



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Název studijního programu: Teorie a stavba strojů

Kód studijního programu: P0715D270024

Výzkum plastových výrobků s ohledem na jejich technologii výroby

Autor: Ing. Martin HABRMAN
Školitel: doc. Ing. Václav VANĚK, Ph.D.
Konzultant specialista: Ing. Zdeněk CHVAL, Ph.D.

Plzeň 2023



Prohlášení

Předkládám k posouzení Disertační práci na téma *Výzkum plastových výrobků s ohledem na jejich technologii výroby*.

Práce je koncipována podle požadavků Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni. Obsahuje proto zejména poznatky a metody bádání, současný stav poznání zkoumané problematiky v českých i zahraničních souvislostech, na základě provedené rešerše specifikaci oblasti výzkumu a prozkoumání její uplatnitelnosti.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:

Ing. Martin Habrman
podpis

Poděkování

I touto cestou děkuji všem, kteří mi při této práci podporovali a od kterých jsem získal cenné poznatky a zkušenosti pro její řešení. Zejména bych rád jmenovitě poděkoval svému školiteli doc. Ing. Václavu Vaňkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Zdeňku Chvalovi, Ph.D.

Autorská práva

Podle zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR), § 17, a zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb., je využití a společenské uplatnění výsledků této práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně technických poznatků, nebo jakékoli nakládání s nimi možné pouze na základě smlouvy se souhlasem autora, autorů citovaných prací a Západočeské univerzity v Plzni.



Výzkum plastových výrobků s ohledem na jejich technologii výroby

Anotace

Cílem této disertační práce je prozkoumat vstřikování do plastových 3D tištěných vložek a pomoci s jejich uplatněním. I když je tato myšlenka relativně nová, již byla nalezena některá řešení. Kromě rešerše stávajících řešení a jejich možností je v této práci provedena rešerše plastů, vstřikování a 3D tisku. Na základě provedených rešerší a prozkoumání nejen současných řešení, ale i dílčích oblastí byly stanoveny upřesňující cíle disertační práce. Jeden z přínosů práce byl stanoven v použití doposud nepoužívané metody 3D tisku mající polotovar ve formě prášku – MJF. Pro zvolenou metodu byla na základě rešerší provedena příprava 3D tisku. Dalším krokem upřesňující cíle disertační práce je příprava vstřikování, a to především návrh, použití a zhodnocení modulární vstřikovací formy, která je dalším přínosem této práce. Dalším krokem této práce bylo prozkoumání vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF. K tomu bylo využito jak simulace, tak bylo použito i měření termokamerou, byly představeny varianty zkoušky zatékavosti, bylo provedeno měření 3D skenerem, k prozkoumání problematiky bylo také využito mikroskopického řezu a mnoho dalšího. Především zkoumání této problematiky včetně vyhotovení závěrů, možností testování atd. tvoří velké přínosy této práce. Na základě provedených rešerší, příprav a výzkumu byla sestavena metodika vstřikování do 3D tištěných plastových vložek metodou MJF. Metodika je výjimečnou, protože stávající řešení ji nenabízejí. Právě popsaná metodika je značným přínosem této práce, který pomůže přiblížit a rozšířit problematiku vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF.

Klíčová slova: Plasty, Vstřikování, 3D tisk, Plastové vstřikovací vložky 3D tištěné metodou MJF z HP PA 12 GB, Metodika



Research of plastic products regarding their production technology

Annotation

The aim of this dissertation is to investigate injection moulding into 3D printed plastic inserts and help with their application. Although this idea is relatively new, some solutions have already been found. In addition to a review of existing solutions and their possibilities, this dissertation includes a review of plastics, injection moulding and 3D printing. Based on these reviews and an investigation of not only current solutions but also particular areas, the refining objectives of the dissertation have been set. One of the contributions of this dissertation was the creation of a previously unused 3D printing method having a semi-finished product in the form of powder – Multi Jet Fusion (MJF). The method of 3D printing was prepared based on the conducted review. The next step of refining the dissertation objective is the preparation of the injection moulding. The design, use and evaluation of a new designed injection mould – a modular injection mould is another contribution of this thesis. The next step of this dissertation was to investigate the injection moulding of 3D printed plastic inserts using the MJF method. To do this, simulation and thermal camera measurements were used, variations of the flow test were presented, 3D scanning measurements were performed, microscopic sectioning was used to investigate the issue, and more. The investigation of these issues and the conclusions drawn, the testing methods etc. are major contributions of this work. Based on the research, preparation and investigation, a methodology for injection moulding of 3D printed plastic inserts using the MJF method was compiled. The methodology described is another major contribution of this thesis that will help to deal with and expand the issue of injection moulding into 3D printed plastic inserts using the MJF method.

Keywords: Plastic, Injection moulding, 3D printing, MJF 3D printed plastic injection moulding inserts from HP PA 12 GB, Methodology

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	5
1 Úvod.....	9
2 Plasty	11
2.1 Polymery	12
2.2 Vlastnosti plastů	15
2.3 Rozdělení plastů podle pravidelnosti geometrie	17
2.4 Druhy plastů	18
2.5 Modifikace základních plastů	20
2.6 Likvidace a recyklace plastů	21
3 Vstřikování	22
3.1 Vstřikovací cyklus.....	23
3.2 Vstřikovací lis	25
3.3 Vstřikovací forma.....	26
Vtoková soustava	28
Kavita (dutina).....	30
Odvzdušnění formy	31
Temperanční (chladicí) systém.....	31
Vyhazovací systém	31
Vedení a středění	31
Rám.....	31
4 3D tisk.....	32
4.1 Rapid prototyping	33
4.2 Výrobní postup	34
4.3 Metody 3D tisku.....	35
Vytlačování materiálu.....	36
Tryskání materiálu.....	37
Laminace plátů	38
Přímé energetické nanášení	39
Spékání práškové vrstvy	39
Fotopolymerace	41
Tryskání pojiva	43
5 Stávající vstřikování do 3D tištěných plastových vložek.....	44
5.1 3D tisk vložek metodou fotopolymerizace.....	44
5.2 3D tisk vložek metodou tryskání materiálu	45
5.3 Shrnutí poznatků	45
3D tisk	45
Vstřikování	46
6 Upřesnění cílů disertační práce	47
7 3D tisk plastových vstřikovacích vložek.....	48
7.1 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200	48
7.2 3D tiskový plast – HP	50
7.3 Výrobní postup	52
7.4 Cena 3D tisku.....	53
8 Příprava vstřikování do 3D tištěných plastových vložek	54
8.1 Vstřikovaný plast	54
8.2 Vstřikovací lis	54
8.3 Modulární vstřikovací forma	55

9	Konstrukce 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek	58
9.1	Testovací díl	59
	Vstřikování testovacího dílu	61
9.2	Drsnost povrchu vložek 3D tištěných metodou MJF	62
9.3	Zabránění tvorby přetoků	63
	Lemová zábrana	63
	Přesah celé horní plochy nad dělicí rovinu	64
9.4	Dutina 3D tištěných vložek	65
9.5	Tloušťka stěny vložky	65
10	Simulace vstřikování do 3D tištěných plastových vložek.....	66
10.1	Okrajové podmínky	67
	Model vstřikovací formy	67
	Model vstřikovací jednotky	68
	Vstřikovací podmínky	68
10.2	Výpočet	70
10.3	Vyhodnocení	70
	Plnění	71
	Dotlak	71
	Chlazení	72
	Plastové vložky	73
	Ocelová vtoková vložka	73
	Ocelové vyhazovače	75
10.4	Zjednodušení simulace	76
10.5	Porovnání vstřikování do plastových vložek s hliníkovými vložkami	76
10.6	Chlazení plastových vložek	79
11	Validace teplotního zatížení vložek	81
11.1	Oblast výstupku pohyblivé vložky pod krytem RTI.....	82
11.2	Oblast pohyblivé vložky pod hlavním kanálkem	83
11.3	Ověření doby zchladnutí vložky během otevření formy	83
11.4	Závěr	84
12	Zatékavost.....	85
12.1	Variety testování.....	87
	Plnění do tlakového omezení.....	87
	Plnění do 10 s	88
12.2	Porovnání délek zatečení do plastových vložek s hliníkovými	88
12.3	Nanesení vrstvy sprejem.....	90
	Délky zatečení při nanesení vrstvy sprejem	91
13	Opotřebení vložek	93
13.1	Měření opotřebení	93
	Pevná vložka	94
	Pohyblivá vložka	95
13.2	Doba chladnutí	96
	Mikroskopický řez ztuhlým výstřikem ve vložce.....	97
14	Výhodnost 3D tištěných plastových vložek	100
14.1	Rychlost výroby	100
14.2	Cena výroby	101
15	Metodika vstřikování do plastových vložek 3D tisknutých metodou MJF	102
15.1	Plánování	103
	Technické zhodnocení	104
	Ekonomické zhodnocení	105
15.2	Virtuální návrh	107

15.3	3D tisk	107
15.4	Vstřikování.....	107
16	Shrnutí disertační práce	108
16.1	Přínosy práce	108
16.2	Směry výzkumu.....	108
17	Závěr	110
18	Použitá literatura	111
19	Publikační činnosti autora.....	113

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Vstřikování do plastových vložek tištěných na 3D tiskárnách Formlabs metodou fotopolymerizace

Příloha č. 2 – Vstřikování do plastových vložek tištěných na 3D tiskárnách Stratasys metodou tryskání materiálu

Příloha č. 3 – Vstřikovaný plast PP 100-GB25

Příloha č. 4 – Přesnost plastových vložek 3D tištěných metodou MJF

Příloha č. 5 – Simulace vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF

Příloha č. 6 – Validace teplotního zatížení plastové vložky 3D tištěné metodou MJF

Příloha č. 7 – Zatékavost plastu vstřikovaného do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF

Příloha č. 8 – Opatření plastových vložek 3D tištěných metodou MJF po vstřikování

Seznam obrázků

Obr. 1	– Světová produkce plastů a oceli od roku 1950 do 2015 [2]	11
Obr. 2	– Sloučení monomerů v polymer.....	12
Obr. 3	– Druhy polymerů podle řetězce makromolekuly	14
Obr. 4	– Závislost pevnosti plastů na teplotě	16
Obr. 5	– Orientace makromolekul v amorfním a semikrystalickém plastu.....	18
Obr. 6	– Rozdělení druhů plastů	19
Obr. 7	– Poměr vyráběných polymerů v EU za rok 2019 [2]	20
Obr. 8	– Princip vstřikování.....	22
Obr. 9	– Vstřikovací cyklus.....	23
Obr. 10	– Dvoudesková vstřikovací forma	27
Obr. 11	– Výstřik se studenou vtokovou soustavou a výstřik s teplými vtoky [11].....	28
Obr. 12	– Příklady vtokových ústí	29
Obr. 13	– Porovnání Rapid prototyping s konvenční výrobou	33
Obr. 14	– Metody 3D tisku.....	35
Obr. 15	– Vytlačování materiálu	36
Obr. 16	– Tryskání materiálu	37
Obr. 17	– Laminace plátů – metoda LOM	38
Obr. 18	– Přímé energetické nanášení	39
Obr. 19	– Spékání práškové vrstvy – Metoda SLS	40
Obr. 20	– Fotopolymerizace – Metoda SLA	41
Obr. 21	– Tryskání pojiva	43
Obr. 22	– Příprava vstřikování do vložek 3D tištěných metodou fotopolymerizace [19].....	44
Obr. 23	– Vstřikovací vložky 3D tištěné metodou tryskání materiálu (zeleně) a vstřikovaný díl [20]	45
Obr. 24	– 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200 a procesní stanice [23].....	48
Obr. 25	– Umístění a natočení vstřikovacích vložek při 3D tisku	52
Obr. 26	– Cena 3D tisku metodou MJF v závislosti na objemu	53
Obr. 27	– Vstřikovací lis 470 E 1000-290 G včetně základních parametrů [25]	54

Obr. 28 – Modulární vstřikovací forma.....	56
Obr. 29 – Sestava jednoho modulu	57
Obr. 30 – Vstřikovaný díl – kryt elektroniky.....	60
Obr. 31 – Porovnání hliníkové vložky s plastovou vložkou pro vstřikování testovacího dílu	60
Obr. 32 – Porovnání výstřiků vstřikovaných do obráběné hliníkové vložky a plastové 3D tištěné metodou MJF	62
Obr. 33 – Profil drsnosti plastové vložky 3D tištěné metodou MJF	63
Obr. 34 – Zabránění tvorby přetoků lemem	64
Obr. 35 – Počáteční model vstřikovací formy.....	67
Obr. 36 – Simulace vstřikování, konec fáze plnění – rozložení teploty	70
Obr. 37 – Simulace vstřikování, fáze plnění – tečení taveniny v čase.....	71
Obr. 38 – Simulace vstřikování, fáze dotlaku – teplota roztaveného jádra	72
Obr. 39 – Simulace vstřikování, fáze chladnutí – rozložení teplot	73
Obr. 40 – Simulace vstřikování, začátek a konec fáze chladnutí – rozložení teploty	74
Obr. 41 – Simulace vstřikování, konec fáze chladnutí – rozložení teploty v pohyblivé vložce a vyhazovačích	75
Obr. 42 – Zjednodušený model vstřikovací formy	76
Obr. 43 – Porovnání vstřikovacích cyklů pro hliníkovou vložku a vložku z HP PA 12 GB	77
Obr. 44 – Porovnání časů fází vstřikování do hliníkových vložek s časy fází vstřikování do vložek z HP PA 12 GB	77
Obr. 45 – Simulace vstřikování, fáze chladnutí – rozložení teploty v plastové vložce po 11 s a hliníkové po 10 s	79
Obr. 46 – Pokus chladit plastovou vložku kanálkem.....	80
Obr. 47 – Porovnání rozložení teplot z termokamery a simulace po otevření formy a po provedení 10 cyklů.....	82
Obr. 48 – Porovnání měření teploty termokamerou se simulací.....	83
Obr. 49 – Vložka pro testování zatékavosti a výstřik	85
Obr. 50 – Podstata vstřikování zatékavosti variantou „Omezení“	87
Obr. 51 – Zatékavost pro ocelovou a plastovou vložku v obou variantách testování.....	89
Obr. 52 – Porovnání zatékavosti ve vložkách z HP PA 12 GB po nanesení různých vrstev spreji.....	92
Obr. 53 – Vstřikovací vložky z HP PA 12 GB po testování vrstev silikonu a AT - 44.....	93
Obr. 54 – Vyhodnocení opotřebení pevné vložky po 100 cyklech.....	94
Obr. 55 – Vyhodnocení opotřebení pohyblivé vložky po 100 cyklech	95
Obr. 56 – Důsledek příliš dlouhé doby chladnutí.....	97
Obr. 57 – Mikroskopický řez zatuhlého dílu	98
Obr. 58 – Mikroskopický řez v detailním zobrazení.....	99
Obr. 59 – Schéma postupu vstřikování do plastových vložek 3D tisknutých metodou MJF	103
Obr. 60 – Porovnání doby výroby 100 kusů vstřikování do hliníkových a plastových vložek	106

Seznam tabulek

Tab. 1 – Základní požadavky na vstřikovací formu	28
Tab. 2 – Převod CAD modelu do STL modelu	34
Tab. 3 – Relativní hodnocení prášků pro 3D tiskárnu HP Jet Fusion 4200 dle výrobce 3D tiskárny [22]	51
Tab. 4 – Vlastnosti HP PA 12 GB [24]	51
Tab. 5 – Parametry vstřikování testovacího dílu, poprvé	61
Tab. 6 – Teplotní vlastnosti částí formy [24], [26]	68
Tab. 7 – Parametry vstřikování testovacího dílu, podruhé	69
Tab. 8 – Doby fází dotlaku, chlazení a otevření formy při vstřikování do hliníkových vložek	77
Tab. 9 – Parametry vstřikování zatékavosti	86
Tab. 10 – Porovnání výrobních cen vložek.....	101

Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam zkratk ve skupinách a v abecedním pořadí

Zkratka	Název	Překlad
2D	dvojdímenzionální	
3D	trojdímenzionální	
ASTM	American Society for Testing Materials	Americká společnost pro zkušebnictví a materiály
atd.	a tak dále	
cca	přibližně, asi tak nějak, plus minus	
CAD	Computer Aided Design	počítačem podporované navrhování
CNC	Computer Numerical Control	počítačem řízený obráběcí stroj
CO ₂	oxid uhličitý	
ČSN	Česká státní norma	
EN	Evropská norma	
EU	Evropská unie	
GmbH & Co. KG	Besondere Kommanditgesellschaft	smíšené komanditní společnosti
HDT	Heat Deflection Temperature	teplota tepelné deformace
https	bezpečná verze hypertextového přenosového protokolu	
Inc.	incorporated	veřejná obchodní společnost
IPC	The French Industrial Technical Center for Plastics and Composites Francouzské průmyslové technické centrum pro plasty a kompozity	
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro normalizaci
KG	Kommanditgesellschaft	komanditní společnost
LLC	Limited liability company	obdoba české společnosti s ručením omezeným
Ltd.	Limited	společnost s ručením omezeným
max.	maximální	
min.	minimální	
MFR	melt mass-flow rate	hmotnostní index toku taveniny
MVR	melt volume-flow rate	objemový index toku taveniny
NA	Not Available	nedostupné, nestanovené
např.	například	
obr.	obrázek	
Ra	střední aritmetická odchylka profilu	
RTI	Regionální technologický institut	
s.r.l.	Società a responsabilità limitata	společnost s ručením omezeným
s.r.o.	společnost s ručením omezeným	
S.A.	Société Anonyme	anonymní společnost
SE	Societas Europaea	evropská společnost
STL	Stereolitografie, typ CAD formátu	
tj.	to je (jest)	
tzn.	to znamená	
UV	ultrafialové záření	
WLC	Williams – Landel – Ferry rovnice	
WTO	World Trade Organization	Světová obchodní organizace
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni	

Plasty

Chemické prvky

C	uhlík
Cl	chlor
F	fluor
H	vodík
N	dusík

O	kyslík
P	fosfor
S	síra
Si	křemík

Druhy plastů

ABS	akrylonitril-butadien-styren
ASA	akrylonitril-styren-akrylát
EOS PA 12	polyamid od firmy EOS
EPS	epoxidovaný polystyren
ETFE	ethylen-tetrafluorethylen
FEP	fluorovaný ethylen-propylen
HP PA 11	polyamid od firmy HP
HP PA 12	polyamid od firmy HP
HP PA 12 GB	polyamid od firmy HP plněný skleněnými kuličkami
LCP	kapalně krystalické polymery
PA	polyamid
PA + G	polyamid plněn skelnými vlákny
PA 11	typ polyamidu
PA 12	typ polyamidu
PA 66	polyhexamethylendipamid
PBT	polybutylentereftalát
PC	polykarbonát
PC + G	polykarbonát plněný skelnými vlákny
PCT	polycyclohexylenedimethylene terephthalate
PCTG	polycyklohexylenedimethylen tereftalát
PE	polyethylen
PE – HD	vysokohustotní polyethylen
PE – LLD	lineární nízkohustotní polyethylen
PE – LP	nízkohustotní polyethylen
PE – MD	středněhustotní polyethylen
PEEK	polyetheretherketon
PEI	polyetherimid
PEK	polyetherketon
PES	polyethersulfon
PET	polyethylentereftalát
PETG	polyethylentereftalát glykol
PFA	perfluor alkoxyalkan kopolymer
PMMA	polymethylmetakrylát
POM	polyoxymethylen, polyformaldehyd, polyacetát
POM + G	polyoxymethylen, polyformaldehyd, polyacetát plněn skelnými vlákny
PP	polypropylen
PP + G	polypropylen plněný skelnými vlákny
PP copo	kopolymer polypropylénu
PP homo	homopolymer polypropénu
PPA	polyftalamid
PPO	polyfenylenoxid
PPS	polyfenylsulfid
PPSU	polyfenylensulfon
PS	polystyren
PSU	polysulfon
PTFE	polytetrafluoroethylen
PUR	polyuretanová pěna
PVC	polyvinylchlorid
sPS	syndiotaktický polystyren

SAN	styren-akrylonitril
SB	styren-butadien
SBS	styren-butadien-styren
SMMA	styrén-methylmethakrylát
TPE	termoplastický elastomer
TPE-A, TPA	termoplastický polyamid
TPE-U, TPU	termoplastický polyuretan

3D tisk tisk v trojdimenzionálním prostoru
 RepRap replicating rapid prototype schopný sebereplikace a rychlého prototypování

Vytlačování materiálu

FDM	Fused Deposition Modelling	tavené depoziční modelování
FFF	Fused Filament Fabrication	výroba z tavného filamentu

Tryskání materiálu

DoD	Drop On Demand	kapička na vyžádání
MJ	Material Jetting	tryskání materiálu

Laminace plátů

LOM	Laminated Object Manufacturing	výroba laminovaných předmětů
-----	--------------------------------	------------------------------

Přímé energetické nanášení

DED	Direct Energy Deposition	přímé energetické nanášení
-----	--------------------------	----------------------------

Spékání práškové vrstvy

mLS	metal Laser Sintering	laserové slinování kovu
pLS	polymer Laser Sintering	laserové slinování polymeru
LS	Laser Sintering	laserové slinování
MJF	Multi Jet Fusion	
PBF	Powder Bed Fusion	spékání práškové vrstvy
SLS	Selective Laser Sintering	spékání práškové vrstvy

Fotopolymerizace

CDLP	Continuous Digital Light Processing	nepřetržité přímé působení světla
DLP	Direct Light Processing	přímé světelné zpracování
LCD	Liquid Crystal Display	displej z tekutých krystalů
LFS	Low Force Stereolithography	stereolitografie s nízkou silou
LPU	Light Processing Unit	jednotka pro zpracování světla
SLA	Stereolitografie	
SLA-1	SLA 3D tiskárna od firmy 3D Systems	
VAT	kád', nádrž	

Tryskání pojiva

3DP	Three – Dimension Printing	trojrozměrný tisk
BJ	Binder Jetting	tryskání pojiva

Seznam symbolů v abecedním pořadí

Označení	Jednotky	Název
$\dot{\gamma}$	1/s	smyková rychlost
η	Pa/s	viskozita
η_0	Pa/s	nulová viskozita / Newtonovská mez
τ_k	Pa	kritická úroveň napětí
A_1	–	koeficient
A_3	K	koeficient
b_{1L}	cm ³ /kg	koeficient
b_{2L}	cm ³ /(kg * K)	koeficient
b_{3L}	Pa	koeficient
b_{4L}	1/K	koeficient
b_{1S}	cm ³ /kg	koeficient
b_{2S}	cm ³ /(kg * K)	koeficient
b_{3S}	Pa	koeficient
b_{4S}	1/K	koeficient
b_5	K	koeficient
b_6	K/Pa	koeficient
b_7	m ³ /kg	koeficient
b_8	1/K	koeficient
b_9	1/Pa	koeficient
B	–	koeficient zohlednění citlivosti materiálu na tlaku
$B_{1,2,4}$	–	koeficienty
$B_{3,5}$	K ⁻¹	koeficienty
B_6	K ⁻²	koeficient
C	–	konstanta
D_1	Pa/s	koeficient
D_2	K	koeficient
G	dyne/cm ²	viskozita
K	erg/(s * cm * °C)	tepelná vodivost
n	–	index mocninného zákona v režimu vysoké smykové rychlosti
T	K	teplota
T_g	K	teplota zasklení
T_m	K	teplota tání
$v(T, p)$	cm ³	objem závislý na teplotě a tlaku
$v_0(T)$	cm ³	měrný objem při nulovém měrném tlaku, závislý pouze na teplotě

1 Úvod

Množství plastových výrobků ve světě se neustále zvětšuje a nacházejí uplatnění ve stále větším počtu odvětví, která by za ně jen těžko nalézala náhradu. Ve spoustě odvětví dochází k postupné náhradě výrobků z konvenčních materiálů plastovými. Taková náhrada je možná jen za předpokladu, že jsou vlastnosti plastového výrobku výhodnější. Na svět každým dnem přichází nové plasty, jejichž vlastnosti jsou často jen nepatrně odlišné od vlastností již známých plastů. Vylepšení jedné vybrané vlastnosti nového plastu bývá mnohdy bohužel na úkor ostatních vlastností. Neustálý výzkum plastů a jejich vlastností umožňuje široký výběr. Oproti ostatním materiálům je nabízený sortiment mnohonásobně široký, avšak při výběru vhodného plastu je nutné zohledňovat všechny specifické vlastnosti. Pro označení nových plastů se uplatňují stále více komerční názvy.

