajućih svojstava otpresaka. [10,11,13-17] Posebice je bitno trajno održavanje postignute propisane temperature stijenke kalupne šupljine. Međutim radi se o slučajnoj varijabli koja ovisi o većem broju statičkih i dinamičkih čimbenika. Toplinska svojstva materijala stijenke kalupne šupljine te promjer i raspored kanala za temperiranje predstavljaju statičke čimbenike. Ovisnost temperaturnog polja u kalupnoj šupljini, a time i svojstava otpreska o materijalu elemenata kalupne šupljine biti će podrobnije opisana u poglavlju

6. Temperatura taljevine, temperatura okoline, brzina i temperatura medija za temperiranje, te vremena hlađenja otpreska odnosno ciklusa injekcijskog prešanja predstavljaju dinamičke čimbenike. Kako se svi navedeni čimbenici ciklički mijenjaju tijekom ciklusa injekcijskog prešanja postoji samo određena vjerojatnost da se iz ciklusa u ciklus održi propisana temperatura stijenke kalupne šupljine. [10,16]

Stoga je moguće zaključiti kako temperatura stijenke kalupne šupljine nije izravno upravljiv parametar injekcijskog prešanja. Temperaturu stijenke kalupne šupljine moguće je mjeriti s pomoću odgovarajućih osjetila temperature, te na temelju dobivenih rezultata podešavati pa i regulirati izravno podesive parametre u cilju postizanja propisane temperature stijenke kalupne šupljine. [13,16]

Temperatura stijenke kalupne šupljine ima vrlo mali utjecaj na tijek tlaka u kalupnoj šupljini u fazi punjenja kalupa radi kratkog vremena hlađenja unutar faze punjenja. S druge strane, temperatura stijenke kalupne šupljine snažno utječe na tijek tlaka u fazi djelovanja naknadnog tlaka, jer se tim parametrom definiraju uvjeti hlađenja (očvršćivanja) otpreska (slika 3.8). [10]



Slika 3.8 Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i tlaka u kalupnoj šupljini [11]

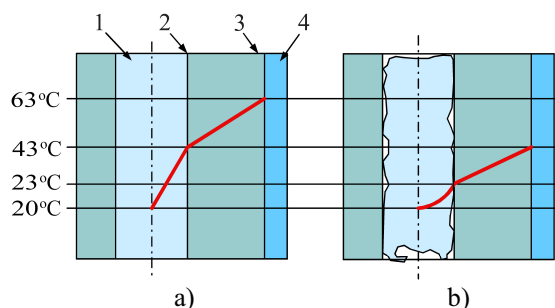
3.1.1.8 Temperatura medija za temperiranje

Pri priključivanju kalupa na temperiralo ili izravno na vodovodnu mrežu, kroz kanale za temperiranje kalupa ustrojava medij za temperiranje. Pri injekcijskom prešanju plastomera medij za temperiranje predaje ili preuzima toplinu kalupu, pa se temperatura medija pri prolasku kroz kanale za temperiranje mijenja. Stoga postoje ulazna i izlazna temperatura medija za

temperiranje. Temperatura medija za temperiranje (ϑ_M) predstavlja aritmetičku sredinu tih dviju vrijednosti. Temperatura medija za temperiranje predstavlja jedan od izravno podesivih parametara s pomoću kojih je moguće podešavanje temperaturnog polja u kalupu. U tom slučaju potrebno je raspolagati temperiralom koje održava željenu (propisanu) ulaznu temperaturu medija za temperiranje. Pri izravnom priključku kalupa na vodovodnu mrežu takvo podešavanje nije moguće. Tada je kalupu moguće samo odvoditi toplinu. [16]

3.1.1.9 Brzina (protok) medija za temperiranje

Učinkovitost temperiranja kalupa izražava se preko izmjene topline između stijenke kalupne šupljine i medija za temperiranje. Temperaturni gradijent od stijenke kalupne šupljine do medija za temperiranje sastoji se od dvaju dijelova: gradijent kroz materijal elemenata kalupne šupljine ovisan o toplinskoj prohodnosti materijala i gradijent na stijenci kanala medija za temperiranje ovisan o protoku medija za temperiranje. [16,18,19] Strujanje medija za temperiranje može biti laminarno, turbulentno i prijelazno. Pri niskim brzinama medija za temperiranje tečenje medija je laminarno, a toplina preuzeta sa stijenke kanala za temperiranje treba biti izmijenjena kroz slojeve laminarnog strujanja. Kako su mediji za temperiranje u pravilu loši vodiči topline, izmjena topline je neefikasna (slika 3.9 a). S povišenjem brzine protoka medija za temperiranje brzina izmjene topline se povisuje na stijenama kanala za temperiranje, sve dok se ne postigne turbulentno strujanje medija. U tom slučaju vektor brzine tečenja medija dobiva i dodatni vektor okomit na smjer kanala za temperiranje, što uzrokuje dramatično povišenje učinkovitosti izmjene topline (slika 3.9 b). [16,19]



Slika 3.9 Temperaturni gradijent kroz stijenku kalupa: a) pri laminarnom strujanju, b) pri turbulentnom strujanju; 1 - medij za temperiranje, 2 - stijenka kanala za temperiranje, 3 - stijenka kalupne šupljine, 4 - otpresak [19]

Veličina kojom je moguće opisati strujanje medija za temperiranje kroz kanale je Reynoldsov broj. Intenzivna izmjena topline zahtijeva Reynoldsove brojeve veće od 10 000. [16,18,19]

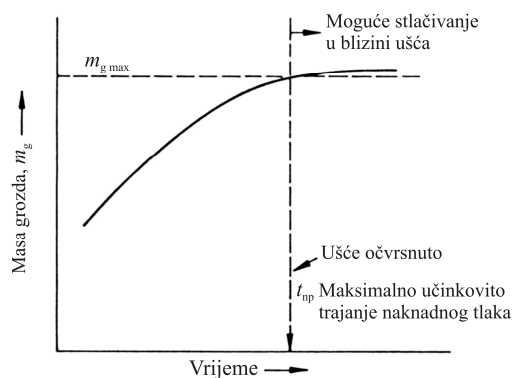
3.1.1.10 Brzina ubrizgavanja (vrijeme ubrizgavanja)

Brzina koja je bitna za proces injekcijskog prešanja je brzina kretanja pužnog vijka tijekom ubrizgavanja taljevine u kalup. Vrijeme ubrizgavanja obrnuto je proporcionalno brzini ubrizgavanja. [11] Vrijeme ubrizgavanja sačinjavaju vrijeme potrebno za popunjavanje kalupne šupljine plastomernom taljevinom, vrijeme stlačivanja taljevine i vrijeme održavanja maksimalnog tlaka u kalupnoj šupljini. To je vrijeme u pravilu vrlo kratko no bitno za kvalitetu otpreska. [16] Kratko vrijeme ubrizgavanja uzrokuje istodobno veliki pad tlaka. S druge strane produljena vremena ubrizgavanja uzrokuju smanjenje efektivnog presjeka kroz kojeg teče taljevina uslijed očvršćivanja taljevine, što opet dovodi do većeg pada tlaka. [10]

Tlak u hidrauličkom sustavu raste s porastom brzine ubrizgavanja, što je moguće objasniti porastom otpora tečenju taljevine u mlaznici ubrizgavalice i ušću kalupa. Pad tlaka tijekom punjenja kalupne šupljine, mjeren u blizini ušća, veći je pri nižoj brzini ubrizgavanja. To je odraz istodobnog procesa hlađenja otpreska, tijekom kojeg se povisuje viskoznost taljevine i smanjuje efektivni presjek tečenja taljevine. Sa stajališta proizvodnosti i kvalitete otpreska, brzina ubrizgavanja trebala bi biti što je moguće viša. [11]

3.1.1.11 Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka

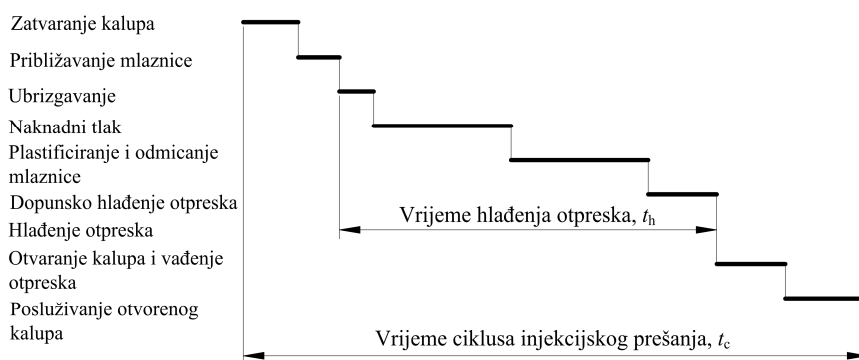
Pod vremenom djelovanja naknadnog tlaka najčešće se smatra vrijeme potrebno za očvršćivanje ušća. Drugi je pristup dovođenje u vezu vremena djelovanja naknadnog tlaka i mase otpreska. Sustavnim mjerenjem moguće je uočiti da nakon određenog vremena, produljenje vremena djelovanja naknadnog tlaka neće imati utjecaja na povećanje mase proizvoda (slika 3.10). Stoga je moguće odrediti optimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka. [11,13]



Slika 3.10 Određivanje optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka [11]

3.1.1.12 Vrijeme hlađenja otpreska [16]

Vrijeme hlađenja otpreska najčešće predstavlja najdulje vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. Stoga je pri optimiranju ciklusa injekcijskog prešanja posebnu pozornost potrebno posvetiti određivanju vremena hlađenja otpreska. Prema normi DIN 24450 vrijeme hlađenja otpreska definira se kao vrijeme koje započinje naredbom "ubrizgavanje", a završava naredbom "otvaranje kalupa". Tako definirano vrijeme hlađenja u sebi obuhvaća sljedeće operacije: ubrizgavanje, djelovanje naknadnog tlaka, plastificiranje i odmicanje mlaznice, dopunsko hlađenje otpreska, hlađenje otpreska, otvaranje kalupa i vadenje otpreska, posluživanje otvorenog kalupa (slika 3.11). Najčešće sve navedene operacije završavaju prije nego li se otpresak ohladi do temperature postojanosti oblika. Stoga je nužno ostvariti dodatno vrijeme hlađenja otpreska.



Slika 3.11 Analiza ciklusa injekcijskog prešanja [16]

Proračun vremena hlađenja otpreska temelji se na rješavanju Fourierove diferencijalne jednadžbe: [16]

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \nabla^2 \vartheta \quad (3.1)$$

gdje su: ϑ - temperatura ($^{\circ}\text{C}$), t - vrijeme (s), a - toplinska difuzivnost.

Jedno od mogućih analitičkih rješenja je opća jednadžba hlađenja otpreska: [16]

$$t_h = \frac{s_o^2}{K_O \cdot a_{ef} \cdot \pi^2} \cdot \ln \left[K_U \cdot \frac{\vartheta_T - \vartheta_K}{\vartheta_{PO} - \vartheta_K} \right] \quad (3.2)$$

gdje su: t_h - vrijeme hlađenja otpreska (s), s_o - karakteristična izmjera otpreska (debljina stijenke) (m), K_O - koeficijent oblika otpreska, a_{ef} - efektivna toplinska difuzivnost (m^2/s), K_U - koeficijent unutrašnjosti otpreska, ϑ_T - temperatura plastomerne taljevine ($^{\circ}\text{C}$), ϑ_K - temperatura stijenke kalupne šupljine ($^{\circ}\text{C}$), ϑ_{PO} - temperatura postojanosti oblika otpreska ($^{\circ}\text{C}$).

Pri različitim oblicima otpresaka, rabe se koeficijenti oblika i unutrašnjosti otpreska za jednostavnija geometrijska tijela (o vremenu hlađenja otpreska opširnije u [16]).

Računalni programi za simulaciju procesa injekcijskog prešanja omogućuju numerička rješenja jednadžbe 3.1.

3.1.1.13 Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja [16]

Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja sastoji se od vremena hlađenja otpreska i pomoćnih vremena: [16]

$$t_c = t_h + t_p \quad (3.3)$$

gdje su: t_c - vrijeme ciklusa (s), t_p - pomoćno vrijeme (s).

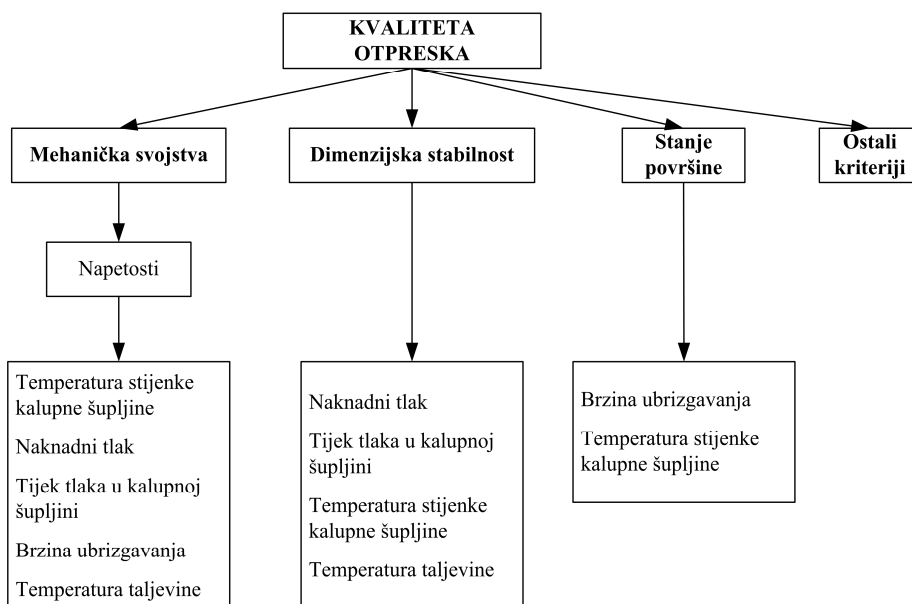
Općenito, pomoćno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja dijeli se na: vrijeme podmazivanja i čišćenja kalupa, vrijeme posluživanja otvorenog kalupa, vrijeme zatvaranja kalupa, vrijeme ukapčanja, vrijeme približavanja mlaznice, vrijeme otvaranja kalupa i vrijeme vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Pomoćno vrijeme se u već uhodanom ciklusu najčešće sastoji od vremena zatvaranja kalupa, vremena otvaranja kalupa i vremena vađenja otpreska iz kalupa.

3.1.2 Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na svojstva otpreska

Svi elementi sustava za injekcijsko prešanje utječu na kvalitetu otpreska te međusobno. Stoga samo optimalno sastavljen sustav za injekcijsko prešanje plastomera uz optimalno podešene uvjete preradbe može rezultirati proizvodnjom dimenzijski stabilnih otpresaka optimalne kvalitete uz minimalno trajanje ciklusa. Pri optimalnom vođenju procesa injekcijskog prešanja cilj je uz minimalni utrošak vremena, energije i materijala proizvesti kvalitetan otpresak. Kako su konačne veličine (npr. kvaliteta otpreska, utrošak energije, itd.) kao takve nemjerljive, treba ih dovesti u korelaciju s lako mjerljivim veličinama procesa (npr. brzina ubrizgavanja, temperatura taljevine, temperatura stijenke kalupne šupljine, tlak ubrizgavanja itd.). [13,14]

Kvalitetu otpreska moguće je podijeliti u 5 skupina: stanje površine otpreska, dimenzijska stabilnost, mehanička svojstva, unutrašnja svojstva, ostala svojstva. [13,14]

Povezanost pojedinih parametara procesa injekcijskog prešanja s kvalitetom otpreska prikazuje slika 3.12 iz koje je vidljivo kako je kvaliteta otpreska očito funkcija prošlosti procesa, a ona je rezultat parametara preradbe. [13,16]



Slika 3.12 Kvaliteta otpreska u ovisnosti o parametrima preradbe [13,16]

Prethodna istraživanja su ukazala kako su pri klasičnom injekcijskom prešanju najutjecajniji parametri na kvalitetu otpreska: [12-17,20-30]

- temperatura stijenke kalupne šupljine
- tlak u kalupnoj šupljini
- temperatura taljevine
- brzina (vrijeme) ubrizgavanja.

Analiza temperature stijenke kalupne šupljine i tlaka u kalupnoj šupljini te njihova korelacija s konačnim veličinama pokazali su kako se mjerenjem tih termodinamičkih veličina stanja može najbolje opisati događaje u procesu te se dobiti najviše informacija o kvaliteti otpreska. [13,24]

U nastavku bit će opisana detaljnije samo neka svojstva otpresaka te mogućnost utjecaja na njih s pomoću podešavanja parametara preradbe injekcijskim prešanjem.

3.1.2.1 Dimenzijska stabilnost otpreska

Svi do sada spomenuti parametri preradbe imaju izravni ili posredni utjecaj na izmjere otpreska. Pri tome prevladava utjecaj naknadnoga tlaka i vremena njegovog djelovanja (tablica 3.2). To znači kako je za definiranje dimenzijske stabilnosti otpreska najvažnija faza djelovanja naknadnog tlaka u ciklusu injekcijskog prešanja (opširnije u [11]).

Tablica 3.2 Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na izmjere otpreska [11]

Parametar	Utjecaj	Izmjere otpreska
Povišenje temperature taljevine	- povećanje obujma	↓
Povišenje temperature stijenke kalupne šupljine	- viša temperatura otvaranja kalupa	↓
Povišenje brzine ubrizgavanja	- bolji prijenos naknadnog tlaka u kalupnu šupljinu	↑
Povišenje naknadnog tlaka	- bolja kompenzacija stezanja, bolje stlačivanje taljevine	↑
Produljenje vremena djelovanja naknadnog tlaka	- isto kao i prethodno (prije pečačenja ušća) - nakon pečačenja ušća	↑ -
Povećanje deformacija kalupa uslijed tlaka u kalupnoj šupljini	- disanjem kalupa omogućuje se bolje djelovanje naknadnog tlaka	↑
Povećanje presjeka ušća	- posredni utjecaj (ovisno o brzini ubrizgavanja, naknadnom tlaku i temperaturi taljevine)	↑

3.1.2.2 Mehanička svojstva otpreska

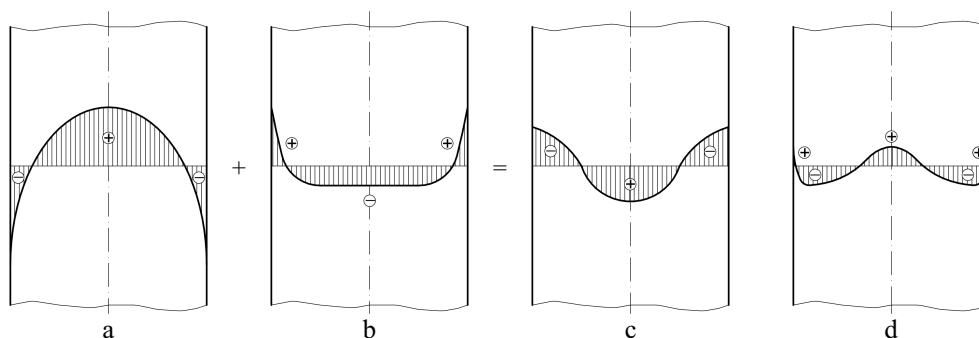
Mehanička svojstva otpresaka ne ovise samo o kemijskoj strukturi plastomera, već na njih bitno utječu i parametri preradbe. Gotovo sva mehanička svojstva otpresaka načinjenih od istoga plastomernog materijala mogu se mijenjati promjenom parametara injekcijskog prešanja. Većina tih svojstava koja utječu na kvalitetu otpreska uglavnom su odraz unutrašnje strukture materijala otpreska. [11]

Najvažnije strukturne karakteristike plastomera koje su ovisne o parametrima preradbe su: orijentacija makromolekula, orijentacija punila i ojačavala (ukoliko su prisutna), zaostala naprezanja, kristalnost strukture i stupanj kristalnosti. [11]

Mehanička svojstva otpreska izravno su ovisna o stupnju i smjeru orijentacije molekula materijala otpreska. Općenito vrijedi pravilo kako su mehanička svojstva viša u smjeru tečenja, a niža u smjeru okomitom na smjer tečenja. Orijeantiranost se smanjuje s povećanjem puta tečenja.

U blizini ušća naknadni tlak može uzrokovati lagani porast stupnja orijentacije u središtu presjeka otpreska. Orijehtacija uglavnom ovisi o temperaturi taljevine i profilu brzine čela taljevine. Orijehtacija amorfnih i kristalastih plastomera je različita. Veći iznosi stezanja javljaju se pri preradbi kristalastih plastomera, pa je nužno dodavanje veće količine taljevine tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka. Dodavanje taljevine povisuje stupanj orijentacije posebice kroz središte presjeka otpreska. Brzina čela taljevine također utječe na orijentaciju. Pri visokim brzinama ubrizgavanja ostvaruje se veći stupanj orijentacije. [10]

Zaostala naprezanja su mehanička naprezanja prisutna u otpresku bez djelovanja vanjskog opterećenja (slika 3.13). Ona su rezultat različitih temperaturnih profila u otpresku tijekom hlađenja, što uzrokuje deformacije kutova atomskih veza u makromolekulama. Površinski sloj se brzo hladi i očvršćuje čineći krutu ljusku koja sputava stezanje još uvijek vrućih unutrašnjih slojeva tijekom njihova hlađenja. Takvo stanje rezultira rasteznim naprezanjima u unutrašnjosti otpreska te pritisnim naprezanjima na vanjskim dijelovima otpreska. Deformacije koje uzrokuju zaostala naprezanja uglavnom su energijsko-elastične prirode. [10, 11,31]



Slika 3.13 Napetosti u pločastom otpresku: a - zbog uvjeta zagrijavanja ili hlađenja, b - zbog uvjeta tečenja, c - zbog djelovanja unutarnjeg tlaka, d - ukupne (superponirane) napetosti [31]

Zaostala naprezanja predstavljaju mehaničko predopterećenje otpresku i imaju bitan utjecaj na uporabljivost otpreska, dimenzijsku stabilnost, čvrstoću i kemijsku postojanost. [10,31]

Temperatura stijenke kalupne šupljine ključni je parametar za pojavu zaostalih naprezanja u otpresku. Niže temperature stijenke kalupne šupljine pogoduju pojavi povišenih zaostalih naprezanja u otprescima. Vrijeme hlađenja bitno utječe na profil zaostalih naprezanja u otpresku. Skraćenje vremena hlađenja smanjuje razinu zaostalih naprezanja. Razlog djelomično leži u činjenici da otpresak što je više temperature pri vađenju iz kalupne šupljine, to mu je omogućena bolja relaksacija makromolekula. Drugi razlog je ranije vađenje otpreska iz kalupne šupljine koje

rezultira bržim uravnoteženjem profila temperatura po presjeku otpreska, pa zaostala naprezanja nastaju uslijed manjih temperaturnih razlika. Debljina stijenke otpreska također bitno utječe na profil zaostalih naprezanja. Otpresci tanjih stijenki hlade se brže od debljih, pa se u njima razvijaju veći temperaturni gradijenti koji uzrokuju više vrijednosti zaostalih naprezanja. Deblji otpresci također omogućuju bolje uvjete za relaksaciju naprezanja. [10]

Vršne vrijednost tlaka tijekom stlačivanja i prekomjerni naknadni tlak u kalupnoj šupljini uzrokuju stlačivanje i preopterećenje u središnjem dijelu presjeka otpreska. U takvim slučajevima otpresak se vadi iz kalupne šupljine s povišenim tlakom u njegovoj unutrašnjosti. Takvo stanje dovodi do pojave *napetosti uslijed stlačivanja* u kalupu. [11]

Pri preradbi kristalastih plastomera postiže se sređenija struktura molekula na mikro razini. Takve skupine sređenih makromolekula nazivaju se kristalitima. Stupanj kristalnosti može se definirati kao omjer kristaliziranog materijala prema materijalu koji je bio sposoban kristalizirati. Stupanj kristalnosti definira nekoliko svojstava otpreska. Postoji izravna veza između stupnja kristalnosti i mase otpreska, rastezne čvrstoće, modula elastičnosti i žilavosti koji rastu proporcionalno s porastom stupnja kristalnosti. [10]

Stupanj kristalnosti ovisi prvenstveno o molekularnoj strukturi, no na njega je moguće utjecati i s pomoću parametara preradbe te naknadnom obradbom. Na stupanj kristalnosti najveći utjecaj ima temperatura stijenke kalupne šupljine. Viša temperatura stijenke kalupne šupljine pogoduje postizanju višeg stupnja kristalnosti. Viša brzina hlađenja uzrokuje postizanje manjeg stupnja kristalnosti. U tom je slučaju moguće očekivati naknadnu kristalizaciju koja ima utjecaj na svojstva otpreska i njegove izmjere. [10]

Debljina stijenke otpreska utječe na postizanje određenog stupnja kristalnosti. Kako se deblji otpresci hlade sporije, u njihovoj strukturi postiže se viši stupanj kristalnosti nego li u slučaju tankostjenih otpresaka. [10]

Tijekom faze ubrizgavanja najjači je utjecaj tlaka u kalupnoj šupljini na postizanje kvalitete površine otpreska, orijentiranost molekula, te postignuti stupanj kristalnosti. Ta faza ujedno definira i razinu toplinskih i mehaničkih opterećenja taljevine. Tijekom faze stlačivanja bitno se utječe na oblikovanje otpreska i poprimanje svih detalja kalupne šupljine. Tijekom te faze također je moguća pojava srha, te oštećenja kalupa. Faza djelovanja naknadnog tlaka usko je povezana s postizanjem odgovarajuće mase otpreska, kao i s odgovarajućom dimenzijskom

stabilnošću otpreska. Tijekom te faze također se utječe na postizanje orijentacije strukture i na postignuti stupanj kristalnosti, ali u manjoj mjeri nego li tijekom ubrizgavanja. Moguće je zaključiti kako se u svim fazama ciklusa injekcijskog prešanja može utjecati na mehanička svojstva otpresaka. [11]

Temperatura stijenke kalupne šupljine, ukupno gledajući, smatra se najutjecajnijim parametrom preradbe injekcijskim prešanjem na svojstva otpreska (tablica 3.3). [13]

Temperatura stijenke kalupne šupljine ovisi o toplinskim svojstvima materijala elemenata koji oblikuju kalupnu šupljinu i izmjerama kanala za temperiranje. Također je dinamička funkcija temperature taljevine, temperature okoline te temperature i brzine medija za temperiranje, kao i vremena hlađenja otpreska i vremena ciklusa injekcijskog prešanja. [13,16]

Tablica 3.3 Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na neka svojstva otpreska [13]

Utjecajna veličina	Porast	Pad
• Temperatura stijenke kalupne šupljine	x	
Zavisne veličine (svojstva otpreska)		
• Napetosti		x
• Kristalnost	x	
• Naknadno skupljanje		x
• Toplinska postojanost	x	
• Orijehtacija		x
• Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	x	
• Vrijeme pečenja ušća	x	
• Vrijeme hlađenja (ciklusa)	x	

Stohastičnost temperature stijenke kalupne šupljine očituje se u činjenici kako postoji samo stanovita vjerojatnost da se postignuta temperatura i zadrži u idućem ciklusu, što zahtijeva mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine. Pokusi su pokazali kako se najbolji rezultati postižu ako se osjetilo temperature postavlja na površini ili neposredno ispod površine stijenke kalupne šupljine. [13,16]

Tlak u kalupnoj šupljini sljedeći je utjecajni čimbenik na svojstva otpreska. Važnost tijeka tlaka u kalupnoj šupljini na svojstva otpreska prikazuje slika 3.4. Ispravan tijek tlaka u kalupnoj šupljini i njegova kontrola tijekom preradbe postiže se mjerenjem i registriranjem. Stoga se u kalup ugrađuju osjetila tlaka. Tlak u kalupnoj šupljini moguće je mjeriti izravno ili posredno. [11,13,29]

3.2 TANKOSTJENO INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERA

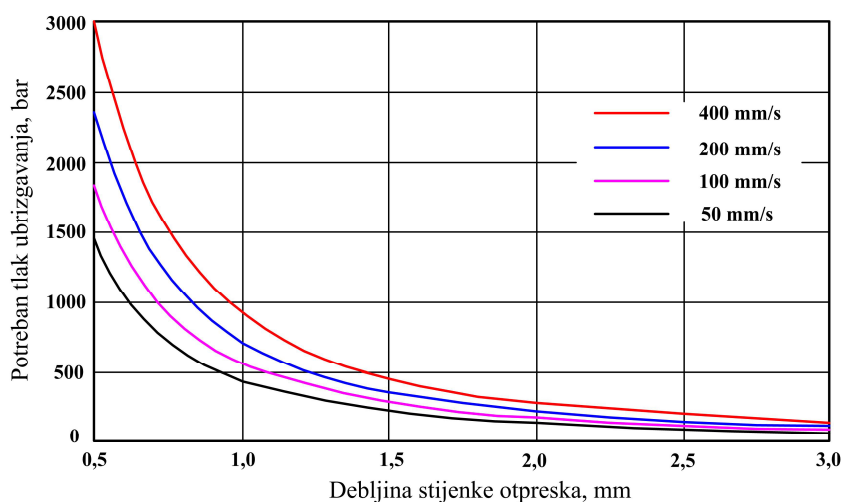
Pri injekcijskom prešanju pojam tankostjeno je relativan. Klasični plastični otpresci imaju debljinu stijenke 1,5 do 2 mm. Tankostjene konstrukcije otpresaka imaju debljine od 0,5 do 1,5 mm, a posebnu skupinu tankostjenih konstrukcija imaju debljine stijenke manje od 0,5 mm. Druga definicija tankostjenog otpreska temelji se na omjeru duljine tečenja i debljine stijenke. Uobičajeni omjeri pri tankostjenim otprescima kreću se u omjerima 100:1 i više. [32-41] Valja napomenuti kako definicija tankostjenog otpreska nije konačna, a postizive debljine stijenki otpreska trajno se pomiču prema nižim vrijednostima.

Pri injekcijskom prešanju tankostjenih plastomernih otpresaka dolazi do izražaja činjenica da je temeljni informacijski ulaz u sustav za injekcijsko prešanje oblik i kompleksna masivnost otpreska. Taj ulaz, a posebno kompleksna masivnost koja se izražava s pomoću debljine stijenke otpreska, izravno utječe na vrstu odabranoga materijala, uvjete preradbe, izbor ubrizgavalice i temperirala. [40] Tankostjeno injekcijsko prešanje je proces injekcijskog prešanja sa specifičnim parametrima kao što su visoke brzine ubrizgavanja i visoki tlakovi ubrizgavanja. Takvi uvjeti bitno suzuju raspon optimalnih parametara preradbe, te zahtijevaju posebne materijale, preciznije strojeve i pažljivije vođenje procesa injekcijskog prešanja. Unatoč tome, postupci tankostjenog injekcijskog prešanja postaju sve važnijima uslijed ekonomičnosti (ušteda materijala, kratki ciklusi) i rastućeg tržišta tankostjenih proizvoda (elektronika, telekomunikacije itd.), te trendovima na tim tržištima. [33]

Debljina stijenke otpreska i zahtjevi koji se postavljaju na materijal otpreska obrnuto su proporcionalne veličine. To znači – što je tanja stijenka to su zahtijevane vrijednosti pojedinih svojstava materijala više. Materijali iz skupine plastomera koji se rabe za tankostjeno injekcijsko prešanje odlikuju se visokim vrijednostima žilavosti, čvrstoće, zadovoljavajuće postojanosti pri povišenoj temperaturi i dimenzijske točnosti i preciznosti. Uz to, bitna su i njihova preradbena svojstva. [40]

Smanjenje debljine stijenke otpreska povisuje udio zaostalih naprezanja u otpresku, što ima utjecaj na rasteznu čvrstoću otpreska te na svojstva otpreska na mjestima linija spajanja. Viša temperatura taljevine i temperatura stijenke kalupne šupljine, niži naknadni tlak i viša brzina ubrizgavanja djeluju na sniženje udjela zaostalih naprezanja u otpresku i na linijama spajanja, te općenito poboljšavaju mehanička svojstva tankostjenih otpreska. [39]

Pri tankostjenom injekcijskom prešanju, tečenje taljevine u kalupnoj šupljini bitno je ograničeno u usporedbi s izradbom klasičnih otpresaka. Poteškoće pri tečenju nastaju uslijed vrlo brzog stvaranja očvrnulog sloja uz stijenku kalupne šupljine koji smanjuju efektivni presjek tečenja taljevine. [32] Smanjenjem tog presjeka uvelike se pogoršavaju uvjeti tečenja taljevine radi povećanja otpora tečenju. Istodobno se viskoznost taljevine povisuje eksponencijalno sa sniženjem temperature taljevine. Utjecaj smanjenja debljine stijenke presjeka tečenja moguće je opisati kroz pojam tecljivosti. Debljina stijenke otpreska utječe na tecljivost polimernog materijala s trećom potencijom. Pri injekcijskom prešanju valja očekivati stvaranje očvrnulog sloja debljine oko 0,25 mm uz svaku stijenku kalupne šupljine, bez obzira kolika je debljina stijenke otpreska. [37] Pri izradbi vrlo tankih otpresaka (debljine stijenke 0,3 do 0,5 mm) potrebno je, radi stvaranja očvrnulog sloja uz stijenke uljevne i kalupne šupljine, ostvariti često tlakove ubrizgavanja više od 3 000 bara i to u djeliću sekunde, što zahtijeva visoku potrošnju energije (i preko 100 kW) (slika 3.14). [41]

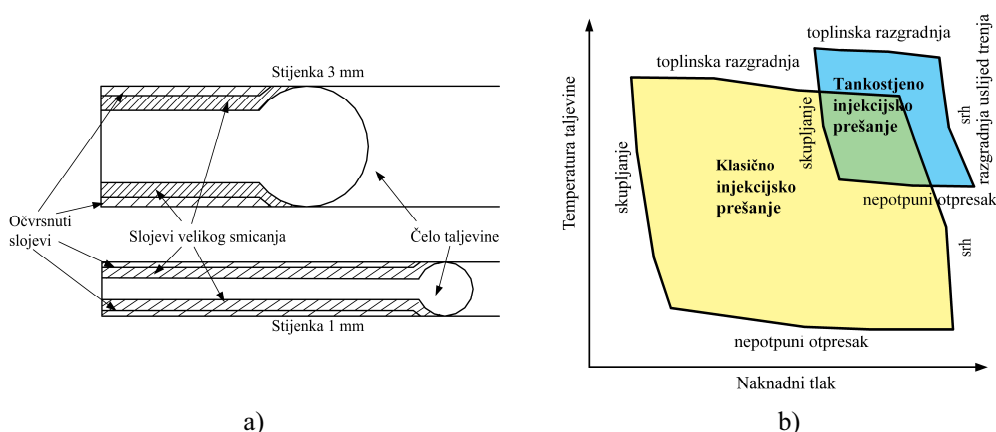


Slika 3.14 Potreban tlak ubrizgavanja pri različitim debljinama stijenki i brzinama ubrizgavanja [41]

Kao jedno od rješenja, prerađivači primjenjuju povišenje temperature taljevine i do 65 °C iznad preporučenih vrijednosti. Drugu alternativu predstavlja povišenje brzina ubrizgavanja (500 do 1 400 mm/s). Kako bi se osigurale visoke brzine ubrizgavanja, potrebno je osigurati i vrlo visoke tlakove ubrizgavanja (2 400 do 3 000 bara). Za tankostjeno injekcijsko prešanje plastomernih otpresaka svojstveno je usko polje preradbenih parametara (slika 3.15). [11,34]

Ostali pristupi rješavanju poteškoća pri tankostjenom injekcijskom prešanju temelje se na uporabi vrućih uljevnih sustava, višestrukih ušća i/ili dinamički upravljanih mlaznica. Optimirani

profil brzine puta pužnog vijka i optimirano vrijeme ubrizgavanja također mogu smanjiti visinu potrebnog tlaka ubrizgavanja. U usporedbi s klasičnim vremenom ubrizgavanja od 2 s, vrijeme ubrizgavanja tankostjenih otpresaka kreće se u rasponu 0,1 do 0,5 s. [32]



Slika 3.15 Usporedba klasičnog i tankostjenog injekcijskog prešanja: a - presjek čela taljevine, b - područja zadovoljavajućih parametara [32]

Pri tankostjenom injekcijskom prešanju obujam ubrizgavanja smanjen je u usporedbi s klasičnim otprescima. Na taj način se smanjuje vrijeme boravka taljevine u cilindru za taljenje čime se izbjegava nepotrebno pregrijavanje materijala i opasnost od razgradnje materijala. Uslijed visokih brzina ubrizgavanja i visokih smičnih brzina, orijentacija molekula tankostjenih otpresaka je jače izražena. Kako bi se minimiralo anizotropno stezanje tankostjenih otpresaka, važno je ostvariti optimalno stlačivanje taljevine u kalupnoj šupljini. Stlačivanje taljevine moguće je sve do trenutka očvršćivanja najtanjeg dijela uljevnog sustava (najčešće je to ušće). Stoga se uljevni sustav dimenzionira tako da je ušće deblje od stijenke otpreska kako bi se omogućilo tečenje s deblje na tanju stijenku. Prekomjerno zadržavanje taljevine u cilindru za taljenje, previsoke temperature taljevine ili preveliko smicanje potrebno je izbjegavati radi sprječavanja degradacije materijala. [32]

Vremena ciklusa injekcijskog prešanja tankostjenih otpresaka kreću se u svega nekoliko sekundi. Stoga je na raspolaganju za pojedine faze ciklusa svega nekoliko desetinki sekunde. Pri tankostjenom injekcijskom prešanju stoga se na ubrizgavalice postavljaju dodatni zahtjevi. Rješenja i trendovi u razvoju ubrizgavalica za područje tankostjenog injekcijskog prešanja detaljno su opisani u [41].

Osim na području razvoja ubrizgavalica, određeni naponi načinjeni su i pri razvoju kalupa za tankostjeno injekcijsko prešanje. Jedno od rješenja je primjena tzv. kalupa s brzim toplinskim

odzivom (e. *Rapid Thermal Response* - RTR). Stijenke kalupne šupljine takvih kalupa mogu se zagrijati na temperaturu blisku temperaturi taljevine prije početka ubrizgavanja, te vrlo brzo ohladiti prije faze vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Takvo stanje u kalupnoj šupljini sprječava hlađenje taljevine tijekom faze punjenja kalupne šupljine, čime se sprječava ili minimira stvaranje očvrsnulog sloja polimera uz stijenku kalupne šupljine. [37,42]

Prednosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja omogućuju smanjenje mase tvorevine, uštedu materijala i bitno skraćanje vremena ciklusa injekcijskog prešanja, što dovodi do bitnih sniženja troškova preradbe. Tankostjeno injekcijsko prešanje s druge strane tehnički je zahtjevnije od klasičnog procesa. Razlozi proizlaze iz otežanog tečenja taljevine, posebnih parametara preradbe i suženog raspona njihovih optimalnih iznosa. Proces također zahtijeva robusnije i skuplje kalupe, te posebne konstrukcije ubrizgavalica koje omogućuju visoke tlakove i visoke brzine ubrizgavanja. Takvi parametri preradbe mogu izazvati i degradaciju materijala u kalupu. [32]

4 OSNOVE RAČUNALNE SIMULACIJE PROCESA INJEKCIJSKOGA PREŠANJA

Općenito pri razvoju i proizvodnji otpresaka injekcijskim prešanjem potrebno je poznavati četiri temeljna područja: polimerne materijale, konstruiranje otpresaka, konstruiranje kalupa i proces injekcijskog prešanja (podešavanje parametara). [43]

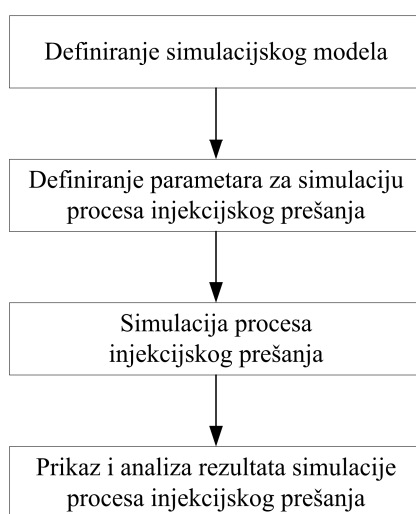
Svako od navedenih područja podjednako je važno, a promjene u bilo kojem dijelu uzrokuju promjene u ostalim segmentima. Primjerice, smanjenje debljine stijenke otpreska može uzrokovati izbor novoga materijala s boljim svojstvima tečenja, prilagodbu konstrukcije kalupa (gnijezda i žiga), kao i povišenje tlaka ubrizgavanja radi osiguranja popunjavanja kalupne šupljine. [43]

Suvremeni trendovi na tržištu pred konstruktore kalupa, alatničare i prerađivače postavljaju sve oštrije zahtjeve. Prvenstveno se očekuje skraćenje vremena razvoja otpreska, razvoja i izradbe kalupa, zahtijeva se viša kvaliteta uz niže cijene, javlja se potreba za razvojem otpresaka ekstremnih debljina stijenki (npr. tankostjeni otpresci), istodobno se razvijaju i uspješno primjenjuju unaprijeđeni procesi injekcijskog prešanja, trajno se razvijaju novi polimerni materijali za injekcijsko prešanje itd. [40,44-49]

Kao mogući odgovor tim zahtjevima javlja se područje proračunavanja s pomoću računala tj. računalna simulacija procesa injekcijskog prešanja. S pomoću računalne simulacije moguće je unaprijed predvidjeti poteškoće u preradbi, te ih na vrijeme otkloniti još u prividnom (virtualnom - računalnom) okruženju, što je mnogo brže i ekonomičnije nego u stvarnom okruženju, na primjerice već izrađenom kalupu. [43] Uporabom tih programa moguće je analizirati utjecaj geometrije otpreska, svojstava polimernog materijala kao i parametara kalupa i procesa injekcijskog prešanja na svojstva otpreska. Isprva se može učiniti kako izvođenje računalnih simulacija i optimiranja odabranog materijala, konstrukcije otpreska, konstrukcije kalupa i parametara injekcijskog prešanja mogu uzrokovati povišene troškove razvoja, no ti se troškovi dugoročno bitno snižuju. Izbjegavaju se greške u konstrukcijama otpreska i kalupa koje je kasnije vrlo skupo i dugotrajno ispravljati, kao i greške u podešavanju parametara procesa injekcijskoga prešanja. [43, 50-56]

Razvoj računala i odgovarajućih računalnih programa doveo je do sve češće uporabe prvenstveno numeričkih metoda pri pokušajima računalnog oponašanja procesa injekcijskog prešanja. Pri tome, numerički proračun kalupa se svodi na simulaciju faze punjenja kalupne šupljine i stlačivanja (e. *fill analysis*), fazu djelovanja naknadnog tlaka (e. *pack analysis*), fazu temperiranja (e. *cool analysis*), te proračun (simulaciju) deformacija otpreska i kalupnoj šupljini te nakon vađenja iz kalupne šupljine (e. *warpage analysis*). [18,19]

Kako bi simulacija procesa injekcijskog prešanja plastomernih taljevina bila uspješna, potrebno je provesti korake prikazane slikom 4.1.



Slika 4.1 Koraci pri simuliranju injekcijskog prešanja plastomera [44,57]

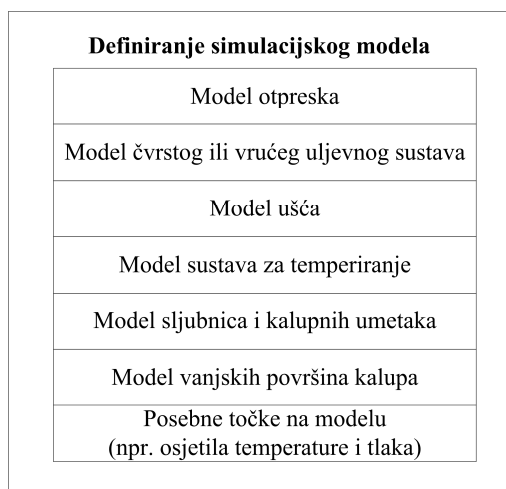
Proces injekcijskog prešanja detaljno je opisan u poglavlju 3. Ovdje će se ukazati na mogućnost primjene računalne simulacije pri predviđanju poteškoća tijekom injekcijskog prešanja te njihovog eventualnog uklanjanja već u prividnom okruženju

4.1 DEFINIRANJE SIMULACIJSKOG MODELA

Prije izvođenja analize potrebno je definirati precizan simulacijski model, kako bi rezultati provedenih analiza bili što točniji. Zadatak se svodi na definiranje mreže konačnih elemenata otpreska, odnosno kalupne šupljine i elemenata kalupa. Na slici 4.2 shematski je prikazana ta faza simuliranja. [44,57]

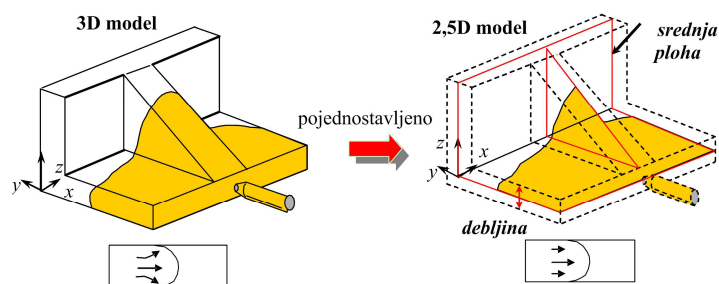
Za definiranje konstrukcije simulacijskog modela potrebno je učiniti sljedeće korake: [44,57]

- konstruiranje geometrije simulacijskog modela
- definiranje mreže konačnih elemenata na modelima
- definiranje posebnih točaka na modelu (npr. osjetila tlaka i temperature)
- provjera mreže.



Slika 4.2 Faza definiranja simulacijskog modela [18,44,57]

Pri definiranju simulacijskog modela potrebno je voditi računa o tome hoće li se rabiti plošna mreža konačnih elemenata (2,5D model) ili trodimenzijska mreža (3D model) konačnih elemenata (slika 4.3). [18]

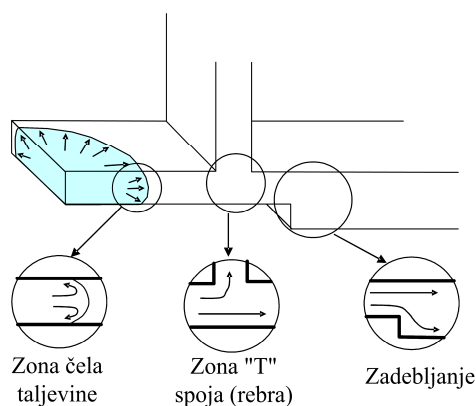


Slika 4.3 Razlika između plošne i obujamne analize punjenja kalupne šupljine [18]

Pri izboru simulacijske metode, tj. generiranja pojedinoga simulacijskog modela potrebno je biti svjestan prednosti i nedostataka pojedinog pristupa. Prednosti 2,5D simulacije očituju se u brzini analize (manje zahtjevno za računalo), te robusnosti samog procesa proračuna što se očituje u manjoj mogućnosti nastanka pogreške tijekom simulacije. S druge strane, izradba srednje plohe

predstavlja najveću poteškoću pri 2,5D analizi, te zahtijeva i preko 80 % ukupnog vremena potrebnog za simulaciju. Kako je za neke geometrijske detalje vrlo teško identificirati srednju plohu, vrlo često se geometrija otpreska pojednostavljuje što predstavlja izvor netočnosti u rezultatima simulacije. Kao dopunski izvor netočnosti javlja se i zanemarivanje pojava vezanih uz treću dimenziju u kalupnoj šupljini (posebice pri fazi punjenja kalupne šupljine - slika 4.4). Dopunski nedostatak 2,5D simulacije predstavlja poteškoća u integriranju sa solverima koji omogućuju proračune naprezanja u otpresku ili elementu kalupne šupljine.[18,50,51]

Pri uporabi 3D simulacije izbjegavaju se greške vezane uz generiranje srednje plohe, omogućena je analiza stvarnih pojava pri 3D tečenju taljevine, a osigurani su i točniji podatci o mikrostrukturi (efekti izvora tečenja, orijentacija vlakana, orijentacija molekula, stezanje i vitoperenje). Međutim 3D analiza zahtijeva moćnija računala i dulja vremena analize, a analiza grešaka na mreži daleko je zahtjevnija nego li pri 2,5D simulaciji. [18]



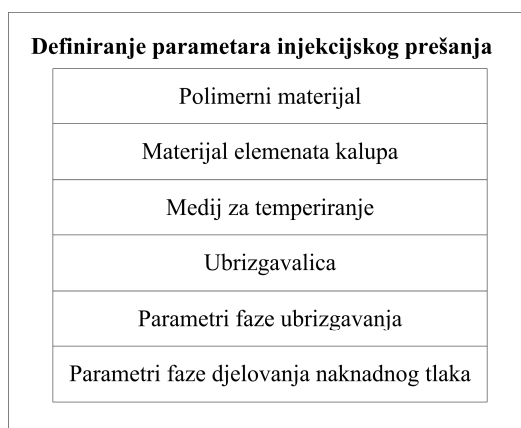
Slika 4.4 Pojave u smjeru treće osi pri tečenju taljevine [18,50,58]

4.2 DEFINIRANJE PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA

Prije provođenja bilo koje od numeričkih analiza nužno je definirati parametre injekcijskog prešanja (slika 4.5) koji uz simulacijski model predstavljaju ulazne podatke za simulaciju. Stoga je bitno te parametre odrediti što je moguće vjernije stvarnom stanju u sustavu za injekcijsko prešanje.

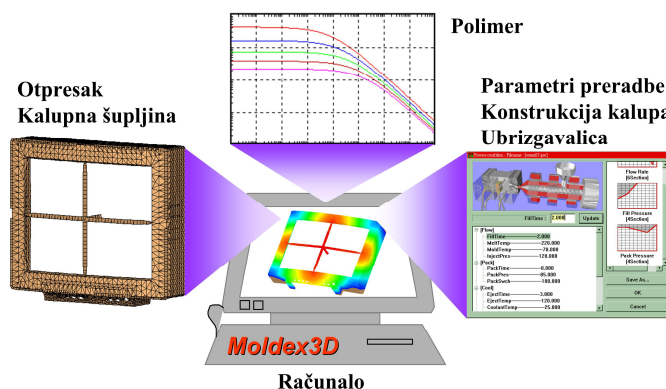
Definiranje parametara injekcijskog prešanja uključuje izbor odgovarajućeg polimernog materijala čija su preradbeno svojstva ključna za dobivanje odgovarajućih rezultata simulacije. Računalni programi za simulaciju injekcijskog prešanja uglavnom sadrže podatke s većim brojem polimernih materijala tako da je uključivanje ovih ulaznih parametara vrlo jednostavno,

izborom jednog od raspoloživih materijala. Ukoliko se određeni polimerni materijal ne nalazi u podatkaru, u većini programa moguće je definirati vlastitu podatkaru s potrebnim materijalima. Već pri samom izboru polimernog materijala automatski se definiraju mogući rasponi određenih parametara injekcijskog prešanja. Primjerice svi proizvođači polimernih materijala definiraju poželjne raspone parametara preradbe kao što su temperatura taljevine, temperatura stijenke kalupne šupljine te temperatura postojanosti oblika (temperatura očvršćivanja).[18,19,44,54]



Slika 4.5 Faza definiranja parametara injekcijskog prešanja [18]

Pri određivanju ulaznih parametara za simulaciju također je potrebno definirati vrstu kalupnog materijala, vrstu i parametre medija za temperiranje (protok, temperatura), te ubrizgavalicu na kojoj će se odvijati buduća preradba (slika 4.6). [18,19]

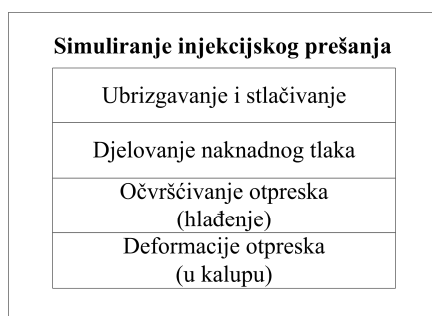


Slika 4.6 Ulazni parametri za računalnu simulaciju procesa injekcijskog prešanja[18,46]

Pri tome je moguće uz temeljne karakteristike ubrizgavalice definirati i profile brzine ubrizgavanja, profile tlaka ubrizgavanja i naknadnog tlaka. Po definiranju potrebnih parametara moguće je pokrenuti željenu simulaciju. [18,19,54]

4.3 SIMULIRANJE PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA

Pri većini računalnih programa simuliranje procesa injekcijskog prešanja podijeljeno je u 4 koraka (slika 4.7).



Slika 4.7 Faze simuliranja injekcijskog prešanja [18]

Tijekom simuliranja faze punjenja kalupne šupljine i stlačivanja taljevine analizira se tečenje plastomerne taljevine kroz uljevnu i kalupnu(e) šupljine. Ta faza predstavlja reološki proračun kalupa u kojem se određuju parametri potrebni za uspješno i potpuno popunjavanje kalupne šupljine. Pri tome je moguće definirati postotak popunjenosti kalupne šupljine prije preklapanja na naknadni tlak. Najčešće se taj postotak kreće od 95 do 100 %. Pri injekcijskom prešanju tankostjenih otpresaka najčešće se pri fazi punjenja kalupna šupljina ispuni 100 %. [18,19,54]

Slijedi analiza faze djelovanja naknadnog tlaka. Tijekom te faze analiziraju se zbivanja u kalupnoj šupljini pri dodavanju materijala u kalupnu šupljinu radi nadoknade stezanja taljevine. Na kraju faze djelovanja naknadnog tlaka kalupna šupljina treba biti 100 % popunjena. [18,19,54]

Analiza očvršćivanja otpreska svodi se na toplinski proračun kalupa. Pri tome se određuje vrijeme hlađenja otpreska, te je moguće proračunati optimalne parametre sustava za temperiranje kalupa. Također je moguće dobiti uvid u temperaturno polje kalupa koje umnogome određuje uporabna svojstva otpreska, kao i utrošak energije potrebne za temperiranje kalupa. [18,19,54]

Utjecaj i posljedice prethodnih faza ciklusa injekcijskog prešanja na svojstva otpreska moguće je analizirati kroz proračun deformacija otpreska u kalupu. Pri ubrizgavanju plastomerne taljevine u kalupnu šupljinu, pri djelovanju naknadnog tlaka i pri očvršćivanju otpreska u kalupu plastomerna taljevina je u kalupnoj šupljini pod utjecajem temperatura, tlakova, smičnih brzina i

smičnih naprežanja koji se mjesno mogu bitno razlikovati. To dovodi do različitih mjesnih uvjeta u kalupnoj šupljini što rezultira deformacijama otpreska najčešće u obliku vitoperenja. Nadalje, ukoliko je otpresak nema jednoliku debljinu stijenke, odnosno ukoliko temperiranje kalupa nije optimirano, dolazi do nejednolikog stezanja taljevine u kalupnoj šupljini i dodatnog vitoperenja otpreska. [18,19,54]

Navedene proračune moguće je s većinom računalnih programa provoditi odvojeno. Međutim ukoliko se želi provesti čitav proračun najčešće se provode analiza punjenja, zatim očvršćivanja otpreska, pa ponovo punjenja, djelovanja naknadnog tlaka i konačno deformacija otpreska u kalupu. Razlog je takvoj kombinaciji proračuna to što se pri prvoj analizi punjenja ulazi samo s pojedinačnim vrijednostima ulaznih parametara. Nakon analize punjenja, a zatim i očvršćivanja raspolaže se s čitavim poljima parametara koji se zatim rabe u preostalim fazama analize. Time se postižu točniji rezultati. [18,19]

4.4 ANALIZA I INTERPRETACIJA REZULTATA RAČUNALNE SIMULACIJE

Pri analizi procesa injekcijskog prešanja s pomoću računala odvojeno se promatraju četiri faze ciklusa: punjenje kalupne šupljine, djelovanje naknadnog tlaka, očvršćivanje otpreska u kalupu i deformacije otpreska u kalupu.

4.4.1 Analiza rezultata simulacije faze punjenja kalupne šupljine

Pri analizi punjenja kalupne šupljine razmatra se uglavnom nekoliko pojava, pri čemu se analizira njihov utjecaj na: [18,19,54]

- popunjenost kalupne šupljine.
- potreban tlak ubrizgavanja
- postojanje mjesno većih otpora tečenju
- pojava uključina zraka u otpresku
- pojava linija spajanja na otpresku
- pri višestrukim ušćima, uravnoteženje tečenja taljevine kroz kalupnu šupljinu
- pri kalupima s više kalupnih šupljina, uravnoteženje uljevnog sustava kako bi se za svaku kalupnu šupljinu postigli ujednačeni uvjeti punjenja.

Važniji rezultati koje je potrebno pravilno interpretirati pri analizi faze punjenja kalupne šupljine predstavljaju temperatura otpreska, razdioba tlaka, smičnih naprezanja i smičnih brzina u kalupnoj šupljini.

Visoke temperature u središtu otpreska upućuju na razvijanje topline uslijed trenja. Ukoliko simulacija rezultira previsokim vrijednostima moguće je zaključiti kako će se u otpresku pojaviti lokalne vruće zone koje mogu uzrokovati izgaranje taljevine u kalupnoj šupljini. Ukoliko je središnja temperatura otpreska bliska temperaturi stijenke kalupne šupljine, to upućuje na brzo snižavanje temperature taljevine radi izmjene topline s hladnijom stijenkom kalupne šupljine. Pri temperaturi otpreska u središta bliskoj ulaznoj temperaturi taljevine u kalupnu šupljinu, očekuje se relativno lako popunjavanje kalupne šupljine. Dodatno, nove količine taljevine unose u kalupnu šupljinu novu količinu topline, što održava taljevinu pri visokim temperaturama. Niska temperatura u središtu otpreska na većoj zoni otpreska upućuje na poteškoće pri popunjavanju kalupne šupljine, jer dolazi do prebrzog hlađenja taljevine i stvaranja očvrstnalog sloja uz stijenku kalupne šupljine. Slična razmatranja vrijede i za prosječnu temperaturu otpreska.

Analiza tlaka u kalupnoj šupljini tijekom faze punjenja rezultira podacima o popunjenosti kalupne šupljine. Posebno je moguće analizirati utjecaj debljine stijenke otpreska i temperatura na razdiobu tlaka i gubitaka tlaka u uljevnoj i kalupnim šupljinama. Na temelju tih rezultata moguće je optimirati izmjere uljavnog sustava kalupa, a pri kalupima s više kalupnih šupljina moguće je načiniti uravnoteženje uljavnog sustava.

Analiza razdiobe smičnih naprezanja može ukazati na potencijalne prekomjerne deformacije ukoliko je njihova razdioba u kalupnoj šupljini izrazito neujednačena. U slučaju previsokih iznosa naprezanja, dolazi do izrazite orijentacije molekulnih lanaca i visoke vjerojatnosti njihovog loma. Izrazito istezanje molekulnih lanaca također uzrokuje pojačano vitoperenje. Pri analizi smičnih naprezanja posebna se pozornost posvećuje područjima kalupne šupljine koja se posljednja popunjavaju. Niske temperature na tim mjestima najčešće uzrokuju visoke vrijednosti smičnih naprezanja.

Pri analizi smične brzine taljevine potrebno je provjeriti je li razdioba smične brzine jednolika i kakva je njezina vrijednost. Obično su više vrijednosti u blizini ušća, te na tanjim presjecima. Previsoke smične brzine mogu deformirati molekularne lance i dovesti do njihovog pucanja, te umanjiti čvrstoću konačnog proizvoda. Takvo stanje također ima loš utjecaj na optička svojstva otpreska.

4.4.2 Analiza rezultata simulacije faze djelovanja naknadnog tlaka [18]

Naknadni tlak djeluje nakon ubrizgavanja tijekom očvršćivanja plastomerne taljevine u kalupnoj šupljini. Gustoća plastomera se stoga povisuje nadoknadom obujamnog stezanja pri prelasku plastomera iz kapljevito u čvrsto stanje.

U kalupnoj šupljini se ostvaruje viša gustoća u zonama gdje je ostvaren viši naknadni tlak i obrnuto. Kako je brzina ubrizgavanja u toj fazi ciklusa injekcijskog prešanja vrlo niska, naknadni tlak postaje prevladavajući parametar procesa. Tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka također se ostvaruje lagano otvaranje kalupa. Pri tome otvaranje kalupa ne smije prijeći propisani iznos jer se u suprotnom može očekivati na otpresku pojava srha. Ukoliko se pod djelovanjem određenog naknadnoga tlaka ostvaruje preveliko otvaranje kalupa, potrebno je uporabiti ubrizgavalicu s višom silom držanja kalupa.

Naknadni tlak treba biti dovoljno visok kako bi se prevladao otpor tečenju kojeg pruža ušće i tlak u kalupnoj šupljini u cilju nadoknade stezanja u kalupnoj šupljini. Povišenje naknadnog tlaka i vremena djelovanja naknadnog tlaka produljiti će vrijeme očvršćivanja plastomera.

Pri interpretaciji rezultata simulacije faze djelovanja naknadnog tlaka potrebno je voditi računa o napredovanju čela taljevine tijekom te faze. Čelo taljevine ponekad ne uspijeva potpuno popuniti kalupnu šupljinu do završetka djelovanja naknadnog tlaka. To upućuje na preveliki otpor tečenju. Kao mjere za sprječavanje nepotpunog popunjavanja kalupne šupljine mogu se razmatrati povećanje debljine stijenke otpreska, broja ušća, izmjera ušća i optimiranje položaja ušća itd. [18]

Ukoliko se uočavaju zone u kojima je naknadni tlak presnažno djeluje, moguće je očekivati prekomjerno stlačivanje molekula (e. *over-packing*) i nepovoljna svojstva otpreska. Tu je razliku moguće uočiti usporedbom gustoća u tim zonama prije i nakon djelovanja naknadnog tlaka. Najčešće je uzrok toj pojavi geometrija otpreska i nepovoljan položaj ušća. [18]

Pri analizi faze djelovanja naknadnog tlaka posebnu pozornost valja posvetiti razdiobi tlaka u kalupnoj šupljini te razdiobi stezanja otpreska. Za analizu razdiobe tlaka u kalupnoj šupljini tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka vrijede naznake kao i tijekom faze punjenja kalupne šupljine. [18]

Međutim stezanje tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka potrebno je posebno razmotriti. Kristalasti plastomeri pri višim temperaturama imaju veći specifični obujam od amorfni, dok pri nižim temperaturama imaju manji specifični obujam (radi boljeg slaganja makromolekulnih lanaca), tj. višu gustoću. Stoga je moguće zaključiti kako kristalasti plastomeri pri promjeni temperature prolaze kroz veće promjene u svojoj strukturi, a to dovodi do zaključka kako je njihov specifični obujam više temperaturno ovisan nego li amorfni plastomera. [18]

Naknadni tlak, kao i temperatura taljevine predstavljaju najvažnije parametre pri određivanju specifičnog obujma i gustoće plastomernih otpresaka. [18]

Stezanje plastomernih otpresaka definirano je postignutim uvjetima u kalupnoj šupljini tijekom djelovanja naknadnog tlaka. Kako je temperatura stijenke kalupne šupljine relativno niža od temperature taljevine, taljevina se nakon popunjavanja kalupne šupljine hladi, povisuje joj se viskoznost i gustoća. Takvi uvjeti otežavaju dodavanje novog materijala kroz ušće, pa je potrebno ostvariti naknadni tlak koji će to omogućiti. Viši iznos naknadnog tlaka i dulje vrijeme djelovanja naknadnog tlaka rezultirati će visokom gustoćom otpreska i manjim iznosima stezanja. [18]

4.4.3 Analiza rezultata simulacije faze očvršćivanja otpreska (hlađenje)

Vrijeme hlađenja otpreska iznosi 70 do 80 % ciklusa injekcijskog prešanja. Stoga se pravilnim konstruiranjem sustava za temperiranje može bitno skratiti vrijeme ciklusa, povisiti proizvodnost i sniziti troškove proizvodnje. Uslijed nepravilnog temperiranja osim produljenja vremena ciklusa, vrlo često kao posljedica nejednolikog temperiranja javljaju se greške na otprescima kao što su: vitoperenje, nejednoliko stezanje i uvijanje. [18]

Plastomerni otpresci u kalupu uglavnom se hlade s pomoću medija za temperiranje koji teče kroz kanale za temperiranje izvedene u kalupnim pločama. Temeljni mehanizmi prijenosa topline između plastomerne taljevine i medija za temperiranje su provođenje i konvekcija. Od stijenke kalupne šupljine do kanala za temperiranje toplina se prenosi provođenjem kroz kalupne ploče, a zatim s pomoću medija za temperiranje konvekcijom odvodi iz kalupa. Kalup dodatno izmjenjuje toplinu i s okolinom, provođenjem preko steznih ploča ubrizgavalice i konvekcijom s okolišnim zrakom. Ostatak topline kojeg oslobađa plastomerna taljevina u kalupnoj šupljini se raspoređuje kroz presjek kalupa do trenutka otvaranja kalupa. Nakon toga otpresak ostatak

topline predaje okolini. Proces temperiranja (hlađenja) otpreska u kalupu detaljno je opisan u [16].

Parametre koji utječu na brzinu hlađenja otpreska moguće je podijeliti u nekoliko kategorija. Prvenstveno su to geometrijski parametri otpreska (debljina stijenke i koeficijent oblika otpreska), karakteristike kalupa (toplinska svojstva materijala elemenata kalupne šupljine, karakteristike sustava za temperiranje, svojstva i parametri medija za temperiranje) i svojstva plastomernoga materijala (toplinska svojstva). [16,18]

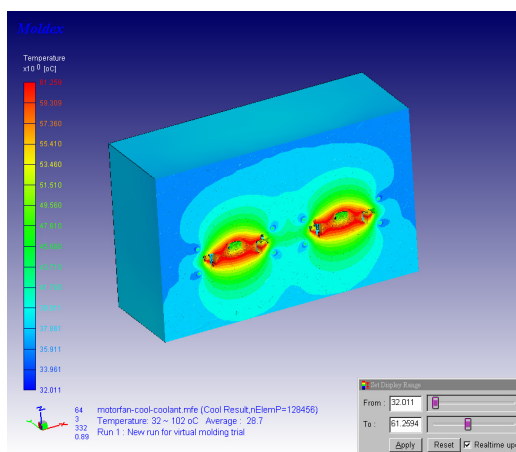
Cilj analize faze očvršćivanja (hlađenja) otpreska prvenstveno je određivanje vremena hlađenja otpreska i vremena ciklusa injekcijskog prešanja, optimiranje sustava za temperiranje (postizanje efikasnog i jednolikog hlađenja, optimiranje broja i položaja kanala za temperiranje, te njihovog promjera), te definiranje temperatura stijenke kalupne šupljine potrebnih za proračun vitoperenja. Nejednoliko hlađenje jedan je od najčešćih uzroka pojave vitoperenja otpreska. [16,18]

Pri analizi faze očvršćivanja otpreska potrebno je posebice provjeriti je li otpresak ohlađen u svim zonama ispod temperature postojanosti oblika, kako bi se mogao sigurno izvaditi iz kalupne šupljine. Također je potrebno provjeriti prati li razdioba temperature u otpresku i razdiobu debljine stijenke. Debljoj stijenci, te na rebrima je potrebno dulje vrijeme hlađenja. Takva mjesta obično su uzrok pojavama vitoperenja, uvijanja i usahlina. [16,18,31]

Pri analizi hlađenja otpreska razlikuju se pomična i nepomična strana kalupa radi utvrđivanja toplinskih uvjeta u oba dijela kalupa. Na temelju tih uvjeta moguće je i odrediti učinkovitost kanala za temperiranje u oba dijela kalupa. Izrazito nejednoliki toplinski uvjeti u obje strane uzrokovati će pojavu vitoperenja. Stoga je potrebno provjeriti pojavu mjesta gdje se akumulira toplinska energija što može biti povezano s lošom efikasnošću kanala za temperiranje, debljinom stijenke otpreska ili mjesnoga zagrijavanja taljevine. Prikazane temperature predstavljaju prosječne temperature stijenke kalupne šupljine (slika 4.8). [18]

Toplinski tok u kalupu predstavlja brzinu izmjene topline po jedinici površine i obično je proporcionalan umnošku toplinske provodnosti i razlike temperatura (Newtonov zakon). Pri analizi se može utvrditi je li brzina izmjene topline dobra ili ne na temelju razdiobe toplinskog toka. Brzina izmjene topline između plastomerne taljevine i stijenke kalupne šupljine ovisi o debljini stijenke otpreska, toplinskoj prohodnosti između polimernog materijala i materijala

kalupnih ploča, temperaturnoj razlici između plastomerne taljevine i stijenke kalupne šupljine, uvjetima hlađenja i rasporedu kanala za temperiranje. Stoga se toplinski tokovi mogu bitno razlikovati u oba dijela kalupa. Prikazani rezultati predstavljaju prosječne vrijednosti toplinskog toka koji služi za ocjenu efikasnosti hlađenja otpreska. [18]



Slika 4.8 Temperaturno polje kalupa [18]

Analiza toplinskog toka također može poslužiti za određivanje efikasnosti hlađenja pojedinog kanala za temperiranje. Viši toplinski tok označuje bržu izmjenu topline i bolju efikasnost kanala. Pri tome se može optimirati položaj kanala kako bi se povisila njihova učinkovitost, a s druge strane kanali s vrlo niskom učinkovitošću se mogu potpuno ukloniti, što snizuje troškove izradbe kalupa. [18]

4.4.4 Analiza rezultata simulacije deformiranja otpreska u kalupu [18]

4.4.4.1 Stezanje tijekom faze punjenja i djelovanja naknadnog tlaka [18]

Razlike u temperaturi i tlakovima u kalupnoj šupljini mogu uzrokovati razlike u specifičnom obujmu i gustoći otpreska. Stezanje otpreska tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka izravno je povezano sa stupnjem stlačivanja taljevine tj. dodavanja nove količine materijala u kalupnu šupljinu. Veličina stezanja izravno ovisi o iznosu i vremenu djelovanja naknadnog tlaka.

4.4.4.2 Stezanje tijekom procesa hlađenja otpreska [18]

To stezanje započinje nakon očvršćivanja ušća i traje do vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Nakon očvršćivanja ušća plastomerni se otpresak hladi uz konstantnu masu, što dovodi do

smanjenja njegovog obujma i povišenja gustoće. Stezanje u toj fazi ovisi o ponašanju toga plastomera a što se utvrđuje s pomoću dijagrama p - v - T . Pri preradbi i amorfnih i kristalastih plastomera glavni čimbenici koji utječu na stezanje u toj fazi procesa su temperatura stijenke kalupne šupljine i brzina hlađenja otpreska. Visoke temperature stijenke kalupne šupljine i sporo hlađenje uzrokuju visoke vrijednosti stezanja otpresaka.

4.4.4.3 Stezanje nakon vađenja iz kalupne šupljine [18]

Nakon vađenja iz kalupne šupljine, otpresak se može slobodno stezati, bez ograničenja koje mu je u kalupu predstavljao oblik kalupne šupljine. Izvori naprezanja koja izazivaju stezanje u toj fazi dolaze od zaostalih naprezanja nastalih pri tečenju plastomerne taljevine (faza punjenja i djelovanja naknadnog tlaka), te od toplinskih napetosti nastalih radi temperaturnih razlika između otpreska pri vađenju iz kalupne šupljine i okoline. Ukoliko akumulirane napetosti u plastomernom otpresku premašuju čvrstoću materijala, tj. otpreska, dolazi do uvijanja otpreska.

4.4.4.4 Čimbenici koji utječu na stezanje otpreska [18]

Utjecaje na stezanje plastomernog otpreska moguće je podijeliti u nekoliko kategorija. Stezanje prvenstveno ovisi o vrsti prerađivanog plastomera. Kristalasti se plastomeri stežu jače od amorfnih. Također su više podložni brzini hlađenja od amorfnih. Povišeni sadržaj vlage u plastomeru utječe na povišenje stezanja. Materijale koji su podložni upijanju vlage potrebno je sušiti prije preradbe, a nakon preradbe otpreske je potrebno pravilno skladištiti. Punila i ojačavala uglavnom snizuje stezanje.

Geometrija otpreska uvelike utječe na stezanje. Deblje stijenke omogućuju veće stezanje radi produljenog održavanja otpreska pri višim temperaturama. Nejednolikost debljine stijenke uvjetuje razlike u uvjetima hlađenja i uvjetima djelovanja naknadnog tlaka što rezultira i različitim stezanjem i posljedičnim vitoperenjem.

Konstrukcija kalupa jedan je od čimbenika koji na stezanje utječe prvenstveno položajem, te vrstom i izmjerama ušća. Veće izmjere ušća omogućuju bolju nadoknadu stezanja (lakši prijenos novog materijala i produljeno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka). Veće izmjere uljevnih kanala omogućuju tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka olakšanu dobavu novog materijala, no tijekom faze hlađenja otpreska produljuje se vrijeme hlađenja. Kako bi se smanjili gubitci tlaka unutar uljevnog sustava ne preporuča se konstruiranje predugih uljevnih kanala. Raspored kanala

za temperiranje, tolerancije izradbe kalupa, konstrukcija sustava za vađenje otpreska i elastične deformacije kalupa također utječu na iznose stezanja otpreska.

Od parametara injekcijskog prešanja koji utječu na stezanje valja istaći prvenstveno naknadni tlak. Na završetku faze djelovanja naknadnog tlaka, tlak na ušću u trenutku očvršćivanja ušća se naziva tlakom pečaćenja. Što je taj tlak viši, manji su iznosi stezanja. Na njega utječe iznos naknadnog tlaka. Bez uporabe naknadnog tlaka postižu se vrijednosti stezanja i do 25 %, a njih se snizuje djelovanjem naknadnog tlaka. Vrijednost naknadnog tlaka s druge strane ne smije biti previsoka, jer to uzrokuje u otpresku zaostala naprezanja i posljedične deformacije po vađenju iz kalupne šupljine.

Sljedeći parametar koji utječe na stezanje je temperatura taljevine. Općenito previsoke temperature taljevine uzrokuju povećano stezanje (dovoljno vremena za bolje slaganje makromolekulnih lanaca). Međutim neka su istraživanja pokazala kako se pri povišenim temperaturama taljevine (posebice pri tankim stijenkama) postiže usmjeravanje strukture i bolje tečenje materijala, što olakšava prijenos naknadnog tlaka u kalupnu šupljinu, te nadoknadu stezanja. S druge strane povišena temperatura taljevine uzrokuje dulje vrijeme hlađenja i smanjenu proizvodnost. Stoga je potrebno postići temperaturu taljevine pri kojoj će se postići najmanji iznosi stezanja.

Nakon pečaćenja ušća, temperatura stijenke kalupne šupljine postaje ključnim parametrom za definiranje veličine stezanja. Niže temperatura stijenke kalupne šupljine rezultiraju uglavnom manjim vrijednostima stezanja, no niska temperatura stijenke kalupne šupljine otežava punjenje kalupne šupljine i uzrokuje pojavu zaostalih naprezanja.

Povišenje brzine ubrizgavanja povećava orijentaciju makromolekulnih lanaca i povišuje vrijednosti stezanja. Nadalje povišenje brzine ubrizgavanja uzrokovat će povišenje smične brzine i sniženje viskoznosti što rezultira boljim tečenjem taljevine. Razvijanje topline uslijed trenja također pogoduje tečenju taljevine kroz ušće tijekom punjenja i djelovanja naknadnog tlaka. Stoga valja pronaći optimalnu brzinu ubrizgavanja.

4.5 OPTIMIRANJE PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA [54]

Optimiranje procesa injekcijskog prešanja s pomoću računala moguće je usmjeriti ka nekoliko područja. To se prvenstveno odnosi na optimiranje: debljine stijenke otpreska, odnosa brzine

ubrizgavanja i tlaka ubrizgavanja, visine naknadnoga tlaka, vremena djelovanja naknadnoga tlaka i dopunskoga vremena hlađenja.

Pri optimiranju (minimiranju) debljine stijenke potrebno je voditi računa o popunjenosti kalupne šupljine, tj. omogućuje li izabrana ubrizgavalica dovoljni visoki tlak ubrizgavanja za potpunu popunjenost kalupne šupljine te osigurava li dovoljnu silu držanja kalupa.

Pri proračunu vremena odnosno brzine ubrizgavanja, potrebno je definirati brzinu ubrizgavanja pri kojoj je moguće ostvariti minimalni tlak ubrizgavanja. Povišenje brzine ubrizgavanja povisuje potreban tlak ubrizgavanja zbog povećanog otpora tečenju. S druge strane sniženje brzine ubrizgavanja može rezultirati povećanjem tlaka ubrizgavanja radi sporijeg popunjavanja kalupne šupljine i očvršćivanja čela taljevine. Stoga je ovdje potrebno odrediti optimalnu brzinu ubrizgavanja.

Optimiranje naknadnog tlaka svodi se na određivanje takve vrijednosti tlaka koji rezultira minimalnim stezanjem otpreska, pri čemu ne dolazi do unošenja napetosti u otpresak. Slične smjernice vrijede i za vrijeme djelovanja naknadnog tlaka.

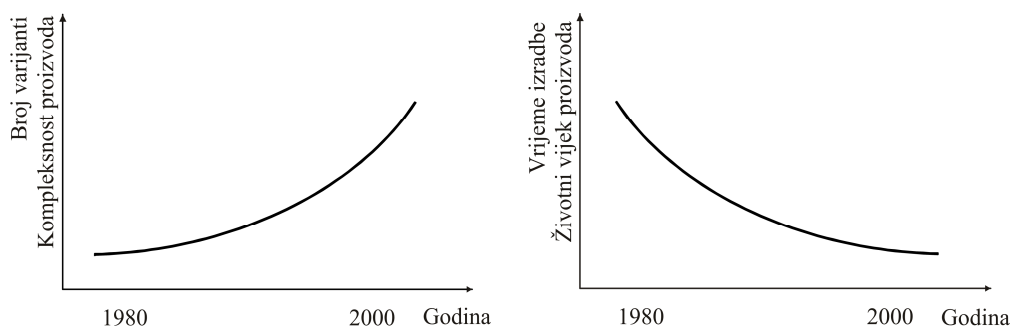
Osnovni cilj optimiranja dopunskog vremena hlađenja je minimiranje tog vremena odnosno ukupnog vremena ciklusa injekcijskog prešanja. To je vrijeme koje nakon prestanka djelovanja naknadnog tlaka otpresak provodi u kalupu, pri čemu treba postići temperaturu postojanosti oblika. Potrebno dopunsko vrijeme hlađenja otpreska, kao i jednoliko hlađenje u cijeloj kalupnoj šupljini moguće je optimirati s pomoću protoka i temperature medija za temperiranje te broja, položaja i promjera kanala za temperiranje. Temperiranje kalupa također treba definirati tako da se postižu najmanji iznosi deformacija otpreska.

Temeljna prednost računalne simulacije je mogućnost iterativnog provođenja optimiranja bez ikakvih zahvata na kalupu, optimiranje se provodi u virtualnom okruženju. Takav pristup daleko je brži i ekonomičniji od pokušaja optimiranja procesa injekcijskog prešanja na već postojećem sustavu za injekcijsko prešanje.