Nové plasty se svými specifickými vlastnostmi nejsou jediné, jež se neustále vyvíjí. Pro správně navržený plastový výrobek je zapotřebí zohlednit i technologii výroby. V možnostech zpracování plastového výrobku došlo také ke značnému pokroku. Začíná se více uplatňovat aditivní styl výroby. Na konci 70. let minulého století byly patentovány první metody 3D tisku. V současné době už je možné 3D tisknout téměř ze všech materiálů, avšak nejvíce používaným 3D tiskovým materiálem je plast. Do povědomí široké veřejnosti se 3D tisk dostal po představení projektu RepRap roku 2005. Poté začíná pronikat více nejen do podniků, ale i do domácností. Myšlenkou projektu je sdílené know how všeho, co je spojené s 3D tiskem. Postupem let platnosti patentů 3D tiskových metod zanikají, tím je umožněno dříve chráněné metody volně používat. Na svět přicházejí nejen po domácku vyrobené 3D tiskárny, ale i komerční verze. Vznikají další firmy zaměřující se na konstrukci 3D tiskáren. Dříve vynalezené 3D tiskové metody jsou upravovány. Vývoj 3D tisku v posledních letech prochází výrazným rozvojem.

S vývojem 3D tisku je spojen i vývoj 3D tištěných výrobků, 3D výtisků. Zatímco od prvních 3D výtisků nikdo moc neočekával, na dnešní 3D výtisky jsou kladeny daleko větší požadavky. 3D výtisky nacházejí zpravidla dvojí uplatnění. První je náhrada poničeného výrobku 3D tištěným, kdy za pomoci reversního inženýrství je možné navrhnout podklad pro výrobu 3D výtisku. Druhé uplatnění 3D tisku je zařazení přímo do výroby. Použití 3D tisku pro výrobu nové součásti nachází uplatnění především kvůli rychlé výrobě prototypů, Rapid prototyping. V sériové výrobě není zatím 3D výtisk příliš používán. Ať už je uplatnění 3D tisku jakékoliv, vlastnosti 3D výtisku mají svá specifika. Ne vždy bude náhrada adekvátní, v některých případech bude potřeba provést změnu tvaru výrobku. Je nutné zohlednit umístění podpor, natočení součásti, výšku vrstvy, směr pokládání vláken atd. a tím vzít v úvahu odlišnosti aditivní technologie od konvenční.

I přes velkou popularitu a oblibu 3D tisku zůstává většina plastových výrobků vyráběná tvářecími technologiemi. Nejrozšířenější tvářecí technologií pro výrobu plastových výrobků je vstřikování. V minulém století a na přelomu milénia zaznamenalo vstřikování značný pokrok. Vstřikování pronikalo do velkého množství aplikací a zároveň i složitost vstřikovaných výrobků narůstala, tím se rozvíjelo i konstruování vstřikovacích forem. Rostl i počet vstřikovaných dílů, bylo potřeba vyrábět velký počet kusů plastových výrobků. Příkladem je automobilový průmysl, kde v automobilu procentuálně narostl objem použitých plastů. Pro výrobu i složitějších plastových výrobků se vstřikování ukázalo jako velice efektivní způsob výroby. Dnes je již vstřikování spojováno se sériovou výrobou. Mnoho firem vyrábějících své výrobky vstřikováním našlo pro ně vhodné podmínky, výrobce strojů, vybralo vhodný plast atd. Vznikla i řada doporučení pro vstřikování, která se týkají např. změny vstřikovaného plastu a tím souvisejících úprav vstřikovacích podmínek atd.

Technologie vstřikování plastů představuje rychlou výrobu, jíž lze dosáhnout uspokojivé kvality vstřikovaných dílů. Jako u každé technologie je však nezbytná příprava procesu. Nástrojem je vstřikovací forma, kterou je nutné pro každý tvar výrobku nechat znovu vyrobit. Výroba formy představuje značné náklady. Investované náklady do výroby formy jsou vráceny zpět zpravidla až po vyrobení několika set tisíců vstřikovaných dílů. Pro hromadnou výrobu je výhodné použít i tvrdokov, který je ve formě umístěn v podobě vstřikovacích vložek. Opotřebením tvrdokovu obtékáním vstřikovaného plastu je mnohem pomalejší. Tím je zaručen stálý tvar dutiny pro velký počet cyklů. Ovšem v praxi se vyskytují i případy, kdy je potřeba vyrobit malý počet vstřikovaných dílů. V takových případech drahý materiál, tvrdokov nemá z finančního hlediska smysl. Snahy výrobců forem snížit náklady na výrobu formy spočívají v použití

levnějšího materiálu. Tím je nejen snížena pořizovací cena polotovaru, ale např. při použití hliníku je lehčí obrobiteľnost. Náklady jsou také sníženy investováním pouze do vložky, avšak ceny kovových vložek narážejí na své limity.

Cíl disertační práce

Disertační práce se zaměřuje na výzkum vstřikování pro kusovou či malosériovou výroby. Oblastí výzkumu je vstřikovací forma. Výchozím bodem jsou dosavadní limity běžně používaných forem. Snížit výrobní cenu vstřikovací vložky lze použitím levnějšího materiálu, než je kov, a zároveň použitím technologie, která snáze vyrábí tvarově složitější výrobky. Tyto dvě možnosti snížení výrobní ceny vstřikovací vložky vhodně představuje plastový 3D tisk. Nejedná se však o úplně novou myšlenku. Za pár let existence vstřikování do 3D tištěných plastových vložek v této oblasti našlo uplatnění mnoho firem a institucí, avšak vývoj plastu a 3D tisku neustále pokračuje.

Cílem této práce je zaměřit se na využití nových možností 3D tisku plastových vstřikovacích vložek. K naplnění zvoleného cíle bude zapotřebí prozkoumat oblasti plastů a 3D tisku a současně i oblast vstřikování, ve které se 3D tištěné plastové vložky budou uplatňovat. Využití nových možností 3D tisku vyžaduje i prozkoumání stávajícího použití 3D tištěných plastových vložek. Po provedení rozsáhlejších rešerší bude možné nalézt novou možnost 3D tisku plastových vstřikovacích vložek, ale i vylepšit dosavadní přístupy využití vložek.

2 Plasty

Plastů, z nichž může být plastový výrobek vyroben, existuje mnoho. Od ostatních materiálů se odlišují svou strukturou, která je tvořena makromolekulárními řetězci. Všechny materiály tvořené makromolekulami se nazývají polymery, polymerní materiály atd. Plasty tvoří pouze jednu část polymerů. Polymery jsou samostatnou skupinou materiálů odlišujících se od ostatních jak chemicky, tak fyzikálně. Jejich označení se postupem času a vývojem měnilo. Při objevení skupiny polymerů se používalo označení „nové hmoty“. Když se polymery srovnávaly s jinými látkami tvořenými stejnými prvky, začínal se používat název „umělé hmoty“, který vznikl překladem z německého „Kunststoffe“. Polymery jsou tvořeny prvky, jimiž jsou tvořené i živé hmoty. Avšak polymery nejsou živé a jsou vytvořeny „uměle“. Označení polymerů jako „umělé“ nemá své opodstatnění. „Uměle“ lze nazvat každý materiál, který se v přírodě nevyskytuje. Toto označení novou skupinu materiálů vůbec necharakterizovalo. Pro výrobu lze použít i přírodní vlákna. Lze však rozlišovat, zda vlákno je „umělé“, syntetické nebo přírodní. Nelze však celou skupinu materiálu nazvat jako umělou. Stejně označení „nové“ postupem času rovněž ztrácí svůj význam. Později se začal používat německý název „Polyplaste“, rusky „plastmassy“, což by se dalo přeložit jako „plastické hmoty“. Časem název zlidověl na „plasty“. Avšak s rozvojem této skupiny materiálu se začaly některé plasty od sebe výrazně odlišovat svým chováním. Přichází poslední označení, a to polymery. Slovo polymer je odvozeno od podstaty, jak vzniká tento materiál – je složen z makromolekul složených z jednotlivých merů [1].

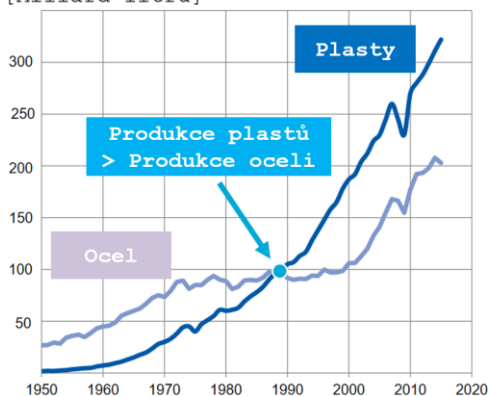
Laboratorně byly polymery objeveny již v 19. století. Průmyslového zpracování se polymery dočkaly až ve 20. století. Větší zpracování plastů lze zaznamenat až po první světové válce. Nastává vývoj syntetických polymerů, vláken. Začínají se rozrůstat odvětví chemie, jež se na ně zaměřují. Rozvíjí se petrochemie zaměřující se na přeměnu ropy a uhlí ve využitelné materiály. Vznikají obory kaučukářství, gumárenství, obalů, nátěrů, lepidel, kompozitů atd.

Během druhé světové války se uplatňují výhody polymerů. V některých aplikacích se dokonce začínaly vyrovnávat doposud používaným materiálům. Především Německo vedl nedostatek surovin k rozvoji syntetických látek.

Po skončení druhé světové války a vzpamatování se z ní nastává bouřlivý rozvoj a výroba polymerů. Výrobky z nich začínají postupně zaplňovat trh. Hlavní výhodou polymerů je jejich čím dál levnější zpracování a nízká cena. Zpočátku byly polymery vnímány jako poválečná laciná náhrada za jiné materiály. Se zlepšováním vlastností polymerů a zlepšováním technologií nahrazují polymery čím dál více ostatní materiály. V některých oblastech svými vlastnostmi dokonce překonávají dříve používané materiály. Minuly časy konce minulého století, kdy člověk nahlížel na polymery stále ještě nedůvěřivě. Stále méně jsou považovány za lacinou náhradu nebo horší materiál.

Dnes je možné se s polymery setkat téměř všude, jsou součástí běžného života každého z nás. Neexistuje téměř nikdo, kdo by za celý svůj život nepřišel do kontaktu s polymerem. Dříve se doba označovala podle materiálu, který byl v ní hojně používán. Člověk tak prošel dobou kamennou, bronzovou, železnou atd. V současné době jsou polymery jedním z nejpoužívanějších materiálů, proto by se tato doba mohla nazývat doba polymerní, polymerních materiálů atd.

[Miliard litrů]



- 1989 – Produkce plastů překračuje výrobu oceli
- Produkce v roce 2015
 - 322 [miliard litrů] plastů
 - 203 [miliard litrů] oceli

Obr. 1 – Světová produkce plastů a oceli od roku 1950 do 2015 [2]

Výroba polymerů od prvního průmyslového zpracování neustále roste. Žádný jiný materiál za posledních 60 let nezaznamenal prudší nárůst výroby. Růst produkce výroby plastů ve světě je znázorněn v grafu na Obr. 1. Vyrobene množství je přepočítáno na jednotku litr dle následujícího početního modelu – 1 kg plastu odpovídá přibližně 1 l, a to dle hustoty plastu. 8 kg oceli odpovídá přibližně 1 l dle hustoty oceli. Kvůli velkému množství vyrobených kusů ve světě byla jednotka znásobena na miliardu litrů. Na vodorovné ose jsou zobrazeny roky. Graf začíná rokem 1950 a končí rokem 2015. Dobře vystihuje historické období plastů od druhé poloviny 20. století téměř až do současnosti. Pro porovnání produkce je v grafu zanesen i vývoj oceli. Ocel je jedním z nejpoužívanějších materiálů. Další materiály zde nejsou uvedeny. Průběh ostatních materiálů bude podobný, jen v menším množství a jejich nárůst nebude tak prudký. Zejména u vzácnějších kovů je jejich produkce limitována současným množstvím nalezišť [2].

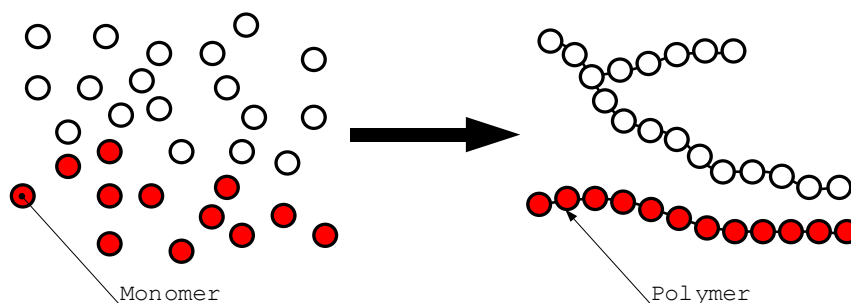
Z grafu na Obr. 1 je dobře patrná expanze výroby plastů. Oceli, které se vyrábělo okolo roku 1950 přibližně o 30 miliard litrů více než plastů, se roku 2015 vyrábí o více než 100 miliard litrů méně. Je předpoklad, že se rozdíl mezi množstvím vyrobeného plastu a oceli bude více zvětšovat. V roce 1989 nastal bod zvratu v produkci mezi ocelí a plasty. Produkce plastů se v tomto roce vyrovnala oceli a v témže roce ji i překonala. U produkce plastů i oceli nastává pokles produkce okolo roku 2008. V tomto roce byla celosvětová hospodářská krize a poptávka po materiálech poklesla. Pro křivku oceli je poklesů více v závislosti na světových událostech. Pro plasty je druhý menší pokles výroby ještě okolo roku 1975, jehož příčinou byla ropná krize. Ropa je jednou ze základních surovin pro výrobu polymerů.

Polymery pronikají do všech oblastí a jejich produkce roste. Zatímco v Evropě je poměr produkce plastů k oceli 84 : 16, v Severní Americe 60 : 40, v Asii je poměr 33 : 67 [2]. Na základě tohoto poměru lze říct, že produkce plastů je pro Evropu mnohem důležitější než produkce oceli. Je důležitý vývoj jak nových druhů plastů, tak technologií pro jejich zpracování, ale zároveň i správného konstruování plastových výrobků a tím lehký průmysl nabírá v Evropě na důležitosti.

Dle dosavadního vývoje plastů nejen v Evropě, ale i ve světě je zaměření se na použití plastu namísto kovu správným krokem.

2.1 Polymery

Polymery jsou nadřazená skupina, do níž spadají plasty. Podle prvků skládajících makromolekulární řetězce patří do oblasti organické chemie. Sloučeniny, kterými se organická chemie zabývá, musí ve své molekule obsahovat alespoň některý z těchto 4 prvků: C, O, H, N. Téměř každý polymer obsahuje C, jenž má typickou vlastnost vytvářet řetězce a vaznost na biogenní prvky (O, N, S atd.) Dále mohou být v polymerech přítomny prvky F, P, Cl, S, Si, jež skládají základní molekuly označované jako mery. Stejně mery se označují jako monomery [3].



Obr. 2 – Sloučení monomerů v polymer

Slovo polymer pochází z řečtiny a skládá se ze slov poly = mnoho a mer = částice. Slova lze také chápat jako „spojený z mnoha částic“. Sloučením monomerů vzniká molekula nazývaná se polymer. Přeměnu monomerů na polymery je vidět na Obr. 2. Barevně jsou odlišeny monomery podle toho, jaký skládají polymer. Výsledkem je pak polymer spojený z monomerů, které se opakují a tvoří dlouhý řetězec. Charakteristika řetězce je, že jeho délka je výrazně delší než šířka. Délka makromolekuly může být až 0,001 mm, zato šířka je pouze cca 0,000 001 mm. U jiných materiálů se takové dlouhé molekuly příliš často nevyskytují. Podle dlouhé délky molekuly se používá označení makromolekula. Zároveň jsou

makromolekuly i těžší než běžné molekuly. Relativní molekulová hmotnost makromolekuly je přes 10 000, zato běžná molekula má relativní molekulovou hmotnost 10 až 100. Polymery i monomery jsou stejného procentního složení, ale vlivem různého tvaru svých molekul mají různé vlastnosti. Tvar a uspořádání makromolekul má výrazný vliv na vlastnosti polymerů [1].

Výhodou makromolekuly je, že jsou v ní mery spojeny kovalentní (chemickou) vazbou, jež je charakteristická vysokou mechanickou pevností, stabilitou za zvýšené teploty, odolností proti působení korozního prostředí atd. Tím by mohly mít polymery velmi dobré celkové vlastnosti. Jejich nevýhodou je velmi slabé spojení jednotlivých makromolekul, jež jsou k sobě drženy Van der Walsovými silami (fyzikální vazba). Tato vazba je velmi slabá, což má za následek klouzání makromolekul po sobě. Někdy může dojít i k vytažení jedné makromolekuly z původní polohy.

Rozdělení polymerů podle původu.

Přírodní polymery se získávají ze živých organismů. Po izolaci z přírodních zdrojů se používají buď v původní formě, nebo se dále chemicky upravují. Druhou skupinou jsou umělé polymery též označované jako syntetické. Syntéza je spojování více částí v jeden celek. Princip spojování je znázorněn na Obr. 2. Syntetické polymery nevznikají samy od sebe, pro jejich vytvoření je zapotřebí zásah člověka.

A. Přírodní polymery

Přírodní polymery vznikají v rostlinách nebo v živočišných organismech složitými biochemickými procesy. Řadí se sem jak makromolekulární látky, tak jejich odvozeniny (deriváty). Mezi nejznámější přírodní polymery patří kaučuk, celulóza (buničina), chitin, škrob a jantar. Více polymerů je však vyráběno synteticky.

B. Syntetické polymery

Syntetické polymery jsou vytvářeny z merů, které jsou chemickou reakcí přeměněny v polymer. Tato chemická reakce se nazývá polyreakce. Základní 3 polyreakce jsou uvedeny níže. Toto rozdělení není jednoznačné, neboť některé makromolekuly se dají získat různými způsoby, např. syntetické pryskyřice lze získat více reakcemi [1].

Polyreakce

Cílem polyreakce je vytvořit polymer. Podstata polyreakce je rozrušení, otevření dvojně vazby v monomerech. Zrušení dvojně vazby způsobí sloučení monomerů mezi sebou, tím vzniká řetězec monomerů, polymer. Jedná se o řetězovou chemickou reakci. K rozrušení dvojných vazeb monomerů dochází za vysoké teploty. Podle požadovaného tvaru makromolekul se použije patřičné činidlo. Výsledkem je polymer mající jiné chemické složení než vstupní monomery.

1. Polymerace

Nejjednodušším typem polyreakce je polymerace. Do reakce vstupují stejné monomery. Během polymerace dochází pouze k otevření dvojně vazby. Přitom nevzniká žádný vedlejší produkt, odpad. Rychlost reakce je vysoká. Za velmi krátkou dobu se vytvoří z monomerů dlouhé makromolekuly [3].

2. Polykondenzace

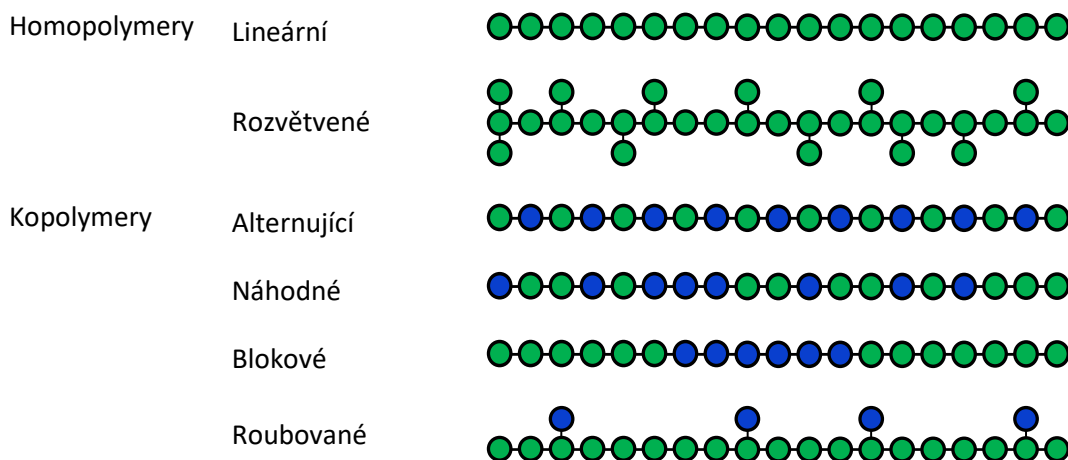
Do reakce mohou vstupovat buď stejné, nebo rozdílné monomery. Po otevření dvojně vazby se stejně jako u polymerace vytváří řetěz makromolekuly. U polykondenzace se však může spojit více řetězců. Při reakci vzniká vedlejší produkt, což je nízkomolekulární látka, např. voda, alkohol, amoniak atd. Rychlost reakce je velmi nízká. Významnými produkty jsou polyamidy (PA, např. nylon /silon) nebo polyestery (polyethylentereftalát PET) [1].

3. Polyadice

Polyadice je velmi podobná polykondenzaci, nevzniká však žádný vedlejší produkt. Vstupní monomery musí obsahovat mnoho dvojných vazeb. Makromolekulární řetězec je tvořen postupnou adicí (sčítáním či násobením) monomerů. Rychlost reakce je stejně jako u polykondenzace velmi nízká. Významnými produkty jsou polyuretan a styren-butadienový kaučuk. Butadien-styrenový kaučuk sloužící k výrobě pneumatik.

Druhy polymerů podle řetězce makromolekuly

Podle připravených podmínek polyreakce lze vytvořit jeden z následujících řetězců makromolekuly zobrazených na Obr. 3.



Obr. 3 – Druhy polymerů podle řetězce makromolekuly

Základní rozdělení polymerů je na homopolymery a kopolymery. Pro vznik homopolymeru byly použity stejné monomery. Výsledkem polyreakce je polymer složený ze stejných monomerů. Pro vznik kopolymeru byly použity dva a více monomery. U kopolymeru se dále rozlišuje střídání monomerů. Podle tvaru se řetězce rozdělují na lineární, rozvětvené a zesíťované. Zesíťovaný řetězec není zobrazen na Obr. 3. Lze si jej představit jako rozvětvený řetězec makromolekuly propojený s více rozvětvenými řetězci makromolekul ve více místech. Polymerní materiál tvořený lineárními řetězci se vyznačuje velkou hustotou. Důvod je, že řetězce se mohou velmi hustě umístit vedle sebe. Výsledkem je nízkopórovitý materiál. Opakem jsou rozvětvené řetězce. Makromolekuly jsou rozvětvené, což brání k jejich stlačení k sobě. Poslední skupinou jsou zesíťované řetězce, které mohou být tvořeny lineárními nebo rozvětvenými řetězci. Jednotlivé řetězce jsou však spojeny vazbami.

Základní rozdělení polymerů

O vlastnostech polymerů rozhodují makromolekuly. Především zesíťování řetězců rozděluje polymery na plasty a elastomery. Další vlastností, která polymery rozděluje, je jejich reakce na teplotu.

Elastomery

Řetězce elastomerů jsou zesíťované. Vstupní molekuly mohou být přírodního nebo syntetického původu. Místa spojení mezi řetězci se nazývají můstky. Výsledná struktura představuje síť tvořenou řetězci a pospojovanou můstky. Chemická reakce, při které se vytváří můstky mezi molekulami, se nazývá vulkanizace. Pro ni je potřeba teplo a vulkanizační činidlo, např. síra, peroxidy atd. Výsledkem je vysoce elastický polymer nazývaný se elastomer. Charakteristika elastomeru je, že za běžných podmínek je bez porušení malou silou značně deformovatelný. Velikost deformace je nezávislá na teplotě. Významnou skupinou jsou kaučuky vyráběné z přírodního kaučuku. Typickým představitelem elastomeru je guma.

Plasty

Druhou skupinou jsou plasty, které představují většinu polymerů. Za běžných podmínek jsou plasty tvrdé a často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. Podle možnosti tvarovat plast za zvýšené teploty se rozdělují na termoplasty a reaktoplasty. Termoplast je možné za zvýšené teploty opakovaně tvarovat. Pokud lze plast za zvýšené teploty tvarovat pouze jednou, jedná se o reaktoplast. Tvarování reaktoplastu za zvýšené teploty je jen při výrobě. Výrobkům z reaktoplastu již nikdy nelze za tepla změnit tvar, aniž by se poškodily.

Termoplasty

Vlastnost opakovaného tvarování za zvýšené teploty je využívána pro recyklaci. Recyklace polymerů je v současné době velmi diskutované téma. Polymerů na světě neustále přibývá a tím i množství

již zastaralých, nepotřebných výrobků. Vzhledem k množství polymerů zaplavujících oceány se vývoj zaměřuje na recyklaci. Ze skupiny plastů tvoří termoplasty značnou většinu. Rychlost vývoje termoplastů je proto rychlejší než u reaktoplastů. Hlavním představitelem je nejvyráběnější polymer na světě – polyethylen PE. Značná část PE se spotřebovává na obalové hmoty.

Reaktoplasty /Termosety/

Dřívější označení reaktoplastů je termosety. Možnost jednorázově tvarovat za zvýšené teploty je způsobeno chemickou reakcí. Jakmile ale proběhne, nelze reaktoplasty znova tvarovat. K aktivaci chemické reakce je zapotřebí tepla a síťovacího činidla. Během reakce se vytváří síťovaná struktura. Výsledkem je tvrdý, ale velmi křehký reaktoplast. Pokud by došlo k pokusu opakovat tváření za zvýšené teploty, je pravděpodobné, že by reaktoplast spíše shořel. Charakteristickou vlastností je dobrá přilnavost (adheze). Typickými představiteli jsou lepidla, barvy, laky atd. Velmi dobrou přilnavost téměř ke všem materiálům má epoxidová pryskyřice (Adhezivní vlastnosti pryskyřice je využíváno v některých metodách 3D tisku.).

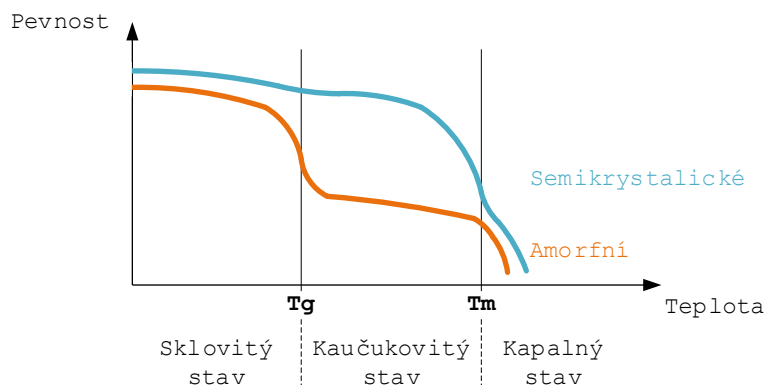
Vzhledem k zaměření práce má smysl uvažovat o výběru polymeru pro vstřikovací vložky pouze z termoplastů nebo reaktoplastů. Z tohoto důvodu byly v názvu práce uvedeny pouze plastové výrobky, nikoliv polymer.

2.2 Vlastnosti plastů

Po dřevu jsou polymery nejlehčím materiálem. Svým chemickým složením nedovolují vznik statické elektřiny a zároveň brání průchodu elektronů. Polymery nevedou elektrický proud, spíše jsou elektrickými izolanty. Složení polymerů také velice dobře odolává chemickým činidlům, agresivnímu prostředí atd. Pro zlepšení odolnosti je možné přimíchat různé přísady již při výrobě, tím je potom dodatečná povrchová ochrana ve většině případů zbytečná. Žádoucí je např. ochrana proti UV záření. Dopadající sluneční paprsky ultrafialového záření porušují vazbu mezi atomy v řetězci makromolekuly. Menší makromolekula snadněji reaguje s kyslíkem. Některé plasty do sebe snáze absorbují vlhkost. Zadržená vlhkost komplikuje např. zpracování, hmotnost plastu se zadrženou vlhkostí změní atd. [1].

Ve srovnání s kovy jsou plasty snáze zpracovatelné. Pro jejich tvarování stačí nižší teploty a síly. Při tváření plastů může docházet k většímu přemístění částic. Jejich výhodou oproti oceli je, že nekorodují, naopak v nevýhodou jsou mechanické vlastnosti. Polymery nedosahují takových mechanických hodnot jako oceli, např. modul pružnosti v tahu je u polymerů přibližně 100krát nižší než u oceli. Další nevýhodou je větší závislost na teplotě, čase a rychlosti zatěžování. Při použití plastu se doporučuje znát údaje ze zkoušky únavy, tečení (creep) a relaxace. Odolnost plastů proti dlouhodobému cyklickému namáhání je dobrá. Při tečení a relaxaci se zjišťuje závislost deformace na čase. Teplota při zkouškách je udržována konstantní a zpravidla je vyšší než pokojová. Při tečení je konstantní zatěžující síla a zjišťuje se nárůst deformace v čase. Při relaxaci se zjišťuje změna elastické deformace na plastickou v čase. V polymerech se vyskytuje jak Brownův pohyb, tak i makropohyb. Převládající pohyb rozhoduje o tom, jaké jsou základní vlastnosti plastu. Makropohyb způsobuje plasticitu a mikropohyb elasticitu. Plasty mají dobrou elasticitu. Délka makromolekul vede k jejich vzájemnému zaplétání do sebe a také vede k menší náchylnosti na šíření trhlin. Složení z řetězců také dobře pohlcuje a tlumí rázy.

Bude-li plastu dodáno velké množství tepelné energie, začínají se dávat do pohybu i makromolekuly, nastává makropohyb. Jednotlivé makromolekuly po sobě kloužou a plast se tak stává tvarovatelnějším. Nastává rozplétání zapletených makromolekulárních řetězců a snižuje se odpor plastu proti tečení, viskozita. Plast se začíná rozpouštět. Oproti látkám s kratšími řetězci se plasty hůře rozpouští. Čím hustější jsou příčné vazby, tím horší je rozpustnost a tavitelnost. Vysoká molekulová hmotnost polymerů způsobuje neobyčejně vysoký bod varu. Pro všechny polymery je teplota bodu varu nad teplotou rozkladu. Polymer nelze odpařit a jeho hoření je problematické. Z tohoto důvodu plynný stav polymeru neexistuje. Často je tato vlastnost využívána k samohašení, např. v elektronice. Polymer se může vyskytovat pouze ve stavu pevném a tekutém. Avšak chování polymeru oproti kovům bude v průběhu tání rozdílné. U kovů existuje mezi pevným a kapalným stavem ostřejší hranice. Polymery přecházejí z pevného stavu do kapalného postupně. Jak se skupenství plastu mění v závislosti na teplotě, je vidět na Obr. 4.



Obr. 4 – Závislost pevnosti plastů na teplotě

Stavy plastu v závislosti na teplotě jsou uvedeny na vodorovné ose grafu na Obr. 4. S rostoucí teplotou plast taje a přechází postupně z tuhého stavu do kapalného. Tuhý stav plastu je označován jako sklovitý, skelný stav. Ohříváním plastu na teplotu skelného přechodu (T_g) přechází plast do kaučukovitého stavu. Teplota skelného přechodu je často označována jako teplota zasklení. Do teploty skelného přechodu, v sklovitém stavu nejsou makromolekuly v pohybu, jsou zaskleny. Kaučukovitý stav plastu je na rozhraní stavu pevného a kapalného. Dalším zvyšováním teploty je dosažena teplota tání (T_m , melting point). Po překročení teploty tání plast roztaje do kapalného stavu.

1. Skelný stav

Ve skelném stavu se plast chová jako většina pevných látek. Oproti kovům mají plasty velmi malou oblast platnosti Hookova zákona. Rozsah teplot skelného stavu je od minusových teplot až do teploty skelného přechodu. Plast je ve skelném stavu křehký.

2. Kaučukovitý stav

Kaučukovitý stav je od teploty skelného přechodu až do teploty tání. Po překročení teploty skelného přechodu se plast stává snadněji deformovatelným. V kaučukovitém stavu je možné plast velmi dobře deformovat bez porušení. Pro elastomery je kaučukovitý stav typický. U elastomerů je téměř nulová plasticita a nelze je např. ohnout tak, aby v ohnutém (deformovaném) stavu zůstaly. Pro elastomery je výhodné snižovat teplotu skelného přechodu a tím zvětšovat teplotní rozsah použitelnosti. Téměř všechny elastomery mají teplotu skelného přechodu nižší, než je pokojová teplota. Kaučukovitý stav může i nemusí být přípustný, záleží na geometrii plastu. Oproti elastomerům není jejich struktura zesíťovaná. Řetězce makromolekul se mohou snadněji pohybovat v závislosti na teplotě. Tuhost plastu v kaučukovitém stavu je nižší než ve skelném stavu.

Teplota průhybu při zatížení

Vliv chování plastu za působení tepla dobře popisuje technologická zkouška Stanovení teploty průhybu při zatížení. Zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 75-1 obecná metoda zkoušení a část 2 je zaměřená na plasty. Zkratka zkoušky je podle anglického názvu Heat Deflection Temperature (HDT). Podstatou zkoušky je trojbodové konstantní zatížení plastového normalizovaného vzorku ponořeného do kapaliny, jíž se zvyšuje teplota přibližně rychlostí $2\text{ }^\circ\text{C}$ za minutu. Vlivem rostoucí teploty lázně dochází k průhybu vzorku, který je měřen. Zkouška začíná před zatížením zkušební vzorku, docílení počátečního průhybu na hodnotu napětí danou dle testovaného plastu při teplotě nejvýše $27\text{ }^\circ\text{C}$. Po 5 minutách následuje vynulování přístroje na měření průhybu. Následuje postupný ohřev lázně. Zkouška končí docílením smluvního průhybu. Při této hodnotě průhybu se odečte teplota lázně. Zkouška se provádí minimálně pro dva zkušební vzorky a výsledkem je aritmetický průměr naměřených hodnot. Výsledná hodnota se zaokrouhlí na nejbližší stupeň Celsia (celé číslo) [4], [5].

3. Kapalný stav

V kapalném stavu se polymer chová stejně jako většina ostatních látek. Po překročení teploty tání začíná rychle ztrácet svůj původní tvar a stává se z něj kapalina. Řetězce makromolekul se začínají velmi

volně pohybovat. Čím více je dodáváno teplo, tím více se molekuly pohybují. Pokud by bylo dodáno příliš tepla, mohlo by nastat přetrhání vazeb mezi řetězci, což by vedlo k degradaci materiálu.

V kapalném stavu je plast popsán následujícími veličinami:

Smykové napětí

Ideální kapalina neexistuje, proto ani proudění není rovnoměrné. Každá vrstva proudění (proudnice) má rozdílnou rychlost, sílu. Na rozhraní dvou proudnic je tření a vzniká zde smykové napětí. Velikost napětí je vyjádřena poměrem síly proudnice ke kontaktní ploše proudnic. Jednotkou je Pa (Pascal).

Smyková rychlost

Další důležitou veličinou je smyková rychlost, což je poměr rychlosti tečení ke vzdálenosti od stěny. Jednotkou je 1 sekunda. Čím menší je vzdálenost od stěny, tím větší je smyková rychlost. Pro zlepšení proudění je snaha snižovat smykovou rychlost. Proudí-li kapalina kanálkem, nejmenší smyková rychlost je uprostřed kanálku, v jádru, což také říká, že nejmenší odpor má kapalina uprostřed. Tento jev se nazývá fontánový tok. U plastů je důležitá kontrola smykové rychlosti s dovolenou rychlostí. Při tření vzniká teplo. Bude-li smyková rychlost vyšší než dovolená, hrozí spálení, degradace plastu.

Viskozita

Závislost mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí udává viskozita neboli vazkost, což je poměr smykového napětí ku smykové rychlosti. Jednotkou je Pa za sekundu. Udává odpor kapaliny proti tečení. Jedná se o konstantu naměřenou za určitých podmínek pro daný plast.

Podle viskozity se kapaliny rozdělují na newtonské a neneutonské. Skvělým příkladem newtonské kapaliny je voda, benzín atd. Závislost smykového napětí na smykové rychlosti je lineární. Naopak u neneutonské kapaliny je tato závislost nelineární. Většina polymerů se během tečení chová jako neneutonská kapalina – pseudoplastická, která je charakteristická tím, že menším nárůstem smykové rychlosti je vyvoláno větší smykové napětí. Viskozita klesá s rostoucí smykovou rychlostí. Podstatou je oslabení van der Waalových vazeb. Nesmí dojít k jejich přetrhání. Vzhledem k vysoké relativní atomové hmotnosti makromolekul a vysoké viskozitě je proudění plastů laminární. Viskozitu polymerů lze popsat, např. Arrheniovou rovnicí nebo WLC (Williams – Landel – Ferry) rovnicí.

Index toku taveniny

Další vypovídající hodnotou o plastu v tekutém stavu je index toku taveniny. Jedná se o technologickou zkoušku a veličinu. Zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 1133-1. Zjišťuje se rychlost, kterou polymer teče za definovaných geometrických a teplotních podmínek. Čas je dán 10 minutami. Podle toho, kolik hmoty nebo objemu proteče, se rozdělují následující hodnoty [4].

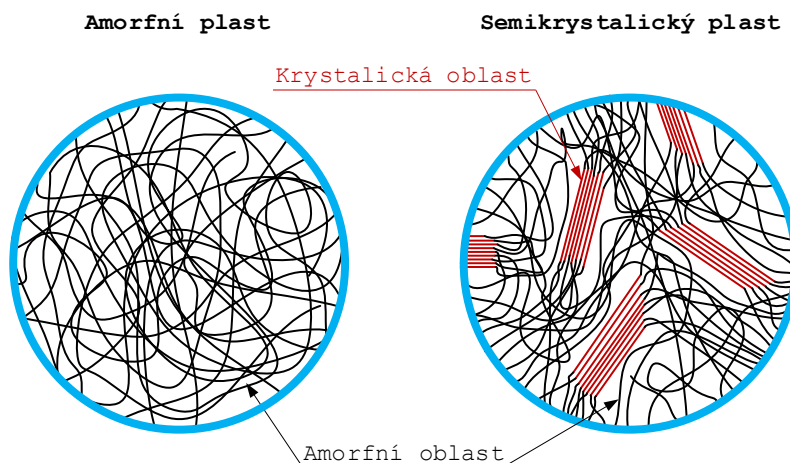
MFR melt mass-flow rate Hmotnostní index toku taveniny [g/10 min]

MVR melt volume-flow rate Objemový index toku taveniny [cm³/10 min]

Na vliv toku taveniny má vliv především viskozita. Čím je kapalina méně viskózní, klade menší odpor proti tečení, tím větší rychlostí proteče za definovaných podmínek a tím má větší index toku taveniny.

2.3 Rozdělení plastů podle pravidelnosti geometrie

Graf na Obr. 4 popisuje závislost pevnosti plastu na teplotě. S rostoucí teplotou plast taje a mění své skupenství. Kvůli velkým délkám makromolekul je tento přechod pomalejší než u kovů. Mění se teplota má vliv i na pevnost. S rostoucí teplotou pevnost plastu stejně jako většiny materiálů klesá. Úbytek pevnosti však není pro každý plast stejný. Rozdíl v chování způsobuje pravidelnost, uspořádání makromolekul. Vnitřní uspořádání ve struktuře rozděluje plasty na amorfní a semikrystalické. Zvětšený řez amorfním a semikrystalickým plastem je vidět na Obr. 5.



Obr. 5 – Orientace makromolekul v amorfním a semikrystalickém plastu

Zatímco amorfni plast na Obr. 5 vlevo má neuspořádanou geometrii, semikrystalicky plast ji má částečně uspořádanou. Tento rozdíl v geometrii má vliv na více vlastností, nejenom na pevnost.

Amorfni plasty

Amorfni struktura plastu má řetězce zcela nesrovnané a různě zamotané do sebe. Ve struktuře neexistuje žádná známka pravidelnosti geometrie. Jelikož struktura není krystalická, nemůžou v ní nastávat dislokace i jiné poruchy mřížky. Výhodou nekystalické struktury je její transparentnost. Světelný paprsek amorfními plasty prochází. Neexistuje žádná krystalická struktura, od které by se mohl paprsek odrážet.

Amorfni plasty jsou použitelné pouze ve sklovitém stavu, tzn. teploty nižší, než je skelný přechod. Nad teplotou skelného přechodu se začínají řetězce makromolekul pohybovat a hrozí jejich rozpletení. Amorfni plast pak rychle ztrácí vlastnosti mající ve sklovitém stavu. Příkladem je náhlý pokles pevnosti při teplotě skelného přechodu, viz graf na Obr. 4. Pokles vlastností je spojitý, probíhá v tzv. přechodovém stavu, tj. okolo teploty skelného přechodu. Tento stav je charakteristický tím, že malým dodáním teploty prudce klesají vlastnosti amorfního plastu. Snahou je zvětšovat teplotu skelného přechodu a tím posouvat teplotní rozsah použitelnosti amorfních plastů, které se používají pouze v dovoleném rozsahu teplot, ve kterém se vyznačují rozměrovou stálostí, tepelnou odolností atd.

Semikrystalické

Název semikrystalický je složený ze slov semi = částečně a krystalický. Plně vystihuje geometrické složení plastu. Semikrystalicky plast má část struktury krystalickou a zbytek amorfni. Plně krystalicky plast neexistuje. Velmi vysoká krystalicita plastů je přibližně při 60 % a zbytek plastu je tvořen amorfni geometrií. Krystalická oblast je tvořená makromolekulami, viz Obr. 5. Makromolekuly se skládají do lamel a k nim se připojují další, vzniká tak lokální destičkové uspořádání struktury.

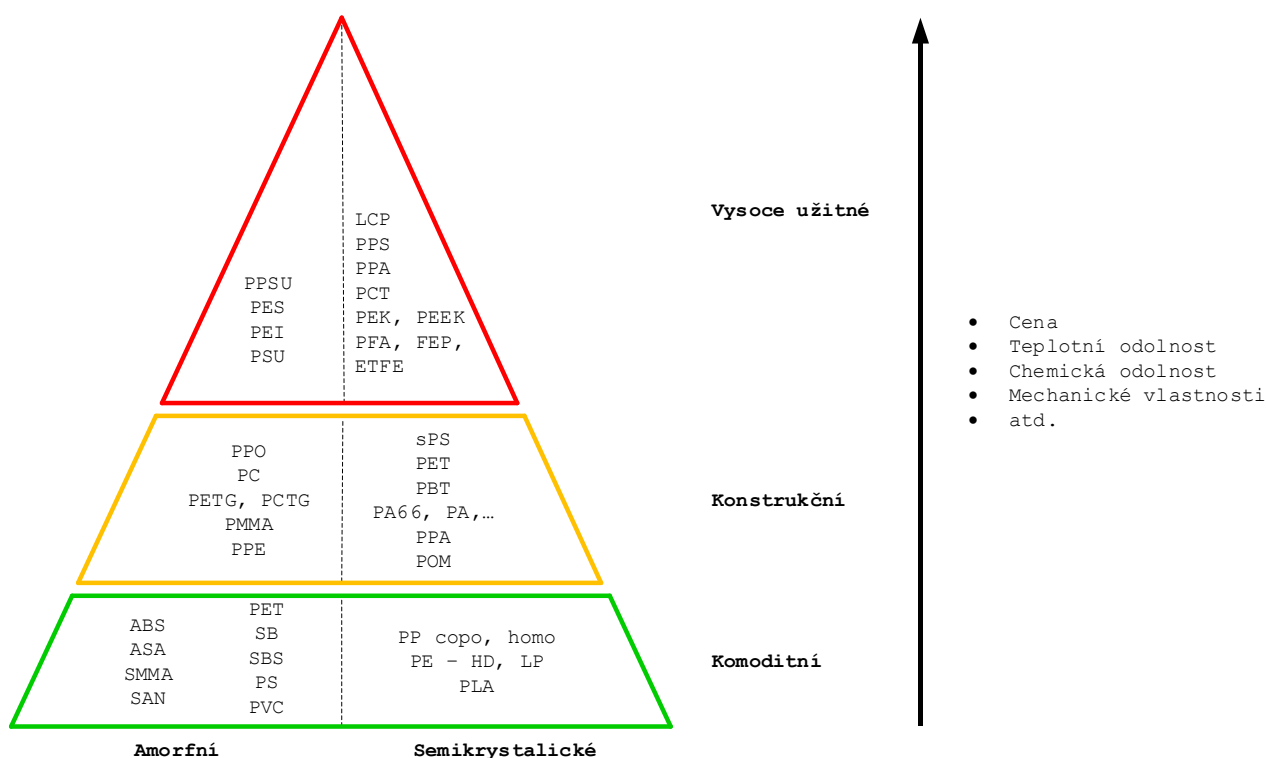
Svou částečnou krystalicitou se semikrystalické plasty podobají částečně kovům. Podíl krystalické struktury zlepšuje mechanické a dynamické vlastnosti. Semikrystalické plasty mají lepší otěruvzdornost, tvrdost atd. než amorfni plasty. Krystalická struktura umožňuje použití nad teplotu skelného přechodu, viz graf na Obr. 4. Také teplota skelného přechodu je u semikrystalického plastu zpravidla vyšší než u amorfního. Oproti kovům plně krystalické struktury začínají vlastnosti semikrystalických plastů klesat před bodem tání. Po překročení bodu tání stejně jako u amorfních materiálů prudce klesají všechny vlastnosti.