5 POSTUPCI BRZE PROIZVODNJE TVOREVINA

5.1 ULOGA POSTUPAKA BRZE PROIZVODNJE TVOREVINA PRI RAZVOJU PROIZVODA

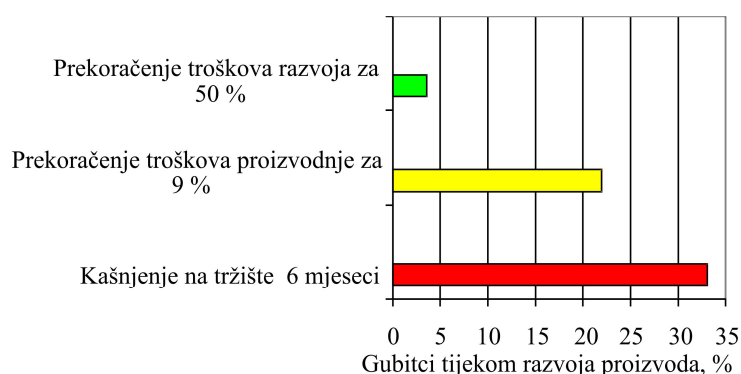
Pri razvoju svih proizvoda teži se proizvodnji visokokvalitetnih proizvoda u što kraćem vremenu, uz što niže troškove. [59] Na tržištu su u prošlosti postojali većinom masovni, identični proizvodi. Međutim marketinška se koncepcija tvrtki okrenula krajnjem korisniku i njegovim zahtjevima. Tome je posebice doprinijela globalizacija tržišta (npr. radi mogućnosti kupovine preko interneta), te pojačana konkurencija među proizvođačima. Prilagodbe zahtjevima potrošača mogu se očitovati samo kroz završne faze proizvodnje (npr. proizvodnja istih proizvoda ali u različitim bojama), no mogu se očitovati i u bitnim izmjenama u proizvodnji. Nove zahtjeve pri razvoju proizvoda sažeto prikazuje slika 5.1. [60]



Slika 5.1 Novi zahtjevi pri razvoju proizvoda [61]

Na području razvoja proizvoda moguće je zamijetiti nekoliko trendova. Konstruiranju se posvećuje sve veća pažnja, sve je češća pojedinačna i maloserijska proizvodnja, potrebno je sve više voditi računa o zaštiti okoliša, općenito je skraćen vijek proizvoda na tržištu, prisutan je trajni pad cijena proizvoda na tržištu uslijed vrlo jake konkurencije, pri razvoju proizvoda potrebno je pridržavati se različitih propisa i normi, zahtijeva se interdisciplinarni pristup razvoju proizvoda, u proces razvoja proizvoda uključuje se sve više stručnjaka izvan matičnog poduzeća (multinacionalne kompanije), gdje je vrlo važno uspostaviti odgovarajuću komunikaciju između suradnika. Novi proizvodi su kompleksniji (funkcijski) i kompliciraniji (geometrijski), a vrijeme njihove proizvodnje treba biti što kraće. [1,2,59,62,63]

Analizom slike 5.2 moguće je zaključiti kako je vrijeme potrebno za uvođenje proizvoda na tržište ključni čimbenik za ocjenu uspješnosti bilo kojeg proizvoda. Prevlast vremena nad troškovima pri razvoju proizvoda nema samo apsolutni već i relativni značaj. To znači da nije dovoljno samo tijekom razvoja proizvoda donositi ispravne odluke, već je važnije donositi ih što je moguće ranije. [1,2] Pri tome treba napomenuti kako se pri razvoju proizvoda u fazi konstruiranja istodobno definira 80 % kvalitete proizvoda, te 70 % troškova razvoja i proizvodnje proizvoda. [31,61] Moguće je zaključiti kako se maksimalna dobit može ostvariti minimiranjem vremena razvoja proizvoda, a ne troškova razvoja. [1,2]



Slika 5.2 Utjecaj različitih čimbenika na gubitke tijekom razvoja proizvoda [1,2]

Temeljne prednosti ranijeg izlaska s proizvodom na tržište su: [60]

- prednost pred konkurencijom koja sporije izlazi na tržište
- prednost u definiranju cijene proizvoda prije konkurencije
- brži povrat sredstava uloženi u razvoj proizvoda (manji financijski rizik)
- potencijalno dulji vijek proizvoda na tržištu u usporedbi s konkurencijom
- potencijalno veća ostvarena dobit od prodaje proizvoda (ostvarena veća sredstva za razvoj novih proizvoda).

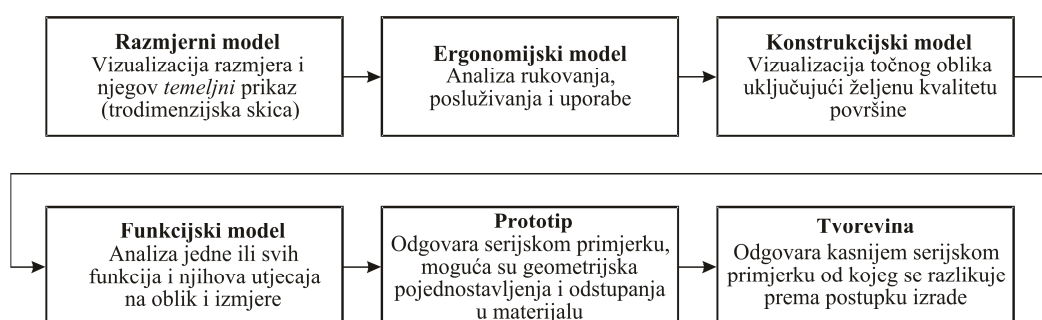
Jedan od mogućih odgovora takvim oštrim zahtjevima na razvoj proizvoda je uporaba postupaka obuhvaćenih pojmom brza proizvodnja tvorevina u okviru koncepta tzv. brzog razvoja proizvoda (e. *Rapid Product Development* - RPD). RPD pristupom se nastoji ubrzati proces razvoja proizvoda u cilju minimiranja vremena od ideje o proizvodu do njegovog izlaska na tržište. Kada se govori o RPD pristupu, misli se prvenstveno na primjenu konstruiranja i izradbe s pomoću računala (CAD, CAM, CAE), te primjenu postupaka brze proizvodnje tvorevina i obrnutoga, reverznoga inženjerstva. [60]

Brzu proizvodnju tvorevina moguće je ostvariti na tri načina, tj. kao postupke: brze proizvodnje prototipova (e. *Rapid Prototyping* - RP), brze proizvodnje alata (e. *Rapid Tooling* - RT) i brze (izravne) proizvodnje (e. *Rapid Manufacturing* - RM). Ti postupci omogućuju proizvodnju tvorevina vrlo kompliciranih oblika izravno iz računalnih podataka u vrlo kratkom vremenu s pomoću najčešće automatiziranih procesa. [2]

Uloga postupaka brze proizvodnje prototipova unutar RPD pristupa je očita. Nakon što se ideja o novom proizvodu definira u digitalnom obliku, u vrlo kratkom vremenu se s pomoću postupaka brze proizvodnje prototipova može izraditi fizički ili čak i funkcijski model. [60]

Modeli tijekom razvoja proizvoda rabe se prvenstveno radi poboljšanja kvalitete komunikacije između timova stručnjaka uključenih u razvoj, te radi komunikacije s tržištem. Posebnim prototipovima moguće je analizirati ispunjavanje propisanih normi za proizvod, moguće je certificiranje proizvoda itd. Vrlo bitna uloga prototipova je i u ranom otkrivanju grešaka i propusta tijekom razvoja proizvoda. [44]

Prema definiciji VDID (*Verband Deutscher Industrie-Designer*) postoji 6 različitih tipova modela prikazanih slikom 5.3 (opširnije u [2,62]). Modeli u pravilu predstavljaju trodimenzijski prikaz stvarne tvorevine u različitim mjerilima. Iz slike je vidljivo kako prototipovi predstavljaju samo jednu vrstu modela. Međutim, u okviru brze proizvodnje tvorevina, postupci pravljenja svih vrsta modela nazivaju postupcima brze proizvodnje prototipova, pa se za sve modele općenito uvriježio naziv prototip.



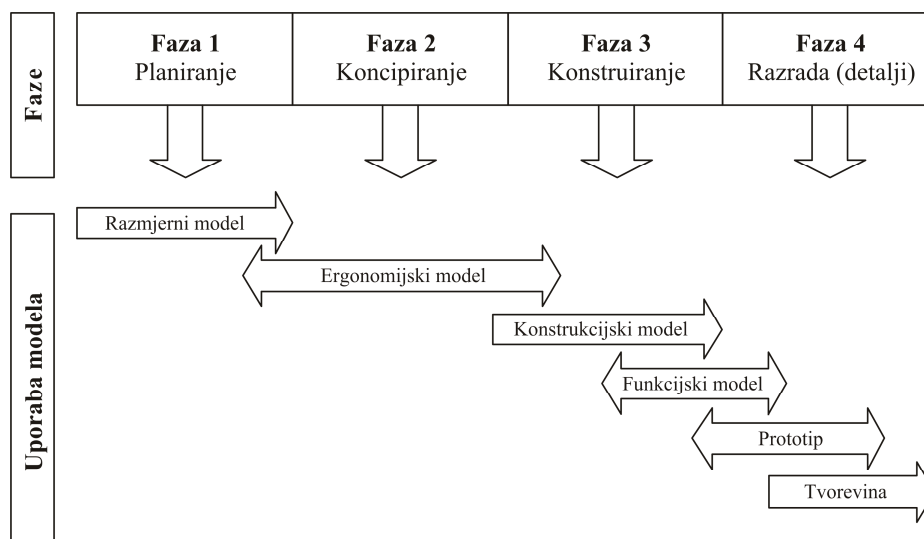
Slika 5.3 Podjela modela prema VDID [2,62]

Prototipove je također moguće podijeliti na reprodukcijske i procesne prototipove. Reprodukcijski prototipovi vjerno prikazuju proizvod, no primjenjuju se samo u marketinške i eventualno u konstrukcijske svrhe uz određena ograničenja. Procesni prototipovi primjenjuju se

za ispitivanje karakteristika razvijanog modela te za njihovo poboljšanje. Na primjeru injekcijskog prešanja, procesni prototipovi (npr. načinjeni u kalupu za izradbu prototipova) primjenjuju se za poboljšanje karakteristika otpresaka, ali i procesa injekcijskog prešanja, prije nego se uopće započne s izradbom kalupa. [62]

Posebnu skupinu prototipova čine tzv. prividni prototipovi koji se razvijaju u okruženju nazvanom prividna stvarnost, prividnost (e. *Virtual Reality*).

Općenito, povezanost razvoja proizvoda prema definiciji DIN VDI 2221 i uporabe pojedinih vrsta prototipova u određenim fazama razvoja moguće je prikazati slikom 5.4. [2,61]



Slika 5.4 Korelacija između definicije razvoja proizvoda prema DIN VDI 2221 i brze proizvodnje prototipova [2,61]

Najveći nedostatak postupaka brze proizvodnje prototipova je u ograničenom broju materijala koje je moguće preraditi. Svojstva raspoloživih materijala za proizvodnju prototipova u načelu se bitno razlikuju od svojstava materijala koji se rabe pri serijskoj proizvodnji. Kada je riječ primjerice o injekcijskom prešanju bitna razlika javlja se i u samom načinu proizvodnje, odnosno proizvodnji prototipova i otpresaka u serijskoj proizvodnji. [64]

Gotovo svaki postupak proizvodnje prototipova može se rabiti za proizvodnju dijelova čija je primarna estetska funkcija. Međutim, samo pokusna proizvodnja prototipova predviđenim postupkom preradbe daje potrebne informacije o ponašanju proizvoda, mogućnostima preradbe i tolerancijama izmjera proizvoda. [65]

Zahtjevi tržišta stoga postavljaju novi zadatak na brzu proizvodnju prototipova. Njihovu pojedinačnu ili maloserijsku proizvodnju sa svojstvima usporedivim svojstvima otpresaka izrađenih u klasičnim kalupima za serijsku proizvodnju i to u što kraćem vremenu. [2,60,66]

Iako je razvoj na području izravne proizvodnje prototipova stalan, i najbrži RP uređaji su još uvijek daleko prespori i omogućuju preradbu samo ograničenog broja materijala, pa ne zadovoljavaju svakodnevne potrebe industrije. Postupci kao što je injekcijsko prešanje stoga za sada ostaju jednim odgovorom na te zahtjeve. Pri tome RP postupci mogu poslužiti za ubrzavanje postupaka izradbe kalupa, te za sniženje troškova tih postupaka. Stoga se razvija posebno područje brze proizvodnje kalupa (prototipnih kalupa). Brza proizvodnja prototipnih kalupa podrazumijeva uporabu niza postupaka brze proizvodnje prototipova, s pomoću kojih se izrađuju čitavi privremeni kalupi, ili samo elementi koji oblikuju kalupne šupljine (tzv. hibridni kalupi) u kojima će se izraditi odgovarajući broj otpresaka (prototipova) (e. *Soft Tooling*). Ti postupci mogu se također rabiti za pravljenje prototipnih *prijelaznih* kalupa (e. *Bridge Tooling*), na temelju kojih se kasnije izrađuju kalupi za serijsku proizvodnju (e. *Hard Tooling*). [4,66,67]

Razlikuju se dvije temeljne skupine postupaka brze izradbe kalupa: [2,66]

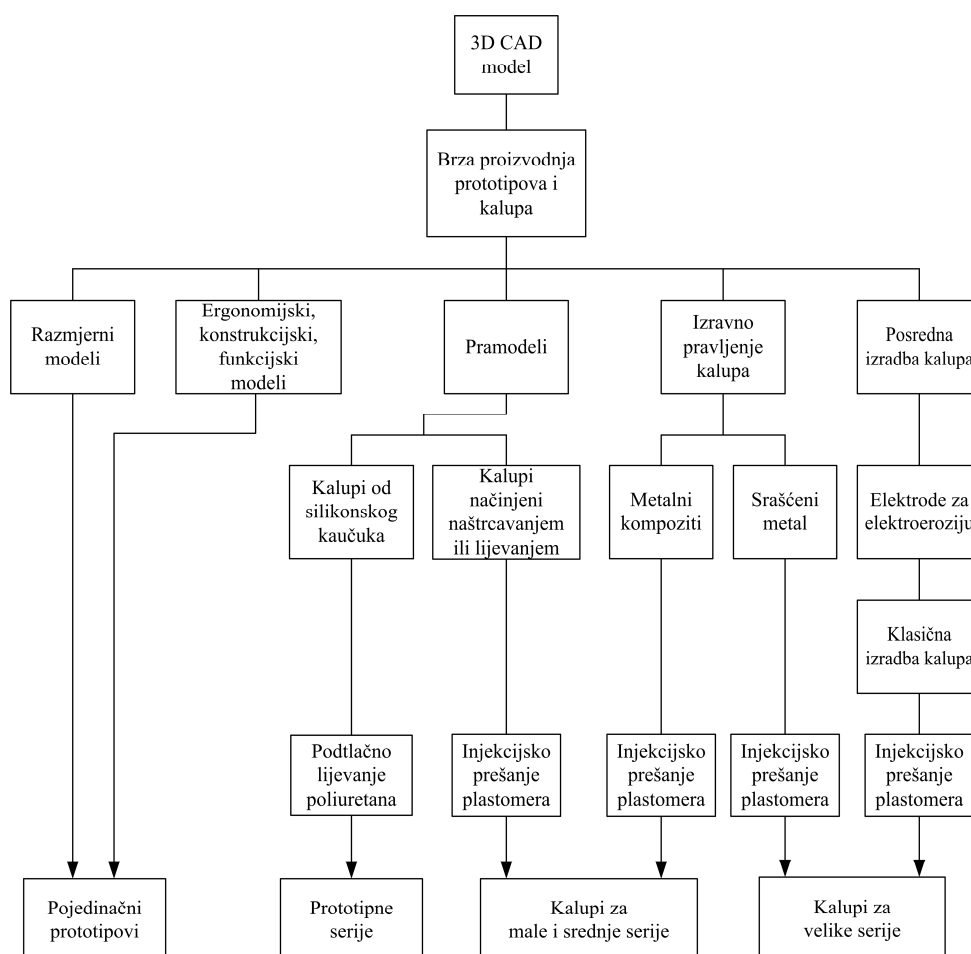
- postupci temeljeni na proizvodnji pramodela s pomoću postupaka brze proizvodnje prototipova i njihovom daljnjom obradbom (posredni postupci brze proizvodnje kalupa)
- postupci temeljeni na izravnoj proizvodnji elemenata kalupa (izravni postupci brze proizvodnje kalupa).

Postupci brze proizvodnje kalupa razvili su se kao odgovor na povećane zahtjeve tržišta kao što su: [68]

- proizvesti što je moguće ranije
- proizvodnja prototipova za provjeru samog postupka preradbe (procesni prototipovi)
- proizvodnja prototipova od istog materijala kao i serijskog proizvoda
- proizvodnja prototipova istim postupkom kao i serijskih proizvoda.

Mogućnosti brze proizvodnje kalupa uz niske troškove postala je tema mnogih istraživanja i projekata, a razvoj postupaka brze proizvodnje kalupa dao je djelomičan odgovor suvremenim zahtjevima tržišta. Postupci brze proizvodnje kalupa ustvari predstavljaju kombinaciju postupaka brze proizvodnje prototipova i klasičnih postupaka izradbe kalupa u cilju brzog razvoja i izradbe kalupa. [60]

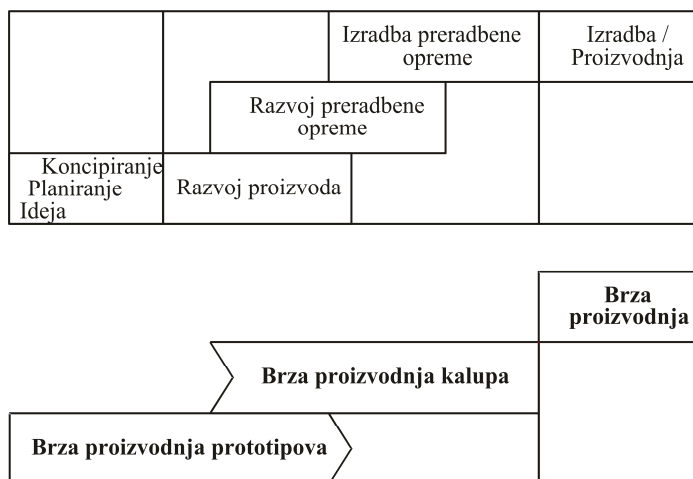
Brza proizvodnja prototipova zahtijeva prevladavajuće znanje glede samo jednog postupka (usvojenog RP postupka), dok brza proizvodnja kalupa zahtijeva osim poznavanja postupka RT i dobro poznavanje postupka injekcijskog prešanja, te postupaka klasične obradbe odvajanjem čestica. Postupci RT pružaju rješenja za izradbu kalupnih šupljina, no kalup je sustav kojeg ne čine samo elementi koji oblikuju kalupnu šupljinu ugrađeni u kućište, već je to mehanički i toplinski dinamički podsustav sustava za injekcijsko prešanje. Stoga se pred RT postupke postavljaju daleko oštriji zahtjevi nego li pred RP postupke. [68] Primjene RP/RT postupaka prikazuje slika 5.5. [67]



Slika 5.5 Moguće primjene RP/RT postupaka [67]

Postupci brze tj. izravne proizvodnje predstavljaju treći oblik ostvarenja brze proizvodnje tvorevina, a sastoje se u izradbi manje serije proizvoda postupcima brze proizvodnje prototipova, izravno bez uporabe posebnog alata (npr. kalupa). U tom slučaju alat kao uobičajeno sredstvo djelovanja pri praoblikovanju zamjenjuje oprema za brzu proizvodnju prototipova. [66] Tijekom

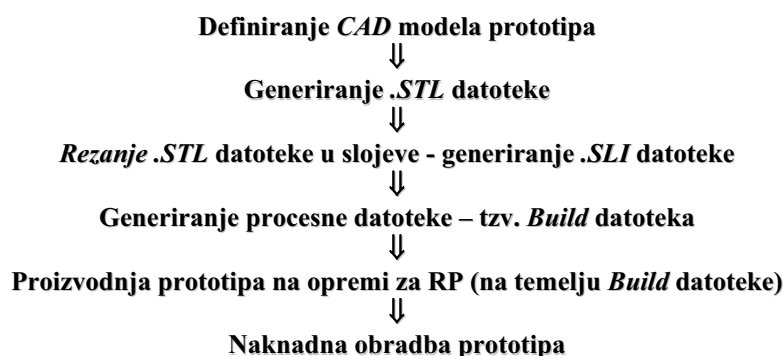
razvoja proizvoda izrađuju se odgovarajući modeli, pri čemu je moguće prikazati navedena područja primjene odgovarajućih pristupa (*Rapid ...*) (slika 5.6). [2]



Slika 5.6 Područja uporabe brze proizvodnje prototipova, kalupa i izravne brze proizvodnje [2]

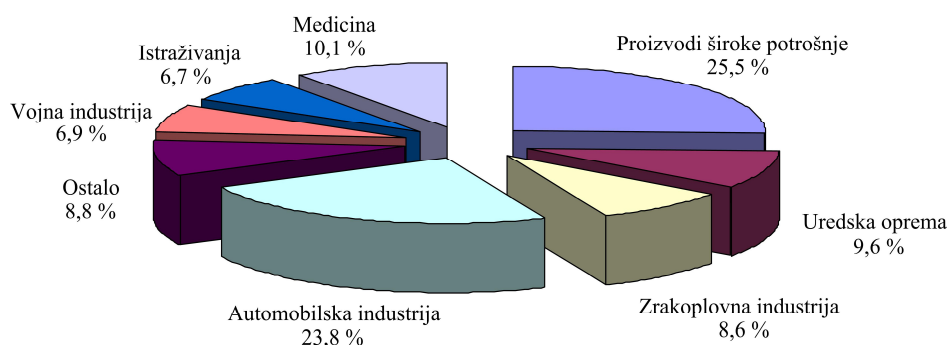
5.2 POSTUPCI BRZE PROIZVODNJE PROTOTIPOVA

Brza proizvodnja prototipova (RP) predstavlja skupinu postupaka izradbe trodimenzijskih tvorevina izravno na temelju računalnih CAD modela s pomoću posebne opreme. Postupke brze proizvodnje prototipova moguće je podijeliti u dvije temeljne skupine, prema vrsti ulaznih materijala i prema postupku stvaranja oblika (opširnije u [62,69-71]). Unatoč većem broju razvijenih postupaka, najviše su se u praksi uvriježili tzv. *slojeviti postupci* proizvodnje prototipova (prototip se gradi sloj-po-sloj). Takvi se postupci sastoje od nekoliko temeljnih faza (slika 5.7). [69]

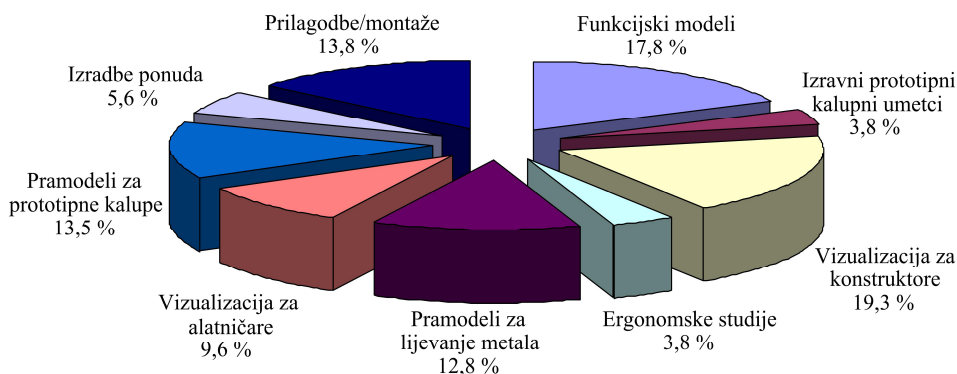


Slika 5.7 Faze slojevitih postupaka brze izradbe prototipova [69]

Pri izradbi CAD modela tvorevine poželjnija je uporaba računalnih programa koji rade sa *solid* (čvrstom) geometrijom, no radi pojave vrlo kompliciranih geometrijskih oblika, sve se više rabe i programi koji imaju jake alate za generiranje takvih površina, a koji rade s površinskom, *surface* geometrijom. Većina računalnih programa omogućuje izradbu standardne triangulizacijske datoteke (STL) tvorevine, koja je potrebna za uporabu RP postupaka. U STL zapisu, na površini geometrije tvorevine se generira mreža trokuta, a zapis sadrži podatke o x, y i z koordinati vrha svakog trokuta, kao i podatak o smjeru normale na površinu tvorevine svakog trokuta. Nakon što se načini STL zapis CAD modela, sljedeći je korak podijeliti model tvorevine u vodoravne slojeve. Debljina tih slojeva ujedno definira debljinu sloja koja će se izraditi na opremi za RP. Pri tome se za svaki sloj generira posebni SLI zapis, a na kraju se svi ti zapisi objedinjuju u zajedničku datoteku (*built* datoteka). Vrsta postupaka naknadne obradbe uglavnom ovisi o namjeni tvorevine načinjene postupkom RP. [69] Najčešća područja primjene prototipova prikazana su slikom 5.8. Slika 5.9 prikazuje strukturu primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina. [72]



Slika 5.8 Područja primjene prototipova [72]



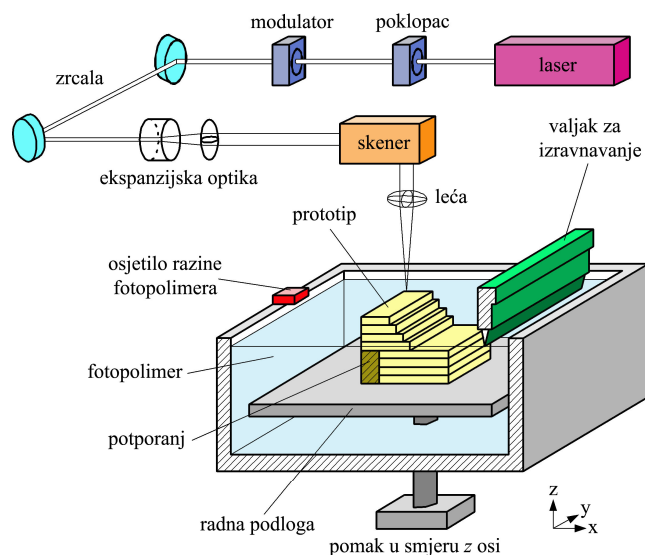
Slika 5.9 Raščlamba primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina [73]

U nastavku će biti ukratko opisani važniju postupci brze proizvodnje prototipova.

5.2.1 Stereolitografija (e. *Stereolithography* - SL/SLA)

Stereolitografija je jedan od najšire upotrebljanih postupaka brze proizvodnje prototipova. Prototipovi s pomoću postupka stereolitografije nastaju polimeriziranjem niskoviskozne polimerne kapljevine sloj po sloj. Stereolitografijom se uglavnom prerađuju fotopolimeri temeljeni na akrilnim, vinilnim ili epoksidnim smolama. Oblik i izmjere prototipova izravno se na uređaj za stereolitografiju prenose s 3D računalnog modela prototipa. [2,62,69,74,75]

Osnovni dijelovi uređaja za stereolitografiju su He-Cd ili Ar laser s potrebnom optičkom opremom, zrcalo za usmjeravanje UV zraka, posuda s fotopolimerom i pokretna podloga koja se može kretati u smjeru okomite osi u razmacima jednakim debljini sloja CAD modela (slika 5.10). [65,72]



Slika 5.10 Oprema za stereolitografiju (SLA) [72]

Laser generira i fokusira UV svjetlost koja se preko pokretnog zrcala usmjerava na različite točke vodoravne ravnine fotopolimera. Pri tome molekule fotopolimera selektivno očvršćuju pod djelovanjem UV zračenja. Zračenjem lasera se osim očvršćivanja trenutnog sloja postiže i njegovo prijanjanje na prethodni sloj. Pri proizvodnji prototipova SLA postupkom ključan je sam početak (prvi slojevi), te točno slaganje slojeva jedan na drugi. Početni sloj prototipa se nanosi na metalnu podlogu. Nakon očvršćivanja jednog sloja čitava se radna podloga spušta prema dolje za debljinu idućeg sloja. Jedan od važnijih elemenata sustava za stereolitografiju je i uređaj za nanošenje tj. izravnavanje kapljevine fotopolimera. On se pokazao potrebnim kako bi se izbjegla

pojava mjehurića zraka u prototipovima. Kako se prototipovi grade u kapljevitom okruženju, potrebno je također osigurati održavanje konstantnog položaja prototipa tijekom njegova pravljenja s pomoću posebnog potpornja. Postupak očvršćivanja slojeva se ponavlja sve do konačne proizvodnje prototipa. Kada je načinjen posljednji sloj prototipa, prototip se vadi iz kapljevito polimera, a višak polimera se ispire u otapalu. Ta faza opisuje se kao *zelena faza* izratka. *Zeleni* dio, zelenac, postavlja se na rotacijski stol u uređaj za završno polimeriziranje u kojem se u trajanju minimalno 1 sat izlaže intenzivnome naknadnom UV zračenju, čime se dovršava polimerizacija. Tako načinjenim prototipovima odstranjuje se potporanj, a prototip se završno obrađuje na željenu kvalitetu površine pjeskarenjem, sačmarenjem ili strojnom obradbom. [2,62,69,74-76]

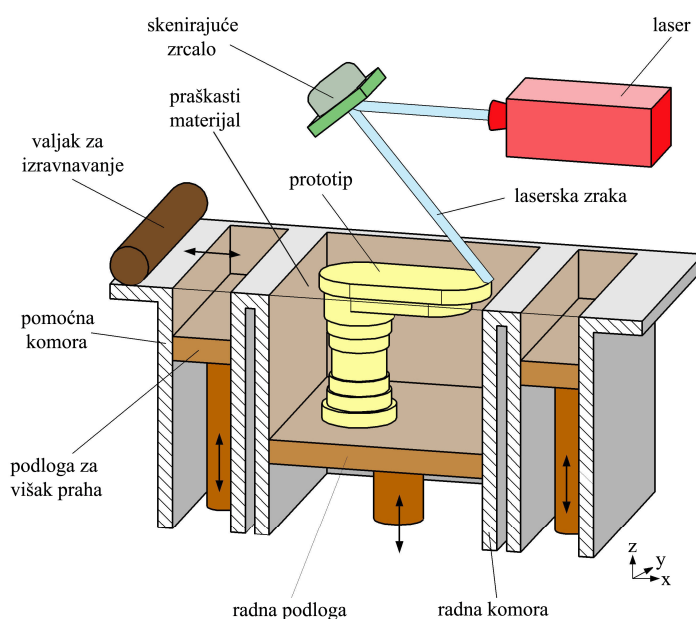
Prednosti SLA postupka su: mogućnost rada uređaja 24 sata dnevno, visoka rezolucija (mogućnost pravljenja vrlo finih detalja), mogućnost pravljenja višebojnih prototipova, nema geometrijskih ograničenja pri njihovoj proizvodnji, proces je potpuno automatiziran. [65,74,76,77]

Nedostatci SLA postupka su: potreba za potpornjem potrebna je naknadna obradba prototipa (dodatno UV očvršćivanje u peći), stezanje polimera tijekom očvršćivanja koje uzrokuje naprezanja i vitoperenje prototipa, potreban poseban prostor za uređaj (razvijaju se otrovni plinovi), fotopolimeri su otrovni u kapljevitom stanju, ograničen broj uporabljivih materijala (samo fotopolimeri), ograničena primjena prototipova radi svojstava fotopolimera, potrebno je naknadno uklanjanje potpornja. [65,74,76,77]

U posljednje vrijeme proizvodnja višebojnih prototipova postaje sve zanimljivija većem broju korisnika (npr. u medicini). Stoga je razvijen modificirani postupak stereolitografije koji omogućuje pravljenje (za sada) dvobojnih prototipova. Postupak proizvodnje dvobojnih prototipova s pomoću stereolitografije sastoji se od dva koraka. U prvom koraku očvršćuje se prozirni fotopolimer koji oblikuje vanjski dio prototipa, a u drugom koraku se očvršćuje fotopolimer pomiješan s pigmentima koji oblikuje unutrašnjost prototipa. Nakon provođenja prvog koraka, podloga na kojoj se gradi prototip podiže se iznad razine fotopolimera, a višak prozirnog fotopolimera se odstranjuje. Nakon toga se s pomoću posebnog sustava u komoru za proizvodnju prototipa dobavlja fotopolimer u boji. Laser ocrta potrebne obrise na fotopolimeru u boji i nakon završetka očvršćivanja, neočvršnuti fotopolimer se uklanja, a dobavlja se prozirni fotopolimer. Podloga se spušta za debljinu jednog sloja u usporedbi s položajem na početku prethodnog koraka i postupak se ponavlja. [78]

5.2.2 Selektivno lasersko srašćivanje (e. *Selective Laser Sintering* - SLS)

Selektivno lasersko srašćivanje jedan je od najvažnijih postupaka pravljenja prototipova (slika 5.11). Tim je postupkom moguće prerađivati teorijski gotovo sve vrste materijala koje su prerađljivi u praškastom obliku, što predstavlja temeljnu prednost postupka. Međutim pri izradbi prototipova najčešće se rabe polimerni materijali (PS, PC, PA, PA sa staklenim vlaknima, PVC, elastomeri), keramika, voskovi te metalni prahovi. Od metalnih prahova najčešće se izrađuju prototipni alati (kalupi), pa će proizvodnja metalnih prototipova postupkom SLS detaljnije biti opisana u poglavlju o brzjoj proizvodnji kalupa. [2,74]



Slika 5.11 Oprema za selektivno lasersko srašćivanje (SLS) [79]

SLS postupak sličan je stereolitografiji. Razlika je u tome što se pri SLS postupku rabe praškasti materijali. Čitav SLS postupak se odvija unutar grijane komore ispunjene uglavnom inertnim plinom kao što je dušik u cilju smanjenja neželjene interakcije materijala prototipova s atmosferom. Plin je zagrijan na temperaturu blisku talištu materijala prototipa, pa pri gradnji prototipa laser treba osigurati samo dio toplinske energije kako bi osigurao spajanje pojedinih slojeva prototipa. Time se postižu bitno kraća vremena izradbe prototipova, a smanjene su i deformacije prototipa. [2,74,80]

Pri SLS postupku laserska zraka reflektira se o zrcalo za usmjeravanje zraka i ocrta oblik sloja prototipa po praškastom materijalu smještenom u posebnom spremniku. Pod djelovanjem

toplinske energije laserske zrake praškasti materijal omekšava i dolazi do međusobnog zavarivanja ili srašćivanja čestica materijala. Laser je moduliran tako da ima utjecaja samo na one čestice koje je ozračio (samo one srašćuju). Nakon generiranja početnog sloja prototipa, podloga s prototipom se spušta za debljinu idućeg sloja, a istovremeno se podiže podloga u spremniku s praškastim materijalom. Valjkom za izravnavanje nanosi se novi sloj materijala i proces se ponavlja do konačne izradbe modela. Laserska zraka u idućem ciklusu osim taljenja novih čestica praha istodobno povezuje novi sloj s već postojećim. Praškasti materijali koji se rabe pri SLS postupku su čestica reda veličine 50 μm . Nezagrijani praškasti materijal koji okružuje srašćeni materijal podupire strukturno slaba područja tijekom izradbe modela pa nije potreban potporanj. [2,74,81]

Prednosti SLS postupka očituju se u: mogućnosti primjene većeg broja materijala, relativno je brz postupak (prototipovi se uglavnom mogu izraditi unutar jednog dana), pri izradbi prototipova višak praha podupire prototip (nije potreban potporanj), neuporabljeni prah može se uporabiti za izradbu novog prototipa. [2,74,80]

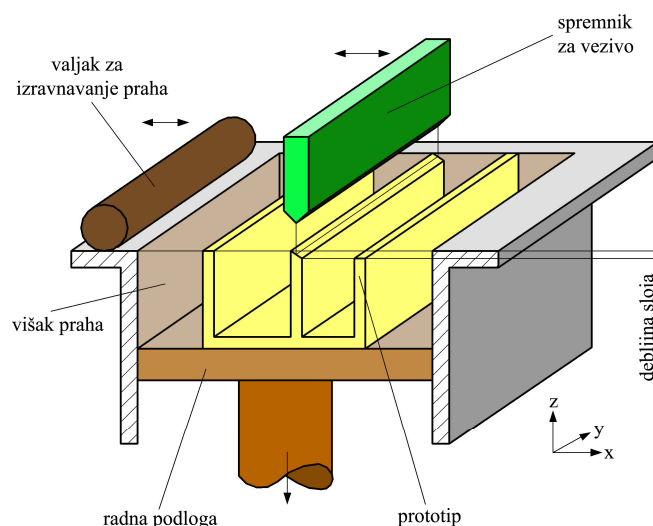
Nedostatci SLS postupka su: kvaliteta površine prototipa relativno je loša (to je moguće ublažiti prevlačenjem površine prototipa s voskom), pri očvršćivanju je moguće da se uz granične površine prototipa očvrstne i okolni praškasti materijal što dopunski pogrubljuje površinu prototipa, pri uporabi nekih materijala (npr. PVC) potrebno je omogućiti zaštitnu atmosferu radi pojave otrovnih plinova tijekom srašćivanja. [2,74,80]

5.2.3 3D tiskanje (e. 3D Printing - 3DP)

Postupak 3D tiskanja pripada skupini brzih postupaka proizvodnje prototipova koji je patentiralo MIT sveučilište 1989. godine. Radi se o vrlo brzom, pouzdanom i jeftinom postupku koji omogućuje izradbu 3D prototipova na temelju računalnih modela u uredskim uvjetima (nema razvijanja otrovnih tvari tijekom procesa). [77,82]

Temeljno načelo postupka je povezivanje čestica praha s pomoću veziva koje se nanosi na prah s pomoću *inkjet* mlaznica (slika 5.12). Kako se vezivo i prah nanose u slojevima, prototip se gradi sloj-po-sloj. 3D pisac sastoji se od okomito pokretne podloge s prahom, podloge za nošenje prototipa, spremnika za smještaj suviška materijala, valjka za nanošenje novog sloja praha i *inkjet* glave s mlaznicama, pomične u smjeru osi x i y . U prvom koraku se s pomoću valjka za nanošenje, spojenog na glavu s mlaznicama, prah s prve podloge nanosi na podlogu za pravljenje

prototipa. Višak praha pada u spremnik za višak materijala. Tijekom povratnog gibanja mehanizma, s pomoću mlaznica se u obliku kapljica nanosi vezivo na prethodno nanoseni prah, čime se postiže povezivanje čestica praha. Koraci se ponavljaju sve do konačne izradbe prototipa. O inačicama postupka 3D tiskanja opširnije u [74,77,82].



Slika 5.12 Oprema za 3D tiskanje (3DP) [82]

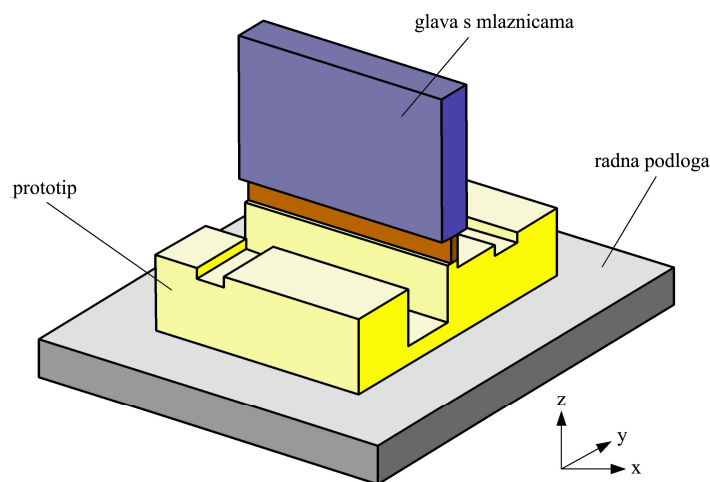
Prednosti primjene postupka 3D tiskanja mogu se očitovati u: mogućnostima primjene u uređima (neotrovni materijali), visoka preciznost uređaja, dobre dimenzijske tolerancije prototipova, vrlo glatka površina prototipa, mogućnost izradbe vrlo tankih slojeva. [74]

Nedostatci se očituju u: ograničenim izmjerama prototipa, ograničenom broju primjenjivih materijala, ograničenoj brzini pravljenja prototipova. [74]

5.2.4 Višemlazno oblikovanje (e. *Multi Jet Modeling* - MJM)

Razvoj postupka višemlaznog oblikovanja usmjeren je dobivanju jednostavnog uređaja za brzu izradbu prototipova, kojima bi se moglo upravljati kao s uredskim uređajima (tvrtka *3D Systems*). Taj je postupak dobiven modifikacijom načela rada *inkjet* štampača i rješavanjem poteškoća u međuodnosu vrste uporabljenog materijala i glave s mlaznicama. Prototip se izrađuje pomicanjem vodoravno vođene glave s mrežom mlaznica iznad podloge koja se spušta sloj-po-sloj. [2] Glava s mlaznicama ima mogućnost kretanja u smjeru samo jedne vodoravne osi gibajući se s jedne na drugu stranu i nanoseći vosak. Podloga se giba u smjeru druge vodoravne te okomite osi (slika 5.13). Time se postiže rasterski izgled prototipa. [69] Glava uređaja vođena

je izravno iz CAD podataka ispuštajući točno određenu količinu materijala, po prethodno utvrđenim obrisima prototipa. Materijal trenutno očvršćuje pri dodiru s podlogom ili prethodnim slojem. Temeljni problem postupka je razviti materijal dovoljno niskog tališta i niske viskoznosti. Kada to zahtijeva geometrija prototipa, moguće je dodati i potporanj, koji se po završetku izradbe prototipa uklanja. [69] Uređaj pripada skupini uredskih uređaja za izradbu manjih prototipova u vrlo kratkom vremenu, ali loše točnosti oblika i izmjera. Prototipovi načinjeni tim postupkom uglavnom se rabe za konceptijsko oblikovanje i vizualizaciju. [74]



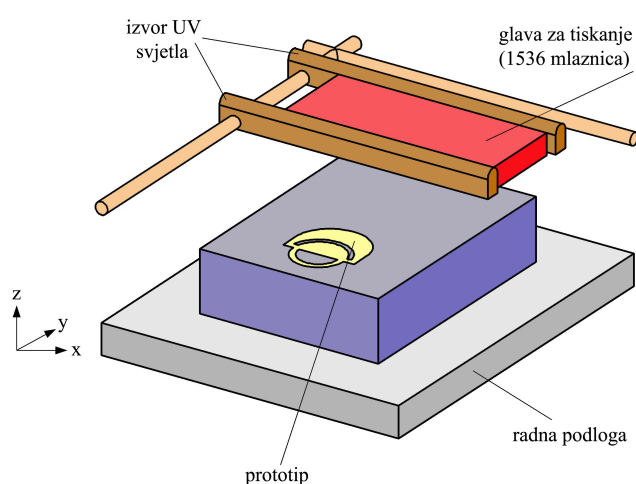
Slika 5.13 Oprema za višezlazno oblikovanje (MJM) [69]

Pri MJM postupku rabe se plastomerni materijali temeljeni na vosku, koji se tale pri 120 °C zagrijavani u kontroliranim uvjetima i koji isparavaju. Prednosti MJM postupka su: mogućnost vrlo brze izradbe reprodukcijских prototipova, mogućnost rada uređaja u mreži, uporaba materijala bez isparljivih ostataka, male izmjere uređaja – nije potreban odvojeni radni prostor, jednostavna uporaba – kratka izobrazba, nema vitoperenja prototipa, automatska priprema i prijenos podataka. Nedostatci MJM postupka su: ograničena funkcionalnost modela određena svojstvima raspoloživih materijala, smanjena točnost oblika i izmjera prototipova, nužan je potpranj. [2]

5.2.5 Hibridni postupak 3D tiskanja i stereolitografije (OBJET) [83]

Tvrtka *Objet Geometries* je u nastojanjima za prevladavanjem nedostataka SLA postupka razvila hibridni postupak koji objedinjuje dobre strane SLA postupka i postupka 3D tiskanja pod nazivom OBJET (slika 5.14).

Pri OBJET postupku proizvodnje prototipova, prvi korak je 3D tiskanje sloja fotoosjetljivog polimernog materijala s pomoću mreže mlaznica (1536 mlaznica). Pri tome se rabi gradivni materijal i potporanj koji omogućuje tiskanje kompliciranih oblika geometrije. Nakon tiskanja sloja, u idućem koraku sloj očvršćuje pod djelovanjem izvora UV svjetlosti. Temeljna je prednost OBJET postupka pred SLA postupkom u tome što čitav sloj prototipa očvršćuje istodobno, a ne selektivno. Prije početka pravljenja novog sloja prototipa, podloga se spušta za debljinu sljedećega sloja. Kako je svaki sloj potpuno očvršćen, omogućeno je nanošenje novog sloja izravno na prethodni bez poteškoća koje se javljaju pri SLA ili SLS postupku.



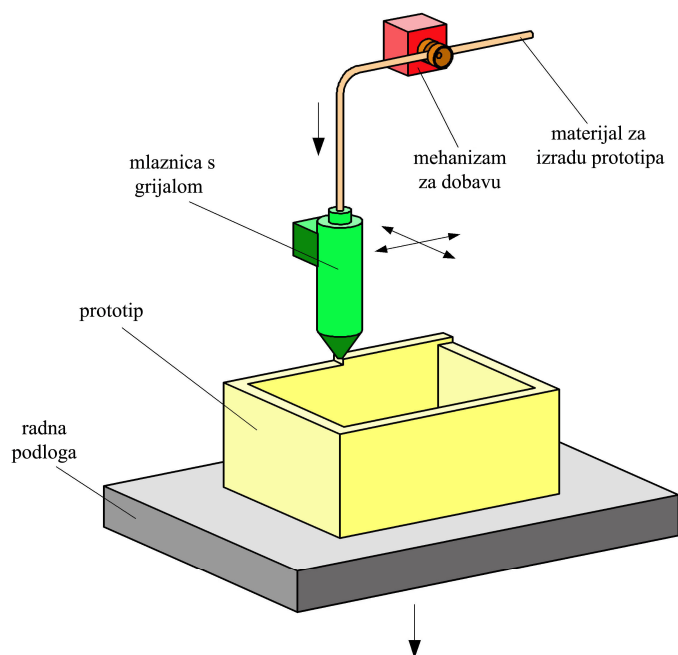
Slika 5.14 Oprema za hibridni OBJET postupak [83]

Nakon proizvodnje završnog sloja, potporanj se uklanja. Kako je postupak vrlo precizan, potrebe za naknadnom obradom vrlo su male. Također se ne zahtijeva naknadno očvršćivanje prototipova.

5.2.6 Taložno očvršćivanje (e. *Fused Deposition Modeling - FDM*)

Uređaj za FDM radi na načelima troosnog NC obradnog centra. Kroz mlaznicu, upravljanu s pomoću računala u sve tri osi, prolazi polimerni materijal u obliku žice koji se u mlaznici zagrijava i tali (slika 5.15). Materijal napušta mlaznicu u kapljevitom stanju, a pri sobnoj temperaturi vrlo brzo očvršćuje. Stoga je osnovni zahtjev FDM procesa održavanje temperature kapljevito materijala malo iznad temperature očvršćivanja. Tijekom građenja prototipa, materijal se ekstrudira i polaže na željena mjesta u vrlo finim slojevima. [2,74] Za izradbu prototipa kompliciranije geometrije može se uporabiti i potporanj. Tada se radi o modifikiranju postupka uporabom dvostruke glave ekstrudera. Pri tome jedna mlaznica nosi gradivni materijal,

a druga vosak za podupiranje. U tom se slučaju između potpornja i prototipa postavlja sloj za razdvajanje tako da se nakon izradbe prototipa potporanj može bez poteškoća odvojiti od prototipa. [74]



Slika 5.15 Oprema za taložno srašćivanje (FDM) [77]

Kvaliteta površine prototipova nešto je bolja nego li u slučaju SLS postupka, no prototipovi su porozniji. S pomoću naknadnog postupka prodiranja punila u prototipove, moguće im je povisiti gustoću. [74] Materijali za izradbu prototipova FDM postupkom su vosak za fino lijevanje, vosak za izradbu modela, PE, PA i ABS. [2]

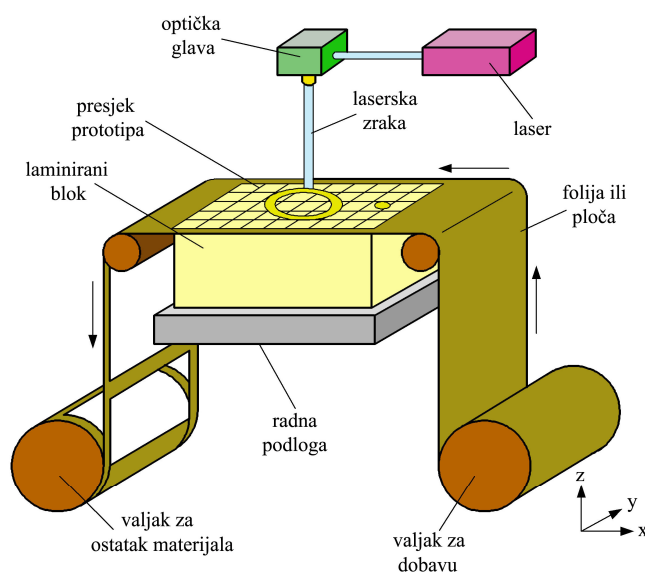
Prednosti postupka FDM su: ne rabi se laser, manja je potrošnja energije, nema zahtjeva za hlađenjem i ventilacijom, jednostavna uporaba, relativno mala investicija, niski troškovi održavanja, mogućnost izradbe više prototipova istovremeno, male izmjere uređaja (nema zahtjeva za odvojenim radnim prostorom), nema vitoperenja prototipova. [2,77]

Nedostatci FDM postupka su: funkcionalnost prototipova ograničena je izborom materijala, vrlo je često nužan potporanj, nužna je naknadna obradba prototipova, vidljive linije između slojeva, čvrstoća prototipa je snižena u smjeru okomitom na smjer izradbe slojeva prototipa, oscilacije temperature tijekom postupka mogu dovesti do delaminiranja (raslojavanja), prototipa. [2,77]

5.2.7 Laminiranje (e. *Laminated Object Manufacturing - LOM*)

Tijekom proteklih godina razvijeno je nekoliko postupaka laminiranja. Pri tome se prototipovi laminiranjem mogu izrađivati od papira, polimernih filmova i folija, kompozita s epoksidnom matricom i staklenim ojačalima, te od metalnih ploča. Debljina filmova i folija koje se rabe za laminiranje iznose 0,05 do 0,5 mm. Proizvodnja metalnih prototipova LOM postupkom najčešće se rabi za brzu proizvodnju kalupa, pa će ta inačica postupka biti objašnjena u poglavlju koje opisuje brzu proizvodnju kalupa. [2]

Najpoznatiji je postupak laminiranja patentirala tvrtka *Helsys*. Papir ili folija namotani u svitke se prevlače preko podloge za izradbu prototipa (slika 5.16). S pomoću temperiranih valjaka novi sloj se lijepi na već izrađeni dio modela. Nakon lijepljenja nekoliko slojeva uređaj s pomoću CO₂ lasera reže prethodno laminirani materijal prema s pomoću računala definiranom obliku poprečnog presjeka prototipa. Snaga lasera i brzina rezanja mogu se podesiti tako da se istodobno režu po 4 sloja. Obradba većeg broja slojeva povišuje brzinu izradbe, ali se smanjuje točnost prototipa te dolazi do pougljičenja rubova. [2]



Slika 5.16 Oprema za laminiranje (LOM) [74,84]

Kada je završen posljednji sloj prototipa, višak materijala se ručno odvaja od prototipa. Zatim se površina prototipa ručno doraduje kako bi se izbjegla slojevita struktura nastala slaganjem slojeva. [69]

Postupci laminiranja prvenstveno se rabe za izradbu reprodukcijских prototipova. Osim toga, mogu se rabiti u raznim 3D postupcima izradbe prototipova kao pramodeli za izradbu kalupa (uglavnom za lijevanje). Pri tome valja voditi računa kako su ti modeli znatno čvršći u smjeru okomitom na slojeve nego u smjeru slaganja slojeva. [2]

Prednosti LOM postupka očituju se u relativno velikoj brzini postupka, malim izmjerama uređaja (mogućnost rada u običnom uredu), prototipovi su pogodni za izradbu pramodela za 3D postupke brze izradbe kalupa, nije potreban potporanj, nema vitoperenja prototipova (nepostojanje zaostalih naprezanja), niske su cijene materijala za izradbu prototipa. [2,74,77]

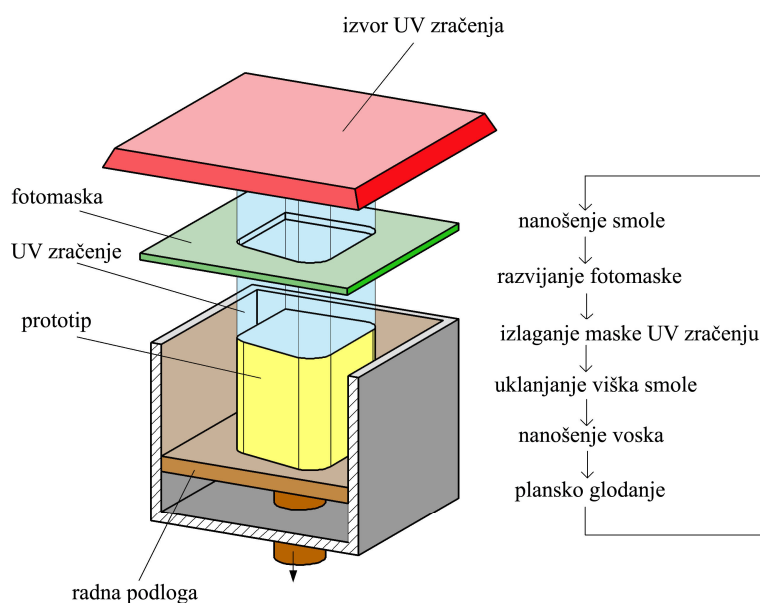
Nedostatci LOM postupka su: funkcionalnost prototipova ograničena je uskim izborom materijala, potreban je posebni rashladni uređaj i podtlačni sustav za odstranjivanje viška papira i folija iz središnjeg dijela prototipa, anizotropnost svojstava i higroskopnost materijala prototipa, potrebna završna obradba za dotjerivanje površine. Stabilnost prototipa ograničena je čvrstoćom lijepljenih spojeva, šuplji prototipovi trebaju se izrađivati kao dvodijelni, veliki udio otpadnog materijala, površina prototipa je vrlo gruba, naknadna obradba prototipa je ograničena uslijed opasnosti od pojave raslojavanja. [2,74,77]

5.2.8 Tonografski postupak (*e. Solid Ground Curing - SGC*)

Tonografski postupak predstavlja kombinaciju aditivnog i subtraktivnog laserskog postupka pri proizvodnji prototipova. Prototipovi se prave od fotopolimera slično kao i pri SLA postupku. Pri SGC postupku, rabi se maska preko koje se UV izvoru svjetla izlaže čitav sloj odjednom (bitno ubrzan proces u usporedbi sa SLA postupkom). Postupak generiranja maske temelji se na načelima elektrofotografije (kserografije). Postupak se odvija u dva koraka: generiranje maske i proizvodnja sloja prototipa (slika 5.17). [2,74]

Maska (staklena ploča) selektivno se elektrostatski nabija i prevlači tonerom (slično fotokopiranju). Rezultat je fotografska maska koja se sastoji od prozirnih i neprozirnih površina koje definiraju sljedeći sloj prototipa. Zatim se tanki sloj fotopolimera raspoređuje na radnu površinu. Maska se postavlja iznad fotopolimera, koji se kroz masku izlaže djelovanju izvora UV svjetlosti s pomoću koje sloj, tamo gdje je osvijetljen, očvršćuje. Slijedi čišćenje fotografske maske, a neosvijetljeni fotopolimer se uklanja s radne površine. Na radnu površinu se nakon toga nanosi fini sloj voska (za podupiranje fotopolimera na mjestima gdje je prije bio neočvršćeni prah), te se i vosak očvršćuje. Konačno se radna površina obrađuje glodanjem kako bi se postigla

planparalelnost slojeva. Općenito, prosječno vrijeme pravljenja jednog sloja iznosi oko 2 minute. Postupak se zatim ponavlja sve do završetka pravljenja posljednjeg sloja. Nakon završetka proizvodnje prototipa vosak se skida s modela s pomoću limunske kiseline. Najpoznatiji proizvođač uređaja za tonografski postupak je tvrtka *Cubital*. [85]



Slika 5.17 Oprema za tonografski postupak (SGC) [74]

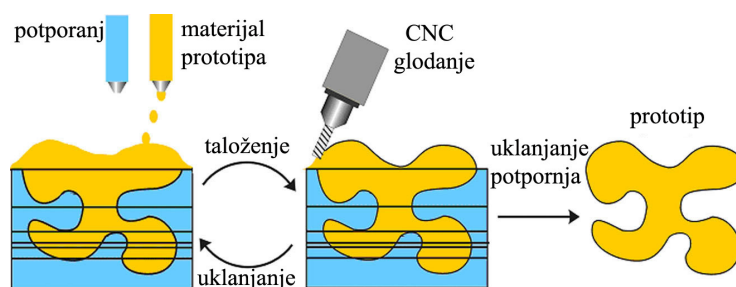
Postupak SGC ima određene prednosti posebice u usporedbi s SLA postupkom: visoka proizvodnost postupka (10 do 15 puta viša nego li pri SLA), orijentacija prototipa tijekom proizvodnje je nevažna, radi uporabe voska tijekom postupka, nisu potrebni potpornji, nije potrebno dodatno očvršćivanje nakon proizvodnje prototipa, mogućnost proizvodnje dijelova visoko komplicirane geometrije (kompliciranost ne utječe na vrijeme proizvodnje prototipa), pojedine slojeve je moguće potpuno ukloniti glodanjem ako se utvrdi da nisu dobro načinjeni, nisu potrebni posebni potpornji, moguća je proizvodnja prototipova s pokretnim dijelovima, mogućnost istodobnog pravljenja većeg broja prototipova, ne rabi se laser (ekonomske i tehničke prednosti). [2,74]

Nedostatke SGC postupka moguće je sažeti kao: potrebna je naknadna obradba radi uklanjanja voska iz prototipa, fotopolimeri imaju ograničena mehanička i toplinska svojstva (ograničeno područje primjene), veliki utrošak voska, loša rezolucija prototipova, prejako izlaganje UV svjetlu uzrokuje porast viskoznosti fotopolimera te ga čini neupotrebljivim, (potrebno ga je ukloniti), postupak zahtijeva rad u mračnoj komori, a tijekom njega se razvijaju otrovni plinovi,

uređaj za postupak je vrlo velik, postupak je dosta bučan, postupak zahtijeva stalni nadzor (nije potpuno automatiziran), na raspolaganju je svega nekoliko materijala za pravljenje prototipova tim postupkom, potrebno je uklanjanje voska nakon završetka proizvodnje prototipa. [2,74]

5.2.9 Proizvodnja taloženjem oblika (e. *Shape Deposition Manufacturing - SDM*) [86,87]

Postupak SDM (slika 5.18) objedinjuje dobre strane postupaka slojevitog građenja prototipa i postupaka obradbe odvajanjem čestica (generativnih i subtraktivnih postupaka). Početni korak SDM postupka sastoji se od računalne podjele prototipa u segmente na temelju geometrije prototipa. Segmenti predstavljaju pojednostavljene geometrijske elemente čijom je kombinacijom moguće složiti vrlo komplicirane geometrijske oblike konačnog prototipa (primjerice pojava podreza na prototipovima). U idućem se koraku s pomoću postupka taloženja na točno definiranim mjestima nanosi građivni materijal. Mlaznice za nanošenje materijala upravljane su s pomoću računala. Naneseni sloj ima samo približno točne izmjere, koje je potrebno korigirati u sljedećem koraku s pomoću 5-osne CNC glodalice. Nakon CNC obradbe jednog sloja, s pomoću druge mlaznice nanosi se potporanj te se proces ponavlja.



Slika 5.18 Postupak taloženja oblika (SDM) [87]

Postupak omogućuje izradbu vrlo višekomponentnih kompliciranih oblika geometrije, te jednostavno pravljenje podreza. Debljina pojedinih segmenata ovisi o mjesnoj geometriji prototipa, ali i o ograničenjima primjenjenog postupka taloženja. Nakon što je završena proizvodnja prototipa, potporanj se uklanja.

Postupak SDM također omogućuje izradbu kompliciranih prototipova pri čemu se unaprijed definirani segmenti prototipa izrađuju od drugog materijala.

5.3 POSTUPCI BRZE PROIZVODNJE (ELEMENATA) KALUPA

Priprema i proizvodnja kompliciranih i kompleksnih alata kao što su kalupi za injekcijsko prešanje polimera obično su na kritičnom putu u projektima razvoja i proizvodnje polimernih otpresaka, te imaju izravni i snažni utjecaj na vrijeme izlaska proizvoda na tržište. RT postupci omogućuju brzo pravljenje kalupa čime je omogućen brzi odgovor na zahtjeve tržišta. Namjena RT postupaka nije proizvodnja gotovih proizvoda, već brza proizvodnja kalupa koji omogućuju njihovu izradbu. [4]

Zahtjevi koji se postavljaju na kalup za serijsku proizvodnju injekcijskim prešanjem i mogućnosti koje pružaju postupci brze proizvodnje prototipova trenutno nisu u potpunosti usklađeni, tako da neposredna uporaba sustava brze proizvodnje prototipova za injekcijsko prešanje u industrijskim uvjetima još uvijek nema važnost koju bi trebala imati unatoč naporima koji se na tom području ulažu. [2,88] Pred RT postupke postavljaju se daleko oštriji zahtjevi nego li pred RP postupke. U slučaju RT postupaka, izrađeni kalupi moraju dugoročnije izdržati uobičajene parametre injekcijskog prešanja (tlakovi, temperature, udarna opterećenja, itd.), moraju biti dovoljno postojani na trošenje, ponekad se zahtijevaju vrlo uske tolerancije, a kvaliteta površine mora biti vrlo visoka radi estetskog izgleda otpresaka, ali i radi što lakšeg vađenja otpresaka iz kalupne šupljine. Unatoč visokim cijenama klasičnih kalupa i dugih vremena njihove izradbe, samo je mali broj RT postupaka našao širu uporabu u brzom proizvodnji kalupa pri maloserijskoj proizvodnji.[2,4,88]

Postupke brze proizvodnje kalupa moguće je ostvariti kroz tri pristupa: [89]

- izravna uporaba prototipova kao kalupnih elemenata uz određene dorade (npr. prevlačenje slojem metala, ugradnja bakrenih cijevi kao kanala za temperiranje)
- izravno pravljenje metalnih kalupnih umetaka na opremi za RT
- posredno pravljenje metalnih ili keramičkih kalupnih umetaka.

Pri izravnim postupcima se elementi kalupa prave izravno na opremi za brzu proizvodnju kalupa. Nakon eventualne dodatne i toplinske obradbe, slijedi izradba kanala za temperiranje, provrta za izbacivala, kanala za odzračivanje itd. [2]

Posredni postupci brzoga pravljenja kalupa podrazumijevaju proizvodnju elemenata kalupa postupcima brze proizvodnje prototipova ili klasičnim postupcima. Nakon toga se elementi kalupa prevlače metalnim ljuskama, što omogućuje uporabu kalupa za injekcijsko prešanje.

Drugi smjer razvoja tih postupaka sastoji se u prethodnom pravljenju pramodela na temelju kojih se nekim od postupaka lijevanja izrađuju keramički ili metalni elementi kalupnih šupljina. [2]

Pri uporabi RT za pravljenje kalupnih umetaka treba težiti zadovoljavanju kombinaciji triju zahtjeva: [64,89,90]

- čvrstoća $\geq 500 \text{ N/mm}^2$
- tolerancije izmjera $\geq 0,01 \text{ mm}$
- hrapavost (R_a) $\leq 1 \text{ }\mu\text{m}$.

Na tržištu RT opreme i materijala u ovom trenutku nisu ispunjeni navedeni zahtjevi (posebice posljednja dva zahtjeva). Međutim, sve tvrtke s tog područja trajno se nastoje približiti tim zahtjevima. To se posebice odnosi na brzinu opreme, točnost i preciznost izmjera i oblika, te u broju materijala koje je moguće preraditi RT postupcima. Također se trajno usavršavaju svojstva uporabljivih materijala što doprinosi poboljšanim svojstvima gotovih tvorevina. Na taj način se u budućnosti očekuje smanjenje razlika između klasičnih postupaka izradbe kalupa i alternativnih RT postupaka. [89]

5.3.1 Izravna proizvodnja epoksidnih dijelova kalupa (e. *Direct ACES IM - AIM*)

Izravni AIM postupak je postupak brze proizvodnje kalupa pri kojem se s pomoću SLA postupka izrađuje ljuska oblika kalupne šupljine (debljine 2 do 3 mm). Kalupni elementi (stijenke kalupne šupljine) izrađuju se s pomoću tzv. *Accurate Clear Epoxy Solid (ACES)* smole. Toplinska provodnost toga materijala je oko 300 puta niža od klasičnih kalupnih čelika. Stoga se u unutrašnjost SLA ljuske lijeva smjesa aluminijskog prašaka i epoksidne smole. Staklište epoksidnih kalupnih umetaka je pri oko 60 °C. Polimerna taljevina koja se ubrizgava u kalup može imati temperaturu i iznad 230 °C. U cilju održavanja strukturne stabilnosti epoksidnih umetaka, potrebno je kalup odgovarajuće temperirati (u pravilu hladiti), kako bi se njihova temperatura održavala ispod staklišta. Na izmjenu topline u takvim kalupima moguće je utjecati različitim debljinom epoksidnog sloja (ljuske), različitim materijalima za punjenje ljuske, te različitim izmjerama i položajima kanala za temperiranje. Ustanovljeno je kako tanji sloj epoksida omogućuje bržu izmjenu topline. Intenzivniju izmjenu topline moguće je postići i s pomoću metalnih legura nižeg tališta kao punila ljuske u usporedbi s aluminijskim prahom kao punilom. Tipično trajanje ciklusa injekcijskog prešanja s AIM kalupima iznosi za tanje stijenke 3 do 5 minuta, za razliku od 5 do 20 sekundi u klasičnim kalupima. [76,90]

U epoksidne kalupne umetke najčešće se ugrađuju bakrene cijevi koje imaju funkciju kanala za temperiranje. Tlak ubrizgavanja i visoke temperature stijenke kalupne šupljine uzrokuju povezivanje epoksidnog umetka i plastomerne taljevine, što može uzrokovati poteškoće pri vađenju otpreska iz kalupa. [90]

Glavna prednost tog postupka je brza i jeftina proizvodnja ljustica, dobra dimenzijska točnost i preciznost, mogućnost reprodukcije vrlo finih detalja. Elementi kalupne šupljine osjetljivi su na savijanje, te trošenje posebice pri preradbi staklom ojačanih plastomera. Takvi kalupi vrlo brzo postaju neupotrebljivi radi intenzivnog trošenja, a prisutna je i poteškoća odvođenja topline kalupu uslijed loše toplinske provodnosti materijala kalupa. [68,76,91,92]

5.3.2 3D *Keltool* postupak

3D *Keltool* je postupak pravljenja metalnih kalupnih umetaka s pomoću pramodela načinjenih SLA postupkom. Postupak započinje izradbom 3D računalnog modela, te pravljenjem pramodela oblika žiga i gnijezda kalupa s pomoću SLA ili nekog drugog RP postupka. Zatim se proizvode silikonski kalupi sa šupljinama koje odgovaraju geometriji pramodela. U te kalupe se u idućem koraku lijeva smjesa metalnog praha (čelik i titan-karbid) i veziva, čime se dobiva tzv. *zelenac* umetaka. *Zelenci* se stavljaju u peć, te se pri povišenim temperaturama i u kontroliranoj atmosferi (sniženi udio vodika) razgrađuje vezivo, metalne čestice sraščuju, a u nastale pore se prodire bakar. Rezultirajući kalupni umetci sastoje se od 70 % čelika i 30 % bakra. 3D *Keltool* postupak omogućuje visoku reproducibilnost detalja na kalupnim umetcima. Tolerancije tog procesa kreću se u granicama $\pm 0,02$ mm. Pri tome je ključna točnost pramodela koja izravno utječe i na točnost izrađenih kalupnih umetaka. [93-95]

Prednosti primjene 3D *Keltool* postupka pri pravljenju kalupnih umetaka jesu: preradba svih vrsta plastomera, visoka preciznost, tvrdoća elemenata kalupa 50 HRC, moguće izraditi 500 000 do 1 000 000 otpresaka u jednom kalupu (postojanost trošenju), brzi izlaz proizvoda na tržište, mogućnost naknadne obradbe s pomoću bilo kojeg klasičnog postupka, nema ograničenja glede kompliciranosti geometrije, te skraćenje vremena za oko 60 % u usporedbi s klasičnom izradbom kalupa, moguća povišena proizvodnost kalupa (optimirani položaj kanala za temperiranje), mogućnost vrlo dobre ponovljivosti (pravljenje kalupa s više kalupnih šupljina). [94-96]

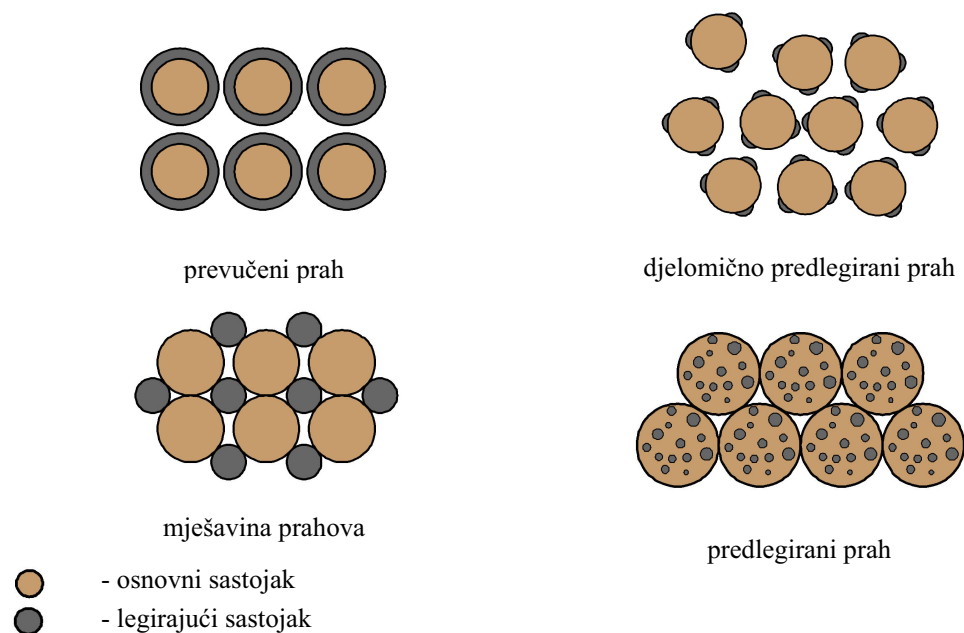
Najveći je nedostatak 3D *Keltool* postupka ograničenje u izmjerama kalupnih umetaka (150 mm · 215 mm · 100 mm). [94,95]

5.3.3 Selektivno lasersko srašćivanje metala (SLS)

Postupak SLS uvriježio se kao jedan od najčešće rabljenih postupaka izravne brze izradbe kalupa. Pri SLS postupku za izradbu kalupnih umetaka ili metalnih prototipova rabi se mješavina praha, pri čemu jedan sastojak ima više, a drugi niže talište. Razlikuju se dva tipa srašćivanja prahova: srašćivanje praha u čvrstom stanju i srašćivanje praha u kapljevitom stanju. Srašćivanje u čvrstom stanju je proces koji se odvija pri temperaturama ispod tališta praha. Glavni pokretač povezivanja čestica praha je difuzija jedne čestice u drugu. Najčešće je brzina takvog mehanizma vrlo mala, pa je proces srašćivanja u čvrstom stanju relativno spor proces. Srašćivanje u kapljevitom stanju s druge strane daleko je brži proces. [97]

SLS postupak se zasniva na relativno kratkoj interakciji laserske zrake i čestica praha (trajanje zračenja laserske zrake na česticu praha ne traje dulje od 0,5 do 25 ms), pa nije moguće ostvariti srašćivanje u čvrstom stanju. Stoga je SLS postupak temeljen na srašćivanju u kapljevitom stanju. [97,98] To znači kako je potrebno sastojak s nižim talištem (obično je to vezivo, tj. legirajući sastojak koji može biti metalni ili polimerni) dovesti u kapljevito stanje pri čemu taj sastojak popunjava prostor između čestica osnovnog materijala. [97]

Pri srašćivanju prahova na raspolaganju su 4 vrste smjese osnovnog materijala i veziva (slika 5.19).



Slika 5.19 Mogućnosti legiranja pri SLS postupcima [98]

Postoji nekoliko parametara procesa te materijala koji su jedinstveni za sve SLS postupke (bez obzira na primijenjeni materijal). Površinska napetost i viskoznost materijala međutim imaju bitno različitu ulogu u izradbi metalnih, keramičkih ili polimernih prototipova. [99]

Povećanje debljine sloja i udaljenosti između prolaza laserske zrake rezultiraju povećanjem poroznosti modela što uzrokuje sniženje tvrdoće i gustoće prototipa. Viša gustoća prototipova je postignuta pri manjoj debljini slojeva i manjim brzinama skeniranja laserske zrake (unesena je veća energija na jedinicu površine). Minimalna debljina sloja ograničena je veličinom čestica, jer bi pri manjim debljinama slojeva došlo do razmicanja prethodno nanesenih slojeva. Temperatura radnog prostora treba biti nešto ispod temperature taljenja sastojka s nižom temperaturom taljevine. Više temperature radnog prostora omogućuju postizanje većeg udjela kapljevite faze, kao i lakše prodiranje kapljevite faze oko čvrste faze (jednoliki raspored faza). [99,100]

Općenito, pri RT pravljenju kalupa površinski slojevi i unutrašnji slojevi izrađuju se pri različitim parametrima lasera i s različitom konfiguracijom prolaza lasera. S pomoću određene kombinacije vrijednosti parametara kao što su snaga lasera, brzina skeniranja, razmaci u prolazima laserske zrake i debljina sloja, postiže se i odgovarajuća gustoća kalupnog umetka. U praksi se površinske slojeve nastoji načiniti s većom gustoćom nego li ostale slojeve kalupnog umetka. Brzina kretanja laserske zrake je smanjena, a prolazi su gušći. Time se postiže smanjenje zaostalih naprezanja u umetku, te se optimira vrijeme izradbe kalupnog umetka. Gustoća prototipova na površini iznosi oko 80 %, no bitno se produljuje vrijeme izradbe tih slojeva prototipa. Stoga se trajno razvijaju nove strategije izlaganja čestica laseru. [4,101,102]

Točnost i preciznost izmjera prototipnog dijela načinjenog SLS postupkom ovisi o CAD modelu, algoritmu rezanja u slojeve, prijenosu podataka, preciznosti pokretnih dijelova uređaja, kvaliteti laserske zrake, svojstvima praha, stezanju nakon toplinske obradbe itd. Pri određivanju točnosti i preciznosti izmjera kalupnih umetaka od ključne je važnosti količina unesene energije s pomoću lasera. Osim što količina te energije određuje učinkovitost postupka, na temelju nje odnosno njene razdiobe moguće je zaključivati o potencijalnim razlikama u temperaturnom gradijentu unutar kalupnih umetaka, a time i o toplinskim naprezanjima i posljedičnim deformacijama. Pri slojevitoj izradbi umetaka također valja biti svjestan činjenice kako je točnost izmjera u ravnini x - y bitno različita od točnosti u smjeru osi z . [4]

Kvaliteta površine kalupnih umetaka sa stajališta postupka injekcijskog prešanja vrlo je važna u fazi vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Ukoliko je hrapavost prevelika, otežano je vađenje

otpreska iz kalupa što rezultira produljenjem vremena ciklusa injekcijskog prešanja, a može dovesti i do oštećenja otpreska. U slučaju većine metalnih prahova nakon toplinske obradbe hrapavost iznosi 20 do 40 μm (R_a), a nakon prodiranja primjerice epoksidne smole 7 do 15 μm (R_a). Daljnjom naknadnom obradbom (pjeskarenje ili poliranje) hrapavost je moguće smanjiti na svega 1 μm . [4]

Čvrstoća prototipnih kalupnih umetaka ovisi izravno o mehaničkim svojstvima materijala, poroznosti, defektima u strukturi i zaostalim naprezanjima. Pri SLS postupku prodiranje punila je bitno za povišenje mehaničkih svojstava kalupnog umetka. [4]

Velik je broj postupaka koji u procesu brze izradbe kalupa uključuju i SLS postupak, no za potrebe rada pobliže će se razmotriti tri najvažnija postupka: [94,95,102]

- izravna izradba kalupnih elemenata s pomoću smjese bakra i PA (e. *Copper-PA* postupak),
- izravno srašćivanje metala (e. *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS ili *Direct Tool*),
- posredno srašćivanje metala (e. *Indirect Metal Laser Sintering* - IMLS ili *Rapid Tool*).

5.3.3.1 *Copper-PA* postupak

Za male količine otpresaka, SLS postupak se rabi za proizvodnju prototipnih kalupnih umetaka koji se izrađuju od metalno-plastomernog kompozita (e. *Copper-Polyamide*). Ti umetci mogu izdržati proizvodnju nekoliko stotina otpresaka od uobičajenih plastomernih materijala. Plastomerni materijali pogodni za preradbu u takvim kalupima su polipropilen (PP), polistiren (PS), staklom ojačani polipropilen, akrilonitril/butadien/stiren (ABS), mješavina polikarbonata i akrilonitril/butadien/stirena (PC/ABS), kao i ostalih uobičajenih plastomernih materijala. Kalupi načinjenih od tog materijala vrlo su pogodni za izradbu 100 do 400 otpresaka, kada je u fazi razvoja otpresaka potrebno provjeriti proizvod, certificirati ga itd. Tada je temeljni zahtjev identičnost materijala prototipnih otpresaka i otpresaka iz serijske proizvodnje. [103,104]

Kalupni umetci tim se postupkom izrađuju izravno na SLS uređaju na temelju računalne geometrije i STL datoteke (debljina sloja iznosi 75 μm). Elementi uljevnog sustava (kanali i ušća), kanali za temperiranje i vodilice izbacivala mogu se izraditi izravno na tim umetcima. Pri tome, umetke je moguće, ovisno o njihovoj veličini, ali bez obzira na njihovu kompliciranost i kompleksnost, načiniti u jednom danu. Izradba tih umetaka ne zahtijeva dodatni ciklus u peći. [103,104]

Toplinska postojanost i toplinska provodnost tog materijala je bolja u usporedbi s većinom polimernih materijala koji se rabe u kaluparstvu (npr. epoksidi). Vremena ciklusa injekcijskog prešanja pri uporabi Cu-PA kompozita se ne mogu uspoređivati s vremenima postignutim s pomoću klasičnih kalupa, no svakako su kraća nego li pri uporabi bilo kojeg polimernog materijala za izradbu kalupnih umetaka (radi dodatka bakra). [103,104]

5.3.3.2 DMLS i IMLS postupci

Pri SLS postupcima izradbe metalnih prototipova i elemenata kalupa (DMLS i IMLS) rabe se dvije vrste mješavina prahova: metalni prah i polimerno vezivo, te mješavina praha nikal-bronca-bakreni fosfat (Ni-Bz-Cu₂P). U drugom slučaju (DMLS) radi se stvarno o izravnom postupku jer nije potrebna u naknadnim koracima razgradnja veziva, već se u prvom koraku izrađuju gotovi kalupni umetci. Samo je ponekad potrebno prodiranje punila radi povišenja mehaničkih svojstava umetka ili poboljšanja površinskih svojstava prototipa (najčešće epoksidne smole). [4]

Pri IMLS postupku uvijek se provodi prodiranje punila, najčešće uranjanjem *zelenca* u kupku s punilom. Najčešće se rabe bakar i njegove legure, te epoksidna smola. S pomoću epoksidne smole postižu se bolja svojstva površine (glatkoća, tvrdoća), a zaostala naprezanja su niža. Međutim, dubina prodiranja ograničena je na svega nekoliko milimetara od površine. S druge strane, bakar i njegove legure bolje popunjavaju pore nastale pri prvom koraku srašćivanja, čime se postiže viša gustoća prototipa. [4]

Pri IMLS postupku komercijalnog naziva *Rapid Tool*, za proizvodnju kalupnih umetaka prvenstveno se rabi prah koji se sastoji se od metalnog sastojka kao gradiva i polimernog sastojka kao veziva. S pomoću tog postupka se prerađuje nekoliko materijala no ističu se: *Laser Form - ST 100*, *Laser Form - ST 200* te najnoviji *Laser Form A6*. Opširnije informacije o materijalima mogu se pronaći u [81,104-107].