2.4 Druhy plastů

K rozdělení druhů plastů existuje několik kritérií. Základní rozdělení je na amorfni a semikrystalické. Pravidelnost geometrie zásadně rozlišuje vlastnosti jednotlivých druhů plastů. Zda bude pro vybranou aplikaci výrobku vhodnější amorfni nebo semikrystalicky plast, by se mělo rozhodovat v prvním kroku výběru. Např. transparentnost u amorfního plastu z komoditní skupiny vysoce užitečný semikrystalicky plast

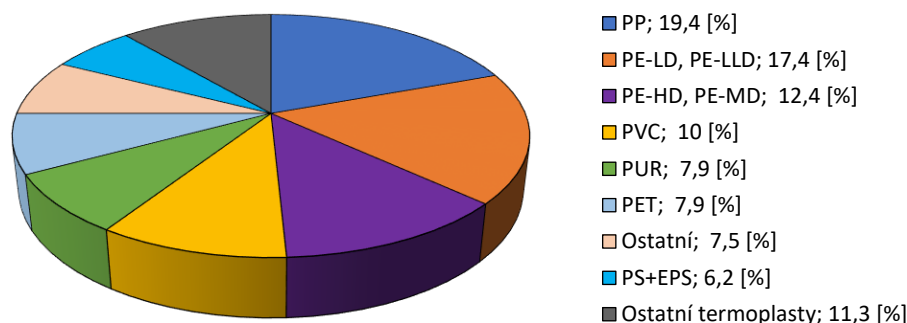
hůře nahradí. Totéž platí i obráceně, např. ořezuvzdornost u komoditního semikrystalického plastu bude velice draze nahrazena amorfním plastem z vyšších vrstev atd. Některé plasty však mohou být jak amorfní, tak semikrystalické. Rozdělení záleží na zpracování. Např. pro polyethylentereftalát (PET) je geometrie závislá na rychlosti chladnutí. Je tak možné vyrobit amorfni PET, který je průhledný. Typickým produktem jsou plastové lahve nebo je možné vyrobit semikrystalický PET, jenž je zakalený a jehož průhlednost závisí na velikosti krystalických částic.

Pro druhý krok rozhodování, jaký zvolit plast, je nápomocný Obr. 6, kde jsou druhy plastů uspořádány do pyramidy. Spodní část pyramidy tvoří nejlevnější druhy. Jejich vlastnosti oproti jiným skupinám jsou nejhorší. Zároveň jsou plasty ve spodní části pyramidy nejvíce vyráběné, proto jsou v pyramidě umístěné v nejširším místě. S těmito plasty se člověk může setkat téměř kdekoli, proto jsou označeny jako komoditní, průmyslové plasty. Lepší vlastnosti plastů ovšem za vyšší cenu nabízejí plasty v prostřední části pyramidy. Člověk se s nimi setká méně. Používají se pro konstrukce, od nichž se už vyžadují lepší vlastnosti. Podle použití se plasty z prostředku pyramidy nazývají konstrukční. Na úplném vrcholu pyramidy jsou plasty s nejlepšími vlastnostmi, jež jsou vysoce užité, proto jsou i tak označeny. Cena těchto plastů je velmi vysoká. Běžně se s nimi člověk setká nejméně. Jejich množství na trhu je kvůli vysoké ceně malé, což reprezentuje vrchol pyramidy. Zpracování vysoce užitečných plastů je nejdražší. Teplotní odolnost, zejména bod tání mají vysoký.



Obr. 6 – Rozdělení druhů plastů

Téměř polovinu vyráběných polymerů v EU tvoří semikrystalické komoditní plasty (PP a PE), o čemž svědčí graf poměrného zastoupení vyráběných druhů plastů v EU za rok 2019 na Obr. 7. Amorfni komoditní plasty (PVC a PET) tvoří přibližně 18 %. Sečtou-li se všechny druhy komoditních plastů, tvoří tak většinu vyrobených polymerů v EU. Z tohoto důvodu jsou v pyramidě na Obr. 6 v nejširší části.



Obr. 7 – Poměr vyráběných polymerů v EU za rok 2019 [2]

Nejvíce produkovaným polymerem je semikrystalický polypropylen (PP). Zpracování PP je poměrně snadné. Při vstřikování dovoluje vysokou smykovou rychlost. Výhody PP jsou vynikající chemická odolnost, nízká hustota, vysoká čistota, nízká absorpce vlhkosti atd. Nachází uplatnění nejčastěji v balení potravin, jako kryty, boxy, potrubí, automobilové díly atd. [2].

Konstrukční a užité plasty jsou v grafu na Obr. 7. zařazeny do skupiny Ostatní.

2.5 Modifikace základních plastů

Druh plastu v základním stavu má své vlastnosti dané složením a výrobou, které jsou pro něj charakteristické. Výhodou plastů je, že vlastnosti se dají upravovat již při výrobě a tím je možné je ovlivnit v celém průřezu, nikoliv jen na povrchu. Vybírat vhodný plast je možné buď ze základních druhů, nebo z tzv. modifikovaných plastů. Modifikace plastu spočívá ve zlepšení vybraných vlastností. Modifikovat plast je možné při výrobě dvěma způsoby, a to smícháním dvou plastů, tím vzniká směs, nebo přidáním přísad. Modifikací plastů existuje mnoho a neustále jsou vynalézány další. Z tohoto důvodu se začínají uplatňovat komerční názvy. Výsledkem modifikace je úprava výchozích vlastností plastu. Modifikovat lze buď všechny vlastnosti, nebo je možné se zaměřit na vybrané. Často se může stát, že vybrané vlastnosti budou důležitější než ostatní. Modifikací dojde ke zlepšení vybraných vlastností a zbývající budou horší. Možností, jak modifikovat základní plast, je mnoho. Vzniká tak velké množství modifikovaných plastů. Pro správný výběr plastu je důležité zohlednit všechny nabízené vlastnosti [5].

Hlavní výhodou modifikace je, že např. plast z komoditní úrovně v některých vlastnostech může dorovnat nebo i překonat plast z konstrukční úrovně. Komoditní úroveň je také charakterizovaná nižší cenou. Modifikovaný komoditní plast je pak více konkurence schopný.

A. Směsi (Blends)

Směsi neboli blends (z anglického blend = směs) vznikají smícháním více plastů. Rozhodující je poměrné zastoupení vstupních plastů. Lze tak kombinovat jednotlivé vlastnosti plastů a jejich výhody. Nedoporučuje se smíchání plastů, které mají stejné nevýhody, neboť směs tyto nevýhody zpravidla prohlubuje [5].

B. Přísady

Velmi často se modifikace provádí přidáním přísady k základnímu plastu. Příklad přísady je látka, která se přimíchá k základnímu plastu a ovlivní tak jeho výsledné vlastnosti. Podle toho, co přísady ovlivňují, se dělí na fyzikální a ochranné. Fyzikální přísady ovlivňují fyzikální vlastnosti plastu. Ochranné přísady mají za úkol plast ochránit proti vnějšímu působení. Příklad přísady může být mnoho, zde jsou uvedeny jen některé a je připojeno, jakou vlastnost ovlivňují.

Ochranné

Retardéry hoření – zpomalují hoření.

Stabilizátory – zvyšují odolnost plastu proti vysoké teplotě.

Fyzikální

- Pigmenty – barevnost plastu.
- Maziva – zlepšení tření. Mazivo je rozpustné v plastu a zlepšuje tvarovatelnost. Pokud by bylo mazivo nerozpustné v plastu, měl by plast dobré třecí vlastnosti pouze na povrchu.
- Nadouvadla – vznik plynů, které jsou utěsněny v plastu, výsledkem je lehčí hmotnost. Výroba EPS.
- Tvrdidla – způsobují vznik příčných vazeb.
- Změkčovadla – zlepšení houževnatosti. Snižují teplotu skelného přechodu a viskozitu. Pronikají do řetězce makromolekuly a rozdělují je.

Významnou přísadou jsou plniva. Vstupní plast pak tvoří pojivo, které má za úkol spojit plniva. Vzniklý plast je pak složen z plniva a pojiva. Často jsou plniva z jiného materiálu než z plastu. Vznikne tak nový materiál složený z více materiálů, kompozitní materiál, kompozit. Spíše než označení kompozit se používá např. PA 12 se skelnými vlákny atd. Výhodou kompozitního materiálu je kombinace rozdílných vlastností vstupních materiálů. Např. pokud bude-li plnivo magnetické, výsledný plast bude magnetický. Velikost magnetické síly bude záviset na množství plniva. Kromě množství plniva je důležitá i velikost a tvar částic plniva. Podle velikosti a tvaru jsou plniva v podobě prášku, malých částic a vláken.

- Prášek – Tvar částic velice malý ve tvaru prášku. Používá se vápenec, kaolín, grafit, křída, břidlice atd.
- Malé částice – Větší částice než prášek, např. v podobě kuliček. Používá se sklo, bronz, minerály atd.
- Vlákna – Větší částice než prášek protáhlejšího tvaru. Používá se sklo, uhlík, textil.

Čím větší je nepravidelnost geometrie plniva, tím více je důležité dodržet jejich správnou orientaci v plastu, zejména orientaci vláken tak, aby zatěžující síla působila v jejich podélném směru. Vlákna se orientují při výrobě, např. při vstřikování jsou vlákna orientována podélně s tokem.

2.6 Likvidace a recyklace plastů

Likvidace plastů znamená ukončení jejich existence např. buď spálením, nebo vrácením zpět do přírody. Oproti jiným látkám se plasty rozkládají velice špatně. Horší návrat zpět do přírody je zapříčiněn jejich chemickým složením. Vazby plastů jsou tvořeny prvky C, O, H atd., které se také vyskytují v přírodě. Délka molekul brání také v jejich rychlém rozkladu. Lépe se likvidují přírodní plasty než syntetické. Rozklad plastů trvá dlouho. Míst, kam umísťovat plasty, ubývá. Ukládány jsou nejen na zemském povrchu, ale i v oceánech, kde představují riziko kontaminace vody a ohrožení života mořských živočichů. Výzkum likvidace plastů přírodou se neustále vyvíjí. Vědci přicházejí neustále s novými možnostmi, ať už to je urychlení rozkladu, např. pomocí hmyzu, hub atd. Objem odpadu plastů pro likvidaci snižuje recyklace.

Slovo recyklace pochází z anglického „recycling“ a znamená znovunavrácení zpátky do oběhu. Pro recyklaci je potřeba napřed vyprodukovaný odpad roztřídit. Po oddělení polymerů od ostatních výrobků však třídění nekončí. Často jsou oddělovány pouze všechny polymerní materiály od ostatních. Z polymerů mohou být recyklovány pouze termoplasty. Další třídění je na termoplasty a ostatní polymery. I ze skupiny termoplastů jsou více či méně výhodné druhy k recyklaci. Dobře recyklovatelnými termoplasty jsou např. PP a PET. Z plastu PET jsou vyráběny plastové láhve a každý člověk má možnost jejich třídění. Tyto termoplasty lze recyklovat i několikrát. Recyklace ostatních termoplastů už nemusí být tolik výhodná. Často se stává, že cena recyklovaného plastu je vyšší než nového. Také vlastnosti recyklovaného plastu jsou oproti novému zpravidla horší [2].

Množství plastových výrobků se bude neustále zvyšovat. Možnosti jejich snížení představují likvidace nebo recyklace. V EU je vývoj plastů na vysoké úrovni, stejně tak i vývoj likvidace a recyklace. Části světa, kde není rozvoj plastů na podobné úrovni, je likvidace a recyklace mnohem horší. Plasty nejsou vhodně uloženy a recyklace je nižší. Vyprodukovaným množstvím plastového odpadu se tak ničí planeta.

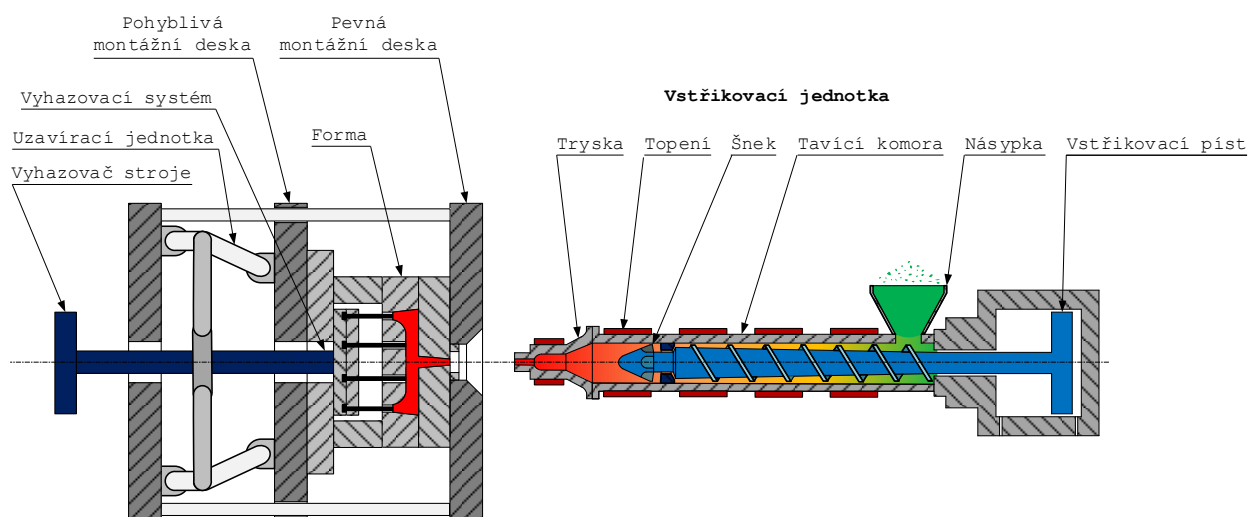
3 Vstřikování

Vstřikování je nejrozšířenější technologií výroby plastových výrobků. Zpracovává plasty tvářením v tepelně mechanickém procesu. Plast je za vysoké teploty, tlaku a rychlosti vstříknut do formy. Uvnitř vstřikovací formy ztuhne a po otevření formy je vyhozen hotový výrobek, vstřikovaný díl, výstřik. Vstřikují se především termoplasty, ale je možné zpracovávat i reaktoplasty nebo kaučuky. Při vstřikování reaktoplastů nebo kaučuků je polymer ve formě delší dobu. Více času vyžaduje zasilování makromolekul. Dále je k zasilování potřebný i větší ohřev formy, než je tomu při zpracování termoplastů. Oproti ostatním technologiím zpracovávajícím plasty mohou mít vstřikované díly složitější tvar. Tvar je podmíněn pouze správným zatečením, zchlazením a vyhozením z formy. Produktivita vstřikování je velmi vysoká. Operace na stroji je plně automatická. Vyjmutí hotového výrobku je možné buď ručně, nebo pomocí robotu. Zmiňovanou nevýhodou vstřikování je drahá výroba nástroje, vstřikovací formy. Dále je nutné počítat s delší dobou upevnění formy na stroj a přípravou pro automatický proces. Metoda vstřikování je zejména vhodná zejména pro sériovou a hromadnou výrobu [6] [7].

Vstřikování plastů se začalo vyvíjet koncem 19. století. První vstřikovací stroj byl vynalezen roku 1870 a sloužil pro výrobu držáků štětek na holení. Rozvoj vstřikování společně s rozvojem plastů začal narůstat po druhé světové válce. Tehdy se začaly nejen kovy nahrazovat plasty. Např. dánská firma LEGO nahrazuje v padesátých letech minulého století dřevěné hračky plastovými. Dále se pístové vstřikovací jednotky začínají nahrazovat šnekovými. Pro vstřikování plastů se začínají používat horké vtoky. Na konci 60. let byla zaváděna zpětná regulace. V 70. letech a dále se začíná při vstřikování využívat stále modernější řídicí technika, mikroprocesory atd. [8].

Princip vstřikování

Princip vstřikování je znázorněn na Obr. 8. Základními prvky vstřikování jsou stroj a forma. Stroj se zpravidla skládá ze vstřikovací a uzavírací jednotky, montážních desek, vyhazovače stroje, ovládání a řízení. Úkolem vstřikovací jednotky je připravit plast pro vstřikování. Uzavírací jednotka se stará o bezpečné zavření a otevření formy. Montážní desky slouží pro uchycení formy, někdy i pro upnutí robotu pro vyjímání vstřikovaných dílů. Řízení stroje je dnes již plně automatické a ovládání je snadné.



Obr. 8 – Princip vstřikování

Princip vstřikování znázorněný na Obr. 8 lze rozdělit na dvě strany. Vlevo je vstřikovací forma upevněná k montážním deskám stroje. Vyhazovací systém vstřikovací formy je spojen s vyhazovačem stroje. O uzavření formy se stará uzavírací jednotka. Vpravo je vstřikovací jednotka stroje.

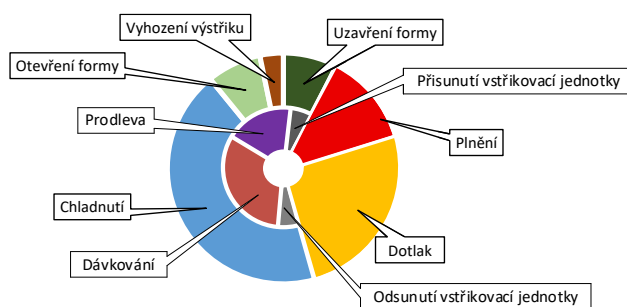
Do vstřikovací jednotky je plast dodáván nejčastěji ve formě granulátu. Je to možné i ve formě prášku, který je pro obsluhu stroje ze zdravotních důvodů horší. Některé plasty, které jsou nasávkové nebo navlhavé, je dobré před vstupem do vstřikovací jednotky vysušit. Tím se předejde uvolnění vlhkosti z plastu ve vstřikovací jednotce, takže bude lépe homogenizovaný, dokonale promíchaný, připravený pro vstřikování. Granulát se sype do násypky. Některé stroje mají sušení jako součást násypky. Násypkou

granulát padá až ke šneku, což je hřídel o různém průměru a šroubovici po obvodu. Průměr šneku se postupně zvětšuje, největší je u čela šneku. Mezery ve šroubovici nemusí mít stejnou vzdálenost. Konstrukcí šneku je několik v závislosti na vstřikovaném plastu. Zpravidla však platí, že šnek je vyroben univerzální a na stroji se často nemění. Čelo a šroubovice šneku je uvnitř tavicí komory. Jde o válec s konstantním vnitřním průměrem. Druhý konec šneku je spojen s motorem, který se stará o jeho otáčení. Šnek musí také zajišťovat posuv v podélném směru. Zde závisí na konstrukci a pohonu stroje. Na Obr. 8 je posuv šneku vyvozen hydraulicky, pístem. Otáčením šneku se plast spadlý z násypky dopravuje k trysce. Během otáčení šneku je plast ohříván a přeměňuje se v taveninu. Ohřev zajišťují topná tělesa, topení, umístěná kolem tavicí komory. Plast je mezi tavicí komorou a šnekem ohříván a otáčením šneku promíchán. Teplo plastu není předáváno pouze z topení, ale vzniká také při tření plastu o šroubovici šneku. Plast je tedy ohříván jak z topné komory, tak třením se šnekem. Smyslem ohřevu je plast zahřát nad teplotu tavení a roztavit jej. Zvětšujícím se průměrem šneku směrem k jeho čelu se prostor mezi šnekem a tavicí komorou zmenšuje. V tomto prostoru dochází k nejlepší homogenizaci plastu. Otáčením šneku je plast dopravován před jeho čelo až k trysce. Na konci šneku je posuvný uzávěr, znázorněn na Obr. 8 tmavě modrou barvou. Tento uzávěr zajišťuje průtok a uzavření šneku. Průtok plastu je možný, pokud je uzávěr v poloze blíže k čelu šneku. Plast teče skrze vnitřní kanálky pod uzávěrem. Pokud je uzávěr dále od čela, průtok plastu není možný. Přemístění uzávěru do správné polohy je řízeno pohybem šneku. Před dávkováním šnek vykonal pohyb zpět, tj. dál od trysky a tím posunul, otevřel uzávěr. Podle velikosti vstřikovaného objemu se nastaví vzdálenost čela šneku od trysky. Jakmile je naplněn objem mezi tryskou a čelem šneku, začne se šnek otáčet na druhou stranu. Kdyby se dále otáčel původním směrem (k čelu), plast by vytékal tryskou. Jakmile je plast připraven pro vstříknutí do formy, celá vstřikovací jednotka přijede ke vstřikovací formě. Při přijetí je nutné zajistit středění trysky s formou a dostatečnou přitlačovací sílu vstřikovací jednotkou, aby plast nemohl nikam unikat. Pohybem šneku vpřed opouští nadávkovaný plast vnitřním průměrem trysky vstřikovací jednotku, přičemž šnek vyvine dostatečně velkou sílu a rychlost. Tím je plast za vysoké teploty, tlaku a rychlosti vystříknut ze vstřikovací jednotky [9].

Levou stranu Obr. 8 principu vstřikování lze rozdělit na dvě části, pohyblivou a pevnou. Jak vstřikovací forma, tak stroj jsou rozděleny. Pevná část blíže ke vstřikovací jednotce se skládá z pevné části formy upnuté na pevnou montážní desku stroje. Po celou dobu vstřikování nevykonává pevná část pohyb. Naproti tomu pohyblivá část musí vykonávat takové pohyby, aby umožnila zavření a otevření formy. Na pohyblivou montážní desku se umísťuje pohyblivá část vstřikovací formy. Pro přesnější pohyb montážní desky vůči pevné jsou na stroji vodící sloupky. Součástí vstřikovací formy je také vyhazovací systém, který se musí spojit s vyhazovačem stroje. Uzavírací jednotka je umístěna za pohyblivou montážní deskou. Na Obr. 8 je použit kloubový uzavírací mechanismus.

3.1 Vstřikovací cyklus

Na výrobu velkého množství výrobků má značný vliv zejména čas výroby jednoho kusu. Např. stihnou-li se za 1 minutu vyrobit 4 kusy, nikoliv 3, vyrobí se jen za jednu hodinu o 60 kusů více. Pro větší produktivitu je snaha co nejvíce zkracovat výrobní čas. Na jedno vstříknutí je možné vstřikovat jeden nebo více výrobků. Vyrobí-li se na jedno vstříknutí více výrobků, jsou označovány jako sada. Vždy se maximálně využívá vstřikovací objem pro co nejvíce výrobků, protože snahou je mít co nejvíce výrobků v sadě. Pro vstříknutí jednoho výrobku nebo jedné sady je nutné provést více činností, fází. Sečtením času těchto činností se získá jeden vstřikovací cyklus, který se na stroji neustále opakuje. Po přípravě a upevnění formy se vstřikovací cyklus skládá z činností zobrazených na Obr. 9 [6].



Obr. 9 – Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus se skládá z činností, které vykonává vstřikovací jednotka (Obr. 9 vnitřní část grafu), a činností, které se uskutečňují ve formě Obr. 9 (vnější část grafu). Činnosti plnění a dotlak jsou společné, tedy je vstřikovací jednotka přisunuta k formě a vstřikovaný plast je v obou částech propojen. Činnosti vstřikovacího cyklu jsou na Obr. 9. zobrazeny poměrově podle toho, kolik vyžadují času. Nejdéle trvá fáze chlazení. I když je plast chlazen ihned od doby, kdy vstoupí do formy, tj. od plnění, přesto je potřeba ho zchladit na teplotu, která umožňuje jeho bezpečné vyjmutí z formy. Tento časový úsek by se mohl lépe místo chlazení nazývat dodatečné chlazení. Během vstřikovacího cyklu je plast doplňován a homogenizován pouze ve fázi dávkování. Během ostatních fází je otáčení šneku ve vstřikovací jednotce zastaveno. Začátek a konec vstřikovacího cyklu ve formě je často udáván mezi činnosti vyhození vstřiku a zavření formy. Po vyhození výstřiku vyhadzovače opět zajednou do své výchozí polohy. Na tento okamžik je forma otevřená stejně jako při spouštění cyklu. Potom následují již automatické činnosti nastavené v řízení stroje. Forma se uzavře, připraví pro vstřikování. Následně se k formě přiblíží vstřikovací jednotka. Během fází plnění a dotlaku je vstřikovací jednotkou dodáván plast. Po skončení dotlaku se vstřikovací jednotka odsune. Následuje doba chlazení plastu ve formě. Až plast ztuhne, otevře se forma a vyhadzovač vyhodí výstřik. Na plastový výrobek mají největší vliv činnosti plnění, dotlaku a chlazení.