S pomoću takvih umetaka moguće je proizvesti veće količine polimernih otpresaka. Nakon prvog koraka postupka umetak je načinjen uobičajenim SLS postupkom te se naziva tzv. *zelenom* fazom (*zelencem*). Čestice praha čelika povezane su polimernim vezivom aktiviranim tijekom srašćivanja s pomoću lasera snage oko 50 W. Nakon završetka svih slojeva, nesrašćeni prah se pažljivo uklanja od *zelenog* umetka. Mehanička svojstva takvog priprema nisu dostatna za primjenu pri injekcijskom prešanju. Stoga je potrebno očvršćivanje *zelenog* priprema koje se ostvaruje toplinskom obradbom u peći pri povišenoj temperaturi. [108]

Zelenac umetka stavlja se na aluminijsku ploču u grafitnoj posudi, te se prevlači aluminijskim prahom. Aluminijski sloj pospješuje prijenos topline po cijelom umetku osiguravajući približno jednake toplinske uvjete na umetku. Grafitna posuda se stavlja u peć gdje se inicira proces srašćivanja u peći. Proces u peći moguće je podijeliti u tri koraka (slika 5.20 a): uklanjanje polimernog veziva, srašćivanje (smeđa faza), prodiranje bronce. [108]

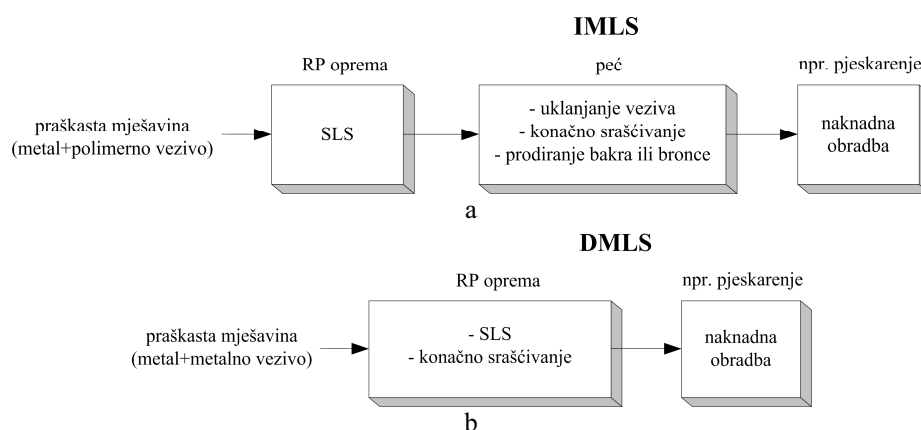
Uklanjanje polimernog veziva odvija se pri temperaturama oko 500 °C. Zatim se temperatura povisuje na 700 °C, pri čemu započinje proces srašćivanja. U peći se pri visokim temperaturama čelični prah srašćuje oblikujući male *mostove* između čestica. Rezultirajući proizvod sadrži otprilike 40 % šupljina (gustoća je 60 %), a naziva se *smeđom* fazom. Ta faza umetka ima povišena mehanička svojstva u usporedbi sa *zelencem*. Umetak u smeđoj fazi je lakše obradiv odvajanjem čestica u usporedbi s gotovim umetkom nakon prodiranja bakra ili bronce. [104-108]

Konačna faza proizvodnje kalupnog umetka sastoji se u stavljanju *smeđe* faze s proračunatom količinom bronce (85 % mase *smeđeg* priprema) u peć. Pri visokim temperaturama (oko 1050 °C) u peći dolazi do taljenja bronce i njegovog kapilarnog prodiranja u postojeće šupljine *smeđega* umetka. Peć se zatim hladi, pri čemu se u njoj osigurava kontinuirani dotok dušika u cilju sprječavanja oksidacije površine kalupnih umetaka sve do ispod 200 °C. Navedene temperature mogu varirati ovisno o uporabljenom materijalu. Nakon završenog praoblikovanja umetaka potrebno ih je naknadno obraditi kako bi se postigla odgovarajuća točnost i preciznost izmjera i kvaliteta površine. Gotovi kalupni umetci u strukturi uglavnom nemaju šupljina (postiže se gustoća 95 do 98 %), a mogu se rabiti za izradbu preko 100 000 otpresaka od uobičajenih plastomernih materijala. [81,104-108]

IMLS postupak (*Rapid Tool*) rezultira vrlo dobrim mehaničkim svojstvima kalupnih umetaka. Rezultat je toga mogućnost preradbe većeg broja otpresaka u kalupu. To je ujedno i najveća prednost postupka jer se time ne osigurava samo prototipna proizvodnja, već i prijelazna (e. *bridge*) odnosno maloserijska proizvodnja otpresaka. U usporedbi s DMLS postupkom nedostatak je naknadna obradba u peći (potreba za peći), te uslijed unesenih napetosti u kalupni umetak i veća odstupanja u izmjerama ($\pm 0,25$ mm). Ta odstupanja moguće je umanjiti naknadnom obradbom odvajanjem čestica. [68,89,104,109]

DMLS postupak počinje isto kao i IMLS postupak uz dvije bitne razlike (slika 5.20 b). Pri DMLS postupku rabi se mješavina materijala koja se sastoji od dva metalna sastojka, pri čemu je jedna nižeg, a druga višeg tališta, te se rabi laser veće snage (200 W) koji u potpunosti već u

prvom koraku postupka srašćuje čestice metala. Kao i pri IMLS postupku ovdje je također na tržištu prisutno nekoliko raspoloživih materijala. U posljednje vrijeme istakla su se dva materijala: *DirectSteel 20*, *DirectMetal 20* te najnoviji materijal *DirectSteel H20*. Opširnije informacije o materijalima moguće je naći u [93,110].



Slika 5.20 Postupak izradbe kalupa srašćivanjem metala s pomoću lasera: a - posredno (IMLS), b - izravno (DMLS) [108,110]

Pri izradbi prototipova DMLS postupkom prvi slojevi posebno su važni. Laserska zraka treba prve slojeve što bolje pričvrstiti na podložnu ploču. Ploča se rabi kao podloga, te kako bi se smanjila potrebna visina izradbe prototipa (manji utrošak skupog praha i kraće vrijeme izradbe). [111]

Prototip se iz uređaja vadi zajedno s podložnom pločom koja predstavlja sastavni dio prototipa. Najčešća je naknadna obradba takvih prototipova pjeskarenje čeličnim kuglicama. Pjeskarenjem se postiže očvršćivanje površine prototipa i smanjenje hrapavosti površine. Hrapavost površine (R_a) nakon srašćivanja iznosi oko 10 μm , a nakon pjeskarenja oko 4 μm . [111]

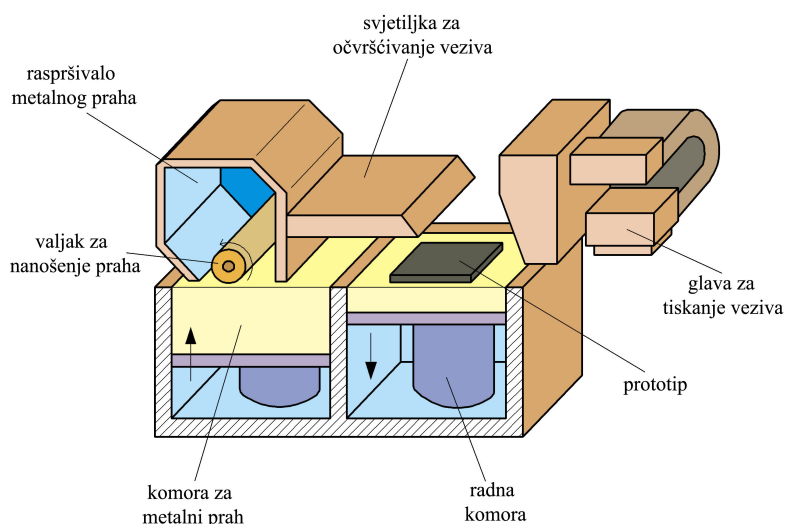
Pri DMLS postupku rabi se metalni prah bez polimernog veziva, pa nije potrebno naknadno srašćivanje kalupnih umetaka. Kako se gustoća takvih umetaka nakon SLS postupka kreće u rasponu od 75 do 85 % (ovisno o uporabljenom materijalu), u podtlačnoj se komori u kalupni umetak može prodirati epoksidna smola. Takav se umetak stavlja u peć u trajanju od 2 sata, a pri temperaturi 160 °C dolazi do polimeriziranja i umreživanja smole i povišenja gustoće umetka (peaćenje mikropora). Rezultat je viša gustoća umetka i bolja kvaliteta površine. Prodiranje epoksidne smole ima za posljedicu otežanu naknadnu obradbu. [67,89]

DMLS se trenutno smatra najbržim postupkom izravne izradbe elemenata kalupne šupljine. Mehanička svojstva kalupnih elemenata nisu visoka kao pri IMLS postupku, no moguće je izraditi nekoliko tisuća otpresaka od uobičajenih plastomera. Iako je debljina sloja pri izradbi kalupnih elemenata svega 0,02 mm, potrebna je dodatna obradba površine. [68]

5.3.4 3D tiskanje metala (*ProMetal* postupak)

Tvrtka *ExtrudeHone* licencirala je postupak 3D tiskanja metala pod nazivom *ProMetal*. S pomoću tog postupka moguće je izrađivati metalne prototipove ili prototipne kalupe. Postupak se temelji na načelima *inkjet* tiskanja. [93,112]

Uređaj kojeg je razvila tvrtka *ExtrudeHone* sastoji se od glave s mlaznicama čije je gibanje u smjeru osi x i y upravljano s pomoću računala, te spremnika s metalnim prahom ispod kojeg se nalazi podloga koja omogućuje gibanje u smjeru osi z (slika 5.21). Pri nanošenju veziva na metalni prah, kontinuirani se mlaz veziva s pomoću piezoelektričnih elemenata raspršuje u kapljice prosječnog promjera $80\ \mu\text{m}$. Svaka kapljica prolazi kroz elektrostatsko polje, pri čemu se kapljice električki nabijaju, a njihov se naboj rabi za točno nanošenje na metalni prah. Brzina okomitog mlaza veziva premašuje $10\ \text{m/s}$. Kada kapljica dotakne metalni prah, nastaje kuglasti konglomerat kapljastog veziva i metalnog praha. Kapilarne sile djeluju na kapljevito vezivo te ga pomiču na željena mjesta na metalnom prahu. Time se osim povezivanja čestica metala na jednom sloju omogućuje povezivanje tog sloja s prethodnim. [93,112]



Slika 5.21 Prometal postupak [112]

Nakon isparavanja kapljevite faze veziva s pomoću posebnog sušila, načinjeni prototip sastoji se od 60 % obujamnog udjela metalnog praha i 10 % udjela organskog veziva. Mehanička svojstva prototipa nakon tog koraka izradbe (*zelena faza*) su vrlo niska, pa je potrebno srašćivanje prototipa u peći zbog povišenja svojstava. Srašćivanjem se prototipu povisuju mehanička svojstva i gustoća. Pravilnim izborom temperature srašćivanja iz prototipa se uklanja organsko vezivo. Konačno povišenje gustoće prototipa ostvaruje se u sljedećem koraku toplinske obradbe, prodiranjem bronce u prototip. Struktura gotovog prototipa ili prototipnog kalupa sastoji se od 60 % čelika i 40 % bronce. [93,112]

ProMetal postupak ne predstavlja zamjenu klasičnim postupcima izradbe kalupa, već alternativno rješenje za izradbu vrlo kompliciranih modela, gdje uporaba klasičnih postupaka postaje neučinkovita ili čak nemoguća. Kvaliteta površine prototipova izrađenih *ProMetal* postupkom nešto je lošija nego pri uporabi SLS postupka, no taj se nedostatak može ukloniti razvojem novih prahova, čestica manjih promjera. Područje uporabe tog postupka unutar RT-a prvenstveno je moguće tražiti u izradbi metalnih funkcijskih prototipova kao i za izradbu elemenata kalupa za injekcijsko prešanje manjih serija polimernih otpresaka. Takve prototipne kalupe moguće je rabiti i za tlačno lijevanje metala (u manjih serijama), te za postupke puhanja i ekstrudiranja polimera. Kalupni elementi izrađeni tim postupkom su približnih izmjera (trenutno je postiziva točnost izmjera prototipova 0,1 mm.[89]), te je potrebna dodatna obradba elemenata na točne izmjere. [93]

Prednosti uporabe *ProMetal* postupka očituju se u: raznolikosti raspoloživih metalnih prahova, nije potreban potporanj, moguće je izraditi prototipove komplicirane geometrije i s unutrašnjim podrezima, moguća promjena preciznosti stroja u cilju povišenja brzine rada, jednostavna izmjena materijala, jednostavnost postupka (načela *inkjet* tiskanja), uređaj raspolaže sustavom za samodijagnosticiranje i izvještavanje o trenutnom statusu, automatska kalibracija uređaja u cilju postizanja što kvalitetnijih prototipova. [112]

5.3.5 Kontrolirana izradba metalnih dijelova (e. *Controlled Metal Build-up - CMB*)

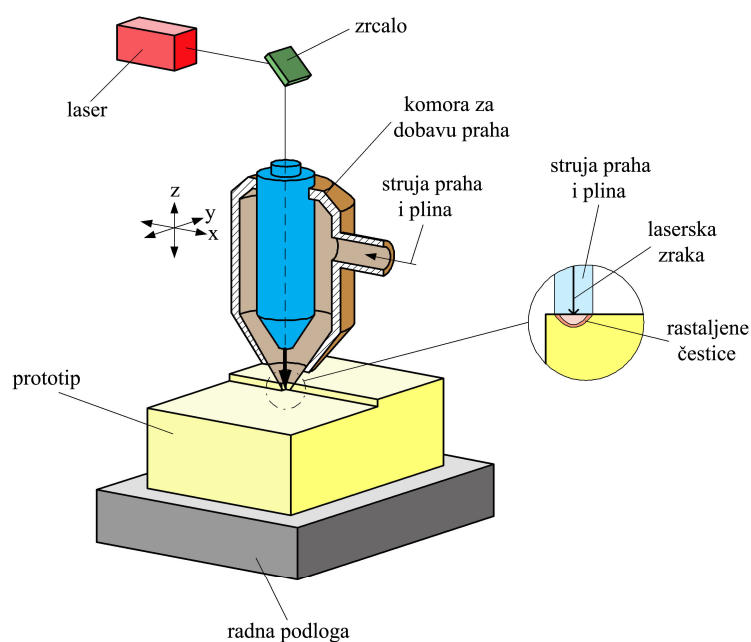
Postupak CMB predstavlja kombinaciju slojevitog zavarivanja s pomoću lasera i visokobrzinskog glodanja. Takva kombinacija uređaja omogućuje izradbu kalupa i kalupnih umetaka od gotovo svih zavarljivih metala. Metalni prototip se gradi tako da se sloj metala zavari s pomoću lasera, nakon čega se završno obradi s pomoću glodalice. Kako se metalni prah ne srašćuje, već u potpunosti tali s pomoću energije laserskog zračenja, rezultat je izradba

prototipnih kalupa i metalnih prototipova sa 100 %-tnom gustoćom. Materijal se laseru dobavlja u obliku žice. Za CMB postupak rabi se laser snage 1 do 2 kW koji tali čeličnu žicu i nanosi materijal na željeno mjesto. Nakon nanošenja odgovarajuće količine rastaljenog metala, s pomoću visokobrzinskog glodanja poravnava se svaki nanešeni sloj radi korekcije izmjera u smjeru osi z.[103]

Količina materijala koja se nanosi u pojedinom sloju vrlo je mala, pa je brzina izradbe prototipova visoka. Ujedno je moguće izrađivati male i uske detalje što je inače moguće ostvariti samo EDM postupkom. Postupak je osim za izradbu elemenata kalupa pogodan i za popravak postojećih oštećenih ili istrošenih kalupa. [113]

5.3.6 Izravno taloženje metala (e. *Laser Engineering Net Shaping - LENS*)

Proces započinje djelovanjem laserske zrake (Nd:Yag laser) na vrlo usko područje površine, pri čemu nastaje mjesno rastaljeno područje. S pomoću mlaznice se zatim dodaje točno određena količina novog praškastog materijala pri čemu nastaje novi sloj prototipa (slika 5.22). [114]



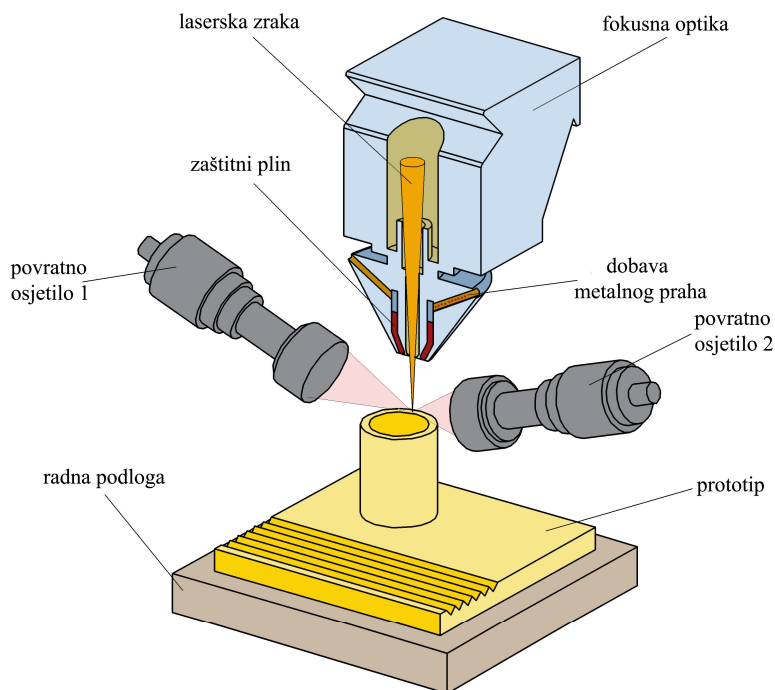
Slika 5.22 Izravno taloženje (LENS postupak) [115]

Postupak se odvija u podtlačnoj komori u kojoj se lako mogu kontrolirati uvjeti izradbe prototipa. Primjerice moguće je održavati atmosferu s argonom u kojoj je sadržaj kisika zanemariv. To je posebice važno pri izradbi prototipova od aluminija gdje prisutnost kisika sprječava dobro međusobno povezivanje slojeva prototipa. LENS postupak omogućuje i izradbu kalupa s više materijala u jednom ciklusu. Primjerice moguće je izraditi dijelove kalupne šupljine od čelika, a dio umetaka može u istom ciklusu biti načinjen od bakra (npr. za jezgre koje se teško mogu temperirati). [114]

5.3.7 Izravno taloženje metalnog praha (e. *Direct Metal Deposition - DMD*)

Postupak je sličan LENS postupku. Razlike se javljaju uglavnom u detaljima oko upravljanja i uporabe uređaja za izradbu metalnih prototipova (slika 5.23). [116,117]

DMD postupak nudi prednosti izradbe prototipova od više materijala, te izradbu kanala za temperiranje u optimalnim položajima. S druge strane postupak je spor, što ga čini pogodnijim za izradbu preciznih detalja na prethodno načinjenom modelu. Postupak se uglavnom rabi u automobilskoj industriji. [103,117]



Slika 5.23 Izravno taloženje metalnog praha (DMD postupak) [116]

5.3.8 Izravna izradba kalupne ljsuske (e. *Direct Shell Production Casting - DSPC*)

DSPC postupak patentirala je tvrtka *Solingen*. Tijekom postupka prvo se na radnu ploču uređaja tiskanjem nanosi sloj aluminijsa, silikonskog karbida ili cirkonija, a na nju se s pomoću mlaznice nanosi fini sloj silika veziva. Vezivo mjesno povezuje metalni prah u tom sloju, te ostvaruje dovoljno prijanjanje kako bi se na njega mogao nanijeti novi sloj metalnog praha. Višak praha koji nije u dodiru s vezivom se ne uklanja već služi za podupiranje prototipa. Postupkom se izrađuju ljsuske koje poprimaju oblik kalupne šupljine. Nakon izradbe čitave ljsuske, ljsuska se vadi iz praha i u peći očvršćuje, čime se završava izradba kalupa. Takvi se kalupi najčešće rabe za lijevanje. [118]

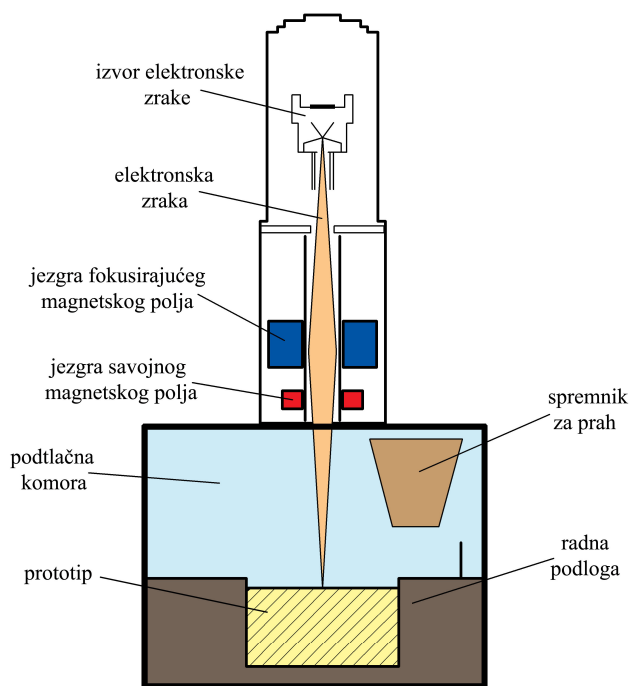
Postupak se odlikuje visokom brzinom, a moguće je izrađivati vrlo komplicirane oblike kalupnih šupljina. Pri tome se rabe neotrovni materijali. S druge strane postupak rezultira vrlo grubom površinom kalupne šupljine, mlaznice za tiskanje metalnog praha se često začepi, te je moguće izrađivati kalupe samo manjeg obujma. [77]

5.3.9 Taljenje s pomoću snopa elektrona (e. *Electron Beam Melting - EBM*) [119-121]

EBM postupkom se prototip gradi sloj po sloj taljenjem sloja metalnog praha s pomoću snopa elektrona. Područja primjene EBM postupka su RP (metalni prototipovi), RM (metalni proizvodi), (RT) kalupi za injekcijsko prešanje, kalupi za tlačno lijevanje, te u biomedicini pravljenje implantata. Materijali koji se prerađuju EBM postupkom su: titan i njegove legure, volfram, niobij, tantal, platina, paladij, cirkonij, iridij, nikal, legure nikla. Prototipovi se izrađuju izravno iz CAD podataka bez potrebe za naknadnom obradbom očvršćivanja. Načinjeni prototipovi trebaju imati dodatke za naknadnu obradbu na konačne izmjere.

EBM postupak (slika 5.24) odvija se u podtlačnoj komori. Snop elektrona se proizvodi s pomoću posebne mlaznice koja se učvršćuje u komori. Snopu elektrona se omogućuje savijanje tako da je moguće doseći svaki kutak komore. Elektroni se emitiraju iz punila koje je pri povišenoj temperaturi (oko 2 500 °C). Elektroni se zatim u električnom polju ubrzavaju na polovicu brzine svjetlosti, a snopom elektrona se upravlja s pomoću dva magnetska polja. Prvo polje djeluje kao magnetska leća. S pomoću njega se snop elektrona fokusira i postiže se željeni promjer snopa. Drugo polje služi za usmjeravanje snopa na željeno mjesto u komori. Pri sudaru elektrona s metalnim prahom, kinetička se energija sudara pretvara u toplinsku koja lokalno tali metalni prah.

Prednosti EBM postupka jesu: mogućnost postizanja visoke razine energije u malom snopu, pravljenje prototipa pri podtlaku što rezultira vrlo dobrim mehaničkim svojstvima prototipa, visoko podtlačna atmosfera jamči izostajanje oksida i nitrida na površini prototipova. Postupak omogućuje navarivanje istog ili kombinaciju različitih metala. Pri generiranju snopa elektrona visoka je učinkovitost što rezultira malom potrošnjom energije. Niski su troškovi instaliranja i održavanja, visoka je brzina izradbe prototipova, usmjeravanje snopa elektrona se postiže bez pokretnih elemenata uređaja što snizuje troškove održavanja i povisuje brzinu izradbe prototipa.



Slika 5.24 Taljenje s pomoću snopa elektrona (EBM postupak) [121]

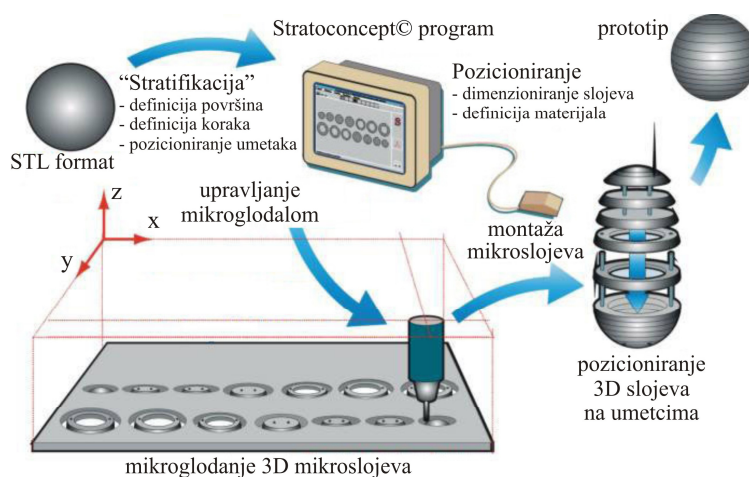
Nedostatci EBM postupka su: visoko podtlačna atmosfera zahtijeva prisutnost dodatnog uređaja, tijekom postupka prisutno je γ -zračenje, moguća je izradba prototipova samo od materijala koji su vodiči električne energije.

5.3.10 Laminiranje (LOM) [2,122]

Prototipovi načinjeni klasičnim LOM postupkom temeljenim na uporabi papira, imaju ograničenu uporabu za vizualne i konceptijske modele. Za potrebe izradbe elemenata kalupa bilo je potrebno umjesto papira uporabiti materijale boljih mehaničkih svojstava, primjerice metalne ploče. Pri takvom LOM postupku se umjesto papirnatih rola rabe metalne (uglavnom čelične)

ploče. U STL datoteci se s pomoću računala načine slojevi budućeg prototipa, a zapis svakog sloja posebno se pohranjuje. Zatim se na temelju svakog od zapisa na ploči izrezuju oblici slojeva s pomoću glodala, plazme, lasera ili vodenim mlazom. Izrezani slojevi se u sljedećem koraku slažu i međusobno povezuju.

Na području izradbe metalnih prototipova i elemenata kalupa s pomoću LOM postupka patentirano je nekoliko postupaka, a jedan od najpoznatijih postupaka je tzv. *Stratoconcept* (slika 5.25). Postupak se sastoji od podjele osnovnog materijala (u pločastom obliku) u potreban broj slojeva nazvanih *stratum*. Slojevi se izrađuju i oblikuju s pomoću 2,5-osne glodalice ili 5-osnog lasera. Izrezani slojevi se u idućem koraku povezuju u cjelinu. Postupak je vrlo brz i nema ograničenja glede geometrije ili izmjera prototipa (prototipnog kalupa).



Slika 5.25 *Stratoconcept* postupak laminiranja [122]

5.3.11 Proizvodnja kalupa od smjese epoksidne smole i metala (e. *Metal Filled Epoxy Tooling - MFET*) [123,124]

Postupak proizvodnje kalupa od smjese epoksidne smole i metala sastoji se od nekoliko koraka. U prvom se koraku nekim od RP postupaka izrađuje pramodul. Zatim se s pomoću lako obradivog materijala (npr. akrili ili drvo) izrađuje podloga s oblikom sljubnice. Na podlogu se postavlja okvir s vanjskim izmjerama koje trebaju imati kalupni umetci. Na površine pramodela, podloge i okvira nanosi se tanki sloj odvajala kako bi se nakon lijevanja mogli lakše odvojiti. Zatim slijedi korak lijevanja smjese epoksidne smole i metalne taljevine u okvir. Nakon očvršćivanja smjese u kalupni umetak, čitav se okvir okreće, te se uklanja podloga oslobađajući prostor unutar okvira za drugu kalupni dio. Postupak se zatim ponavlja i za drugu dio kalupa.

Kalupne umetke je potrebno obraditi na vanjskim stijenkama kako bi se uklopili u kućište kalupa. [123] Poteškoća pri uporabi kalupa načinjenih tim postupkom je loša toplinska provodnost koju je moguće povisiti dodavanjem ugljičnih vlakana u smjesu. [124]

5.3.12 Višefazno mlazno očvršćivanje (e. *Multiphase Jet Solidification - MJS*)

Ovo je generativni postupak izradbe metalnih i keramičkih prototipova koji se temelji na selektivnom taloženju niskoviskoznog materijala s pomoću podesive mlaznice. [2] Postupak je sličan FDM postupku izradbe prototipova, pri čemu se s pomoću MJS postupka prerađuju uglavnom mješavine metala ili keramike i polimera. [125]

MJS postupak razvijen je za izradbu prototipova visoke gustoće. Stoga se u prvom koraku procesa na željena mjesta ekstrudira (kao pri FDM postupku) smjesa keramike ili metala s najčešće polimernim vezivom. Pri tome je samo vezivo u rastaljenom stanju kako bi se održala povezanost među česticama metala ili keramike. Mješavina je zagrijana na temperaturu neposredno iznad tališta veziva, tako da pri dodiru s podlogom dolazi do gotovo trenutnog očvršćivanja mješavine. Rezultat takvog procesa je proizvodnja prototipova ili elemenata kalupne šupljine gustoće oko 35 %. Nakon tog koraka prototipovi se podvrgavaju toplinskoj obradbi u peći (sraščivanju metalnih odnosno keramičkih čestica), te prodiranju elemenata koji popunjavaju šupljine nastale razgradnjom polimernog veziva. [2]

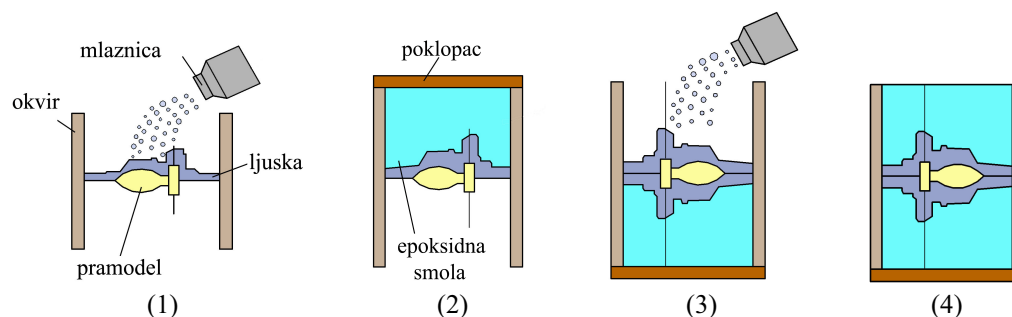
5.3.13 Izradba kalupa naštrcavanjem metala (e. *Spray Metal Tooling - SMT*) [68,103]

Pri izradbi kalupa naštrcavanjem metala (slika 5.26), najčešće se na prethodno načinjeni pramodel nanose legure cinka i aluminijska s talištima raspona 120 °C do 420 °C.

Nanošenjem rastaljene legure na pramodel dobiva se sloj metala debljine 2 do 3 mm čineći *ljusku* koja predstavlja oblik stijenke kalupne šupljine. Kako se tijekom postupka naštrcavanja nanose vrlo male čestice, prototip je gotovo bez napetosti, a kvaliteta površine je dobra. Postupak se primjenjuje za proizvodnju elemenata kalupnih šupljina koje imaju relativno glatku površinu i bez malih detalja. Kako bi se osiguralo točno nalijeganje ljuske u kalup, šupljina ljuske se ispunjava lijevanjem potporna (najčešće epoksidne smole).

U kalupima načinjenim s pomoću tog postupka moguće je načiniti do 1 000 otpresaka što ovisi o vrsti prerađivanog materijala i geometriji kalupne šupljine. Toplinska provodnost kalupa je bitno

snižena u usporedbi s aluminijem ili čelikom, stoga ciklusi traju dulje, a svojstva načinjenih otpresaka se lošija su u usporedbi s otprescima načinjenim u klasičnim kalupima.



Slika 5.26 Postupak naštrcavanja metala: 1 - naštrcavanje metalne ljuske (1. dio kalupa), 2 - lijevanje epoksidne smole (1. dio kalupa), 3 - naštrcavanje metalne ljuske (2. dio kalupa), 4 - lijevanje epoksidne smole (2. dio kalupa) [103]

Temeljni je nedostatak tog postupka opasnost od otkidanja dijelova ljuske tijekom faze punjenja kalupne šupljine na kritičnim mjestima u kalupnoj šupljini, te nemogućnost pravljenja finih detalja. Stoga se najčešće ti dijelovi izrađuju klasičnim postupcima. Temeljna prednost postupka je mogućnost brze proizvodnje većih kalupa.

5.3.14 Lasersko generiranje (e. *Laser Generating - LG*) [4]

Lasersko generiranje je postupak razvijen u *RWTH Aachen* pod nazivom *Laser-Aided Powder Solidification (LAPS)*, u Los Alamosu pod nazivom *Directed Light Fabrication (DLF)*, te u *Sandia Laboratories* pod nazivom *Laser Metal Forming (LMF)*.

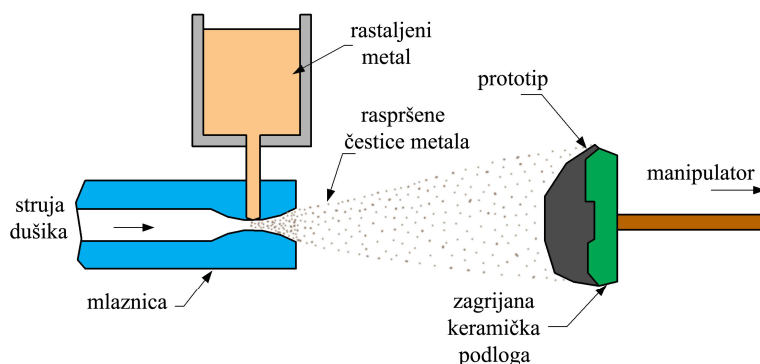
Pri LG postupku prah se rastali pod djelovanjem laserske zrake, a struja inertnog plina mjesno nanosi rastaljene čestice. Postupkom se izrađuju kalupni umetci visoke gustoće od teorijski bilo kojeg materijala kojeg je moguće prerađivati u praškastom obliku. Struja inertnog plina (Ar, He) sprječava oksidaciju metala pri nanošenju čestica. Pri LG postupku dolazi do nastajanja visokih zaostalih naprezanja u prototipnom dijelu, što dovodi do njegove deformacije i većih odstupanja u izmjerama. Postupak u nekim slučajevima zahtijeva uporabu potpornja. Površina prototipova je vrlo gruba ($R_a \approx 12 \mu\text{m}$).

5.3.15 Brzo očvršćivanje (e. *Rapid Solidification Process - RSP*)

Općenito, radi se o postupku naštrcavanja metala, no razlikuje se od ostalih postupaka iz te skupine po količini materijala koju se može nanijeti u jedinici vremena. Pri RSP postupku ona

iznosi nekoliko 100-tina kg/h, dok uobičajeni postupci naštrcavanja omogućuju nanošenje oko 7 kg/h. Ta prednost omogućuje primjenu RSP postupka za izradbu čitavog kalupa, a ne samo ljuske kojoj se naknadno dodaje punilo. Trenutno ograničenje postupka, tj. opreme za RSP postupak je u veličini kalupa koja maksimalno može iznositi oko 150 mm (slika 5.27). [4]

Rastaljeni metal se naštrcava na keramički pramodel poprimajući njegov oblik, pa čak i teksturu površine i vrlo fine detalje. Željena kalupna legura nalazi se spremniku pri temperaturi 100 °C iznad tališta. Taljevina legure se ubrizgava u mlaznicu s pomoću koje se materijal nanosi na pramodel. U mlaznici je taljevina izložena struji inertnog plina koji uslijed velike brzine raščlanjuje taljevinu na male čestice (kapljice) promjera oko 50 μm. Struja plina prenosi čestice materijala na željeno mjesto na pramodelu. Vrijeme prijenosa materijala od mlaznice do pramodela kreće se na razini milisekunde. Tijekom boravka u mlaznici materijal je u kapljevitom stanju, no već po dolasku u struju plina koji se nalazi pri sobnoj temperaturi, kapljice metala vrlo brzo očvršćuju. Uslijed brzog hlađenja rastaljenog metala, oko 70 % čestica u trenutku kontakta s pramodelom već prijeđe u čvrsto stanje. Ostatak rastaljenog materijala je dovoljan kako bi se postigao efekt *zavarivanja* nove količine materijala na prethodno nanoseni materijal. Naštrcavanje se odvija sve dok se ne postigne željena debljina rastaljenog metala. Takav se prototip hladi do sobne temperature, uklanja se keramički pramodel, te se prototip eventualno naknadno obrađuje nekim od klasičnih postupaka obradbe odvajanjem čestica. [4]



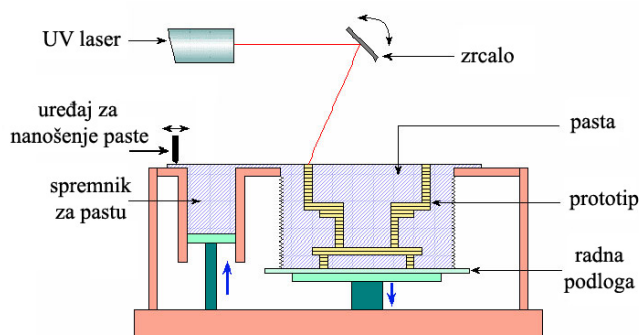
Slika 5.27 Postupak brzog očvršćivanja (RSP) [126]

5.3.16 *OptoForm* postupak pravljenja kalupa [127]

Tipični materijal za pravljenje metalnih prototipova i elemenata kalupa postupkom *OptoForm* je u pastoznom stanju. Pastozni materijal je fotopolimer (akrilni ili epoksidni), punjen metalnim ili keramičkim prahom ili česticama. Materijali koji se rabe za *OptoForm* postupak dijele se u

nekoliko skupina: akrilne smole dovoljne čvrstoće da se mogu rabiti za proizvodnju voštanih kalupa za injekcijsko prešanje, višenamjenske epoksidne smole za proizvodnju prototipova, skupina materijala male stlačivosti za postupke kao što su toplo oblikovanje i oblikovanje deformiranjem, keramike, metali (titan i čelik).

Pastozni materijal nanosi se u finim slojevima jedan na drugi, a svaki sloj mjesno očvršćuje s pomoću UV laserske zrake upravljane posebnim zrcalima (slika 5.28). Sustav za dobavu novog materijala s pomoću dvostrukog valjka nanosi novi sloj paste na prethodno očvršnuti sloj. Debljina sloja može varirati od 20 do 200 μm . Postupak zahtijeva uporabu posebnih potpornja (kao u slučaju stereolitografije) radi učvršćivanja prototipa tijekom njegova pravljenja.



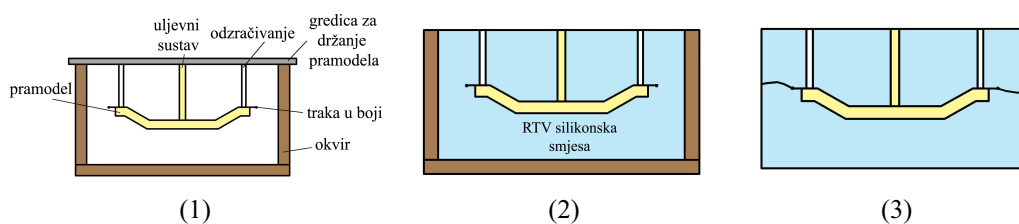
Slika 5.28 OptoForm postupak [127]

Nakon pravljenja jednoga sloja nije potrebno dodatno vrijeme prije nanošenja novoga sloja kao što je slučaj pri stereolitografiji. Ta činjenica zajedno s činjenicom da se za postupak rabi Ar laser snage 400 ili 800 mW dovodi do visoke proizvodnosti čak i za velike i masivne prototipove. Brzine proizvodnje prototipova mogu dostići i do 25 mm/h (u smjeru osi z). Izmjena materijala također je vrlo brza i jednostavna. *OptoForm* je još u razvoju pa za sada nema podataka o trajnosti kalupnih elemenata načinjenih tim postupkom.

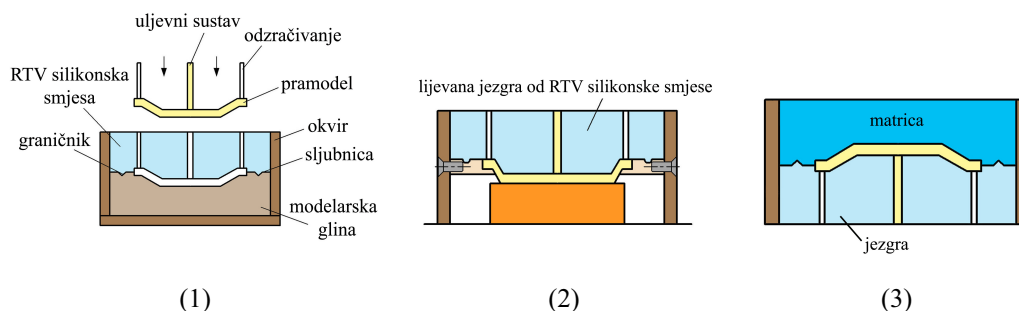
5.3.17 Proizvodnja silikonskih kalupa (RTV kalupi) [2,103]

Proizvodnja kalupa od silikonskog kaučuka koji umrežuje pri sobnoj temperaturi (RTV kaučuci) jedan je od najpopularnijih posrednih postupaka brze proizvodnje kalupa. Pri tome se silikonski kaučuk rabi kao kalupni materijal koji se lijeva oko pramodela tvoreći elemente kalupne šupljine. Općenito postupak se sastoji od tri koraka: pravljenja pramodela, dotjerivanje pramodela na željeni oblik i točnost izmjera, te lijevanje silikonskog kaučuka oko pramodela. Nakon lijevanja i očvršćivanja silikonskog kaučuka, kalup se razrezuje po sljubnici s pomoću

skalpela, a iz kalupne šupljine se vadi pramodel. Materijali koji se najčeće prerađuju u takvim kalupima su poliuretani, ABS i poliamidi. Silikonski kalupi predstavljaju vrlo jednostavno, brzo i jeftino rješenje za izradbu vizualnih i ergonomskih prototipova. Nedostatak postupka je u mogućnosti izradbe relativno malog broja otpresaka (prototipova), te ograničenost na preradbju svega nekoliko vrsta materijala. Silikonski kalup može se izraditi na nekoliko načina. Može se izraditi kao jednodijelni (slika 5.29) ili dvodijelni (slika 5.30).



Slika 5.29 Jednodijelni silikonski kalup: 1 - pozicioniranje pramodela, uljavnog sustava i odzračnika, 2 - lijevanje RTV silikonskog kaučuka, 3 - razrezivanje kalupa na dva dijela [2]



Slika 5.30 Dvodijelni silikonski kalup: 1 - pozicioniranje pramodela, uljavnog sustava i odzračnika u glinu za modeliranje, 2 - lijevanje RTV silikonskog kaučuka (proizvodnja jezgre), 3 - okretanje kalupa, pozicioniranje i lijevanje RTV silikonskog kaučuka (proizvodnja matrice) [2]

U slučaju pravljenja modela kompliciranije geometrije, uz silikonske kalupe mogu se rabiti i metalni ili plastični umetci. Umetci su vrlo dobra zamjena za tanje dijelove kalupa, čime se poboljšava kvaliteta i produljuje trajnost kalupa.

5.3.18 Selektivno lasersko taljenje (e. *Selective Laser Melting* - SLM) [103,128]

Postupak je sličan SLS postupku, no pri SLM postupku metalni ili keramički prahovi se u potpunosti tale (ne srašćuju), što rezultira visokom gustoćom načinjenih prototipova. Stoga nema potrebe za naknadnim koracima kao što su naknadno srašćivanje i prodiranje. Debljina sloja

iznosi oko 20 μm . Temeljni je nedostatak postupka gruba površina prototipa koji je potrebno naknadno doraditi, te netočnost u izmjerama prototipnog dijela.

5.4 IZBOR OPTIMALNOG POSTUPKA BRZE PROIZVODNJE TVOREVINA

Iz prethodnih poglavlja očito je kako se na tržištu trenutno nalazi velik broj postupaka brze proizvodnje tvorevina, a trajno se razvijaju novi postupci. Svaki od postupaka ima određene prednosti ali i nedostatke u usporedbi s ostalim postupcima. Stoga je pri izboru odgovarajućeg postupka potrebno voditi računa o nekoliko kriterija, neovisno o tome namjerava li se nabavljati oprema za brzu proizvodnju tvorevina ili se želi naručiti proizvodnju prototipne tvorevine.

Postoji mnogo čimbenika o kojima valja voditi računa pri izboru optimalnog postupka brze proizvodnje kalupa. Moguće ih je podijeliti u 4 temeljne skupine: [72,129]

- fizikalni i mehanički čimbenici
- parametri procesa proizvodnje prototipova
- mogućnost uporabe načinjenih prototipova (tablica 5.1)
- gospodarski kriteriji.

Tablica 5.1 Mogućnosti primjene pojedinih RP/RT postupaka pri razvoju i proizvodnji [130]

Vrsta modela	Materijal	Postupak proizvodnje	RP/RT postupak
Razmjerni	bilo koji	bilo koji	SLS, SLA, FDM, ...
Konstruktivski	sličan	bilo koji	SLS (PA), podtlačno lijevanje
Funkcijski	identični	sličan	epoksidni kalupi
Predserija	identični	identični	SLS (metalni kalupi)

Fizikalni i mehanički čimbenici

Potrebno je izabrati postupak koji omogućuje pravljenje prototipnih tvorevina koji zadovoljavaju postavljene zahtjeve na fizikalna i mehanička svojstva tvorevine. Najčešće su pri izboru pojedinog postupka ključna svojstva materijala od kojeg se pravi prototipna tvorevina. [131]

U skupinu fizikalnih čimbenika ubraja se točnost i preciznost izmjera i oblika prototipne tvorevine, postojanost izmjera prototipnih tvorevina, toplinska svojstva prototipnih tvorevina, prozirnost itd. [72,75,83,129]

Rabe li se prototipne tvorevine za potrebe funkcijskih ispitivanja, kao konačni proizvodi ili za potrebe brze proizvodnje kalupa, bitna su i mehanička svojstva prototipne tvorevine. Postupci brze proizvodnje tvorevina se prvenstveno razlikuju na temelju postignute gustoće i čvrstoće prototipnih tvorevina, ili drugih mehaničkih svojstava specifičnih za određenu namjenu prototipne tvorevine. Potreba za naknadnom obradbom prototipne tvorevine također pripada skupini fizikalnih i mehaničkih čimbenika. [72,129]

Iako se naknadnom obradbom uglavnom povisuju mehanička svojstva prototipnih tvorevina, potrebno je napomenuti kako takva obradba istodobno negativno utječe na točnost i preciznost izmjera i oblika postignutih tijekom prvog koraka pravljenja prototipne tvorevine. [129]

Od ostalih kriterija iz skupine fizikalnih i mehaničkih kriterija moguće je navesti postizivu tvrdoću prototipne tvorevine (prije i nakon toplinske obradbe), postizivu kvalitetu površine prototipne tvorevine te mogućnost oblikovanja detalja na prototipnoj tvorevini. [72,129,130]

Utjecaj procesnih parametara

Kao najvažniji čimbenik ove skupine kriterija izbora postupka brze proizvodnje tvorevina javlja se veličina prototipne tvorevine koju je moguće načiniti na određenoj opremi. Veličina prototipne tvorevine uglavnom ovisi o veličini radnog prostora uređaja za pravljenje tvorevine, što predstavlja jedno od glavnih ograničenja opreme koja je trenutno na raspolaganju. Pri tome noviji postupci laminiranja omogućuju pravljenje nešto većih tvorevina u usporedbi s ostalim postupcima. Trenutno se ta poteškoća rješava na taj način da ukoliko je potrebno načiniti veće prototipove, izrađuju se manji segmenti koji se naknadno spajaju. [129]

Brzina postupka brze proizvodnje tvorevina jedan je od ključnih parametara koje se razmatra pri izboru postupka, odnosno odgovarajuće opreme. Brzina postupka uglavnom ovisi o samoj fizici pravljenja tvorevine. Primjerice, pri SLA postupku prototipna tvorevina gradi se na temelju slijeda točaka. S druge strane postupci kao što su SGC ili *Objet* omogućuju pravljenje čitave površine prototipa na jednom sloju odjednom. Time se vrijeme pravljenja prototipa bitno skraćuje. [75,72,129,131]

Potreba za potpornijima pri pravljenju prototipnih tvorevina slijedeći je kriterij na temelju kojeg je moguće donijeti odgovarajuću odluku. Kada se radi o primjeni materijala u kapljevitom stanju (npr. SLA postupak), tada je ovisno o geometriji prototipne tvorevine potrebno uporabiti

potporanj. U slučaju kada se rabi materijal u praškastom stanju (npr. SLS postupak), prah koji okružuje načinjene slojeve prototipa ujedno služi za podupiranje prototipa, te nije potreban potporanj. To je očita prednost tih postupaka pred postupcima s kapljevitim materijalima. [2,129]

Neke od tehničkih karakteristika po kojima se mogu uspoređivati postupci brze proizvodnje tvorevina su: kapacitet uređaja, utrošak energije, izmjere uređaja, minimalna debljina sloja, maksimalna debljina sloja, debljina stijenke modela, izmjere radnog prostora, utjecaj na okoliš itd. [2]

Mogućnost uporabe prototipnih tvorevina

Mogućnost uporabe prototipnih tvorevina uglavnom je definirana vrstom uporabljenog materijala kojeg je moguće preraditi određenim postupkom. Radi li se o potrebi za pravljenjem konceptijskih prototipova bez posebnih zahtjeva, svakim od raspoloživih postupaka brze proizvodnje tvorevina moguće je načiniti zadovoljavajući prototip. Međutim, ukoliko je potrebno izraditi funkcijske prototipove, materijal od kojih se izrađuju treba biti isti ili što je moguće sličniji materijalu stvarne tvorevine. Stoga prednost imaju postupci koji omogućuju preradbu što je moguće više vrsta materijala (primjerice SLS postupci). Kada se radi o polimernim prototipovima, tada samo mali broj materijala (i postupaka) može zadovoljiti zahtjeve koji se postavljaju pred prototipne tvorevine koje se rabe za prototipne kalupe. Stoga na tom području prevladavaju postupci za pravljenje metalnih ili keramičkih prototipnih tvorevina. [2,72,129]

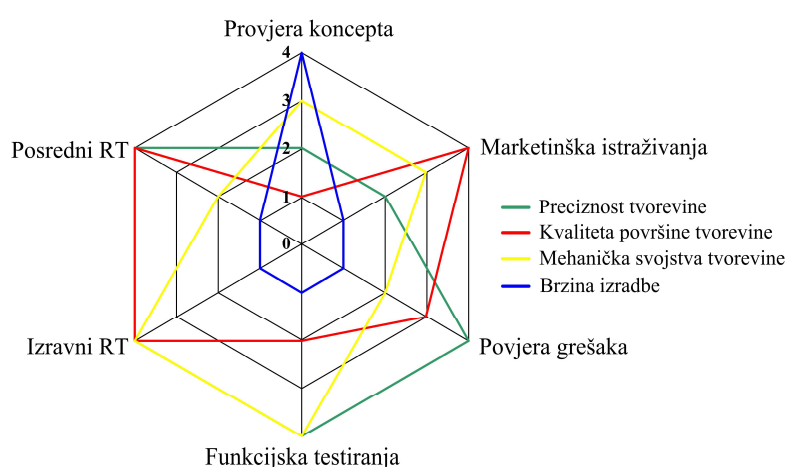
Gospodarski kriteriji

Pri izboru optimalnog postupka brze proizvodnje tvorevina, pored tehničkih karakteristika treba uzeti u obzir i ostale karakteristike koje utječu na cijenu i kvalitetu prototipova. Prvenstveno to su nužnost stručnog nadzora tijekom pravljenja prototipne tvorevine, mogućnost automatiziranja postupka te pripreme i prijenosa podataka, vrijeme izobrazbe za rad na uređaju, nužnost naknadne obradbe prototipnih tvorevina, troškovi opreme i njenog održavanja, troškovi prerađivanih materijala itd. [72,75,129,132]

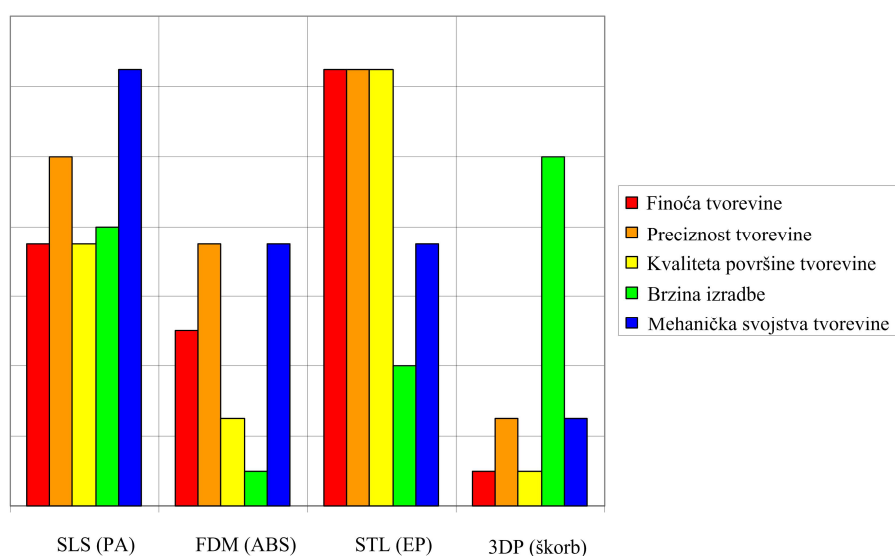
Kako bi se potencijalnim korisnicima opreme za brzu proizvodnju tvorevina, kao i krajnjim korisnicima takvih tvorevina olakšao izbor optimalnog postupka, trajno se provode studije s usporedbama postupaka (detaljnije u [75,72,129,132]).

Stručnjaci s područja brze proizvodnje tvorevina također se zalažu za uvođenje određenih normi na temelju kojih bi potencijalni korisnici opreme mogli procijeniti prednosti uporabe određenog postupka u svom okruženju. Odgovarajuće norme definirale bi uobičajene metode za mjerenje prednosti i ograničenja primjene odgovarajućeg postupka brze proizvodnje tvorevina, kao i praćenje prijenosa novih postupaka iz laboratorijskih uvjeta u proizvodno okruženje. [133]

Slike 5.31 i 5.32 prikazuju primjer vrednovanja zahtjeva na postupke brze proizvodnje tvorevina te primjer usporedbe nekoliko postupaka brze proizvodnje tvorevina.



Slika 5.31 Vrednovanje funkcija cilja pri brznoj proizvodnji tvorevina [130]



Slika 5.32 Primjer usporedbe postupaka brze proizvodnje tvorevina [130]

6 UTJECAJ MATERIJALA STIJENKE KALUPNE ŠUPLJINE NA PROCES INJEKCIJSKOG PREŠANJA

6.1 MATERIJALI ZA IZRADBU ELEMENATA STIJENKI KALUPNE ŠUPLJINE

Za potrebe rada dat će se skupni pregled samo najvažnijih materijala koji se rabe za potrebe izradbe kalupa. Pri tome će se razmatrati posebno skupina klasičnih kalupnih materijala i materijala koji se rabe pri brzom izradbi kalupa (RT). Pri klasičnoj izradbi kalupa najčešće primjenjivani materijali su čelici. Pri tome je moguće načiniti grubu podjelu čelika za izradbu elemenata kalupa u 7 skupina: [16,136-140]

- čelici za cementiranje
- čelici za poboljšavanje
- čelici za nitriranje
- niskolegirani čelici
- visokolegirani alatni čelici
- nehrđajući alatni čelici
- *maraging* čelici.

U toplinski obrađenom stanju čelike za cementiranje karakteriziraju tvrdi i na trošenje postojani površinski slojevi te žilava jezgra. Ti su čelici pogodni osim za klasične postupke izradbe elemenata kalupa i za postupke hladnog utiskivanja. Poboljšavanjem (kaljenjem i visokim popuštanjem) želi se postići dovoljno visoka granica razvlačenja uz povišenu žilavost (radnju loma). Stoga se poboljšani čelici rabe uglavnom za izradbu elemenata kalupa koji su udarno opterećeni. Međutim još je važnija njihova uporaba za izradbu elemenata velikih izmjera kada postoji rizik od prevelikih deformacija pa čak i lomova tijekom toplinske obradbe. Takvi se čelici isporučuju u stanju koje još omogućuje obradbu odvajanjem čestica nakon koje se više ne primjenjuje toplinska obradba. Postupci nitriranja omogućili su poboljšavanje površinskih svojstava čelika no ti čelici se odlikuju i visokom granicom razvlačenja i visokom žilavošću. Niskolegirani čelici trajno gube na značaju u primjeni za kalupne elemente. Visokolegirani čelici svoju primjenu u alatničarstvu našli su uglavnom zbog svojih povoljnih svojstava kao što su postojanost popuštanju, visoka čvrstoća u visokom popuštenom stanju te pogodnost za nitriranje

nakon kaljenja i popuštanja. Ti se čelici odlikuju i relativno visokom žilavošću zbog razmjerno niskog udjela ugljika. U slučaju preradbe agresivnih polimernih materijala prednost u primjeni za izradbu kalupnih elemenata imaju visokolegirani nehrđajući čelici. *Maraging* čelici su visokolegirani, s vrlo malim udjelom ugljika. Ta se skupina čelika pokazala podobnom za izradbu posebice savojno opterećenih elemenata kalupa (npr. duge jezgre). Unatoč visokoj čvrstoći tih čelika, nikal-martenzitna struktura omogućuje dobru obradljivost. Daljnja je prednost te skupine čelika što u otvrdnutom stanju uz relativno visoku čvrstoću zadržavaju razmjerno visoku žilavost. Najčešći predstavnici navedenih skupina kalupnih čelika opisani su u literaturi [16,134-138].

Od ostalih klasičnih materijala najčešće se za kalupne umetke rabe čelični ljevovi, bakrene i aluminijske slitine. Primjenjuju se kad je potrebno ostvariti dobru reprodukciju finih detalja na otprescima te kada se od kalupnih elemenata zahtijevaju dobra toplinska svojstva. Rjeđe se rabe grafitni materijali i cinkove slitine. [16,135]

Pri postupcima brzog pravljenja kalupa (RT) broj raspoloživih materijala je ograničen zbog specifičnosti pojedinog postupka. To se posebice odnosi na izravne postupke brze izradbe elemenata kalupa. Stoga je moguće načiniti temeljnu podjelu tih materijala na: [2,67,68,75,90,91,95,97,98,102,104-105,108-112,114,117,120-123]

- nemetalne (uglavnom epoksidne smole i silikoni)
- kompozitne (najčešće kombinacije čeličnih prahova s metalnim i nemetalnim vezivima).

U prvom slučaju kalupni elementi ili čitavi kalupi načinjeni od epoksidnih smola ili silikona mogu se uporabiti za izradbu ograničenog broj otpresaka zbog bitno lošijih mehaničkih i toplinskih svojstava u usporedbi s čelicima. Ta svojstva moguće je poboljšati izradbom nemetalnih ljuski oblika kalupne šupljine koje se pune metalima ili kompozitima. [60,68,91,124, 141-144]

Drugi slučaj je rašireniji. Pri tome se u početnom obliku kompozitne mješavine sastoje ili od dvaju metalnih sastojaka (nižeg i višeg tališta) ili od metalnog i polimernog sastojka. Tijekom toplinske obradbe tih kalupnih umetaka ukoliko se radi o metalno-polimernom prahu polimerni se sastojak razgrađuje, a u nastale šupljine prodire bakar ili njegove slitine, odnosno ponekad i epoksidna smola. Time se postižu bolja gustoća, bolja mehanička i toplinska svojstva, te bolja svojstva površine kalupnog umetka. Takvi kalupni umetci pogodni su za izradbu većeg broja otpresaka, a parametri preradbe su uslijed povoljnijih mehaničkih i toplinskih svojstava umetaka

sličniji parametrima preradbe pri uporabi klasičnih kalupnih materijala. Neki materijali iz te skupine navedeni su u tablici 6.1. [97,98,105,107-111,145,146]

Tablica 6.1 Najčešći materijali za brzo pravljenje elemenata kalupa [107,110,131,146]

Oznaka materijala	Tvrdoća	Toplinska provodnost (W/mK)	Rastezna čvrstoća (N/mm ²)
Somos 7100 (epoksidni fotopolimer za SLA postupak)	86 Shore D	0,18	59
ProtoTool 20L (kompozitna smola za SLA postupak)	92,9 do 94,7 Shore D	1,43	72 do 79
DirectMetal 20 (za DMLS postupak) (bakar, fosfor, kositar, nikal)	110 HB	30	400
DirectSteel 20 (za DMLS postupak) (željezo, ugljik, bakar, fosfor, nikal)	220 HB	13	600
Rapid Steel 2 (za IMLS postupak) (čelik X5CrNiMo17-12-2 i bronca)	22 HRC	23	580
LaserForm ST-100 (za IMLS postupak) (čelik X46Cr13 i bronca)	87 HB	49	510
LaserForm ST-200 (za IMLS postupak) (čelik X46Cr13 i bronca)	79 HRB	39	435
Laser Form A6 (za IMLS postupak) (čelik A6 (AISI) i bronca)	10 do 20 HRC	39	610

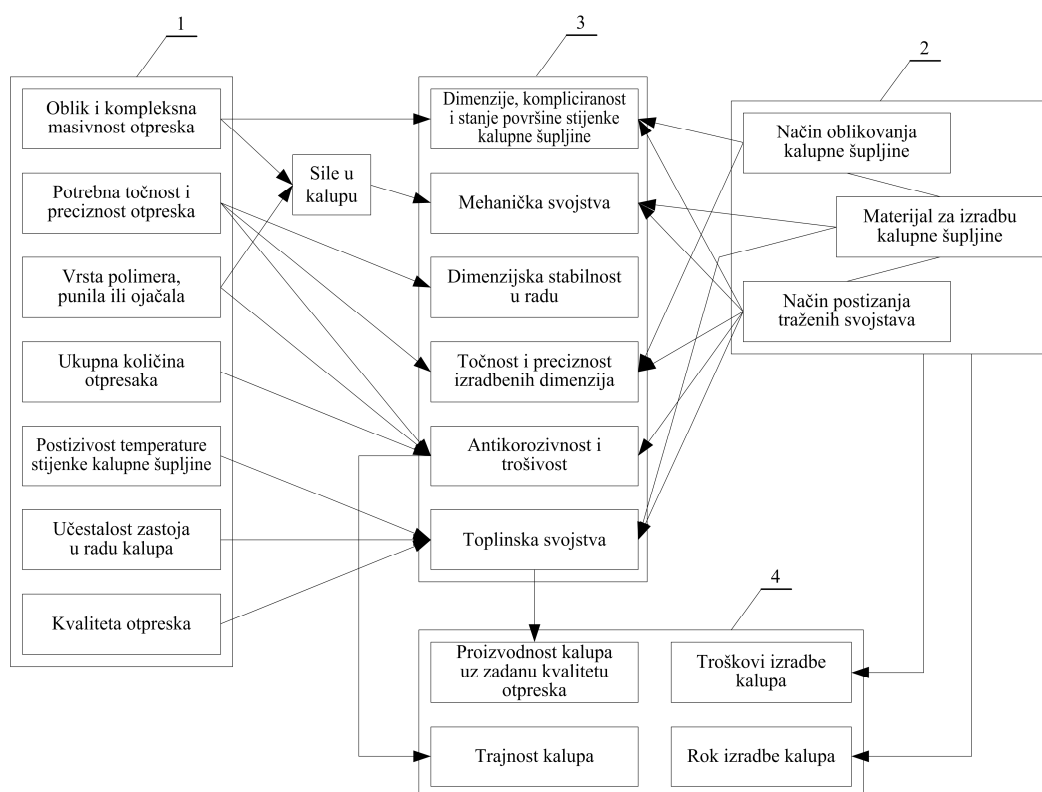
* Navedena svojstva materijala postignuta su nakon odgovarajuće toplinske obradbe i prodiranja dodatnih materijala

Na temelju analize analitičkog [44] i numeričkog proračuna [23,30,43,54,55,147,148] kalupa za injekcijsko prešanje plastomera proizlazi kako mehanička, a posebice toplinska svojstva materijala elemenata kalupne šupljine bitno utječu na proces injekcijskog prešanja, a time i na svojstva otpreska. Izbor materijala stijenke kalupne šupljine kompliciran je proces stoga što svaki kalupni materijal treba udovoljiti brojnim zahtjevima. Kriterije izbora materijala moguće je podijeliti na temeljne i specifične. [16,135]

6.2 KRITERIJI IZBORA MATERIJALA STIJENKE KALUPNE ŠUPLJINE

Idealni materijal za izradbu elemenata koji oblikuju kalupnu šupljinu opisuje se kao kemijski postojan materijal, dopuštene trošivosti, niske cijene, dobre obradljivosti i male mase. Valja biti zadovoljavajućih mehaničkih i toplinskih svojstava te dostupan u svakom trenutku. Unatoč velikom broju razvijenih općih i specijalnih kalupnih materijala, niti jedan od njih ne zadovoljava u potpunosti navedenu definiciju. Stoga je potrebno sistematizirati veći broj kriterija za izbor najpovoljnijeg materijala. [16,135] Općenito kriterije izbora kalupnih materijala moguće je podijeliti u skupine primarnih, eksploatacijskih i izradbenih čimbenika. [16]

Na izbor kalupnog materijala utječu brojni, često i suprotni zahtjevi. Izbor materijala nije moguće odvojiti od postupka izradbe elemenata stijenke kalupne šupljine (što je posebice uočljivo pri postupcima brze izradbe kalupa), kao niti od zahtijevanih svojstava otpreska. Stoga se pri izboru kalupnog materijala naglašava upravo povezanost materijala, postupka obradbe elemenata stijenke kalupne šupljine i svojstava otpreska. Međusobna djelovanja čimbenika koji utječu na izbor kalupnog materijala prikazuje slika 6.1. [16]



Slika 6.1 Povezanost utjecajnih čimbenika i kriterija izbora materijala stijenke kalupne šupljine: 1 - čimbenici koji utječu na izbor svojstva materijala kalupne šupljine, 2 - čimbenici koji utječu na svojstva materijala kalupne šupljine, 3 - svojstva materijala kalupne šupljine, 4 - korisnost izabrane kombinacije materijal - način obradbe [16]

6.2.1 Primarni čimbenici izbora materijala stijenke kalupne šupljine

Ovisno o vrsti prerađivanog plastomera, kalup radi u normalnim uvjetima, izložen utjecaju pare, vlage ili kemijskim utjecajima, te djelovanju dodatka kao što su punila i ojačala (npr. staklena vlakna). Veći dio plastomera nije kemijski agresivan pa s tog stajališta kalup radi u normalnim uvjetima. Iznimke su celulozni acetat i PVC. Posljedice kemijski agresivnog djelovanja plastomera je oštećenje površine stijenke kalupne šupljine, što se očituje gubitkom sjaja,

promjenom izmjera i nekvalitetnim otpreskom. Razina oštećenja u tom slučaju raste s agresivnošću plastomera, temperaturom zbivanja procesa u kalupu, kao i trajanjem tog procesa. [16]

Plastomerni otpresci često zamjenjuju metalne dijelove, pa se nameće potreba povišenja mehaničkih svojstava otpresaka. Stoga trajno raste uporaba ojačanih plastomera. Ojačala utječu na pojačano trošenje materijala stijenke kalupne šupljine, što utječe osim na izbor materijala i na izbor njegove površinske obradbe (toplinska obradba ili postupci prevlačenja površine stijenke kalupne šupljine). [16]

S trošenjem je usko povezan i kriterij ukupnog broja potrebnih otpresaka, njihov oblik i izmjere. Taj je kriterij posebno bitan ukoliko je potrebno načiniti prototipni kalup kada se rabe kalupni materijali bitno lošijih svojstava od klasičnih kalupnih materijala. Stanje na području materijala za brzu izradbu kalupa omogućuje izradbu ograničenog broja otpresaka, dok klasični kalupni materijali kao što su čelici omogućuju izradbu većih serija otpresaka. [4,16,60,104,149-151]

Kriteriji proizvodnosti kalupa i kvalitete otpreska, te izbor odgovarajućeg postupka izradbe elemenata kalupne šupljine vrlo su kompleksni, pa će biti posebno razmotreni u okviru analize utjecaja procesa injekcijskog prešanja na izbor materijala stijenke kalupne šupljine. [16]

6.2.2 Eksploatacijski čimbenici izbora materijala stijenke kalupne šupljine

Osim kemijske postojanosti, na uspješan rad kalupa utječu toplinska i mehanička svojstva materijala elemenata stijenke kalupne šupljine. Utjecaj toplinskih svojstava usko je povezan s proizvodnošću kalupa i kvalitetom otpreska, pa će biti pojašnjen zajedno s tim kriterijima. [16]

Od materijala stijenke kalupne šupljine zahtijeva se prvenstveno dobra obradljivost i sposobnost postizanja visokog sjaja površine stijenke kalupne šupljine. Ukoliko se dijelovi toplinski obrađuju, od materijala stijenke kalupne šupljine se zahtijevaju male promjene izmjera tijekom toplinske obradbe. Od mehaničkih svojstava materijala stijenke kalupne šupljine potrebno je izdvojiti rastezljivost tj. krutost kalupa, zatim tvrdoću i trošivost materijala. Pri većim kalupima postoji opasnost od prevelikog progiba kalupnih ploča, pa je potrebno voditi računa i o modulu elastičnosti. Konačno, ako stijenka kalupne šupljine ima po presjeku velike razlike u debljini, valja voditi računa i o žilavosti materijala. [16]

6.2.3 Čimbenici materijala stijenke kalupne šupljine ovisni o izradbenim postupcima

Od tih čimbenika valja izdvojiti postupke izradbe elemenata stijenke kalupne šupljine, te postupke toplinske obradbe tih elemenata.

Pri postupcima izradbe elemenata stijenke kalupne šupljine potrebno je razlikovati dvije glavne skupine postupaka. To su klasični postupci izradbe i brzi postupci pravljenja elemenata (ili čitavih) kalupa. U prvu skupinu postupaka ubrajaju se obradba odvajanjem čestica, utiskivanje, taloženje i lijevanje. Pri obradbi odvajanjem čestica u posljednje vrijeme načinjeno je najviše nastojanja kako bi se povisila brzina, točnost i preciznost izradbe elemenata kalupne šupljine. Tu je potrebno istaći postupke visokobrzinskog glodanja i elektroerodiranja. [16,134,137]

U drugu skupinu se ubrajaju postupci brze izradbe kalupa (RT) koji mogu biti izravni ili posredni. Od izravnih postupaka najčešće se rabe postupci SLS, LOM, 3DP i postupci laserskog generiranja, a od posrednih proizvodnja silikonskih i epoksidnih kalupa, naštrcavanje metala i brzo očvršćivanje. [2,70] Pri RT postupcima valja napomenuti kako sam izbor proizvodnoga postupka izradbe tvorevine uvelike određuje i izbor materijala elemenata stijenke kalupne šupljine. Razlog tomu je još uvijek ograničen broj materijala koje je moguće preraditi pojedinim RT postupkom.

Pri izradbi elemenata stijenke kalupne šupljine rabi se niz postupaka toplinske obradbe. Zadatak tih postupaka je ili promjena strukture materijala ili povišenje tvrdoće stvaranjem tvrdih površinskih slojeva. Pri toplinskoj obradbi posebice valja posvetiti pozornost postojanosti izmjera elemenata kalupa tijekom toplinske obradbe, te tijekom uporabe. [16] Pri postupcima toplinske obradbe također je moguće postupke podijeliti u one primjenjive na klasične kalupne materijale i one koji se rabe pri RT postupcima. Toplinska obradba elemenata kalupa načinjenih RT postupcima uglavnom se sastoji od naknadnog srašćivanja metalnog praha, prodiranja elemenata koji povisuju gustoću materijala i površinska svojstva te toplinske obradbe u cilju povišenja tvrdoće (opis toplinske obradbe RT kalupnih umetaka načinjenih SLS postupkom dan je u poglavlju 5). [2,95,105-112] Od ostalih čimbenika valja spomenuti glačavost površine stijenke kalupne šupljine. Površine u dodiru s plastomernom taljevinom trebaju biti u pravilu malih neravnina i visokog sjaja, što ovisi o čistoći materijala, površinskoj tvrdoći i načinu glačanja (poliranja). [16]

Pri uporabi RT postupaka uglavnom na površini ostaje efekt slojevitog slaganja elemenata kalupa, a na površinske neravnine također utječe i veličina čestica praha (ako se radi o postupcima s praškastim materijalima). Stoga je uvijek potrebno dodatno glačanje radi postizanja odgovarajuće hrapavosti površine. Dodatno poboljšanje moguće je ostvariti uporabom finijih prahova (čestica manjih promjera, npr. 20 μm), te pažljivim izborom parametara RT postupka. [152]

6.2.4 Utjecaj procesa injekcijskog prešanja na izbor materijala [16]

Dugo se jedinim kriterijem koji je povezivao injekcijsko prešanje plastomera i izbor materijala stijenke kalupne šupljine smatralo toplinsko svojstvo materijala, toplinska vodljivost. Međutim, uočeno je kako je takav pristup nepotpun, te se došlo do 4 specifična kriterija izbora materijala elemenata kalupa koji su u dodiru s plastomernom taljevinom:

- potrebna svojstva otpreska
- toplinska prohodnost, specifični toplinski otpor
- vrijeme hlađenja otpreska (ciklus injekcijskog prešanja - proizvodnost kalupa)
- osjetljivost temperaturnog polja na zastoje u radu.

6.2.4.1 Potrebna svojstva otpreska

Svojstva plastomernih otpresaka izravno ovise o tijeku hlađenja taljevine u kalupnoj šupljini. To posebice vrijedi za kristalaste plastomere. Stupanj kristalnosti kristalastih plastomera izravno ovisi o brzini hlađenja otpreska. Ukoliko se taljevina hladi naglo, stvara se na površini relativno debela amorfna kožica koja snizuje uporabna svojstva otpreska. Sporo hlađenje povisuje stupanj kristalnosti, povećava sferolite i povisuje mehanička svojstva otpreska. [16]

Povezanost materijala stijenke kalupne šupljine i postignutih svojstava otpreska moguće je uočiti preko toplinske prodornosti kalupnog materijala. Toplinska prodornost definira se kao mjera brzine prodiranja topline u tijelo ili sposobnost akumuliranja topline. To svojstvo omogućuje između ostaloga proračun dodirne temperature koja se uspostavlja na stijenci kalupne šupljine u trenutku kada do nje dođe čelo taljevine. [7,16]

Pri istim uvjetima preradbe injekcijskim prešanjem, niža toplinska prodornost rezultira postizanjem više dodirne temperature, što dovodi do sporijeg hlađenja taljevine na površini uz stijenku kalupne šupljine. Time se postiže manji gradijent hlađenja, tanja amorfna površinska

kožica, te općenito bolja uporabna svojstva otpreska. Pri višoj temperaturi stijenke kalupne šupljine tijekom ubrizgavanja, na što se može utjecati izborom materijala nižih toplinskih svojstava, postoji mogućnost boljeg oporavka (relaksacije) makromolekula amorfnih plastomera, snizuje se orijentiranost te se postižu bolja svojstva otpreska. Također valja naglasiti i utjecaj glačavosti na punjenje kalupne šupljine. Visoko sjajna površina stijenke kalupne šupljine olakšava njeno punjenje, što znači kako kombinacija toplinskih svojstava materijala stijenke kalupne šupljine i stanje njene površine izravno utječu na svojstva otpreska. [7,16]

Na temelju prethodnih razmatranja moguće je zaključiti sljedeće. Kada je potrebno ostvariti visoku proizvodnost, treba propisati niske temperature medija za temperiranje i niske temperature stijenke kalupne šupljine, čemu pridonosi izbor materijala visokih toplinskih svojstava. U tom slučaju se ostvaruje povišena proizvodnost, no uporabna svojstva otpresaka su snižena. Ukoliko se od otpreska zahtijevaju visoka svojstva, potrebno je raditi s visokim temperaturama stijenke kalupne šupljine, čemu pridonosi izbor materijala niskih toplinskih svojstava. [16]

6.2.4.2 *Toplinska prohodnost i specifični toplinski otpor materijala stijenke kalupne šupljine* [16]

Za pločasti otpresak toplinska prohodnost određena je jednadžbom:

$$\frac{1}{k_K} = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_M} \quad (6.1)$$

gdje su: k_K - toplinska prohodnost (W/m^2K), s_i - debljina i-tog sloja koji se nalazi između stijenke kalupne šupljine i stijenke kanala za temperiranje (m), λ_i - toplinska provodnost i-tog sloja između stijenke kalupne šupljine i stijenke kanala za temperiranje (W/mK), α_M - toplinska prijelaznost sa stijenke kanala za temperiranje na medij za temperiranje (W/m^2K).

Pod specifičnom toplinskom otpornošću materijala stijenke kalupne šupljine smatra se prvi član u jednadžbi 6.1. Prošireno je mišljenje kako je optimalna izmjena topline u kalupu povezana isključivo s toplinskom provodnošću. Međutim, praksa i razna teorijska razmatranja pokazali su drugačije rezultate. Pokazalo se kako materijali viših toplinskih svojstava u pravilu imaju niža mehanička svojstva što zahtijeva uporabu elemenata kalupa debljih stijenki. Debljina stijenke svakako utječe na izmjenu topline u kalupima. [16]

Na intenzivnost izmjene topline može se učinkovito utjecati i brzinom protoka medija za temperiranje. Stoga se toplinska provodnost materijala stijenke kalupne šupljine ne može uzeti kao jedini čimbenik koji utječe na izmjenu topline. Taj čimbenik najjače utječe, no u obzir valja uzeti i debljinu stijenke elementa stijenke kalupne šupljine, kao i toplinsku prijelaznost s kalupa na medij za temperiranje. [16]

6.2.4.3 Utjecaj materijala stijenke kalupne šupljine na vrijeme hlađenja otpreska [16,40,153]

Kako bi se uočio utjecaj materijala stijenke kalupne šupljine na vrijeme hlađenja otpreska, a time i na vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja potrebno je detaljnije analizirati jednadžbu vremena hlađenja otpreska (jednadžba 3.1). U samoj jednadžbi za proračun vremena hlađenja nema niti jednog elementa koji je izravno povezan s izborom materijala stijenke kalupne šupljine, no postoje posredni utjecaji. Izborom određenog materijala stijenke kalupne šupljine moguće je utjecati na temperaturu stijenke kalupne šupljine, a time i na vrijeme hlađenja otpreska. Pri tome je moguće razmatrati tri slučaja.

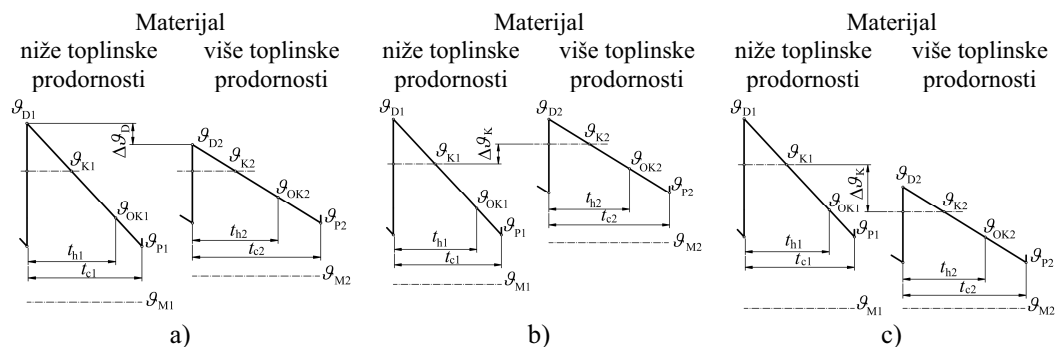
Propisana temperatura stijenke kalupne šupljine [16,40,153]

Temperatura stijenke kalupne šupljine uglavnom se unaprijed zadaje radi propisane kvalitete otpreska. Proizvođači plastomernih materijala također uglavnom preporučuju raspon tih temperatura.

Analizom slike 6.2 može se zaključiti kako će primjena materijala niže toplinske prodornosti rezultirati povišenom dodirnom temperaturom. To znači lakše punjenje kalupne šupljine i sporije hlađenje, te povoljnija svojstva otpreska. Radi lakšeg punjenja kalupne šupljine moguće je sniziti temperaturu taljevine, što ima za posljedicu skraćenje vremena hlađenja otpreska. Primjerice uporaba visokolegiranih čelika umjesto berilijeve bronce za izradbu elemenata kalupne šupljine ima isti učinak kao sniženje temperature taljevine za 10 do 12 °C. Druga je mogućnost prevlačenje stijenke kalupne šupljine prevlakama loših toplinskih svojstava (npr. keramika). Uporaba tih prevlaka omogućuje postizanje viših dodirnih temperatura te istodobno nižih temperatura stijenke kalupne šupljine, što ima za posljedicu skraćenje vremena hlađenja otpreska.

Kao treća mogućnost javlja se uporaba izolacijskih slojeva na stijenci kalupne šupljine. Uporaba tih slojeva posebice je zanimljiva na području tankostjenog injekcijskog prešanja gdje je za

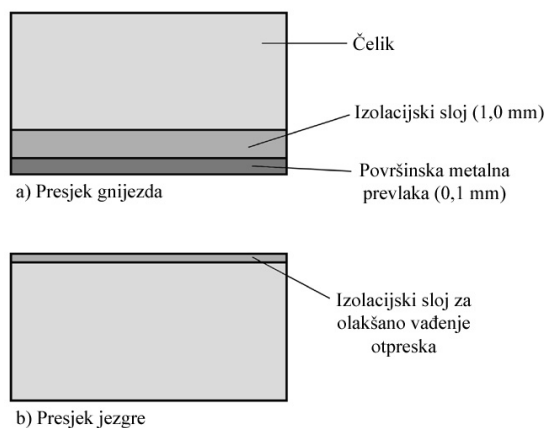
izradbu kvalitetnih otpresaka potrebno u kalupnoj šupljini ostvariti u pravilu visoke tlakove i temperature stijenke kalupne šupljine. Visoku temperaturu stijenke kalupne šupljine potrebno je održavati kako bi se spriječilo stvaranje očvrstnuloj sloja uz stijenku kalupne šupljine.



Slika 6.2 Utjecaj vrste materijala kalupne šupljine na vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja

- a) $\mathcal{G}_{K1} = \mathcal{G}_{K2}$, $t_{h1} < t_{h2}$, $t_{c1} < t_{c2}$; b) $\mathcal{G}_{D1} = \mathcal{G}_{D2}$, $t_{h1} < t_{h2}$, $t_{c1} < t_{c2}$;
c) $\mathcal{G}_{M1} = \mathcal{G}_{M2}$, $t_{h1} > t_{h2}$, $t_{c1} > t_{c2}$ [16]

Primjer takvog kalupa predstavlja tzv. *Ulpac* kalup u kojem se na stijenku kalupne šupljine nanosi izolacijski sloj načinjen od epoksidne smole punjene sa silicijevim dioksidom na koju se elektrotaloženjem nanosi prevlaka od nikla debljine 0,1 mm (slika 6.3).



Slika 6.3 Presjek elemenata kalupne šupljine *Ulpac*-kalupa [40]

Propisana dodirna temperatura [16]

Ukoliko se želi postići odgovarajući stupanj površinske orijentacije ili odgovarajuća površinska napetost u otpresku, odnosno savladati određeni put tečenja, može se tijekom injekcijskog prešanja propisati potrebna dodirna temperatura. Pri istoj dodirnoj temperaturi, temperatura

stijenke kalupne šupljine materijala nižih svojstava je niža, a to znači kraće vrijeme hlađenja otpreska.

Propisana temperatura medija za temperiranje [16]

Čest slučaj u praksi je da se kalup spoji na vodovodnu mrežu te da se kao medij za temperiranje rabi voda. U tom slučaju nije moguće utjecati na temperaturu medija za temperiranje, pa je ta temperatura unaprijed propisana. U tom slučaju brži ciklusi injekcijskog prešanja postižu se pri uporabi materijala viših toplinskih svojstava. Upravo taj primjer upućuje na važnost uporabe temperirala kojim je moguće podesiti temperaturu medija za temperiranje. Utjecaj temperature medija za temperiranje na vrijeme ciklusa 4 je puta veći nego li utjecaj temperature taljevine.

6.2.4.4 Osjetljivost temperaturnog polja kalupa na zastoje [16]

Do sada je već dokazano kako i najmanji zastoji u radu sustava za injekcijsko prešanje imaju za posljedicu sniženje temperature stijenke kalupne šupljine. Stoga je nakon zastoja potreban određeni broj ciklusa kako bi se ponovo uspostavila toplinska ravnoteža kalupa.

Pri uporabi materijala nižih toplinskih svojstava i pri kraćim ciklusima, promjene temperature su veće, a veći je i broj ciklusa potreban do uspostavljanja toplinski ravnotežnog stanja. To znači kako pri kalupima koji ne rade automatski, tj. u koje je potrebno ručno ulaganje jezgri ili vađenje otpresaka, odnosno pri kalupima gdje češće nastaju zastoji u radu, nije uputno rabiti materijale nižih toplinskih svojstava.

Ciklička promjena temperature stijenke kalupne šupljine ima za posljedicu cikličku promjenu temperature u unutrašnjosti materijala kalupnih elemenata. To znači kako će kod materijala nižih toplinskih svojstava toplina biti usredotočena u površinskom sloju, radi čega je pri zastoju u radu i brže sniženje temperature stijenke kalupne šupljine. [16] Valja navesti još jedan nedostatak materijala nižih toplinskih svojstava. Temperaturni gradijent (pad) duž stijenke kalupne šupljine takvih materijala je bitno veći nego li pri materijalima viših toplinskih svojstava. U slučajevima kada valja ostvariti dulje putove tečenja ili kada se radi o tankostjenim proizvodima, niža toplinska svojstva materijala stijenke kalupne šupljine mogu predstavljati nedostatak. [16]

7 KRITIČKI OSVRT NA DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA UTJECAJA PROTOTIPNIH KALUPA NA SVOJSTVA OTPRESKA

Područje primjene postupaka brze proizvodnje prototipova za izradbu elemenata kalupa novijeg je datuma. Stoga je utjecaj materijala prototipnih tj. hibridnih kalupa na svojstva otpresaka još uvijek nedovoljno istražen. Nekolicina autora je do sada provela parcijalna istraživanja tih utjecaja, a pregled važnijih rezultata uz kritički osvrt opisan je u nastavku.

Mnogi RT postupci uključuju uporabu nemetalnih ili neželjeznih materijala za razliku od klasičnih postupaka izradbe kalupa. Svojstva materijala kalupa uvelike određuju i konačna svojstva izrađenog otpreska. [151]

Pri razmatranju primjene RT kalupa pri izradbi otpresaka, javlja se nekoliko područja koja treba istražiti, a može ih se podijeliti u nekoliko kategorija: [151]

- točnost i preciznost, postojanost na trošenje i općenito funkcioniranje kalupa
- količina proizvedenih otpresaka
- kvaliteta proizvedenih otpresaka.

Kvaliteta proizvedenih otpresaka može se procijeniti na temelju zahtjeva na gotovi proizvod, odnosno na temelju ocjene konstrukcije. Analiza kvalitete otpresaka može se provoditi isključivo na temelju izgleda otpreska ili se mogu uključiti specifična mehanička i fizikalna svojstva bitna za uporabu otpreska.[16]

Istraživanja na području injekcijskog prešanja [154]

Uglavnom su rađena istraživanja utjecaja pojedinih parametara injekcijskog prešanja na svojstva otpresaka. Promatrani su utjecaji na uporabna svojstva otpreska. Od toplinskih parametara injekcijskog prešanja zaključeno je kako najveći utjecaj na svojstva otpresaka imaju temperatura taljevine, te brzina zagrijavanja i hlađenja kalupa. Brzina hlađenja kalupa ima veliki utjecaj na stvaranje odgovarajuće mikrostrukture čime se utječe na svojstva otpreska (posebice pri preradbi kristalastih plastomera). Brzinu hlađenja uvelike određuju svojstva materijala kalupa. Stoga,

prototipni kalupi načinjeni od polimera (npr. epoksidne smole) imaju relativno nisku toplinsku provodnost, što uvelike utječe na svojstva otpresaka načinjenih u tim kalupima.

Usporedbe RT postupaka

Većina dosadašnjih usporedbi se ograničila na broj otpresaka koje je moguće načiniti s pomoću kalupa načinjenih pojedinim RT postupkom, kao i na cijenu i vrijeme izradbe takvih kalupa. Ti su postupci uspoređivani uglavnom s klasičnim pristupom izradbi kalupa i to samo za specifične slučajeve, što daje samo parcijalnu informaciju. [4,155] Iz takvih se usporedbi također ne može zaključivati o utjecaju materijala prototipnog kalupa na svojstva otpreska.

U nekoliko istraživanja obrađen je utjecaj materijala kalupa na vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. Zaključeno je kako se pri kompliciranijoj geometriji otpreska (otežano vađenje iz kalupa), te pri nižim vrijednostima toplinske provodnosti materijala kalupa postižu dulja vremena ciklusa. Naime pri uporabi primjerice SLA kalupa potrebno je nakon svakog ciklusa injekcijskog prešanja kalup dovoljno ohladiti (ponekad i nekoliko minuta) kako bi se postigle temperature ispod temperature staklastog prijelaza materijala stijenke kalupne šupljine. Iznad te temperature materijal kalupa bi se izraženo deformirao (narušena dimenzijska točnost otpreska), te bi mu bila snižena mehanička svojstva (opasnost od oštećenja, povećana trošivost). [156,157]

Utjecaj prototipnih kalupa na svojstva otpreska

Većina istraživanja je do sada bila usmjerena na usporedbu materijala koji su kandidati za izradbu kalupa RT postupcima. Pri tome se najviše pozornosti posvećivalo mehaničkim svojstvima tih materijala. Vrlo je malo pažnje posvećivano utjecaju lošijih toplinskih svojstava tih materijala na postignuta svojstva otpresaka. [5,91,124,158,159]

Najveći broj istraživanja načinjen je s SLA kalupima i epoksidnim kalupima, dok je s ostalim vrstama kalupnih materijala zabilježeno vrlo malo istraživanja. Razlog tomu je logičan: SLA i epoksidni kalupi se po toplinskim svojstvima materijala najviše razlikuju od klasičnih kalupnih materijala. [124,160] Kada se analiziraju istraživanja načinjena na tom području, moguće je razlučiti dva pristupa: [151]

- za određeni polimer izabrati nekoliko RT postupaka i usporediti djelovanje tih kalupa
- za određeni RT postupak izabrati nekoliko polimera i usporediti djelovanje kalupa.

Također su načinjena istraživanja o utjecaju različitih geometrija kanala za temperiranje na funkcioniranje SLA kalupa. Loša toplinska svojstva materijala SLA kalupa moguće je donekle nadoknaditi odgovarajućim brojem i rasporedom kanala za temperiranje. [161]

Usporedbom nekoliko RT postupaka pri preradbi PP došlo se do zaključka kako se najviši stupanj kristalnosti postiže u SLA kalupima radi najsporijeg hlađenja otpreska. [162]

U drugom je istraživanju zaključeno kako je kritični čimbenik koji utječe na svojstva otpresaka načinjenih u RT kalupima razlika u izmjeni topline u usporedbi s klasičnim kalupima. Stoga je načinjen veći broj istraživanja u cilju poboljšanja toplinske provodnosti kalupnih materijala. Kao rezultat načinjeni su kalupi s ljuskom načinjenom SLA postupkom i punjenom epoksidnom smolom i aluminijem, koji su omogućili postizanje kraćih vremena ciklusa injekcijskog prešanja. [141-144,155,162,163] Pri usporedbi aluminijskih i SLA kalupa načinjena je analiza utjecaja kalupnih materijala na dimenzijsku stabilnost otpreska, vitoperenje, vizualni dojam, vrijeme i troškove izradbe. Međutim, nisu načinjene nikakve usporedbe mehaničkih svojstava otpresaka načinjenih u oba kalupa. [154]

Novo je istraživanje obuhvatilo preradbu PC, PE-HD i PA 6,6 u klasičnom i SLA kalupu, a promatrani su rastezna čvrstoća, savojna žilavost i razina naprežanja u kristalnoj rešetki materijala otpreska. Utvrđeno je sniženje rastezne čvrstoće od oko 10 %, dok je razina naprežanja u rešetki bila niža u SLA kalupima. Iako su autori identificirali te razlike, nisu ih u potpunosti objasnili. [159,160]

Kritika dosadašnjih istraživanja

Temeljni je problem u analizi rezultata dosadašnjih istraživanja na području utjecaja RT kalupa na svojstva otpresaka u nemogućnosti njihove korelacije. Razlog leži u različitostima polimernih materijala rabljenih u tim istraživanjima, kao i u različitim postupcima RT. Stoga je dosadašnja istraživanja moguće ocijeniti kao fragmentirana, tj. usmjerena samo na određene polimerne materijale i pojedine postupke RT. Objašnjenje za takvo stanje je činjenica kako je većina tih istraživanja bila potaknuta od strane krajnjih korisnika tih rezultata (korisnici RT postupaka i proizvođači RT opreme), pa su istraživanja bila usmjerena potrebama tih korisnika.

Većina istraživanja na tom području odnose se isključivo na utjecaj epoksidnih kalupa na svojstva otpresaka. Istraživanja o utjecaju prototipnih kalupa načinjenih od metala na otpreske

vrlo ograničena. Analizom istraživanja o utjecajima materijala RT kalupa na svojstva otpresaka, osim nekoliko izuzetaka, moguće je zaključiti kako je to područje još uvijek nedovoljno istraženo. Dio istraživanja na tom području također je rezultirao kontradiktornim rezultatima [151], što dodatno treba imati na umu u daljnjim istraživanjima.

Na temelju takvog stanja, početni bi izazov na tom području bio istraživanje parametara injekcijskog prešanja i njihovog utjecaja na svojstva otpresaka, te utvrditi u kojoj mjeri toplinska svojstva materijala kalupa, te neka ograničenja RT postupka utječu na fizikalna i mehanička svojstva otpreska. Nakon što se ti utjecaji detaljno kvantificiraju, bilo bi poželjno za najčešće rabljene RT postupke načiniti istraživanja o utjecaju materijala kalupa na svojstva otpresaka načinjenih od najčešće rabljenih polimernih materijala.

Većina istraživanja ograničena je na usporedbu svojstava otpresaka načinjenih u odgovarajućim prototipnim kalupima. Međutim u praksi se često ne raspolaže opremom za ispitivanje tih svojstava. Stoga je za praktičnu primjenu prikladnije proširiti istraživanje i definirati s kojim se parametrima injekcijskog prešanja postižu svojstva otpreska načinjenih u prototipnim kalupima usporediva sa svojstvima otpresaka načinjenih u klasičnim kalupima.

Stoga na tom području valja načiniti još velik broj istraživanja (pokusa) kako bi se došlo do temeljnih spoznaja koje će omogućiti bolje razumijevanje što se zbiva tijekom procesa injekcijskog prešanja u prototipnim kalupima. Kao jeftinija i brža alternativa pokusima javlja se računalna simulacija, međutim, radi kompleksnosti utjecaja RT kalupa na svojstva otpreska rezultate dobivene takvim pristupom treba uzeti u obzir s oprezom. Pri tome za sada još nije poznat računalni program za simulaciju injekcijskog prešanja koji omogućuje simulaciju injekcijskog prešanja u prototipnim kalupima, već se uz određene modifikacije rabe postojeći programi. [6]

8 SISTEMATIZACIJA POSTUPAKA BRZOG PRAVLJENJA TVOREVINA

Pomnijom analizom postupaka brzog pravljenja tvorevina opisanih u poglavlju 5 može se doći do zaključka kako je potrebno zbog lakšeg identificiranja postupka načiniti njihovu sistematizaciju. Pri tome prethodno valja definirati kriterije sistematizacije koji omogućuju jednostavnije definiranje postupaka.

Na temelju opisa postupaka brzog pravljenja tvorevina (poglavljje 5) moguće je istaći nekoliko kriterija sistematizacije:

- vrsta uporabljenog materijala (kapljevine, prahovi, čvrsti materijal, plinovi, atomi)
- mehanizam gradnje prototipa (umreživanje, elektrogalvanizacija, zamrzavanje, taljenje, srašćivanje, povezivanje, ekstrudiranje, zavarivanje, naštrcavanje, *inkjet* postupci, hibridni postupci)
- vrsta pravljenja prototipa (proizvodnja, izradba)
- vrsta postupka (izravni, posredni)

Tablica 8.1 Sistematizacija postupaka brzog pravljenja tvorevina

Br.	Kratica	Izvorni naziv	Naziv postupka	Vrsta pravljenja	Vrsta postupka
Kapljeviti materijali					
Fotoočvršćujuće kapljevine					
<i>Očvršćivanje propuštanjem svjetlosti kroz masku</i>					
1	SGC	Solid Groud Curing	Tonografski postupak	proizvodnja	izravni
2	DESCAF	Design-Controlled Automated Fabrication	Proizvodnja s pomoću računalom kontrolirane konstrukcije	proizvodnja	izravni
3	RMPD	Rapid Micro Product Development	Brza proizvodnja mikroproizvoda	proizvodnja	izravni
4	MSLA	Microstereolithography	Mikrostereolitografija	proizvodnja	izravni
5	ERP	Electrophotographic Rapid Prototyping	Elektrofotografska proizvodnja prototipova	proizvodnja	izravni
<i>Očvršćivanje s pomoću UV laserske zrake</i>					
6	SLA	Stereolithography	Stereolitografija	proizvodnja	izravni
7	SLTG	Stereo-thermal-lithography	Stereotoplinska litografija	proizvodnja	izravni
8	SLP	Solid Laser Diode Plotter System	Sustav za lasersko diodno tiskanje	proizvodnja	izravni

Tablica 8.1 Sistematizacija postupaka brzog pravljenja tvorevina (nastavak)

Br.	Kratica	Izvorni naziv	Naziv postupka	Vrsta pravljenja	Vrsta postupka
9	SCP	Solid Creation System	Sustav za proizvodnju objekata	proizvodnja	izravni
10	SOUP	Solid Object Ultra-Violet Laser Plotting	Tiskanje objekta s pomoću UV-lasera	proizvodnja	izravni
11	-	Direct ACES for Injection Moulding	Izravna proizvodnja epoksidnih dijelova kalupa za injekcijsko prešanje	proizvodnja	izravni
12	-	Holographic Interference Solidification	Holografsko-interferentni postupak	proizvodnja	izravni
13	-	Beam Interference Solidification	Očvršćivanje interferencijom zračenja	proizvodnja	izravni
14	PCM	Photochemical Machining	Fotokemijska obradba	proizvodnja	izravni
15	SPL	Stereophotolithography	Stereofotolitografija	proizvodnja	izravni
<i>Očvršćivanje vidljivom svjetlom s pomoću DVD uređaja</i>					
16	DPS	Direct Photo Shaping	Izravno foto-oblikovanje	proizvodnja	izravni
<i>Hibridni postupak: kombinacija inkjet postupka i očvršćivanja s pomoću izvora UV svjetla</i>					
17		Object 3D-printer	3D tiskanje tvorevine uz očvršćivanje	proizvodnja	izravni
<i>Elektroliti - elektro-galvanizacija</i>					
18	EFAB	Electrochemical Fabrication	Elektrokemijska proizvodnja prototipova	proizvodnja	izravni
19	-	Electroforming	Elektrooblikovanje	proizvodnja	izravni
<i>Voda - zamrzavanje vode</i>					
20	RFP	Rapid Freeze Prototyping	Brza izradba ledenih prototipova	izradba	izravni
Praškasti materijali					
Taljenje praha					
<i>Srašćivanje s pomoću topline laserske zrake</i>					
21	SLS	Selective Laser Sintering	Selektivno lasersko srašćivanje polimera	izradba	izravni
22	DMLS	Direct Metal Laser Sintering	Izravno lasersko srašćivanje metala	izradba	izravni
23	IMLS	Indirect Metal Laser Sintering	Posredno lasersko srašćivanje metala	izradba	uvjetno izravni
24	-	Selective Laser Sintering of Ceramics	Selektivno lasersko srašćivanje keramike	izrada	izravni
25	SLRS	Selective Laser Reaction Sintering	Selektivno lasersko reakcijsko srašćivanje	proizvodnja	izravni
26	DMF	Direct Metal Fabrication	Izravna preradba metala	izradba	izravni
27	-	Copper-PA	Izradba srasline bakar-poliamid	izradba	izravni
28	SALD	Selective Area Laser Deposition	Selektivno lasersko taloženje	izradba	izravni

Tablica 8.1 Sistematizacija postupaka brzog pravljenja tvorevina (nastavak)

Br.	Kratica	Izvorni naziv	Naziv postupka	Vrsta pravljenja	Vrsta postupka
<i>Taljenje s pomoću topline laserske zrake</i>					
29	LENS/DMD	Laser Engineered Net Shaping/Direct Metal Deposition	Izravno taloženje metala	izradba	izravni
30	DLF	Directed Light Fabrication	Izradba s pomoću usmjerenog svjetla	izradba	izravni
31	CMB	Controlled Metal Build-up	Kontrolirana izradba metalnih dijelova	izradba	izravni
32	LADRP	Laser Aided Direct Rapid Prototyping	Izravna izradba prototipova s pomoću lasera	izradba	izravni
33	SLM	Selective Laser Melting	Selektivno lasersko taljenje	izradba	izravni
33	LAPS-J	Laser-aided Powder Solidification / Powder Jet	Postupak očvršćivanja praha s pomoću lasera	izradba	izravni
35	LAM	Laser Additive Manufacturing	Izradba s pomoću lasera dodavanjem čestica	izradba	izravni
<i>Taljenje s pomoću kinetičke energije (snop elektrona)</i>					
36	EBM	Electron Beam Melting	Taljenje s pomoću snopa elektrona	izradba	izravni
Povezivanje praha s pomoću veziva					
<i>Postupci temeljeni na načelima MIT 3D tiskanja</i>					
37	DSPC	Direct Shell Production Casting	Izravna izradba kalupne ljuske	izradba	izravni
38	3DP	3D Printing (Z-Corporation)	3D tiskanje	izradba	izravni
39	-	ProMetal	3D tiskanje metala s vezivom	izradba	izravni
40	PCT	Printed Computer Tomography	3D tiskanje voska	izradba	izravni
<i>Ekstrudiranje keramike s rastaljenom vezivom</i>					
41	FDC	Fused Deposition of Ceramics	Taložno očvršćivanje keramike	izradba	izravni
<i>Ostali postupci 3D tiskanja</i>					
42	MJS	Multiphase Jet Solidification	Višefazno mlazno očvršćivanje	izradba	izravni
43	TSF	Topographic Shell Fabrication	Topografsko oblikovanje ljuske	izradba	izravni
Čvrsti materijali					
<i>Ekstrudiranje rastaljenog materijala</i>					
44	FDM	Fused Deposition Modelling	Taložno očvršćivanje	izradba	izravni
45	MEM	Melted Extrusion Manufacturing	Ekstrudiranje prototipova	izradba	izravni
46	CC	Contour Crafting	Konturno građenje	izradba	izravni
<i>Postupci temeljeni na zavarivanju</i>					
47	-	Shape Melting	Praoblikovanje taljenjem	izradba	izravni
48	-	Shape Welding	Praoblikovanje zavarivanjem	izradba	izravni

Tablica 8.1 Sistematizacija postupaka brzog pravljenja tvorevina (nastavak)

Br.	Kratice	Izvorni naziv	Naziv postupka	Vrsta pravljenja	Vrsta postupka
49	-	3D Welding	3D zavarivanje	izradba	izravni
50	DROW	Droplet Welding	Zavarivanje kapljica	izradba	izravni
Naštrcavanje metala					
51	-	Incremental Fabrication	Inkrementalna izradba	proizvodnja	izravni
52	-	Recursive Mask and Deposit	Rekurzivno taloženje s pomoću maske	proizvodnja	izravni
53	RSP	Rapid Solidification Process	Praobliskovanje uz brzo očvršćivanje	izradba	posredni
54	-	Sprayform	Praobliskovanje štrcanjem	izradba	posredni
55	TSMD	Thermal Spray Metal Deposition	Oslojavanje metala naštrcavanjem	izradba	posredni
56	SMT	Spray Metal Tooling	Izradba kalupa naštrcavanjem metala	proizvodnja	posredni
Hibridni postupak ekstrudiranja i glodanja					
57	SDM	Shape Deposition Manufacturing	Izradba taloženjem oblika	izradba	izravni
Očvršćivanje pastoznog fotopolimera					
58		<i>OptoForm</i>	<i>OptoForm</i> postupak izradbe elemenata kalupa	proizvodnja	izravni
Inkjet postupci					
59	MJM	MultiJet Modeling	Višemlazno oblikovanje	izradba	izravni
60	-	3D Plotting	3D risanje	izradba	izravni
61	BPM	Ballistic Particle Manufacturing	Balističko oblikovanje	izradba	izravni
62	LMJP	Liquid Metal Jet Printing	Tiskanje mlaza kapljevitoz metala	izradba	izravni
63	PCM	Photo Chemical Machining	Foto-kemijska obradba	proizvodnja	izravni
Ploče					
Laminiranje (povezivanje i naknadno rezanje)					
<i>Rezanje s pomoću laserske zrake</i>					
64	LOM	Laminated Object Manufacturing	Laminiranje	izradba	izravni
65	-	Curved-layer LOM	Krivuljno laminiranje	proizvodnja	posredni
66	SSM	Slicing Solid Manufacturing	Izradba slojevitog objekta	izradba	izravni
67	CAM-LEM	Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials	Obradba laminata s pomoću računala	izradba	posredni
<i>Rezanje s pomoću noža</i>					
68	PLT	Paper Lamination Technology	Postupak laminiranja s papirom	izradba	izravni
<i>Rezanje s pomoću glodala</i>					
69	-	Layer Milling	Glodanje slojeva	izradba	posredni

Tablica 8.1 Sistematizacija postupaka brzog pravljenja tvorevina (nastavak)

Br.	Kratica	Izvorni naziv	Naziv postupka	Vrsta pravljenja	Vrsta postupka
Laminiranje (rezanje i naknadno povezivanje)					
<i>Rezanje s pomoću laserske zrake</i>					
70	LLCC	Laminated Laser Cut Cavities	Lasersko rezanje i laminiranje kalupnih šupljina	izradba	posredni
<i>Rezanje s pomoću mlaza vode</i>					
71	-	TruSurf	TruSurf rezanje s pomoću mlaza vode	izradba	posredni
<i>Rezanje s pomoću noža</i>					
72	-	Offset Fabrication	Ofset obradba	izradba	posredni
<i>Rezanje s pomoću zagrijane elektrode</i>					
73	-	HotPlot	Hotplot rezanje s pomoću zagrijane elektrode	Izradba	posredni
<i>Rezanje s pomoću glodala</i>					
74	-	Stratoconception	Strato rezanje s pomoću glodala	Izradba	posredni
Plinovi, atomi i ostalo					
75	GPD	Gas Phase Deposition	Taloženje plinske faze	proizvodnja	izravni
76	LCVD	Laser-Assisted Chemical Vapour Deposition	Kemijsko taloženje s pomoću lasera	proizvodnja	izravni
77	SALD	Selective Area Laser Deposition	Selektivno lasersko taloženje	proizvodnja	izravni
78	LASAMOCVD	Laser Assisted Selective Area Metal Organic Chemical Vapour Deposition	Selektivno lasersko organsko kemijsko taloženje metala	proizvodnja	izravni
Posredni postupci izradbe kalupa					
<i>Lijevanje</i>					
79	-	Polysteel	Lijevanje smjese metala i polimera	proizvodnja	posredni
80	-	Keltool	Lijevanje metala u RTV kalup	proizvodnja	posredni
81	-	KirkSITE Tooling	Lijevanje Al i Zn	Izradba	posredni
82	-	RTV Mould	Lijevanje izravno u RTV kalupe	proizvodnja	posredni
83	-	Investment Casting Tooling	Fino lijevanje oko keramičke ljuške	Izradba	posredni
84	-	Metal Copy	Lijevanje metala	proizvodnja	posredni
85	MFET	Metal Filled Epoxy Tooling	Lijevanje smjese epoksidne smole i metala	proizvodnja	posredni
86	-	Eco Tool	Lijevanje smjese metala i polimernog veziva	proizvodnja	posredni

9 EKSPERIMENTALNI I SIMULACIJSKI DIO

9.1 CILJ ISTRAŽIVANJA

Planiranim istraživanjem cilj je utvrditi utjecaj hibridnog kalupa na svojstva plastomernog tankostjenog otpreska te definiranje podesivih parametara injekcijskog prešanja koji rezultiraju usporedivim svojstvima otpresaka načinjenih u hibridnom kalupu i klasičnom kalupu. Pri tome se planira istraživanje koje se sastoji od računalne simulacije postupka injekcijskog prešanja u klasičnom i hibridnom kalupu, te eksperimentalne analize na temelju planova pokusa. Eksperimentalna analiza treba omogućiti zaključak o utjecajima pojedinog kalupa na svojstva otpreska te i o primjenjivosti računalne simulacije pri analizi tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom i klasičnom kalupu.

Prvi korak tijekom istraživanja predstavlja izbor karakterističnog predstavnika tankostjenih plastomernih otpresaka. Za potrebe istraživanja rabiti će se predstavnik uobičajenih plastomernih materijala polipropilen koji se rabi za izradbu tankostjenih otpresaka. Također će se, na temelju planiranog broja otpresaka načinjenih u hibridnom kalupu tijekom istraživanja, izabrati postupak brze izradbe prototipnih kalupnih umetaka čime će ujedno biti i definiran materijal prototipnih kalupnih umetaka. Za izabrani otpresak potrebno je preliminarno računalno simulirati proces injekcijskog prešanja pri čemu će se predvidjeti zbivanja u hibridnom kalupu kako bi se definirale početne vrijednosti podesivih parametara preradbe. Dobivene vrijednosti podesivih parametara rabiti će se zatim u planovima pokusa na oba kalupa. Prije provedbe odgovarajućih planova pokusa potrebno je kritički se osvrnuti na izbor najvažnijih podesivih parametara injekcijskog prešanja. Ujedno je potrebno definirati svojstva otpreska koja će se pratiti, mjeriti i izračunavati pri računalnoj simulaciji i provedbi pokusa.

Eksperimentalna analiza sastojat će se iz provedbe pretpokusa na hibridnom kalupu u cilju izbora najutjecajnijih podesivih parametara na izabrana svojstva tankostjenog otpreska. Nakon izbora najutjecajnijih parametara preradbe provest će se odgovarajući plan pokusa na hibridnom i klasičnom kalupu koji omogućuje analizu utjecaja tih parametara i kalupnog materijala na svojstva otpreska te usporedbu tih utjecaja u oba kalupa.

Pri računalnoj simulaciji utjecaj podesivih ulaznih parametara preradbe na izabrana svojstva otpreska analizirati će se s pomoću ponovljenih simulacija uz promjene ulaznih parametara prema istim načelima kao i pri provedbi odgovarajućih planova pokusa.

Na temelju usporedbe rezultata dobivenih u klasičnom kalupu i rezultata dobivenih u hibridnom kalupu nastojati će se definirati smjernice za podešavanje ulaznih parametara injekcijskog prešanja pri uporabi hibridnog kalupa. Cilj takvog podešavanja parametara injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu postizanje je svojstava tankostjenih otpresaka što sličnijih svojstvima otpresaka načinjenih u klasičnom kalupu za serijsku proizvodnju. Učinkovitost postavljenih smjernica provjeriti će se na kalupu načinjenom postupkom brze izradbe kalupa tako, što će se parametri injekcijskog prešanja podesiti na temelju zbivanja u klasičnom kalupu i definiranih smjernica za podešavanje parametara preradbe dobivenih eksperimentalnom analizom.

9.2 OPIS SUSTAVA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE

9.2.1 Izbor karakterističnog predstavnika tankostjenog otpreska

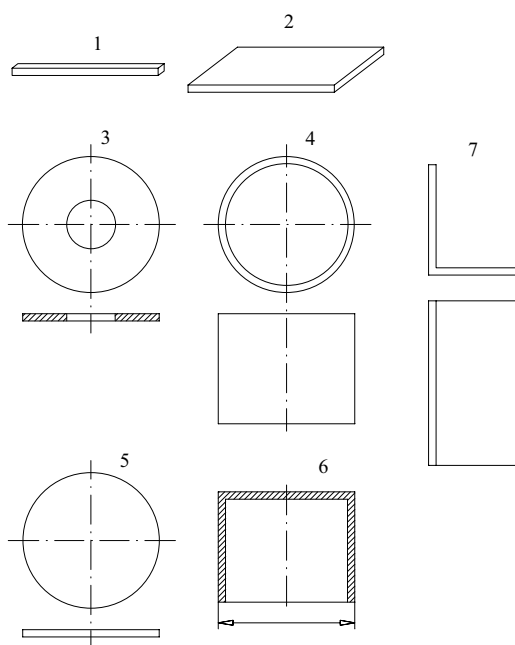
U okviru rada istraživanja utjecaja hibridnog kalupa na svojstva otpreska ograničena su na posebnu obitelj otpresaka - tankostjene otpreske. Općenito, obitelji otpresaka proizvedene postupkom injekcijskog prešanja su spektrom svojih karakteristika vrlo različite. Sukladno tome teško je stvoriti konkretno, do u detalje, obitelji otpresaka bez priloženog i preglednog spektra njihovih karakteristika. Stoga se može govoriti samo o temeljnim idejama za postupak stvaranja obitelji otpresaka [48,164,165].

Kako bi se mogao provesti postupak podjele otpresaka u obitelji, potrebno je analizirati karakteristike otpreska koje utječu na njihovo svrstavanje. U tablici 9.1 prikazane su bitne karakteristike otpresaka i pripadajući kriteriji. Temeljni kriterij za stvaranje obitelji otpresaka sljedeći zakonitosti grupne tehnologije je njihova geometrijska, odnosno konstrukcijska sličnost. Od općih karakteristika iz tablice 9.1 najvažnija karakteristika je *oblik* [165]. S druge strane za potrebe rada bitna je i karakteristika *debljina stijenke*. U radovima [32-41] načinjena je sistematizacija skupina otpresaka na temelju tog kriterija. Pri tome se otpresci najčešće ubrajaju u tankostjene ukoliko im je debljina stijenke manja od 1,2 mm odnosno ukoliko je omjer puta tečenja i debljine stijenke veći od 100:1. Međutim pitanje svrstavanja otpresaka u skupinu tankostjenih u dostupnoj literaturi nije dosljedno razjašnjeno.

Tablica 9.1 Karakteristike otpreska [164,165]

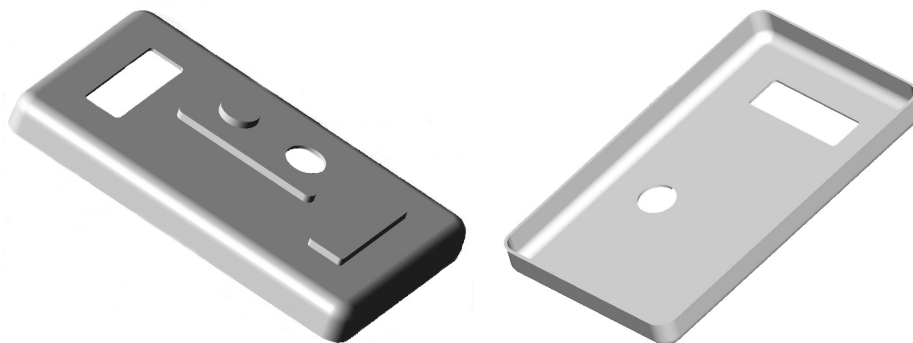
Karakteristika otpreska	Kriterij otpreska
<i>Oblik</i>	- osnovni oblik (geometrija) - veličina - omjer visina-širina - debljina stijenke - geometrijske posebnosti
<i>Materijal</i>	- tvrdoća/žilavost - toplinska postojanost - smična viskoznost - punilo, ojačavalo - skupljanje
<i>Kvaliteta</i>	- kvaliteta površine - točnost i preciznost izmjera - čvrstoća
<i>Ekonomičnost</i>	- planirani broj komada - planirana cijena proizvoda (broj kalupnih šupljina)

Kombinacijom karakteristike *oblik* i *debljina stijenke* moguće je doći do karakterističnog predstavnika skupine tankostjenih otpresaka. Analizom radova [32-41], sistematizacije osnovnih tipova otpresaka (slika 9.1), te otpresaka koje je moguće naći na tržištu, zaključuje se kako su najčešći *pločasti* i *kutijasti* oblici *tankostjenih* otpresaka.



Slika 9.1 Osnovni tipovi otpresaka: 1 - štapićasti, 2 - pločasti pravokutni, 3 - pločasti kružni (s otvorom), 4 - kutijasti kružni (otvoreni), 5 - pločasti kružni, 6 - kutijasti kružni (zatvoreni), 7 - profilni [165]

Stoga je za potrebe rada konstruiran eksperimentalni otpresak koji predstavlja kompromis između te dvije skupine otpresaka (slika 9.2), pri čemu je definirana specifična debljina stijenke od 1,0 mm. Nacrt otpreska dat je u prilogu 13.1 (slika 13.1).



Slika 9.2 Tankostjeni pločasto-kutijasti otpresak (3D računalni model)

9.2.2 Izbor plastomernog materijala

Izbor plastomernog materijala za potrebe istraživanja temeljio se na zahtjevima koje materijal treba zadovoljiti pri tankostjenom injekcijskom prešanju (prvenstveno dobra tecljivost). Jedan od često primjenjivanih materijala za tankostjeno injekcijsko prešanje je polipropilen (PP). Polipropilen također pripada skupini *mekših* materijala, što smanjuje trošenje stijenke kalupne šupljine. To je posebice bitno pri preradbi u prototipnom (hibridnom) kalupu.

Polipropilen je općenito materijal koji pripada skupini kristalastih plastomera s linearnim makromolekulnim lancima. Odlikuje se niskom gustoćom, dobrim mehaničkim, toplinskim i električnim svojstvima, izvrsnom kemijskom postojanošću i dobrom elastičnošću.

Općenito, niska žilavost PP-a jedan je od najvećih nedostataka te skupine plastomera, međutim kopolimerizacijom s polietilenom (PE) dobivaju se kopolimerni tipovi koji su žilavi i pri nižim temperaturama. Nedostatak kopolimerizacije je sniženje stupnja kristalnosti materijala, što negativno utječe na neka mehanička svojstva (tvrdoća, krutost). Nepravilno stezanje PP-a također predstavlja nedostatak pri primjeni te skupine plastomera zbog nemogućnosti točnijeg predviđanja deformacija otpresaka. Zbog svojih dobrih svojstava, PP je pronašao primjenu u gotovo svim granama industrije, a posebno valja istaći elektroničku industriju (uredska oprema, telekomunikacije, računala), industriju cijevi, prehrambenu industriju (pakovanja), automobilsku industriju, izradbu igračaka itd. [166,167]

Od PP-a najčešće se susreću homopolimerni tipovi, statistički kopolimerni tipovi, blok kopolimerni tipovi i statistički blok kopolimerni tipovi [168]. Pri tome se kopolimerni tipovi rabe kada se očekuje uporaba proizvoda pri temperaturama nižim od 0 °C, radi poboljšane žilavosti u usporedbi s homopolimernim tipovima [166]. Pri izboru odgovarajućeg materijala za tankostjeno injekcijsko prešanje potrebno je posebice voditi računa i o svojstvima tečenja materijala. Tecljivost plastomernih taljevina najčešće se izražava preko masenog protoka taljevine (e. *Melt Flow Rate* - MFR) i pri tankostjenom injekcijskom prešanju treba biti što viša. Za potrebe istraživanja izabran je homopolimerni tip polipropilena tvrtke *Borealis*, oznake **HJ 325 MO**. Neka svojstva tog materijala prikazana su u tablici 9.2.

Tablica 9.2 Svojstva materijala **PP HJ 325 MO** tvrtke *Borealis* [169]

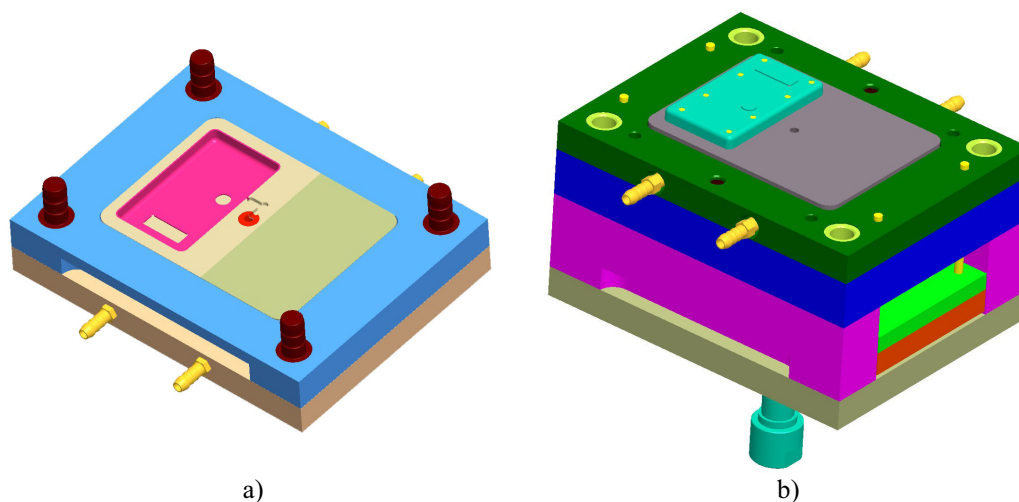
Svojstvo	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Faktor stlačivosti	-	2,0 ... 2,4	-
Gustoća	ρ	900	kg/m ³
Preporučeni tlak ubrizgavanja	p_u	> 50	N/mm ²
Temperatura taljevine	\mathcal{G}_T	200 ... 280	°C
Preporučena temperatura stijenke kalupne šupljine	\mathcal{G}_K	20 ... 80	°C
Temperatura postojanosti oblika	\mathcal{G}_{PO}	93	°C
Temperatura staklastog prijelaza	\mathcal{G}_G	125	°C
Toplinska rastezljivost	α_T	5 ... 10	10 ⁻⁵ m/mK
Toplinska difuzivnost	a	5,8	10 ⁻⁸ m ² /s
Specifični toplinski kapacitet	c_p	2,8	10 ³ J/mK
Toplinska provodnost	λ	0,14	W/mK
Skupljanje	S_L	1,4 ... 1,7	%

9.2.3 Kalup za injekcijsko prešanje

Za potrebe rada rabljeno je standardno kućište tvrtke *HASCO* dimenzija 190 mm · 246 mm. Predviđeno je prilagodba postojećeg kalupa potrebama rada na taj način da se izradbe novi prototipni žig i matrica, te žig i matrica od klasičnog kalupnog materijala. Računalni model eksperimentalnog kalupa prikazuje slika 9.3.

Za izradbu klasičnog žiga i matrice izabran je materijal Č4742 (1.2312). To je uobičajeni čelik koji se rabi za izradbu elemenata kalupa kao što su žigovi i matrice, a pripada skupini čelika za poboljšavanje. Visoki postotak udjela sumpora omogućuje vrlo dobru obradljivost čelika i pri višim tvrdoćama.

Moguće je također nitriranje površine stijenke kalupne šupljine. Čelik omogućuje vrlo dobru ispoliranost površine stijenke kalupne šupljine. Važnija svojstva čelika Č4742 navedena su u tablici 9.3.



Slika 9.3 Računalni model eksperimentalnog kalupa: a - nepomični dio, b - pomični dio

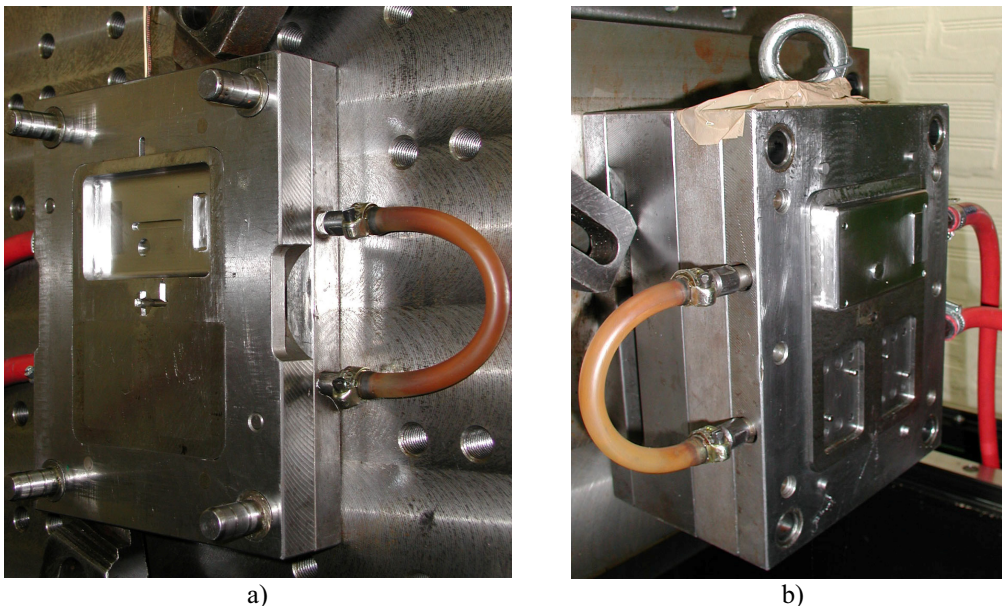
Tablica 9.3 Važnija svojstva čelika Č4742 (1.2312) [140]

Svojstvo	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Toplinska provodnost	λ	33,3	W/mK
Specifični toplinski kapacitet	c_p	0,46	J/gK
Gustoća	ρ	7 850	kg/m ³
Modul rastezljivosti	E_r	210 000	N/mm ²
Toplinska rastezljivost	α_T	$11,7 \cdot 10^{-6}$	m/mK
Maksimalno postiziva tvrdoća	-	51	HRC
Maksimalno postiziva rastezna čvrstoća	R_m	1730	N/mm ²

Izbor tog materijala za izradbu kompleta klasičnog žiga i matrice moguće je opravdati dobrom obradljivošću materijala, povoljnim omjerom cijene i kvalitete, a posebice pri izradbi manjih serija otpresaka (nekoliko tisuća), kada nije potrebna posebna toplinska obradba. Kako će se za potrebe istraživanja rabiti polipropilen, koji pripada skupini *mekših* plastomera, a broj izrađenih otpresaka neće prelaziti 10 000 komada, izbor čelika Č4742 (1.2312) zadovoljava i taj kriterij.

Kako je kućište izvorno bilo rabljeno za drugačiji tip kutijastog otpreska, potrebno je nove komplete žiga i matrice prilagoditi postojećim položajima uljevnog sustava i provrtima za izbacivala. Nacrtni konačne matrice i žiga dati su u prilogu 13.1 (slike 13.2 i 13.3).

Nakon izradbe žig i matrica se montiraju u postojeće kućište (slika 9.4).



Slika 9.4 Eksperimentalni kalup s klasičnim umetcima: a - nepomični dio (matrica), b - pomični dio (žig)

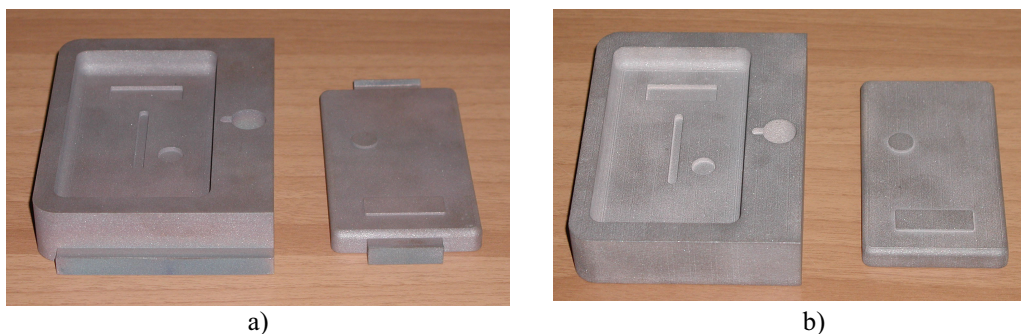
9.2.4 Prototipni kalupni umetci

Pri izboru odgovarajućeg postupka brze izradbe elemenata eksperimentalnog kalupa (prototipne matrice i prototipnog žiga) rabila su se 4 temeljna kriterija:

- prototipni elementi kalupa trebaju biti načinjeni od metala
- prototipni elementi kalupa trebaju biti dovoljne postojanosti trošenju (predviđa se izradba oko 10 000 otpresaka)
- prototipni elementi kalupa trebaju biti zadovoljavajućih mehaničkih svojstava kako bi izdržali preradbu tankostjenim injekcijskim prešanjem
- odstupanja u izmjerama prototipnih elemenata kalupa ne smiju biti veća od $\pm 0,4$ mm.

Analizom raspoloživih postupaka brze izradbe kalupa kao tri najprihvatljivija postupka nametnuli su se DMLS (tvrtka *EOS*), IMLS (tvrtka *3D Systems*) i 3DP (tvrtka *Extrude Hone*) postupci. Na temelju upita upućenih u sve tri tvrtke, izbor je sužen na dva postupka: IMLS i 3DP. Nakon izradbe prototipnih umetaka, prije završne obradbe (slika 9.5) uočeno je kako je kvaliteta površine umetaka načinjenih IMLS postupkom daleko viša, a odstupanja od projektiranih izmjera su manja nego li pri umetcima načinjenim postupkom 3DP (*ProMetal* postupak). Prednost 3DP postupka očituje se u višoj tvrdoći umetaka, no kako će se u

prototipnom kalupu izraditi ograničeni broj otpresaka, ta je činjenica za potrebe istraživanja nebitna.



Slika 9.5 Prototipnih kalupni umetci: a - IMLS postupak, b - 3DP postupak

Stoga je IMLS postupak brze izradbe kalupnih umetaka konačan izbor. Za potrebe istraživanja uporabljen je materijal *LaserForm A6* (važnija svojstva materijala *LaserForm A6* navedena su u tablici 9.4).

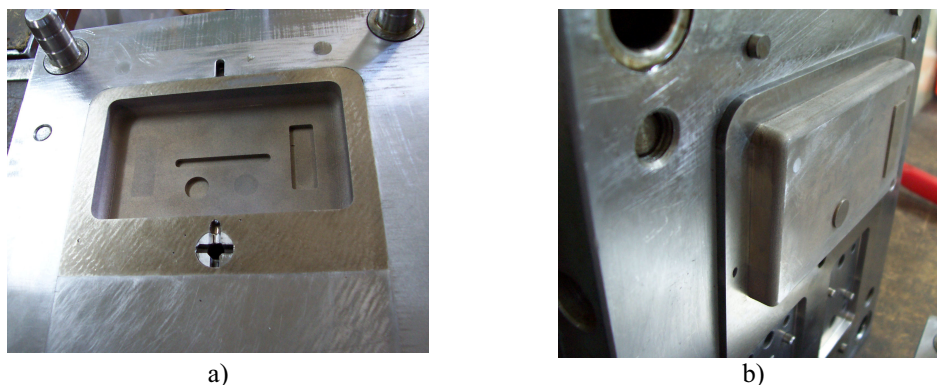
Tablica 9.4 Važnija svojstva materijala *LaserForm A6* [131]

Svojstvo	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Toplinska provodnost	λ	39	W/mK
Specifični toplinski kapacitet	c_p	0,34	J/gK
Gustoća	ρ	7 800	kg/m ³
Modul rastezljivosti	E_r	138 000	N/mm ²
Toplinska rastezljivost	α_T	$7,45 \cdot 10^{-6}$	m/mK
Maksimalno postiziva tvrdoća	-	39	HRC
Rastezna čvrstoća	R_m	610	N/mm ²
Pritisna čvrstoća	R_p	480	N/mm ²

Materijal *LaserForm A6* sastoji se od dvaju temeljnih sastojaka; od čelika A6 (oznaka prema AISI normi) i bronce kao infiltranta. Udio bronce kreće se uglavnom od 20 do 40 %. Materijal *LaserForm A6* obradljiv je svim klasičnim postupcima obradbe odvajanjem čestica, a prihvat kalupnih elemenata je pojednostavljen jer je materijal magnetičan. Hrapavost površine kalupnih umetaka kreće se u rasponu 5 do 10 μm (R_a), što ovisno o potrebi zahtijeva vrlo ograničenu naknadnu obradbu (npr. poliranje). Tvrdoća kalupnih elemenata kreće se oko 20 HRC, no odgovarajućom toplinskom obradbom, ta se vrijednost može udvostručiti. Zbog udjela bronce, materijal ima vrlo dobru postojanost koroziji. [131]

Takve umetke potrebno je u završnoj obradbi prilagoditi kućištu postojećeg kalupa što je obuhvaćalo: odstranjivanje dodataka za spajanje s baznim površinama, izradba ostatka uljevnog

sustava, izradba provrta za izbacivala, izradba navoja za pričvršćivanje prototipnih umetaka u kućište, izradba provrta za osjetilo temperature, poliranje i prilagodba toleriranih izmjera. Nakon završne obradbe umetci su ugrađeni u kućište kalupa (slike 9.6).



Slika 9.6 Prototipni umetci ugrađeni u kućište kalupa: a - matrica, b - žig

Potrebno je naglasiti kako se u prvoj varijanti prototipnih umetaka predvidjelo tunelno ušće, međutim nakon probne serije pokazalo se kako taj tip ušća ne dopušta automatsko odvajanje ušća od otpreska (što je inače odlika upravo tog tipa ušća). Stoga se uljevni sustav na prototipnoj matrici prilagodio izvedbi normalnog bočnog ušća pomaknutog za 10 mm iz središta matrice (slika 9.7).



Slika 9.7 Prilagođen uljevni sustav prototipne matrice

9.2.5 Ubrizgavalica

Pokusi u okviru istraživanja provedeni su na ubrizgavalici ENGEL Victory 330/60 Power. Radi se o hidrauličkoj ubrizgavalici čija je temeljna karakteristika izostanak priječnica, što omogućuje preradbu u kalupima većih gabarita. Općenito se radi o stroju koji pripada skupini ubrizgavalica srednje veličine, a važnije karakteristike dane su u tablici 9.5.

Tablica 9.5 Važnije karakteristike ubrizgavalice ENGEL Victory 330/60 Power [171]

Karakteristika ubrizgavalice	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Promjer pužnog vijka	d_{pv}	35	mm
Maksimalni obujam ubrizgavanja	V_u	154	cm ³
Maksimalna frekvencija vrtnje pužnog vijka	ω_{pv}	400	min ⁻¹
Maksimalna brzina ubrizgavanja	v_u	152	cm ³ /s
Specifični tlak ubrizgavanja (povišeni)	p_u	218	MPa
Sila držanja kalupa	F_d	600	kN
Hod otvaranja kalupa	h_{OK}	450	mm
Minimalna ugradbena visina kalupa	H_K	250	mm
Maksimalna masa kalupa	m_K	450	kg
Pogonska snaga pumpe	N_P	15	kW

9.2.6 Mjerna oprema

Mjerenja tijekom istraživanja moguće je podijeliti u četiri skupine:

- mjerenje temperaturnog polja kalupa (mjerna stanica tvrtke *National Instruments* - NI)
- određivanje rastezne žilavosti otpresaka prema normi DIN 53 448 (instrument tvrtke *Frank*)
- mjerenje izmjera otpresaka (digitalna pomična mjerka tvrtke *MIB Messezeuge*)
- mjerenje mase otpresaka (digitalna vaga tvrtke *Metalka*).

9.2.6.1 Mjerna stanica [172]

Pri mjerenju temperature stijenke kalupne šupljine rabila se mjerna stanica tvrtke NI oznake SCXI-1000 CD, s 8-kanalnim modulom za mjerenje temperature SCXI-1112. Modul SCXI-1112 omogućuje kompenzaciju hladnog kraja osjetila temperature, te zasebnu kalibraciju.

9.2.6.2 Osjetilo temperature [172]

Mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine provedeno je s pomoću osjetila temperature tip J (željezo-konstantan termopar) tvrtke NI. Područje rada osjetila je 0 do 482 °C, uz grešku mjerenja ± 0,75 %. Položaj osjetila temperature u oba kompleta kalupnih umetaka prikazuje nacrt matrice u prilogu 13.1 (slika 13.2).

9.2.6.3 Programski paket za obradbu podataka

Akvizicija mjernog signala ostvarena je s pomoću programskog paketa *Lab View 7.0 Express*. S pomoću tog programa načinjen je potprogram (prividni instrument) za mjerenje temperature, za

izravno prikazivanje mjerenih vrijednosti na zaslonu prijenosnog računala, te zapisivanje mjerenih vrijednosti u posebne datoteke. Frekvencija uzimanja signala iznosila je 10 Hz (10 očitavanja u sekundi).

9.2.6.4 Instrument za mjerenje udarne radnje loma

Zbog debljine stijenke otpreska, odnosno debljine načinjenih ispitnih tijela od 1 mm, kao jedina prihvatljiva i raspoloživa metoda za određivanje žilavosti otpresaka nametnulo se određivanje rastezne žilavosti prema normi DIN 53 448. Normom DIN 51 222 propisan je instrument za mjerenje udarne radnje loma (slika 9.8).



a)



b)

Slika 9.8 Instrument za mjerenje udarne radnje loma (DIN 51 222): a - instrument, b - čeljusti

9.2.6.5 Oprema za mjerenje izmjera otpreska [173]

Mjerenje izmjera otpreska provedeno je s pomoću digitalne pomične mjerke tvrtke *MIB Messezeuge* razlučivosti 0,01 mm. Mjerno područje mjerke iznosi 0 do 150 mm. Preporučene temperature uporabe nalaze se u rasponu 0 do 40 °C. Uporaba mjerke također se preporučuje u rasponu 0 do 80 % sadržaja vlage u zraku.

9.2.6.6 Oprema za mjerenje mase otpresaka [174]

Određivanje mase otpresaka provedeno je s pomoću digitalne vage tvrtke *Metalka*. S vagom je moguće raditi unutar dva mjerna područja. Prvo područje je od 0 do 120 g, pri čemu je osjetljivost vage 0,01 g. Drugo područje je do 120 do 1200 g pri čemu je razlučivost vage 0,1 g. Preporučeni raspon uporabnih temperatura je 10 do 30 °C.

9.3 IZBOR PODESIVIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA

Na temelju analize dostupne literature [20-43], moguće je zaključiti kako su autori u svojim istraživanjima od mnoštva parametara injekcijskog prešanja izdvojili desetak parametara koji se smatraju najutjecajnijim na postizanje odgovarajućih svojstava otpresaka. To su: tlak ubrizgavanja, vrijeme ubrizgavanja (brzina ubrizgavanja), naknadni tlak, vrijeme djelovanja naknadnog tlaka, tlak u kalupnoj šupljini, temperatura taljevine, temperatura stijenke kalupne šupljine, temperatura medija za temperiranje, protok medija za temperiranje i vrijeme hlađenja otpreska (vrijeme ciklusa). Međutim pornijom analizom moguće je zaključiti kako neki od navedenih parametara preradbe nisu nezavisno upravljive veličine.

Temperatura stijenke kalupne šupljine

Temperatura stijenke kalupne šupljine je računski i stohastična veličina, a nije ju moguće podesiti. Postoji samo vjerojatnost njenoga održavanja iz ciklusa u ciklus. Na njenu vrijednost prvenstveno utječu temperatura taljevine, toplinska svojstva materijala stijenke kalupne šupljine i plastomerne taljevine, parametri medija za temperiranje, vrijeme hlađenja otpreska i temperatura okoline [16]. Stoga temperatura stijenke kalupne šupljine nije nezavisno podesivi parametar injekcijskog prešanja. Nisu to ni dvije temperature koje omogućuju proračun temperature stijenke kalupne šupljine, početna temperatura i dodirna temperatura.

Tlak u kalupnoj šupljini

Tlak u kalupnoj šupljini nije moguće izravno podesiti pa je zavisna veličina. Tlak kojeg je moguće podesiti je tlak ubrizgavanja u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice, no nakon faze ubrizgavanja korelacija između ta dva tlaka je mala. Na tlak u kalupnoj šupljini također utječu izravno podesivi parametri injekcijskog prešanja kao što su brzina ubrizgavanja i temperatura taljevine, a i zavisni parametri kao što je temperatura stijenke kalupne šupljine. [11]

Vrijeme hlađenja otpreska (vrijeme ciklusa)

Potrebno vrijeme hlađenja otpreska nije nezavisno podesiva veličina. To vrijeme prvenstveno ovisi o temperaturi taljevine i postignutoj temperaturi stijenke kalupne šupljine. Promjena vremena ubrizgavanja ili vremena djelovanja naknadnog tlaka također utječe na vrijeme hlađenja otpreska, a time i na vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. [16]

Temperatura medija za temperiranje

Tijekom provedbe pokusa nije se raspolagalo temperiralom s pomoću kojeg je moguće podesiti temperaturu medija za temperiranje, već se kao medij za temperiranje rabila voda iz vodovodne mreže čija je temperatura 14 °C. Temperaturu medija za temperiranje nije bilo moguće podešavati pa je i taj parametar eliminiran iz daljnjih razmatranja kao nezavisna varijabla.

Nakon eliminacije spomenutih parametara injekcijskog prešanja, preostali parametri su preuzeti kao podesivi nezavisni parametri s pomoću kojih će se provoditi daljnje analize. To su: tlak ubrizgavanja, vrijeme ubrizgavanja, naknadni tlak, vrijeme djelovanja naknadnog tlaka, temperatura taljevine i protok medija za temperiranje.

9.4 IZBOR KARAKTERISTIČNIH SVOJSTAVA OTPRESKA

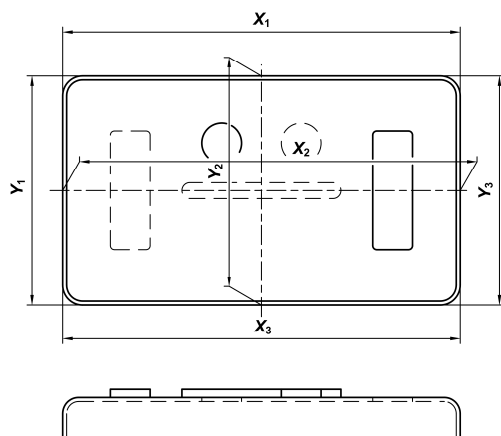
Ocjena utjecaja prototipnog (hibridnog) i klasičnog kalupa, tj. usporedba tih utjecaja, temeljila se na praćenju nekoliko svojstava otpresaka. Praćeno je stanje površine otpreska (prvenstveno potpunost otpreska i pojava srha), dimenzijska stabilnost otpreska (masa, stabilnost postignutih izmjera, deformacija otpreska kao posljedica skupljanja), te žilavost kao predstavnik mehaničkih svojstava.

9.4.1 Masa otpreska

Masa otpresaka određivana je vaganjem na digitalnoj vagi osjetljivosti 0,01 g.

9.4.2 Dimenzijska stabilnost otpreska

Stabilnost postignutih izmjera praćena je pri provedbi analize sposobnosti procesa u hibridnom kalupu u dvije osi otpreska, duljini i širini (slika 9.9). Mjerenje duljine i širine otpreska provedeno je u tri točke. Odbačene su najmanja i najveća vrijednost, a srednja vrijednost je uzeta kao podatak o izmjeri otpreska u pojedinoj osi. Pri provedbi pretpokusa i pokusa s oba kalupa, za analizu su uzimane aritmetičke sredine dobivenih vrijednosti duljine i širine otpreska.



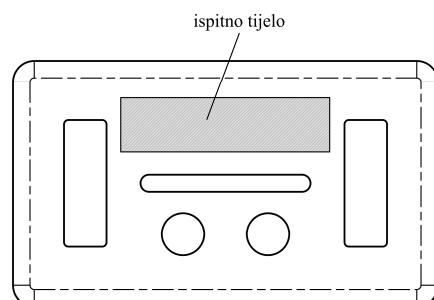
Slika 9.9 Određivanje stabilnosti izmjera otpreska

9.4.3 Deformacija otpreska

Za potrebe pretpokusa i glavnih pokusa praćena je deformacija otpreska također u dvije osi, koja se javlja kao posljedica skupljanja i vitoperenja. Vrijednost deformacije u pojedinoj osi dobivena je izračunavanjem razlika između izmjerene vrijednosti na kalupnoj šupljini i mjerenih vrijednosti na otpresku u tri točke (slika 9.9), te je izračunata srednja vrijednost tih razlika. Na taj način u ovom svojstvu otpreska uključeni su istodobno skupljanje i vitoperenje otpreska.

9.4.4 Rastezna žilavost otpreska

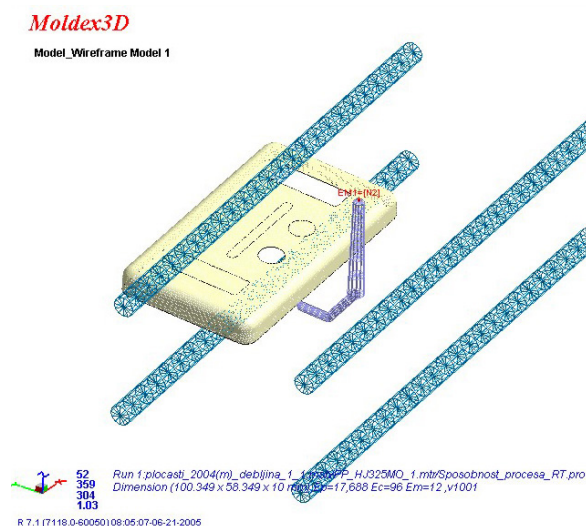
Pri izboru jednog od mehaničkih svojstava postojala su dva ograničenja. Prvo, izmjere otpreska nisu omogućavale izradbu ispitnih tijela za određivanje čvrstoće ili modula elastičnosti. Istodobno, pri uporabi tankostjenih otpresaka jedno od najvažnijih uporabnih svojstava je žilavost. Iako se najčešće određuje savojna žilavost, debljina stijenke otpreska (i ispitnih tijela) od 1 mm predstavlja drugo ograničenje. Prethodno je načinjena proba određivanja savojne žilavosti međutim nije dolazilo do loma ispitnih tijela što je poželjni preduvjet za ispravno određivanje žilavosti. Stoga se kao alternativa pokušala primijeniti metoda određivanja rastezne žilavosti prema normi DIN 53 448. Ta metoda je rezultirala kidanjem ispitnih tijela, te je usvojena za određivanje žilavosti otpreska. Dio otpreska iz kojeg su izrezivana ispitna tijela prikazan je slikom 9.10. Ispitna tijela zbog geometrijskih ograničenja otpreska neće biti načinjena prema uputama iz norme DIN 53 448, no kako se radi o usporedbenom istraživanju (usporedba svojstava otpresaka načinjenih u prototipnom i klasičnom kalupu) takva su odstupanja od norme dopuštena.



Slika 9.10 Područje izrezivanja ispitnih tijela pri određivanju rastezne žilavosti

9.5 POČETNA SIMULACIJA TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA

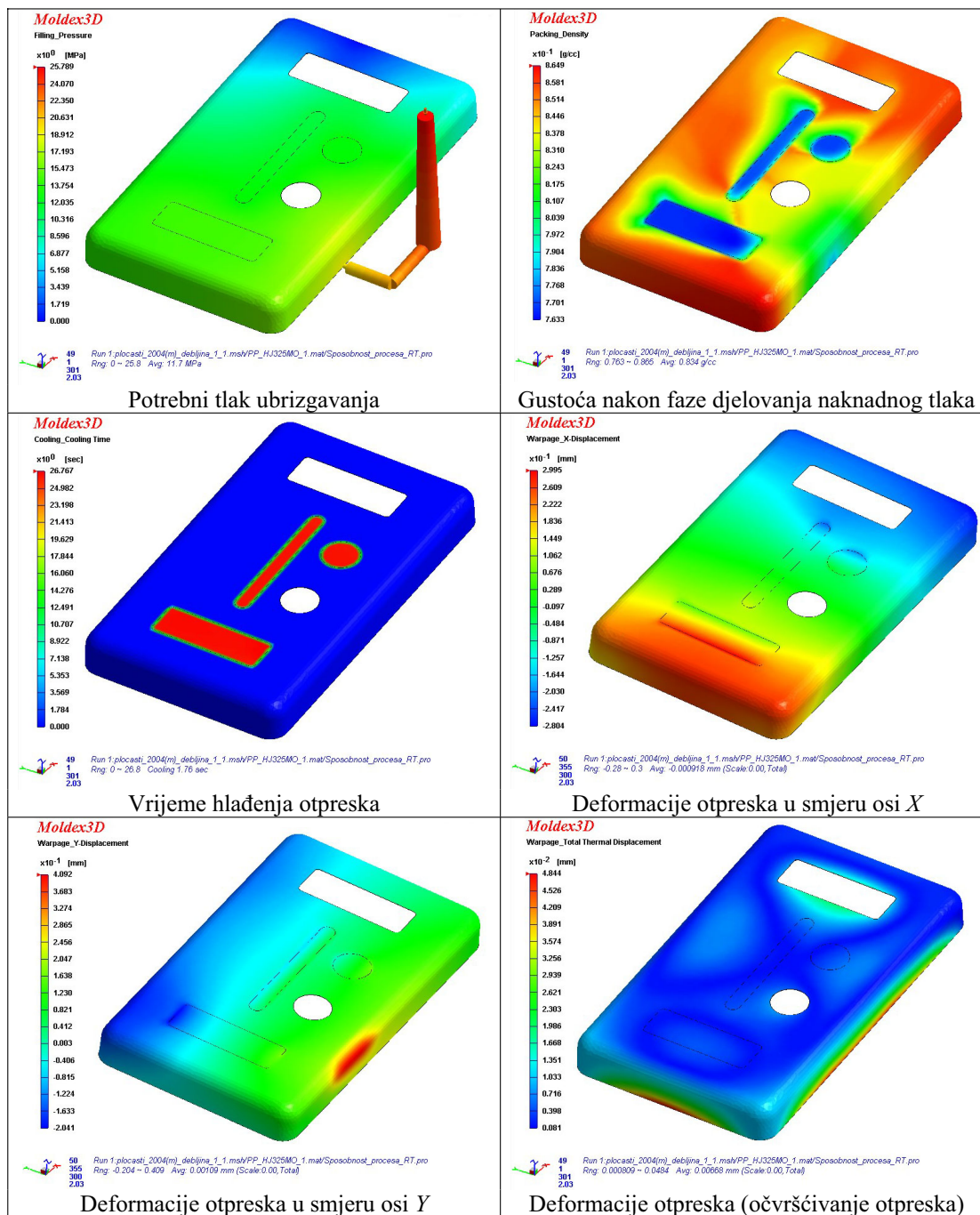
Za potrebe simulacije postupka injekcijskog prešanja rabljen je računalni program *Moldex3D*. Kako se radi o relativno jednostavnoj geometriji te o tankoj stijenci otpreska, simulacija je načinjena u modulu za plošnu analizu (e. *Shell*). Simulacijski model sastoji se od modela mreže konačnih elemenata otpreska, modela uljevnog sustava i modela kanala za temperiranje (slika 9.17). Model sadrži 17 688 konačnih trokutastih plošnih elemenata, 9 063 čvora na tim elementima, 4 elementa koja predstavljaju kanale za temperiranje unutar kojih se nalazi ukupno 96 konačnih valjkastih elemenata, sa 100 čvorova. Uljevni sustav se sastoji od 12 konačnih elemenata sa 8 čvorova. Model također sadrži 2 posebna čvora od kojih jedan predstavlja mjesto ušća, a drugi mjesto osjetila temperature.



Slika 9.11 Simulacijski model tankostjenog otpreska i odgovarajućeg kalupa

Rezultati početne simulacije bitni za istraživanje nalaze se u tablici 9.6.

Tablica 9.6 Važniji rezultati početne simulacije tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu



Potrebni tlak ubrizgavanja

Gustoća nakon faze djelovanja naknadnog tlaka

Vrijeme hlađenja otpreska

Deformacije otpreska u smjeru osi X

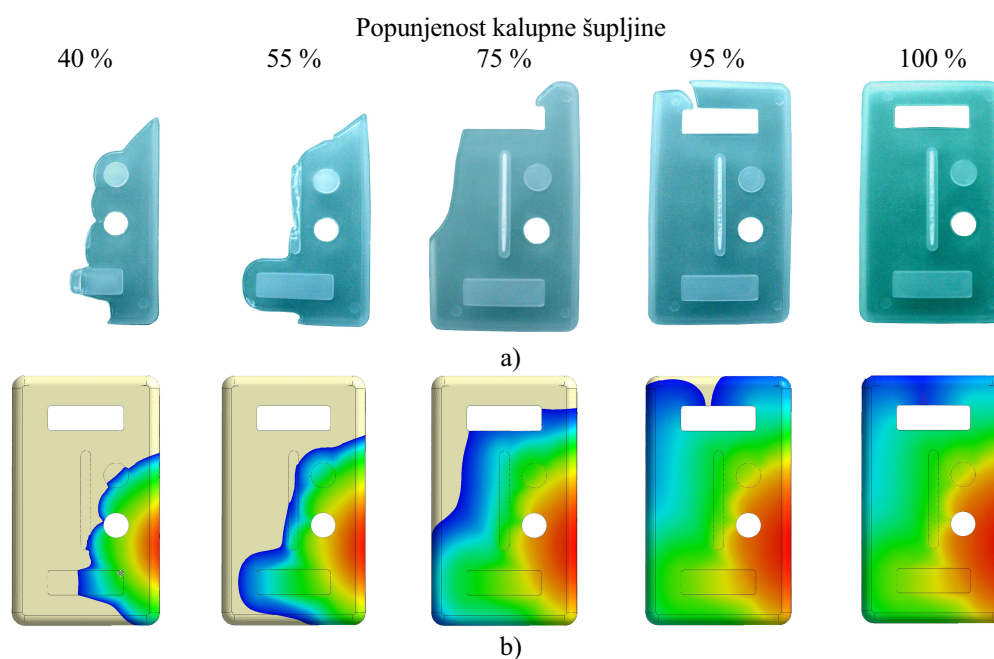
Deformacije otpreska u smjeru osi Y

Deformacije otpreska (očvršćivanje otpreska)

U tablici 9.6 moguće je uočiti rezultate simulacije dviju vrsta deformacija otpreska koje u sebi sadrže stezanje i vitoperenje. U prvom slučaju to su deformacije nastale uslijed razlika temperature taljevine i tlaka u kalupnoj šupljini tijekom faze punjenja kalupne šupljine i

stlačivanja taljevine (deformacije u smjeru osi X i Y). U drugom slučaju radi se o deformacijama nastalim uslijed očvršćivanja otpreska u kalupnoj šupljini. Ukupni iznos deformacija otpreska u smjeru pojedine osi predstavlja njihov zbroj.

Radi provjere primjenjivosti računalne simulacije za potrebe analize tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu moguće je s pomoću dobivenih rezultata provjeriti svaku od faza simulacije. Pri analizi punjenja kalupne šupljine, osim potrebnog tlaka ubrizgavanja, moguće je provjeriti napredovanje čela taljevine tijekom punjenja. Usporedbu rezultata simulacije i stvarnog stanja prikazuje slika 9.12.



Slika 9.12 Usporedba simulacije napredovanja čela taljevine i stvarnog tečenja u kalupnoj šupljini: a - stvarno stanje, b - simulacija

Analiza slike 9.12 ukazuje na vrlo dobro predviđanje toka čela taljevine kroz kalupnu šupljinu. Minimalni potrebni tlak ubrizgavanja provjeren je u stvarnom procesu i iznosio je u prosjeku 255 bar. Rezultat računalne simulacije (tablica 9.6) iznosio je 257 bar.

U okviru faze djelovanja naknadnog tlaka, moguće je provjeriti postignutu gustoću otpreska. Prosječna gustoća nakon faze djelovanja naknadnog tlaka iznosi $0,834 \text{ g/cm}^3$. Volumen otpreska iznosi $9,0 \text{ cm}^3$, pa proizlazi kako bi masa otpreska uz definirane parametre preradbe na temelju prosječne iznosila 7,51 g. Vaganjem otpresaka utvrđena je masa otpresaka od 7,96 g. Takvu je

razliku moguće tumačiti nemogućnošću točnog predviđanja mase otpresaka samo na temelju rezultata prosječne gustoće otpreska. Detaljnijom analizom rezultata simulacije moguće je uočiti kako se na otpresku očekuje raspon postignutih gustoća od $0,763 \text{ g/cm}^3$ do $0,865 \text{ g/cm}^3$. Područja najnižih gustoća su manja a obuhvaćaju područja deblje stijenke otpreska. Većina otpreska rezultira s gustoćom iznad $0,850 \text{ g/cm}^3$, što rezultira masom otpreska većom od 7,6 g. Zaključak je kako se rezultati dobiveni računalnom simulacijom te faze injekcijskog prešanja mogu prihvatiti ali uz kritički osvrt pri njihovoj interpretaciji.

Pri analizi faze očvršćivanja otpreska u kalupu, moguće je uspoređivati dva rezultata s mjerenim ili analitički proračunatim vrijednostima. Vrijeme hlađenja otpreska jedan je od parametara koje je osim s pomoću računalne simulacije moguće odrediti i analitički s pomoću opće jednadžbe hlađenja otpreska. Za proračun vremena hlađenja otpreska potrebno je raspolagati podatcima prikazanim u tablici 9.7.

Tablica 9.7 Podatci potrebni za proračun vremena hlađenja otpreska načinjenog od PP HJ325 MO

Parametar / svojstvo	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Temperatura stijenke kalupne šupljine	ϑ_K	36	°C
Temperatura taljevine	ϑ_T	240	°C
Temperatura postojanosti oblika otpreska	$\hat{\vartheta}_{PO}$	93	°C
Specifični toplinski kapacitet	c_p	2800	J/kgK
Toplinska provodnost	λ	0,14	W/mK
Gustoća	ρ	900	kg/m ³
Debljina stijenke otpreska	s_{o1}	1,10	mm
Debljina stijenke otpreska	s_{o2}	3,0	mm
Koeficijent unutrašnjosti - ploča - kriterij I	K_U	$8/\pi^2$	-
Koeficijent unutrašnjosti - ploča - kriterij II	K_U	$4/\pi$	-
Koeficijent oblika - ploča	K_o	1	-

U prvom koraku određuje se efektivna toplinska difuzivnost polipropilena na temelju izraza [16]:

$$a_{ef} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} = 5,56 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \quad (9.1)$$

Računsko vrijeme hlađenja otpreska na postignutoj debljini stijenke od 1,1 mm prema kriteriju postizanja prosječne temperature postojanosti oblika iznosi:

$$t_h = \frac{s_o^2}{a_{ef} \cdot \pi^2 \cdot K_o} \cdot \ln \left(K_U \frac{\vartheta_T - \vartheta_K}{\hat{\vartheta}_{PO} - \vartheta_K} \right) = 2,3 \text{ s}$$

odnosno 17,4 s u slučaju debljine stijenke 3,0 mm.

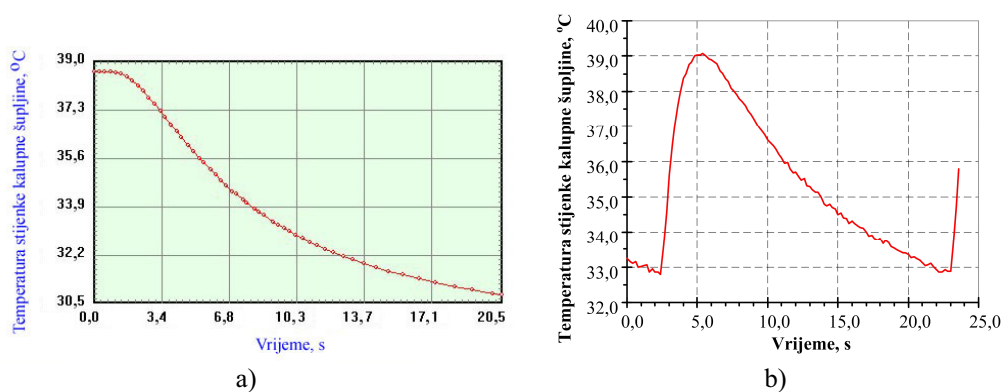
Vremena hlađenja prema kriteriju postizanja temperature postojanosti oblika u središtu otpreska iznose, za debljinu stijenke 1,1 mm:

$$t_h = \frac{s_o^2}{a_{ef} \cdot \pi^2 \cdot K_O} \cdot \ln \left(K_U \frac{\vartheta_T - \vartheta_K}{\hat{\vartheta}_{PO} - \vartheta_K} \right) = 3,4 \text{ s}$$

a pri debljini stijenke od 3,0 mm vrijeme hlađenja otpreska iznosi 24,9 s.