Plnění

Při fázi plnění je vstřikovací forma téměř celá naplněna plastem. Během fáze plnění je důležité, aby se plast dostal do všech dutinek formy. Po naplnění formy nastává přepnutí na dotlak. Impuls pro přepnutí na dotlak je možné definovat více způsoby, např. naplní-li se vstřikovací forma z 98 %, dosáhne-li se určité hodnoty tlaku, času atd.

Dotlak (Doplnění)

Pro fázi dotlaku se na stroji definují jiné hodnoty než pro plnění. Po naplnění celé dutiny formy plastem dochází ke snížení vstřikovací rychlosti a nárůstu vstřikovacího tlaku. I přesto má smysl do dutiny neustále dodávat nový plast, protože je potřeba co možná nejvíce kompenzovat vliv smršťování plastu v dutině formy. Plast má tendenci v chladnější formě zmenšovat svůj objem. U stěn zchladne mnohem rychleji než v jádře, tím je jeho chlazení v dutině formy nerovnoměrné. Výsledkem je, že plast u stěn již zatuhne, ale v jádru je stále ještě tekutý. Právě tekuté jádro je využíváno při fázi dotlaku. Tekutým jádrem je možné dodávat nový plast a tím snižovat jeho smrštění. Dotlak má význam do té doby, než v nějakém místě zatuhne cesta, jíž je plast doplňován. Nejčastěji je tomu v místě s nejmenším průřezem. Pokud je forma správně navržena, mělo by zamrznutí v celém průřezu nastat ve vtokovém ústí, jehož velikost nemůže být příliš velká, protože zanechává viditelné stopy na výstřiku. Po zamrznutí vtokového ústí se nový plast do dutiny již nedostane a pokračovat v dotlaku nemá smysl. K určení doby dotlaku jsou nápomocné simulace vstřikování. Pokud by byl dotlak proveden nesprávně, nebo zcela vynechán, hrozí vstřikovanému dílu propadliny, bubliny, staženiny (lunkry) atd. Plast by se smrští, makromolekuly by se naorientovaly do poloh, které jsou pro ně co nejvíce výhodné atd. Po skončení dotlaku již není potřeba, aby vstřikovací jednotka byla přisunutá k formě, a odsune se [9].

Chlazení

Po skončení dotlaku je vstříknutý plast ještě ponechán ve formě, kde zchladne na výstřik. Plastu je teplo odebíráno zpravidla temperančním systémem formy, pokud je k dispozici. Teplotu pro vyhození z formy udává výrobce plastu. Fáze chlazení zabírá nejvíce času. Již při sériové výrobě představuje velký přínos zkracování této fáze. Ovšem pokud by byl plast vyhozen před dosažením doporučené teploty, hrozí stejný případ popsán při vynechání dotlaku. Předčasně vyhozenému výstřiku hrozí i uhnutí tvaru, neboť zchladne mimo stěny dutiny, které mu v takovém uhnutí brání. Pro semikrystalické materiály s rostoucí dobou chlazení roste i podíl krystalické fáze.

Po vyjmutí výstřiku se forma opět zavře a přijede k ní vstřikovací jednotka. Dál se celý vstřikovací cyklus opakuje.

3.2 Vstřikovací lis

Strojem pro vstřikování je vstřikovací lis, také označovaný jako vstřikolis. V dnešní době jsou stroje plně automatické s přehledným ovládáním. Nejvíce se vstřikolis odlišují velikostí vstřikovaného objemu. Při pořízení vstřikovacího lisu je důležité si stanovit, jak velká produktivita se od stroje očekává. Velké stroje s větším vstřikovaným objemem umožňují vstřikovat najednou více dílů. Naopak pro malý vstřikovaný objem jsou nevhodné. Plastu ve vstřikovací jednotce se vystříkne málo a zbývající plast vlivem ohřevu degraduje. Také pořizovací cena a provozní náklady jsou vyšší. V dnešní době je na trhu mnoho výrobců nabízejících různé velikosti vstřikolisů.

Podle provedení se rozlišují stroje s horizontální, vertikální, případně úhlovou polohou. Nejčastější provedení je horizontální, dobře přístupné. U vertikálního provedení je vstřikovací jednotka umístěna v horní části stroje. Vstřikovaný objem je malý, a proto je vertikální provedení typické pro malé vstřikolis.

Další rozdělení vstřikovacích lisů je podle druhu pohonu. Pohony jsou hydraulické a elektrické. Kombinací hydraulického a elektrického pohonu vznikne hybridní vstřikovací lis. První vstřikovací lisy měly všechny pohyby řešeny hydraulikou. Výhodou hydraulického pohonu je vyvození velké síly při malých zabíraných rozměrech. Z tohoto důvodu byl u některých strojů hydraulický pohon částečně zachován.

Elektrický pohon vstřikolisů obstarávají elektromotory, nejčastěji servomotory s dobrou účinností. Jejich nevýhodou je velikost síly, kterou jsou schopny vynaložit vůči zabíranému objemu. Pro použití elektrického pohonu pro uzavírací sílu formy je nutné stroj vybavit kloubovým mechanismem, který je zobrazen na Obr. 8. Elektromotory zajistí přiblížení montážních desek, zavření formy. Kloubový mechanismus se pak zaklíní a tím drží pohyblivou montážní desku v konstantní poloze. Výhodou kloubového mechanismu je, že po celou dobu, kdy zabraňuje otevření formy, není potřeba dodávat energii jako u hydromotoru. Hlavní výhodou elektrického pohonu oproti hydraulickému je jeho přesnost pohybu, např. při udržení konstantního zpětného tlaku ve vstřikovací jednotce. Šnek je spojen přes převodovku se servomotorem. Je-li vstřikovací jednotka vybavena senzory, které dávají zpětný impuls, servomotor zareaguje prakticky ihned. Oproti tomu změna objemu v hydraulickém oběhu je pomalejší.

Konstrukce hybridního pohonu vstřikovacího stroje vznikla za účelem spojit výhody z elektrického pohonu, servomotorů a hydraulického pohonu. U hybridního pohonu zajišťuje část pohybů hydraulika a zbytek servomotory, zpravidla je to za účelem cenové dostupnosti vstřikolisů. Nejčastěji hydraulika zajišťuje podélný pohyb šneku, může zajišťovat i pohyb vyhazovačů. Servomotory zajišťují otáčení šneku a spolu s kloubovým mechanismem uzavření formy.

Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka se stará o roztavení granulátu a homogenizaci plastu. Konstrukce vstřikovací jednotky může být výjimečně pístová, častěji šneková. První vstřikovací jednotky se skládaly z válce a pístu. Granulát byl umístěn do válce a ohříván, následně byl pístem tlačěn skrz trysku do formy. V dnešní době se již taková vstřikovací jednotka příliš nepoužívá. Avšak pro jednoduchost a levné provedení je možné se s ní setkat u levnějších vstřikolisů. Plast v této vstřikovací jednotce není dostatečně homogenizován, proto se více používají šnekové vstřikovací jednotky. Příprava dávky ve šneku je často označována jako „šnekování“. Vstřikovací jednotka se šnekem je zobrazena na Obr. 8 vpravo.

Velikost vstřikovaného objemu by měla být 10 % až 80 % objemu vstřikovací jednotky, kapacity. Neměla by překročit 90 % kapacity. Pro větší vstřikovaný objem hrozí horší homogenizace plastu. Menší vstřiknutý objem zase způsobuje degradaci materiálu ve vstřikovací jednotce.

Velikost trysky, vnitřní průměr ovlivňuje tlak a vstřikovací rychlost. Trysky na stroji se zpravidla příliš často nevyměňují. Při přisunutí vstřikovací jednotky k pevné části formy je zapotřebí provést středění trysky vůči pevné části formy. To se provádí pomocí sražení ve středícím kroužku, který je namontován na pevnou část formy. Zároveň je pomocí středícího kroužku je vystředěna pevná část formy vůči pevné montážní desce. Sražení ve středícím kroužku se vyrobí podle tvaru trysky stroje. Je možné se setkat i s tryskami se zarovnaným čelem. Kontakt je pomocí dvou rovnoběžných ploch čela trysky a formy.

Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka mění vzdálenost montážních desek a stará se o otevírání a zavírání vstříkovací formy. Při uzavření formy vyvozuje uzavírací jednotka sílu, která brání otevření formy. Maximální uzavírací síla je udávána výrobcem daného typu stroje. Největší otevírací síla je při fázi dotlaku. Při návrhu vstříkovací formy je důležité zkontrolovat, jestli není otevírací síla formy větší než uzavírací síla stroje. Doporučuje se, aby otevírací síla byla max. 90 % uzavírací síly stroje, tím do otevření formy zbývá ještě bezpečnostní rezerva. Pokud by tlak ve formě vyvolal větší sílu, než je uzavírací síla vstříkolisu, hrozí vytečení plastu do dělicí roviny. Otevření formy při dotlaku je charakteristické pro přetoky na výstřiku. Daleko závažnější je otevření formy při plnění. To může nastat, např. bude-li snaha vstříkovat větší objem, než pro jaký je vstříkovací forma navržena. Krátkých vstříkovacích časů je docíleno vysokou vstříkovací rychlostí. Hrozí tak únik rychle se pohybujícího plastu do okolí. Velikost otevírací síly lze stanovit buď pomocí simulace, nebo analyticky. U analytického výpočtu se vynásobí plocha v dělicí rovině zabíraná výstřikem se vstříkovaným tlakem.

Montážní desky

Montážní desky jsou na stroji dvě – pevná a pohyblivá, viz Obr. 8. Na montážní desky se upevňují pohyblivá a pevná část vstříkovací formy. Jedná se o rovné plochy s otvory se závitem pro uchycení formy. Při návrhu vstříkovací formy je důležité dodržet minimální výšku formy danou konstrukcí vstříkolisu.

Vyhazovač stroje

Je to část stroje, do které se upíná vyhazovací systém formy. Upnout vyhazovací systém formy lze např. pomocí tvarového čepu, závitu atd. Vyhazovač stroje vykonává přímočarý vratný pohyb. Délka jeho pohybu se nastavuje buď v ovládní stroje, nebo je daná koncovými dorazy. Pohyb vyhazovače je zpravidla při plném otevření vstříkolisu, tj. při max. vzdálenosti montážních desek od sebe.

Ovládání a řízení stroje

V dnešní době je řízení stroje plně automatické. Přehled nastavených a aktuálních hodnot bývá zobrazen na displeji. Vstříkolisy nabízejí možnost provádět buď jeden cyklus, nebo automatické cykly. Funkce zastavení po jednom cyklu je využívána zejména při odladění výroby.

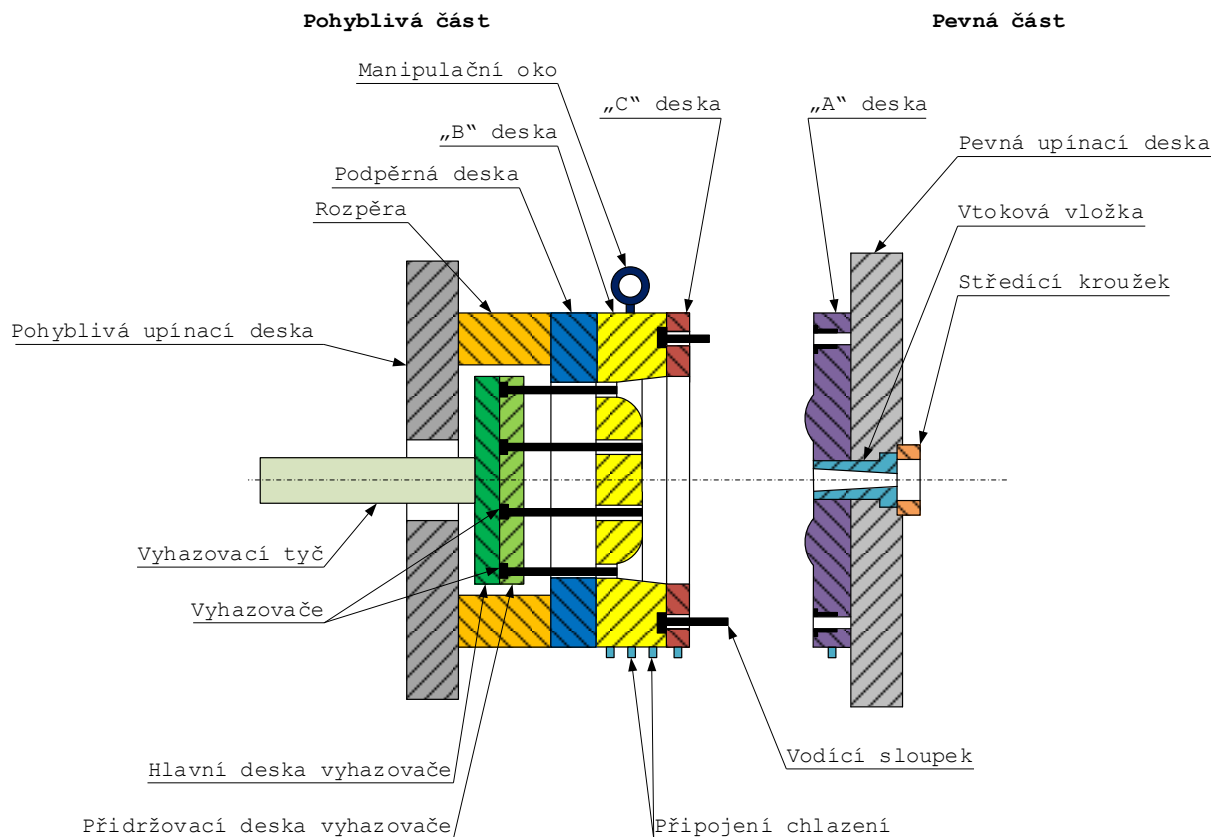
3.3 Vstříkovací forma

Pro vyrobení výrobku očekávaných vlastností je nutné správně navrhnout vstříkovací formu. Ke zvýšení produktivity je snaha na jedno vstříknutí do formy vyrobit co nejvíce výrobků. Velikost vstříkovacího objemu je závislá na možnostech vstříkovací jednotky a uzavírací síle vstříkolisu. Snaha je maximálně využívat možnosti vstříkolisu. Podle počtu dílů výrobků vstříknutých na jeden cyklus se označuje násobnost formy, jeden výstřik = jednonásobná forma, dva výstřiky = dvojnásobná forma atd. Čím vícenásobná je forma, tím větší je produktivita vstříkování. Naopak méně násobná forma je levnější na vyrobení, ale ve srovnání s vícenásobnou formou v sériové výrobě nenabízí takovou produktivitu, např. při srovnání čtyřnásobné formy s jednonásobnou. Vstříkovací cyklus bude pro obě formy stejný, jedna minuta. Čtyřnásobná forma vyprodukuje za hodinu o 180 kusů více.

Formu je nutné pro každý nový výrobek navrhnout znovu. Úspora při návrhu nové formy spočívá ve využití co nejvíce dílů z předchozí formy, tzn. nevyrábět formy jednoúčelové, ale co nejvíce univerzální. V současné době výrazně převyšuje počet univerzálních forem. Pro vstříkování nového výrobku na univerzální formě stačí zpravidla nechat vyrobit pouze tu část, která se změnila. Nejčastěji takovými díly formy jsou desky a vyhazovače. Díly forem jako např. vodicí sloupky, pouzdra, kroužky, vyhazovače atd. jsou buď normalizované, nebo vyráběné ve standardizovaných rozměrech. Jejich použití výrazně snižuje náklady.

Je možné se setkat s celou řadou variant konstrukcí vstříkovacích forem. Často se používá jednoduché rozložení formy podobné formě zobrazené na Obr. 10 – Dvoudesková vstříkovací forma. Jako každá forma, tak i dvoudeskové provedení se rozděluje na pevnou a pohyblivou část. Obě části formy se zpravidla k montážním deskám šroubují. Mezi pevnou a pohyblivou částí formy je dělicí rovina. Označení dvoudeskové provedení je proto, že do kontaktu s taveninou zpravidla přicházejí jen dvě desky [10].

Pevná část formy se skládá pouze z hlavní desky označené „A“ a pevné upínací desky. V kontaktu s taveninou je pouze hlavní deska „A“. Upínací desky se připevňují k montážním deskám stroje. Pro distribuci taveniny je použita vtoková vložka. O vystředění pevné části formy s pevnou montážní deskou stroje se stará středící kroužek [10].



Obr. 10 – Dvoudesková vstřikovací forma

Na pohyblivé straně přichází do kontaktu s taveninou také jen hlavní deska. Její zajímavostí na Obr. 10 je její rozdělení na dvě desky označené „B“ a „C“. Značení je od základny blíže k montážní desce. Důvodem rozdělení desky je ulehčení výroby. Je tak možné pro výrobu dutiny v „C“ desce použít např. drátořez, laser atd. a vypořadit „B“ deskou, která tvoří dno. Zároveň je rozdělení na dvě desky využito pro uložení vodících sloupků. Prostor pro vyhazovače je tvořen rozpěrami. Takto připravená část pohyblivé formy se přišroubuje k upínací desce. Poté je pohyblivá část připevněna k montážní desce. Před používáním vstřikovací formy je nutné provést vystředění obou částí forem. Středění spočívá v povolení šroubů spojujících pohyblivou část formy s montážní deskou. Následné vystředění je přes středící prvky a dotažení šroubů.

Vyhazovače jsou umístěny a schovány zpravidla v dírách se zahloubením v přidržovací desce, která se šroubuje k hlavní desce spojené s tyčí, jež je zakončena tvarem pro rychloupnutí do stroje. Napojení na temperanční (chladicí okruh) je přes přípojky, zobrazené na Obr. 10. Hmotnost částí forem může přesahovat 50 kg. Pro zvedání formy pomocí zvedacího zařízení jsou na formě našroubována manipulační oka [10].

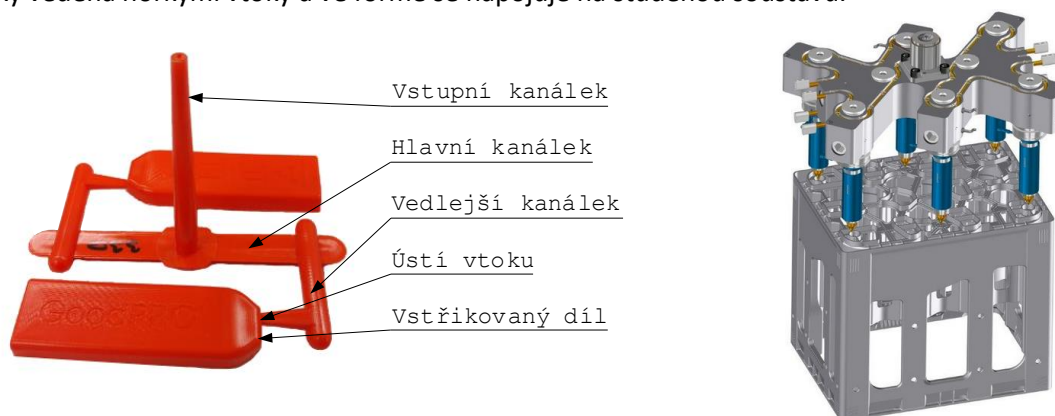
Při návrhu formy je zapotřebí postupovat s ohledem na možnosti vstřikovacího lisu a splnit požadavky zajišťující úspěšné vyrobení výstřiku. Podle základního seznamu požadavků je vstřikovací forma rozdělena na funkční a konstrukční část. Funkční části mají za úkol plnit požadavky uvedené v Tab. 1. Konstrukční částí je rám. V rámu jsou uloženy funkční části, kromě toho rám zajišťuje přenos sil.

Požadavek	Zajišťuje
<ul style="list-style-type: none"> • Rozvod taveniny ze vstřikovací jednotky do dutiny • Udělení tvaru výstřiku • Odvzdušnění dutiny • Zchladnutí výstřiku • Vyhození výstřiku z formy • Vedení a středění pohybujících se částí formy • Držet funkční části 	<ul style="list-style-type: none"> • Vtoková soustava • Kavita /dutina/ • Ventilační systém • Temperanční (chladicí) systém • Vyhazovací systém • Vedení a středění • Rám

Tab. 1 – Základní požadavky na vstřikovací formu

Vtoková soustava

Vtoková soustava je tvořena soustavou kanálků majících za úkol dopravit taveninu ze vstřikovací jednotky do dutiny formy. Nejčastější řešení vtokové soustavy je studené. Studená vtoková soustava nemá temperanční systém, který by po celou dobu distribuce taveninu ohříval. Na Obr. 10 je vidět použití studené vtokové soustavy umístěné ve formě a tvořené vtokovou vložkou. Pro studenou vtokovou soustavu je typické, že plast v kanálcích ztuhne spolu se vstřikovanými díly, jak je vidět na Obr. 11 vlevo. Vtoková soustava zajišťující ohřev taveniny se nazývá teplá či teplé vtoky. Teplé vtoky představují mezičlen mezi formou a vstřikovací jednotkou. Na Obr. 11 vpravo je vidět vstřikovaný díl spolu s teplými vtoky. Kombinovaný typ vtokové soustavy spojuje teplou soustavu se studenou. Tavenina je ze vstřikovací jednotky vedena horkými vtoky a ve formě se napojuje na studenou soustavu.



Obr. 11 – Výstřik se studenou vtokovou soustavou a výstřik s teplými vtoky [11]

Studená vtoková soustava

Výhodou studené vtokové soustavy je levnější provedení, protože není zapotřebí kupovat drahé teplé vtoky zobrazené na Obr. 11 vpravo nahoře, ačkoliv nákup teplých vtoků je pouze jednou. Kanálky studené vtokové soustavy je zapotřebí pro každou formu vyrábět znovu. Výjimkou je zpravidla jen vstupní kanálek, který je již vyrobený v nakupované vtokové vložce. Studená vtoková soustava je součástí formy. Vztahují se na ni konstrukční doporučení, např. měla by být symetrická, aby rovnoměrně namáhala formu atd. Z hlediska plnění by se průřez kanálků měl od trysky k dutině formy zmenšovat. Jelikož plast zatuhne ve studené vtokové soustavě, je následně pak potřeba soustavu od vstřikovaného dílu odstříhnout. Plast ztuhlý v kanálcích představuje bohužel odpad, proto by studená vtoková soustava měla být co nejkratší.

Kanálky studené vtokové soustavy jsou popsány na Obr. 11 vlevo. Velikost jednotlivých částí závisí na velikosti vstřikovaného dílu, plastu, rychlosti plnění atd. V pohyblivé části formy je zpravidla jen vstupní kanálek, případně i rozváděcí kanálky nebo jen jejich poloviny. Vstupní kanálek má tvar komolého kužele se zvětšujícím se průměrem od trysky. Tvar je přizpůsoben tak, aby po otevření formy výstřik a studená vtoková soustava nezástávaly na pevné části formy, ale na pohyblivé, kde mohou být vyhazovači vyhozeny.