Rezultati računalne simulacije ukazuju na vremena hlađenja u rasponu od 2,0 do 3,0 s za debljinu stijenke otpreska od 1,1 mm, a 26,7 s za debljinu stijenke od 3,0 mm. Pri tome je rabljen kriterij postizanja temperature postojanosti oblika u središtu otpreska. Dobiveni rezultati razlikuju se oko 7 % u slučaju deblje stijenke, dok je ta razlika pri tanjoj stjenci zanemariva. Stoga se i rezultati računalne simulacije faze očvršćivanja otpreska mogu smatrati zadovoljavajućima.

Analizu primjenjivosti računalne simulacije u slučaju tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu moguće je provesti i usporedbom predviđenog i izmjenog temperaturnog polja stijenke kalupne šupljine na mjestu osjetila temperature. Slika 9.13 prikazuje temperaturna polja stijenke kalupne šupljine prototipne matrice, izmjerene i simulacijske vrijednosti.



Slika 9.13 Temperaturno polje stijenke kalupne šupljine (prototipna matrica): a - vrijednosti dobivene računalnom simulacijom, b - izmjerene vrijednosti

Usporedbom rezultata na slici 9.13 moguće je uočiti kako je primjerice postignuta dodirna temperatura gotovo identična onoj dobivenoj računalnom simulacijom. Razlika postoji u postignutom temperaturnom gradijentu tijekom ciklusa, te u nemogućnosti analize faze zagrijavanja stijenke kalupne šupljine pri računalnoj simulaciji.

Pri analizi deformacija otpreska uočena je najveća razlika između postignutih i izmjerenih vrijednosti. Stvarne vrijednosti deformacija prelaze 1,0 mm (maksimalne i preko 1,5 mm) u smjeru obiju osi, dok računalna simulacija rezultira vrijednostima od oko 0,6 do 0,8 mm.

Za potrebe istraživanja predviđa se i analiza utjecaja podesivih parametara injekcijskog prešanja na mehaničko svojstvo otpreska - rasteznu žilavost. Računalni program *Moldex3D* ne omogućuje uvid u bilo koje mehaničko svojstvo otpresaka, pa usporedba sa stvarnim stanjem nije moguća.

Računalna simulacija također omogućuje procjenu utjecaja pojedinih parametara injekcijskog prešanja na svojstva otpreska koja je moguće analizirati. Za procjenu utjecaja nekoliko parametara istodobno potrebno je i pri računalnoj simulaciji definirati odgovarajući plan pokusa i provesti potreban broj simulacija (broj stanja pokusa), te statistički obraditi te podatke. Novije inačice računalnih programa u sebi sadrže i module za statističku obradbu podataka čime je olakšana analiza dobivenih rezultata simulacije.

Unatoč tim nastojanjima, zaključak je kako za detaljnije analize utjecaja podesivih parametara injekcijskog prešanja pokusi još uvijek ostaju nezamjenjivi. Računalna simulacija može poslužiti za početno podešavanje potrebnih parametara preradbe u cilju dovođenja pokusa u područje optimalnih parametara i postignutih svojstava otpresaka. Stoga će se u nastavku istraživanja za analizu utjecaja hibridnog i klasičnog kalupa na svojstva otpresaka rabiti prvenstveno pokusi, a računalna simulacija za usporedbu s podacima dobivenim pokusima. Time će se ujedno ispitati i vrijednost računalnog programa.

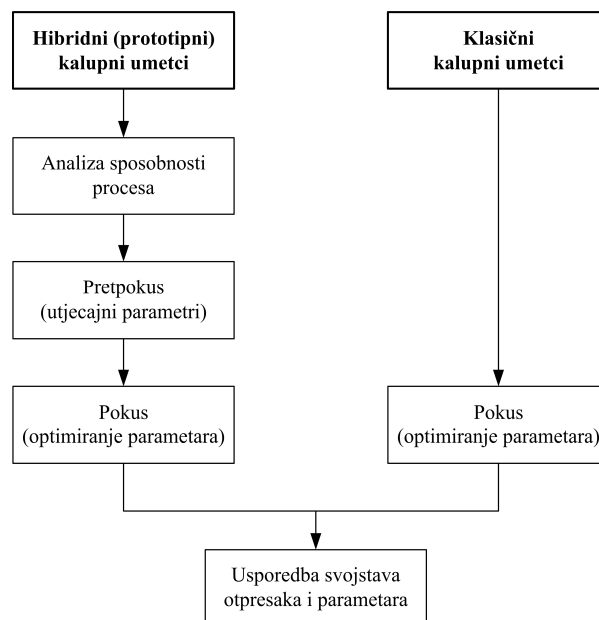
9.6 PROVEDBA POKUSA

9.6.1 Strategija provedbe pokusa i analiza

Općenito pri uspješnom izvođenju pokusa potrebno je provesti odgovarajuće korake: jasna definicija i formulacija problema, pregled i analiza raspoloživih informacija o istraživanom problemu, priprema i izbor strategije, pretpokus, korekcije (ukoliko su potrebne), izvođenje pokusa uz mjerenje rezultata, sistematizacija rezultata i obradba, interpretacija rezultata, donošenje zaključaka. [175]

Definicija problema te pregled raspoloživih informacija dat je u prethodnim poglavljima. Stoga će se ovdje dati težište na razradi strategije istraživanja, uz kratki prikaz teorijskih osnova

pojedinih metoda koje će se rabiti u okviru istraživanja. Slika 9.14 prikazuje plan provedbe analiza i pokusa pri uporabi oba kompleta kalupnih umetaka (prototipnih i klasičnih).



Slika 9.14 Plan provedbe pokusa i analiza pri istraživanju

Pri analizi sposobnosti procesa injekcijskog prešanja u prototipnom (hibridnom) kalupu nastojati će se utvrditi postoje li sustavne smetnje (greške) koje dovode do odstupanja u dobivenim rezultatima. Posebno se u okviru te analize želi istražiti potencijalna prekomjerna trošivost prototipnih kalupnih umetaka.

Na temelju analize iz poglavlja 9.3 zaključeno je kako se pri injekcijskom prešanju tankostjenih otpresaka ističe 6 najvažnijih podesivih parametara preradbe. Pri provedbi pokusa sa svih 6 faktora, došlo bi se do glomaznog plana pokusa, a interpretacija dobivenih rezultata bila bi otežana radi velikog broja potencijalnih interakcija. Stoga je potrebno s pomoću odgovarajućeg pretpokusa načiniti uži izbor 3 do 4 najutjecajnijih faktora. U literaturi [175-178], najčešće se pri selekciji najutjecajnijih parametara kao moguće rješenje spominju ortogonalni planovi pokusa. Nedostatak tih planova pokusa je u tome što daju podatke samo o glavnim faktorima, a s pomoću njih nije moguće obuhvatiti utjecaj interakcije između glavnih faktora [175]. Neka istraživanja [179,180], pokazala su kako se pri injekcijskom prešanju interakcije između glavnih faktora ne smiju zanemariti. Stoga je za provedbu pretpokusa izabrana skupina faktorskih planova pokusa koji omogućuju uvid i u interakcije. To su fracionirani (nepotpuni) faktorski planovi pokusa, a za potrebe istraživanja rabiti će se plan pokusa na dvije razine [175].

U okviru glavnog pokusa istraživanja namjerava se dobiti uvid u čitavo polje parametara preradbe koji rezultiraju željenim svojstvima otpreska. Stoga se nameće potreba za poznavanjem *odzivne* funkcije (površine) procesa injekcijskog prešanja u širem rasponu parametara preradbe, te potreba za optimiranjem signifikantnih podesivih parametara injekcijskog prešanja prema izabranim kriterijima (ciljana svojstva otpresaka). U tu svrhu, kao vrlo efikasna metoda pokazala se metoda odzivnih površina (e. *Response Surface Method* - RSM) [175-177], u okviru koje je za provedbu glavnih pokusa izabran centralno kompozitni plan pokusa. Broj faktora centralno kompozitnog plana pokusa, a time i broj izvođenja pokusa odrediti će se na temelju analize rezultata pretpokusa.

9.6.1.1 Analiza sposobnosti procesa [181]

Analiza sposobnosti procesa pripada skupini statističkih metoda za praćenje i upravljanje procesima (e. *Statistical Process Control* - SPC). Najčešće se tim metodama u prvom koraku nastoji na temelju analize utjecajnih parametara utvrditi i odstraniti izvore signifikantnih poremećaja u procesu, te dovođenje procesa *pod kontrolu*. U drugom koraku se proces nastoji dovesti u stanje u kojem će svi rezultati procesa (proizvodi) biti unutar zahtijevanih granica (granice dopuštenih odstupanja). Odgovor na pitanje je li i u kojoj mjeri je to moguće ostvariti, odnosno kako se to u određenom trenutku ostvaruje, moguće je dobiti s pomoću analize sposobnosti procesa. Za proces se smatra da je sposoban ukoliko daje približno 100 % proizvoda unutar granica dopuštenih odstupanja.

Analizom sposobnosti procesa primarno se analizira rasipanje procesa, odnosno utvrđeno se rasipanje stavlja u vezu s granicama dopuštenih odstupanja. Iako rezultira nezadovoljavajućim proizvodima, proces može biti sposoban, no tada on nije centriran (sredina procesa je pomaknuta u odnosu na sredinu polja dopuštenih odstupanja). Rješenje takvog problema relativno je jednostavno u usporedbi s rješavanjem problema *nesposobnog* procesa. Najjači argumenti unapređivanja kvalitete očituju se u stalnom smanjenju rasipanja. Stoga pri analizi sposobnosti procesa, koja rezultira brojčanim iznosima većeg broja statističkih parametara, tzv. indeksa sposobnosti procesa, najveću *težinu* imaju indeksi koji se temelje na rasipanju procesa.

Statistička obilježja procesa prikazuje slika 9.15.

Pri analizi sposobnosti procesa najširu primjenu imaju indeksi C_p i C_{pk} . Indeksi C_p i C_{pk} uzimaju se kao mjera *potencijalne* sposobnosti procesa kako bi se osigurali zahtjevi na proizvod. Njihove

vrijednosti moguće je odrediti na temelju izraza:

$$C_p = \frac{U - L}{6 \cdot \hat{\sigma}} \quad (9.2)$$

$$C_{pk} = \frac{z_{\min}}{3} \quad (9.3)$$

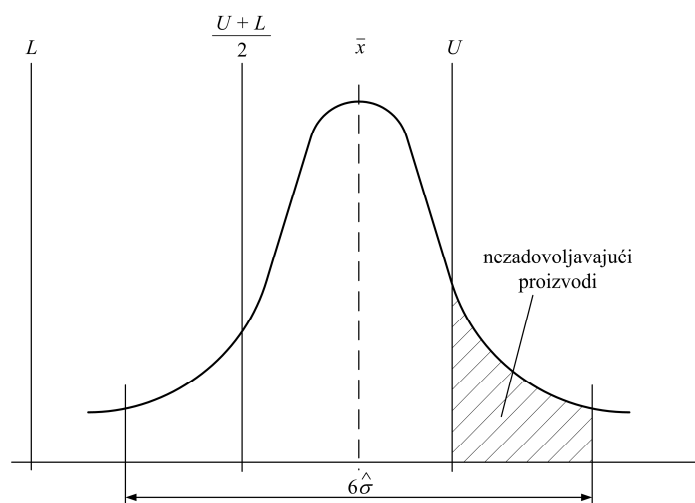
$$\text{uz: } z_{\min} = \min(z_U, z_L) \quad (9.4)$$

$$z_U = \frac{U - \bar{x}}{\hat{\sigma}} \quad (9.5)$$

$$z_L = \frac{\bar{x} - L}{\hat{\sigma}} \quad (9.6)$$

$$\hat{\sigma} = s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (9.7)$$

gdje su: U - gornja granica dopuštenih odstupanja, L - donja granica dopuštenih odstupanja, \bar{x} - aritmetička sredina skupa pojedinačnih podataka, $\hat{\sigma}$ - procjena standardnog odstupanja.



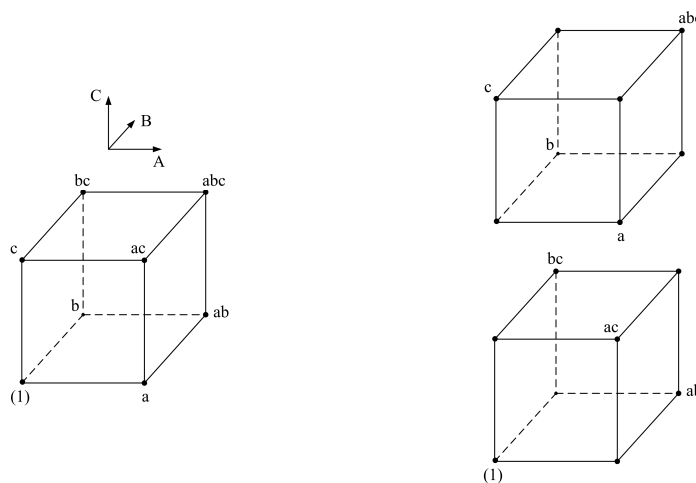
Slika 9.15 Statistička obilježja procesa [181]

Vrijednost indeksa C_p izravno ukazuje na sposobnost procesa. Što je vrijednost indeksa C_p viša, rasipanje procesa je manje. Teorijski, proces je sposoban ukoliko je indeks C_p veći ili jednak 1. Po prijedlogu iz [181] u pravilu se zahtijeva da najmanji iznos indeksa C_p bude 1,33 ($U - L = 8 \cdot \hat{\sigma}$). Nedostatak tog indeksa je u zanemarivanju sredine procesa (\bar{x}), te se u slučaju loše centriranosti procesa može doći do pogrešnog zaključka. Vrijednost indeksa C_{pk} ukazuje na pojavu loših proizvoda u procesu. Ukoliko je vrijednost indeksa C_{pk} viša ili jednaka 1, takvi se proizvodi ne pojavljuju. Ukoliko je proces ispravno centriran, vrijednosti indeksa C_p i C_{pk} su jednake.

9.6.1.2 Frakcionirani faktorski plan pokusa (na dvije razine)

U faktorskim planovima pokusa na dvije razine (2^k pokusi) s porastom broja faktora, vrlo brzo raste i broj potrebnih stanja pokusa. Stoga se za procjenu glavnih faktora i interakcija nižeg reda može rabiti nepotpuni (frakcionirani) faktorski plan pokusa. To je jedan od najčešće rabljenih planova pokusa u industrijskim istraživanjima. [176]

Pri izboru nepotpunog faktorskog plana pokusa najčešće se izabire izvođenje $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$, itd. stanja potpunih faktorskih planova pokusa (slika 9.16). Vrlo često se takvi planovi pokusa označavaju i s pomoću 2^{k-n} oznake (k - broj faktora, n - razina frakcioniranja: $1 = 1/2$, $2 = 1/4$, $3 = 1/8$, itd.). [175,176]



potpuni 2^3 faktorski plan pokusa

dva nepotpuna 2^{3-1} faktorska plana pokusa

Slika 9.16 Model faktorskog plana pokusa 2^3 i dva nepotpuna faktorska plana 2^{3-1} [176]

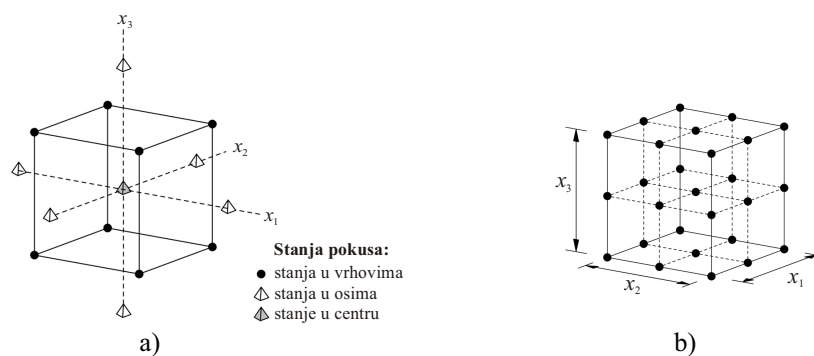
Pri provedbi nepotpunog faktorskog plana pokusa međutim dolazi do preklapanja utjecaja pojedinih glavnih faktora i/ili glavnih faktora i interakcija, kao i interakcija međusobno (tzv. *aliasi*). Pri izboru odgovarajućeg nepotpunog plana pokusa potrebno je voditi računa o minimalnim preklapanjima glavnih faktora i interakcija za koje se unaprijed pretpostavlja da bi mogli biti signifikantni. Pri tome se dolazi do pojma osjetljivosti plana pokusa (e. *Design Resolution*). U praksi su najvažnije osjetljivosti 3., 4. i 5. reda. Ukoliko se želi provesti odgovarajući nepotpuni faktorski plan pokusa sa 6 faktora, pri čemu se niti jedan glavni faktor ne preklapa s dvofaktorskom interakcijom (a interakcije višeg reda se zanemaruju), moguće je izabrati plan pokusa 2_{IV}^{6-2} . Takav plan pokusa podrazumijeva izvođenje $1/4$ stanja pokusa u usporedbi s potpunim faktorskim planom pokusa 2^6 . Dakle, umjesto 64 stanja pokusa izvodi se svega 16 stanja pokusa, pri čemu se zadržava osjetljivost pokusa 4. reda. [176]

9.6.1.3 Centralno-kompozitni plan pokusa

Centralno kompozitni pokus pripada skupini pokusa višeg reda, tzv. *metodama odzivne površine*. Metoda odzivne površine obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa. Mjerljiva veličina kvalitete proizvoda je *odziv*. Odzivna površina s dovoljnom preciznošću, točnošću i pouzdanošću dopušta predviđanje budućih rezultata u okviru analiziranog područja, te daje uvid u čitav proces. U praksi se pokazalo kako su najčešće dovoljne funkcije odziva prvog i drugog reda. Polinomske aproksimacije pogodne su posebice stoga što omogućuju lagano izračunavanje koeficijenata polinoma, ali se trebaju smatrati samo aproksimacijom stvarne zakonitosti i to u istraživanom području. [175,182]

Centralno kompozitni pokus je model pokusa 1. reda (2^k) proširen dodatnim točkama (stanjima pokusa) u centru i točkama u osima kako bi se omogućila procjena parametara modela 2. reda. Centralno kompozitni model pokusa sastoji se od 2^k stanja u vrhovima (faktorska stanja), $2k$ stanja u osima i stanja u centru pokusa (k - broj promatranih faktora). Centralno kompozitni pokus je alternativa $3k$ modelu u izgradnji modela pokusa 2. reda. Pri tome je broj izvođenja (faktorskih stanja) smanjen u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa. [182]

Za $k = 3$ (faktori su x_1 , x_2 i x_3), na slici 9.17 a, prikazan je model centralno kompozitnog pokusa za koji je potrebno 15 stanja pokusa. U slučaju potpunog faktorskog plana pokusa (slika 9.17 b), bilo bi potrebno 27 stanja pokusa.



Slika 9.17 Modeli pokusa: a - centralno kompozitni plan pokusa s 3 faktora, b - potpuni faktorski plan pokusa 3^k [182]

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotatabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ukoliko je zbroj produkata kodiranih stanja bilo koje dvije kolone u matrici pokusa jednaka nuli.

Rotabilnost centralno kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotabilnost ovisi o tzv. osnoj udaljenosti α (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa). [174]

Pokus je rotabilan ukoliko je [177]:

$$\alpha = \sqrt[k]{F} \quad (9.8)$$

gdje je F - broj faktorskih stanja ($F = 2^k$ u slučaju potpunog faktorskog pokusa).

U tablici 9.8 navedene su vrijednosti α za rotabilni centralno kompozitni pokus.

Tablica 9.8 Vrijednosti osne udaljenosti α [175]

Broj faktora k	Broj faktorskih stanja F	Broj ukupnih stanja pokusa N	Osna udaljenost α
2	4	$8 + n_c^*$	1,414
3	8	$14 + n_c$	1,682
4	16	$24 + n_c$	2,000
5	32	$42 + n_c$	2,378

* n_c - broj stanja u centru pokusa

Dodatna stanja u centru pokusa služe kako bi se moglo usporediti vrijednosti mjerenja zavisne varijable u centru pokusa s aritmetičkom sredinom za ostatak pokusa. Ukoliko je aritmetička sredina centra pokusa signifikantno različita od ukupne aritmetičke sredine svih ostalih stanja pokusa, tada se može zaključiti da veza između faktora pokusa i zavisne varijable nije linearna. [175] Ukoliko se pokus barem djelomično ponavlja, moguće je procijeniti grešku pokusa iz varijabilnosti ponovljenih stanja. Kako se ta stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora, procjena greške pokusa iz tih podataka nezavisna je o tome je li model pokusa linearan ili nelinearan, te sadrži li interakcije višeg reda. Tako procijenjena greška pokusa predstavlja čistu grešku (e. *pure error*), odnosno ona je posljedica samo nepouzdanosti mjerenja zavisne varijable. [174,175]

Polinom II. stupnja kojim se opisuje proces (odzivna funkcija) za općeniti slučaj glasi [174]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (9.9)$$

Pri tome se koeficijenti b_0, \dots, b_k određuju s pomoću metode minimalne sume kvadrata odstupanja računskih od stvarnih vrijednosti. [174]

9.6.2 Analiza sposobnosti injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu

9.6.2.1 Provedba analize sposobnosti injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu

Temeljni cilj provedbe analize sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu bio je provjera trošivosti prototipnih kalupnih umetaka. Pojava prekomjernog istrošenja tih umetaka nakon izradbe prvih nekoliko tisuća otpresaka ukazivala bi na nemogućnost daljnje provedbe pokusa zbog promjena u izmjerama i opasnosti od oštećivanja kalupnih umetaka.

Stoga je načinjena probna serija od 5 000 otpresaka. Pri tome se nakon izradbe svakih 100 otpresaka izuzimalo po 2 otpreska kao ispitke za analizu sposobnosti procesa (ukupno 100 ispitaka). Ispitci su bili obilježeni redom izuzimanja. Takav pristup nije omogućio strogo slučajno izuzimanje ispitaka iz uzorka, no jedino na taj način je bilo moguće utvrditi eventualnu pojavu trenda istrošenja prototipnih kalupnih umetaka.

Određivanje parametara preradbe za provedbu analize sposobnosti procesa u hibridnom kalupu temeljilo se na prethodnoj računalnoj simulaciji (poglavlje 9.5). Tablica 9.9 prikazuje važnije parametre injekcijskog prešanja tijekom analize sposobnosti procesa u hibridnom kalupu.

Tablica 9.9 Parametri injekcijskog prešanja pri analizi sposobnosti procesa u hibridnom kalupu

Parametar preradbe	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Tlak ubrizgavanja	p_u	300	bar
Vrijeme ubrizgavanja	t_u	0,5	s
Temperatura taljevine	\mathcal{T}_T	240	°C
Naknadni tlak	p_n	250	bar
Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	t_{np}	2	s
Dopunsko vrijeme hlađenja otpreska	t_d	15	s
Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja	t_c	20,5	s
Protok medija za temperiranje	q_M	5	l/min
Temperatura okoline	\mathcal{G}_O	25	°C

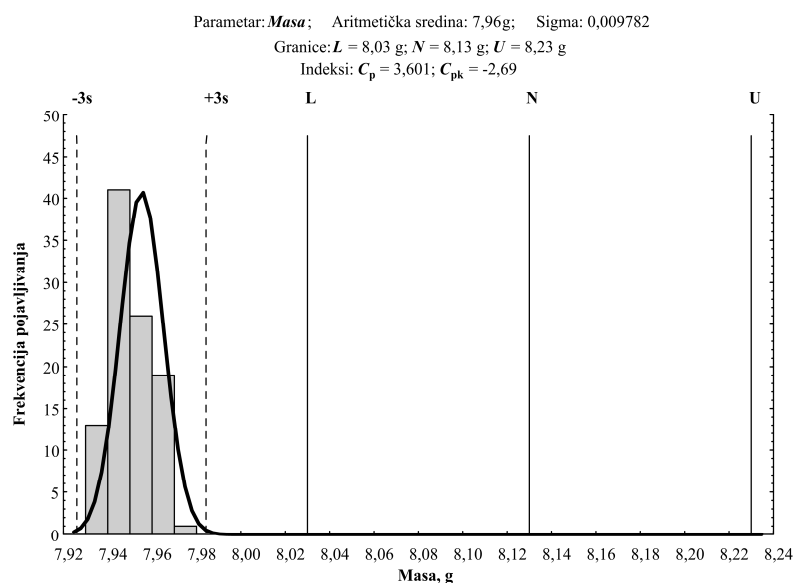
9.6.2.2 Rezultati analize sposobnosti injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu

Pri analizi sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu praćene su dvije izmjere otpresaka, duljina (*Izmjera_1*) i širina (*Izmjera_2*). Obje izmjere su mjerene u tri točke (opisano u poglavlju 9.4.2), a rezultati su dani u tablicama 13.1 i 13.2 (prilog 13.2). Kao vrijednost za analizu sposobnosti procesa uzimana je srednja vrijednost, dok su najmanja i

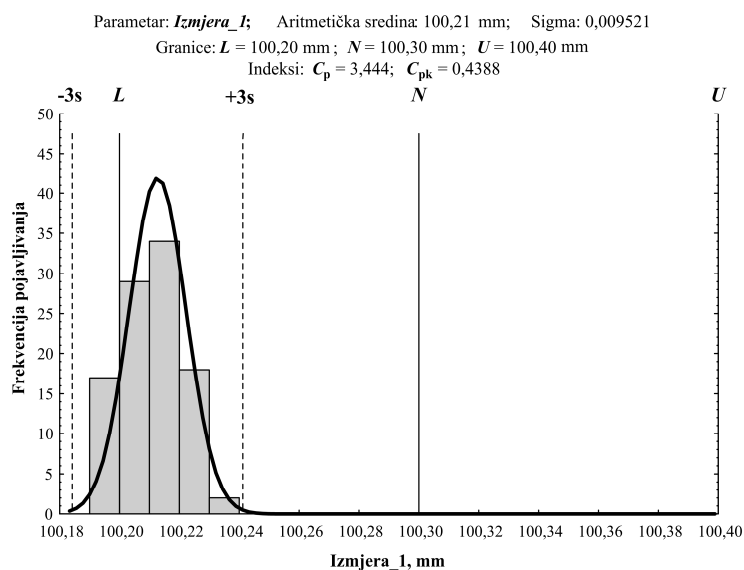
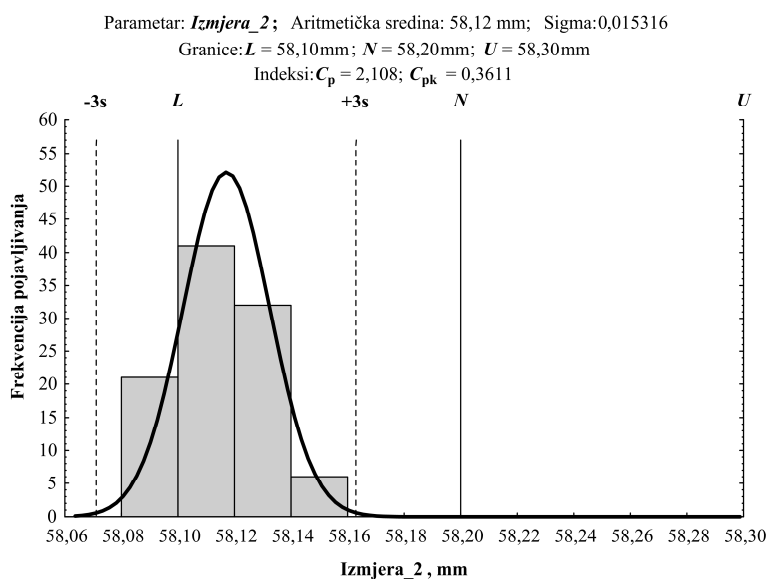
najveća vrijednost duljine i širine otpreska odbačene. Pri određivanju nominalne vrijednosti izmjera, uzimala se vrijednost izmjere kalupne šupljine (prototipne matrice), od koje se oduzela vrijednost iznosa skupljanja PP-a. Izmjera duljine prototipne matrice iznosi 101,80 mm, a širine 59,10 mm. Skupljanje PP-a proizvođač materijala deklarira na 1,5 %. Stoga nominalna vrijednost duljine otpreska iznosi 100,30 mm, a širine 58,20 mm. Kao granice dopuštenih odstupanja zadana je tolerancija $\pm 0,10$ mm u odnosu na nominalnu vrijednost.

Kao treće svojstvo otpreska na temelju kojeg se analizira sposobnost procesa izabrana je masa otpreska (*Masa*). S pomoću računalnog modela otpreska i podatka o gustoći PP-a, dobivena je nominalna vrijednost mase otpreska od 8,13 g. Granice dopuštenih odstupanja postavljene su sa $\pm 0,10$ g. Rezultati određivanja mase otpresaka nalaze se u tablici 13.3 (prilog 13.2).

Rezultate analize sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja na temelju *Mase*, *Izmjere_1*, i *Izmjere_2* prikazuju slike 9.18 do 9.20.



Slika 9.18 Analiza sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja (*Masa*)

Slika 9.19 Analiza sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja (*Izmjera_1*)Slika 9.20 Analiza sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja (*Izmjera_2*)

Analizom slika 9.18 do 9.20 i izračunatih indeksa sposobnosti procesa moguće je zaključiti kako se radi o sposobnom procesu (C_p uvijek veći od 1) koji nije centriran u odnosu na zadane dopuštene granice odstupanja. U sva tri slučaja radi se o pomaku prema donjoj granici, odnosno u slučaju mase o pomaku procesa potpuno ispod donje granice dopuštenih odstupanja. Takav proces moguće je centrirati povišenjem naknadnog tlaka i produljenjem vremena djelovanja

naknadnog tlaka. Time se postiže bolja nadoknada skupljanja otpreska što rezultira većim iznosima izmjera, kao i većom masom otpresaka. Temeljni je razlog provođenja analize sposobnosti procesa bio utvrditi nastaje li istrošenost prototipnih kalupnih umetaka. Takva pojava nije uočena jer nema trenda porasta niti izmjera niti mase ispitaka, što je vidljivo iz tablica 13.1, 13.2 i 13.3 (prilog 13.2).

9.6.3 Pretpokus - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu

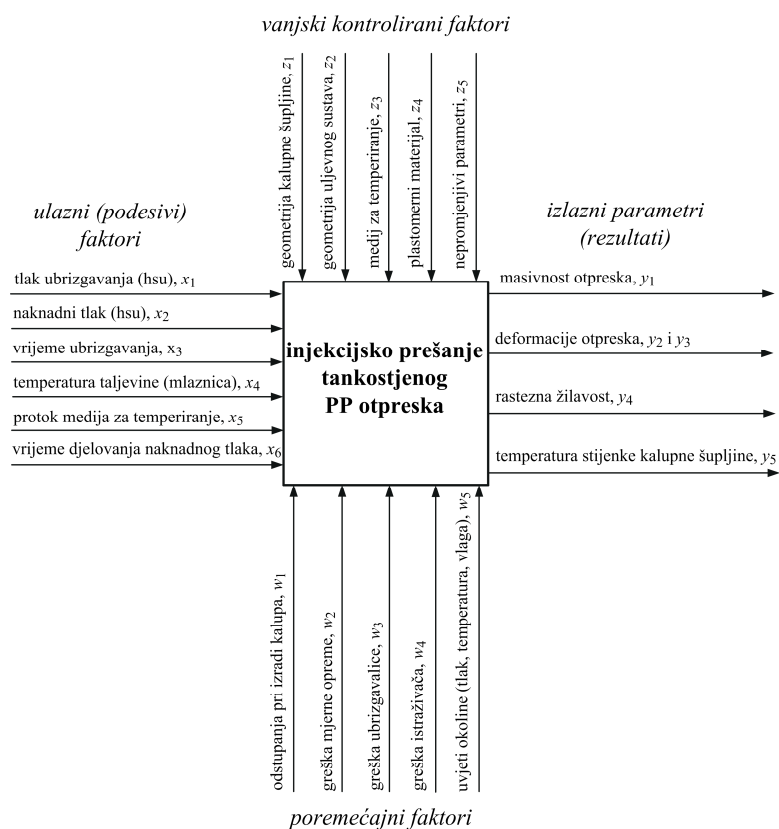
9.6.3.1 Provedba pretpokusa - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu

U okviru pretpokusa temeljni je zadatak provjeriti utjecaj 6 parametara injekcijskog prešanja definiranih u poglavlju 9.3 na svojstva otpreska definirana u poglavlju 9.4 (masa, deformacije i žilavost), te izdvojiti 3 do 4 najutjecajnijih parametra za provedbu glavnih pokusa. Kako pri procesu injekcijskog prešanja nije moguće zanemariti interakcije između glavnih faktora, za provedbu pretpokusa rabljen je frakcionirani faktorski pokus 2_{IV}^{6-2} (opširnije u poglavlju 9.6.1.2).

Pokus je na dvije razine a ima osjetljivost 4. reda, što znači kako nema preklapanja glavnih faktora, već samo dvofaktorskih interakcija i interakcija višeg reda. Također cilj nije utvrditi linearnost procesa, pa se u centru pokusa neće dodavati nova stanja pokusa. Model pretpokusa prikazuje slika 9.21. Na slici 9.21 kao vanjski kontrolirani faktor uzet je plastomerni materijal (z_4). Međutim treba biti svjestan činjenice kako postoji mogućnost odstupanja u svojstvima materijala od šarže do šarže.

Pri provedbi pretpokusa mjerena je promjena temperatura na površini stijenke kalupne šupljine u prototipnoj matrici. Razlog je trojak. Temperatura stijenke kalupne šupljine jedan je od najutjecajnijih (zavisnih) parametara injekcijskog prešanja, pa je bitno bilježiti postignute temperature pri različitim kombinacijama podesivih parametara preradbe. Time je moguće i analizirati utjecaj pojedinih parametara injekcijskog prešanja na postizanje odgovarajuće temperature stijenke kalupne šupljine. Mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine potrebno je također kako bi se utvrdilo kada je sustav postigao toplinsku ravnotežu nakon promjene podesivih parametara.

Tablica 9.10 prikazuje razine podesivih parametara, a tablica 13.4 (prilog 13.3) podešenja parametara za svako stanje pokusa, izmjerene dodirne temperature na stjenci kalupne šupljine, te temperaturni gradijenti tijekom ciklusa injekcijskog prešanja.



Slika 9.21 Model pretpokusa

Tablica 9.10 Razine podesivih parametara pretpokusa

Parametar	Razina		Jedinica
	-1	+1	
Tlak ubrizgavanja, x_1	250	500	bar
Naknadni tlak, x_2	300	450	bar
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,2	0,5	s
Temperatura taljevine, x_4	220	260	°C
Protok medija za temperiranje, x_5	3,0	6,0	l/min
Vrijeme naknadnog tlaka, x_6	1,0	3,0	s

Također je moguće izdvojiti parametre koji su tijekom pokusa ostajali konstantnima:

- vrijeme otvorenog kalupa 3 s
- put pužnog vijka 13 mm
- volumen doziranja 12,5 cm³
- dopunsko vrijeme hlađenja otpreska 15 s
- temperatura okoline 25 °C.

Pokus se izvodio statistički slučajno. U svakom stanju pokusa prije izuzimanja ispitaka čekalo se do postizanja toplinske stabilnosti kalupa. Nakon toga je izuzeto po 10 ispitaka za daljnju analizu svojstava otpresaka. Nakon provedenog pokusa prije analize ispitaka čekalo se 48 sati radi naknadne kristalizacije PP-a koja ima utjecaja na svojstva otpresaka.

Od 10 ispitaka, s pomoću tablice slučajnih brojeva izabrano je po 3 ispitka za svako stanje pokusa. Analiza utjecaja parametara preradbe na postignuta svojstva otpresaka provedena je u pretpokusu na temelju dobivenih srednjih vrijednosti svojstava ispitaka u svakom stanju pokusa.

9.6.3.2 Rezultati pretpokusa - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu

Analiza utjecaja pojedinih faktora i interakcija na promatrana svojstva otpresaka provedena je prema opisu iz poglavlja 9.4 s pomoću računalnog programa *DESIGN EXPERT*. Rezultati provedenih mjerenja nalaze se u tablicama 13.5 do 13.8 (prilog 13.3).

Osnovne vrijednosti promatranih svojstava otpresaka date su u tablici 9.11. Pri tome, iako se načinila analiza izmjera otpreska, dobiveni podatci nisu rabljeni pri analizi utjecaja parametara na svojstva otpreska. Analiza dimenzijske stabilnosti načinjena je na temelju podataka o deformacijama otpresaka.

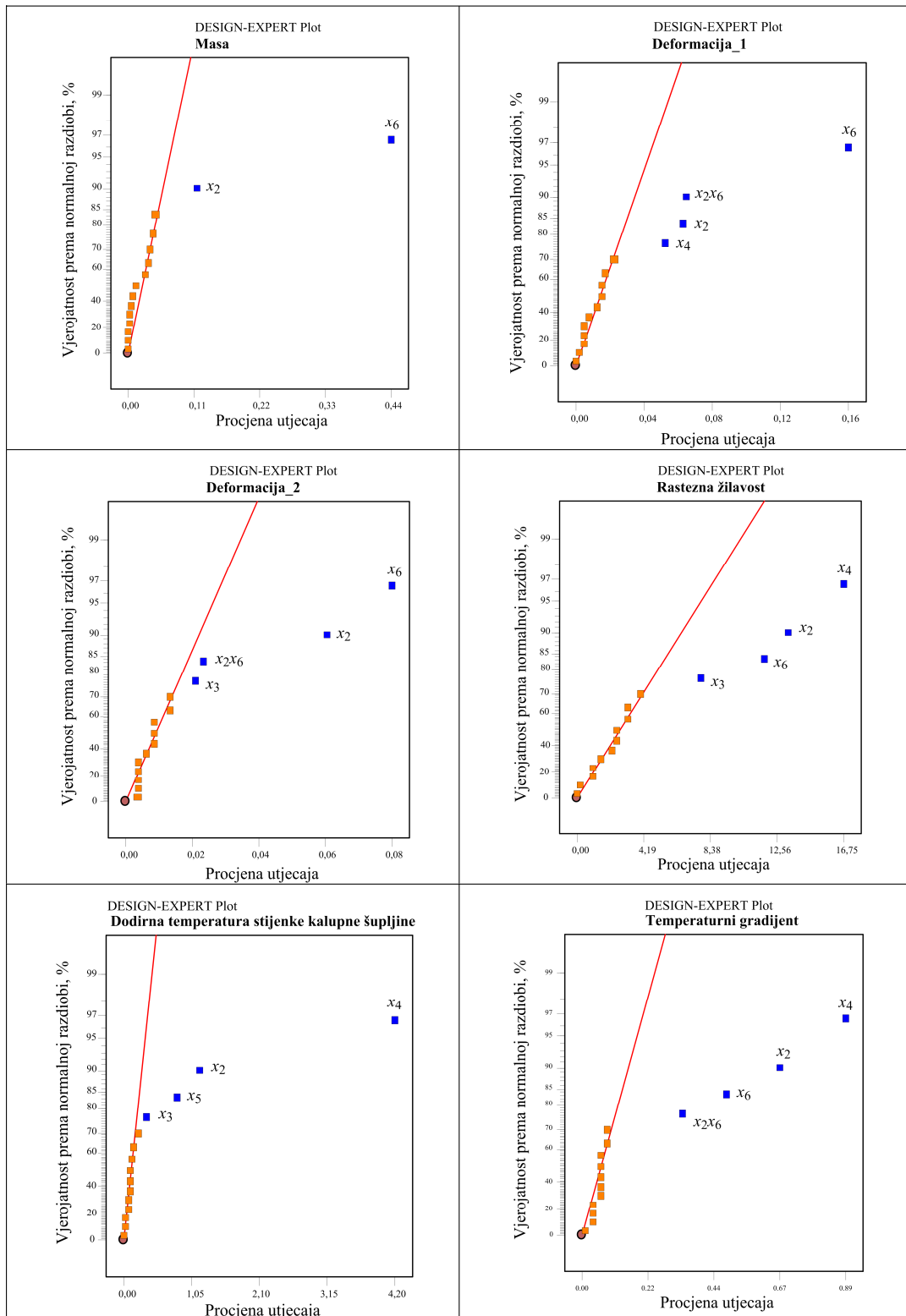
Tablica 9.11 Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja promatranih svojstava

Svojstvo otpreska	Aritmetička sredina	Standardno odstupanje
Masa	7,92 g	0,048 g
Izmjera 1	100,30 mm	0,024 mm
Izmjera 2	58,26 mm	0,016 mm
Deformacija 1	1,50 mm	0,024 mm
Deformacija 2	0,84 mm	0,016 mm
Rastezna žilavost	109,3 kJ/m ²	4,63 kJ/m ²

Tablica 9.12 prikazuje procjenu utjecaja faktora s pomoću pravca prema normalnoj razdiobi za promatrana svojstva otpreska (masa, deformacija u smjeru osi x - deformacija_1, deformacija u smjeru osi y - deformacija_2, i rastezna žilavost), te na postignuta temperaturna polja stijenke kalupne šupljine (dodirna temperatura i temperaturni gradijent).

Sažetak utjecaja pojedinih faktora i interakcija na promatrana svojstva otpreska prikazan je tablicom 9.13, a osnovni podatci o temperaturnom polju kalupa tablicom 9.14.

Tablica 9.12 Procjena utjecaja faktora pravcem prema normalnoj razdiobi



Tablica 9.13 Sažetak utjecaja pojedinih faktora i interakcija

Faktori i interakcije	Masa	Deformacija_1	Deformacija_2	Žilavost
Tlak ubrizgavanja, x_1				
Naknadni tlak, x_2	1	2	3	3
Vrijeme ubrizgavanja, x_3			1	1
Temperatura taljevine, x_4		1		4
Protok medija za temperiranje, x_5				
Vrijeme naknadnog tlaka, x_6	2	4	4	2
$x_2x_6 + x_3x_4$		3	2	

1...4 - ponderi signifikantnosti faktora i interakcija (najviši broj označuje najjači utjecaj)

Na temelju analize tablica 9.12 i 9.13 moguće je zaključiti kako je dominantan faktor za postizanje promatranih svojstava vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (x_6). Slijedi visina naknadnog tlaka (x_2), te temperatura taljevine (x_4). Konačno kao četvrti utjecajni faktor pojavilo se vrijeme ubrizgavanja (x_3). Pri ocjeni utjecaja interakcija, kako se radi o frakcioniranom pokusu, izravno nije moguće zaključiti je li signifikantna interakcija x_2x_6 ili x_3x_4 . Međutim, kako se u interakcijama nije pojavio niti jedan novi faktor koji već sam nije utjecajan, daljnja analiza utjecaja interakcija nije potrebna.

Pri provedbi pretpokusa mjerena je i zabilježena promjena temperature stijenke kalupne šupljine. Stoga je kao dodatno istraživanje načinjena analiza utjecaja ulaznih podesivih parametara na postizanje određene dodirne temperature (temperatura koja se uspostavlja na stijenci kalupne šupljine u trenutku dodira s plastomerom taljevinom), kao i na postizanje određenog gradijenta temperaturnog polja u kalupu tijekom ciklusa injekcijskog prešanja (razlika između početne i dodirne temperature stijenke kalupne šupljine).

Tablica 9.14 Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja temperaturnog polja kalupa

Svojstvo otpreska	Aritmetička sredina	Standardno odstupanje
Dodirna temperatura stijenke kalupne šupljine	38,25 °C	0,18 °C
Temperaturni gradijent stijenke kalupne šupljine	5,51 °C	0,12 °C

Pri analizi utjecaja parametara injekcijskog prešanja na postizanje određenog temperaturnog polja u hibridnom kalupu dobiveni su kao utjecajni isti parametri kao i pri analizi svojstava otpresaka, uz dodatak protoka medija za temperiranje (x_3). Razlika je u tome što se u ovoj analizi kao dominantni faktor pojavljuje temperatura taljevine (x_4).

Za potrebe daljnjih istraživanja stoga će se rabiti 4 parametra preradbe:

- naknadni tlak
- vrijeme djelovanja naknadnog tlaka
- vrijeme ubrizgavanja
- temperatura taljevine.

9.6.4 Pokus - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (hibridni kalup)

Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka je podesiv parametar, no raspon njegova podešavanja ipak je ograničen. Kako je već spomenuto u poglavlju 3.1.1 naknadni tlak omogućuje dodavanje novog materijala u kalupnu šupljinu (utjecaj na masu otpreska) i nadoknadu stezanja otpreska (utjecaj na deformacije otpreska) samo do trenutka pečačenja ušća. Stoga se vrijeme djelovanja naknadnog tlaka pri uporabi hladnog uljevnog sustava svodi na određivanje vremena hlađenja ušća. Pri tome su na raspolaganju proračun određivanja vremena hlađenja ušća s pomoću opće jednadžbe hlađenja (izraz 3.2), te pokus određivanja vremena djelovanja naknadnog tlaka, pri čemu je glavni pokazatelj masa otpreska.

Parametri preradbe i svojstva plastomernog materijala potrebni za proračun nalaze se u tablici 9.15. Oblik ušća moguće je smatrati pločom debljine 1,2 mm. Kriterij kojeg je potrebno primijeniti u ovom slučaju je postizanje propisane temperature postojanosti oblika u središtu ušća.

Tablica 9.15 Podatci potrebni za proračun vremena djelovanja naknadnog tlaka (PP HJ 325 MO)

Parametar / svojstvo	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Temperatura stijenke kalupne šupljine	ϑ_K	38	°C
Temperatura taljevine	ϑ_T	260	°C
Temperatura postojanosti oblika otpreska	$\hat{\vartheta}_{pO}$	90	°C
Specifični toplinski kapacitet	c_p	2800	J/kgK
Toplinska provodnost	λ	0,14	W/mK
Efektivna toplinska difuzivnost	a_{ef}	$5,56 \cdot 10^{-8}$	m ² /s
Gustoća	ρ	900	kg/m ³
Debljina ušća	s_o	1,20	mm
Koeficijent unutrašnjosti - ploča	K_U	$4/\pi$	-
Koeficijent oblika - ploča	K_o	1	-

Računsko maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka iznosi:

$$t_h = \frac{s_o^2}{a_{ef} \cdot \pi^2 \cdot K_o} \cdot \ln \left(K_U \frac{\vartheta_T - \vartheta_K}{\hat{\vartheta}_{pO} - \vartheta_K} \right) = 4,5 \text{ s}$$

9.6.4.1 Provedba pokusa - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (hibridni kalup)

Pri provedbi pokusa za određivanje maksimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka, određeno je početno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka na 3,0 s. Na temelju prethodnog proračuna procijenjeno je kako to vrijeme ne bi trebalo prelaziti preko 6,0 s, pa je to ujedno prihvaćeno kao maksimalna vrijednost tijekom pokusa.

Pri svakoj vrijednosti vremena djelovanja naknadnog tlaka, izrađeno je po 3 otpreska, nakon čega je vrijeme djelovanja naknadnog tlaka produljeno za 0,2 s. Postupak je ponavljan do postizanja vremena od 6,0 s. Otpresci su obilježeni tako da je lako identificiranje pri kojem vremenu djelovanja naknadnog tlaka su izrađeni. Pokus je načinjen sa dvije grupe osnovnih parametara preradbe. U prvoj su definirani parametri koji bi trebali rezultirati većom masom (primjerice viši tlakovi, više temperature taljevine, dulje vrijeme ubrizgavanja), a u drugoj parametri koji bi trebali rezultirati manjom masom otpresaka.

Naknadni tlak u prvom slučaju dobiven je postupnim povišenjem sve do pojave srha na otpresku. Pri naknadnom tlaku od 550 bar i temperaturi taljevine od 240 °C došlo je do vidljive pojave srha uz postignutu debljinu stijenke od 1,22 mm (slika 9.22 a). Već i pri manjem povišenju naknadnog tlaka dolazilo je do sve izraženije pojave srha (slika 9.22 b) što ukazuje na pojačano *disanje* kalupa, odnosno na izraženo stlačivanje prototipnih kalupnih umetaka.



Slika 9.22 Pojava srha na otpresku (hibridni kalup): a - $p_n = 550 \text{ bar}$ i $\vartheta_T = 240 \text{ °C}$,
b - $p_n = 600 \text{ bar}$ i $\vartheta_T = 240 \text{ °C}$

Uz pojavu srha također je uočeno i povećanje debljine stijenke otpreska koja je pri tlaku od 600 bar iznosila 1,26 mm. Stoga je naknadni tlak u prvoj grupi parametara podešen na 520 bar (tablica 9 16). Nakon završetka pokusa otpresci su izvagani digitalnom vagom opisanom u poglavlju 9.2.6.6.

Tablica 9.16 Parametri preradbe - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (hibridni kalup)

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Tlak ubrizgavanja	p_u	350 / 350	bar
Vrijeme ubrizgavanja	t_u	0,4 / 0,2	s
Temperatura taljevine	\mathcal{G}_T	260 / 240	°C
Naknadni tlak	p_n	520 / 300	bar
Dopunsko vrijeme hlađenja otpreska	t_d	15 / 15	s
Protok medija za temperiranje	q_M	5 / 5	l/min
Temperatura okoline	\mathcal{G}_O	25 / 25	°C

9.6.4.2 Rezultati pokusa - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (hibridni kalup)

Rezultati vaganja otpresaka pri obje grupe parametara prikazani su tablicama 13.9 i 13.10 u prilogu 13.4. U slučaju prve skupine parametara masa otpreska ustalila se nakon 5,0 s i iznosila je 8,41 g. U slučaju druge skupine parametara masa otpreska ustalila se nakon 4,8 s, a iznosila je 8,15 g. Na temelju takvih rezultata moguće je zaključiti kako vrijeme djelovanja naknadnog tlaka nije osjetljivo na promjenu podesivih parametara injekcijskog prešanja (razlika 0,2 s). Promjena je uočena u postizivoj masi otpresaka koja je u slučaju prve skupine parametara bitno veća nego li pri drugoj skupini. Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka od 5,0 s uzeto je stoga kao maksimalno vrijeme tijekom kojeg naknadni tlak ima utjecaja na otpresak.

9.6.5 Pokus - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu

Iako je vrijeme djelovanja naknadnog tlaka najutjecajniji faktor iz pretpokusa, na temelju pokusa za određivanje maksimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka njegova je vrijednost ustaljena na 5,0 s i s tom su se vrijednošću provele preostale analize. Na taj način je broj podesivih parametara injekcijskog prešanja, s pomoću kojih će se provoditi daljnja analiza utjecaja na svojstva otpreska, sveden na tri parametra:

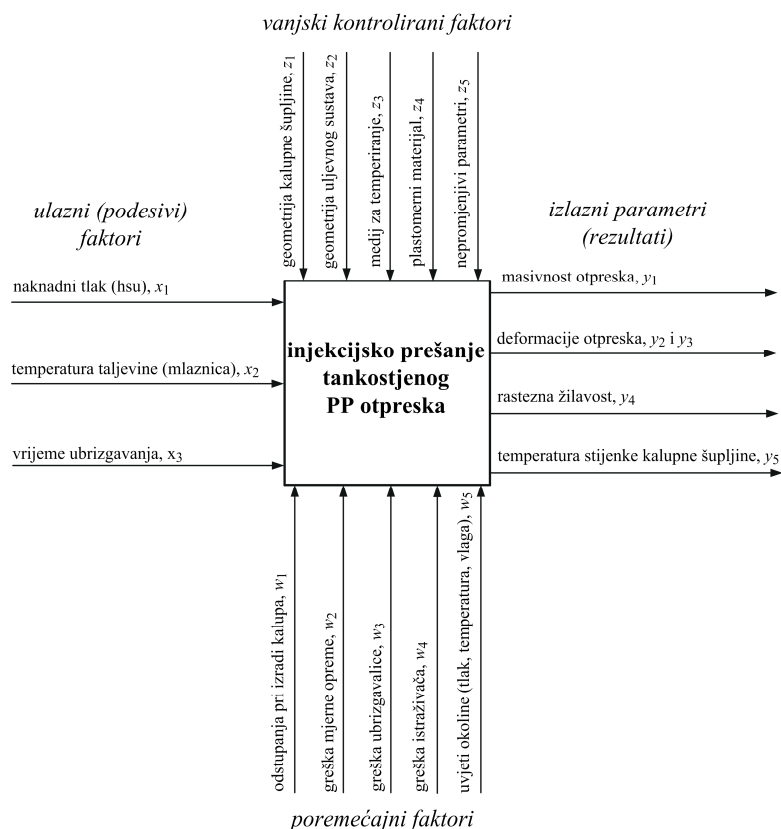
- naknadni tlak, x_1
- temperatura taljevine, x_2
- vrijeme ubrizgavanja, x_3 .

9.6.5.1 Provedba pokusa - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu

Za analizu utjecaja navedenih parametara na svojstva otpreska rabljen je centralno kompozitni pokus sa 3 faktora. Tijekom provedbe glavnog (centralno kompozitnog) pokusa definirani su nepromjenjivi parametri injekcijskog prešanja (tablica 9.17). Model pokusa prikazuje slika 9.23.

Tablica 9.17 Nepromjenjivi parametri injekcijskog prešanja (pokus u hibridnom kalupu)

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Tlak ubrizgavanja	p_u	350	bar
Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	t_{np}	5	s
Dodatno vrijeme hlađenja otpreska	t_d	15	s
Protok medija za temperiranje	q_M	5	l/min



Slika 9.23 Model centralno kompozitnog pokusa

Na temelju matrice pokusa koju je generirao računalni program *DESIGN EXPERT*, bilo je potrebno načiniti 20 stanja pokusa (15 stanja u vrhovima i osima i 5 stanja u centru pokusa). Pri tome su se podesivi parametri definirali na 5 razina (tablica 9.18). Tablica 13.11 (prilog 13.5) prikazuje vrijednosti podesivih parametara za svako stanje pokusa. Pokus se izvodio statistički slučajno. Temperatura okoline iznosila je 26 °C. U svakom stanju pokusa prije izuzimanja ispitaka čekalo se do postizanja toplinske ravnoteže kalupa (na temelju izmjerenog temperaturnog polja stijenke kalupne šupljine). Nakon toga je izuzeto po 10 ispitaka za daljnju analizu svojstava otpresaka. Nakon provedenog pokusa prije analize ispitaka čekalo se 48 sati

radi naknadne kristalizacije PP-a. Od 10 ispitaka, s pomoću tablice slučajnih brojeva izabrano je po 3 ispitka iz svakog stanja pokusa.

Tablica 9.18 Razine promjenjivih parametara injekcijskog prešanja (pokus u hibridnom kalupu)

Razine	Naknadni tlak x_1	Temperatura taljevine x_2	Vrijeme ubrizgavanja x_3
-1,68	280 bar	223 °C	0,20 s
-1	330 bar	230 °C	0,30 s
0	400 bar	240 °C	0,45 s
1	470 bar	250 °C	0,60 s
1,68	520 bar	257 °C	0,70 s

9.6.5.2 Rezultati pokusa - injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu

Vrijednosti mjerenja mase otpresaka, deformacija otpresaka u smjeru osi X i Y , te rastezne žilavosti otpresaka nalaze se u tablicama 13.12 do 13.15 u prilogu 13.5. Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja promatranih svojstava nalaze se u tablici 9.19. Kako je pri mjerenju prototipnih i čeličnih (klasičnih) kalupnih umetaka primijećena razlika u postignutim izmjerama, za daljnju analizu nisu rabljena svojstva *Izmjera_1* i *Izmjera_2*, već samo deformacije otpresaka koje u sebi sadrže podatke o skupljanju i vitoperenju otpresaka. Pretpokus je pokazao kako se pri te dvije kategorije svojstava mogu očekivati isti trendovi tijekom procesa injekcijskog prešanja. U tablicama 13.16 do 13.24 u prilogu 13.5 prikazani su rezultati obrade dobivenih podataka (analiza varijance). Tijekom pokusa također su praćena dva parametra injekcijskog prešanja koja opisuju temperaturno polje stijenke kalupne šupljine: dodirna temperatura i temperaturni gradijent (tablica 9.19). U tablici 13.25 u prilogu 13.5 prikazani su rezultati statističke obrade podataka za dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine.

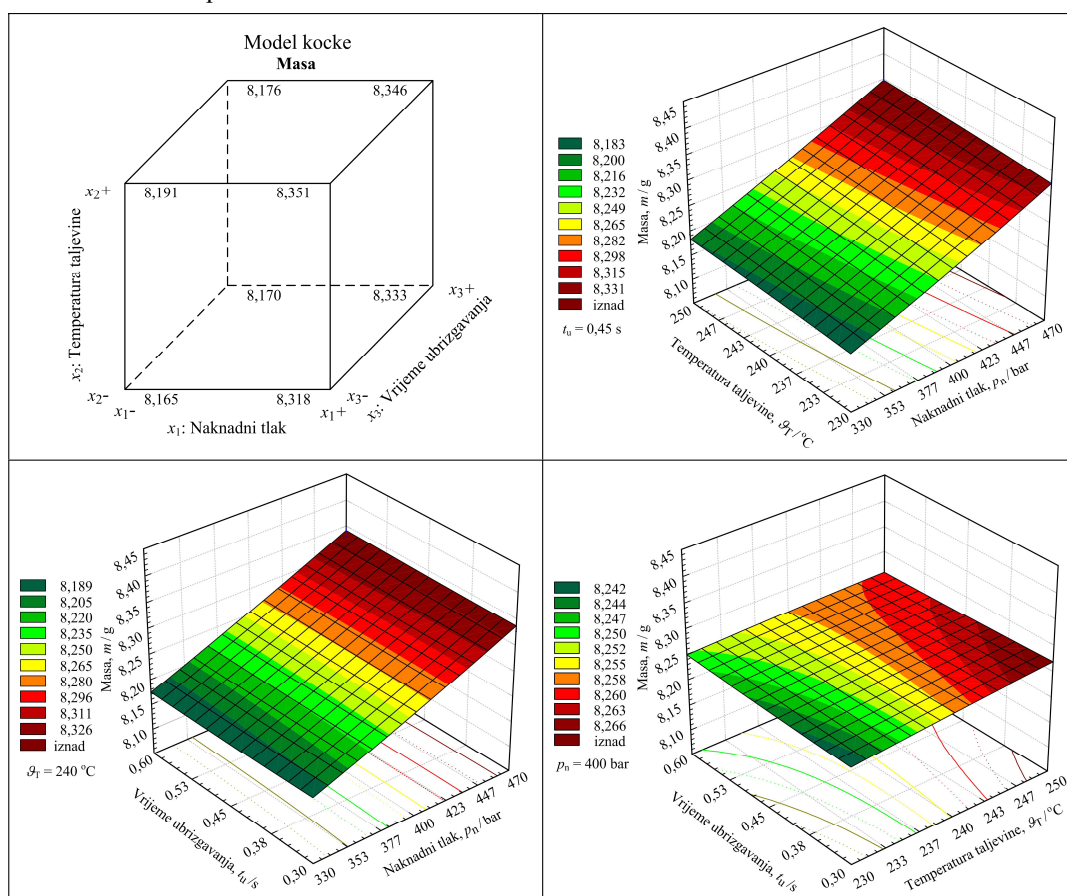
Tablica 9.19 Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja promatranih svojstava

Svojstvo otpreska / parametar	Aritmetička sredina	Standardno odstupanje
Masa	8,26 g	0,007 g
Izmjera 1	100,22 mm	0,021 mm
Izmjera 2	58,12 mm	0,019 mm
Deformacija 1	1,59 mm	0,022 mm
Deformacija 2	0,98 mm	0,020 mm
Rastezna žilavost	96,6 kJ/m ²	3,97 kJ/m ²
Dodirna temperatura	36,55 °C	0,089 °C
Temperaturni gradijent	5,76 °C	0,11 °C

Tablica 9.20 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na masu otpreska.

Tablica 9.20 prikazuje istodobni utjecaj sva tri podesiva parametara na masu otpreska s pomoću modela kocke (prostorni prikaz). Model kocke omogućuje uvid u krajnje vrijednosti promatranog svojstva na vrhovima kocke, no ne daje uvid u razdiobu promatranog svojstva između vrhova kocke. Stoga tablica 9.20 sadrži i tri odziva koja prikazuju istodobni utjecaj dvaju podesivih faktora uz održavanje trećeg faktora na srednjoj vrijednosti.

Tablica 9.20 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska masa

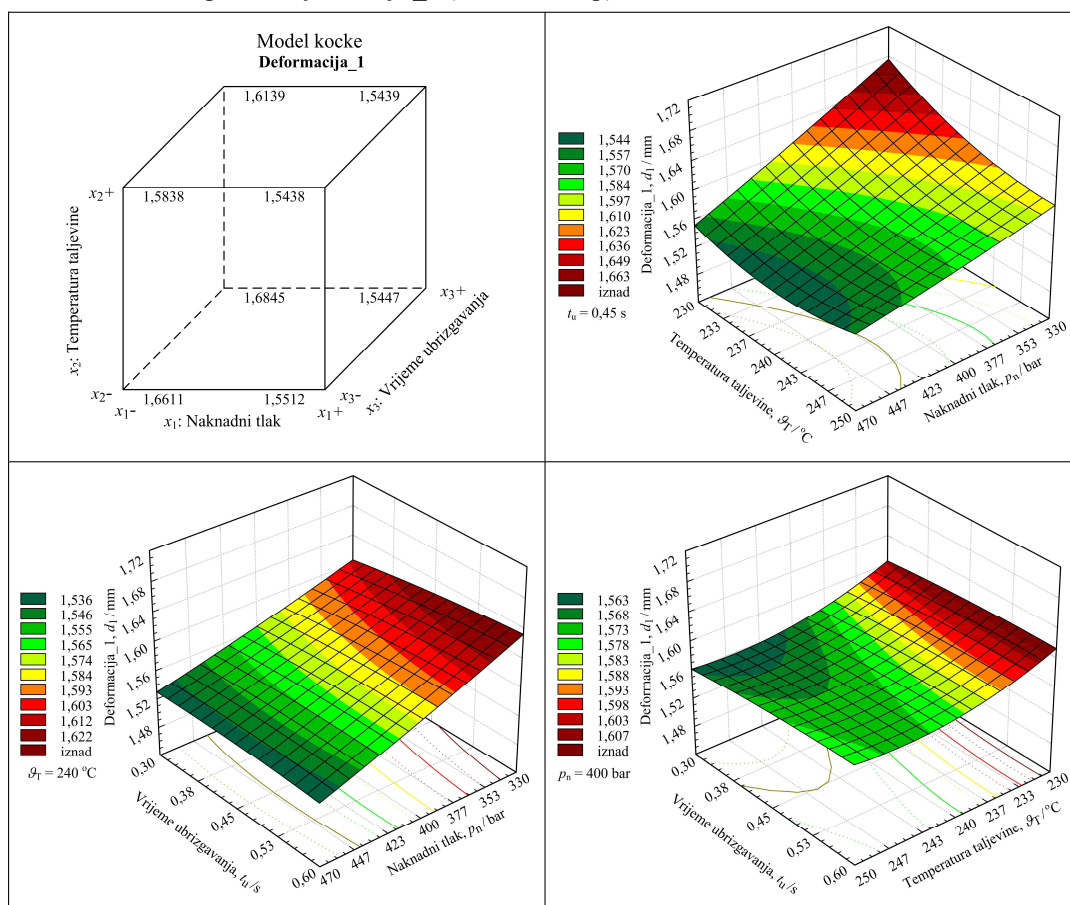


Na temelju koeficijenata regresije navedenih u tablici 13.17 (prilog 13.5), funkcija ovisnosti mase otpresaka o podesivim parametrima injekcijskog prešanja (odziv) može se opisati polinomom drugog stupnja 9.10. Pri tome se iznosi podesivih parametara x_1 , x_2 i x_3 upisuju u kodiranim vrijednostima (tablica 13.18, prilog 13.5):

$$\hat{y}_{\text{masa (h)}} = 8,25 + 0,081x_1 + 2,61 \cdot 10^{-3}x_1^2 + 9,547 \cdot 10^{-3}x_2 - 1,515 \cdot 10^{-3}x_2^2 - 7,809 \cdot 10^{-5}x_3 + \quad (9.10) \\ + 8,421 \cdot 10^{-4}x_3^2 + 1,663 \cdot 10^{-3}x_1x_2 + 2,495 \cdot 10^{-3}x_1x_3 - 4,989 \cdot 10^{-3}x_2x_3$$

Tablica 9.21 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na deformaciju otpreska u smjeru osi X (*deformacija_1*). Dati su rezultati prikazani s pomoću modela kocke, te tri odzivne plohe s istodobnim utjecajem po dva podesiva parametra uz održavanje trećeg na srednjoj vrijednosti.

Tablica 9.21 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska *deformacija_1* (hibridni kalup)

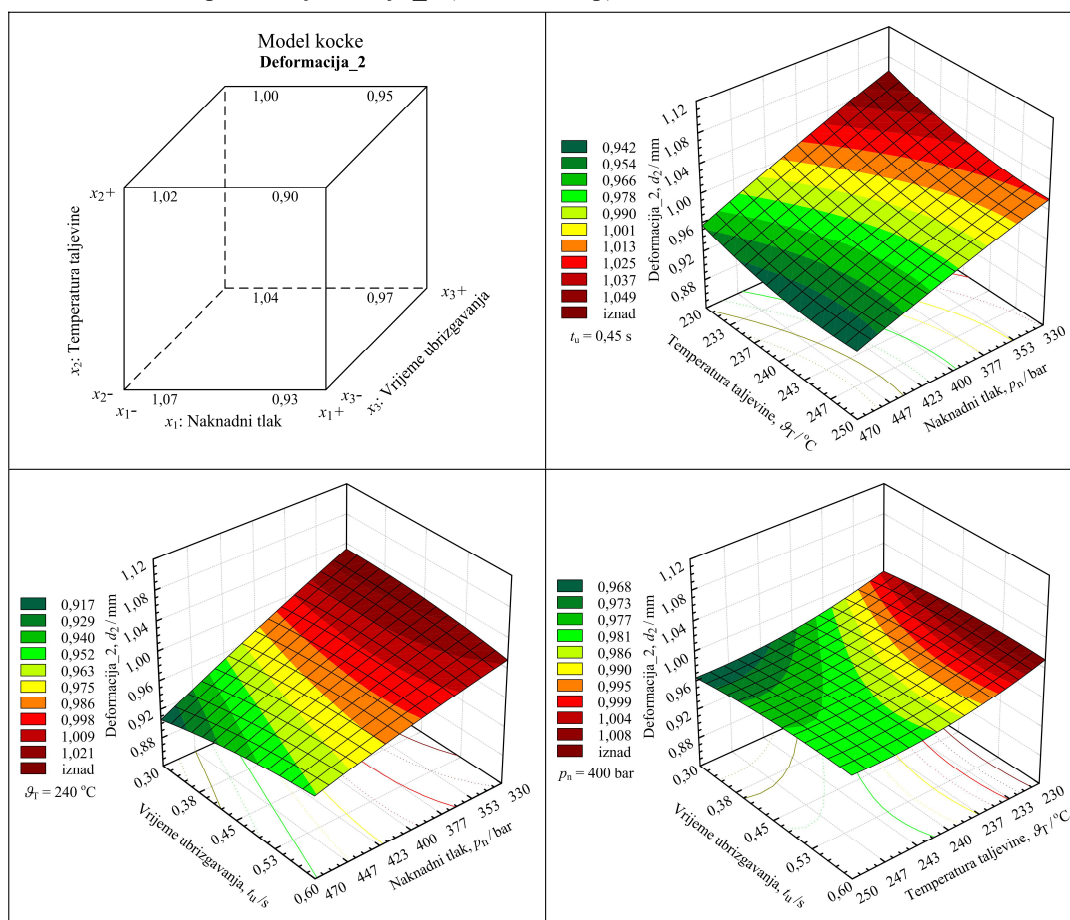


Na temelju koeficijenata regresije navedenih u tablici 13.20 (prilog 13.5), funkcija ovisnosti deformacije u smjeru osi X otpresaka (*deformacija_1*) o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati polinomom drugog stupnja 9.11 (iznosi parametara x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranim vrijednostima):

$$\hat{y}_{\text{def}_1(\text{h})} = 1,57 - 0,045x_1 + 2,475 \cdot 10^{-3}x_1^2 - 0,02x_2 + 0,018x_2^2 + 5,896 \cdot 10^{-3}x_3 - 2,828 \cdot 10^{-3}x_3^2 + 0,017x_1x_2 - 7,484 \cdot 10^{-3}x_1x_3 + 1,663 \cdot 10^{-3}x_2x_3 \quad (9.11)$$

Tablica 9.22 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na deformaciju otpreska u smjeru osi Y (*deformacija_2*). Rezultati su prikazani s pomoću modela kocke, te tri odzivne plohe s istodobnim utjecajem po dva podesiva parametra uz održavanje trećeg na srednjoj vrijednosti.

Tablica 9.22 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska *deformacija_2* (hibridni kalup)

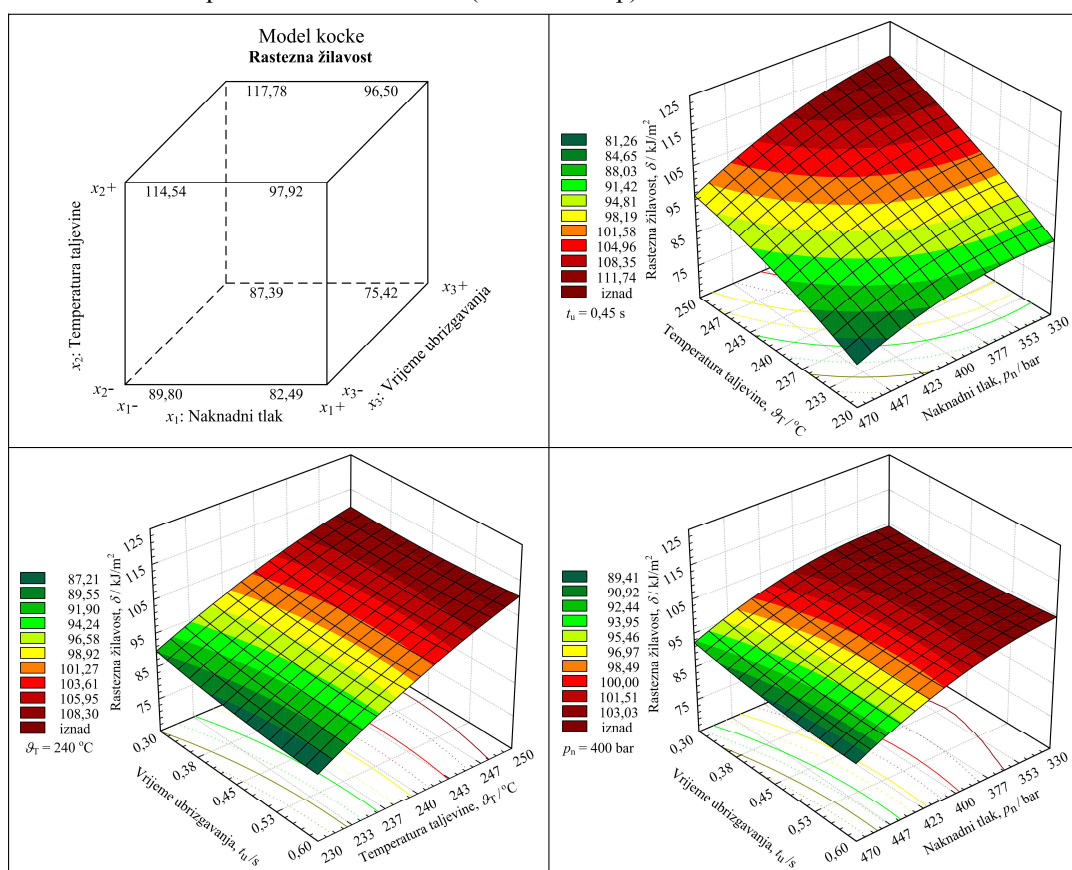


Prema koeficijentima regresije navedenim u tablici 13.22 (prilog 13.5), funkcija ovisnosti deformacije otpresaka u smjeru osi Y (*deformacija_2*) o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati sljedećim polinomom (iznosi parametara x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranim vrijednostima):

$$\hat{y}_{\text{def}_2(\text{h})} = 0,98 - 0,047x_1 - 2,896 \cdot 10^{-3}x_1^2 - 0,017x_2 + 0,011x_2^2 + 5,974 \cdot 10^{-3}x_3 - 5,253 \cdot 10^{-3}x_3^2 + 5,821 \cdot 10^{-3}x_1x_2 + 0,017x_1x_3 + 8,316 \cdot 10^{-4}x_2x_3 \quad (9.12)$$

Tablica 9.23 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na rasteznu žilavost otpreska. Rezultati su prikazani s pomoću modela kocke, te tri odzivne plohe s istodobnim utjecajem po dva podesiva parametra injekcijskog prešanja uz održavanje trećeg na srednjoj vrijednosti.

Tablica 9.23 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska rastezna žilavost (hibridni kalup)

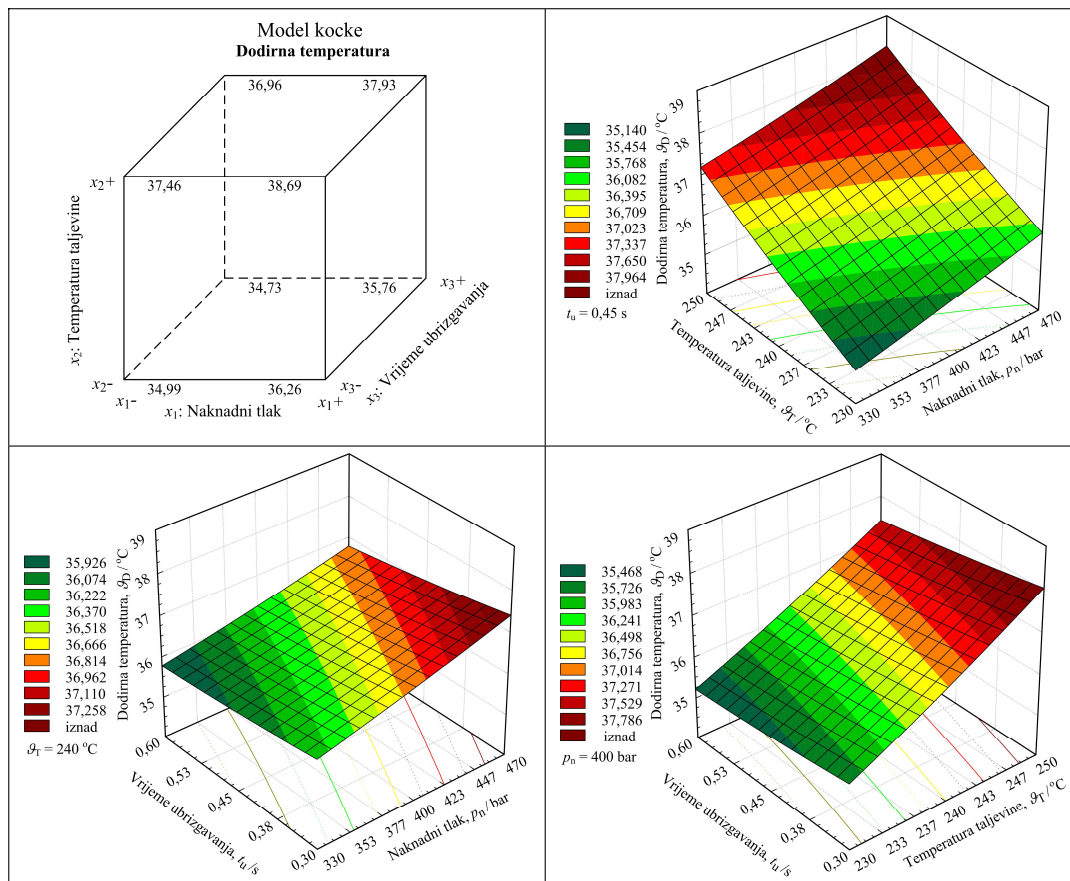


Prema koeficijentima regresije navedenim u tablici 13.24 (prilog 13.5), funkcija ovisnosti rastezne žilavosti otpresaka o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati sljedećim polinomom drugog stupnja (x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranim vrijednostima):

$$\hat{y}_{\text{žilavost(h)}} = 99,61 - 7,15x_1 - 3,48x_1^2 + 11,46x_2 - 1,95x_2^2 - 0,96x_3 + 1,06x_3^2 - 2,33x_1x_2 - 1,16x_1x_3 + 1,41x_2x_3 \quad (9.13)$$

Tablica 9.24 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine hibridnog kalupa.

Tablica 9.24 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine (hibridni kalup)



Prema koeficijentima regresije navedenim u tablici 13.26 (prilog 13.5), funkcija ovisnosti dodirne temperature stijenke kalupne šupljine o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati sljedećim polinomom (x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranim vrijednostima):

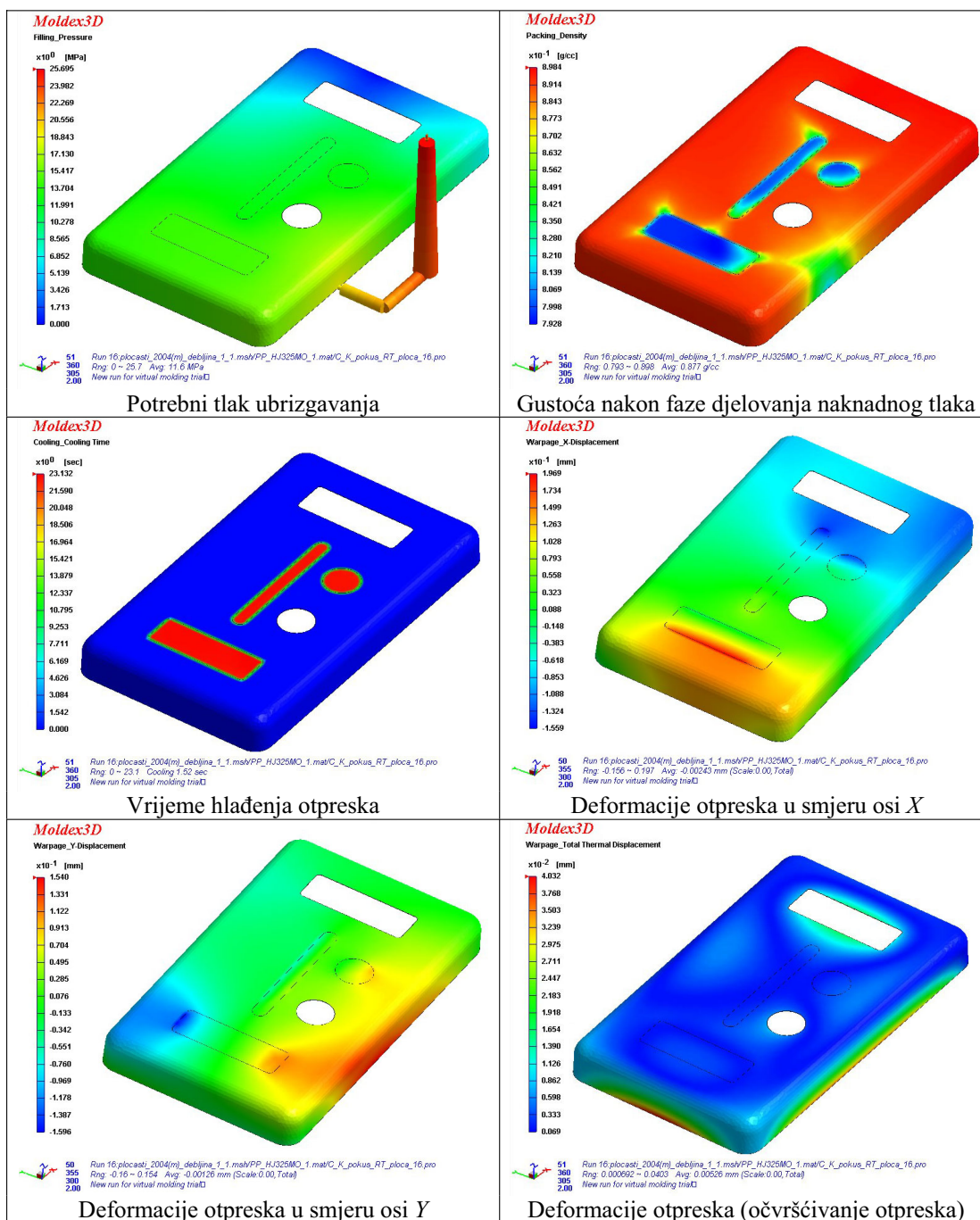
$$\hat{y}_{\text{dodirna_temperatura}(h)} = 36,46 + 0,56x_1 + 0,033x_1^2 + 1,16x_2 + 0,068x_2^2 - 0,25x_3 + 0,033x_3^2 - 0,012x_1x_2 - 0,062x_1x_3 - 0,062x_2x_3 \quad (9.14)$$

9.6.6 Računalna simulacija - pokus (hibridni kalup)

Pri računalnoj simulaciji tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu nastojalo se oponašati stanja provedenog centralno kompozitnog plana pokusa. Pri tome su mijenjani podesivi parametri koje se mijenjalo tijekom stvarnog pokusa. Razlog uporabe računalne simulacije je usporedba sa stvarnim postignutim vrijednostima, te procjena primjenjivosti računalne simulacije pri uporabi hibridnih kalupa.

Tablica 9.25 prikazuje važnije rezultate računalne simulacije (stanje u centru pokusa), usporedive s promatranim parametrima i svojstvima otpresaka postignutim u stvarnom pokusu.

Tablica 9.25 Važniji rezultati simulacije tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu (centralno kompozitni pokus - stanje u centru pokusa)



Potrebni tlak ubrizgavanja

Gustoća nakon faze djelovanja naknadnog tlaka

Vrijeme hlađenja otpreska

Deformacije otpreska u smjeru osi X

Deformacije otpreska u smjeru osi Y

Deformacije otpreska (očvršćivanje otpreska)

9.6.7 Pokus - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (klasični kalup)

Kako bi se utvrdilo maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka u klasičnom kalupu, ponovljen je pokus iz poglavlja 9.6.4 no ovoga puta s ugrađenim kalupnim umetcima načinjenim od klasičnog kalupnog materijala - čelika Č4742 (1.2312).

9.6.7.1 Provedba pokusa - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (klasični kalup)

Pokus za određivanje maksimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka u klasičnom kalupu proveden je na identičan način kao i u slučaju hibridnog kalupa (poglavlje 9.6.4.1), te su rabljene iste dvije skupine parametara injekcijskog prešanja (tablica 9.16). Prije provedbe pokusa načinjena je analiza utjecaja naknadnog tlaka na stlačivost klasičnih kalupnih umetaka. Prva izraženija pojava srha uočena je pri naknadnom tlaku od 800 bar i pri temperaturi taljevine od 260 °C (slika 9.24), uz debljinu stijenke od 1,16 mm. Pri temperaturi taljevine od 240 °C izraženija pojava srha nije uočena ni pri naknadnom tlaku od 1 000 bar.



Slika 9.24 Pojava srha na otpresku (klasični kalup): $p_n = 800 \text{ bar}$ i $T_f = 260 \text{ °C}$

9.6.7.2 Rezultati pokusa - maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (klasični kalup)

Rezultati vaganja otpresaka pri obje skupine parametara prikazani su tablicama 13.27 i 13.28 (prilog 13.6). U slučaju prve skupine parametara masa otpreska ustalila se nakon 5,0 s i iznosila je 7,99 g. U slučaju druge skupine parametara masa otpreska ustalila se nakon 4,8 s, a iznosila je 7,75 g. Maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka gotovo se ne razlikuje od onog postignutog u hibridnom kalupu, no vidljive razlike se javljaju u masi otpresaka. Kao izvore tih razlika moguće je navesti razlike u izmjerama prototipnih i klasičnih kalupnih umetaka i razlike u stlačivosti materijala od kojeg su načinjeni. Mjerenjem kalupnih umetaka utvrđene su razlike u

izmjerama matrica i žigova (tablica 9.26), te se došlo do postignute debljine stijenke otpreska od 1,10 mm. Proizvođač plastomera je deklarirao skupljanje PP-a s vrijednošću 1,5 %. Stoga je jednostavno procijeniti izmjere otpresaka u obje osi (tablica 9.27).

Tablica 9.26 Razlike u izmjerama matrica hibridnog i klasičnog kalupa

Kalup	Izmjera u smjeru osi X mm		Izmjera u smjeru osi Y mm	
	Matrica	Žig	Matrica	Žig
Hibridni	101,80	99,50	59,1	56,8
Klasični	101,50	99,30	58,9	56,5
Razlika	0,30	0,20	0,20	0,20

Tablica 9.27 Razlike u izmjerama otpresaka načinjenih u hibridnom i klasičnom kalupu

Kalup	Izmjera u smjeru osi X mm	Izmjera u smjeru osi Y mm
Hibridni	100,30	58,2
Klasični	100,00	58,0
Razlika	0,30	0,20

Na temelju tih izmjera moguće je s pomoću 3D računalnog modela obaju otpresaka procijeniti kolika je razlika u masi otpresaka zbog razlika u izmjerama kalupnih umetaka. U slučaju hibridnog kalupa procijenjena je masa otpreska na 8,13 g, dok je slučaju klasičnog kalupa procijenjena masa otpreska iznosi 7,90 g. Ukoliko se masa otpreska od 7,90 g smatra nominalnom, odstupanje u hibridnom kalupu iznosi 2,9 %, što valja imati na umu pri optimiranju parametara injekcijskog prešanja u oba kalupa. Pri optimiranju će se tih 2,9 % odstupanja u masi smatrati dopuštenima, a ostatak razlike smatrati će se rezultatom povišene stlačivosti prototipnih umetaka. Radi identičnosti parametara injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu s onima u hibridnom kalupu, vrijeme djelovanja naknadnog tlaka u nastavku istraživanja bilo je 5,0 s.

9.6.8 Pokus - injekcijsko prešanje u klasičnom kalupu

Kako je cilj čitavog istraživanja usporedba utjecaja hibridnog i klasičnog kalupa na svojstva otpresaka, u slučaju klasičnog kalupa nije proveden pretpokus radi utvrđivanja utjecajnih parametara preradbe, već su preuzeti podesivi parametri koji su bili rabljeni i pri pokusu sa hibridnim kalupom. To su: naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine, (x_2) i vrijeme ubrizgavanja, (x_3).

9.6.8.1 Provedba pokusa - injekcijsko prešanje u klasičnom kalupu

Za analizu utjecaja navedenih parametara na svojstva otpreska načinjenih u klasičnom kalupu rabljen je isti centralno kompozitni pokus sa 3 faktora kao i pri injekcijskom prešanju u hibridnom kalupu. Tijekom provedbe pokusa preuzeti su i isti nepromjenjivi parametri injekcijskog prešanja (tablica 9.17), te razine podesivih promjenjivih parametara preradbe (tablica 9.18). Model pokusa prikazan je slikom 9.24.

Isto kao i pri provedbi pokusa sa hibridnim kalupom, s pomoću računalnog programa *DESIGN EXPERT* generirana je matrica pokusa, te vrijednosti podesivih parametara (tablica 13.29, prilog 13.7).

Pokus se izvodio statistički slučajno. Temperatura okoline iznosila je 24 °C. U svakom stanju pokusa prije izuzimanja ispitaka čekalo se do postizanja toplinske stabilnosti kalupa (na temelju izmjerenog temperaturnog polja stijenke kalupne šupljine). Nakon toga je izuzeto po 10 ispitaka za daljnju analizu svojstava otpresaka. Nakon provedenog pokusa prije analize ispitaka čekalo se 48 sati radi naknadne kristalizacije PP-a. Od 10 ispitaka, s pomoću tablice slučajnih brojeva za analizu utjecaja parametara preradbe na postignuta svojstva otpreska izabrano je po 3 ispitka za svako stanje pokusa.

9.6.8.2 Rezultati pokusa - injekcijsko prešanje u klasičnom kalupu

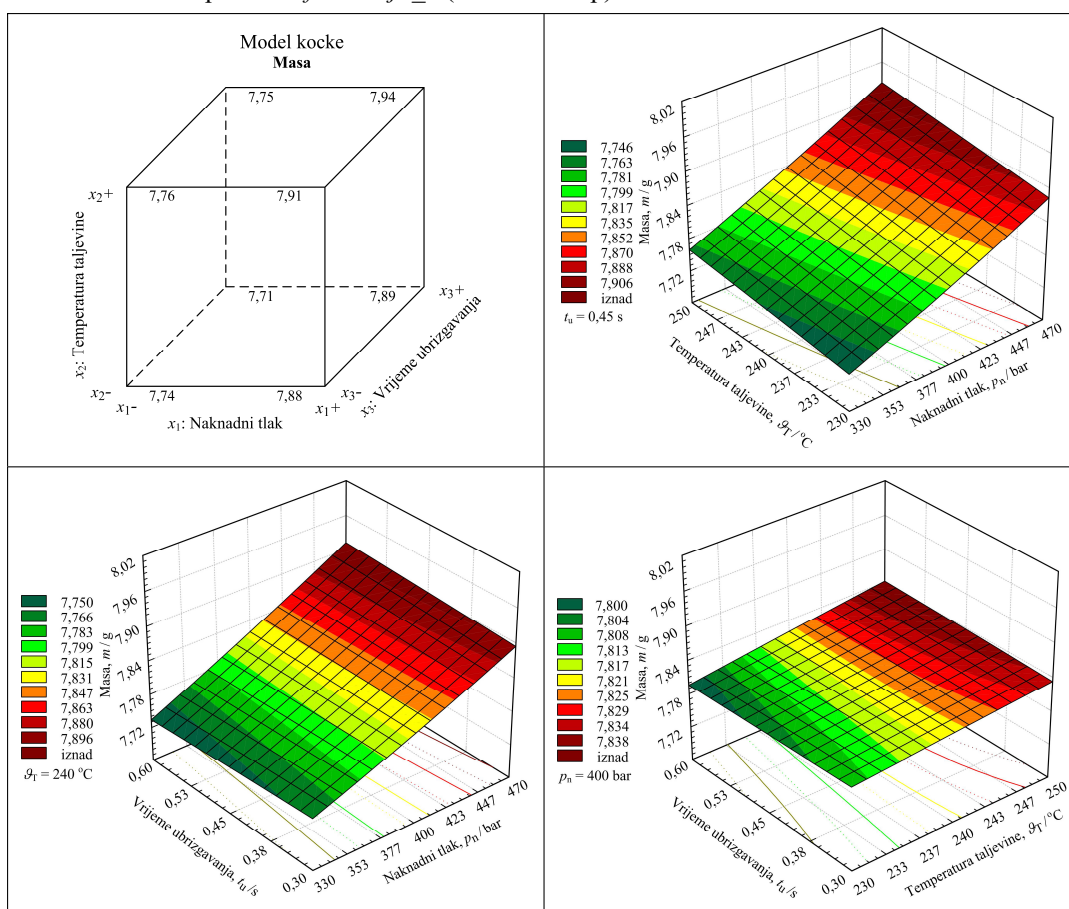
Vrijednosti promatranih svojstava otpreska i temperaturnog polja stijenke kalupne šupljine za klasični kalup nalaze se u tablicama 13.30 do 13.33 (prilog 13.7). Osnovni statistički podatci navedenih svojstava i parametara preradbe nalaze se u tablici 9.28.

Tablica 9.28 Vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih odstupanja promatranih svojstava

Svojstvo otpreska / parametar	Aritmetička sredina	Standardno odstupanje
Masa	7,82 g	0,007 g
Izmjera 1	100,03 mm	0,029 mm
Izmjera 2	57,97 mm	0,032 mm
Deformacija 1	1,47 mm	0,03 mm
Deformacija 2	0,93 mm	0,033 mm
Rastezna žilavost	123,48 kJ/m ²	5,07 kJ/m ²
Dodirna temperatura	32,66 °C	0,10 °C
Temperaturni gradijent	2,53 °C	0,13 °C

Kao i pri analizi hibridnog kalupa za daljnju analizu nisu rabljena svojstva *Izmjera_1* i *Izmjera_2*, već samo deformacije otpresaka. Tablica 9.29 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na deformaciju otpreska u smjeru osi *X* (*deformacija_1*) u slučaju klasičnog kalupa. Dati su rezultati prikazani s pomoću modela kocke, te tri odzivne plohe s istodobnim utjecajem po dva podesiva parametra uz održavanje trećeg na srednjoj vrijednosti.

Tablica 9.29 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska *deformacija_1* (klasični kalup)



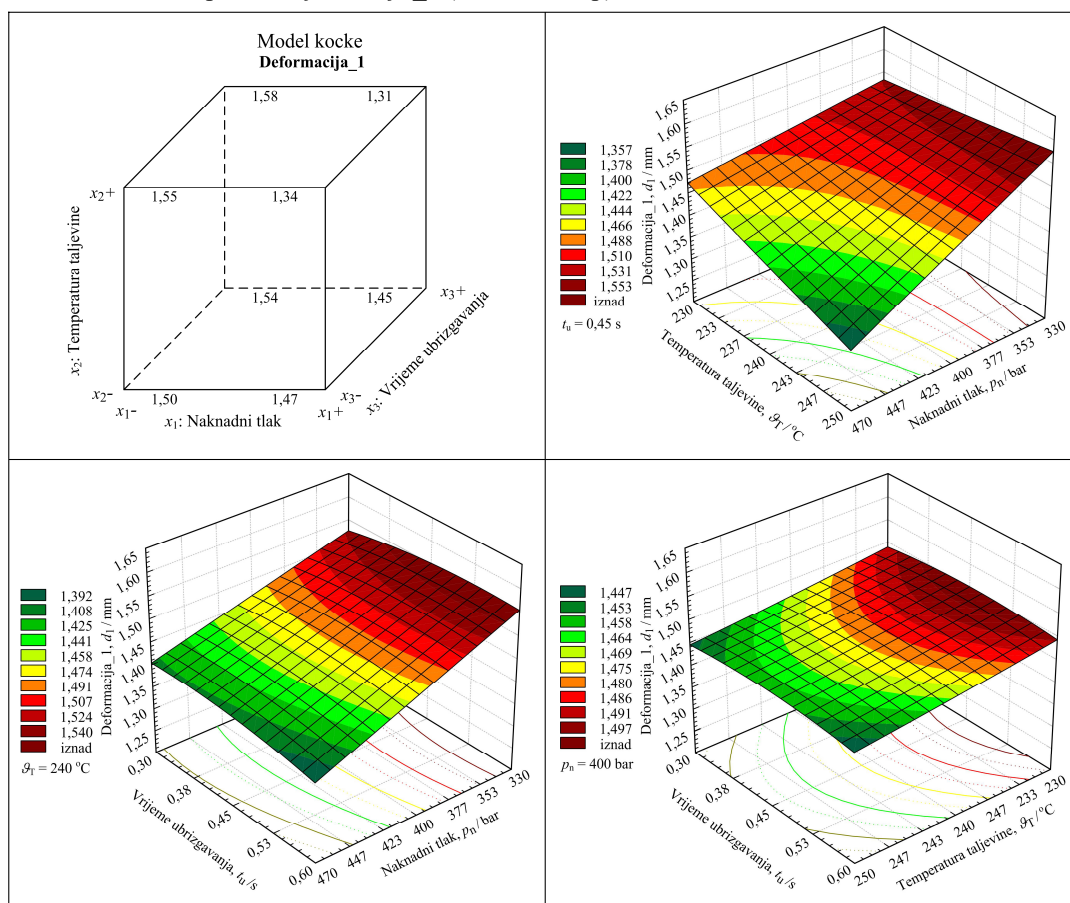
Na temelju koeficijenata regresije navedenih u tablici 13.35 (prilog 13.7), funkcija ovisnosti mase otpresaka načinjenih u klasičnom kalupu o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati sljedećim polinomom drugog stupnja (vrijednosti x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranom obliku - tablica 13.18, prilog 13.5):

$$\hat{y}_{\text{masa (k)}} = 7,82 + 0,080x_1 + 3,611 \cdot 10^{-3}x_1^2 + 0,018x_2 - 5,224 \cdot 10^{-4}x_2^2 - 1,563 \cdot 10^{-4}x_3 + \quad (9.15)$$

$$+ 5,224 \cdot 10^{-4}x_3^2 + 2,5 \cdot 10^{-3}x_1x_2 + 9,167 \cdot 10^{-3}x_1x_3 + 5,0 \cdot 10^{-3}x_2x_3$$

Tablica 9.30 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na deformaciju otpreska u smjeru osi X (*deformacija_1*) načinjenih u klasičnom kalupu. Rezultati su prikazani s pomoću modela kocke, te tri odzivne plohe s istodobnim utjecajem po dva podesiva parametra uz održavanje trećeg na srednjoj vrijednosti.

Tablica 9.30 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska *deformacija_1* (klasični kalup)

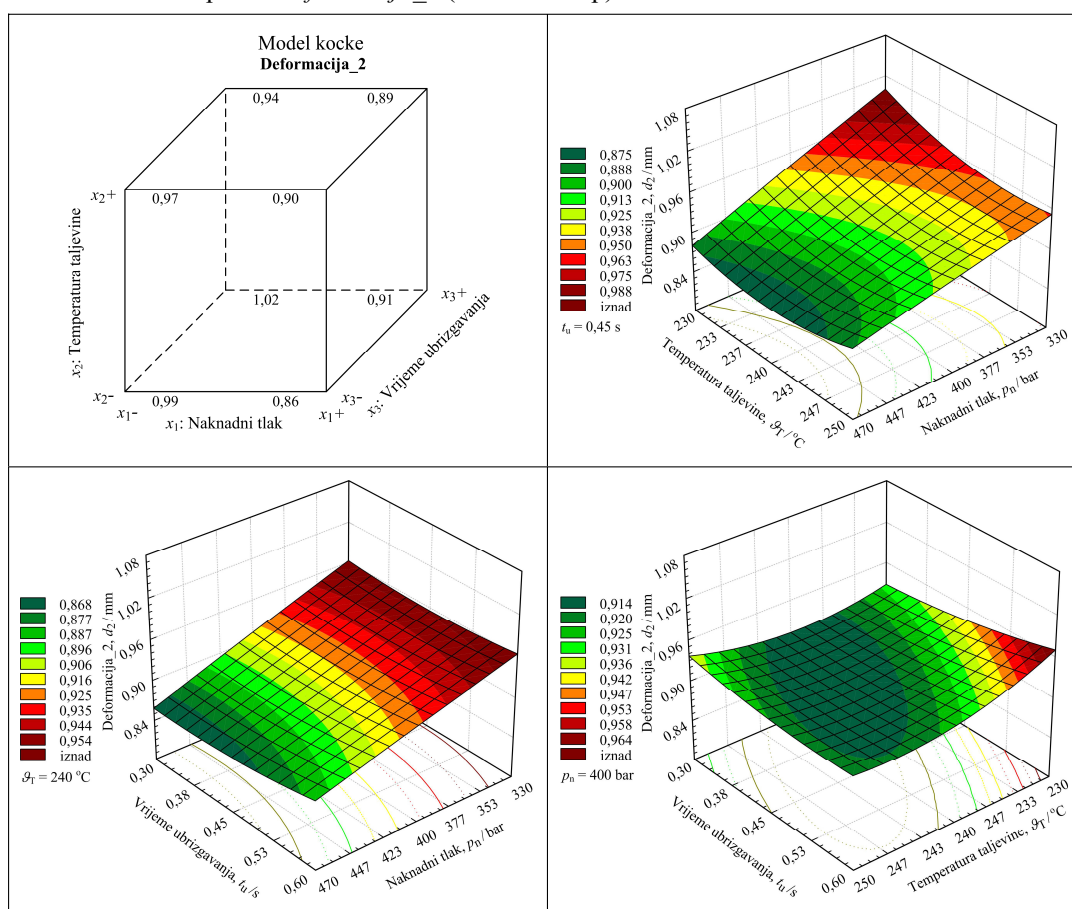


Prema koeficijentima regresije navedenim u tablici 13.37 (prilog 13.7), funkcija ovisnosti deformacije u smjeru osi X (*deformacija_1*) otpresaka načinjenih u klasičnom kalupu o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati polinomom drugog stupnja 9.16 (vrijednosti x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranom obliku):

$$\hat{y}_{\text{def}_1(k)} = 1,48 - 0,075x_1 - 2,202 \cdot 10^{-4}x_1^2 - 0,023x_2 + 1,551 \cdot 10^{-3}x_2^2 + 1,173 \cdot 10^{-4}x_3 - 0,012x_3^2 - 0,045x_1x_2 - 0,014x_1x_3 + 1,667 \cdot 10^{-3}x_2x_3 \quad (9.16)$$

Tablica 9.31 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na deformaciju otpreska u smjeru osi Y (*deformacija_2*) načinjenih u klasičnom kalupu. Rezultati su prikazani s pomoću modela kocke, te tri odzivne plohe s istodobnim utjecajem po dva podesiva parametra uz održavanje trećeg na srednjoj vrijednosti.

Tablica 9.31 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska *deformacija_2* (klasični kalup)

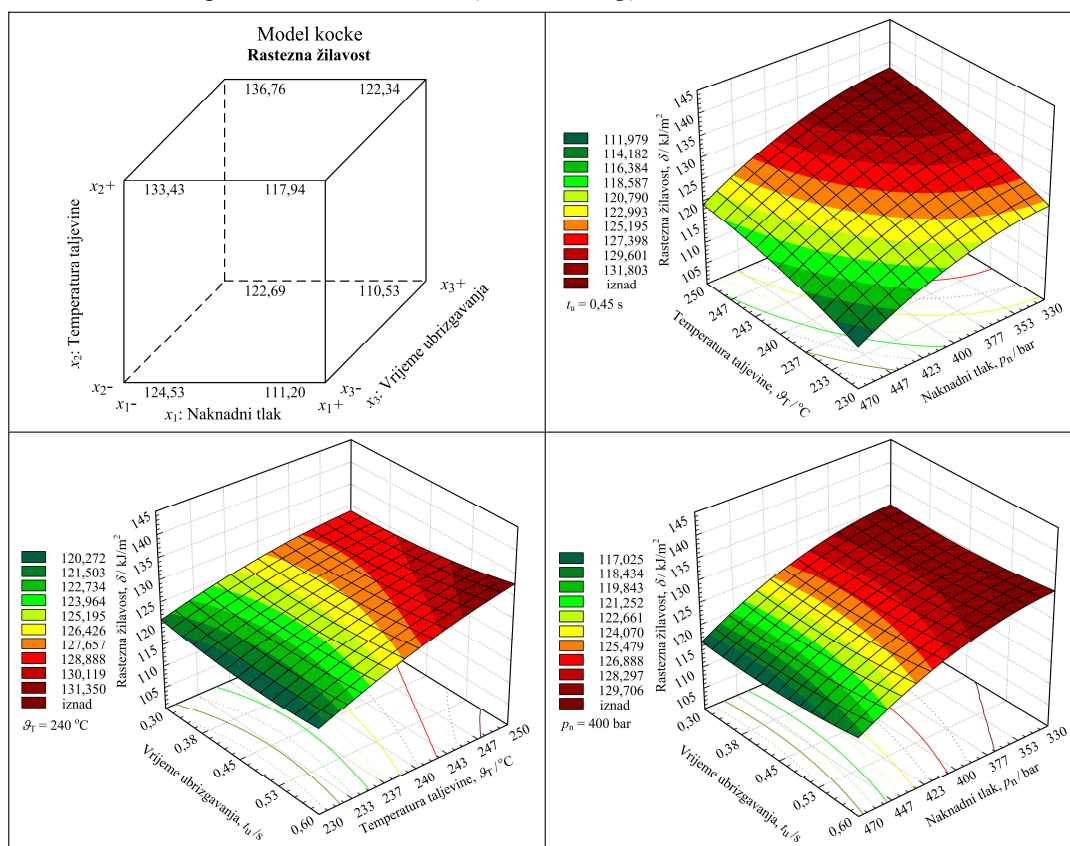


Prema koeficijentima regresije navedenim u tablici 13.39 (prilog 13.7), funkcija ovisnosti deformacije otpresaka u smjeru osi Y (*deformacija_2*) načinjenih u klasičnom kalupu o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati polinomom drugog stupnja 9.17 (vrijednosti x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranom obliku):

$$\hat{y}_{\text{def}_2(k)} = 0,91 - 0,046x_1 - 9,79 \cdot 10^{-4}x_1^2 - 0,011x_2 + 0,02x_2^2 + 5,912 \cdot 10^{-3}x_3 + 7,288 \cdot 10^{-3}x_3^2 + 0,014x_1x_2 + 5,417 \cdot 10^{-3}x_1x_3 - 0,015x_2x_3 \quad (9.17)$$

Tablica 9.32 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na rasteznu žilavost otpreska načinjenih u klasičnom kalupu. Rezultati su prikazani s pomoću modela kocke, te tri odzivne plohe s istodobnim utjecajem po dva podesiva parametra injekcijskog prešanja uz održavanje trećeg na srednjoj vrijednosti.

Tablica 9.32 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na svojstvo otpreska rastezna žilavost (hibridni kalup)

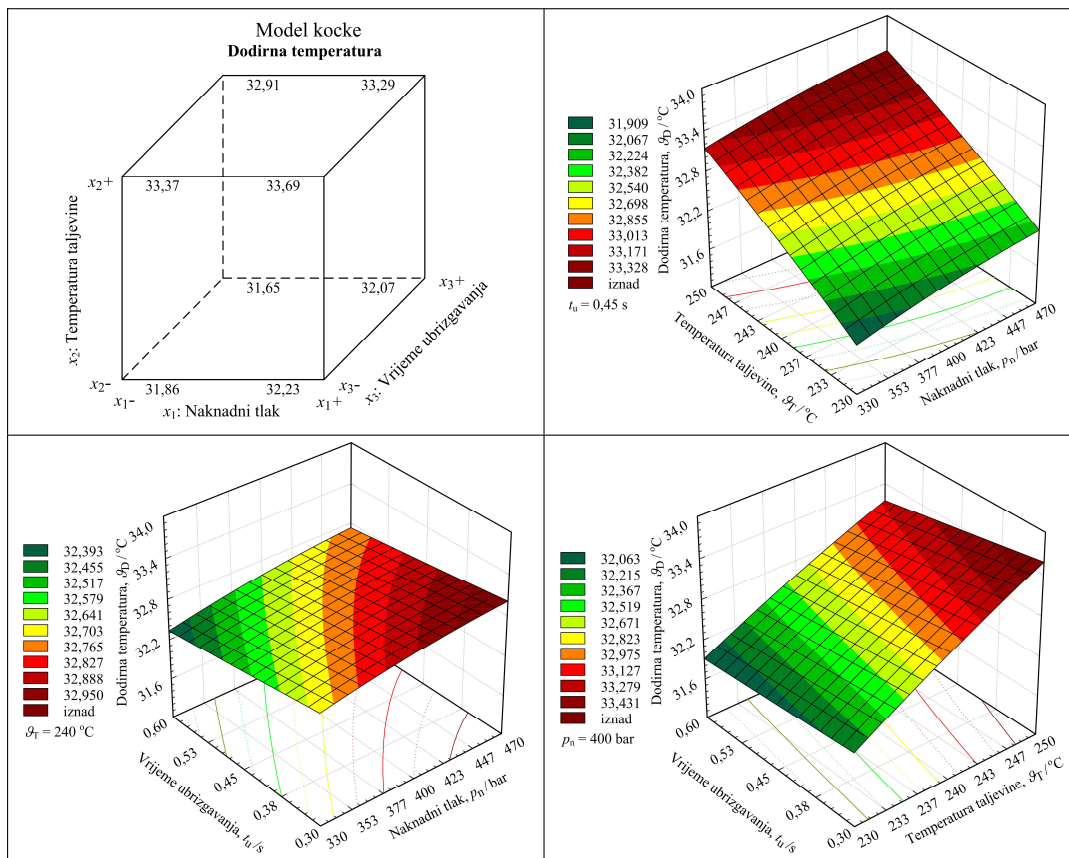


Prema koeficijentima regresije navedenim u tablici 13.41 (prilog 13.7), funkcija ovisnosti rastezne žilavosti otpresaka načinjenih u klasičnom kalupu o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati sljedećim polinomom drugog stupnja (vrijednosti x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranom obliku):

$$\hat{y}_{\text{žilavost}(k)} = 125,72 - 6,91x_1 - 2,98x_1^2 + 5,2x_2 - 1,39x_2^2 - 0,66x_3 + 1,09x_3^2 - 0,54x_1x_2 + 0,29x_1x_3 + 1,29x_2x_3 \quad (9.18)$$

Tablica 9.33 prikazuje rezultate pokusa pri analizi utjecaja podesivih parametara na dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine klasičnog kalupa.

Tablica 9.33 Rezultati pokusa - utjecaj podesivih parametara injekcijskog prešanja na dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine (klasični kalup)



Prema koeficijentima regresije navedenim u tablici 13.43 (prilog 13.7), funkcija ovisnosti dodirne temperature stijenke kalupne šupljine o podesivim parametrima injekcijskog prešanja može se opisati sljedećim polinomom drugog stupnja (vrijednosti x_1 , x_2 i x_3 upisuju se u kodiranom obliku):

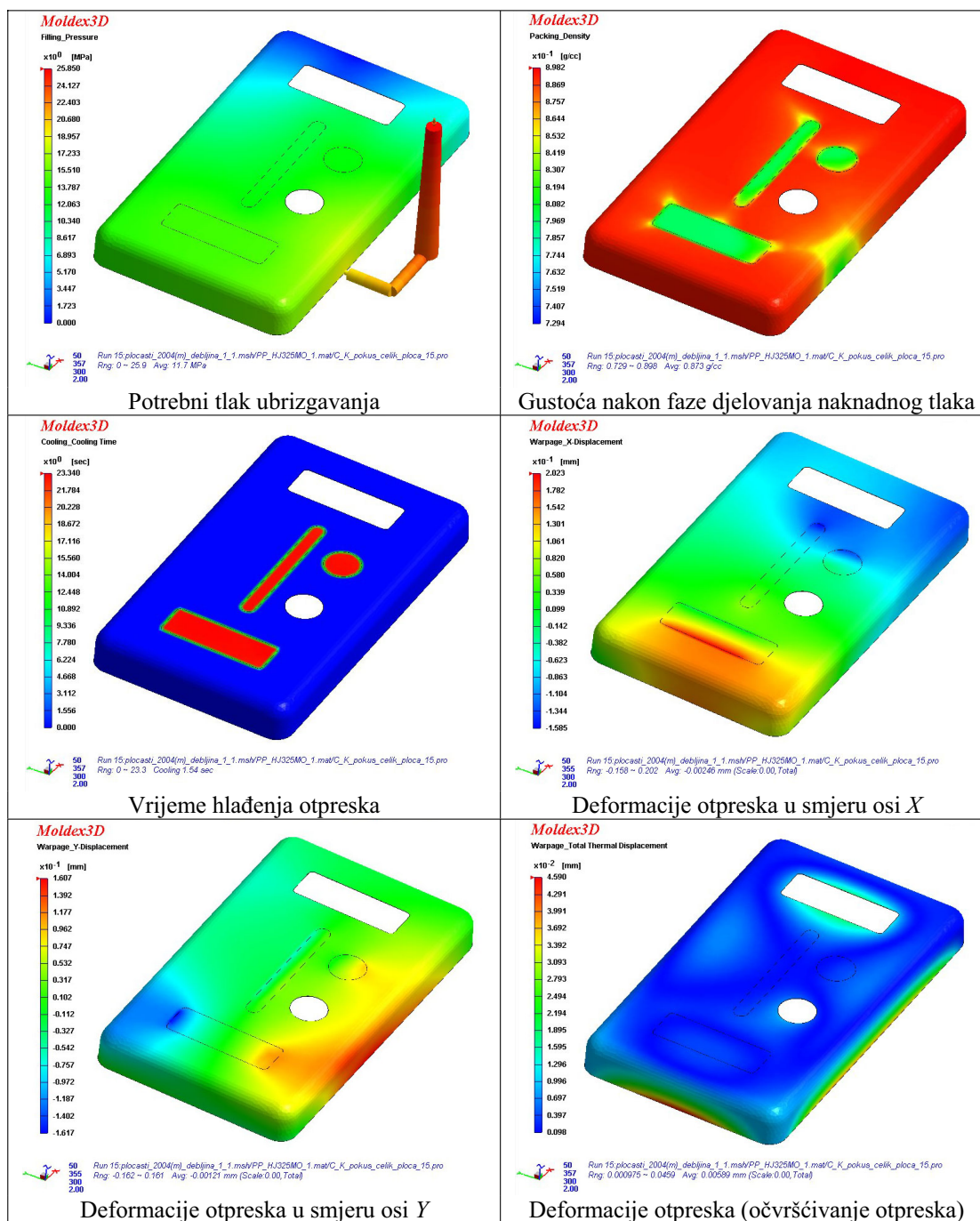
$$\hat{y}_{\text{dodirna_temperatura}(k)} = 32,73 + 0,19x_1 - 0,05x_1^2 + 0,68x_2 - 0,05x_2^2 - 0,15x_3 + 3,201 \cdot 10^{-3}x_3^2 - 0,012x_1x_2 + 0,013x_1x_3 - 0,063x_2x_3 \quad (9.19)$$

9.6.9 Računalna simulacija - pokus (klasični kalup)

Pri računalnoj simulaciji tankostjenog injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu nastojalo se oponašati stanja provedenog centralno kompozitnog plana pokusa. Na isti način kao i pri simulaciji injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu mijenjani su podesivi parametri koje se mijenjalo tijekom stvarnog pokusa.

Tablica 9.34 prikazuje važnije rezultate računalne simulacije (stanje u centru pokusa), usporedive s promatranim parametrima i svojstvima otpresaka postignutim u stvarnom pokusu.

Tablica 9.34 Važniji rezultati simulacije tankostjenog injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu (centralno kompozitni pokus - stanje u centru pokusa)



Potrebni tlak ubrizgavanja

Gustoća nakon faze djelovanja naknadnog tlaka

Vrijeme hlađenja otpreska

Deformacije otpreska u smjeru osi X

Deformacije otpreska u smjeru osi Y

Deformacije otpreska (očvršćivanje otpreska)

9.6.10 Optimiranje parametara preradbe

Provedbom pokusa s oba kalupa uočeni su najutjecajniji faktori na promatrana svojstva otpreska (masa, deformacija u smjeru osi X , deformacija u smjeru osi Y i rastezna žilavost). S pomoću računalnog programa *DESIGN EXPERT* moguće je također provesti optimiranje podesivih parametara preradbe na temelju tzv. funkcije poželjnosti (e. *desirability*). Pri tome se tijekom optimiranja u obzir uzimaju poželje vrijednosti promatranih svojstava otpresaka (odzivi), koje mogu biti minimalne, maksimalne ili ciljane.

U okviru istraživanja provedeno je optimiranje pokusa s klasičnim kalupom u cilju optimiranja promatranih svojstava otpresaka. Kao sljedeći korak načinjen je pokušaj optimiranja svojstava otpresaka i parametara preradbe u hibridnom kalupu prema rezultatima dobivenim u pokusu s klasičnim kalupom. Kao rezultat takvog optimiranja očekuje se dobivanje korigiranih podesivih parametara preradbe koji rezultiraju otprescima što sličnijim otprescima načinjenim u klasičnom kalupu.

9.6.10.1 Optimiranje parametara preradbe u klasičnom kalupu

U okviru optimiranja pokusa injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu definirani su rasponi podesivih parametara, zahtjevi na željene vrijednosti svojstava otpreska te važnost pojedinog svojstva (tablica 9.35).

Tablica 9.35 Podatci za optimiranje injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	Kriterij za optimiranje	Donja granica	Gornja granica	Važnost
Naknadni tlak	u rasponu	-1	1	1
Temperatura taljevine	u rasponu	-1	1	1
Vrijeme ubrizgavanja	u rasponu	-1	1	1
Masa otpreska	ciljana = 7,82 g	7,69 g	7,98 g	1
Deformacija u smjeru osi X	ciljana = 1,50 mm	1,25 mm	1,62 mm	4
Deformacija u smjeru osi Y	ciljana = 0,90 mm	0,80 mm	1,05 mm	4
Rastezna žilavost	ciljana = 124 kJ/m ²	104 kJ/m ²	140 kJ/m ²	2

Ciljana vrijednost mase otpreska određena je na temelju aritmetičke sredine podataka iz centralno kompozitnog pokusa. Ciljane vrijednosti deformacija određene su na temelju skupljanja polipropilena kojeg je deklarirao proizvođač na 1,5 %. Ciljana vrijednost rastezne žilavosti također je određena na temelju aritmetičke sredine postignutih vrijednosti u pokusu.

Vrijednosti donjih i gornjih granica za sva promatrana svojstva uzeta su iz matrice pokusa. Pri određivanju važnosti pojedinog svojstva otpreska prvenstveno se težište dalo na dimenzijskoj stabilnosti otpreska što podrazumijeva ciljanu deformaciju otpreska koja u sebi sadrži unaprijed definirani iznos skupljanja.

Pri provedbi optimiranja moguća su dva pristupa. Jedan pristup obuhvaća optimiranje prema svim promatranim svojstvima otpreska istodobno (kompleksno optimiranje), dok drugi pristup obuhvaća optimiranje prema pojedinačnom promatranom svojstvu (parcijalna optimiranja) otpreska (npr. samo prema deformacijama otpreska). Kompleksno optimiranje u slučaju injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu rezultiralo je s 2 rješenja (tablica 9.36). Rezultate provedbe parcijalnih optimiranja prikazuju tablice 9.37 do 9.39.

Tablica 9.36 Rješenja kompleksnog optimiranja injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2
Naknadni tlak, bar	403,5	403,5
Temperatura taljevine, °C	237,5	237,4
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,40	0,38
Masa, g	7,82	7,82
Deformacija u smjeru osi X, mm	1,48	1,48
Deformacija u smjeru osi Y, mm	0,91	0,91
Rastezna žilavost, kJ/m ²	124	124
Funkcija poželjnosti	0,947	0,946

Tablica 9.37 Rješenja parcijalnog optimiranja (klasični kalup) - masa

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2	3	4
Naknadni tlak, bar	385,3	388,8	407,7	400,7
Temperatura taljevine, °C	248,9	246,7	235,3	239,8
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,59	0,56	0,50	0,50
Masa, g	7,82	7,82	7,82	7,82
Funkcija poželjnosti	1,0	1,0	1,0	1,0

Tablica 9.38 Rješenja parcijalnog optimiranja (klasični kalup) - deformacije

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2	3
Naknadni tlak, bar	435,7	435	376,9
Temperatura taljevine, °C	230	230	243,4
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,38	0,37	0,47
Deformacija u smjeru osi X, mm	1,49	1,49	1,50
Deformacija u smjeru osi Y, mm	0,90	0,90	0,92
Funkcija poželjnosti	0,973	0,973	0,922

Tablica 9.39 Rješenja parcijalnog optimiranja (klasični kalup) - rastezna žilavost

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2	3
Naknadni tlak, bar	407,7	454,6	420,3
Temperatura taljevine, °C	238,3	249	238,9
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,42	0,57	0,57
Rastezna žilavost, kJ/m ²	124	124	124
Funkcija poželjnosti	1,0	1,0	1,0

9.6.10.2 Optimiranje parametara preradbe u hibridnom kalupu (prema klasičnom kalupu)

U okviru optimiranja pokusa injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu definirani su rasponi podesivih parametara, a zahtjevi na željene vrijednosti svojstava otpreska te važnost pojedinog svojstva podešeni su prema optimiranju s klasičnim kalupom (tablica 9.40).

Tablica 9.40 Podatci za optimiranje injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	Kriterij za optimiranje	Donja granica	Gornja granica	Važnost
Naknadni tlak	u rasponu	-1	1	1
Temperatura taljevine	u rasponu	-1	1	1
Vrijeme ubrizgavanja	u rasponu	-1	1	1
Masa otpreska	ciljana = 8,05 g	8,05 g	8,41 g	1
Deformacija u smjeru osi X	ciljana = 1,50 mm	1,46 mm	1,7 mm	4
Deformacija u smjeru osi Y	ciljana = 0,90 mm	0,87 mm	1,09 mm	4
Rastezna žilavost	ciljana = 124 kJ/m ²	72 kJ/m ²	124 kJ/m ²	2

Do ciljane vrijednosti mase otpreska od 8,05 g došlo se na temelju povišenja ciljane vrijednosti od 7,82 g u klasičnom kalupu za 2,9 % kako bi se kompenziralo odstupanje izmjera prototipne matrice i žiga. U slučaju kompleksnog optimiranja injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu dobivena su 2 rješenja (tablica 9.41).

Tablica 9.41 Rješenja kompleksnog optimiranja injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2
Naknadni tlak, bar	458,1	467,9
Temperatura taljevine, °C	245,5	243,3
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,30	0,30
Masa, g	8,33	8,34
Deformacija u smjeru osi X, mm	1,54	1,53
Deformacija u smjeru osi Y, mm	0,91	0,91
Rastezna žilavost, kJ/m ²	98	95
Funkcija poželjnosti	0,696	0,693

U nastojanju za poboljšanjem funkcije poželjnosti, u idućem koraku optimiranja promatrano područje sva 3 podesiva parametra prošireno je na -2 do 2 (u kodiranom obliku). Pri tome valja biti svjestan činjenice kako se pokus provodio u području -1,68 do 1,68. Stoga je rezultate dobivene optimiranjem izvan tog područja potrebno uzeti s oprezom.

Rezultati optimiranja u tom slučaju prikazani su u tablici 9.42.

Tablica 9.42 Rješenja postupka kompleksnog optimiranja injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu (područje parametara preradbe -2 do 2)

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2	3	4
Naknadni tlak, bar	437,8	437,8	437,8	438,5
Temperatura taljevine, °C	245,7	245,6	245,5	245,2
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,15	0,15	0,15	0,15
Masa, g	8,31	8,31	8,31	8,31
Deformacija u smjeru osi X, mm	1,53	1,53	1,53	1,53
Deformacija u smjeru osi Y, mm	0,90	0,90	0,90	0,90
Rastezna žilavost, kJ/m ²	106	106	106	105
Funkcija poželjnosti	0,770	0,770	0,770	0,770

Iz dobivenih rezultata vidljivo je kako proširenje promatranog područja ima učinak samo na povišenje rastezne žilavosti, a jedini parametar koji je promijenjen je vrijeme ubrizgavanja koje je zadržano na donjoj granici promatranog područja (-2 kodirano). Također je donekle povišena vrijednost funkcije poželjnosti. Međutim i dalje je primijećena velika razlika u postignutoj masi otpresaka, dok su vrijednosti deformacija dovedene u željeno područje.

Rezultate parcijalnog optimiranja parametara preradbe s hibridnim kalupom, te svojstava načinjenih otpresaka prikazuju tablice 9.43 do 9.46.

Tablica 9.43 Rješenja parcijalnog optimiranja (hibridni kalup) - masa

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2	3	4	5
Naknadni tlak, bar	330	330	330	330,7	330
Temperatura taljevine, °C	230	230	230	230	233,5
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,33	0,33	0,34	0,30	0,30
Masa, g	8,17	8,17	8,17	8,17	8,17
Funkcija poželjnosti	0,680	0,680	0,680	0,678	0,665

Tablica 9.44 Rješenja parcijalnog optimiranja (hibridni kalup) - masa (područje parametara -2 do 2)

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2	3
Naknadni tlak, bar	260	267	260
Temperatura taljevine, °C	220	220,1	232,2
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,19	0,15	0,15
Masa, g	8,08	8,08	8,11
Funkcija poželjnosti	0,920	0,904	0,833

Tablica 9.45 Rješenja parcijalnog optimiranja (hibridni kalup) - deformacije

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1	2	3	4
Naknadni tlak, bar	470	470	470	470
Temperatura taljevine, °C	242,7	242,4	242,9	238
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,30	0,30	0,31	0,37
Deformacija u smjeru osi X, mm	1,53	1,53	1,53	1,53
Deformacija u smjeru osi Y, mm	0,90	0,90	0,90	0,92
Funkcija poželjnosti	0,915	0,914	0,911	0,862

Tablica 9.46 Rješenja parcijalnog optimiranja (hibridni kalup) - rastezna žilavost

Parametar preradbe / svojstvo otpreska	1
Naknadni tlak, bar	330
Temperatura taljevine, °C	250
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,60
Rastezna žilavost, kJ/m ²	118
Funkcija poželjnosti	0,881

Za provjeru dobivenih parametara na temelju odzivne funkcije provedeno je istraživanje s izabranim optimiranim parametrima preradbe (tablica 9.47).

Tablica 9.47 Parametri preradbe - optimiranje (hibridni kalup)

Optimiranje	Naknadni tlak	Temperatura taljevine	Vrijeme ubrizgavanja
Kompleksno	440 bar	245 °C	0,15 s
Masa	260 bar	220 °C	0,15 s
Deformacije	470 bar	240 °C	0,30 s
Rastezna žilavost	330 bar	250 °C	0,60 s

Rezultati mjerenih vrijednosti (tablica 13.44 prilog 13.8) pokazuju dobru korelaciju svojstava otpresaka dobivenih s pomoću računalnog optimiranja (*DESIGN EXPERT*) i svojstava dobivenih u stvarnom okruženju. Pri tome je najveće odstupanje dobiveno pri analizi rastezne žilavosti.

9.6.11 Analiza osjetljivosti hibridnog i klasičnog kalupa na zastoje

U okviru istraživanja, kako bi se proširile spoznaje u utjecaju pojedine vrste kalupa na postupak injekcijskog prešanja, provedena je i analiza osjetljivosti oba kalupa na zastoje u radu. Pri zastojima u radu kalupa dolazi do neuravnoteženja temperaturnog polja u kalupu (pada temperature stijenke kalupne šupljine), što ima za posljedicu postizanje bitno različitih uvjeta u kalupnoj šupljini, te stoga postizanja različitih svojstava otpresaka. Cilj ovog dijela istraživanja bio je utvrditi koji kalup je osjetljiviji na zastoje, tj. pri kojem kalupu je moguće prije ponovo postići uravnoteženo temperaturno polje kalupa.

9.6.11.1 Provedba analize osjetljivosti kalupa na zastoje

Za potrebe provedbe analize osjetljivosti kalupa na zastoje definirani su nepromjenjivi parametri (tablica 9.48), te 4 skupine promjenjivih parametara preradbe koji su u ovom slučaju temperatura taljevine i dopunsko vrijeme hlađenja otpreska (tablica 9.49). Analiza je provedena na 4 razine s različitim kombinacijama promjenjivih parametara za oba kalupa.

Tablica 9.48 Nepromjenjivi parametri preradbe za analizu osjetljivosti kalupa na zastoje

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Tlak ubrizgavanja	p_u	350	bar
Vrijeme ubrizgavanja	t_u	0,5	s
Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	t_{np}	5	s
Naknadni tlak	p_n	300	bar
Protok medija za temperiranje	q_M	5	l/min

Analiza je provedena tako da se nakon puštanja medija za temperiranje kroz kalup pričekalo do postizanja početne temperature stijenke kalupne šupljine (\mathcal{G}_p). Nakon toga je pušten automatski rad ubrizgavalice s parametrima skupine I sve do postizanja toplinske ravnoteže kalupa. Nakon toga je simuliran zastoj kalupa od 30 s. Po isteku zastoja ponovo je pušten automatski rad ubrizgavalice do ponovnog postizanja toplinske ravnoteže kalupa. Pri tome je bilježen broj ciklusa do postizanja toplinske ravnoteže (u oba slučaja), te tijekom temperature stijenke kalupne šupljine tijekom čitave analize.

Nakon završene analize sa jednom skupinom promjenjivih parametara, kalup je hlađen do postizanja početne temperatura stijenke kalupne šupljine. Zatim se analiza ponavljala sa sljedećom skupinom promjenjivih parametara. Kako analiza osjetljivosti nije provedena istoga

dana za oba kalupa, postojala je razlika u temperaturi okoline, a razlike su nastale i u postignutim početnim temperaturama stijenke kalupne šupljine (tablica 9.50).

Tablica 9.49 Skupine promjenjivih parametara preradbe za analizu osjetljivosti kalupa na zastoje

Parametar	Skupina parametara			
	I	II	III	IV
Temperatura taljevine, ϑ_T (°C)	210	210	270	270
Dopunsko vrijeme hlađenja, t_d (s)	9	15	9	15

Tablica 9.50 Razlike u parametrima pri analizi osjetljivosti kalupa na zastoje

Parametar	Hibridni kalup	Klasični kalup
Temperatura okoline, ϑ_0 (°C)	25	23
Početna temperatura stijenke kalupne šupljine, ϑ_p (°C)	21,5	21,1

9.6.11.2 Rezultati analize osjetljivosti kalupa na zastoje

Sažete rezultate analize osjetljivosti kalupa prikazuje tablica 9.51. Temeljni kriterij za ocjenjivanje osjetljivosti kalupa na zastoje je broj ciklusa potreban za postizanje toplinske ravnoteže kalupa. Grafički prikaz tijeka temperatura stijenke kalupne šupljine za oba kalupa i sve 4 skupine parametara dat je slikama 13.7 do 13.10 (prilog 13.9).

Tablica 9.51 Broj ciklusa do postizanja toplinske ravnoteže kalupa

Skupina parametara	Hibridni kalup	Klasični kalup
<i>Skupina I</i>		
Početno zagrijavanje (broj ciklusa)	56	52
Zagrijavanje nakon zastoja (broj ciklusa)	15	12
Maksimalna dodirna temperatura, ϑ_D (°C)	36,5	32,0
<i>Skupina II</i>		
Početno zagrijavanje (broj ciklusa)	31	23
Zagrijavanje nakon zastoja (broj ciklusa)	11	9
Maksimalna dodirna temperatura, ϑ_D (°C)	33,9	28,7
<i>Skupina III</i>		
Početno zagrijavanje (broj ciklusa)	44	41
Zagrijavanje nakon zastoja (broj ciklusa)	11	9
Maksimalna dodirna temperatura, ϑ_D (°C)	41,6	35,1
<i>Skupina IV</i>		
Početno zagrijavanje (broj ciklusa)	31	24
Zagrijavanje nakon zastoja (broj ciklusa)	8	7
Maksimalna dodirna temperatura, ϑ_D (°C)	37,9	31,7

10 RASPRAVA

10.1 RASPRAVA O REZULTATIMA ANALIZE SPOSOBNOSTI PROCESA TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA U HIBRIDNOM KALUPU

U okviru analize sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu cilj je bio utvrditi pojavu prekomjernog istrošenja prototipnih kalupnih umetaka što bi se očitovalo u stalnom povećanju mase otpresaka te povećanju postignutih izmjera otpresaka. Analizom tablica 13.1 do 13.3 i slika 13.4 do 13.6 (prilog 13.2) moguće je utvrditi kako do takve pojave nakon izradbe 5 000 otpresaka nije došlo. Time je potvrđena pretpostavka iz faze izbora postupka brze izradbe prototipnih kalupnih umetaka, kako postupak IMLS (materijal *LaserForm A6*) rezultira prototipnim kalupnim umetcima zadovoljavajuće postojanosti trošenju pri izradbi tankostjenog otpreska od PP-a, te je omogućena provedba daljnjih analiza u okviru istraživanja.

S pomoću slika 9.18 do 9.20 analizirana je sposobnost procesa tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu. Na temelju podataka o indeksima sposobnosti procesa pri analizi mase otpreska (*Masa*), duljine (*Izmjera_1*) i širine (*Izmjera_2*) moguće je zaključiti kako se u sva tri slučaja radi o sposobnom procesu. Negativni predznak indeksa C_{pk} u slučaju analize mase otpresaka (slika 9.18) ukazuje na lošu centriranost procesa, odnosno na postizanje masa otpresaka ispod granica dopuštenih odstupanja. Centriranje takvog procesa vrlo je jednostavno. Masu otpresaka moguće je povisiti prvenstveno produljenjem vremena djelovanja naknadnog tlaka (u slučaju analize sposobnosti procesa vrijeme djelovanja naknadnog tlaka iznosilo je 2 s). Kasnija analiza vremena djelovanja naknadnog tlaka (poglavlje 9.6.4) rezultirala je maksimalnim vremenom djelovanja naknadnog tlaka od 5 s, uslijed čega su postizane mase otpresaka od 8,41 g pri jednom podešenju parametara te 8,15 g pri drugom podešenju parametara (tablica 9.16). Temperatura taljevine i vrijeme ubrizgavanja također utječu na postizanje odgovarajuće mase otpreska. Pri višim temperaturama taljevine i duljem vremenu ubrizgavanja postignute su više vrijednosti mase otpresaka.

Pri analizi svojstva *Izmjera_1* otpresaka također je dobiven sposoban proces, koji je pomaknut prema donjoj granici dopuštenih odstupanja. Indeks C_p veći je od 3, dok je indeks C_{pk} manji od 1 što ukazuje na lošu centriranost procesa (slika 9.19). Kasnije analize utjecaja pojedinih

parametara preradbe na izmjere otpresaka odnosno postignute deformacije, ukazale su na dominantnu ulogu vremena djelovanja naknadnog tlaka s pomoću kojeg je moguće postići ciljenu vrijednost izmjera otpresaka, te dovođenje procesa unutar granica dopuštenih odstupanja. Slična razmatranja vrijede i pri analizi sposobnosti procesa tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu na temelju praćenja svojstva *Izmjera_2* (širina) otpreska (slika 9.20).

Opći je zaključak kako je proces injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu sposoban uz potrebu prvenstveno produljenja vremena djelovanja naknadnog tlaka i/ili povišenja njegove vrijednosti. Time je omogućeno bolje popunjavanje kalupne šupljine u fazi djelovanja naknadnog tlaka, te bolja nadoknada skupljanja otpreska, a oboje rezultira višim vrijednostima mase otpresaka. Izmjere otpresaka u tom slučaju dovode se unutar granica dopuštenih odstupanja određenih na temelju izmjera kalupne šupljine i propisanog skupljanja prerađivanog materijala.

10.2 RASPRAVA O REZULTATIMA PRETPOKUSA - TANKOSTJENO INJEKCIJSKO PREŠANJE U HIBRIDNOM KALUPU

U okviru provedbe pretpokusa tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu temeljni je cilj bio odrediti najutjecajnije parametre preradbe s pomoću kojih će se provesti detaljne analize kroz centralno kompozitne planove pokusa. Za potrebe pretpokusa izabran je frakcionirani faktorski plan pokusa 2_{IV}^{6-2} osjetljivosti 4. reda. Rezultati pretpokusa grafički su prikazani tablicom 9.12.

Tablicom 9.12 procjenjuje se utjecaj podesivih parametara preradbe s pomoću pravca prema normalnoj razdiobi na postizanje odgovarajuće mase otpreska. Pri tome se kao prevladavajuće javlja vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (x_6), te kao drugi utjecajni parametar vrijednost naknadnog tlaka (x_2). Takav rezultat je očekivan jer oba parametra uzrokuju svojim povišenjem bolju popunjenost kalupne šupljine i bolje stlačivanje, odnosno povećanje mase otpreska (djelomični regresijski polinom sa signifikantnim članovima 10.1):

$$y_{\text{masa_pretpokus}} = 7,92 + 0,058x_2 + 0,22x_6 \quad (10.1)$$

Pri procjeni utjecaja podesivih parametara na svojstvo otpreska *Deformacija_1* (u smjeru osi X -duljina otpreska), kao signifikantni javljaju se vrijeme naknadnog tlaka (x_6), zatim interakcija naknadnog tlaka i vremena djelovanja naknadnog tlaka (x_2x_6), zatim naknadni tlak (x_2), te konačno temperatura taljevine (x_3) (tablica 9.12).

Svi parametri, odnosno interakcija utječu svojim povišenjem na smanjenje postignute deformacije otpreska (djelomični regresijski polinom 10.2):

$$y_{\text{def}_1_{\text{pretpokus}}} = 1,50 - 0,031x_2 - 0,026x_4 - 0,080x_6 - 0,032x_2x_6 \quad (10.2)$$

Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka i naknadni tlak utječu na bolje stlačivanje taljevine tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka i time na bolju dimenzijsku stabilnost otpreska. Istodobno omogućena je i bolja nadoknada skupljanja otpreska što također utječe na postojanost izmjera odnosno manje skupljanje i vitoperenje otpreska koji predstavljaju glavne izvore deformacije otpreska. Viša temperatura taljevine s jedne strane pogoduje boljem tečenju i stlačivanju taljevine te postizanju bolje dimenzijske stabilnosti. S druge strane viša temperatura taljevine utječe na postizanje više temperature stijenke kalupne šupljine pri kojoj otpresak napušta kalupnu šupljinu, što rezultira većim iznosima deformacija. Kao posljedica takvog stanja potreba je za produljenjem vremena hlađenja otpreska. U tom slučaju prvi mehanizam očito je dominantniji te je povišenje temperature taljevine rezultiralo manjim iznosom deformacija.

Pri analizi utjecaja podesivih parametara na svojstvo otpreska *Deformacija_2* (u smjeru osi *Y* - širina otpreska), kao utjecajni parametri javljaju se vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (x_6), naknadni tlak (x_2), njihova interakcija (x_2x_6), te vrijeme ubrizgavanja (x_3) (tablica 9.12). Kao i pri svojstvu *Deformacija_1*, naknadni tlak, vrijeme njegovog djelovanja i njihova interakcija svojim porastom utječu na smanjenje deformacije, dok porast vremena ubrizgavanja (sniženje brzine ubrizgavanja) utječe na povećanje deformacije (djelomični regresijski polinom 10.3):

$$y_{\text{def}_2_{\text{pretpokus}}} = 0,84 - 0,031x_2 + 0,011x_3 - 0,041x_6 - 0,012x_2x_6 \quad (10.3)$$

Za naknadni tlak, vrijeme njegovog djelovanja i njihovu interakciju vrijede ista obrazloženja kao i pri interpretaciji rezultata analize svojstva *Deformacija_1*. U ovom slučaju umjesto temperature taljevine kao utjecajni parametar javlja se vrijeme ubrizgavanja. To je moguće objasniti činjenicom kako je ušće smješteno okomito u odnosu na os *X* otpreska (slika 13.2, prilog 13.1), stoga je glavni smjer tečenja taljevine u smjeru osi *Y*. To je ujedno i os u čijem smjeru se određuje deformacija otpreska pod svojstvom *Deformacija_2*. Stoga je logično očekivati da će vrijeme (brzina) ubrizgavanja imati utjecaja na pojavu deformacija u tom smjeru.

Dodatno, pri tankostjenom injekcijskom prešanju brzina ubrizgavanja je općenito jedan od utjecajnijih parametara preradbe. Pri očvršćivanju taljevine u kalupnoj šupljini smanjuje se efektivni presjek kroz kojeg je omogućeno tečenje taljevine. Stoga produljenje vremena ubrizgavanja (sniženje brzine ubrizgavanja) dovodi do povećanog pada tlaka u kalupnoj šupljini

na putu tečenja taljevine. Uslijed većeg pada tlaka u kalupnoj šupljini, smanjeno je i stlačivanje taljevine, te omogućena veća deformacija stijenki otpresaka.

Procjena utjecaja podesivih parametara preradbe na svojstvo *Rastezna_žilavost* rezultirala je izdvajanjem 4 utjecajna faktora (tablica 9.12). To su temperatura taljevine (x_4), zatim vrijednost naknadnog tlaka (x_2), vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (x_6) i vrijeme ubrizgavanja (x_3). Pri tome, povišenje naknadnog tlaka i/ili produljenje vremena djelovanja naknadnog tlaka utječu na sniženje rastezne žilavosti. S druge strane, povišenje temperature taljevine i produljenje vremena ubrizgavanja (sniženje brzine ubrizgavanja) rezultiraju povišenjem rastezne žilavosti (djelomični regresijski polinom 10.4):

$$y_{\text{žilavost_pretpokus}} = 109,25 - 6,62x_2 + 3,88x_3 + 8,38x_4 - 5,87x_6 \quad (10.4)$$

Utjecaj povišenja naknadnog tlaka i produljenje vremena njegovog djelovanja moguće je objasniti činjenicom kako oba parametra omogućuju bolje slaganje makromolekulnih lanaca prerađivanog plastomera. Makromolekule su pri tome u napregnutom stanju i ukoliko im se ne dopusti relaksacija (kratko vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja) takvo stanje se zadržava nakon očvršćivanja otpreska, a kao posljedica javlja se sniženje žilavosti otpreska. Temperatura taljevine je najutjecajniji parametar pri analizi rastezne žilavosti otpresaka. Njen utjecaj na rasteznu žilavost moguće je obrazložiti posredno preko postignutog stupnja kristalnosti. Pri višim temperaturama taljevine postižu se i viši stupnjevi kristalnosti koji imaju za posljedicu u pravilu višu žilavost otpresaka.

Pri procjeni utjecaja podesivih parametara na dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine (tablica 9.12) moguće je uočiti 4 signifikantna parametra: temperatura taljevine (x_4), naknadni tlak (x_2), protok medija za temperiranje (x_5) i vrijeme ubrizgavanja (x_3). Pri tome povišenje temperature taljevine i/ili naknadnog tlaka rezultiraju višom dodirnom temperaturom stijenke kalupne šupljine. Povećanje protoka medija za temperiranje rezultira sniženjem dodirne temperature. Produljenje vremena ubrizgavanja, a time i vremena ciklusa injekcijskog prešanja rezultira postizanjem nižeg temperaturnog polja stijenke kalupne šupljine uslijed dugotrajnijeg hlađenja kalupa (djelomični regresijski polinom 10.5):

$$y_{\text{dodirna_temperatura_pretpokus}} = 38,25 + 0,59x_2 - 0,17x_3 + 2,10x_4 - 0,41x_5 \quad (10.5)$$

Korelaciju između temperature taljevine i dodirne temperature na stijenci kalupne šupljine nije potrebno posebice obrazlagati, a dobiveni rezultat je logičan. Viši naknadni tlak dodatno zagrijava taljevinu te stoga posredno povisuje i dodirnu temperaturu. Veći protok medija za

temperiranje uzrokuje intenzivniju izmjenu topline između plastomerne taljevine i medija za temperiranje, te sniženje početne a time i dodirne temperature stijenke kalupne šupljine. Konačno, dulje vrijeme ubrizgavanja (niže brzine ubrizgavanja) rezultira slabijim zagrijavanjem taljevine uslijed trenja o stijenke kalupne šupljine, pa se ostvaruje niža dodirna temperatura negoli pri kratkim vremenima ubrizgavanja (visoke brzine ubrizgavanja) što je potvrđeno i kroz analizu rezultata glavnih pokusa s oba kalupa.

Konačno pri analizi utjecaja podesivih parametara preradbe na postignuti temperaturni gradijent signifikantni su: temperatura taljevine (x_4), naknadni tlak (x_2), vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (x_6) i njihova interakcija (x_2x_6) (tablica 9.12).

Pri tome svi članovi svojim povišenjem utječu na povišenje temperaturnog gradijenta stijenke kalupne šupljine (djelomični regresijski polinom 10.6).

$$y_{\text{temp_gradijent_pretpokus}} = 5,51 + 0,33x_2 + 0,44x_4 + 0,24x_6 + 0,17x_2x_6 \quad (10.6)$$

Pri povišenim temperaturama taljevine ostvaruju se i više temperature stijenke kalupne šupljine koje uzrokuju intenzivniju izmjenu topline s medijem za temperiranje, te se ostvaruje i veći temperaturni gradijent na stijenci kalupne šupljine. Pri tome je uočeno kako su postignute dodirne temperature osjetljivije na promjene temperaturâ taljevine od početnih temperaturâ stijenke kalupne šupljine. Viši naknadni tlak povisuje temperaturu taljevine i time posredno temperaturu stijenke kalupne šupljine, što rezultira većim gradijentom nego li pri nižem naknadnom tlaku. Dulje vrijeme djelovanja naknadnog tlaka produljuje vrijeme hlađenja otpreska koje počinje nakon početka ubrizgavanja taljevine. Kako taljevina u kalupnoj šupljini očvršćuje dulje vrijeme, postiže se i veći temperaturni gradijent na stijenci kalupne šupljine. Konačno, interakcija naknadnog tlaka i vremena njegovog djelovanja također utječe na temperaturni gradijent s istim predznakom kao i pojedini parametri iz te interakcije.

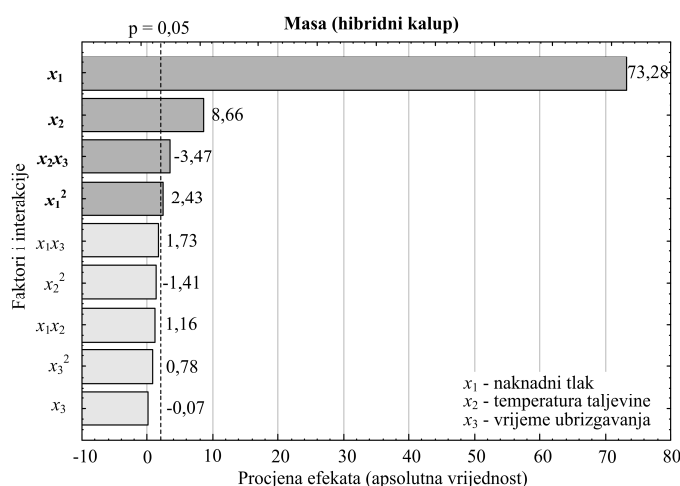
Kao signifikantni parametri tankostjenog injekcijskog prešanja izabrani su: vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (dominantan faktor), naknadni tlak, temperatura taljevine i vrijeme ubrizgavanja. Općenito, rezultati dobiveni u pretpokusu s hibridnim kalupom prate trendove koji se javljaju i pri klasičnim kalupima za tankostjeno injekcijsko prešanje. Razlog tome su relativno male razlike prvenstveno u toplinskim svojstvima materijala oba kompleta kalupnih umetaka.

10.3 RASPRAVA O REZULTATIMA POKUSA - TANKOSTJENO INJEKCIJSKO PREŠANJE U HIBRIDNOM KALUPU

U okviru glavnog pokusa s hibridnim kalupom nastojalo se utvrditi utjecaj signifikantnih podesivih parametara tankostjenog injekcijskog prešanja i uporabe prototipnih kalupnih umetaka na svojstva otpreska: masa, deformacija u smjeru osi X (*Deformacija_1*), deformacija u smjeru osi Y (*Deformacija_2*), te rastezna žilavost. Istodobno se pratio njihov utjecaj na postizanje dodirne temperature i temperaturnog gradijenta na stijenci kalupne šupljine. Pri analizi mase otpreska dobivena je odzivna funkcija 9.10. Na temelju analize varijance dobiveni su signifikantni faktori i interakcije, a rezultirajuća djelomična odzivna funkcija koja obuhvaća samo signifikantne članove prikazana je izrazom 10.7:

$$\hat{y}_{\text{masa (h)}} = 8,25 + 0,081x_1 + 2,67 \cdot 10^{-3}x_1^2 + 9,547 \cdot 10^{-3}x_2 - 4,989 \cdot 10^{-3}x_2x_3 \quad (10.7)$$

Kao signifikantni faktori javljaju se naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine (x_2), kvadratni član naknadnog tlaka (x_1^2), te interakcija između temperature taljevine i vremena ubrizgavanja (x_2x_3). Naknadni tlak i temperatura taljevine svojim povišenjem utječu na povećanje mase otpreska, dok interakcija temperature taljevine i vremena ubrizgavanja utječu na masu otpreska s negativnim predznakom. Takav utjecaj interakcije moguće je objasniti očvršćivanjem čela taljevine pri punjenju kalupne šupljine, što onemogućuje dobro popunjavanje kalupne šupljine. Analizom tablice 9.20, jednostavno je uočiti kako je dominantni parametar pri analizi utjecaja na masu otpreska naknadni tlak, zatim slijedi temperatura taljevine, dok vrijeme ubrizgavanja gotovo nema utjecaja na masu otpreska. Razine signifikantnosti pojedinog faktora i interakcije prikazuje slika 10.1.

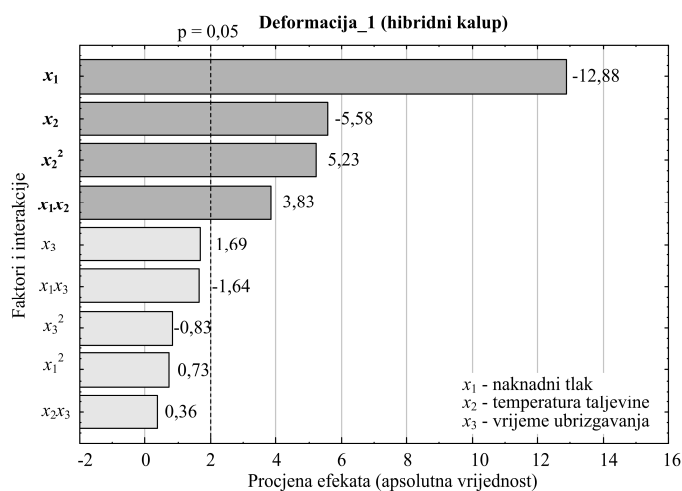


Slika 10.1 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - masa (hibridni kalup)

Analizom deformacije otpreska u smjeru osi X - duljine (*Deformacija_1*) dobivena je odzivna funkcija 9.11, a djelomična odzivna funkcija (samo sa signifikantnim članovima) prikazana je izrazom 10.8:

$$\hat{y}_{\text{def}_1(\text{h})} = 1,57 - 0,045x_1 - 0,02x_2 + 0,018x_2^2 + 0,017 \cdot 10^{-3}x_1x_2 \quad (10.8)$$

Kao signifikantni faktori pri analizi deformacije otpreska u smjeru osi X javljaju se: naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine (x_2), kvadratni član temperature taljevine (x_2^2) te interakcija naknadnog tlaka i temperature taljevine (x_1x_2). Oba glavna faktora svojim povišenjem utječu na smanjenje deformacije otpreska (tablica 9.21). Pri tome naknadni tlak više nego dvostruko utjecajniji na pojavu deformacija otpreska. Interakcija naknadnog tlaka i temperature taljevine uzrokuje povećanje deformacija otpreska. To je moguće objasniti činjenicom kako se pri višim tlakovima i višim temperaturama taljevine omogućuje bolje stlačivanje taljevine, no istodobno se omogućuje i unošenje naprezanja u otpresak, što nakon vađenja otpreska iz kalupne šupljine rezultira povećanim deformacijama otpreska. Razine signifikantnosti pojedinog faktora i interakcije u tom slučaju prikazuje slika 10.2.



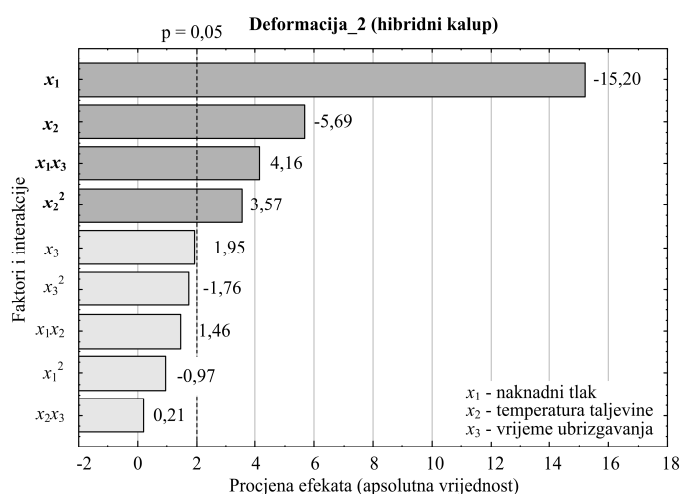
Slika 10.2 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - *deformacija 1* (hibridni kalup)

Analizom deformacije otpreska u smjeru osi Y - širine (*Deformacija_2*) dobivena je odzivna funkcija 9.12, a djelomičnu odzivnu funkciju prikazuje izraz 10.9:

$$\hat{y}_{\text{def}_2(\text{h})} = 0,98 - 0,047x_1 - 0,017x_2 + 0,011x_2^2 + 0,017x_1x_3 \quad (10.9)$$

Kao signifikantni faktori u ovom slučaju javljaju se: naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine (x_2), kvadratni član temperature taljevine (x_2^2) te interakcija naknadnog tlaka i vremena

ubrzigavanja (x_1x_3) (tablica 9.22). Objašnjenja za utjecaj naknadnog tlaka i temperature jednaka su onima pri interpretaciji rezultata analize deformacije otpreska u smjeru osi X . Interakcija između naknadnog tlaka i vremena ubrzigavanja utječe na pojavu deformacije u smjeru osi Y s pozitivnim predznakom. Takav rezultat je u korelaciji s rezultatom dobivenim analizom te deformacije pri provedbi pretpokusa, te je potvrđen veći utjecaj vremena (brzine) ubrzigavanja u smjeru tečenja taljevine. U navedenoj interakciji očito je kako je vrijeme ubrzigavanja dominantno u usporedbi s naknadnim tlakom jer se ostvaruje učinak suprotan onome kojeg ostvaruje naknadni tlak kao glavni faktor. Razine signifikantnosti pojedinog faktora i interakcije prikazuje slika 10.3.



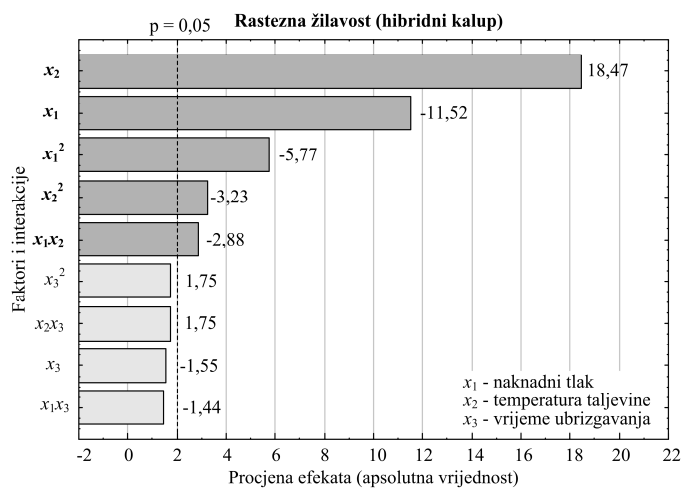
Slika 10.3 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - deformacija 2 (hibridni kalup)

Analizom rastezne žilavosti otpresaka dobivena je odzivna funkcija 9.13, te djelomična odzivna funkcija 10.10:

$$\hat{y}_{\text{žilavost}(h)} = 100,47 - 7,15x_1 - 3,59x_1^2 + 11,46x_2 - 2,05x_2^2 - 2,33x_1x_2 \quad (10.10)$$

Pri tome kao signifikantni faktori javljaju se naknadni tlak (x_1) i temperatura taljevine (x_2), njihovi kvadratni članovi (x_1^2 , x_2^2) te njihova interakcija (x_1x_2) (tablica 9.23). Najutjecajniji parametar u tom slučaju je temperatura taljevine koja s povišenjem utječe na povišenje rastezne žilavosti. Naknadni tlak s druge strane utječe svojim povišenjem na sniženje rastezne žilavosti. Takvi rezultati ponovo se podudaraju s rezultatima dobivenim tijekom pretpokusa, pa vrijede ista objašnjenja. Pri interakciji naknadnog tlaka i temperature taljevine, tlak ima dominantnu ulogu jer ta interakcija djeluje na rasteznu žilavost s negativnim predznakom.

Slika 10.4 prikazuje razine signifikantnosti faktora i interakcija.

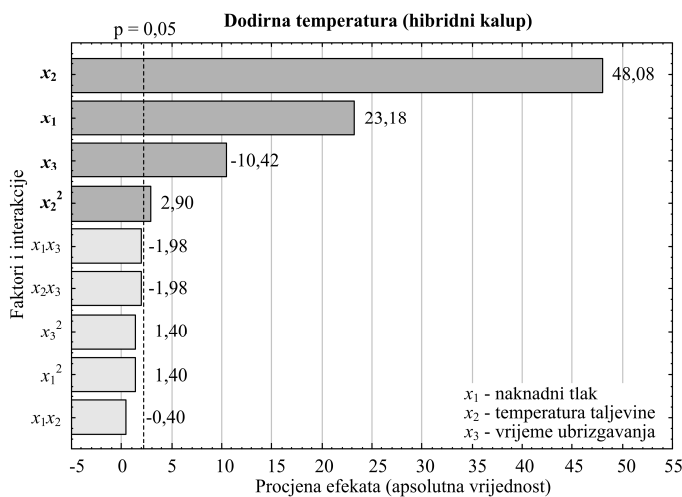


Slika 10.4 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - rastezna žilavost (hibridni kalup)

Pri analizi utjecaja podesivih parametara na dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine dobivena je odzivna funkcija 9.14, te djelomična odzivna funkcija 10.11:

$$\hat{y}_{\text{dodirna_temperatura}(h)} = 36,51 + 0,56x_1 + 1,16x_2 + 0,062x_2^2 - 0,25x_3 \quad (10.11)$$

Pri tome se kao signifikantni faktori pojavljuju sva tri glavna faktora: naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine (x_2) i vrijeme ubrizgavanja (x_3), te kvadratni član temperature taljevine (x_2^2). Razinu signifikantnosti parametara i interakcija prikazuje slika 10.5.



Slika 10.5 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - dodirna temperatura (hibridni kalup)

Temperatura taljevine je u tom slučaju dominantan faktor (tablica 9.24), a zatim slijedi naknadni tlak. Oba parametra s pozitivnim predznakom utječu na dodirnu temperaturu. Vrijeme ubrizgavanja na dodirnu temperaturu utječe s negativnim predznakom, a razlog je pojašnjen pri interpretaciji rezultata dobivenih pretpokusom. Utjecaj podesivih parametara tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu na postizanje temperaturnog gradijenta stijenke kalupne šupljine nije posebno razmatran.

10.4 RASPRAVA O REZULTATIMA POKUSA - TANKOSTJENO INJEKCIJSKO PREŠANJE U KLASIČNOM KALUPU

U okviru glavnog pokusa s klasičnim kalupom, na isti način kao i pri pokusu s hibridnim kalupom analizirao se utjecaj signifikantnih podesivih parametara injekcijskog prešanja na masu, deformacije i rasteznu žilavost otpresaka te dodirnu temperaturu stijenke kalupne šupljine.

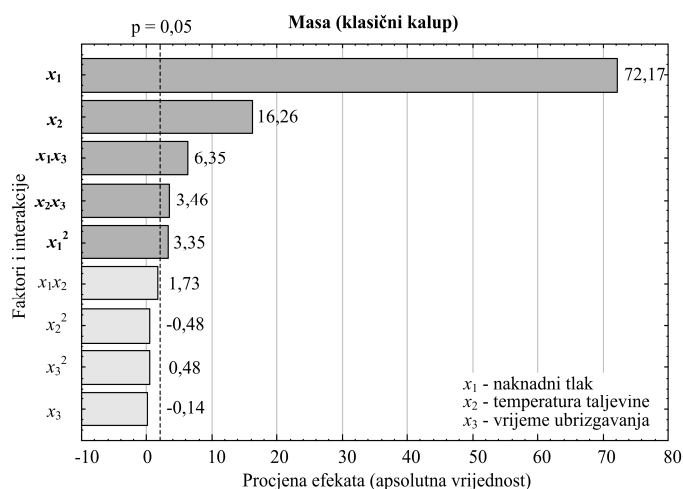
Pri analizi mase otpresaka načinjenih u klasičnom kalupu dobivena je odzivna funkcija 9.15, te djelomična odzivna funkcija 10.12:

$$\hat{y}_{\text{masa (k)}} = 7,82 + 0,080x_1 + 3,70 \cdot 10^{-3}x_1^2 + 0,018x_2 + 9,167 \cdot 10^{-3}x_1x_3 + 5,0 \cdot 10^{-3}x_2x_3 \quad (10.12)$$

Kao signifikantni faktori u ovom slučaju javljaju se naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine (x_2), kvadratni član naknadnog tlaka (x_1^2), interakcija između naknadnog tlaka i vremena ubrizgavanja (x_1x_3) te interakcija između temperature taljevine i vremena ubrizgavanja (x_2x_3). Pri tome svi faktori i interakcije svojim povišenjem utječu na povećanje mase otpresaka. Utjecaj naknadnog tlaka i temperature taljevine već je objašnjen kroz analizu rezultata pretpokusa i pokusa u hibridnom kalupu. Novost u odzivu je signifikantnost interakcija u kojima se oba puta javlja vrijeme (brzina ubrizgavanja). Oba puta te interakcije djeluju na masu otpreska s pozitivnim predznakom iako samo vrijeme ubrizgavanja na masu djeluje s negativnim predznakom. Viša temperatura taljevine kao i viši naknadni tlak omogućuju bolju tecljivost taljevine, a time i bolje popunjavanje kalupne šupljine. Vrijeme ubrizgavanja ima suprotan efekt, no očito je kako su ovdje naknadni tlak odnosno temperatura taljevine dominantni. Grafičke rezultate analize prikazuju tablica 9.29 i slika 10.6.