Rozváděcí kanálky spojují vstupní kanálek s vtokem. Značit kanálky je možné více způsoby. Na Obr. 11 vlevo jsou dva rozváděcí kanálky značeny jako hlavní a vedlejší. Rozváděcí kanálek navazující na vstupní kanálek je označen jako hlavní. Pokud má studená soustava více kanálků, používá se číselné označení nebo označení kanálků jako primární, sekundární, terciární atd. Vždy na začátku značení je kanálek, který navazuje na vstupní kanálek. Napojení kanálků by mělo být provedeno tak, že následující kanálek není

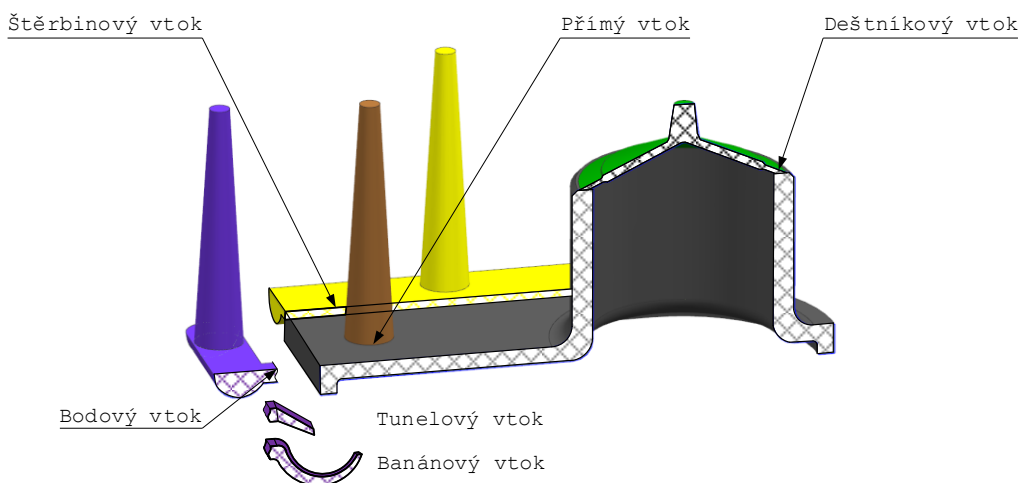
napojen v konci toho předchozího, ale je od konce vzdálen. Připravená vzdálenost od konce je připravena pro natečení čela taveniny. Taveniny protékající studenou formou mají na čele nižší teplotu než dále od čela. Proto je vhodné, aby studené čelo nateklo do připravené vzdálenosti. Do následujícího kanálku pak vstupuje teplejší tavenina. Nejčastější tvary kanálků jsou kruh, půlkruh, čtverec, obdélník atd. Výhodou nedělených kanálků, např. půlkruhového, je nenáchylnost na případné přesazení formy. Přesazení formy znamená posunutí částí forem v dělicí rovině, ke kterému může dojít špatným středěním forem.

Posledním členem studené vtokové soustavy je vtok, za nímž je dutina formy. Průřez vtoku, který je v kontaktu s dutinou, se nazývá vtokové ústí. Velikost průřezu ústí vtoku je ze všech částí soustavy nejmenší. Správně navržená velikost ústí je důležitá. Vtokové ústí musí zamrznout jako první, následně pak až vtok. Příliš velké ústí by šlo hůře od výstřiku odstříhnout a příliš malé by mohlo zamrznout dříve, než bude plast v dutině dotlačen. Na vliv velikosti vtokového ústí má především vliv vstříkovaný plast. Větší průřez ústí je pro semikrystalické než pro amorfní plasty. Velikost vtoku musí zohledňovat maximální dovolenou smykovou rychlost plastu atd. Malé díly se doporučuje vstříkovat jedním vtokem. Při vstříkování větších dílů by jeden vtok musel být příliš velký, proto se větší díly vstříkují více vtoky, např. díl plněný více vtoky zobrazený na Obr. 11 vpravo. Použitím více vtoků hrozí riziko vzniku studených spojů. Studený spoj vzniká na soutoku dvou a více čel tavenin. Nevýhodou přítomnosti studeného spoje je, že v něm má výstřik horší vlastnosti. Další nevýhodou je viditelná přítomnost studeného spoje na povrchu výstřiku. Existuje-li možnost vyhnout se studeným spojům, je lepší se jim vyhnout. Některé vstříkované díly mají takový tvar, že se bohužel neobejdou bez přítomnosti studených spojů. Pokud se studeným spojům nelze vyhnout, je dobré je umístit do míst výstřiku, která nebudou příliš zatěžována.

Vtok má na kvalitu vstříkovaného dílu zásadní vliv. Je potřeba nalézt správné umístění, zvolit správnou velikost, ale i správný tvar. Vtoků existuje mnoho, včetně možností jejich dělení. Podle kontaktu vtoku s dutinou formy se rozdělují:

- Bodové
 - Přímý vtok;
 - Dle tvaru vtokového ústí: kruhové, půlkruhové, čtvercové, obdélníkové atd.;
 - Dle polohy vůči dělicí rovině: podélné, kolmé, šikmé.
- Přímkové (Štěrbínové, Filmové)
- Kruhové
 - Deštníkové, prstencové, talířové.

Na Obr. 12 jsou zobrazeny vybrané vtoky. Šedě je zobrazen výstřik, jehož tvar je navržen tak, aby jej bylo možné vstříkovat bodovým, přímkovým nebo kruhovým vtokem. Bodové vtoky jsou zobrazeny fialovou a hnědou barvou. Přímkový vtok je zobrazen žlutě, kruhový vtok je zobrazen zeleně. [12]



Obr. 12 – Příklad vtokových ústí

Podle tvaru lze rozdělovat bodové vtoky na kruhové, půlkruhové, čtvercové, obdélníkové atd. Zvláštním bodovým vtokem je přímý vtok, zobrazený na Obr. 12 hnědě. Vtoková soustava je tvořena pouze vstupním vtokem. Tavenina je přímo vstříknuta přímo do dutiny formy s minimálními ztrátami při proudění

a množství plastu ztuhlého ve vtokové soustavě, odpad je minimální. Nevýhodou přímého vtoku je velké vtokové ústí, a sice zpravidla větší, než by bylo při použití ostatních druhů bodových vtoků.

Svým tvarem se odlišují od ostatních bodových vtoků tunelový a banánový vtok. Na Obr. 12 je bodový vtok přerušen řezem. Kdyby přerušen nebyl a vedl až k výstřiku, jednalo by se o bodový vtok obdélníkového průřezu. Bodový vtok je přerušen a je naznačeno napojení pro tunelový a banánový vtok. Tunelový vtok umožňuje plnění mimo dělicí rovinu. Také umožňuje plnit stěnu dutiny formy pod úhlem jiným než kolmým. Např. bude-li stěna dutiny formy skloněna vůči dělicí rovině, je možné se tunelovým vtokem více přiblížit k podélnému směru stěny, nebo naopak ke kolmému. Výroba tunelového vtoku je náročnější. Také při použití tunelového vtoku je nutné počítat s větší přidržovací silou. Banánový vtok je složitější než tunelový a má podobné nevýhody. Pro svou složitost se doporučuje koupit jako nakupovaný díl a připevnit k formě. Název vtoku je odvozen od jeho tvaru. Banánový vtok umožňuje plnit plnění dutiny formy kolmo k dělicí rovině. Pokud by vstřikovaný díl na Obr. 12 měl horní a boční strany pohledové, umístění vtoku do spodní části je ideální volbou. Zároveň tvar banánového vtoku umožňuje vést vtok pod stěnou dutiny formy. Další výhodou banánového vtoku je, že při vyhazování výstřiku z formy dojde k oddělení vtokové soustavy od výstřiku. Oproti ostatním výstřikům nemusí být vtoková soustava od výstřiku oddělována mimo vstřikovací lis.

Přímkový vtok je často označován jako šterbinový nebo filmový. Průřez ústí vtoku je v jednom směru výrazně delší než v ostatních. Při použití přímkového vtoku je nutné počítat s větší viditelnou stopou po vtoku.

Kruhové vtoky jsou vhodné pro plnění kruhových stěn. Jejich kontakt s dutinou formy je po obvodu kružnice. Mohou být umístěny jak na čelo kruhové plochy, tak buď z vnější, nebo vnitřní strany. Na Obr. 12 je zobrazen deštníkový vtok. Tavenina je vedena k ústí vtoku pod úhlem. Prstencový vtok je vhodný pro plnění z vnější strany. Po ztuhnutí připomíná vtok tvar prstenu. Opakem je talířový vtok vhodnější pro plnění zvnitřku strany. Výhodou kruhových vtoků je zamezení tvorby studených spojů, které by vznikly. Plnil by se díl více bodovými vtoky.

Teplá vtoková soustava (teplé vtoky)

Teplá vtoková soustava po celou dobu dodává plastu teplo a udržuje jej v tekutém stavu. Soustavu opouští pouze takové množství taveniny, které je nezbytné pro vstřikování dutiny formy. Teplá vtoková soustava představuje něco jako prodloužení vstřikovací jednotky. Stejně jako vstřikovací jednotka může i teplá vtoková soustava způsobit degradaci plastu, pokud mu dodává teplo příliš dlouho. Doporučuje se vždy po vstříknutí plastu do formy trochu plastu z teplé vtokové soustavy vystříknout naprázdno. Teplé vtokové soustavy se dělí na otevřené a uzavřené. Otevřená teplá vtoková soustava má otevřený konec vtoku. Tavenina může ústím vtoku vytékat. Vyhřívací část otevřené teplé vtokové soustavy není vždy až k ústí vtoku. Vždy je ponechána od ústí vtoku a vyhřívací části mezera, jež umožňuje malé zamrznutí taveniny v ústí vtoku, tím je tavenině zabráněno vytékat z vtoku. Ovšem ústí vtoku nesmí příliš zamrznout, jinak by hrozilo jeho ucpání. K tomuto účelu je vhodnější vnitřní vyhřívání než vnější. U vnitřního vyhřívání obtéká tavenina kolem vyhřívajícího členu, tzv. torpédové vnitřní těleso. Vnější ohřívání je vně kanálku, kterým protéká tavenina. Uzavřená teplá vtoková soustava má mechanicky uzavíratelné ústí vtoku. Otvírání vtoku je zpravidla řízené, což umožňuje řízené plnění více vtoky, tzv. kaskádové plnění. Impulsem pro otevření vtoku může být čas, objem, tlak atd. Cena teplé vtokové soustavy je mnohem vyšší než studené vtokové soustavy. Z teplých vtokových soustav je soustava uzavřená dražší než otevřená. Ovšem uzavřená vtoková soustava umožňuje kaskádové plnění a tím je možné docílit lepších vlastností při plnění více vtoky.

Nevýhodou teplé vtokové soustavy je vyšší teplota v ústí vtoku. Kdyby se použila teplá vtoková soustava pro vstřikování do plastové vložky, je nutné zajistit, aby nebyla v kontaktu s plastovou vložkou.

Kavita (dutina)

Důležitou částí vstřikovací formy je kavita. Kavita má negativní, opačný tvar, než je vstřikovaný díl, a objem zvětšený o hodnotu smrštění. Kvalita drsnosti povrchu kavity se promítne do kvality drsnosti výstřiku. Kavitu je možné vyrobit buď do desky, nebo do vložky. Z hlediska docílení lepších vlastností kavity,

úspory atd. je výhodnější vyrábět kavitu do vložky. Kavita může být vyrobená jak do pohyblivé, tak do pevné části formy. Podle umístění se kavita rozděluje na tvárník a tvárnici. Pokud je kavita vyrobena do pohyblivé části formy, jedná se o tvárník, a pokud do pevné části, jedná se o tvárnici.

Odvzdušnění formy

Dutina formy je před vstříkáním naplněna vzduchem. Jakmile je do ní vstříknut plast, čelo taveniny tlačí před sebou uvězněný vzduch, jenž začíná unikat mezerami ve formě. Nejvíce vzduchu uniká přes dělicí rovinu, dále pak vůlemi mezi vyhazovači a vedením. V některých případech tento prostor pro únik vzduchu stačí. Pokud ne, vzduch je zatlačen čelem taveniny až ke stěnám, kde jeho odpor výrazně naroste natolik, že nastává riziko nedotečení plastu až ke stěnám nebo tvorba vzduchových bublinek. Některé plasty mohou vytvářet zplodiny. Uvězněný vzduch a zplodiny při vysokém tlaku a teplotě mohou způsobit hoření plastu, tzv. Dieselův efekt. Výsledkem je pak opálená černá hrana na výstřiku.

Nejčastějším řešením odvzdušnění vstříkovací formy je vytvoření děr, jimiž vzduch uniká. Zároveň velikost otvoru nesmí být příliš velká, aby jimi neunikala tavenina. Velikost vůle závisí na viskozitě plastu, max. velikost by neměla přesahovat 0,3 mm.

Temperanční (chladicí) systém

Chladicí systém snižuje teplotu taveniny ve formě na teplotu, při které může být výstřik bezpečně vyhozen z formy. Úkolem temperančního systému je udržovat konstantní teplotu formy pro každý cyklus. Teplota vstříkovací formy je nižší než teplota vstříkovaného plastu, proto ve formě dojde ihned k ochlazení vstříknutého plastu. Správně zvolená teplota má vliv na vlastnosti, deformaci, smrštění atd. výstřiku. Temperanční systém se skládá ze systému kanálků, jimiž protéká chladicí médium – voda, olej, glykol atd. Nedoporučuje se dělat příliš složitý a dlouhý kanálek. Rozdíl teplot chladicího média mezi vstupem a výstupem do kanálku a z něj by neměla být větší než 5 °C.

Vyhazovací systém

Úkolem vyhazovacího systému je vyhození výstřiku z formy. Vyhazovací systém vstříkovací formy se připojuje přes rychlospojku k vyhazovači vstříkolisu. Vyhazovače jsou pak uloženy v přidržovací a hlavní desce. Konce vyhazovačů jsou jedinou částí z celého vyhazovacího systému, které jsou v kontaktu se vstříkovaným plastem. Je potřeba zajistit nejen správnou polohu vyhazovačů, ale i vyhazovače zkrátit na správnou délku. Příliš velká délka vyhazovačů by způsobila válcové díry ve výstřicích, naopak krátké vyhazovače by způsobily válcové výstupky. Konec vyhazovačů musí být ve stejné výšce, jako jsou konce stěn formy. Vyhazovačem jsou nejčastěji kolíky. Pokud by hrozilo propíchnutí výstřiku koncem vyhazovače, použije se stírací deska, kroužek atd. Od vyhazovačů je požadavek, aby zachytily při otevření formy výstřik v pohyblivé části. K tomu se na jednom či více vyhazovačích vyrobí podkos, zápich atd. Vstříkovaný plast zateče do připraveného prostoru a ten mu při otevření formy brání vypadnout z pohyblivé části. Až následný pohyb vyhazovačů vpřed vyhodí výstřik.

Vedení a středění

Každé vzájemně se pohybující části je potřeba vůči sobě vést. Před vedením je potřeba provést středění pomocí středících prvků. Veden je vyhazovací systém vstříkovací formy vůči její pohyblivé části. Středěná je pevná část vstříkovací formy vůči otvoru uprostřed pevné montážní desky stroje. Pohyblivá a pevná část vstříkovací formy jsou vůči sobě středěny. K vedení se nejčastěji používají vodící sloupek a pouzdro. Pro středění se používají kuželové sloupky a pouzdra. Zároveň jsou při montáži formy vzájemně se nepohybující části středěny, např. kolíky, lícovanými šrouby atd.

Rám

Rámem se rozumí vše, v čem jsou uloženy funkční části. Úkolem rámu je nést, vést a zajistit bezpečně a stabilní uložení funkčních částí. Rám je z hlediska velkých uzavíracích sil nejčastěji složen z desek.

4 3D tisk

Použití 3D tisku je relativně novou možností výroby plastových výrobků. 3D tištěné výrobky mají stále lepší vlastnosti a nacházejí tak i čím dál větší uplatnění. To je způsobeno výzkumem a rozvojem aditivní výroby, do které se řadí 3D tisk. Oproti výrobě tvářením nebo substantivním způsobem je aditivní způsob odlišný. Při aditivním způsobu výroby je výrobek „skládán“, tvořen postupným přidáváním materiálu. Slovo 3D tisk se skládá ze dvou slov. 3D znamenající trojdimenzionální prostor a slova tisk. V podstatě se jedná o poslední úroveň, kam tisk po staletí dospěl. Úkolem tisku je a bude ulehčit práci a zaznamenat nebo reprodukovat myšlenky. Od počátku lidstva byly záznamy vytesávané do kamene, dřeva a až po objevení papíru byly vázány do knih. Pokud někdo chtěl kopii knihy, musela být pracně přepsána, a to často mnichy v kláštorech. Takhle to fungovalo až do doby, než byl vynalezen knihtisk, tím cena knih klesla a zvětšila se jejich dostupnost. Postupem času se metody a kvalita tisku neustále zlepšovaly. Roku 1976 byl vynalezen inkoustový tisk, předchůdce dnešního 3D tisku a zároveň inspirace pro některé metody 3D tisku. V současné době jsou tiskárny na vysoké úrovni a tisknou za příznivou cenu. Pořád se ale jedná o 2D tisk, tj. tisk ve dvojdimenzionálním prostoru na papír [13].

Pokusy trojdimenzionálního tisku se začínají častěji objevovat koncem minulého století. Jisté pokusy byly zaznamenány již dříve, avšak nenašly příliš velké uplatnění. Podstatou 3D tisku je rozdělení 3D tištěného dílu na několik vrstev. Následně tisk probíhá vrstvou po vrstvě, kdy jednotlivé vrstvy jsou na sebe „skládány“, spojovány. Tento aditivní způsob výroby se označuje výroba „layer by layer“, lze přeložit jako „vrstva po vrstvě“. 2D tisk je výroba pouze jedné vrstvy, „skládáním“, spojováním, více vrstev na sebe je 2D tisk obohacen o další dimenzi a stává se 3D tiskem.

První metoda 3D tisku byla objevena roku 1983 a nazývá se stereolitografie (SLA) pracující na metodě fotopolymerizace. Podstatou metody je vytvrzování tenké nanesené vrstvy tekutého fotopolymeru UV zářením. Metodu vynalezl Charles W. Hull, který pracoval v nábytkářské firmě, která používala ultrafialové světlo k přichycení plastové dýhy ke dřevu. O rok později (1984) si vynálezce stereolitografie Charles W. Hull nechává metodu patentovat pod názvem „Apparatus for Production of Three Dimensional Objects by Stereolithography“. Roku 1986 Charles W. Hull zakládá firmu 3D Systems, která je v současné době jedním z významných prodejců 3D tiskáren. O rok později (1987) firma 3D Systems uvádí na trh své 3D tiskárny pod označením SLA-1. Ve stejném roce 1987 byla vynalezena Dr. Carl Deckard z univerzity v Texasu metoda Selective Laser Sintering (SLS) spékání práškové vrstvy. Ke spékání prášku byl použit laser. Roku 1988 vynalezl S. Scott Crump metodu Fused Deposition Modelling (FDM), přeloženo jako vytlačování materiálu. S. Scott Crump objevil FDM metodu, když chtěl pomocí lepicí pistole naplněné směsí polyethylenu a vosku své dceři vyrobit žabku. Následně se zabýval možností proces automatizovat. Roku 1989 je patentovaná metoda SLS objevená Dr. Carl Deckard, dále pak S. Scott Crump spolu s manželkou zakládají firmu Stratasys Ltd., který je v současné době jedním z významných prodejců 3D tiskáren. Roku 1992 byla metoda FDM a stejně tak i označení metody patentovány firmou Stratasys Ltd. Roku 1994 byla představena firmou Sanders Prototype, Inc., dneska Solidscape, Inc. prvně komerčně vyráběná 3D tiskárna na tryskání materiálů pod označením komerčně vyráběná 3D tiskárna na tryskání materiálů.

Po představení prvních metod 3D tisku následovalo jejich rychlé patentování, které metody chránilo. Výrobců majících možnost využívat patent moc nebylo, a proto jim bylo umožněno prodávat své 3D tiskárny za vyšší cenu. Tím nebyla nejen cena 3D tiskáren, ale i 3D výtisků nebyla právě cenově dostupná. S postupem času se doby chránění 3D tiskových metod patentem blížily ke konci. Toho si všiml Dr. Adrian Bowyer z anglické univerzity v Bath, který roku 2005 představil projekt RepRap. Zkratka projektu znamená „replicating rapid prototype“, který lze přeložit jako „schopné seberekopie a rychlé prototypování“. Hlavní myšlenka projektu spočívala v tom navrhnout takovou 3D tiskárnu, která ve své konstrukci využije co nejvíce dílů vyráběných na dřívě vyrobené 3D tiskárně. Cílem je vyrobit kompletně celou novou 3D tiskárnu na stávající 3D tiskárně. V současné době je cíl nereálný, především výroba elektrických součástí je problematická. Přední vlastností projektu RepRap je postavení na Open source, sdíleném know-how. Zapojit a využívat data, zpravidla z internetu, o 3D tisku může kdokoliv. Podmínkou je, že pokud se něco pomocí sdílených dat navrhne, mělo by se to také zveřejnit a být také k dispozici pro ostatní uživatele. Na základě sdíleného know-how stojí rovněž projekt Arduino zaměřený

na elektronickou výrobu prototypu. Řídicí jednotka Arduino je při návrhu nových 3D tiskáren velmi oblíbená. Pro některé aplikace bylo výhodnější používat Arduino než jiné komerční řešení a tím Arduino donutilo ostatní výrobce snížit cenu elektronických součástí. Stejnou sílu sdíleného know-how využívá projekt RepRap. Nejenže vývoj 3D tisku posouvá dopředu, ale donutil komerční výrobce 3D tiskáren snížit cenu. 3D tiskárnu je dnes možné pořídit za pár tisíc českých korun, jsou tak dostupné téměř každému. Za dobu existence projektu RepRap se do něj zapojilo spousta osob, skupin, ale i firem. Známa je česká firma Prusa Research s.r.o. založená roku 2012 Josefem Průšou. Firma nabízí 3D tiskárny buď ve složeném stavu, nebo ve formě stavebnice. Na webové stránce *prusa3d.com* je možné získat přístup k návodům, 3D modelům náhradních dílů, ale i nalézt spoustu zajímavých informací o 3D tisku. Podmínkou firmy je, aby jejich data nebyla prodávána a držela se pravidel projektu RepRap [14].

Roku 2009 zanikla patentová ochrana metody FDM vlastněná firmou Stratasys Ltd. S již běžícím projektem RepRap se metoda FDM stává velmi oblíbenou. V současné době je FDM nejvíce používanou metodou 3D tisku. I když firmě Stratasys zanikla patentová ochrana na používání metody, označení FDM je stále chráněna, proto vzniká druhé označení metody Fused Filament Fabrication (FFF).

Počet využívaných metod se ustálil, a proto roku 2015 vznikla mezinárodní norma definující 7 metod 3D tisku – ISO/ASTM 52900:2015: Additive manufacturing – General principles – Terminology. Do ČSN byla norma převzata roku 2017.

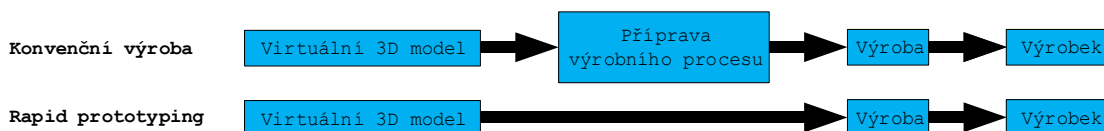
Budoucnost 3D tisku lze těžko předvídat. 3D tiskové metody se vyvíjí a neustále posouvají kvalitu 3D výtisků výše. 3D tisk nachází čím dál větší uplatnění. 3D tisk oproti 2D tisku je náročnější na provoz, jelikož je potřeba vykonat více činností. Není zatím možné stisknout tlačítko „tisknout“ a očekávat kvalitní výtisk. To omezuje možnost obsluhovat 3D tiskárnu stejným počtem lidí, kteří jsou schopni obsluhovat 2D tiskárnu. Podle náročnosti 3D tisku vznikají různá 3D tisková centra. Není tak zapotřebí posílat 3D výtisk, ale lze si ho nechat podle zasláných 3D výtisknout v nejbližším centru. Výhodou je úspora za náklady vynaložené na transport. Podobně je možnost 3D tisku na vesmírné lodi podle dat poslaných ze Země [15].

V této disertační práci je vybrána oblast použití 3D tisku pro výrobu vstříkovacích vložek. Jedná se o relativně novou možnost uplatnění 3D tisku. Na počátku jeho vývoje nedosahovaly 3D výtisky takové úrovně, aby jej bylo možné použít jako vstříkovací vložky. Snahou této práce je prozkoumání současných možností 3D tisku. Nicméně s rychlým vývojem, jakým 3D tisk postupuje, je možné, že za několik let mohou být poznatky uvedené v této práci již zastaralé a překonané.

4.1 Rapid prototyping

3D tisk má velice blízko k technologii Rapid prototyping. Název Rapid prototyping vychází z účelu použití technologie a v překladu znamená rychlé prototypování. Myšlenka této technologie spočívá v co nejrychlejší vytvoření výrobku. Výrobek je určen jako prototyp, na kterém následně probíhá testování za účelem ověření vlastností, nebo slouží k prezentaci. Rychlost sestavení prototypu je velmi žádaná zpravidla před spuštěním sériové výroby.

Podstata Rapid prototyping spočívá v rychlém vytvoření výrobku, prototypu. Stejně jako při výrobě konvenčními technologiemi je výchozím bodem sestavení virtuálního modelu. Tento výchozí bod je zobrazen na Obr. 13. Následně se technologie před odesláním do výroby liší. Pro výrobu konvenčním způsobem je zapotřebí vykonat několik činností – nakreslit a posoudit výkresovou dokumentaci, provést všechny činnosti potřebné pro spuštění výroby, např. vyrobit vstříkovací formu atd. Naopak podstatou Rapid prototyping je schopnost hned vyrábět, tzn. přeskočení přípravy výroby, jak je znázorněno na Obr. 13. Pro výrobu metodou Rapid prototyping je zapotřebí pouze virtuální 3D model. Ten nabízí hned několik výhod. Nejenže je možné ho využít pro Rapid prototyping, ale lze na něm provádět virtuální simulace a tak levně optimalizovat vlastnosti vyvíjeného výrobku ještě před vyrobením prototypu [15].



Obr. 13 – Porovnání Rapid prototyping s konvenční výrobou

Ideální stav Rapid prototyping je ve srovnání s konvenční technologií zobrazen na Obr. 13. Prozatím je tento stav nedosažitelný. Nejvíce se k němu blíží 3D tisk, avšak ani ten se v současné době bez přípravy výrobního procesu neobejde. Pro 3D tisk je zapotřebí připravit 3D tiskárnu a často i 3D výtisky opracovat.

4.2 Výrobní postup

Obecně se výrobní postup 3D tisku nezávislý na metodě a 3D tiskárně skládá z následujících kroků:


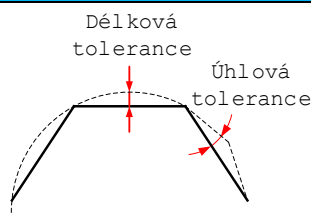


1. Model

Prvním krokem je vytvoření virtuálního 3D modelu pomocí některého ze široké nabídky dostupných CAD programů. Computer Aided Design (CAD) v překladu znamená počítačem podporované navrhování. Uživatel umožňuje jednoduše a přehledně vytvářet virtuální model bez nutnosti zabývat se jeho programováním. K definici geometrie modelu jsou používány různé nástroje. Výsledkem práce je virtuální 3D model, který prezentuje ideální tvar budoucího výrobku. Model bývá často použit jako podklad pro výkresovou dokumentaci, která není pro 3D tisk potřebná.

2. Model čitelný Slicery

Dalším krokem je export 3D modelu do formátu čitelným programem Slicer („kráječ“), který vytvoří rozdělení modelu na jednotlivé vrstvy („slices“). Export na požadovaný formát umožňuje většina CAD programů. Nejčastěji používaným formátem je STL, z anglického „Stereolitografie“, název je pojmenován pravděpodobně podle první metody 3D tisku. Formát STL definuje pouze povrch 3D tělesa. 3D model ve formátu STL se skládá z jednotlivých trojúhelníků. Údaj každého trojúhelníku je popsán polohou 3 bodů tvořících trojúhelník a normálou trojúhelníku. Normála rozlišuje, která plocha je vnitřní a která je vnější. Více údajů soubor STL nenabízí, chybí např. údaj o barvě jednotlivých částí, závitech atd. Výhodou je jednoduchá definice souboru pomocí textové i binární reprezentace [16].

STL model není tak přesný jako CAD model. Při převodu z CAD do STL modelu musí uživatel dobře zvážit velikost tolerancí. Zejména tolerance odchyly jsou pro tvar STL modelu zásadní. Doporučuje se používat nejmenší možnou toleranci, kterou CAD program umožňuje. Důvod je znázorněn v Tab. 2, kde je CAD model převeden do různých STL lišících se tolerancemi délky a úhlu.

CAD model	Nastavení exportu	STL model	
		Velká přesnost	Malá přesnost
 <p>Poloměr = 20 mm</p>	 <p>Délková tolerance Úhlová tolerance</p>	 <p>Tolerance odchyly 0,01 mm Úhlová tolerance 1°</p>	 <p>Tolerance odchyly 10 mm Úhlová tolerance 45°</p>

Tab. 2 – Převod CAD modelu do STL modelu

Pro velmi malé tolerance je STL model velice podobný CAD modelu. Naopak při použití velkých tolerancí vzniká nesmyslná geometrie, kterou vůbec nelze použít.

3. Vytvoření programu

Vytvořením programu se rozumí sestavení jednotlivých úkolů, které bude vykonávat 3D tiskárna. Standardem pro definování pohybů se stal G-kód neboli programování v ISO kódech. G-kód je programovací jazyk pro jakýkoliv CNC stroj. Jedná se o nejnižší úroveň, jakou může být CNC stroj naprogramován. Většina strojů má trochu pozměněný G-kód, takže programy se mohou lišit. Základní funkce však zůstávají společné. G-kód se skládá ze dvou hlavních příkazů, a to G příkazy a M příkazy. Příkazy G se programuje pohyb dráhy nástroje v kartézském souřadnicovém systému, poloha nástroje atd. Říkají, jaký ze základních pohybů se má provést, kam se má provést a jak se má provést. Příkazy M jsou odvozeny od anglického machine nebo motor. Jedná se o strojní funkce, např. spuštění motorů, chlazení, nastavení vyhřívání atd. Programování

v G-kódu je velmi náročné. Ruční programování pro 3D tisk se používá zcela výjimečně. Pro naprogramování 3D tiskárny se používají uživatelsky přívětivější prostředí Slicery, ve kterých se snáze pomocí nástrojů nastaví 3D tisk. Jak bude 3D model připraven pro 3D tisk, záleží na vybrané metodě 3D tisku. Metody 3D tisku se vzájemně odlišují a s nimi i naprogramování kódu. Nastavení 3D tisku zabere jistě nějaký čas, samotné generování programu („krájení“, „slicování“) je mnohdy otázkou několika sekund. Mezi nejčastěji používané Slicery patří: Cura, MatterControl 2.0, 3DPrinterOS, KISSlicer, Slic3r, SliceCrafter, IceSL, OctoPrint, Repetier-Host, AstroPrint atd. [17].

4. Příprava 3D tiskárny

Příprava 3D tiskárny je podobná přípravě jakéhokoliv výrobního stroje. Kromě kontroly stavu 3D tiskárny, připojení elektrického zdroje, dostatku materiálu atd. je často nutné provést i kalibraci 3D tiskárny. Kalibrace nemusí být prováděna před každým 3D tiskem. Výrobci 3D tiskáren tento interval předepisují nebo ho uživatel podle okolností sám provede. V některých případech je kalibrace prováděna po zjištění chyby z předchozího 3D tisku. Příprava 3D tiskárny bude záležet na zvolené metodě 3D tisku.

5. 3D tisk

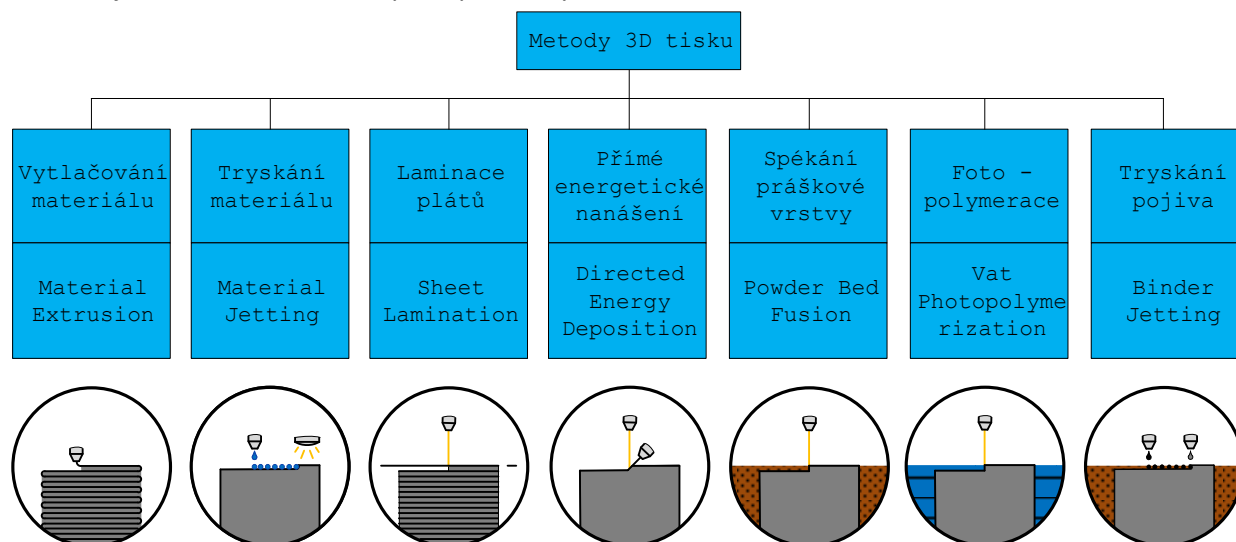
Samotný 3D tisk je převážně automatický proces, který může trvat několik minut či několik dní v závislosti na velikosti 3D modelu a výrobní rychlosti 3D tiskárny. Některé 3D tiskárny, zejména metody FFF, dovolují ruční zásah do procesu 3D tisku, např. pro změnu materiálu.

6. Postprocessing

Často je nutné 3D výtisk po tisku dodatečně opracovat a zkontrolovat. Opět zde to závisí na vybrané metodě 3D tisku. Např. pro metodu FFF to může být oříznutí podpor, očištění od lepidla. Pro metodu SLA je to nejčastěji vysušení a vytvrzení výtisku. U práškových metod je to pískování atd.

4.3 Metody 3D tisku

Převzatá mezinárodní norma ČSN EN ISO/ASTM 52900 rozlišuje celkem 7 metod 3D tisku podle tvorby a spojování vrstev. Velmi často je při označení metody preferován anglický název před českým. Anglické označení metody a jeho český překlad je zobrazen na Obr. 14. Dále je pod každou metodou zjednodušeně zobrazen princip metody [18].



Obr. 14 – Metody 3D tisku

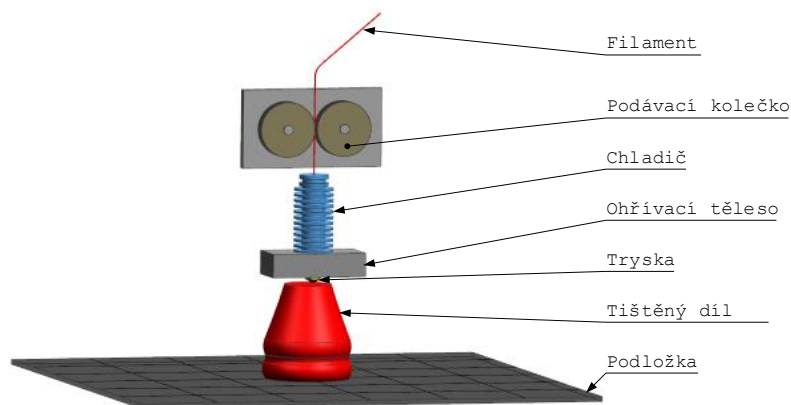
Rozdělovat metody 3D tisku je možno více způsoby. Lze je např. rozlišovat podle materiálu polotovaru na kovový, plastový, keramický atd. 3D tisk. Plastové polotovary je možné dělit na termoplasty a reaktoplasty. Reaktoplasty lze dále rozdělit na vytvrditelné působením světla, či nikoliv. Dále je možné rozdělovat 3D tisk podle stavu polotovaru, který může být v pevném, nebo kapalném skupenství. Pevný stav polotovaru se dále dělí podle tvaru na práškový, v podobě drátu, plátu atd. Další rozdělení 3D tisku může být podle způsobu spojování vrstev – lepením, teplem, UV zářením, laserem atd.

Vytlačování materiálu

FDM = Fused Deposition Modelling = Tavené depoziční modelování

FFF = Fused Filament Fabrication = Výroba z tavného filamentu

Metoda FFF se především zásluhou projektu RepRap stala nejrozšířenější metodou 3D tisku. FFF 3D tiskárna je jednoduchá na provoz a její konstrukce není složitá. S levnější dostupností jednotlivých komponentů, zejména krokových motorů, se stává stále dostupnější. FFF 3D tiskárnami se lze setkat jak v průmyslových podnicích, tak i v některých domácnostech. V České republice média propagují hodně FFF 3D tiskárny vyrobené firmou Prusa Research a.s., i když firma nabízí i 3D tiskárny využívající metodu fotopolymerizace. Tím si nesprávně spousta lidí pod pojmem 3D tisk představí jen FFF metodu. Princip metody je znázorněn na Obr. 15. Jak název napovídá, metoda je založena na vytlačování materiálu.



Obr. 15 – Vytlačování materiálu

Polotovarem je filament, či 3D tiskový drát, struna atd. o průměru zpravidla 1,75 až 3 mm, který je navinut na cívce. Podavačem je filament odvíjen z cívky a dopravován k vyhřívanému bloku, kde dojde k jeho natavení. Aby nebyla délka filamentu z hlediska dopravování příliš velká, je mezi vyhřívaným blokem a podavačem chladič. Filament opouští v tekutém stavu vyhřívanou trysku vnitřním průměrem, který mu dává tvar. Průměr trysky je od 0,2 až 1 mm, nejčastěji 0,4 mm. Jakmile natavený filament opouští trysku, je jeho rychlost chladnutí závislá na teplotě vnitřního prostoru 3D tiskárny. Tento prostor může být vyhříván, a pokud tak není, je teplota vnitřního prostoru závislá na vzdálenosti od podložky, která zpravidla vyhřívána je. Zmenšení teplotního rozdílu mezi tryskou a teplotou okolí a podložkou zmenšuje smrštění 3D tištěného dílu. Správné nanášení první vrstvy na podložku je ze všech vrstev nejdůležitější, neboť tvoří základ 3D výtisku. Roztavený plast má tendenci se při kontaktu se studenou podložkou kroutit a odlepovat. Tomu lze pomoci natřením povrchu podložky lepidlem. Možnost lepšího přichycení první vrstvy nabízejí Slicery ve vytvoření raftu nebo brimu. Po úspěšném nanášení první vrstvy jsou další vrstvy pokládány na předchozí. Pokládáním nataveného plastu se vytvářejí vlákna, což je souvisle nanášená délka nataveného plastu ve vrstvě. Pokud by 3D tištěný díl měl převislou část nebo by jeho náklon byl příliš velký a hrozilo by, že by následující nanášená vrstvy spadla, je nutné vytvoření podpor. Na nebezpečí spadnutí vrstvy některé Slicery upozorňují a nabízejí typ a množství podpor. U posledních vrstev je možné zvolit možnost žehlení, ironing, kdy rozehřátá tryska přejíždí nad 3D výtiskem a minimálně dodává další plast. Výsledkem je hladší povrch se zahlazenými detaily po 3D tisku. Další relativně nová možnost zlepšení povrchu 3D tištěného dílu, a to nejen poslední vrstvy, je použití Non planner 3D tisku. Všechny vrstvy jsou 3D tištěny s dostatečným odsazením jak ze stran, tak od horní plochy. Poslední nanášení je podél křivek dílu. Nanášení plastu je odspodu 3D tištěného dílu až k vrcholu. Výsledek je skrytí vrstev, které by byly vidět nanášením plastu po vrstvách v rovinách [13].

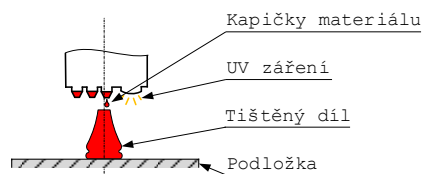
Při 3D tisku je důležitá vzdálenost nanášených vláken od sebe. Příliš velká vzdálenost může způsobit nedostatečné spojení vláken. Ve vzniklé mezeře je uložen vzduch, vzniká tak vzduchová mezera, bublina, která výrazně zhoršuje vlastnosti 3D výtisku. Naopak budou-li vlákna vedle sebe blízko, dojde k propojení molekul. 3D výtisk s propojenými vlákny pak bude mít mnohem lepší vlastnosti. Vlákna je důležité umísťovat v malé vzdálenosti od sebe ve vrstvě a jednotlivé vrstvy pak v malé vzdálenosti od sebe. Spojení vláken mezi vrstvami není tak velké jako spojení vláken ve vrstvě. Důvodem je, že spodní vrstvy mají nižší

teplotu než právě nanášená. Nanášená vrstva je nad teplotou tání a předchozí vrstva často pod teplotou tání. Vychladne-li předchozí vrstva pod teplotu skelného přechodu, vrstvy se nespojí, budou v povrchovém kontaktu. Zvýší-li se rychlost 3D tisku, zmenší se čas pro chladnutí předchozích vrstev. Vzniká však nebezpečí, že pokud nebude předchozí vrstva dostatečně ztuhlá a nanese-li se na ni nová, hrozí nebezpečí zhroucení 3D výtisku. Další vzduchové bubliny vznikají nesprávným vytvořením programu 3D tiskárny. Může být např. způsobeno špatně navrženou geometrií výrobku. Vytvořené trajektorie trysky nemohou dokonale vyplnit výrobek ve vrstvě, vznikají tak vzduchové bubliny. Nastane-li stejný problém ve více vrstvách, může být vzduchová mezera vysoká od spodní hrany k horní hraně 3D výtisku. Výsledkem jsou výrazně zhoršené vlastnosti 3D výtisku. 3D výtisk má ve směru vláken lepší vlastnosti, než pokud by zatížení bylo kolmo na vlákna, spojená vlákna. Doporučením je pokládat vlákna ve směru předpokládaného zatížení 3D výtisku, ve Sliceru naorientovat správně model. 3D výtisk se skládá ze skořepiny a výplně. Existuje mnoho druhů výplně a je možné zvolit rozdílnou hustotu výplně. Pokud není průběh zatížení znám, doporučuje se použít výplň schopnou přenášet zatížení ve všech směrech rovnoměrně. Pokud je průběh znám a vlákna jsou správně natočená, má 3D výtisk mnohem lepší vlastnosti.

Tryskání materiálu

MJ = Material Jetting = Tryskání materiálu

Princip metody je částečně podobný metodě FFF. Rozdíl je ve tvaru nataveného plastu, který opouští trysku. V metodě FFF je natavený plast pokládán ve vlákních. U MJ metody opouští trysku pouze kapičky nataveného plastu. Tento princip je velice podobný 2D inkoustovému tisku. Dopadající kapičky vytvářejí 3D tištěný díl, jak je znázorněno na Obr. 16.



Obr. 16 – Tryskání materiálu

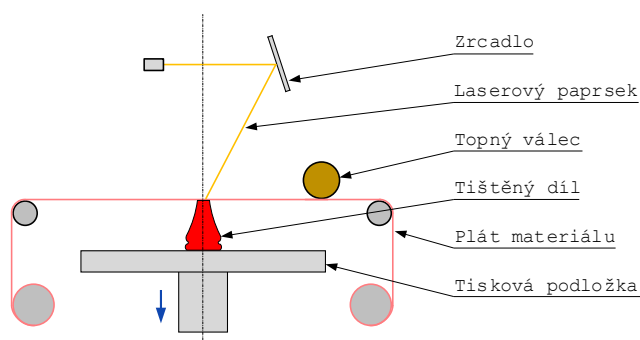
Polotovar je v kapalné formě umístěn v náplních a je dopravován k trysce. Zpravidla 3D tisková hlava obsahuje více trysek pro zvýšení produktivity 3D tisku. Nanesená vrstva kapičky plastu je velmi malá, zpravidla menší než 0,05 mm. Jedná se o nejpřesnější metodu 3D tisku. Jsou dvě možnosti nanášení materiálu, a to buď kontinuálně, nebo řízeně. Kontinuálně znamená, že z trysky neustále teče materiál. Řízené opouštění trysky má zkratku DoD a znamená Drop On Demand, což lze přeložit jako „kapička na vyžádání“. Systémem je přesně řízeno a sledováno, kdy má kapička opustit trysku. Kapičky jsou nanášeny pouze na průřez 3D výtisku ve vrstvě. Tvoří-li 3D výtisk převis, je potřeba vytisknout podpory, stejně jako u metody FFF. Oproti metodě FFF nelze použít mřížkovou strukturu, ale podpora musí být plná. Tím narůstá cena podpor i 3D tisku. 3D tisková hlava však může mít dva typy trysek. První je tryska, kterou protéká hlavní materiál 3D tištěného dílu, a druhou protéká podpurný materiál, jenž nemusí mít tak dobré vlastnosti. Typickým tvarem podpor jsou koule. Nanesené kapičky je potřeba vytvrdit. K tomu se používá UV záření umístěné na 3D tiskové hlavě, jež je zobrazena na Obr. 16. Napřed jsou nanášeny kapičky materiálu a následně hned potom jsou vytvrzovány působením UV záření. Pokud by nebyla předchozí vrstva vytvrzena, nelze na ni nanášet další vrstvu. Je žádoucí, aby byl materiál vytvrditelný UV zářením. První pokusy 3D tisku byly s voskem. Nanesené kapičky byly následně vytvrzovány a ochlazovány. Následně byly testovány další materiály a sestavovány požadavky na materiál. Pro nanesení pouze malé kapičky je žádoucí, aby materiál měl dobrou viskozitu. Protikladný požadavek je větší relativní molekulová hmotnost. Tyto vlastnosti dobře spojují plasty. Dobře vytvrditelná UV zářením je také pryskyřice. Dnes se 3D tiskne nejčastěji z reaktoplastů a nejčastěji na bázi pryskyřice. Označení polymeru vytvrditelného světlem je pak fotopolymer. Je však možné použít i MJ 3D tiskárny tisknouce z keramiky, hliníku, kovu atd. MJ 3D výtisky z kovů nacházejí uplatnění zejména v elektronice pro 3D tisk různých destiček atd. Nejrozšířenějším materiálem je však reaktoplast. MJ 3D výtisky z reaktoplastu jsou nejen velmi přesné, ale mají i velmi hladký povrch. Po odstranění podpor, pokud 3D výtisk vyžaduje, už nemusí být MJ 3D výtisky dále upravovány. Nevýhodou použití reaktoplastu vytvrditelného UV zářením je jeho teplotní rozsah použití. MJ 3D výtisky nesmějí být vystaveny velkým teplotám. Dále mají horší mechanické vlastnosti a jsou křehké. Často jsou

MJ 3D výtisky používány jako ukázkové předměty. Vzhledem k velkému množství různě barevných náplní je možné vytisknout plně nabarvený MJ 3D výtisk, který nemusí být dále barven. I když je MJ metoda při použití více trysek velmi rychlá, cena náplní prodraňuje 3D tisk. Také po otevření náplně není životnost příliš dlouhá. Mezi nejznámější výrobce MJ 3D tiskáren určující další vývoj patří Solidscape, Inc., 3D Systems, Inc. a Stratasys Ltd. Někteří výrobci místo označení MJ používají svá vlastní označení. Pod svým označením metodu MJ nezávisle vyvíjí 3D Systems, Inc., který používá označení MultiJet a Stratasys Ltd., který používá označení PolyJet. Například jeden z rozdílů je v přístupu tvorby podpor. PolyJet vyrábí podpory z rozpustného plastu. Po 3D vytisknutí se většina podpor odstraní tlakem vody a v chemickém roztoku je odstraněn zbytek. MultiJet jsou podpory vyráběny parafínovým voskem, který je pak roztaven v peci. Výzkum MJ metody se ubírá převážně k neustálému zmenšování velikosti kapiček až k nano rozměrům, Nano Particular Jetting. Výsledkem je pak ještě větší homogenita struktury MJ 3D výtisku [13], [15].