Usporedba postignutih masa otpresaka iz pokusa s hibridnim i klasičnim kalupom pokazuje bitna odstupanja. Aritmetička sredina postignutih masa u kalupu s prototipnim umetcima je 8,26 g, dok je taj iznos iz pokusa s klasičnim kalupnim umetcima iznosio 7,82 g. Kako je utvrđeno u poglavlju 9.6.7.2 (tablica 9.27) izmjere prototipnih umetaka su veće što je uzrokovalo postizanje

razlike u masi otpresaka od 2,9 %. Ukupna razlika aritmetičkih sredina masa otpresaka načinjenih u oba kalupa iznosi 5,6 %. Preostala razlika od 2,7 % u masi otpresaka smatra se posljedicom povišene stlačivosti prototipnih kalupnih umetaka. Pri određivanju maksimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka u oba kalupa (poglavlja 9.6.4 i 9.6.7) dobivene su razlike u debljinama stijenke otpreska mjestimice i do 0,1 mm što se približava razlici od 10 % u debljini stijenke a time i u masi otpresaka. Međutim pri tim analizama rabljeni su vrlo visoki naknadni tlakovi (600 do 1 000 bar), pa te rezultate treba uzeti u obzir samo kao pokazatelje trenda povišenja stlačivosti prototipnih umetaka.



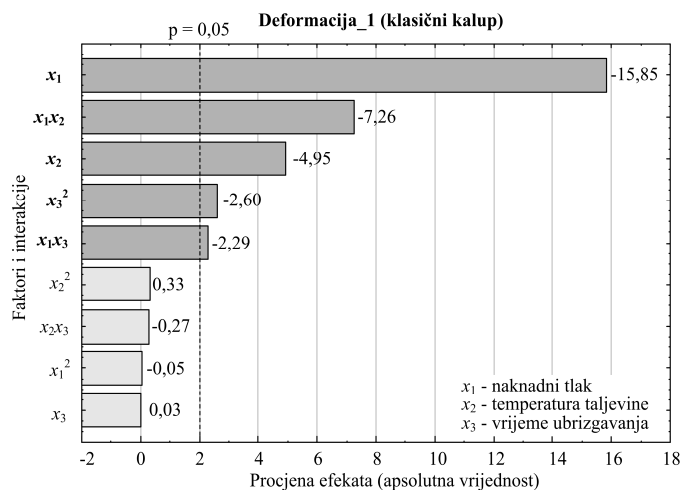
Slika 10.6 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - masa (klasični kalup)

Na temelju analize utjecaja podesivih parametara injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu na deformacije otpresaka u smjeru osi X - duljina (*Deformacija_1*) dobivena je odzivna funkcija 9.16, te djelomična odzivna funkcija 10.13:

$$\hat{y}_{\text{def}_1(k)} = 1,48 - 0,075x_1 - 0,023x_2 - 0,012x_3^2 - 0,045x_1x_2 - 0,014x_1x_3 \quad (10.13)$$

Kao signifikantni faktori javljaju se: naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine (x_2), kvadratni član vremena ubrizgavanja (x_3^2), te interakcije naknadnog tlaka s preostala dva podesiva parametra (x_1x_2 i x_1x_3). Svi utjecajni parametri na pojavu deformacije u smjeru osi X utječu s negativnim predznakom, što znači da povišenjem djeluju na smanjenje deformacije. Utjecaj naknadnog tlaka i temperature taljevine na deformacije otpreska već je prethodno detaljno pojašnjen. Naknadni tlak se javlja kao utjecajan i kroz interakcije s temperaturom taljevine i vremenom ubrizgavanja. Pri tome naknadni tlak i vrijeme ubrizgavanja kao glavni faktori imaju suprotan učinak na deformacije, no očito je kako je naknadni tlak u interakciji dominantan.

Grafičke rezultate navedenih utjecaja prikazuju tablica 9.30 i slika 10.7.



Slika 10.7 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - *deformacija_1* (klasični kalup)

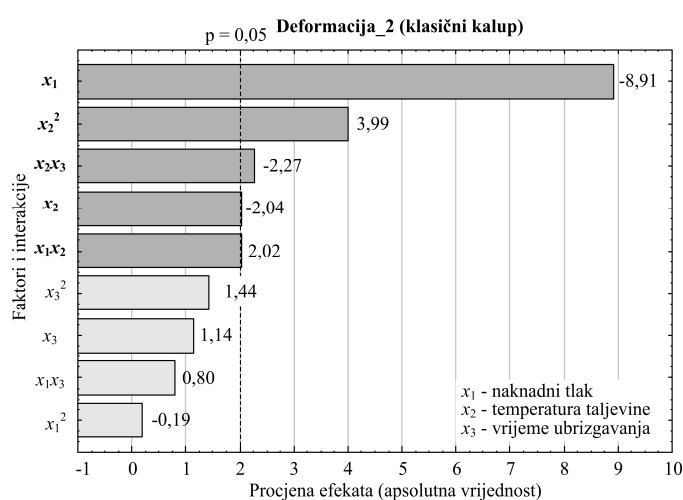
Na temelju analize deformacija otpresaka u smjeru osi X u oba kalupa (tablice 9.19 i 9.28) uočena je razlika od 8,1 % (veći iznosi postizani su u hibridnom kalupu). Pri oba kalupa podešeni su isti parametri preradbe tijekom pokusa. Stoga je kao jedini izvor te razlike moguće navesti razlike u postizanju odgovarajućih temperaturnih polja stijenke kalupne šupljine u oba kalupa. Rezultate analize deformacija otpresaka stoga je potrebno povezati s rezultatima analize temperaturnog polja u kalupu. Razlike u postignutim dodirnim temperaturama iznose 11,9 %, a u temperaturnom gradijentu čak 2,27 puta (više temperature i veći gradijent u hibridnom kalupu). U slučaju hibridnog kalupa otpresci napuštaju kalup pri višim temperaturama stijenke kalupne šupljine, što pogoduje povećanom skupljanju i vitoperenju otpresaka, te povećanoj rezultirajućoj deformaciji otpresaka.

Na temelju analize utjecaja podesivih parametara injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu na deformacije otpresaka u smjeru osi Y - širina (*Deformacija_2*) dobivena je odzivna funkcija 9.17, te djelomična odzivna funkcija 10.14:

$$\hat{y}_{\text{def}_2(k)} = 0,91 - 0,046x_1 - 0,011x_2 + 0,02x_2^2 + 0,014x_1x_2 - 0,015x_2x_3 \quad (10.14)$$

Kao signifikantni parametri javljaju se: naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine (x_2), kvadratni član temperature taljevine (x_2^2), te interakcije temperature taljevine s preostala dva podesiva parametra (x_1x_2 i x_2x_3). Ne temelju analize tablice 9.31 moguće je zaključiti kako je naknadni tlak dominantan, a njegov utjecaj na pojavu deformacija otpresaka je već pojašnjen u prethodnim

interpretacijama rezultata pokusa, što vrijedi i za temperaturu taljevine. U ovom slučaju temperatura taljevine se također pojavljuje kao utjecajna kroz kvadratni član te interakciju s naknadnim tlakom. U oba slučaja radi se o utjecaju s pozitivnim predznakom. Kako i naknadni tlak i temperatura taljevine kao glavni faktori utječu na smanjenje deformacije u smjeru osi Y , nije moguće objasniti utjecaj njihove interakcije na povećanje deformacije. Interakcija između temperature taljevine i vremena ubrizgavanja ima utjecaj s negativnim predznakom, iako vrijeme ubrizgavanja utječe s pozitivnim predznakom na deformaciju otpreska. Stoga je temperatura taljevine dominantan član interakcije. Grafičke rezultate analize prikazuju tablica 9.31 i slika 10.8.



Slika 10.8 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - *deformacija_2* (klasični kalup)

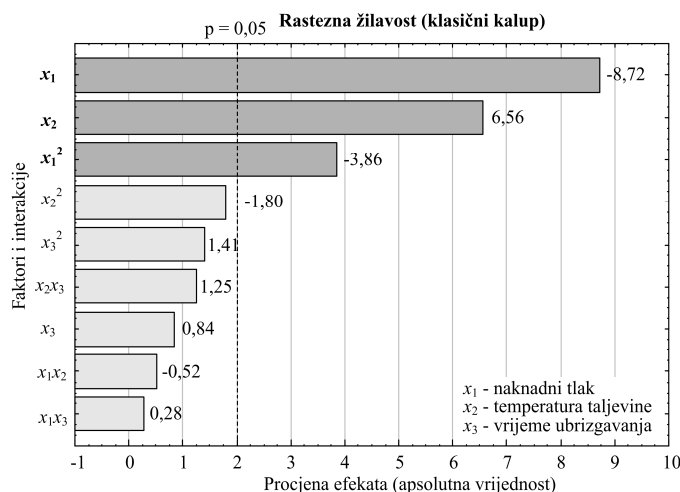
I pri analizi deformacija otpresaka u smjeru osi Y (širina) došlo se do razlika u prosječnim vrijednostima postignutim u hibridnom i klasičnom kalupu (tablice 9.19 i 9.28). Razlika u ovom slučaju iznosi 5,4 %, a njen nastanak je moguće obrazložiti na isti način kao i pri praćenju deformacije otpreska u smjeru osi X .

Pri analizi utjecaja podesivih parametara injekcijskog prešanja u klasičnom kalupu na rasteznu žilavost otpresaka dobivena je odzivna funkcija 9.18, te djelomična odzivna funkcija 10.15:

$$\hat{y}_{\text{žilavost}(k)} = 125,50 - 6,91x_1 - 2,95x_1^2 + 5,20x_2 \quad (10.15)$$

Utjecajni faktori u tom slučaju su: naknadni tlak (x_1), temperatura taljevine (x_2) i kvadratni član naknadnog tlaka (x_1^2). Naknadni tlak i njegov kvadratni član na rasteznu žilavost utječu s negativnim predznakom što je već obrazloženo pri analizi rezultata pokusa sa hibridnim

kalupom. Temperatura taljevine s porastom utječe na povišenje rastezne žilavosti otpresaka. Grafičke rezultate analize prikazuju tablica 9.32 i slika 10.9.



Slika 10.9 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - rastezna žilavost (klasični kalup)

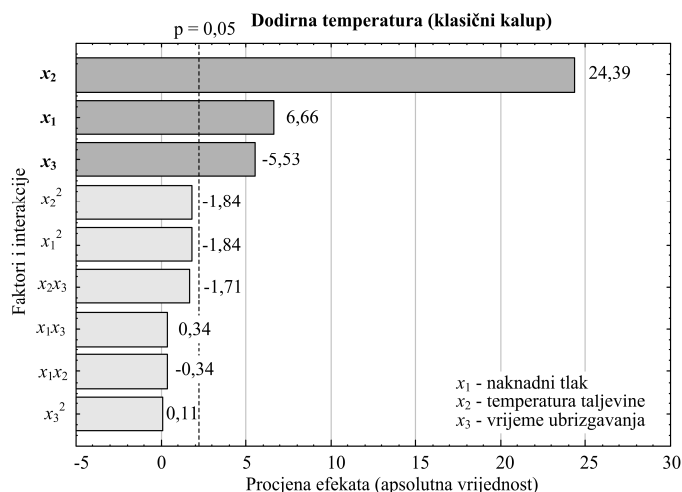
Pri usporedbi rezultata dobivenih pokusima s oba kalupa, u slučaju rastezne žilavosti postignute su najveće razlike (tablice 9.19 i 9.28). Postignuta razlika iznosi 27,8 %. Tu razliku moguće je opisati razlikama u temperaturnim poljima stijenki kalupnih šupljina tijekom ciklusa injekcijskog prešanja u oba kalupa. Zbog niže toplinske prodornosti materijala prototipnih kalupnih umetaka u hibridnom kalupu postižu se više vrijednosti dodirnih temperatura. Bolja toplinska provodnost tog materijala s druge strane omogućuje brže odvođenje topline u unutrašnjost kalupnog umetka. Stoga se postiže veći temperaturni gradijent u hibridnom kalupu. To ujedno ima za posljedicu brže očvršćivanje otpreska i postizanje nižeg stupnja kristalnosti materijala otpreska te posljedično nižih vrijednosti rastezne žilavosti.

Pri analizi utjecaja podesivih parametara injekcijskog prešanja na dodirnu temperaturu u klasičnom kalupu dobivena je odzivna funkcija 9.19, te djelomična odzivna funkcija 10.16:

$$\hat{y}_{\text{dodirna_temperatura}(k)} = 32,66 + 0,19x_1 + 0,68x_2 - 0,15x_3 \quad (10.16)$$

Signifikantni faktori su svi podesivi parametri (x_1 , x_2 , x_3), pri čemu temperatura taljevine ima daleko veći utjecaj od preostala dva faktora, zatim slijedi naknadni tlak, a najmanji utjecaj ima vrijeme ubrizgavanja (slika 10.10). Temperatura i naknadni tlak pozitivno utječu na dodirnu temperaturu, dok vrijeme ubrizgavanja utječe s negativnim predznakom. Grafičke rezultate analize prikazuje tablica 9.33. Razlike dodirnih temperatura postignutih pri uporabi hibridnog i

klasičnog kalupa, kao i njihovi uzroci, objašnjeni su u raspravi o primjenjivosti računalne simulacije pri postupku tankostjenog injekcijskog prešanja (poglavlje 10.5).



Slika 10.10 Razina signifikantnosti faktora i interakcija - dodirna temperatura (klasični kalup)

Na temelju rezultata statističke obrade podataka (prilozi 13.5 i 13.8) moguće je sastaviti tablicu utjecaja pojedinih faktora i interakcija za pokuse s oba kalupa (tablica 10.1).

Tablica 10.1 Sažetak utjecaja pojedinih faktora i interakcija (glavni pokusi)

Faktori i interakcije	Masa	Deformacija_1	Deformacija_2	Žilavost	Dodirna temperatura
<i>Hibridni kalup / klasični kalup</i>					
Naknadni tlak x_1	1 ↑ / 1 ↑	1 ↓ / 1 ↓	1 ↓ / 1 ↓	2 ↓ / 1 ↑	2 ↑ / 2 ↑
Temperatura taljevine x_2	2 ↑ / 2 ↑	2 ↓ / 3 ↓	2 ↓ / 4 ↓	1 ↑ / 2 ↑	1 ↑ / 1 ↑
Vrijeme ubrizgavanja x_3					3 ↓ / 3 ↓
x_1^2	3 ↑ / 5 ↑			3 ↓ / 3 ↓	
x_2^2		3 ↑ / -	3 ↑ / 2 ↑	4 ↓ / -	4 ↑ / -
x_3^2		- / 4 ↓			
x_1x_2		4 ↑ / 2 ↓	- / 5 ↑	5 ↓ / -	
x_1x_3	- / 3 ↑	- / 5 ↓	4 ↑ / -		
x_2x_3	4 ↓ / 4 ↑		- / 3 ↓		

1...5 - ponderi signifikantnosti faktora i interakcija na temelju analize njihove razine signifikantnosti (manji broj označava utjecajni faktor ili interakciju)

↑ - povišenje faktora ili interakcije uzrokuje povišenje promatranog svojstva

↓ - povišenje faktora ili interakcije uzrokuje sniženje promatranog svojstva

10.5 RASPRAVA O PRIMJENJIVOSTI RAČUNALNE SIMULACIJE TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA U HIBRIDNOM I KLASIČNOM KALUPU

Primjenjivost računalne simulacije za tankostjeno injekcijsko prešanje u hibridnom kalupu uglavnom je analizirana već u poglavlju 9.5. Pri provedbi glavnih pokusa s oba kalupa, računalnom simulacijom oponašala su se stanja pokusa u cilju usporedivosti rezultata dobivenih u stvarnim pokusima i rezultata dobivenih računalnom simulacijom.

Pri ocjeni primjenjivosti računalne simulacije za tankostjeno injekcijsko prešanje u oba kalupa svaka faza računalne simulacije praćena je zasebno. Pri fazi punjenja kalupne šupljine, moguće je pratiti tijek punjenja kalupne šupljine i potrebne tlakove ubrizgavanja. U poglavlju 9.5 utvrđeno je vrlo dobro podudaranje računalnog predviđanja napredovanja čela taljevine u kalupnoj šupljini sa stvarno postignutim rezultatima (slika 9.12). Takva podudarnost postignuta je pri svim iznosima vremena (brzine) ubrizgavanja, što upućuje na prihvatljivost računalne simulacije za predviđanje zbivanja tijekom faze punjenja kalupne šupljine u oba kalupa. Potrebni tlakovi ubrizgavanja dobiveni računalnom simulacijom u oba kalupa sličnih su vrijednosti, a kreću se u rasponu 240 do 280 bar. Te se vrijednosti vrlo dobro poklapaju s vrijednostima postignutim u pokusima.

Drugu fazu računalne simulacije predstavlja analiza faze djelovanja naknadnog tlaka. Kao parametar računalne simulacije kojeg je moguće usporediti s rezultatima dobivenim pokusima je gustoća otpreska nakon faze djelovanja naknadnog tlaka. Uz poznati obujam otpreska moguće je tada usporediti rezultate dobivene simulacijom i rezultate dobivene pokusima. U slučaju prototipnih kalupnih umetaka, trendovi porasta i sniženja gustoće po simuliranim stanjima poklapaju se sa trendovima porasta i sniženja mase otpresaka iz pokusa. Međutim, u dobivenim rezultatima ima odstupanja. Primjerice maksimalna masa otpresaka u pokusu postizana je u stanju 10, dok računalna simulacija rezultira s maksimalnom gustoćom otpreska u stanju pokusa 6. S druge strane dobivene vrijednosti masa otpresaka proračunatih na temelju računalne simulacije se tijekom pokusa kreću u rasponu od 7,87 g do 7,92 g, dok je taj raspon pri stvarnom pokusu 8,11 do 8,41 g. Ovdje dolazi do izražaja odstupanje izmjera prototipnog žiga i matrice od projektiranih, te nemogućnost predviđanja deformacija stijenki kalupne šupljine s pomoću računalnog programa *Moldex3D*.

U slučaju klasičnih kalupnih umetaka raspon masa predviđenih računalnom simulacijom također je iznosio 7,87 g do 7,92 g, što je bilo i očekivano jer se u obzir ne uzimaju razlike u

stlačivostima kalupnih umetaka. Međutim rasponi postignutih masa u slučaju klasičnih kalupnih umetaka iznose 7,69 g do 7,95 g. Dobivene razlike valja tražiti u načinu određivanja gustoće otpresaka s pomoću računala pri čemu su navedene vrijednosti dobivene na temelju prosječne gustoće otpreska. Unatoč tome, u slučaju klasičnog kalupa, vrijednosti dobivene računalnom simulacijom moguće je smatrati prihvatljivima.

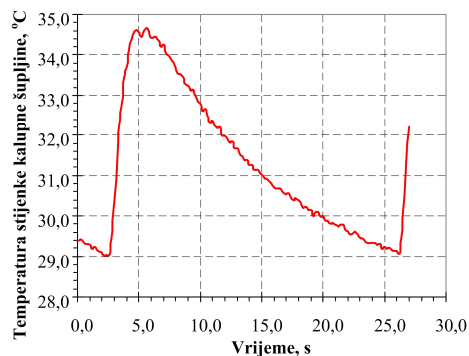
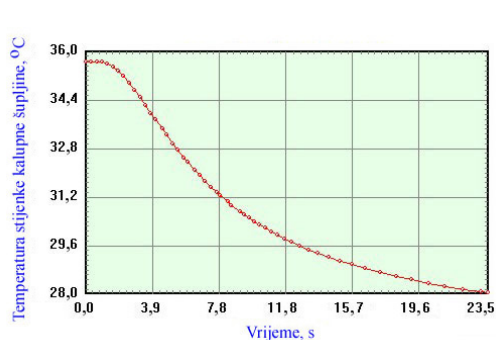
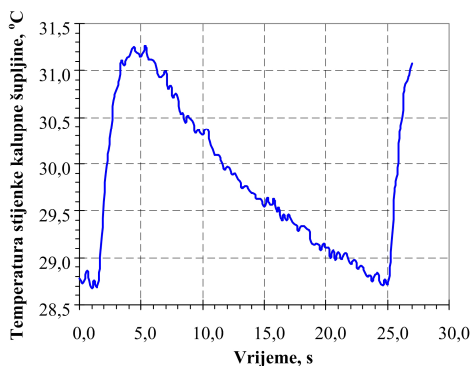
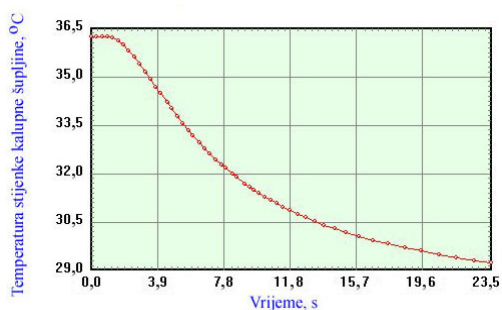
Ocjenu računalnog programa za analizu faze očvršćivanja otpreska moguće je temeljiti na usporedbi rezultata vremena hlađenja otpreska s vrijednostima dobivenim općom jednadžbom za proračun vremena hlađenja otpresaka (jednadžba 3.2) provjerenom u stvarnim pokusima, te na temelju usporedbe dobivenog temperaturnog polja stijenke kalupne šupljine s izmjerenim vrijednostima u pokusima.

U slučaju hibridnog kalupa najkraće vrijeme hlađenja otpreska postignuto je u stanju 11 (najniža temperatura taljevine) s vremenom hlađenja od 20,98 s, a najdulje vrijeme hlađenja otpreska u stanju 12 (najviša temperatura taljevine) s vremenom hlađenja otpreska 25,01 s. U centru pokusa vrijeme hlađenja otpreska dobiveno računalnom simulacijom iznosilo je 23,13 s. Pri tome valja naglasiti kako su navedene vrijednosti postignute na najdebljoj stijenci otpreska od 3,0 mm, dok su se vremena hlađenja potrebna za očvršćivanje debljine stijenke od 1,1 mm kretala oko 3 s. Mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine bilo je provedeno na debljini stijenke od 1,1 mm pa je moguća usporedba tih rezultata s rezultatima simulacije samo na toj debljini stijenke.

Uz već poznata svojstva PP-a, poznatu debljinu stijenke otpreska i temperaturu taljevine, za proračun vremena hlađenja otpreska potrebno je definirati temperaturu stijenke kalupne šupljine. Nju je moguće u slučaju računalne simulacije odrediti na temelju temperaturnog polja stijenke kalupne šupljine tijekom ciklusa injekcijskog prešanja. Temperatura stijenke kalupne šupljine računaska je vrijednost koja se određuje kao aritmetička sredina dodirne temperature i temperature otvaranja kalupa [16]:

$$\vartheta_k = \frac{\vartheta_D + \vartheta_{OK}}{2} \quad (10.17)$$

Slika 10.11 prikazuje temperaturna polja stijenki prototipne i klasične kalupne šupljine. Pro tome su prikazana temperaturna polja postignuta simulacijom (a) i izmjerena (b) za stanje pokusa 11 (najniža temperatura taljevine). U oba slučaja mjesto praćenja temperature stijenke kalupne šupljine je debljina otpreska od 1,1 mm.

Hibridni kalup**Klasični kalup**

a)

b)

Slika 10.11 Temperaturna polja stijenke kalupne šupljine - stanje pokusa 11: a - računalna simulacija, b - mjerenje u pokusu

Na temelju slike 10.11 i izraza 10.17 moguće je odrediti temperature stijenke kalupne šupljine (ϑ_K) za oba kalupa (tablica 10.2).

Tablica 10.2 Temperature stijenke kalupne šupljine (stanje pokusa 11)

Kalup	Simulacija	Mjerenje
Hibridni	32,0 °C	32,1 °C
Klasični	32,8 °C	30,1 °C

Na temelju dobivenih temperatura stijenke kalupne šupljine, te s pomoću opće jednadžbe hlađenja otpreska (izraz 3.2) moguće je izračunati i potrebno vrijeme hlađenja otpreska. Pri tome se za temperaturu postojanosti oblika uzelo 93 °C, a u stanju 11 pokusa temperatura taljevine iznosila je 223 °C. Proračun vremena hlađenja otpreska u slučaju hibridnog kalupa proveden je samo za jednu temperaturu stijenke kalupne šupljine, jer je razlika između mjerenih rezultata i rezultata simulacije svega 0,1 °C:

$$t_{h_{11}} = \frac{1,1^2 \cdot 10^{-6}}{5,56 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 1} \cdot \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{223 - 32}{93 - 32}\right) = 3,05 \text{ s}$$

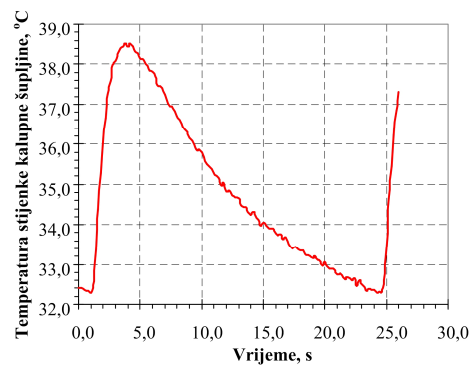
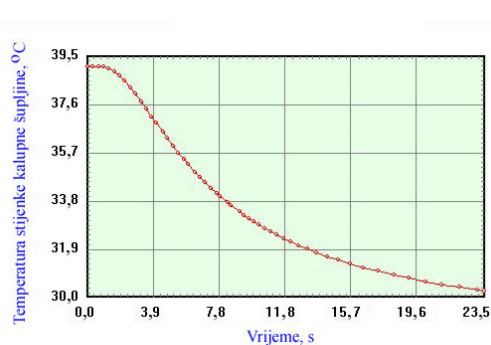
$$t_{k_{11_simulacija}} = \frac{1,1^2 \cdot 10^{-6}}{5,56 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 1} \cdot \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{223 - 32,8}{93 - 32,8}\right) = 3,07 \text{ s}$$

$$t_{k_{11_mjereno}} = \frac{1,1^2 \cdot 10^{-6}}{5,56 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 1} \cdot \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{223 - 30,1}{93 - 30,1}\right) = 3,01 \text{ s}$$

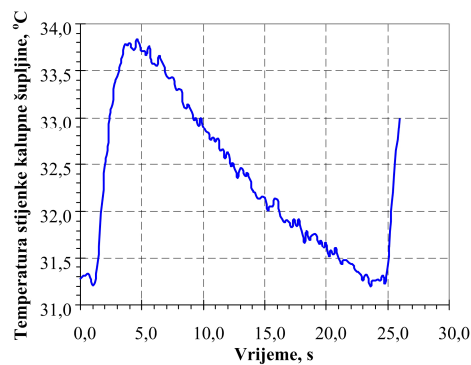
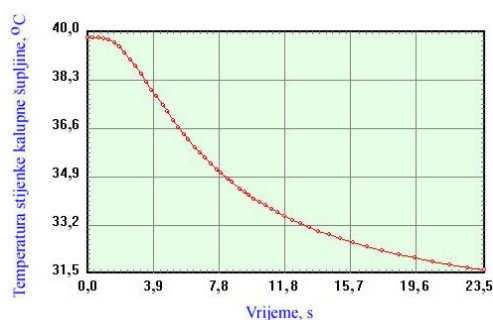
Dobiveni rezultati vremena hlađenja otpreska usporedivi su s rezultatima simulacije.

Sličnu analizu moguće je provesti i za stanje pokusa 12 (najviša temperatura taljevine). Slika 10.12 prikazuje temperaturno polje stijenki prototipne i klasične kalupne šupljine.

Hibridni kalup



Klasični kalup



a)

b)

Slika 10.12 Temperaturna polja stijenki kalupne šupljine - stanje pokusa 12: a - računalna simulacija, b - mjerenje u pokusu

Na temelju slike 10.12 i izraza 10.17 moguće je odrediti temperature stijenki kalupne šupljine (ϑ_K) za oba kalupa (tablica 10.3) za stanje pokusa 12.

Tablica 10.3 Temperature stijenki kalupne šupljine (stanje pokusa 12)

Kalup	Simulacija	Mjerenje
Hibridni	34,9 °C	35,6 °C
Klasični	35,8 °C	32,9 °C

Na isti način kao i pri analizi stanja pokusa 11, moguće je za stanje 12 provesti proračune vremena hlađenja otpreska s pomoću opće jednadžbe hlađenja. Razlika je jedino u visini temperature taljevine koja u ovom slučaju iznosi 257 °C:

$$t_{h_12_simulacija} = \frac{1,1^2 \cdot 10^{-6}}{5,56 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 1} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{257 - 34,9}{93 - 34,9} \right) = 3,49 \text{ s}$$

$$t_{h_12_mjereno} = \frac{1,1^2 \cdot 10^{-6}}{5,56 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 1} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{257 - 35,6}{93 - 35,6} \right) = 3,51 \text{ s}$$

$$t_{k_12_simulacija} = \frac{1,1^2 \cdot 10^{-6}}{5,56 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 1} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{257 - 35,8}{93 - 35,8} \right) = 3,52 \text{ s}$$

$$t_{k_12_mjereno} = \frac{1,1^2 \cdot 10^{-6}}{5,56 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 1} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{257 - 32,9}{93 - 32,9} \right) = 3,44 \text{ s}$$

Rezultati u vremenima hlađenja otpresaka dobiveni mjerenjima i simulacijom vrlo se malo razlikuju. Međutim za oba stanja pokusa uočavaju se bitnije razlike u postizanju temperaturnih polja stijenke kalupne šupljine (slike 10.11 i 10.12).

U slučaju oba kalupa pri računalnoj simulaciji u pravilu su dobivane nešto više vrijednosti dodirnih temperatura od mjerenih vrijednosti. Istodobno, temperaturni gradijenti dobiveni simulacijom su veći nego li postignuti u stvarnim pokusima. Takva odstupanja dodirnih temperatura i temperaturnog gradijenta moguće je objasniti činjenicom kako se u simulacijskom modelu točka osjetila temperature definira izravno na modelu otpreska (uz samu stijenku kalupne šupljine), dok je u stvarnom kalupu osjetilo temperature postavljeno 1,0 mm ispod stijenke kalupne šupljine, te su mjerene vrijednosti stoga nešto niže.

Rezultate postignutih dodirnih temperatura i temperaturnih gradijenata za stanja pokusa 11 i 12 prikazuje tablica 10.4.

Tablica 10.4 Rezultati analize temperaturnog polja kalupa (stanja pokusa 11 i 12)

Stanja pokusa	Simulacija / mjerenje			
	Dodirna temperatura		Temperaturni gradijent	
	Hibridni kalup °C	Klasični kalup °C	Hibridni kalup °C	Klasični kalup °C
Stanje 11	35,8 / 34,7	36,2 / 31,3	7,8 / 5,7	6,9 / 2,5
Stanje 12	39,2 / 38,5	39,8 / 33,8	9,0 / 6,3	8,2 / 2,6

Pri usporedbi dodirnih temperatura u hibridnom kalupu, računalna simulacija rezultirala je vrlo dobrim predviđanjem. Prosječno odstupanje u tom slučaju iznosi 0,9 °C. U slučaju klasičnog kalupa te su razlike bitno veće i iznose u prosjeku 5,4 °C (više nego 5 puta veća razlika u predviđanju dodirne temperature nego li u slučaju hibridnog kalupa).

Kako bi se i statistički provjerila je li razlika između rezultata dobivenih računalnom simulacijom i pokusima signifikantna, moguće je načiniti test signifikantnosti s jednim faktorom dodirnom temperaturom, odnosno temperaturnim gradijentom (tablice 10.5 i 10.8).

Tablica 10.5 Rezultati testa signifikantnosti - dodirna temperatura (hibridni kalup)

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Stupanj slobode	Varijanca	$F_{rač}$	$F_{tab 0,05}$
Između uzorka	3,816333	1	3,816333	2,738714	4,20
Unutar uzorka	39,01733	28	1,393476		
Ukupno	42,83367	29			

$F_{rač} < F_{tab 0,05}$ (nema signifikantne razlike u dobivenim rezultatima)

Tablica 10.6 Rezultati testa signifikantnosti - dodirna temperatura (klasični kalup)

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Stupanj slobode	Varijanca	$F_{rač}$	$F_{tab 0,05}$
Između uzorka	208,5603	1	208,5603	242,7809	4,20
Unutar uzorka	24,05666	28	0,859048		
Ukupno	232,6137	29			

$F_{rač} > F_{tab 0,05}$ (postoji signifikantna razlika u dobivenim rezultatima)

Tablica 10.7 Rezultati testa signifikantnosti - temperaturni gradijent (hibridni kalup)

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Stupanj slobode	Varijanca	$F_{rač}$	$F_{tab 0,05}$
Između uzorka	42,96033	1	42,96033	228,3967	4,20
Unutar uzorka	5,266667	28	0,188095		
Ukupno	48,227	29			

$F_{rač} > F_{tab 0,05}$ (postoji signifikantna razlika u dobivenim rezultatima)

Tablica 10.8 Rezultati testa signifikantnosti - temperaturni gradijent (klasični kalup)

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Stupanj slobode	Varijanca	$F_{rač}$	$F_{tab 0,05}$
Između uzorka	186,5013	1	186,5013	2206,495	4,20
Unutar uzorka	2,366667	28	0,084524		
Ukupno	188,868	29			

$F_{rač} > F_{tab 0,05}$ (postoji signifikantna razlika u dobivenim rezultatima)

Pri analizi temperaturnog polja u oba kalupa (simulacijskog i stvarnog) primijećena je još jedna pojava. Simulacija u slučaju klasičnog kalupa rezultirala je u pravilu višim dodirnim temperaturama nego li simulacija u slučaju prototipnog kalupa. Kao najbolji pokazatelj za postizanje odgovarajuće dodirne temperature moguće je analizirati toplinske prodornosti oba materijala kalupnih umetaka. Svojstva potrebna za proračun toplinske prodornosti nalaze se u tablici 10.9.

Tablica 10.9 Toplinska svojstva materijala kalupnih umetaka [131,140]

Svojstvo materijala	Jedinica	Č4742 (1.2312)	LaserForm A6
Toplinska provodnost, λ	W/mK	33,3	39,0
Gustoća, ρ	kg/m ³	7 850	7 800
Specifični toplinski kapacitet, c_p	J/kgK	460	340

Toplinsku prodornost moguće je odrediti na temelju izraza [16]:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (10.18)$$

Za oba materijala kalupnih umetaka toplinske prodornosti iznose:

$$b_k = \sqrt{33,3 \cdot 7850 \cdot 460} = 10\,965,7 \text{ Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$$

$$b_h = \sqrt{39 \cdot 7800 \cdot 340} = 10\,170 \text{ Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$$

Materijal prototipnih umetaka iako ima nešto višu toplinsku provodnost, ima nižu toplinsku prodornost. Niža toplinska prodornost rezultira postizanjem viših dodirnih temperatura uslijed akumulacije topline uz površinu stijenke kalupne šupljine. Stoga je simulacijom dobiven nelogičan rezultat u kojem se pri uporabi materijala više toplinske prodornosti postižu i više dodirne temperature. Ovdje se dokazuje tvrdnja iz [16] kako se izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje polimera ne može temeljiti isključivo na jednom svojstvu materijala kalupnih umetaka - toplinskoj provodnosti.

Unatoč razlikama u temperaturnim gradijentima, uočava se isti trend kada se usporede hibridni i

klasični kalup. Pri klasičnom kalupu se ostvaruje manji temperaturni gradijent. To je moguće objasniti nešto boljom toplinskom provodnošću materijala hibridnog kalupa te boljim odvođenjem topline.

Pri analizi rezultata deformacija otpresaka javljaju se najveće razlike između rezultata simulacije i deformacija postignutih u pokusima. Pri računalnoj simulaciji dobivene su manje vrijednosti deformacija nego li pri provedbi pokusa. Tu je pojavu moguće objasniti činjenicom kako je nemoguće predvidjeti deformacije otpreska odmah po vađenju iz kalupne šupljine, te tijekom 48 sati koliko je bilo predviđeno za naknadnu kristalizaciju PP-a. Polipropilen je općenito materijal čiji je jedan od nedostataka vrlo nepravilno skupljanje, a kao posljedica se javlja vitoperenje koje dodatno povećava deformaciju otpreska. Računalna simulacija pri analizi deformacija otpreska omogućuje uvid u razinu deformacija uzrokovanih fazom punjenja kalupa plastomernom taljevinom i njenog stlačivanja (postignuta polja tlakova, gustoća i smičnih naprezanja u kalupnoj šupljini), te fazom očvršćivanja (postignuto temperaturno polje u kalupnoj šupljini). Pri tome prva deformacija ima dominantnu ulogu. Usporedbom s rezultatima pokusa nije uočen niti trend po kojem bi vrijednosti dobivene simulacijom pratile vrijednosti dobivene pokusima.

Dodatno, pri računalnoj analizi deformacija otpresaka u hibridnom kalupu dobivene su manje vrijednosti nego li pri analizi deformacija u klasičnom kalupu. Rezultati pokusa dali su suprotne rezultate. Razlog je moguće objasniti činjenicom kako je računalna simulacija rezultirala postizanjem viših temperatura stijenke kalupne šupljine pri uporabi klasičnog kalupa, što ima za posljedicu veće deformacije otpresaka. U pokusima, temperatura stijenke kalupne šupljine klasičnog kalupa bila je uvijek nešto niža nego li hibridnog kalupa. Stoga je zaključak kako je u ovom slučaju računalna simulacija za predviđanje deformacija otpreska neupotrebljiva.

Konačno, računalni program *Moldex3D* ne omogućuje uvid u bilo koje postignuto mehaničko svojstvo otpreska, pa nije omogućena analiza rastezne žilavosti otpreska s pomoću računala.

10.6 RASPRAVA O OPTIMIRANJU PARAMETARA TANKOSTJENOG INJEKCIJSKOG PREŠANJA U HIBRIDNOM I KLASIČNOM KALUPU

Pri optimiranju parametara tankostjenog injekcijskog prešanja u oba kalupa nastojalo se postići usporediva svojstva otpresaka. Konačni cilj takvog optimiranja je definiranje podesivih parametara preradbe u slučaju uporabe hibridnog kalupa koji rezultiraju svojstvima otpresaka što sličnijim onima postignutim u klasičnom kalupu. Stoga je prvo provedeno optimiranje

parametara preradbe u klasičnom kalupu, a zatim na temelju rezultata optimiranja u klasičnom kalupu i optimiranje u hibridnom kalupu. Optimiranje u oba kalupa provedeno je u dva koraka: kompleksno i parcijalno. Pri tome su deformacije otpreska u smjeru osi *X* i osi *Y* objedinjene. Usporedbu načelnih rezultata kompleksnog optimiranja parametara tankostjenog injekcijskog prešanja u oba kalupa, te razlike postignute u hibridnom kalupu prikazuje tablica 10.10.

Tablica 10.10 Rezultati kompleksnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -1 do 1)

<i>Parametar preradbe / svojstvo otpreska</i>	Klasični kalup	Hibridni kalup	Razlika
Naknadni tlak, bar	404	458 do 468	+13,4 % do +15,8 %
Temperatura taljevine, °C	238	243 do 245	+2,1 % do +2,9 %
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,40	0,30	-25 %
Masa, g	7,82	8,34	+6,6 % (+3,7 %)
Deformacija u smjeru osi <i>X</i> , mm	1,48	1,54	+4,1 %
Deformacija u smjeru osi <i>Y</i> , mm	0,91	0,91	0
Rastezna žilavost, kJ/m ²	124	95 do 98	-23,4 % do -21 %

Analizom tablice 10.10 uočava se velika razlika u postignutoj rasteznoj žilavosti. Jedna od prednosti uporabe metode odzivnih površina je uvid u proces na širokom rasponu podesivih parametara. Stoga je pri optimiranju parametara preradbe u hibridnom kalupu područje podesivih parametara prošireno na -2 do 2. Rezultate optimiranja u tom slučaju prikazuje tablica 10.11. Pri tome valja imati na umu kako se pokus proveo na području -1,68 do 1,68.

Tablica 10.11 Rezultati kompleksnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -2 do 2 za hibridni kalup)

<i>Parametar preradbe / svojstvo otpreska</i>	Klasični kalup	Hibridni kalup	Razlika
Naknadni tlak, bar	404	437,8	+8,4 %
Temperatura taljevine, °C	238	245	+2,9 %
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,40	0,15	-62,5 %
Masa, g	7,82	8,31	+6,3 % (3,4 %)
Deformacija u smjeru osi <i>X</i> , mm	1,48	1,53	+3,4 %
Deformacija u smjeru osi <i>Y</i> , mm	0,91	0,90	≈ 0
Rastezna žilavost, kJ/m ²	124	106	-14,5 %

Proširenje područja parametara preradbe imalo je smisla samo za jedan podesivi parametar preradbe - vrijeme ubrizgavanja. Nešto niži naknadni tlak i bitno kraće vrijeme ubrizgavanja rezultirali su očitim smanjenjem razlike u postignutim rasteznim žilavostima otpresaka. Sljedeća po veličini je razlika u postignutim masama otpresaka. Tu je razliku moguće smanjiti primjerice skraćanjem vremena djelovanja naknadnog tlaka u slučaju hibridnog kalupa (tablica 10.12).

Tablica 10.12 Rezultati kompleksnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -2 do 2 za hibridni kalup, vrijeme djelovanja naknadnog tlaka 3,0 s)

<i>Parametar preradbe / svojstvo otpreska</i>	Klasični kalup	Hibridni kalup*	Razlika
Naknadni tlak, bar	404	438	+8,4 %
Temperatura taljevine, °C	238	245	+2,9 %
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,40	0,15	-62,5 %
Masa, g	7,82	8,05	+2,9 % (0)
Deformacija u smjeru osi X, mm	1,48	1,65	+11,5 %
Deformacija u smjeru osi Y, mm	0,91	1,02	+12,1 %
Rastezna žilavost, kJ/m ²	124	117	-5,6 %

* podatci dobiveni provjerom optimiranja u stvarnom ciklusu

Iz tablice 10.12 vidljivo je kako skraćenje djelovanja naknadnog tlaka smanjuje razliku između postignutih masa otpresaka. Razlika u masama otpreska iznosi nakon skraćjenja vremena djelovanja naknadnog tlaka 2,9 %, no kako je to već ranije utvrđeno, ta razlika nastaje uslijed razlika u izmjerama kalupnih umetaka. Stoga se u ovom slučaju može smatrati kako razlike u masama otpreska uslijed stlačivanja kalupnih umetaka nema. U tablici 10.12 uočeno je i smanjenje razlike u rasteznim žilavostima, što se može objasniti kraćim djelovanjem naknadnog tlaka na slaganje makromolekulnih lanaca te manjim napetostima u otpresku. Međutim, skraćenje vremena djelovanja naknadnog tlaka ima za posljedicu istodobno povećanje deformacija otpresaka, što je neželjena pojava.

Pri parcijalnom optimiranju svako svojstvo otpreska promatra se odvojeno. Rezultate optimiranja parametara preradbe u oba kalupa za u slučaju analize mase otpresaka prikazuje tablica 10.13.

Tablica 10.13 Rezultati parcijalnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -1 do 1) - svojstvo masa

<i>Parametar preradbe / svojstvo otpreska</i>	Klasični kalup	Hibridni kalup	Razlika
Naknadni tlak, bar	385,3 do 407,7	330	-14,4 % do -19,1 %
Temperatura taljevine, °C	235,3 do 248,9	230	-2,3 % do -7,6 %
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,50 do 0,59	0,33	-34 % do -44,1 %
Masa, g	7,82	8,17	+4,5 % (+1,6 %)

Razlika u masama otpreska iznosi ukupno 4,5 %, no kada se ta razlika umanjuje za 2,9 %, razlika u masama otpresaka uslijed stlačivanja prototipnih kalupnih umetaka iznosi svega 1,6 %

Rezultate optimiranja parametara preradbe pri praćenju deformacija otpreska u oba kalupa prikazuje tablica 10.14.

Tablica 10.14 Rezultati parcijalnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -1 do 1) - svojstvo *deformacije*

<i>Parametar preradbe / svojstvo otpreska</i>	Klasični kalup	Hibridni kalup	Razlika
Naknadni tlak, bar	376,9 do 435,7	470	+7,9 % do +24,7 %
Temperatura taljevine, °C	230 do 243,4	243	0 do +5,7 %
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,37 do 0,47	0,30	-18,9 % do -36,1 %
Deformacija u smjeru osi X, mm	1,49	1,53	+2,7 %
Deformacija u smjeru osi Y, mm	0,90	0,90	0

U rasponu podesivih parametara -1 do 1 dobivene su zadovoljavajuće male razlike.

Pri analizi rastezne žilavosti otpresaka rezultate optimiranja prikazuje tablica 10.15.

Tablica 10.15 Rezultati parcijalnog optimiranja u klasičnom i hibridnom kalupu (područje parametara -1 do 1) - svojstvo *rastezna žilavost*

<i>Parametar preradbe / svojstvo otpreska</i>	Klasični kalup	Hibridni kalup	Razlika
Naknadni tlak, bar	407,7 do 454,6	330	-19,1 % do -27,4 %
Temperatura taljevine, °C	238,3 do 249	250	0 do +4,9 %
Vrijeme ubrizgavanja, s	0,42 do 0,57	0,60	+42,9 % do +66,7 %
Rastezna žilavost, kJ/m ²	124	118	-4,8 %

Razlika manja od 5 % je u ovom slučaju zadovoljavajuća pa se nije provodilo proširenje raspona parametara preradbe u hibridnom kalupu. Na temelju rezultata prikazanih u tablicama 10.10 do 10.15 moguće je dati okvirne smjernice za podešavanje parametara injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu (tablica 10.16) koji bi trebali rezultirati svojstvima otpresaka usporedivim sa svojstvima otpresaka načinjenih u klasičnom kalupu.

Tablica 10.16 Smjernice za podešavanje parametara injekcijskog prešanja u hibridnom kalupu

<i>Parametar</i>	<i>Cilj optimiranja</i>			
	<i>Kompleksno optimiranje</i>	<i>Masa</i>	<i>Deformacija</i>	<i>Rastezna žilavost</i>
Naknadni tlak	+10 %	-30 %	+10 do +25 %	-20 do -30 %
Temperatura taljevine	+5 %	-10 %	+5 %	0 do +5 %
Vrijeme ubrizgavanja	-60 %	-70 %	-20 do -35 %	+45 do +70 %

* navedene smjernice vrijede pri maksimalnom vremenu djelovanja naknadnog tlaka

Cilj optimiranja nije definiranje konkretnih vrijednosti parametara već definiranje područja u kojima bi se pojedini parametri trebali kretati za postizanje željenih svojstava otpresaka.

Pri kompleksnom optimiranju gotovo nisu potrebna podešavanja naknadnog tlaka i temperature taljevine, no vrijeme ubrizgavanja potrebno je u hibridnom kalupu skratiti (povisiti brzinu ubrizgavanja) za 60 % s trendom prema minimalnim vrijednostima. Pri tome se kao najveća razlika u svojstvima postiže 14,5 % niža rastezna žilavost. Razlike u ostalim svojstvima nalaze se unutar granica od 5 %. Potrebu za značajnim podešavanjem vremena ubrizgavanja moguće je objasniti povišenom hrapavošću stijenke prototipne kalupne šupljine što otežava tečenje plastomerne taljevine pri čemu punjenje kalupne šupljine nije optimalno. Pri pokusima su rabljena vrlo kratka vremena ubrizgavanja (0,15 do 0,7 s) pa promjena od 60 % u apsolutnom iznosu nema toliku težinu. Opći je zaključak kako vrijeme ubrizgavanja u slučaju uporabe hibridnog kalupa treba minimirati. Pri optimiranju mase otpresaka logično je očekivati potrebu za sniženjem naknadnog tlaka i temperature taljevine, kao i za povišenjem brzine ubrizgavanja. Unatoč višoj stlačivosti prototipnih kalupnih umetaka, optimiranje parametara preradbe na temelju postizanja ciljane vrijednosti deformacija rezultiralo je neznatnim povišenjem naknadnog tlaka, gotovo identičnom temperaturom taljevine, te bitnim skraćanjem vremena ubrizgavanja. Konačno, pri optimiranju parametara u hibridnom kalupu u cilju postizanja željene rastezne žilavosti sniženje naknadnog tlaka i bitno produljenje vremena ubrizgavanja očekivani su rezultati, kao i neznatno povišenje temperature taljevine.

Pomnijom analizom potrebnih podešavanja parametara preradbe u hibridnom kalupu moguće je zaključiti kako su najveće korekcije potrebne pri podešavanju vremena ubrizgavanja. Uglavnom se radi o skraćanju vremena ubrizgavanja, osim u slučaju rastezne žilavosti. Podešenja naknadnog tlaka ovise o promatranom svojstvu otpreska. Temperatura taljevine pokazala se kao parametar kojeg gotovo nije potrebno mijenjati u usporedbi s klasičnim kalupom. Ukoliko su promjene parametara potrebne, najčešće su s pozitivnim predznakom (osim u slučaju optimiranja mase otpreska).

10.7 RASPRAVA O REZULTATIMA ANALIZE OSJETLJIVOSTI HIBRIDNOG I KLASIČNOG KALUPA NA ZASTOJE

Pri analizi osjetljivosti kalupa na zastoje nastojalo se utvrditi koji od kompleta kalupnih umetaka uzrokuje kraće vrijeme, odnosno manji broj ciklusa do postizanja ponovne toplinske ravnoteže kalupa, pri namjerno izazvanom zastoju rada kalupa. Sa 4 skupine parametara preradbe nastojalo se utvrditi utjecaj dopunskog vremena hlađenja otpreska i temperature taljevine na broj potrebnih ciklusa injekcijskog prešanja do postizanja toplinske ravnoteže pri početnom zagrijavanju kalupa, te nakon namjerno izazvanog zastoja u radu.

Na temelju analize tablice 9.51, te slika 13.7 do 13.10 (prilog 13.11) moguće je zaključiti kako je u hibridnom kalupu pri svim skupinama podesivih parametara bilo potrebno nekoliko ciklusa više do postizanja toplinske ravnoteže nego li u klasičnom kalupu. Razlika je veća pri početnom zagrijavanju, dok se nakon zastoja radi o razlici od 1 do 2 ciklusa. Takve rezultate je bilo logično očekivati stoga što oba materijala kalupnih umetaka imaju usporediva toplinska svojstva. Niža toplinska prodornost materijala prototipnih umetaka rezultirala je postizanjem viših dodirnih temperatura, no istodobna viša toplinska provodnost rezultirala je većim temperaturnim gradijentom stijenke kalupne šupljine tijekom ciklusa u usporedbi s klasičnim kalupnim umetcima. To znači da je tijekom ciklusa brže hlađenje prototipnih kalupnih umetaka, a kao rezultat javlja se veći broj ciklusa potrebnih za postizanje toplinske ravnoteže.

Pri praćenju utjecaja temperature taljevine na broj ciklusa potrebnih za postizanje toplinske ravnoteže dobiven je očekivani rezultat - povišenje temperature taljevine uzrokuje smanjenje broja potrebnih ciklusa do ravnotežnog stanja. Pri višim temperaturama taljevine postiže se brže zagrijavanje stijenke kalupne šupljine, što u konačnici rezultira manjim brojem ciklusa do ravnotežnog stanja. S druge strane, produljenje dopunskog vremena hlađenja još očitije utječe na broj ciklusa do ravnotežnog stanja. Produljenje tog vremena od 6 s rezultiralo je pri nižim temperaturama taljevine s gotovo polovicom broja ciklusa do ravnotežnog stanja u hibridnom kalupu, a u klasičnom i manje od polovice. Pri višim temperaturama taljevine ta razlika nešto je manja radi samog utjecaja povišenja temperature taljevine. Dominacija dopunskog vremena hlađenja na postizanje određenog broja ciklusa do ravnotežnog stanja potvrđena je činjenicom kako su pri duljem dopunskom vremenu hlađenja otpreska dobiveni gotovo isti rezultati na obje razine temperature taljevine. Povišenje temperature taljevine od 60 °C u tom slučaju gotovo nije imalo učinka na broj ciklusa do ravnotežnog stanja (tablica 9.51). Tu je pojavu moguće objasniti činjenicom kako pri duljem vremenu ciklusa injekcijskog prešanja taljevina dulje vrijeme boravi u kalupnoj šupljini, te preda kalupu veću količinu topline po ciklusu. Takvo stanje posredno ima za posljedicu brže zagrijavanje kalupa i brže postizanje toplinske ravnoteže.

10.8 KRITIKA VLASTITOG RADA I POTICAJ BUDUĆEM RADU

Pri provedbi istraživanja u okviru rada postojala su određena ograničenja koja su utjecala na sam rad i dobivene rezultate.

Tlak u kalupnoj šupljini jedan je od najbitnijih parametara injekcijskog prešanja koji izravno utječe na svojstva otpresaka. Istraživanje u okviru rada obuhvatilo je utjecaj naknadnog tlaka

postignutog u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice na svojstva otpreska prvenstveno stoga što je to nezavisno podesiv parametar injekcijskog prešanja. Tlak u kalupnoj šupljini iako je zavisni parametar procesa, daje izravne informacije o postignutim svojstvima otpreska, te ukazuje na potencijalne pogreške načinjene pri podešavanju nezavisnih parametara injekcijskog prešanja (npr. pogrešno preklapanje s tlaka ubrizgavanja na naknadni tlak). Stoga bi u daljnjim istraživanjima valjalo obuhvatiti mjerenja tlaka u kalupnoj šupljini.

Izostanak temperiranja iz eksperimentalnog sustava onemogućio je praćenje utjecaja temperature medija za temperiranje na svojstva otpresaka. S pomoću tog podesivog parametra omogućila bi se još dublja analiza temperaturnog polja u oba kalupa, te utjecaj intenzivnosti izmjene topline na postignuta svojstva otpresaka.

U radu je analiziran utjecaj samo jedne vrste prototipnih kalupnih umetaka. Na tržištu je dostupan veći broj postupaka brze izradbe kalupnih elemenata. Njihov izbor načelno definira i izbor materijala prototipnih kalupnih umetaka. Stoga bi u budućim istraživanjima bilo potrebno načiniti slične analize u cilju dobivanja veće baze znanja o tome kako hibridni kalupi utječu na svojstva otpresaka i parametre injekcijskog prešanja. Istodobno moguće je istraživanje proširiti i na neke klasične kalupne materijale (primjerice berilijevu broncu i aluminijski).

Tijekom istraživanja u okviru rada u oba kalupa kanali za temperiranje bili su izvedeni izravno u kalupnim pločama (po dva kanala u oba dijela kalupa), dok sami kalupni umetci nisu bili posebno temperirani. Postupci brze izradbe kalupnih elemenata međutim omogućuju bitno veću slobodu u definiranju kanala za temperiranje glede položaja kanala, njihovog toka, kao i njihovog oblika, a sve u cilju postizanja optimalnog temperaturnog polja u kalupu. S pomoću tih postupaka moguće je pratiti konture otpresaka bez obzira na njihovu geometrijsku kompliciranost. S druge strane, primjerice postoji mogućnost izradbe elipsastog oblika kanala za temperiranje koji rezultira i do 30 % većom površinom stijenke kanala, a time i mogućnošću intenzivnije izmjene topline. Stoga u radu nije iskorištena jedna od prednosti postupaka brze izradbe elemenata kalupa. Pri budućim istraživanjima bilo bi potrebno temperirati i kalupne umetke, pri čemu valja iskoristiti mogućnosti postupaka brze izradbe kalupnih elemenata za izradbu optimalnog sustava kanala za temperiranje. Početne smjernice moguće je pri tome dobiti s pomoću odgovarajuće računalne simulacije.

Za potrebe rada materijal za izradbu otpresaka bio je polipropilen. Radi se o kristalastom plastomeru izrazito nepravilnog skupljanja i posljedičnog vitoperenja. Upravo ta činjenica dovela

je i do bitnih razlika između rezultata analize deformacija dobivenih računalnom simulacijom i pokusima. U budućem istraživanju na tom polju valjalo bi utvrditi kakvi su rezultati pri uporabi amorfnih plastomera, primjerice polistirena (PS) ili akrilonitril/butadien/stirena (ABS). Ti materijali se također često rabe pri tankostjenom injekcijskom prešanju, a pri njihovoj se uporabi očekuju bitno manje deformacije otpresaka nego li pri uporabi PP-a. Dodatno, moguće je istraživanje proširiti na materijale koji su zahtjevniji glede parametara preradbe i izdržljivosti kalupa, primjerice polikarbonat (PC).

Pri provedbi pokusa dopunsko vrijeme hlađenja otpreska podešeno je na 15 s. Međutim, iako se to vrijeme može nezavisno podesiti na ubrizgavalici, ono je samo uvjetno nezavisni parametar. Na njega utječu temperatura taljevine i temperatura stijenke kalupne šupljine, te vremena u ciklusu koja mu prethode (vrijeme ubrizgavanja i vrijeme djelovanja naknadnog tlaka). Stoga bi za pravilno određivanje dopunskog vremena hlađenja bilo potrebno provesti pretpokuse kako bi se za buduće pokuse odredili parametri koji utječu na dopunsko vrijeme hlađenja, te shodno tome izračunalo dopunsko vrijeme hlađenja za svaku točku pokusa.

Kao najveći izvor netočnosti rezultata dobivenih pri određivanju svojstava otpresaka ocijenjeno je mjerenje izmjera otpresaka s pomoću pomične mjerke (kontaktno mjerenje). Pri takvom mjerenju moguće je unijeti grešku u dobiveni rezultat mjerenja uslijed osjetljivosti tankostjenog otpreska na deformacije. Stoga se radi uklanjanja tog izvora netočnosti rezultata mjerenja u budućim istraživanjima preporučuje uporaba neke od metoda bezdodirnog mjerenja. Prvenstveno su tu na raspolaganju digitalne kamere i skeneri s pomoću kojih je moguće dobivanje slike otpreska koja se zatim s pomoću posebnog računalnog programa uspoređuje sa slikom (modelom) *projektiranog* otpreska, te se proračunavaju odstupanja od zadanih izmjera.

Pri analizi tankostjenog injekcijskog prešanja s pomoću računalne simulacije u radu nije bilo moguće uzeti u obzir stlačivanje kalupnih umetaka (posebice prototipnih). Promjena debljine stijenke od gotovo 10 % bitno utječe i na postignute uvjete u kalupnoj šupljini, a i na svojstva otpresaka. Stoga bi u budućim istraživanjima valjalo kombinirati barem dva računalna programa; jedan za simulaciju injekcijskog prešanja, a drugi za proračun deformacija stijenki kalupne šupljine. U prvom koraku tada bi se na temelju simulacije injekcijskog prešanja dobila polja tlakova u kalupnoj šupljini. Na temelju tih podataka, u drugom koraku s pomoću računalnog programa koji omogućuje analize naprezanja i deformacija u modelima, odredili bi se iznosi deformacija stijenke kalupne šupljine. Konačno s tako definiranom kalupnom šupljinom ponovila bi se simulacija injekcijskog prešanja sa stvarnim izmjerama stijenke otpreska.

Sličnu kombinaciju računalnih programa valjalo bi ubuduće rabiti i pri pokušaju analize mehaničkih svojstava otpresaka s pomoću računala. Nakon definiranja stvarne debljine stijenke otpreska i provedene simulacije, mrežu konačnih elemenata otpreska sa svim podacima iz simulacije potrebno je učitati u računalni program koji omogućuje na temelju podataka iz simulacije procjenu mehaničkih svojstava otpreska.

Konačno, radi što bolje ocjene uporabljivosti računalne simulacije potrebno je za analizu rabiti nekoliko računalnih programa te dobivene rezultate usporediti s postignutima u pokusima, odnosno usporediti međusobno rezultate dobivene pojedinim računalnim programima. Na temelju takve analize moguće je izabrati program koji daje rezultate najbliže stvarnima.

11 ZAKLJUČAK

U okviru rada načinjena je usporedna analiza utjecaja prototipnog (hibridnog) kalupa i klasičnog kalupa na svojstva tankostjenog injekcijski prešanog otpreska od polipropilena. Pri analizi utjecaja oba kalupa na svojstva tankostjenog otpreska nastojalo se za predviđanja zbivanja u kalupnoj šupljini te nekih svojstava otpreska primijeniti računalnu simulaciju injekcijskog prešanja, odnosno procijeniti primjenjivost računalne simulacije pri tankostjenom injekcijskom prešanju u oba kalupa. Konačno, načinjena je analiza osjetljivosti oba kalupa na zastoje u radu.

Na temelju provedenih istraživanja došlo se do nekoliko zaključaka.

U okviru pretpokusa načinjen je izbor 4 najutjecajnije parametra injekcijskog prešanja na promatrana svojstva tankostjenog otpreska. Najutjecajniji parametar je vrijeme djelovanja naknadnog tlaka, no njegov je utjecaj ograničen na vrijeme očvršćivanja ušća. Stoga je određeno maksimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka, a ostatak istraživanja proveden je s tom vrijednošću. Kao utjecajni parametri pri tankostjenom injekcijskom prešanju u hibridnom kalupu dobiveni su: naknadni tlak, temperatura taljevine i vrijeme (brzina) ubrizgavanja. U radu je kroz analizu sposobnosti procesa, pretpokus, glavni pokus i analizu osjetljivosti zastoja hibridnog kalupa načinjena opsežna analiza utjecaja hibridnog i klasičnog kalupa na postignuta svojstva otpresaka (masa otpreska, stabilnost izmjera, rastezna žilavost) i na neke zavisne parametre preradbe (temperaturno polje stijenke kalupne šupljine). Pri uporabi hibridnog kalupa uočena je povišena stlačivost prototipnih kalupnih umetaka što se očitovalo u postizanju masivnijih otpresaka u usporedbi s klasičnim kalupima. Pri analizi dimenzijske stabilnosti otpresaka, preradba u hibridnom kalupu rezultirala je većim iznosima deformacija nego li u klasičnom kalupu. To je posljedica većeg temperaturnog gradijenta stijenke prototipne kalupne šupljine tijekom ciklusa, te viših temperatura stijenke kalupne šupljine pri kojima otpresci napuštaju prototipnu kalupnu šupljinu. Konačno, rastezna žilavost otpresaka načinjenih u hibridnom kalupu niža je nego li onih načinjenih u klasičnom kalupu. Razlog leži u višoj toplinskoj provodnosti prototipnih kalupnih umetaka zbog čega se stijenka kalupne šupljine odnosno otpresci brže hlade, što ne pogoduje stvaranju finostrukture sferolita koja rezultira višom žilavošću.

Dobivene razlike moguće je smanjiti optimiranjem (podešavanjem) parametara preradbe pri uporabi hibridnog kalupa. U okviru rada provedena su kompleksna i parcijalna optimiranja parametara preradbe. Rezultati optimiranja, odnosno smjernice za podešavanje parametara pri uporabi hibridnog kalupa sažeti su u tablici 10.16. Iz tablice je očito kako je najveće zahvate potrebno načiniti s vremenom (brzinom) ubrizgavanja, dok je primjerice temperaturu taljevine potrebno zanemarivo podesiti. Naknadni tlak potrebno je neznatno podesiti ovisno o promatranom svojstvu otpreska. Takve smjernice za podešavanje parametara preradbe u hibridnom kalupu rezultiraju postizanjem svojstava otpresaka usporedivih sa svojstvima otpresaka načinjenih u klasičnom kalupu. Time je ujedno potvrđena i glavna hipoteza rada. Najveća razlika koja se pri tome postiže niža je rastezna žilavost otpresaka načinjenih u hibridnom kalupu.

Računalna simulacija postupka injekcijskog prešanja nameće se kao jedan od alata s pomoću kojeg je moguće predvidjeti neke parametre injekcijskog prešanja i neka svojstva otpreska, te načiniti potrebna optimiranja samog postupka. Stoga je u radu primijenjena računalna simulacija tankostjenog injekcijskog prešanja u hibridnom i klasičnom kalupu. Rezultati računalne analize faze ubrizgavanja i djelovanja naknadnog tlaka, te donekle toplinskog proračuna (očvršćivanje otpreska) ocijenjeni su, kroz usporedbu sa stvarnim stanjima iz pokusa s oba kalupa, kao prihvatljivima. Pri toplinskom proračunu kalupa dobivena su odstupanja u rezultatima temperaturnog polja stijenke kalupne šupljine na mjestu osjetila temperature. Konačno, pri analizi deformacija otpreska računalna simulacija pokazala se neupotrebljivom.

U okviru istraživanja načinjena je i analiza osjetljivosti hibridnog i klasičnog kalupa na zastoje u radu. Kao neznatno osjetljiviji na zastoje ocijenjen je hibridni kalup, jer je za postizanje toplinske ravnoteže kalupa, nakon zastoja u radu, potreban veći broj ciklusa. Pri provedenoj analizi također je uočena dominantnost vremena ciklusa injekcijskog prešanja nad temperaturom taljevine. Produljenje vremena ciklusa injekcijskog prešanja rezultira bitnim smanjenjem broja ciklusa potrebnih do postizanja toplinske ravnoteže kalupa.

12 LITERATURA

1. A. Gebhardt: Rapid Prototyping, Werkzeug für die schnelle Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München, 1996.
2. A. Gebhardt: Rapid Prototyping, Carl Hanser Verlag, München, 2003.
3. A. Gebhardt: Rapid Tooling, Kunststoffe, 88(1998)11, 1992-2000.
4. N.P. Karapatis, J.P.S. van Griethuysen, R. Glardon: Direct rapid tooling: a review of current research, Rapid Prototyping Journal, 4(1998)2, pp. 77-89.
5. J.W. Barlow, J.J. Beaman, B. Balasubramanian: A rapid mould-making system: material properties and design consideration, Rapid Prototyping Journal, 2 (1996)3, pp. 4-15.
6. R. Aluru, M. Keefe, S. Advani: Simulation of injection molding into rapid-prototyped molds, Rapid Prototyping Journal, 7(2001)1, pp. 42-51.
7. I. Čatić: Uvod u proizvodnju polimernih tvorevina, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1991.
8. A. Rogić, I. Čatić: Injekcijsko prešanje polimera, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1996.
9. I. Čatić, N. Razi, P. Raos: Analiza injekcijskog prešanja polimera teorijom sustava, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1991.
10. G. Pötsch, W. Michaeli: Injection Molding, Carl Hanser Verlag, München, 1995.
11. F. Johannaber: Injection Molding Machines, Carl Hanser Verlag, München, 1994.
12. E.B. Garvey: On-line Quality Control of Injection Molding Using Neural Networks, M.Sc. Thesis, Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne, 1997.
13. M. Šercer, I. Čatić: Vođenje procesa injekcijskog prešanja plastomera, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1986.
14. M. Šercer: Reguliranje procesa injekcijskog prešanja od ciklusa do ciklusa, Magistarski rad, Tehnološki fakultet, Zagreb, 1984.
15. M. Wagner: Part dimensional consistency with different switchpoint controls techniques, Conference Proceedings, ANTEC '94, San Francisco, 01.-05.05.1994., 716-720
16. I. Čatić: Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1985.
17. A. Rogić: Optimiranje temperatura prerade u procesu injekcijskog prešanja plastomera, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1987.
18. N.N.: Upute za uporabu računalnog programa Moldex 3D, CoreTech Systems, 2004.
19. N.N.: Upute za uporabu računalnog programa Moldflow Plastics Inside, Moldflow, 2004.
20. P.J. Blyskal, P.J. Meheran: Applying design of experiment analysis techniques to the injection molding process, ANTEC '94, Conference Proceedings, San Francisco, 01.-05.05.1994., 729-732

21. D.M. Gao, K.T. Nguyen, P. Girard, G. Salloum: Effect of variable injection speed in injection moulding, Conference Proceedings, ANTEC '94, San Francisco, 01.-05.05.1994., 712-715
22. D.B. Hunkar: MAD approach to the determination of optimum machine setups in injection molding of thermoplastics, ANTEC '94, San Francisco, 01.-05.05.1994., 721-728
23. G. Xu, K.W. Koelling: Study of Cavity Pressure and its Prediction during Injection Molding, *ANTEC 2003*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Nashville, 4.-8.5.2003., 566-570.
24. F. Gao, H. Koresawa, H. Narahara, H. Suzuki: Evaluation of thermal environment in plastic injection mold, *ANTEC 2001*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 6.-10.5.2001., 969-973.
25. J.C. Rowland, D.O. Kazmer: An On-line Quality Monitoring System for Thermoplastic Injection Molding, *ANTEC '96*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Indianapolis, 5.-10.5.1996., 513-518.
26. Th. Wenniges, H. Potente: Optimisation of the injection moulding process with multi-cavity moulds, *ANTEC '95*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Boston, 7.-11.5.1995., 659-662.
27. J.C. Rowland, K. Ho-Le: Process Quality Assurance for Injection Molding of Thermoplastic Polymers, *ANTEC '94*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, San Francisco, 1.-5.5.1994., 342-347.
28. M. Bandreddi, R. Nunn, R.A. Malloy: An Investigation of Time Based Holding Pressure Profiles, *ANTEC '94*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, San Francisco, 1.-5.5.1994., 348-352.
29. C. Collins, Monitoring cavity pressure perfects injection molding, *Assembly Automation*, 19(1999)3, pp. 197-202.
30. M.S.A. Oliveira, R. Alves, M. Sousa, A.C.M. Sousa: A neural network strategy for improved injection moulding quality, ICIT 2003, Conference Proceedings, TECOS, Bled-Celje, 8.-12.4.2003., 233-241
31. P. Raos, I. Čatić: Razvoj injekcijski prešanih polimernih tvorevina, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1991.
32. T.A. Osswald, L.S. Turng, P.J. Gramann: Injection Molding Handbook, Carl Hanser Verlag, München, 2002.
33. B. Bujanić: Konstruiranje kalupa za tankostijeni plastomerni otpresak, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
34. N.N.: Thinwall Technology Guide, www.geoplastics.com/resins/techsolution/technifacts.html
35. N.N.: Technical Information, X-Melt Expansion Melt Technology, ENGEL, 2002.
36. S.C. Chen, H.S. Peng, L.T. Huang, C.T. Chang, D.Y. Wei, R.C. Ruo: Thin-wall injection molding, *ANTEC 2000*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Orlando, 7.-15.5.2000., 543-547.
37. D. Yao, B. Kim: Thin-wall injection molding using rapidly heated molds, *ANTEC 2003*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Nashville, 4.-8.5.2003., 521-525

38. S.J. Liao, D.Y. Chang, H.J. Chen, L.S. Tsou, J.R. Ho, H.T. Yau, W.H. Hsieh: Investigation of optimum conditions of thin-wall injection molding process, *ANTEC 2002*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, San Francisco, 5.-9.5.2002., 556-559.
39. S.C. Chen, W.R. Jong, Y.P. Chang, Y. Kang, H.S. Peng, L.T. Huang, L.K. Yang: Structure performance of thin-wall injection molded parts, *ANTEC 2001*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 6.-10.5.2001., 666-670.
40. I. Čatić, F. Johannaber: Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2004.
41. J. Navodnik: Tankostensko brizganje - hitre brizgalke, *Plast Forma*, 8(2003)1, 21-23
42. D. Rebić: Konstruiranje kalupa za tankostjeni plastomerni otpresak, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
43. V. Travaglini: Optimizing part and mold design using C.A.E. technology, *ANTEC '98*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 26.-30.4.1998., 893-897.
44. D. Godec: Doprinos sustavnosnom razvoju kalupa za injekcijsko prešanje plastomera, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.
45. F. Johannaber: Unaprijeđeni postupci injekcijskog prešanja na razmeđi dvaju tisućljeća II, *Polimeri*, 22(2001)2, 45-54.
46. N.N.: Prezentacija računalnog programa Moldex 3D, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 27.11.2003.
47. R. A. Malloy: *Plastic Part Design for Injection Molding*, Carl Hanser Verlag, München, 1994.
48. W. Eversheim, F. Klocke: *Werkzeugbau mit Zukunft, Strategie und Technologie*, Springer, Berlin, 1998.
49. A. Griffiths: Moulding the future, *Materials World*, 6(1998)1, 12-14.
50. D. Godec, I. Čatić, D. Perković: Simulation Application in Mould Development for Injection Moulding of Polymers, *UPS'97*, Proceedings, Sveučilište u Mostaru, Strojarski fakultet, Mostar, 1997., 93-98.
51. M. Šercer, D. Godec: Računalna simulacija punjenja kalupne šupljine, *IV. simpozij Modeliranje u znanosti, tehnici i društvu*, Zbornik radova, Akademija tehničkih znanosti i Hrvatsko društvo za sustave, Rijeka, 26.-27. 6. 2000., 209-215.
52. K. Webehaus: Prozeßsimulation mit CADMOULD Version 6: Vereinfachte Benutzerführung und kürzere Rechenzeiten, 19. IKV Kolloquium, Aachen, 1998., Block 13, 1-7.
53. D. Godec, M. Rot, I. Čatić: Comparison Between Analytical and Numerical Mould Calculation for Injection Moulding of Thermoplastics, *ICIT 2001*, Conference Proceedings, TECOS, Rogaška Slatina, 22.-26. 4. 2001., 163-168.
54. J.P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman: *Successful Injection Molding*, Carl Hanser Verlag, München, 2002.
55. M. Mahishi: Material Characterization for Thin Wall Molding Simulation, *ANTEC '98*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 26.-30.4.1998., 893-897.
56. A. Glojek, B. Nardin, K. Kuzman: Simulation of the insert molding of glass shelves by PP, *ICIT 2003*, Conference Proceedings, TECOS, Bled-Celje, 8.-12.4.2003., 215-218
57. H. Kruhek: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1999.

58. W. Michaeli, H. Findeisen, Th. Gossel, Th. Klein: 2,5 und 3D im Vergleich - Spritzgießsimulationen auf dem Prüfstand, *Kunststoffe*, 87(1997)4, 462-466.
59. H. Wollstadt: Schnell und gut zur Serie, *Plastverarbeiter*, 49(1998)11, 42-44.
60. A. Norton: Utilising Rapid Product Development and Late Customisation Methodologies within Manufacturing SME-s, www.primetechnologywatch.org.uk, 2001.
61. G. Železnik, D. Peruško: Pomen izdelave prototipov v razvoju izdelkov, *Tehnološki razvoj in industrijska rast*, RTCZ, Izlake, 29.11.2002., 48-58.
62. D. Šantek: Podjela postupaka brze izradbe prototipova, *Strojarsvo*, 37(1995)5-6, 231-237.
63. K. U. Witte: Der schnellste Weg zum Prototyp bringt die besten Marktchancen, *VDI-Nachrichten*, 52(1998)50, 15.
64. J.C. Castañeda: Prototype vs. Production Tooling in Rapid Product Development, ANTEC 2000, Conference Proceedings, SPE, Orlando, 7.-11. 5. 2000., 2974-2976.
65. E. Šarić: Postupci brze izradbe prototipova, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
66. A. Gebhardt: Rapid Tooling, *Kunststoffe*, 88(1998)11, 1992-2000.
67. C.A. Maier: Rapid Prototyping and Tooling, www.mrmsnet.com
68. T. Dormal: Rapid tools for injection moulding: State of the art, www.raptia.org, 2002.
69. P. Harrison: Rapid Prototyping user guide, www.dmu.sc.uk, 2002.
70. www.wohlerssicoates.com
71. www-2.cs.cmu.edu/~rapidproto/manufacturing/mfgresources.html
72. F. Klocke, C. Freyer: Rapid Prototyping and Rapid Tooling, Fraunhofer Institute of Production Technology IPT, www.ipt.fraunhofer.de, 2002.
73. Wohlers report 2001, www.wohlerssicoates.com
74. A. Mafezzoli: A prototyping: an overview, www.axpmat1.unile.it
75. N.N.: Instruction manual for the StereoLithography Apparatus (SLA-250), 3D Systems, Valencia, 2001.
76. A. Norton: Utilising Rapid Product Development and Late Customisation Methodologies within Manufacturing SME-s, www.primetechnologywatch.org.uk, 2001.
77. <http://claymore.engineer.gvsu.edu>
78. Y.G. Im, S.I. Chung, J.H. Son, Y.D. Jung, J.G. Jo, H.D. Jeong: Functional prototype development: inner visible multi-color prototype fabrication process using stereolithography, *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131(2002), 372-377.
79. B. Shockley: Selective Laser Sintering, www.engr.ku.edu
80. S.S. Dimov, D.T. Pham, F. Lacan, K.D. Dotchev: Rapid tooling applications of the selective laser sintering process, *Assembly Automation*, 21(2001)4, pp. 296-302.
81. M.P. Goover: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, John Wiley & Sons, 2002.
82. N.N.: 3D-printing, www.fmf.uni-freiburg.de
83. OBJET Quadra, Prospektni materijal, Objet Geometries Ltd., 2002.
84. N.N.: New RP process aims at low-volume parts, <http://home.att.net>

85. A.V. Kumar, A. Dutta: Investigation of an electrophotography based rapid prototyping technology, *Rapid Prototyping Journal*, 9(2003)2, pp. 95-103.
86. G. Link: Layered manufacturing of laser deposited carbon steel, Ph.D. Thesis, Stanford University, www-rpl.stanford.edu, 1999.
87. www-2.cs.cmu.edu
88. B.J. Arnold-Feret: Rapid Tooling – What Works and What Doesn't, ANTEC 2002, Conference Proceedings, SPE, New York, 5.-9. 5. 2002., 840-844.
89. E. Radstock: Rapid tooling, *Rapid Prototyping Journal*, 5(1999)4, pp. 164-168.
90. S. Saurkar, R. Malloy, S. McCarthy: Rapid tooling: a study of different cooling techniques for mold inserts used in direct AIM (Aces Injection Molding) process, ANTEC '99, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 2.-6.5.1999., 1105-1108.
91. A. Palmer, J. Colton: Design rules for stereolithography injection molding inserts, ANTEC '99, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 2.-6.5.1999., 4002-4006.
92. B. Blair, J. Colton: Polishing of stereolithography injection molds, ANTEC '98, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 26.-30.4.1998., 884-887.
93. F. Lenstraa i ostali: RP, RT, RM trends and development/research survey, RAPTIA Thematic Network Report, www.RAPTIA.org, 2002.
94. DTM: Prospektni materijal, Hilden, 2001.
95. 3D Systems: Prospektni materijal, Valencia, 2003.
96. www.hut.fi/Yksikot/Konepaja/Opinnot/Kurssiesitteet/Vaihtuvat/v2004/r14_tyo.pdf
97. N. Tolochko, S. Mozzharov, T. Laoui, L. Froyen: Selective laser sintering of single- and two-component metal powders, *Rapid Prototyping Journal*, 9(2003)2, pp.68-78.
98. F. Klocke, T. Celiker, Y.A. Song: Rapid metal tooling, *Rapid Prototyping Journal*, 1(1995)3, pp. 32-42.
99. M. Agarwala, D. Bourell, J. Beaman, H. Marcus, J. Barlow: Direct selective laser sintering of metals, *Rapid Prototyping Journal*, 1(1995)1, pp. 26-36.
100. A.N. Chatterjee, S. Kumar, P. Saha, P.K. Mishra, A.R. Choudhury: An experimental design approach to selective laser sintering of low carbon steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 136(2003), 151-157.
101. H.V. Bui, P. Lours, G. Bernhart: Influence of porosity and anisotropy on the mechanical properties of Direct Laser Sintered Metal powder for injection moulding tools, ICIT 2003, Conference Proceedings, TECOS, Bled-Celje, 8.-12.4.2003., 205-208.
102. Electro Optical System: Prospektni materijal, München, 2004.
103. www.mouldmakingtechnology.com
104. C. Nelson: Creation of plastic prototypes and molded plastic parts via Selective Laser Sintering, ANTEC '99, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 2.-6.5.1999., 1109-1113.
105. K. Dalgarno, T. Stewart: Production tooling for polymer moulding using RapidSteel process, *Rapid Prototyping Journal*, 7(2001)3, pp. 173-179.
106. D. King, T. Tansey: Rapid tooling: selective laser sintering injection tooling, *Materials Processing Technology*, 132(2003), 42-48.

107. www.3Dsystems.com
108. A.R.Overman, P. Conner, J. Pavek: Rapid Manufacturing of Tooling Inserts Via LaserForm ST-100 Material, www.3Dsystems.com, 2002.
109. M. Geiger, M. Prechtel, F. Niebling, A. Otto: Laser assisted rapid prototyping – processes, applications and developments in the field of additive processes, *ICIT 2003*, Conference Proceedings, TECOS, Bled-Celje, 8.-12.4.2003., 15-24
110. www.EOS-gmbh.de
111. M. Dolinšek: Neposredno lasersko sintranje kovin - predstavitev postopka in možnosti uporabe, Tehnološki razvoj in industrijska rast, RTCZ, Izlake, 29.11.2002., 59-65.
112. N.N.: ProMetal Rapid Tooling System, www.prometal-rt.com
113. F. Klocke, C. Freyer: Fast Manufacture, Modification and Repair of Molds using Controlled Metal Build Up (CMB), Rapid Prototyping & Tooling, Newsletter, (2001)6, Danish Technological Institute
114. www.optomec.com
115. www3.lehigh.edu/engineering/research/faculty/materials3.asp
116. www.trumpf.com/1.laserformen_funktionsw-dmd.html
117. www.pom.net
118. www.foundryonline.com
119. U. Lindhe, O. Harrysson: Rapid Manufacturing with Electron Beam Melting (EBM) - A manufacturing revolution?, www.cadmetal.org
120. www.arcam.com
121. N.N: Prospektni material tvrtke ARCAM AB, 2003.
122. D.M. Jacobson: Metal layer object manufacturing, RAPTIA Thematic Network Report, www.RPATIA.org, 2002.
123. <http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk>
124. E.K. Dawson, J.D. Muzzy: The effect of rapid prototype tooling on final product properties, *ANTEC '99*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 2.-6.5.1999., 456-460.
125. www.wtec.org/loyola/rp/p1_ifam.htm
126. N.N: RSP Tooling Held an Open House to Announce the Completion of Tooling Machine, Forging Press, The Monthly Newsletter of the Forging Defense Manufacturing Consortium, 02.2003.
127. T. Dormal: OptoForm, a new process for rapid layer manufacturing based on paste, Rapid Prototyping & Tooling Industrial Application Newsletter, Danish Technological Institute, Aarhus, No 4., 2000., 1-3
128. www.mcp-grpup.de
129. T. Grimm: Stereolithography, Selective Laser Sintering and PolyJet: Evaluating and Applying the Right Technology, www.atirapid.com, 2003
130. N.N.: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing, Prezentacija, CRIF-WTCM, 2002.
131. N.N: Laser Form A6 Steel Material, Prospektni material, 3D Systems, 2003.

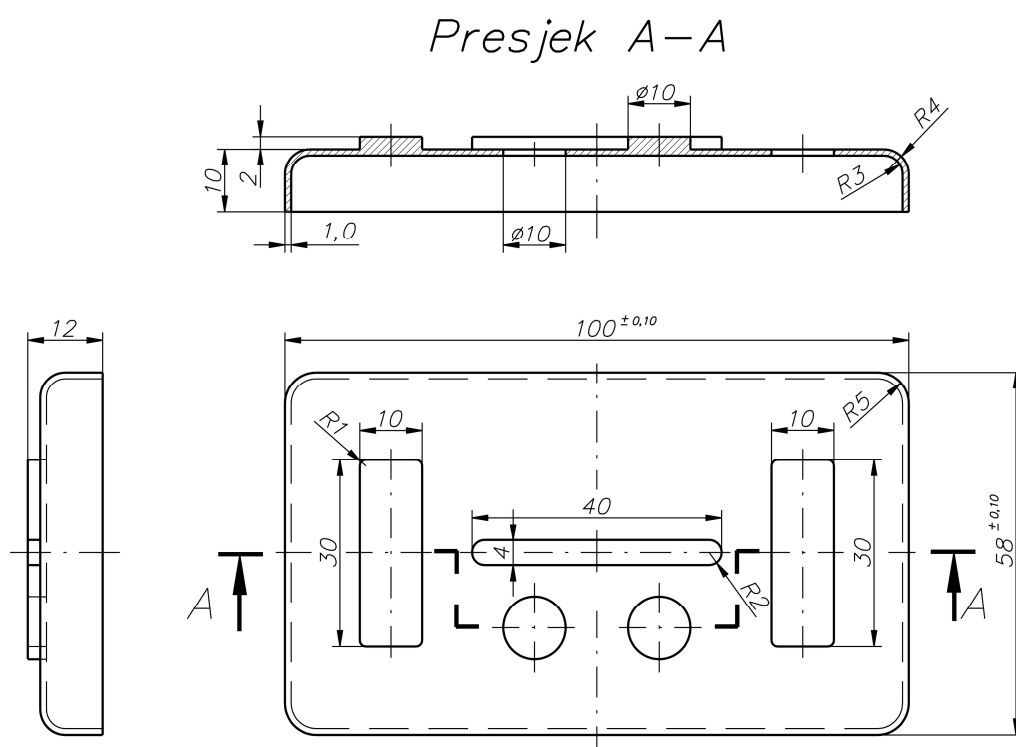
132. B. Koojimans, L. Brouwers, J.W. Gunnink: A case study to compare Rapid Tooling Techniques, Rapid Prototyping & Tooling, Newsletter, (2001)6, Danish Technological Institute
133. K.K. Jurrrens: Standards for the rapid prototyping industry, Rapid Prototyping Journal, 5(1999)4, pp. 169-178.
134. G. Menges, P. Mohren: Spritzgieß-Werkzeuge, Anleitung zum Bau von Spritzgieß-Werkzeugen, Carl Hanser Verlag, München, 1991.
135. M. Novosel: Kalupni materijali za preradu polimera, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1988.
136. H. Gastrow: Injection Molds - 108 Proven Designs, Carl Hanser Verlag, München, 1993.
137. H. Rees: Mold Engineering, Carl Hanser Verlag, München, 1995.
138. F. Hippenstiel, V. Lubich, P. Vetter, W. Grimm: Handbook of Plastics Mould Steels, Edelstahlwerke Buderus AG, 2004.
139. D. Lisjak: Identifikacija čelika prema kemijskom sastavu i standardnim oznakama, Projekt IT-2002-022, Fakultet strojarstva i borodgradnje, Zagreb, 2002.
140. www.sz-metal.si
141. R.A. Harris, P.M. Dickens: Determining, understanding & controlling the morphology of injection moulded parts produced in stereolithography moulds, *ANTEC 2003*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Nashville, 4.-8.5.2003., 889-893
142. P.S. Lima, J. Ramos, A.S. Pouzada: Thermal performance of hybrid injection moulds with epoxy inserts, *ANTEC 2003*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Nashville, 4.-8.5.2003., 453-857.
143. E.K. Dawson, J.D. Muzzy: Higher conductivity composite tooling, *ANTEC '99*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 2.-6.5.1999., 456-460.
144. D.T. Burns, R.A. Malloy, S.P. McCarthy: Analysis of metal coating effects on stereolithography tooling for injection molding, *ANTEC '98*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 26.-30.4.1998., 888-892.
145. M. Yeung: Low Cost and Fast Delivery Tooling Processes and Special Interest Groups, pozivno predavanje za MoldMaker Council of the Canadian Plastics Industry Association, Toronto, 25.01.2001.
146. www.dsmsomos.com
147. L.W. Caspers: VIp an integral approach to the simulation of injection moulding, Doktorska disertacija, Technicshe Universiteit Eindhoven, 1995.
148. S.C. Chen, H.S. Peng, L.T. Huang, C.T. Chang, D.Y. Wei, R.C. Ruo: Thin-wall injection molding, *ANTEC 2000*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Orlando, 7.-15.5.2000., 543-547.
149. J.D. Arciprete, R. Malloy, S. McCarthy: Cavity pressure studies for stereolithography produced tooling, *ANTEC '99*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 2.-6.5.1999., 467-469.
150. D. King, T. Tansey: Alternative materials for rapid tooling, *Materials Processing Technology*, 121(2002), 313-317
151. J.I. Segal, R.I. Campbell: A review of research into the effects of rapid tooling on part properties, *Rapid Prototyping Journal*, 7(2001)2, pp. 90-98.

152. I. Gibson, D. Shi: Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering, *Rapid Prototyping Journal*, 3(1997)4, pp. 129-136.
153. M. Rujnić-Sokele, I. Čatić, M. Šercer: Influence of Cavity Materials on the Cooling Time of Molding, *ANTEC 2005*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Boston, 1.-5.5.2005., 961-965.
154. W. Michaeli, H. Keller: Simulation of solidification and the resulting mechanical properties of polypropylene, *Computational Materials Science*, 7(1996), 253-256
155. R. Paradis: A comparison of the conventional machined aluminium and rapid epoxy shell prototype mould building process, *Journal of Injection Moulding Technology*, 2(1998)1, 8-17.
156. S. Rahmati, P. Dickens: Stereolithography injection moulding tooling, 6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Conference Proceedings, Nottingham, 1-3.7.1997.
157. S. Rahmati, P. Dickens: Stereolithography injection mould tool failure analysis, *Solid Freeform Fabrication Symposium*, Conference Proceedings, Austin, 11.-13.8.1997.
158. S. Rahmati, P. Dickens: Stereolithography for Injection Moulding, *Rapid Prototyping Journal*, 3(1997)2, 53-60
159. N. Hopkins, P. Dickens: A comparison between stereolithography and aluminium injection moulding tooling, *Rapid Prototyping Journal*, 6(2000)4, pp 253-258.
160. Q.F. Polosky, R. Malloy, R. Stacer: A mechanical property performance comparison for plastic parts produced in a rapid epoxy tool and conventional steel tooling, *ANTEC '98*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 26.-30.4.1998., 2972-2978.
161. M. Janczyk, R. McLaughlin, S.P. McCarthy: Rapid stereolithography tooling for injection moulding: the effect of cooling channel geometry, *Journal of Injection Moulding Technology*, 1(1997)1, 72-78
162. M. Langen, W. Michaeli: Temperatur distribution in rapid tooling cavities - how close are injection moulded prototypes to series parts?, *ANTEC '97*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Toronto, 27.4.-2.5.1997., 939-945.
163. R. Gnegy, A. Ogale: High thermal conductivity rapid dies: backfilled and coated dies, *ANTEC '99*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 2.-6.5.1999., 1069-1099.
164. J. Dobranić: Raščlamba kvalitativne konstrukcije kalupa za injekcijsko prešanje plastomera, *Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb*, 1998.
165. H. Bangert: *Systematische Konstruktion von Spritzgießwerkzeugen und Rechnerinsatz*, disertacija, RWTH, Aachen, 1981.
166. M. Nađ: *Polimerni materijali - plastomeri i elastoplastomeri, konstrukcija i prerada*, Poligraf, Zagreb, 1991.
167. Z. Janović: *Polimeri i polimerizacije*, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Zagreb, 1997.
168. M. Gahleitner, A. Wolfsberger, M. Wachholder: Innovationen heute und morgen: Polypropylen für flexible Verpackungen, 94(2004)6, 62-65.
169. N.N.: *Prospektni materijal tvrtke Borealis*, 2003.
170. N.N.: *Vanguard and Vanguard HS SLS System*, 3D Systems, 2001.
171. N.N.: *Prospektni materijal tvrtke Engel*, 2003.

172. www.ni.com
173. N.N.: Prospektni materijal tvrtke Messezeuge, 2003.
174. N.N.: Prospektni materijal tvrtke Metalka, 1988.
175. N. Šakić: Metode znanstveno-istraživačkog rada, predavanja na poslijediplomskom studiju, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 1996.
176. R.H. Myers, D.C. Montgomery: Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design Experiments, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
177. R.J. Del Vecchio: Understanding Design of Experiments, Carl Hanser Verlag, München, 1997.
178. G.S. Peace: Taguchi Methods: a hands-on approach, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., New York, 1993.
179. I. Čatić: Dopuna kriterija za izbor čelika za dijelove kalupa za preradu termoplastičnih masa injekcionim prešanjem, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1970.
180. M. Rujnić-Sokele, I. Čatić: Study of the Influence of the Injection Molding Processing Parameters on Molded Part Properties Using the Full Factorial Design, *ANTEC '99*, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, New York, 02.-06.05.1999., 504-508.
181. V. Mudronja: Analiza sposobnosti procesa, *CIM '95*, Zbornik radova, Zagreb, 1995., 10-17.
182. M. Rujnić-Sokele: Optimiranje procesa proizvodnje puhanih proizvoda od poli(etilentereftalata), Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

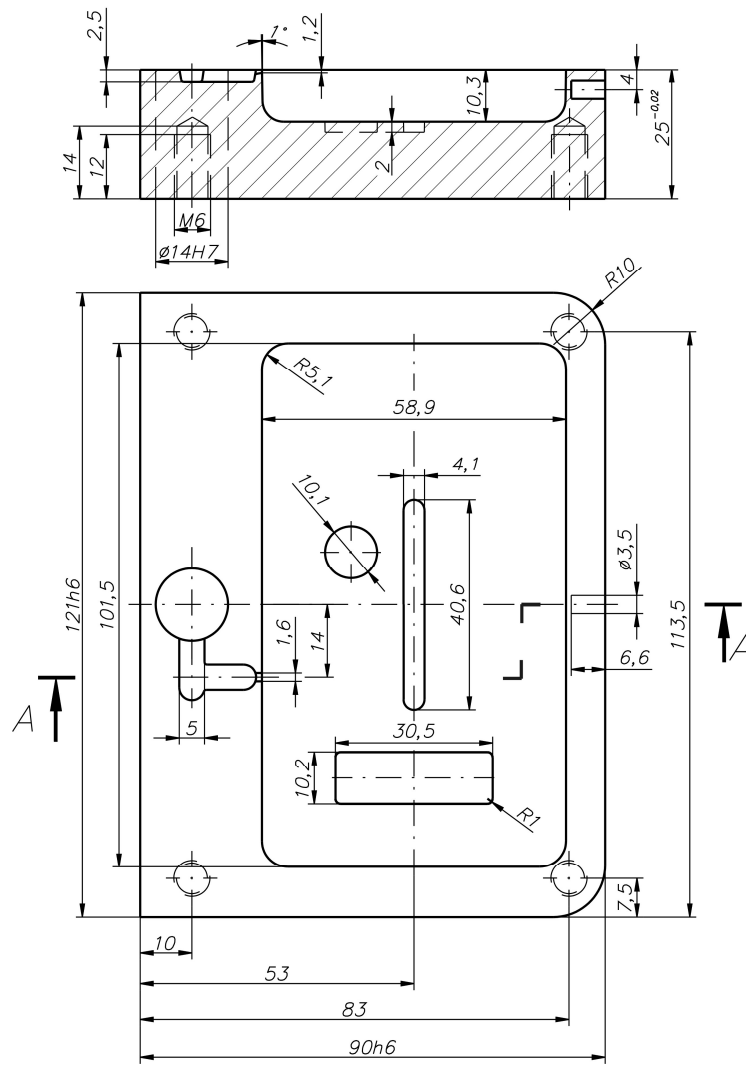
13. PRILOZI

13.1 EKSPERIMENTALNI OTPRESAK I KALUP

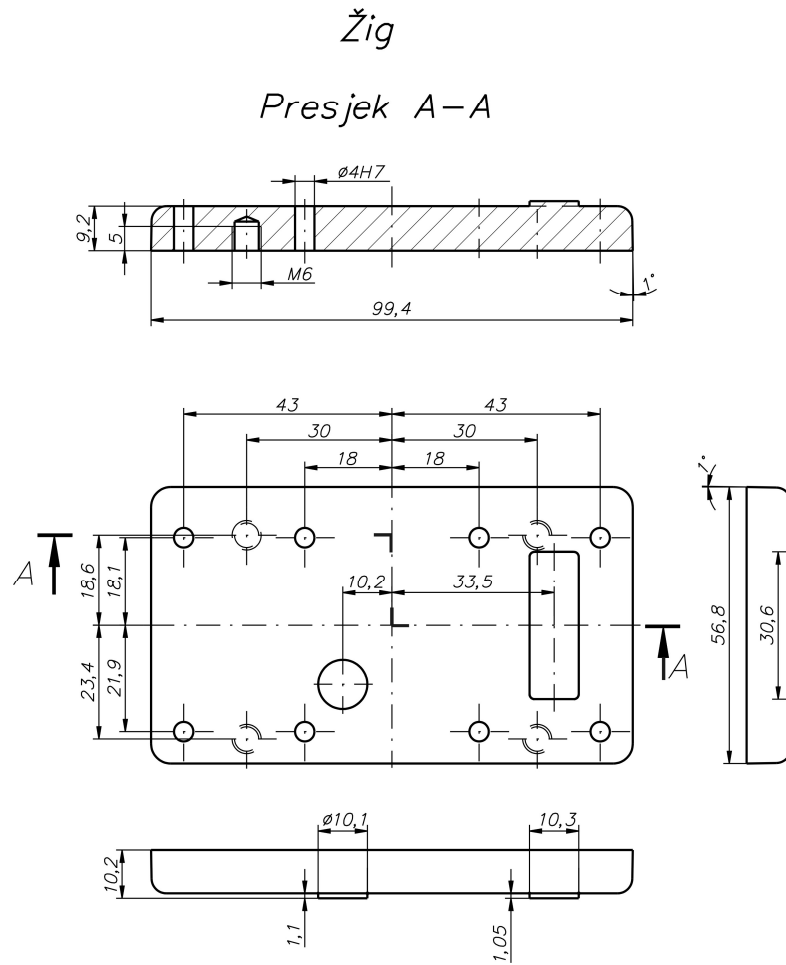


Slika 13.1 Eksperimentalni otpresak

Matrica
Presjek A-A



Slika 13.2 Matrica eksperimentalnog kalupa

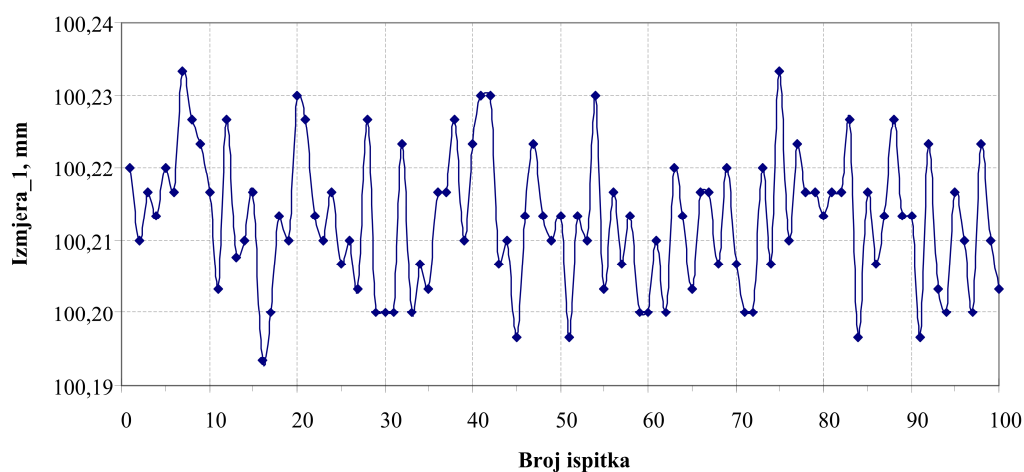


Slika 13.3 Žig eksperimentalnog kalupa

13.2 VRIJEDNOSTI MJERENJA IZ ANALIZE SPOSOBNOSTI PROCESA

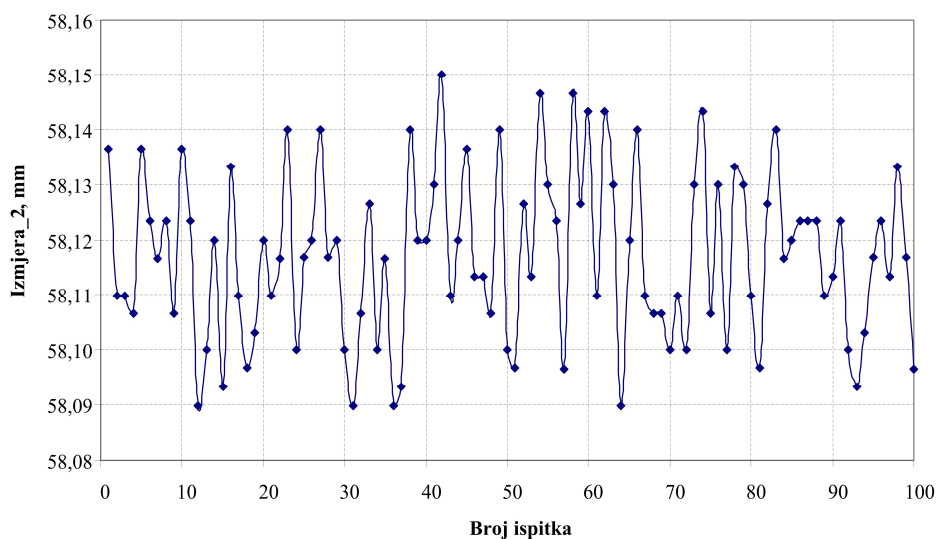
Tablica 13.1 Rezultati mjerenja duljine otpresaka (*Izmjera_1*)

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)									
Skupljanje:	1,5 %									
Datum:	07.09.2004.									
Temperatura:	26 °C									
Serijski broj	Duljina ispitka mm									
1000	100,22	100,21	100,22	100,21	100,22	100,22	100,23	100,23	100,22	100,22
	100,20	100,23	100,21	100,21	100,22	100,19	100,20	100,21	100,21	100,23
2000	100,23	100,21	100,21	100,22	100,21	100,21	100,20	100,23	100,20	100,20
	100,20	100,22	100,20	100,21	100,20	100,22	100,22	100,23	100,21	100,22
3000	100,23	100,23	100,21	100,21	100,20	100,21	100,22	100,21	100,21	100,21
	100,20	100,21	100,21	100,23	100,20	100,22	100,21	100,21	100,20	100,20
4000	100,21	100,20	100,22	100,21	100,20	100,22	100,22	100,21	100,22	100,21
	100,20	100,20	100,22	100,21	100,23	100,21	100,22	100,22	100,22	100,21
5000	100,22	100,22	100,23	100,20	100,22	100,21	100,21	100,23	100,21	100,21
	100,20	100,22	100,20	100,20	100,22	100,21	100,20	100,22	100,21	100,20
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge									

Slika 13.4 Rezultati mjerenja duljine otpresaka (*Izmjera_1*)

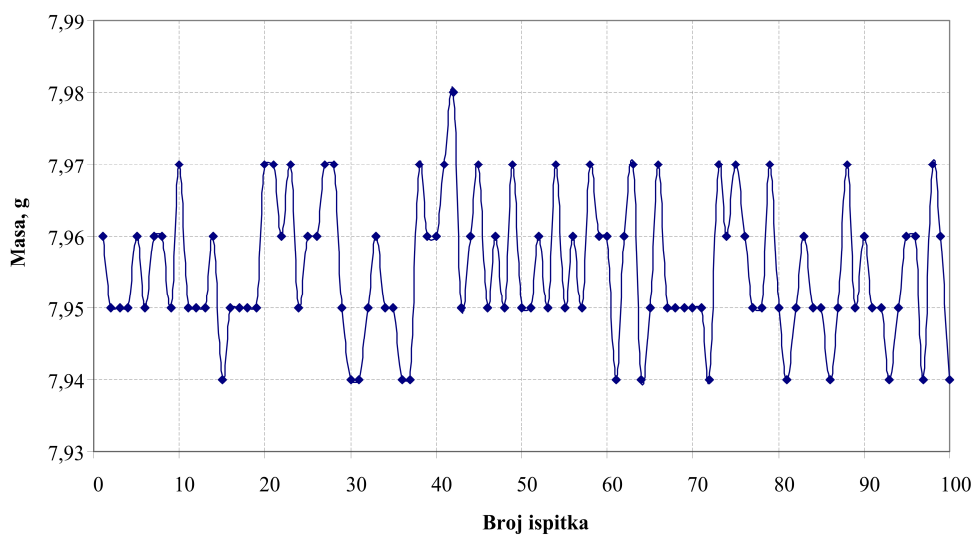
Tablica 13.2 Rezultati mjerenja širine otpresaka (*Izmjera_2*)

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)									
Skupljanje:	1,5 %									
Datum:	07.09.2004.									
Temperatura:	26 °C									
Serijski broj	Širina ispitka mm									
1000	58,14	58,11	58,11	58,11	58,14	58,12	58,12	58,12	58,11	58,14
	58,12	58,09	58,10	58,12	58,09	58,13	58,11	58,10	58,10	58,12
2000	58,11	58,12	58,14	58,10	58,12	58,12	58,14	58,12	58,12	58,10
	58,09	58,11	58,13	58,10	58,12	58,09	58,09	58,14	58,12	58,12
3000	58,13	58,15	58,11	58,12	58,14	58,11	58,11	58,11	58,14	58,10
	58,10	58,13	58,11	58,15	58,13	58,12	58,10	58,15	58,13	58,14
4000	58,11	58,14	58,13	58,09	58,12	58,14	58,11	58,11	58,11	58,10
	58,11	58,10	58,13	58,14	58,11	58,13	58,10	58,13	58,13	58,11
5000	58,10	58,13	58,14	58,12	58,12	58,12	58,12	58,12	58,11	58,11
	58,12	58,10	58,09	58,10	58,12	58,12	58,11	58,13	58,12	58,10
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge									

Slika 13.5 Rezultati mjerenja duljine otpresaka (*Izmjera_2*)

Tablica 13.3 Rezultati određivanja mase otpresaka

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)									
Skupljanje:	1,5 %									
Datum:	06.09.2004.									
Temperatura:	27 °C									
Serija kom	Masa ispitka g									
1000	7,96	7,95	7,95	7,95	7,96	7,95	7,96	7,96	7,95	7,97
	7,95	7,95	7,95	7,96	7,94	7,95	7,95	7,95	7,95	7,97
2000	7,97	7,96	7,97	7,95	7,96	7,96	7,97	7,97	7,95	7,94
	7,94	7,95	7,96	7,95	7,95	7,94	7,94	7,97	7,96	7,96
3000	7,97	7,98	7,95	7,96	7,97	7,95	7,96	7,95	7,97	7,95
	7,95	7,96	7,95	7,97	7,95	7,96	7,95	7,97	7,96	7,96
4000	7,94	7,96	7,97	7,94	7,95	7,97	7,95	7,95	7,95	7,95
	7,95	7,94	7,97	7,96	7,97	7,96	7,95	7,95	7,97	7,95
5000	7,94	7,95	7,96	7,95	7,95	7,94	7,95	7,97	7,95	7,96
	7,95	7,95	7,94	7,95	7,96	7,96	7,94	7,97	7,96	7,94
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge									



Slika 13.6 Rezultati određivanja mase otpresaka

13.3 VRIJEDNOSTI MJERENJA IZ PRETPOKUSA - HIBRIDNI KALUP

Tablica 13.4 Vrijednosti podesivih faktora (pretpokus - hibridni kalup)

Stanje pretpokusa	<i>Faktori</i>					
	x_1 Tlak ubrizgavanja	x_2 Naknadni tlak	x_3 Vrijeme ubrizgavanja	x_4 Temperatura taljevine	x_5 Protok medija	x_5 Vrijeme naknadnog tlaka
	p_u , bar	p_n , bar	t_u , s	ϑ_T , °C	q_M , l/min	t_{np} , s
1	250	300	0,2	220	3	1
2	500	300	0,2	220	6	1
3	250	450	0,2	220	6	3
4	500	450	0,2	220	3	3
5	250	300	0,5	220	6	3
6	500	300	0,5	220	3	3
7	250	450	0,5	220	3	1
8	500	450	0,5	220	6	1
9	250	300	0,2	260	3	3
10	500	300	0,2	260	6	3
11	250	450	0,2	260	6	1
12	500	450	0,2	260	3	1
13	250	300	0,5	260	6	1
14	500	300	0,5	260	3	1
15	250	450	0,5	260	3	3
16	500	450	0,5	260	6	3

Tablica 13.5 Rezultati određivanja mase otpresaka

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)			
Datum:	03.09.2004.			
Temperatura:	27 °C			
Stanje pokusa	Redni broj ispitka Masa, g			Srednja vrijednost g
	1	2	3	
1	7,68	7,67	7,67	7,67
2	7,67	7,67	7,67	7,67
3	8,25	8,24	8,24	8,24
4	8,21	8,22	8,22	8,22
5	8,05	8,04	8,05	8,05
6	8,07	8,07	8,07	8,07
7	7,80	7,78	7,79	7,79
8	7,82	7,82	7,81	7,82
9	8,04	8,05	8,05	8,05
10	8,07	8,06	8,07	8,07
11	7,66	7,67	7,66	7,66
12	7,67	7,67	7,67	7,67
13	7,68	7,67	7,67	7,67
14	7,65	7,64	7,65	7,65
15	8,21	8,22	8,21	8,21
16	8,22	8,22	8,22	8,22
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za materijale i tribologiju Mjerni instrument: digitalna vaga tvrtke Metalka			

Tablica 13.6 Rezultati određivanja *Deformacije_1* otpresaka

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)						
Skupljanje:	1,5 %						
Datum:	06.09.2004.						
Temperatura:	26 °C						
Nominalna duljina kalupne šupljine:	101,8 mm						
Stanje pokusa	Redni broj ispitka duljina, mm			Redni broj ispitka deformacija, mm			Srednja vrijednost mm
	1	2	3	1	2	3	
1	100,14	100,19	100,21	1,66	1,61	1,59	1,62
2	100,13	100,18	100,19	1,67	1,62	1,61	1,63
3	100,42	100,41	100,38	1,38	1,39	1,42	1,40
4	100,43	100,39	100,46	1,37	1,41	1,34	1,37
5	100,35	100,28	100,31	1,45	1,52	1,49	1,49
6	100,22	100,28	100,24	1,58	1,52	1,56	1,55
7	100,22	100,21	100,16	1,58	1,59	1,64	1,60
8	100,24	100,22	100,19	1,56	1,58	1,61	1,58
9	100,33	100,33	100,38	1,47	1,47	1,42	1,45
10	100,32	100,35	100,35	1,48	1,45	1,45	1,46
11	100,20	100,25	100,22	1,60	1,55	1,58	1,58
12	100,21	100,22	100,24	1,59	1,58	1,56	1,58
13	100,23	100,27	100,24	1,57	1,53	1,56	1,55
14	100,27	100,25	100,28	1,53	1,55	1,52	1,53
15	100,43	100,44	100,48	1,37	1,36	1,32	1,35
16	100,46	100,47	100,50	1,34	1,33	1,30	1,32
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge						

Tablica 13.7 Rezultati određivanja *Deformacije_2* otpresaka

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)						
Skupljanje:	1,5 %						
Datum:	06.09.2004.						
Temperatura:	26 °C						
Nominalna širina kalupne šupljine:	59,1 mm						
Stanje pokusa	Redni broj ispitka duljina, mm			Redni broj ispitka deformacija, mm			Srednja vrijednost mm
	1	2	3	1	2	3	
1	58,14	58,20	58,22	0,96	0,90	0,88	0,91
2	58,22	58,21	58,18	0,88	0,89	0,92	0,90
3	58,34	58,37	58,37	0,76	0,73	0,73	0,74
4	58,32	58,36	58,33	0,78	0,74	0,77	0,76
5	58,24	58,21	58,24	0,86	0,89	0,86	0,87
6	58,25	58,24	58,22	0,85	0,86	0,88	0,86
7	58,20	58,24	58,21	0,90	0,86	0,89	0,88
8	58,22	58,25	58,20	0,88	0,85	0,90	0,88
9	58,24	58,26	58,27	0,86	0,84	0,83	0,84
10	58,26	58,30	58,31	0,84	0,80	0,79	0,81
11	58,27	58,24	58,27	0,83	0,86	0,83	0,84
12	58,26	58,23	58,23	0,84	0,87	0,87	0,86
13	58,19	58,24	58,23	0,91	0,86	0,87	0,88
14	58,17	58,17	58,19	0,93	0,93	0,91	0,92
15	58,34	58,32	58,33	0,76	0,78	0,77	0,77
16	58,31	58,34	58,34	0,79	0,76	0,76	0,77
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge						

Tablica 13.8 Rezultati određivanja rastezne žilavosti otpresaka

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)			
Datum:	07.09.2004.			
Temperatura:	27 °C			
Stanje pokusa	Redni broj ispitka Rastezna žilavost, kJ/m ²			Srednja vrijednost kJ/m ²
	1	2	3	
1	105	98	102	102
2	110	114	111	112
3	78	82	84	81
4	85	89	91	88
5	103	100	108	104
6	106	108	108	107
7	107	110	106	108
8	106	107	106	105
9	122	125	124	124
10	107	112	111	110
11	110	111	114	112
12	109	117	115	114
13	132	134	138	135
14	133	129	136	133
15	103	109	108	107
16	104	107	108	106
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za materijale i tribologiju Mjerni instrument: uređaj tvrtke Frank			

13.4 VRIJEDNOSTI MJERENJA PRI ODREĐIVANJU MAKSIMALNOG VREMENA DJELOVANJA NAKNADNOG TLAKA (HIBRIDNI KALUP)

Tablica 13.9 Rezultati određivanja mase otpresaka - parametri prerade I

Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (s)	Masa (g)		
3,0	8,29	8,29	8,30
3,2	8,33	8,32	8,33
3,4	8,35	8,34	8,35
3,6	8,35	8,36	8,35
3,8	8,36	8,36	8,37
4,0	8,37	8,37	8,38
4,2	8,39	8,38	8,38
4,4	8,39	8,39	8,38
4,6	8,40	8,40	8,40
4,8	8,41	8,40	8,40
5,0	8,41	8,41	8,41
5,2	8,41	8,42	8,41
5,4	8,41	8,41	8,41
5,6	8,42	8,41	8,41
5,8	8,41	8,42	8,41
6,0	8,41	8,41	8,41

Tablica 13.10 Rezultati određivanja mase otpresaka - parametri prerade II

Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (s)	Masa (g)		
3,0	8,07	8,07	8,06
3,2	8,09	8,09	8,09
3,4	8,11	8,11	8,11
3,6	8,12	8,11	8,11
3,8	8,12	8,12	8,12
4,0	8,13	8,13	8,12
4,2	8,14	8,13	8,13
4,4	8,14	8,13	8,14
4,6	8,14	8,14	8,14
4,8	8,15	8,15	8,15
5,0	8,15	8,15	8,15
5,2	8,15	8,15	8,15
5,4	8,15	8,15	8,15
5,6	8,15	8,16	8,15
5,8	8,15	8,15	8,15
6,0	8,16	8,15	8,15

13.5 VRIJEDNOSTI MJERENJA IZ POKUSA - HIBRIDNI KALUP

Tablica 13.11 Plan pokusa s redoslijedom stanja izvođenja - hibridni kalup

Stanje pokusa	Redoslijed	Blok	Faktori			Faktori – razine		
			x_1 Naknadni tlak	x_2 Temperatura taljevine	x_3 Vrijeme ubrizgavanja	x_1	x_2	x_3
			p_n , bar	ϑ_T , °C	t_w , s			
1	6	1	330	230	0,30	-1	-1	-1
2	8	1	470	230	0,30	1	-1	-1
3	17	1	330	250	0,30	-1	1	-1
4	7	1	470	250	0,30	1	1	-1
5	4	1	330	230	0,60	-1	-1	1
6	20	1	470	230	0,60	1	-1	1
7	9	1	330	250	0,60	-1	1	1
8	1	1	470	250	0,60	1	1	1
9	15	1	280	240	0,45	-1,68	0	0
10	10	1	520	240	0,45	1,68	0	0
11	14	1	400	223	0,45	0	-1,68	0
12	3	1	400	257	0,45	0	1,68	0
13	18	1	400	240	0,20	0	0	-1,68
14	3	1	400	240	0,70	0	0	1,68
15	5	1	400	240	0,45	0	0	0
16	19	1	400	240	0,45	0	0	0
17	16	1	400	240	0,45	0	0	0
18	11	1	400	240	0,45	0	0	0
19	12	1	400	240	0,45	0	0	0
20	2	1	400	240	0,45	0	0	0

Tablica 13.12 Rezultati određivanja mase otpresaka - hibridni kalup

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)			
Datum:	09.09.2004.			
Temperatura:	25 °C			
Stanje pokusa	Redni broj ispitka Masa, g			Srednja vrijednost g
	1	2	3	
1	8,18	8,17	8,16	8,17
2	8,32	8,31	8,32	8,32
3	8,19	8,20	8,19	8,19
4	8,36	8,35	8,35	8,35
5	8,18	8,16	8,17	8,17
6	8,33	8,34	8,33	8,33
7	8,18	8,18	8,18	8,18
8	8,35	8,34	8,34	8,34
9	8,12	8,13	8,11	8,12
10	8,40	8,39	8,41	8,40
11	8,23	8,23	8,24	8,23
12	8,26	8,28	8,25	8,26
13	8,26	8,25	8,25	8,25
14	8,25	8,26	8,26	8,26
15	8,25	8,26	8,25	8,25
16	8,26	8,25	8,25	8,25
17	8,25	8,25	8,26	8,25
18	8,26	8,26	8,25	8,26
19	8,25	8,26	8,26	8,26
20	8,26	8,25	8,25	8,25
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za materijale i tribologiju Mjerni instrument: digitalna vaga tvrtke Metalka			

Tablica 13.13 Rezultati određivanja *Deformacije_1* otpresaka - hibridni kalup

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)						
Skupljanje:	1,5 %						
Datum:	10.09.2004.						
Temperatura:	26 °C						
Nominalna duljina kalupne šupljine:	101,8 mm						
Stanje pokusa	Redni broj ispitka duljina, mm			Redni broj ispitka deformacija, mm			Srednja vrijednost mm
	1	2	3	1	2	3	
1	100,10	100,14	100,14	1,70	1,66	1,66	1,67
2	100,26	100,26	100,25	1,54	1,54	1,55	1,54
3	100,19	100,24	100,25	1,61	1,56	1,55	1,57
4	100,24	100,26	100,22	1,56	1,54	1,58	1,56
5	100,11	100,14	100,15	1,69	1,66	1,65	1,67
6	100,22	100,25	100,26	1,58	1,55	1,54	1,56
7	100,20	100,19	100,16	1,60	1,61	1,64	1,62
8	100,27	100,26	100,28	1,53	1,54	1,52	1,53
9	100,16	100,13	100,12	1,64	1,67	1,68	1,66
10	100,27	100,29	100,34	1,53	1,51	1,46	1,50
11	100,15	100,16	100,12	1,65	1,64	1,68	1,65
12	100,23	100,18	100,21	1,57	1,62	1,59	1,59
13	100,27	100,25	100,24	1,53	1,55	1,56	1,55
14	100,21	100,24	100,19	1,59	1,56	1,61	1,59
15	100,21	100,24	100,23	1,59	1,56	1,57	1,57
16	100,21	100,19	100,21	1,59	1,61	1,59	1,59
17	100,20	100,23	100,24	1,60	1,57	1,56	1,58
18	100,25	100,22	100,22	1,55	1,58	1,58	1,57
19	100,25	100,24	100,23	1,55	1,56	1,57	1,56
20	100,26	100,24	100,21	1,54	1,56	1,59	1,56
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge						

Tablica 13.14 Rezultati određivanja *Deformacije_2* otpresaka - hibridni kalup

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)						
Skupljanje:	1,5 %						
Datum:	10.09.2004.						
Temperatura:	26 °C						
Nominalna širina kalupne šupljine:	59,1 mm						
Stanje pokusa	Redni broj ispitka duljina, mm			Redni broj ispitka deformacija, mm			Srednja vrijednost mm
	1	2	3	1	2	3	
1	58,01	58,03	58,02	1,09	1,07	1,08	1,08
2	58,15	58,18	58,16	0,95	0,92	0,94	0,94
3	58,10	58,05	58,06	1,00	1,05	1,04	1,03
4	58,18	58,23	58,18	0,92	0,87	0,92	0,90
5	58,02	58,05	58,07	1,08	1,05	1,03	1,06
6	58,14	58,13	58,12	0,96	0,97	0,98	0,97
7	58,09	58,11	58,10	1,01	0,99	1,00	1,00
8	58,14	58,15	58,17	0,96	0,95	0,93	0,94
9	58,08	58,06	58,05	1,02	1,04	1,05	1,04
10	58,17	58,21	58,22	0,93	0,89	0,88	0,90
11	58,07	58,06	58,08	1,03	1,04	1,02	1,03
12	58,09	58,14	58,12	1,01	0,96	0,98	0,99
13	58,17	58,15	58,15	0,93	0,95	0,95	0,95
14	58,11	58,13	58,12	0,99	0,97	0,98	0,98
15	58,12	58,11	58,12	0,98	0,99	0,98	0,99
16	58,12	58,10	58,15	0,98	1,00	0,95	0,98
17	58,11	58,12	58,13	0,99	0,98	0,97	0,98
18	58,09	58,10	58,08	1,01	1,00	1,02	1,01
19	58,12	58,11	58,10	0,98	0,99	1,00	0,99
20	58,15	58,13	58,14	0,95	0,97	0,96	0,96
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge						

Tablica 13.15 Rezultati određivanja rastezne žilavosti otpresaka - hibridni kalup

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)			
Datum:	13.09.2004.			
Temperatura:	27 °C			
Stanje pokusa	Redni broj ispitka Rastezna žilavost, kJ/m ²			Srednja vrijednost kJ/m ²
	1	2	3	
1	90	89	83	87
2	78	83	82	81
3	115	120	110	115
4	91	98	98	96
5	84	92	89	88
6	72	75	74	74
7	118	120	116	118
8	94	99	100	98
9	98	102	105	102
10	82	80	77	80
11	80	72	79	77
12	114	113	112	113
13	105	107	109	107
14	95	106	99	100
15	104	101	93	99
16	109	103	103	105
17	103	98	94	98
18	95	91	100	95
19	102	98	97	99
20	98	101	102	100
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za materijale i tribologiju Mjerni instrument: uređaj tvrtke Frank			

Tablica 13.16 Rezultati obrade analize varijance - masa otpresaka

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	0,27	9	0,03	579,20	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	0,27	1	0,27	5117,04	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	0,003739	1	0,003739	71,42	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,0000002502	1	0,0000002502	0,004779	0,9452
x_1^2	0,0002948	1	0,0002948	5,63	0,0215
x_2^2	0,00009933	1	0,00009933	1,90	0,1745
x_3^2	0,00003069	1	0,00003069	0,59	0,4474
x_1x_2	0,00006667	1	0,00006667	1,27	0,2645
x_1x_3	0,00015	1	0,00015	2,87	0,0967
x_2x_3	0,0006	1	0,0006	11,46	0,0014
Ostatak	0,002617	50	0,00005234		
Odstupanje od modela	0,0003727	5	0,00007455	1,49	0,2106
Greška pokusa	0,002244	45	0,00004988		
Ukupna SKO	0,28	59			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.17 Koeficijenti regresije - masa otpresaka

	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	8,25	0,001703	8,25	8,26
Naknadni tlak, x_1	0,081	0,00113	0,079	0,083
Temperatura taljevine, x_2	0,009547	0,00113	0,007278	0,012
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	-0,00007809	0,00113	-0,002347	0,002191
x_1^2	0,00261	0,0011	0,000401	0,004819
x_2^2	-0,001515	0,0011	-0,003724	0,0006939
x_3^2	0,0008421	0,0011	-0,001367	0,003051
x_1x_2	0,001663	0,001474	-0,001297	0,004623
x_1x_3	0,002495	0,001474	-0,0004653	0,005455
x_2x_3	-0,004989	0,001474	-0,007949	-0,002029

Tablica 13.18 Kodirane vrijednosti faktora pokusa x_1 , x_2 i x_3

<i>Naknadni tlak</i>		<i>Temperatura taljevine</i>		<i>Vrijeme ubrizgavanja</i>	
<i>Stvarna vrijednost, bar</i>	<i>Kodirana vrijednost</i>	<i>Stvarna vrijednost, °C</i>	<i>Kodirana vrijednost</i>	<i>Stvarna vrijednost, s</i>	<i>Kodirana vrijednost</i>
330	-1	230	-1	0,30	-1
340	-0,857	231	-0,9	0,35	-0,667
350	-0,714	232	-0,8	0,40	-0,333
360	-0,571	233	-0,7	0,45	0
370	-0,429	234	-0,6	0,50	0,333
380	-0,286	235	-0,5	0,55	0,667
390	-0,143	236	-0,4	0,60	1
400	0	237	-0,3		
410	0,143	238	-0,2		
420	0,286	239	-0,1		
430	0,429	240	0		
440	0,571	241	0,1		
450	0,714	242	0,2		
460	0,857	243	0,3		
470	1	244	0,4		
		245	0,5		
		246	0,6		
		247	0,7		
		248	0,8		
		249	0,9		
		250	1		

Tablica 13.19 Rezultati obrade analize varijance - Deformacija_1 otpresaka

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	0,12	9	0,014	27,41	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	0,083	1	0,083	165,84	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	0,016	1	0,016	31,18	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,001426	1	0,001426	2,85	0,0976
x_1^2	0,0002651	1	0,0002651	0,53	0,4701
x_2^2	0,014	1	0,014	27,39	< 0,0001
x_3^2	0,0003462	1	0,0003462	0,69	0,4095
x_1x_2	0,00735	1	0,00735	14,69	0,0004
x_1x_3	0,00135	1	0,00135	2,70	0,1068
x_2x_3	0,00006667	1	0,00006667	0,13	0,7167
Ostatak	0,025	50	0,0005004		
Odstupanje od modela	0,004289	5	0,0008578	1,86	0,1201
Greška pokusa	0,021	45	0,0004607		
Ukupna SKO	0,15	59			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.20 Koeficijenti regresije - Deformacija_1 otpresaka

	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	1,57	0,005267	1,56	1,58
Naknadni tlak, x_1	-0,045	0,003493	-0,052	-0,038
Temperatura taljevine, x_2	-0,020	0,003493	-0,027	-0,012
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,005896	0,003493	-0,00112	0,013
x_1^2	0,002475	0,0034	-0,004355	0,009305
x_2^2	0,018	0,0034	0,011	0,025
x_3^2	-0,002828	0,0034	-0,009658	0,004002
x_1x_2	0,017	0,004557	0,00831	0,027
x_1x_3	-0,007484	0,004557	-0,017	0,001668
x_2x_3	0,001663	0,004557	-0,007489	0,011

Tablica 13.21 Rezultati obrade analize varijance - Deformacija_2 otpresaka

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	0,12	9	0,013	33,91	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	0,089	1	0,089	230,94	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	0,012	1	0,012	32,42	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,001464	1	0,001464	3,80	0,0569
x_1^2	0,0003631	1	0,0003631	0,94	0,3364
x_2^2	0,004915	1	0,004915	12,75	0,0008
x_3^2	0,001194	1	0,001194	3,10	0,0845
x_1x_2	0,0008167	1	0,0008167	2,12	0,1517
x_1x_3	0,006667	1	0,006667	17,30	0,0001
x_2x_3	0,00001667	1	0,00001667	0,043	0,8361
Ostatak	0,019	50	0,0003854		
Odstupanje od modela	0,003405	5	0,0006809	1,93	0,1078
Greška pokusa	0,016	45	0,0003526		
Ukupna SKO	0,14	59			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.22 Koeficijenti regresije - Deformacija_2 otpresaka

	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	0,98	0,004622	0,97	0,99
Naknadni tlak, x_1	-0,047	0,003065	-0,053	-0,04
Temperatura taljevine, x_2	-0,017	0,003065	-0,024	-0,011
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,005974	0,003065	-0,0001828	0,012
x_1^2	-0,002896	0,002984	-0,00889	-0,003097
x_2^2	0,011	0,002984	0,004663	0,017
x_3^2	-0,005253	0,002984	-0,011	0,0007405
x_1x_2	0,005821	0,003999	-0,002211	0,014
x_1x_3	0,017	0,003999	0,008599	0,025
x_2x_3	0,0008316	0,003999	-0,0072	0,008864

Tablica 13.23 Rezultati obrade analize varijance - rastezna žilavost otpresaka

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	8470,71	9	941,19	59,61	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	2095,52	1	2095,52	132,72	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	5838,59	1	5838,59	340,96	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	37,69	1	37,69	2,39	0,1286
x_1^2	524,78	1	524,78	33,24	< 0,0001
x_2^2	164,58	1	164,58	10,42	0,0022
x_3^2	48,19	1	48,19	3,05	0,0868
x_1x_2	130,67	1	130,67	8,28	0,0059
x_1x_3	32,67	1	32,67	2,07	0,1566
x_2x_3	48,17	1	48,17	3,05	0,0868
Ostatak	789,47	50	15,79		
Odstupanje od modela	108,36	5	21,67	1,43	0,2313
Greška pokusa	681,11	45	15,14		
Ukupna SKO	9260,18	59			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.24 Koeficijenti regresije - rastezna žilavost otpresaka

	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	99,61	0,94	97,73	101,49
Naknadni tlak, x_1	-7,15	0,62	-8,39	-5,90
Temperatura taljevine, x_2	11,46	0,62	10,21	12,70
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	-0,96	0,62	-2,20	0,29
x_1^2	-3,48	0,60	-4,70	-2,27
x_2^2	-1,95	0,60	-3,16	-0,74
x_3^2	1,06	0,60	-0,16	2,27
x_1x_2	-2,33	0,81	-3,95	-0,70
x_1x_3	-1,16	0,81	-2,79	0,46
x_2x_3	1,41	0,81	-0,21	3,04

Tablica 13.25 Rezultati obrade analize varijance - dodirna temperatura

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	23,81	9	2,65	330,67	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	4,30	1	4,30	537,50	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	18,49	1	18,49	2311,24	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,87	1	0,87	108,66	< 0,0001
x_1^2	0,016	1	0,016	1,95	0,1925
x_2^2	0,067	1	0,067	8,40	0,0159
x_3^2	0,016	1	0,016	1,95	0,1925
x_1x_2	0,00125	1	0,00125	0,16	0,7009
x_1x_3	0,031	1	0,031	3,91	0,0763
x_2x_3	0,031	1	0,031	3,91	0,0763
Ostatak	0,08	10	0,008		
Odstupanje od modela	0,067	5	0,013	5,00	0,051
Greška pokusa	0,013	5	0,002667		
Ukupna SKO	23,89	19			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.26 Koeficijenti regresije - dodirna temperatura

	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	36,46	0,036	36,38	36,54
Naknadni tlak, x_1	0,56	0,024	0,51	0,61
Temperatura taljevine, x_2	1,16	0,024	1,11	1,22
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	-0,25	0,024	-0,31	-0,20
x_1^2	0,033	0,024	-0,02	0,085
x_2^2	0,068	0,024	0,016	0,12
x_3^2	0,033	0,024	-0,02	0,085
x_1x_2	-0,012	0,032	-0,083	0,058
x_1x_3	-0,062	0,032	-0,13	0,007944
x_2x_3	-0,062	0,032	-0,13	0,007944

13.6 VRIJEDNOSTI MJERENJA PRI ODREĐIVANJU MAKSIMALNOG VREMENA DJELOVANJA NAKNADNOG TLAKA (KLASIČNI KALUP)

Tablica 13.27 Rezultati određivanja mase otpresaka - parametri prerade I

Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (s)	Masa (g)		
3,0	7,73	7,73	7,73
3,2	7,76	7,77	7,77
3,4	7,78	7,77	7,78
3,6	7,80	7,81	7,80
3,8	7,85	7,84	7,85
4,0	7,86	7,86	7,87
4,2	7,86	7,87	7,87
4,4	7,88	7,87	7,87
4,6	7,98	7,97	7,98
4,8	7,98	7,98	7,98
5,0	7,99	7,99	7,99
5,2	7,99	7,99	7,99
5,4	7,99	7,99	7,99
5,6	7,99	7,99	7,99
5,8	7,99	7,99	7,99
6,0	7,99	7,99	7,99

Tablica 13.28 Rezultati određivanja mase otpresaka - parametri prerade II

Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka (s)	Masa (g)		
3,0	7,69	7,69	7,69
3,2	7,71	7,71	7,71
3,4	7,72	7,72	7,72
3,6	7,73	7,73	7,73
3,8	7,73	7,73	7,73
4,0	7,74	7,74	7,74
4,2	7,74	7,74	7,74
4,4	7,74	7,74	7,74
4,6	7,75	7,74	7,74
4,8	7,75	7,75	7,75
5,0	7,75	7,75	7,75
5,2	7,75	7,75	7,75
5,4	7,75	7,75	7,75
5,6	7,75	7,75	7,75
5,8	7,75	7,75	7,75
6,0	7,75	7,75	7,75

13.7 VRIJEDNOSTI MJERENJA IZ POKUSA - KLASIČNI KALUP

Tablica 13.29 Plan pokusa s redoslijedom stanja izvođenja - klasični kalup

Stanje pokusa	Redoslijed	Blok	Faktori			Faktori – razine		
			x_1 Naknadni tlak	x_2 Temperatura taljevine	x_3 Vrijeme ubrizgavanja	x_1	x_2	x_3
			p_n , bar	ϑ_T , °C	t_w , s			
1	8	1	330	230	0,30	-1	-1	-1
2	2	1	470	230	0,30	1	-1	-1
3	18	1	330	250	0,30	-1	1	-1
4	20	1	470	250	0,30	1	1	-1
5	16	1	330	230	0,60	-1	-1	1
6	3	1	470	230	0,60	1	-1	1
7	1	1	330	250	0,60	-1	1	1
8	14	1	470	250	0,60	1	1	1
9	9	1	280	240	0,45	-1,68	0	0
10	4	1	520	240	0,45	1,68	0	0
11	12	1	400	223	0,45	0	-1,68	0
12	10	1	400	257	0,45	0	1,68	0
13	5	1	400	240	0,20	0	0	-1,68
14	15	1	400	240	0,70	0	0	1,68
15	19	1	400	240	0,45	0	0	0
16	7	1	400	240	0,45	0	0	0
17	6	1	400	240	0,45	0	0	0
18	17	1	400	240	0,45	0	0	0
19	11	1	400	240	0,45	0	0	0
20	13	1	400	240	0,45	0	0	0

Tablica 13.30 Rezultati određivanja mase otpresaka - klasični kalup

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)			
Datum:	17.09.2004.			
Temperatura:	23 °C			
Stanje pokusa	Redni broj ispitka Masa, g			Srednja vrijednost g
	1	2	3	
1	7,75	7,74	7,74	7,74
2	7,88	7,88	7,88	7,88
3	7,77	7,76	7,75	7,76
4	7,91	7,92	7,90	7,91
5	7,72	7,71	7,70	7,71
6	7,89	7,89	7,88	7,89
7	7,75	7,75	7,75	7,75
8	7,94	7,93	7,93	7,93
9	7,70	7,71	7,69	7,70
10	7,96	7,95	7,98	7,96
11	7,79	7,78	7,79	7,79
12	7,85	7,86	7,85	7,85
13	7,82	7,82	7,81	7,82
14	7,82	7,83	7,82	7,82
15	7,82	7,82	7,82	7,82
16	7,83	7,82	7,82	7,82
17	7,82	7,82	7,83	7,82
18	7,82	7,82	7,82	7,82
19	7,82	7,81	7,82	7,82
20	7,82	7,82	7,81	7,82
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za materijale i tribologiju Mjerni instrument: digitalna vaga tvrtke Metalka			

Tablica 13.31 Rezultati određivanja *Deformacije_1* otpresaka - klasični kalup

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)						
Skupljanje:	1,5 %						
Datum:	20.09.2004.						
Temperatura:	24 °C						
Nominalna duljina kalupne šupljine:	101,5 mm						
Stanje pokusa	Redni broj ispitka duljina, mm			Redni broj ispitka deformacija, mm			Srednja vrijednost mm
	1	2	3	1	2	3	
1	100,00	99,94	99,98	1,50	1,56	1,52	1,53
2	100,02	100,03	100,00	1,48	1,47	1,50	1,48
3	99,95	99,94	99,97	1,55	1,56	1,53	1,55
4	100,17	100,15	100,15	1,33	1,35	1,35	1,35
5	99,97	99,99	99,94	1,53	1,51	1,56	1,54
6	100,06	100,02	100,06	1,44	1,48	1,44	1,45
7	99,93	99,95	99,92	1,57	1,55	1,58	1,57
8	100,18	100,21	100,25	1,32	1,29	1,25	1,29
9	99,88	99,89	99,93	1,62	1,61	1,57	1,60
10	100,15	100,15	100,15	1,35	1,35	1,35	1,35
11	99,99	100,00	100,01	1,51	1,50	1,49	1,50
12	100,01	100,03	100,08	1,49	1,47	1,42	1,46
13	100,08	100,09	100,06	1,42	1,41	1,44	1,43
14	100,05	100,00	100,07	1,45	1,50	1,43	1,46
15	100,02	100,03	99,98	1,48	1,47	1,52	1,49
16	99,97	100,05	100,09	1,53	1,45	1,41	1,46
17	99,99	100,08	100,03	1,51	1,42	1,47	1,47
18	100,04	100,08	100,01	1,46	1,42	1,49	1,46
19	100,04	100,03	99,99	1,46	1,47	1,51	1,48
20	99,99	100,01	99,98	1,51	1,49	1,52	1,51
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge						

Tablica 13.32 Rezultati određivanja *Deformacije_2* otpresaka - klasični kalup

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)						
Skupljanje:	1,5 %						
Datum:	20.09.2004.						
Temperatura:	24 °C						
Nominalna širina kalupne šupljine:	58,9 mm						
Stanje pokusa	Redni broj ispitka duljina, mm			Redni broj ispitka deformacija, mm			Srednja vrijednost mm
	1	2	3	1	2	3	
1	57,89	57,93	57,90	1,01	0,97	1,00	1,00
2	58,04	58,02	57,99	0,86	0,88	0,91	0,88
3	57,93	57,91	57,87	0,97	0,99	1,03	1,00
4	57,98	58,03	57,99	0,92	0,87	0,91	0,90
5	57,88	57,85	57,87	1,02	1,05	1,03	1,03
6	58,00	57,97	58,02	0,90	0,93	0,88	0,90
7	57,98	57,96	57,96	0,92	0,94	0,94	0,93
8	58,00	57,99	58,01	0,90	0,91	0,89	0,90
9	57,91	57,94	57,92	0,99	0,96	0,98	0,98
10	58,09	58,10	58,05	0,81	0,80	0,85	0,82
11	57,94	57,92	57,91	0,96	0,98	0,99	0,98
12	57,91	57,99	57,98	0,99	0,91	0,92	0,94
13	58,02	58,01	57,98	0,88	0,89	0,92	0,90
14	57,98	57,94	57,94	0,92	0,96	0,96	0,95
15	57,89	57,95	57,96	1,01	0,95	0,94	0,97
16	57,95	57,93	57,96	0,95	0,97	0,94	0,96
17	58,00	58,02	58,04	0,90	0,88	0,86	0,88
18	58,02	57,98	57,99	0,88	0,92	0,91	0,90
19	58,03	58,02	58,04	0,87	0,88	0,86	0,87
20	57,97	58,01	58,05	0,93	0,89	0,85	0,89
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge						

Tablica 13.33 Rezultati određivanja rastezne žilavosti otpresaka - klasični kalup

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)			
Datum:	21.09.2004.			
Temperatura:	25 °C			
Stanje pokusa	Redni broj ispitka Rastezna žilavost, kJ/m ²			Srednja vrijednost kJ/m ²
	1	2	3	
1	128	121	123	124
2	104	112	110	109
3	134	135	125	131
4	110	123	125	119
5	116	124	116	119
6	104	111	115	110
7	136	140	134	137
8	114	125	122	120
9	128	132	135	132
10	111	105	104	107
11	115	112	122	116
12	135	132	126	131
13	130	128	128	129
14	126	138	134	133
15	127	132	125	128
16	128	125	128	127
17	124	117	111	117
18	129	128	123	127
19	131	125	130	129
20	124	129	125	126
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za materijale i tribologiju Mjerni instrument: uređaj tvrtke Frank			

Tablica 13.34 Rezultati obrade analize varijance - masa otpresaka

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	0,28	9	0,031	616,28	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	0,26	1	0,26	5214,12	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	0,013	1	0,013	264,60	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,000001001	1	0,000001001	0,02	0,8881
x_1^2	0,000562	1	0,000562	11,24	0,0015
x_2^2	0,00001176	1	0,00001176	0,24	0,6299
x_3^2	0,00001176	1	0,00001176	0,24	0,6299
x_1x_2	0,00015	1	0,00015	3,00	0,0895
x_1x_3	0,002017	1	0,002017	40,32	< 0,0001
x_2x_3	0,0006	1	0,0006	12,00	0,0011
Ostatak	0,002501	50	0,00005001		
Odstupanje od modela	0,0003673	5	0,00007346	1,55	0,1938
Greška pokusa	0,002133	45	0,00004741		
Ukupna SKO	0,28	59			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.35 Koeficijenti regresije - masa otpresaka

	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	7,82	0,001665	7,82	7,82
Naknadni tlak, x_1	0,080	0,001105	0,078	0,082
Temperatura taljevine, x_2	0,018	0,001105	0,016	0,020
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	-0,0001563	0,001105	-0,002376	0,002064
x_1^2	0,003611	0,001077	0,001447	0,005775
x_2^2	-0,0005224	0,001077	-0,002686	0,001641
x_3^2	-0,0005224	0,001077	-0,002686	0,001641
x_1x_2	0,0025	0,001444	-0,0003995	0,005399
x_1x_3	0,009167	0,001444	0,006267	0,012
x_2x_3	0,005	0,001444	0,002101	0,007899

Tablica 13.36 Rezultati obrade analize varijance - *Deformacija_1* otpresaka

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	0,31	9	0,035	37,89	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	0,23	1	0,23	251,39	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	0,023	1	0,023	24,50	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,0000005629	1	0,0000005629	0,0006106	0,9804
x_1^2	0,000002089	1	0,000002089	0,002266	0,9622
x_2^2	0,0001037	1	0,0001037	0,11	0,7387
x_3^2	0,006237	1	0,006237	6,77	0,0122
x_1x_2	0,049	1	0,049	52,72	< 0,0001
x_1x_3	0,004817	1	0,004817	5,22	0,0265
x_2x_3	0,00006667	1	0,00006667	0,072	0,7891
Ostatak	0,046	50	0,0009219		
Odstupanje od modela	0,007932	5	0,001586	1,87	0,1184
Greška pokusa	0,038	45	0,000848		
Ukupna SKO	0,36	59			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.37 Koeficijenti regresije - *Deformacija_1* otpresaka

	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	1,48	0,007149	1,46	1,49
Naknadni tlak, x_1	-0,075	0,004746	-0,085	-0,066
Temperatura taljevine, x_2	-0,023	0,004746	-0,033	-0,014
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,0001173	0,004746	-0,009415	0,009649
x_1^2	-0,0002202	0,004625	-0,00951	0,00907
x_2^2	0,001551	0,004625	-0,007738	0,011
x_3^2	-0,012	0,004625	-0,021	-0,002741
x_1x_2	-0,045	0,006198	-0,057	-0,033
x_1x_3	-0,014	0,006198	-0,027	-0,001718
x_2x_3	-0,001667	0,006198	-0,014	0,011

Tablica 13.38 Rezultati obrade analize varijance - *Deformacija_2* otpresaka

<i>Faktor</i>	<i>Suma kvadrata odstupanja SKO</i>	<i>Stupnjevi slobode SS</i>	<i>Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS</i>	<i>Varijabla F</i>	<i>Rizik odbacivanja hipoteze H₀</i>
Model	0,12	9	0,014	12,48	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	0,088	1	0,088	79,44	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	0,004618	1	0,004618	4,16	0,0466
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,001431	1	0,001431	1,29	0,2616
x_1^2	0,00004131	1	0,00004131	0,037	0,8478
x_2^2	0,018	1	0,018	15,97	0,0002
x_3^2	0,002289	1	0,002289	2,06	0,1572
x_1x_2	0,004538	1	0,004538	4,09	0,0485
x_1x_3	0,0007042	1	0,0007042	0,63	0,4295
x_2x_3	0,005704	1	0,005704	5,14	0,0277
Ostatak	0,055	50	0,00111		
Odstupanje od modela	0,007325	5	0,001465	1,37	0,2539
Greška pokusa	0,048	45	0,00107		
Ukupna SKO	0,18	59			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.39 Koeficijenti regresije - *Deformacija_2* otpresaka

	<i>Koeficijent regresije</i>	<i>Standardna greška</i>	<i>Interval povjerenja u rezultat 95 %</i>	
			<i>Donja granica</i>	<i>Gornja granica</i>
Konstanta	0,91	0,007844	0,89	0,93
Naknadni tlak, x_1	-0,046	0,005207	-0,057	-0,036
Temperatura taljevine, x_2	-0,011	0,005207	-0,021	-0,0001639
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,005912	0,005207	-0,004546	0,016
x_1^2	-0,000979	0,005074	-0,011	0,009213
x_2^2	0,02	0,005074	0,01	0,03
x_3^2	0,007288	0,005074	-0,002904	0,017
x_1x_2	0,014	0,0068	0,00009203	0,027
x_1x_3	0,005417	0,0068	-0,008241	0,019
x_2x_3	-0,015	0,0068	-0,029	-0,001759

Tablica 13.40 Rezultati obrade analize varijance - rastezna žilavost otpresaka

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	3663,37	9	407,04	15,83	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	1956,52	1	1956,52	76,09	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	1107,50	1	1107,50	43,07	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	18,02	1	18,02	0,70	0,4065
x_1^2	383,53	1	383,53	14,92	0,0003
x_2^2	83,12	1	83,12	3,23	0,0782
x_3^2	51,33	1	51,33	2,0	0,1639
x_1x_2	7,04	1	7,04	0,27	0,6031
x_1x_3	2,04	1	2,04	0,079	0,7793
x_2x_3	40,04	1	40,04	1,56	0,2179
Ostatak	1285,61	50	25,71		
Odstupanje od modela	186,0	5	37,20	1,52	0,2019
Greška pokusa	1099,61	45	24,44		
Ukupna SKO	4948,98	59			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.41 Koeficijenti regresije - rastezna žilavost otpresaka

	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	125,72	1,19	123,32	128,12
Naknadni tlak, x_1	-6,91	0,79	-8,51	-5,32
Temperatura taljevine, x_2	5,2	0,79	3,61	6,79
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,66	0,79	-0,93	2,26
x_1^2	-2,98	0,77	-4,53	-1,43
x_2^2	-1,39	0,77	-2,94	0,16
x_3^2	1,09	0,77	-0,46	2,64
x_1x_2	-0,54	1,04	-2,62	1,54
x_1x_3	0,29	1,04	-1,79	2,37
x_2x_3	1,29	1,04	-0,79	3,37

Tablica 13.42 Rezultati obrade analize varijance - dodirna temperatura

Faktor	Suma kvadrata odstupanja SKO	Stupnjevi slobode SS	Srednji kvadrat odstupanja SKO/SS	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	7,24	9	0,80	75,05	< 0,0001
Naknadni tlak, x_1	0,47	1	0,47	44,12	< 0,0001
Temperatura taljevine, x_2	6,34	1	6,34	591,46	< 0,0001
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	0,33	1	0,33	30,39	0,0003
x_1^2	0,036	1	0,036	3,34	0,0974
x_2^2	0,036	1	0,036	3,34	0,0974
x_3^2	0,0001472	1	0,0001472	0,014	0,9090
x_1x_2	0,00125	1	0,00125	0,12	0,7398
x_1x_3	0,00125	1	0,00125	0,12	0,7398
x_2x_3	0,031	1	0,031	2,92	0,1185
Ostatak	0,11	10	0,011		
Odstupanje od modela	0,074	5	0,015	2,22	0,2016
Greška pokusa	0,033	5	0,006667		
Ukupna SKO	7,35	19			

* $H_0 < 0,05$ – nema signifikantnog utjecaja faktora

Tablica 13.43 Koeficijenti regresije - dodirna temperatura

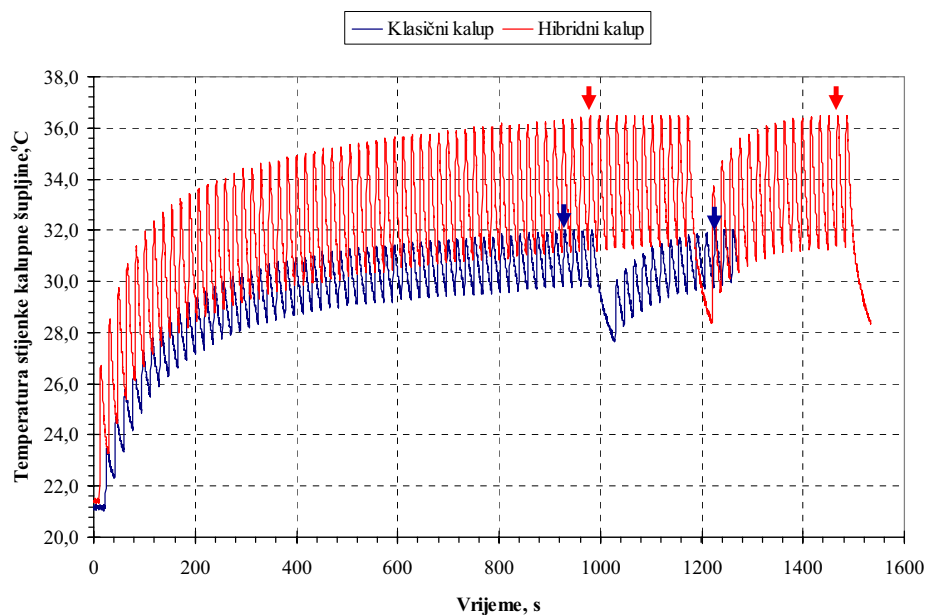
	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultat 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	32,73	0,042	32,64	32,83
Naknadni tlak, x_1	0,19	0,028	0,12	0,25
Temperatura taljevine, x_2	0,68	0,028	0,62	0,74
Vrijeme ubrizgavanja, x_3	-0,15	0,028	-0,22	-0,092
x_1^2	-0,05	0,027	-0,11	0,011
x_2^2	-0,05	0,027	-0,11	0,011
x_3^2	0,003201	0,027	-0,058	0,064
x_1x_2	-0,012	0,037	-0,094	0,069
x_1x_3	0,013	0,037	-0,069	0,094
x_2x_3	-0,063	0,037	-0,14	0,019

13.8 REZULTATI MJERENJA PRI OPTIMIRANJU PARAMETARA PRERADE (HIBRIDNI KALUP)

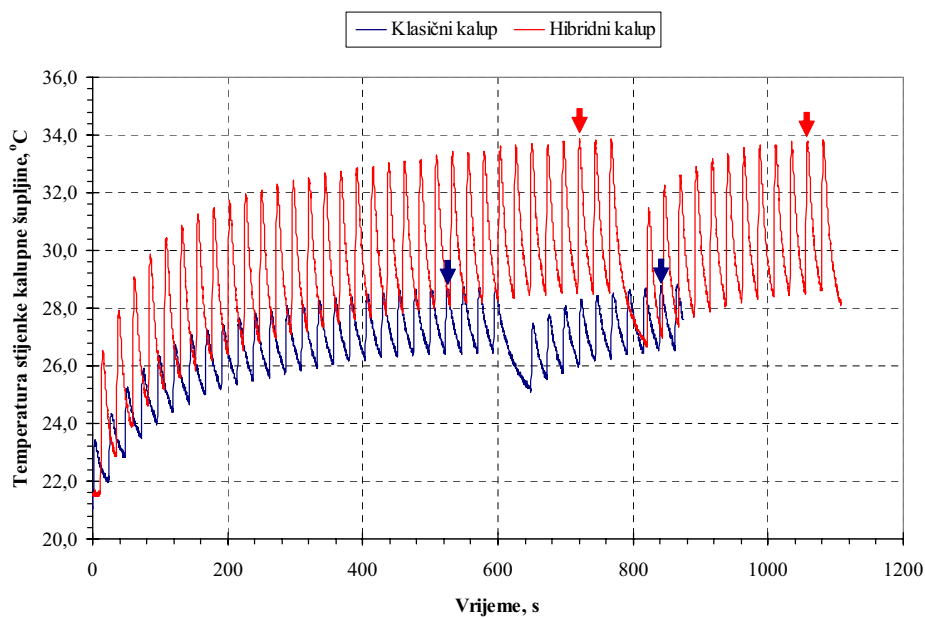
Tablica 13.44 Svojstva otpresaka - optimiranje (hibridni kalup)

Materijal:	PP HJ325MO (Borealis)					
Skupljanje:	1,5 %					
Datum:	08.09.2004.					
Temperatura:	27 °C					
Vrsta optimiranja (svojstvo otpreska)	Ispitci					Srednja vrijednost
Kompleksno						
<i>Masa,</i> <i>g</i>	8,30	8,31	8,30	8,31	8,31	8,30
	8,30	8,30	8,31	8,30	8,30	
<i>Deformacija_1,</i> <i>mm</i>	1,48	1,52	1,51	1,49	1,50	1,50
	1,49	1,52	1,51	1,52	1,50	
<i>Deformacija_2,</i> <i>mm</i>	0,88	0,87	0,91	0,90	0,91	0,90
	0,89	0,91	0,90	0,89	0,90	
<i>Žilavost,</i> <i>kJ/m²</i>	97	108	111	95	98	103,8
	105	108	99	105	112	
Parcijalno						
<i>Masa,</i> <i>g</i>	8,15	8,17	8,17	8,16	8,16	8,16
	8,16	8,16	8,16	8,16	8,17	
<i>Deformacija_1,</i> <i>mm</i>	1,52	1,49	1,52	1,48	1,49	1,50
	1,51	1,51	1,48	1,51	1,50	
<i>Deformacija_2,</i> <i>mm</i>	0,88	0,88	0,89	0,92	0,91	0,90
	0,89	0,91	0,92	0,90	0,88	
<i>Žilavost,</i> <i>kJ/m²</i>	103	107	108	105	111	106,9
	105	106	107	109	108	
Napomena:	FAKULTET STROJARSTVA I BORDOGRADNJE Katedra za preradu polimera Mjerni instrument: digitalna pomična mjerka tvrtke Messezeuge					

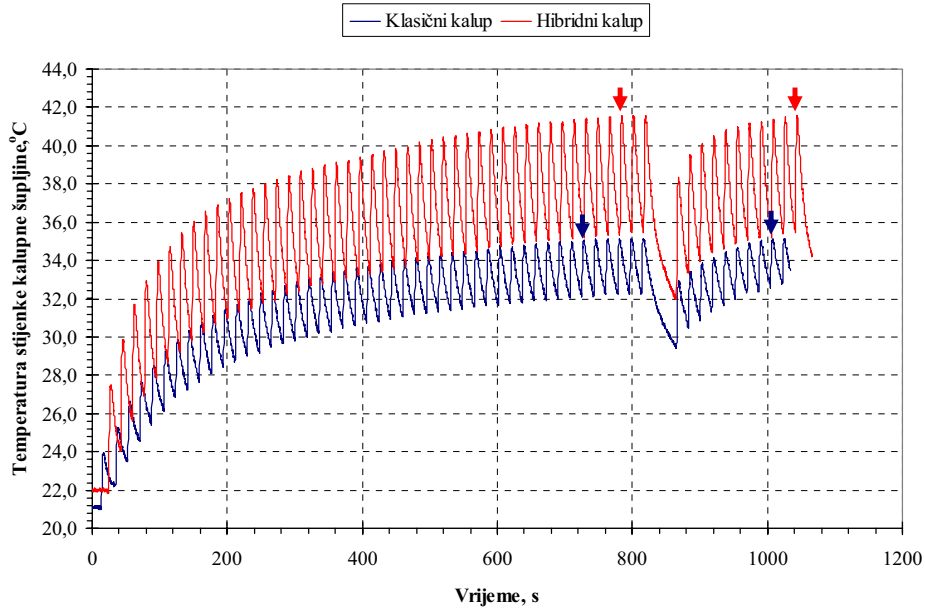
13.9 ANALIZA OSJETLJIVOSTI KALUPA NA ZASTOJE



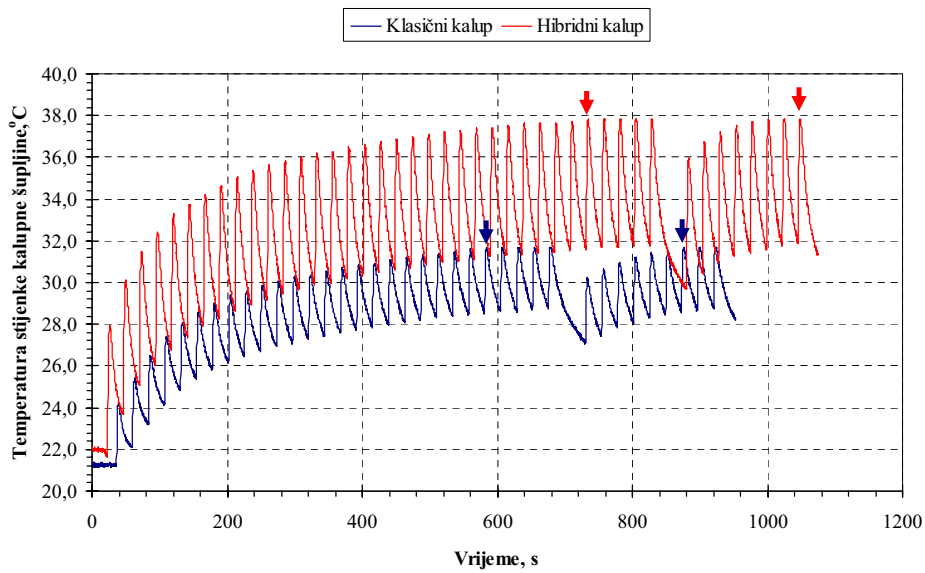
Slika 13.7 Temperaturna polja kalupa (parametri Skupina I)



Slika 13.8 Temperaturna polja kalupa (parametri Skupina II)



Slika 13.9 Temperaturna polja kalupa (parametri Skupina III)



Slika 13.10 Temperaturna polja kalupa (parametri Skupina IV)

ŽIVOTOPIS



Damir GODEC rođen je 18. ožujka 1970. godine u Samoboru, Republika Hrvatska. Nakon završene osnovne škole upisuje Centar za obrazovanje "Rade Končar" u Zagrebu. Studij strojarstva pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu započinje pohađati u akademskoj godini 1990/91. Tijekom studija nagrađen je s dvije Rektorove nagrade, te medaljom Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu za uspjeh tijekom studiranja. Diplomirao je u akademskoj godini 1994/95. s izvrsnim uspjehom.

U studenome 1995. upisuje poslijediplomski studij strojarstva u Zagrebu. Od ožujka 1996. godine zaposlenik je Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske s radnim mjestom znanstvenog novaka pri Katedri za preradu polimera, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U tom razdoblju sudjelovao je u radu na dva projekta *Optimiranje integrirane proizvodnje tvorevina (2-08-182)* i *Optimiranje fraktalne proizvodnje polimernih tvorevina (120-036)* financiranih od strane Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske. Također je aktivno sudjelovao u radu na hrvatsko-slovenskom projektu *Reinženjering konstruiranja kalupa za potrebe malih i srednje velikih poduzeća*. Magistrirao je u listopadu 2000. godine, nakon čega odlazi na radno mjesto konzultanta u tvrtki KonzaltING. d.o.o. u Zagrebu. U veljači 2002. vraća se na mjesto asistenta pri Katedri za preradu polimera. Aktivno se uključuje u rad na projektu *Unaprijeđeni postupci prerade polimera (0120-035)*. Znanstvena područja s kojima se bavi su konstruiranje kalupa za injekcijsko prešanje polimera, računalna simulacija zbijanja u kalupu, te brza proizvodnja tvorevina (RP/RT/RM). Do sada mu je objavljeno kao autoru ili koautoru 42 znanstvena i stručna rada u zemlji i inozemstvu. Aktivno sudjeluje u izdavanju stručnog časopisa "Polimeri". Vrlo dobro govori i piše engleski jezik, a dobro njemački.

BIOGRAPHY



Mr. Damir Godec was born on 18 March 1970 in Samobor, Republic of Croatia. After completing primary school, he continued his education at the Education Centre “Rade Končar” in Zagreb. He started attending lectures from field of mechanical engineering in the academic year 1990/91 at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. During his studies he was awarded with two Rector’s Awards, and the Medal of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture for successful course of his studies. He graduated in the academic year 1994/95 with the highest mark.

In November 1995, Mr. Godec enrolled in the postgraduate study of Mechanical Engineering in Zagreb. Since March 1996 he has been employed by the Ministry of Science and Technology of the Republic of Croatia working as junior researcher at the Chair for Polymer Processing, at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. Over this period he participated in working on two projects: *Optimising of Integrated Manufacturing of Things* (2-08-182) and *Optimising of Fractal Production of Polymeric Things* (120-036) funded by the Ministry of Science and Technology, Republic of Croatia. He also participated in working on croatian-slovenian project *Reengineering of Mould Design for Medium and Small-sized Companies*. He graduated at the postgraduate study in October 2000. After that he went to the new position as consultant at the company KonzalTING d.o.o. in Zagreb. In February 2002 he has returned to the position of assistant at the Chair for Polymer Processing. He was involved in work on project *Advanced Procedures pf Polymer Processing* (0120-035). Mr. Godec’s special interest lies in the scientific fields of designing moulds for injection moulding of polymers, computer simulation of the injection moulding and Rapid Production procedures (RP/RT/RM). Up to now he has published as author or co-author 42 scientific and professional papers in Croatia and abroad. He participates actively in publishing the scientific journal "Polimeri". He is fluent both in spoken and written English, and has good command of German.