Laminace plátů

LOM = Laminated Object Manufacturing = Výroba laminovaných předmětů

Ačkoliv metoda LOM byla prvně komerčně známá roku 1991, pokusy 3D tisku spojovat pláty byly zaznamenány již dříve, např. pro tvorbu 3D map, kdy výška vrstevnice představovala jednu vrstvu. Použitým materiálem byl papír, dřevo, plast atd. Na stejném principu pracují i dnešní LOM metody 3D tisku s tím rozdílem, že místo vrstevnice se používá označení vrstva. Jednotlivé vrstvy vznikají vyřezáním průřezu 3D tištěného dílu do plátu a spojováním vrstev vzniká 3D výtisk. Princip metody LOM je znázorněn na Obr. 17.



Obr. 17 – Laminace plátů – metoda LOM

V metodě LOM je polotovar ve tvaru fólie navinut na válec. Z jedné strany je folie natřená lepidlem, aktivující se teplem. Přes sadu válců je folie natažena nad 3D tištěný díl. Natřená strana folie směřuje k tištěnému dílu. Přes nanosenou vrstvu přejede topný válec a teplem aktivuje lepidlo. Zároveň tlakem přimáčkne vrstvu k 3D tištěnému dílu. Nová vrstva je spojena s předchozí a připravená pro řezání průřezu dílu ve vrstvě. V první komerční LOM metodě byl k řezání použit CO₂ laser a polotovarem byl papír. Řez do folie nesmí být hlubší, než je výška vrstvy, aby nedošlo k poškození již vytištěného dílu. Po vyříznutí vrstvy se podložka posune směrem dolů, směr modré šipky, viz Obr. 17, o výšku vrstvy. Dále pak sada válců opět natáhne nad 3D výtisk fólii a 3D tisk se opakuje. Fólie, do které byl vyříznut průřez, je navíjena na válec. Vždy je průřez 3D výtisku vyřezáván tak, aby zbytek fólie mohl být navinut na válec. Nesmí se stát, aby průřez 3D tištěného dílu byl stejně široký, jako je šířka fólie, a aby folii rozřízнул. Folie s vyříznutým průřezem 3D výtisku představuje odpad [15].

Postup metody LOM znamená napřed spojit vrstvu a pak vyřezat průřez 3D výtisku ve vrstvě, fólii. Označení postupu je Bond – Then – Form. Je však možné postupovat obráceně. Napřed může být vyřezán průřez 3D výtisku ve fólii a dál je přilepen pouze vyříznutý tvar. Označené opačného postupu je Form – Then – Bond. Při druhém postupu je však nutné zajistit, aby se rozřezaný průřez 3D výrobku nerozpadl. Zpravidla je nanášen rozřezaný průřez pomocí podložky. Při nesprávném napojení průřezů hrozí výroba zmetku. Tento postup není vhodný pro velké a složité 3D výtisky. Výhodou obráceného postupu je, že spojovány budou pouze vrstvy tvořící 3D výtisk. Lze tak použít metody spojení vrstev, které by jinak bránily odvinutí zbytku fólie na válec, např. tepla. Obrácený postup lze také aplikovat stylem jako všechny vrstvy nařezat, poskládat a pak až všechny najednou spojit [15].

Materiálů tvořících vrstvy, pláty může být několik. V podstatě každý materiál může být spojován. Papír byl první používaný plát. Dnes jsou na trhu dostupné 3D tiskárny tisknouce z běžného A4 papíru. Dále se používá plast, nejčastěji PVC desky, dřevo, hliník, keramika, kov atd.

Vybraný materiál je možné řezat a vytvářet jednotlivé průřezy 3D výtisku různými způsoby. Kromě laseru je možné použít nůžky, drátořez, pilu, frézu atd.

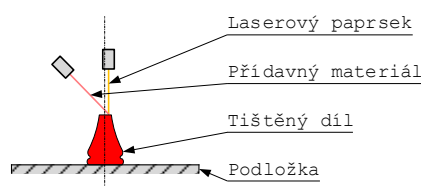
Podle vybraného materiálu se kromě různých metod řezání může zvolit několik metod spojování vrstev. Nejčastěji je materiál 3D výtisku z jedné strany natřený plastovým lepidlem. Spojovat vrstvy je možné tlakem, ohřevem a působením silou. Dále je možné vrstvy svařovat, ultrasonicky svařovat atd. Svařování je vhodné převážně pro kovové materiály. Možností je spojit všechny vrstvy najednou spojovacím elementem atd. [15].

Možností, jak 3D tisknout metodou spojování plátu, vrstev je několik. 3D výtisk skládaný ze spojovaných celých vrstev je převážně náchylný na kvalitu spojení. Častou chybou je nedostatečné nespojení vrstev. Aby se do 3D výtisku nedostávala vlhkost, je potřeba 3D výtisk povrchově upravit.

Přímé energetické nanášení

DED = Direct Energy Deposition

Proces přímého energetického nanášení spočívá v roztavení přídavného materiálu a nanášením se tvoří 3D výtisk. Ačkoliv je tato metoda vyvinutá pro všechny druhy materiálů, komerční uplatnění nachází zpravidla jen kovy, méně častěji keramika. Princip metody je podobný svařování elektrodou. Doslova se jedná o navařování přídavného materiálu. Princip metody je znázorněn na Obr. 18.



Obr. 18 – Přímé energetické nanášení

Polotovar je buď ve formě drátu dopravován, nebo ve formě prášku přisypáván na místo, kde má být na 3D výtisku přidán. Působením tepelné energie je pak přivářen k 3D výtisku. Zdrojem tepelné energie je nejčastěji laser, elektronový paprsek, plazma atd. Pro plasty energeticky vystačí laser. Při tisknutí kovového DED 3D výtisku je podobně jako při svařování chránit natavenou oblast v ochranném plynu. Při DED je materiál přidáván a hned spojen, proto metoda nepotřebuje podpory. DED je vhodný zejména na opravy poškozených výrobků. Pro 3D tisk celého výrobku je DED metoda velice pomalá a pro velké výrobky se zpravidla nepoužívá. Působení lokálního tepelného zdroje zanechává hrubý povrch a přesnost výrobku je stěží menší než 0,2 mm. Podstatnou nevýhodou je velké smrštění DED 3D výtisku. To je způsobeno lokálním natavením materiálu a rychlým zchladnutím. Podobně jako svařování pod tavidlem chrání svar, který pod ním pomalu chladne, přisypání prášku částečně zpomaluje chladnutí a brání přístupu vzduchu. Lépe je práškem chráněno natavené místo u metody PBF, kde dochází k pomalejšímu chladnutí [15].

Spékání práškové vrstvy

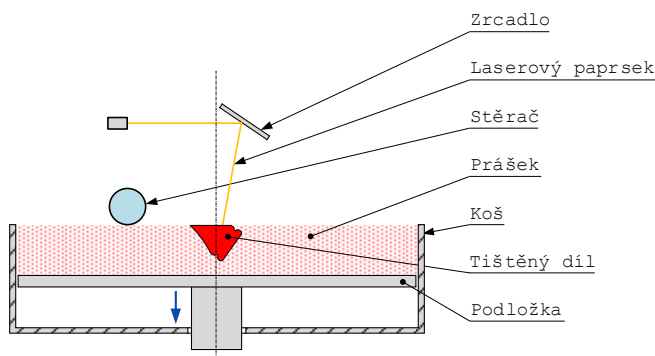
PBF = Powder Bed Fusion

Spékání práškové vrstvy je jednou z nejstarších metod 3D tisku. Její podstata spočívá ve využití tepelné energie pro spojení práškového polotovaru. Podle zdroje tepelné energie a stylu působení paprsků se rozlišují metody PBF. Nejznámější a nejstarší je použití CO₂ laseru v inertní atmosféře. Pro zvýšení jeho účinku je oblast působení laseru přehřívána. Laser dodá dostatek tepelné energie plasty pod bodem tání. Intenzivněji dodává tepelnou energii svazek elektronových paprsků, označený EBM Electron Beam Melting. Pro průchod elektronů je potřeba zajistit vakuum. Avšak pro plasty není tolik energie potřeba a svazek elektronů se používá převážně pro spojení kovového prášku. Dále se PBF metoda používá pro keramiku či jiné materiály. Pro plastový prášek stačí dodat méně tepelné energie např. infračerveným zářením atd. Použití laseru nese své označení a zkratku uvedenou níže [13], [15].

SLS = Selective Laser Sintering = Selektivní laserové slinování

LS = Laser Sintering = Laserové slinování

Používají se zkratky jak SLS, tak LS. SLS vychází z podstaty, kdy laser ve vrstvě vybírá pouze průřez 3D tištěného dílu. Často je před zkratkou LS udáván materiál prášku. mLS znamená metal = kov a pLS znamená polymer. Princip metody SLS či LS je vidět na Obr. 19 [15].



Obr. 19 – Spékání práškové vrstvy – Metoda SLS

Plastový polotovar v podobě prášku je po vrstvách přisypáván do koše. Zároveň objem koše udává maximální rozměr 3D tiskové oblasti. Nanesenou vrstvu prášku uhlazuje stěrač. Po přisypání prášku stěrač přejezdí přes celou plochu prášku a zarovná vrstvu na stejnou výšku. Přesnost výšky vrstvy je zpravidla menší než 0,1 mm. 3D tištěný díl může být umístěn kdekoli v koši, viz Obr. 19. Na rozmístění dílů v koši jsou speciální slicery vyvinuté pro PBF metodu. Slicer pak definuje laseru, kde má provést spečení prášku. Laserový paprsek je pomocí zrcadel nasměrován tak, aby dopadal na požadované místo. Paprsek dopadá na bod prášku. Pro vytvrzení 3D výtisku ve vrstvě musí trajektorie laseru vést přes celý průřez 3D tištěného dílu. Nespečený prášek zůstává na svém místě nedotčený laserovým paprskem. Zároveň také slouží jako podpora pro výrobu převisných částí. PBF je velice vhodná pro 3D tisk složitých dílů. Po spečení požadovaného průřezu se podložka pohybuje směrem dolů ke dnu koše. Směr podložky je na Obr. 19 znázorněn modrou šipkou. Následně je přisypán další prášek a zarovnán na stejnou výšku po celé ploše. Po vytvoření všech vrstev následuje chladnutí 3D výtisků. Vytiskované 3D výtisky chladnou obalené nespečeným práškem. Kdyby byly 3D výtisky ihned vyjmuty z nespečeného prášku, nastalo by vlivem prudké změny teploty jejich velké smrštění. 3D výtisky jsou ponechány v nespečeném prášku po dobu několika hodin. Chladnutí je velmi pomalé. Tím se metoda PBF odlišuje od vstřikování, kdy plast je nejprve dlouho ohříván, homogenizován ve vstřikovací jednotce a následně je vstříknut do vstřikovací formy, kde ihned zchladne. Rychlé chladnutí vyvolává smrštění a deformace ve výstřiku. Naopak při metodě PBF je rychle dodána laserem tepelná energie a chladnutí je velmi pomalé. Po uplynutí požadované doby chladnutí jsou 3D výtisky vyndány z koše. Nespečený prášek, který zůstal v koši, je možné po dobu předepsanou výrobcem prášku recyklovat. Nespečený prášek je také přilepen k 3D výtiskům. To je způsobeno blízkostí, ve které proběhl ohřev. Zároveň má 3D výtisk větší relativní molekulární hmotnost, a proto je těžší než prášek. Prášek je pod 3D výtiskem stlačován vahou 3D výtisku. Přilepený, přichycený prášek je potřeba oddělit od 3D výtisku. K tomu se nejčastěji používá tryskání malých částic pod tlakem, a to buď zrna písku, plastu atd. Pro menší detaily 3D výtisku se používá pouze stlačený vzduch [13], [15].

Pro metodu PBF se doporučuje použít takový plast, který má nízkou tepelnou vodivost. Důvodem je lepší oddělení nespečeného prášku od spečeného. Nespečený prášek bude méně tepelně ovlivněn a nehrozí vytvoření vazby dodáním tepelné energie sousednímu prášku. Vzhledem k dlouhé době chladnutí se doporučuje použít semikrystalický plast, u něhož je výhodná vysoká teplota tání a zároveň teplota degradace výrazně vyšší, dále nízká teplota zasklení. Tím je možno vyvodit vysokou teplotu pro spečení, a než laser přejezdí na sousední část ve vrstvě, původní se nedostane pod teplotu zasklení. Výsledkem je tepelné propojení sousedních částí, při rychlejší rychlosti 3D tisku i lepšího spojení vrstev nad sebou. Pokud bude semikrystalický plast déle chladnout, vytváří se ve struktuře větší podíl krystalické fáze. Větší poměr krystalické fáze semikrystalický plast posouvá vlastnostmi blíže k oceli či jiným materiálům krystalické struktury. 3D výtisky metodou PBF mají velice dobrou izotropii, příčinou je vysoký poměr krystalické fáze. Větší poměr krystalicity dává charakteristickou vlastnost 3D výtiskům zhotovených metodou PBF, a to je jejich větší hmotnost. Výborně tyto vlastnosti splňuje polyamid. Konkrétně jsou to Pa s počtem uhlíků 11

a 12 označené jako PA 11 a PA 12. I když se jedná např. o PA12, jsou v něm rozdíly ve vlastnostech daných výrobcem. Zpravidla výrobce PBF 3D tiskárny nabízí i svůj plast pro 3D tisk. Je možné se setkat s PA12 od EOS, PA 12 od 3D Systems atd. Jelikož výrobců prášku není mnoho, je cena plastu vysoká. Také výběr barvy není velký. Ovšem drsnost povrchu 3D výtisku je poměrně hrubá, a proto na povrchu dobře přichycují barvy, 3D výtisk je pak snadné nabarvit. Velikost prášku musí být velmi malá, aby nevznikaly póry. Výrobců těchto PBF 3D tiskáren je málo. Cena zařízení je velmi vysoká. Provoz PBF 3D tiskárny je velmi energeticky náročný. Dále je náročnější i obsluha 3D tiskárny. Manipulace s práškem vyžaduje větší bezpečnostní opatření. Především je potřeba chránit dýchací ústrojí obsluhy.

Hlavní nedostatkem metody SLS je bodové působení laseru. Dlouho trvá, než laser speče prášek v průřezu 3D tištěného dílu ve vrstvě. Vzhledem k vysoké přesnosti dané nízkou výškou vrstvy je 3D výtisk složen z mnoha vrstev a 3D tisk trvá delší dobu. Výrobci PBF 3D tiskáren přicházejí neustále s vylepšeními působení laseru v přímce nebo po celé vrstvě. Usměrnění laseru jen na potřebný průřez je možné realizovat prozatím třemi způsoby. Prvním je použití masky, která zakryje dopadání tepelné energie mimo průřez 3D výtisku ve vrstvě. Druhou možností je nanesení absorpční látky a vyvození takové tepelné energie, která bude dopadat jen na nanesený průřez ve vrstvě. Třetí možnost je opakem druhé. Látka je nanášena na část, která nemá být spečená. Nevýhodou je, že nanášená krycí látka zhoršuje recyklovatelnost prášku.

MJF = Multi Jet Fusion

Metoda MJF patentovaná firmou HP Inc. využívá pro vytvrzení prášku infračervené záření, které působí na celou plochu prášku. Před působením tepelného záření jsou do procesu vřazeny 2 kroky. V prvním kroku je nanášena absorpční látka označená jako „fusing“. Nanášení látky připomíná metodu BJ, avšak zde nanášená látka nic nelepí. Nanášená látka, zpravidla černé barvy, označí ve vrstvě průřez 3D výtisku. Ve druhém kroku je nanášena látka označená jako „detailing“. Úkolem druhého kroku je zarytí malé plochy od hrany průřezu 3D výtisku ve vrstvě. Tím je docíleno ostřejší hrany v průřezu. Následně ultrafialové záření speče pouze tu vrstvu, kde bylo nanášeno absorpční činidlo. Výsledkem je zrychlení doby 3D tisku.

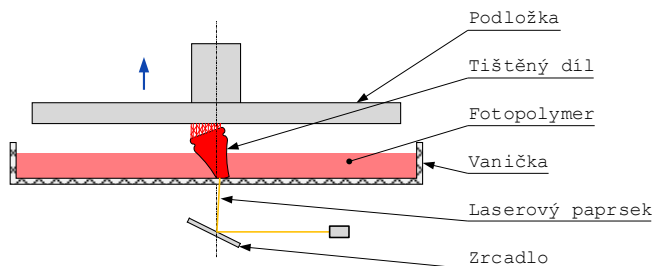
Fotopolymerace

VAT Polymerization = VAT polymerizace

Vat of liquid photopolymer resin = Nádoba s fotopolymerní pryskyřicí

K fotopolymerizaci je potřeba nádoba, ve které polymerizace probíhá. Často je zdůrazňována kapalná podoba polymeru či jeho vlastnost aktivovat polymeraci při působení světla. Dobře tyto vlastnosti splňuje pryskyřice, proto je také uváděná do názvu metody. Princip vytvrzení materiálu světlem je podobný jako u MJ.

Nejznámější metodou fotopolymerizace je nejstarší metoda 3D tisku Stereolitografie (SLA). Princip metody je velice podobný metodě SLS. Jako u SLS je použit laser pro vytvrzení vrstvy, akorát u SLA je použita místo prášku kapalina, která činí metodu přesnější. Přesnost SLA 3D tisku ve vrstvě je menší než 0,1 mm. Po MJ se jedná o druhou nejpresnější metodu 3D tisku. Princip metody je zobrazen na Obr. 20.



Obr. 20 – Fotopolymerizace – Metoda SLA

Polotovar je v kapalně podobě nalit do vaničky. Materiálem je podle názvu metody fotopolymer, nejčastěji na bázi pryskyřice. Fotopolymer musí být vytvrditelný působením světla, jehož nevýhodou je jeho životnost. Po otevření musí být zpravidla do roka spotřebován, jinak ztrácí své vlastnosti. První vrstva je 3D tištěna na podložku. Podložka sjede ke dnu vaničky. Výška mezi podložkou a dnem vaničky je rovna výšce vrstvy. Podobně jako u SLS je sadou zrcadel laserový paprsek nasměrován do místa, kde má být

provedeno vytvrzení fotopolymeru. Laserový paprsek provede vytvrzení v průřezu 3D výtisku ve vrstvě. Vanička musí dovolovat průchod laserového paprsku. Potom se podložka posune směrem nahoru, směr modré šipky na Obr. 20. Posunutí je o výšku vrstvy. Po odsunutí podložky fotopolymer zateče do připraveného prostoru a další vrstva je připravena k vytvrzení. Buď s podložkou, nebo po oddělení je 3D výtisk nutné očistit od zbytku fotopolymeru. Zbýlý fotopolymer ve vaničce je plně recyklovatelný a připravený pro další 3D tisk. Očištění, zbavení se usazeného tenkého filmu fotopolymeru na povrchu 3D výtisku se provádí v čistící nádobě, kde kolem 3D výtisku proudí čistící přípravek, zpravidla izopropylalkohol. Po odstranění zbytků nevytvrzeného fotopolymeru, pokud se ještě nestalo, je oddělena podložka od 3D výtisku. Následuje je 3D výtisk na předepsanou dobu a teplotu vložený do pece pro odstranění vnitřního pnutí. I po odstranění vnitřního pnutí je SLA 3D výtisk stejně jako MJ 3D výtisk velmi křehký a má horší mechanické vlastnosti oproti jiným metodám 3D tisku. Také možný rozsah teplot je omezený. Posledním krokem je odstranění podpor. Podpory jsou zpravidla vždy dány zavěšením SLA 3D výtisku směrem dolů za podložku. Díl by měl být při SLA 3D tisku orientován tak, aby jeho objem narůstal s každou vrstvou směrem k podložce. Tím se zmenšuje namáhání, tahání již 3D vytištěného dílu. Tento směr 3D tisku v metodě fotopolymerizace se nazývá Bottom-up, přeloženo zezdola nahoru. Podložka se pohybuje směrem zdola nahoru. Zdroj světla je umístěn dole. Lze však použít obrácený směr 3D tisku, a to Top-down, přeloženo shora dolů. Zdroj světla je pak nahoře. Uspořádání SLA 3D tiskárny je podobné jako na Obr. 19 u SLS metody, pouze místo prášku se použije fotopolymer. Podobně jako u SLS je nutné použít stěrač pro zarovnání vrstvy. I přes kapalnou stav mají plasty vysokou reálnou molekulovou hmotnost, která brání dokonalému vyplnění mezery rovnající se výšce vrstvy. Při směru 3D tisku Bottom-up je snáze zajištěna výška vrstvy. Fotopolymer snáze pod tlakem vyplní vzniklou mezeru. Bezspornou výhodou je směru 3D tisku Top-down je výrazně menší potřeba podpor, tím je dovoleno tisknout i větší 3D výtisky [13], [15].

Stejně jako u SLS 3D tisku je i u SLA 3D tisku nevýhoda bodového působení laserového paprsku. Laser musí vytvrdit celý průřez 3D výtisku ve vrstvě, tím se rychlost 3D tisku prodlužuje. Nabízí se možnost působení světla na celou plochu a použití masky. Masky zakryje tu část fotopolymeru, která nemá být vytvrzena. Vznikají tak další metody fotopolymerizace.

LCD = Liquid Crystal Display = Displej z tekutých krystalů

Princip metody spočívá ve vystavení celé plochy UV záření z lampy. LCD displej je umístěn mezi UV lampu a fotopolymer. Na tenkém LCD displeji jsou pak zobrazovány mezery, kudy má světelný tok projít. Přesnost 3D tisku záleží na velikosti pixelů monitoru.

DLP = Direct Light Processing = Přímé světelné zpracování

Metoda DLP nepotřebuje LCD displej. Světelný tok je na fotopolymer promítán projektořem, vždy jedno promítnutí na vrstvu. Přesnost 3D tisku záleží na velikosti pixelů projektořem.

CDLP = Continuous Digital Light Processing = Nepřetržitě přímé působení světla

CDLP spočívá v neustálém pohybu podložky směrem nahoru. U DLP působí světelný tok po vrstvách. U CDLP je světelný tok neustále promítán na fotopolymer. Výsledkem je rychlejší 3D tisk.

LFS = Low Force Stereolithography = Stereolitografie s nízkou silou

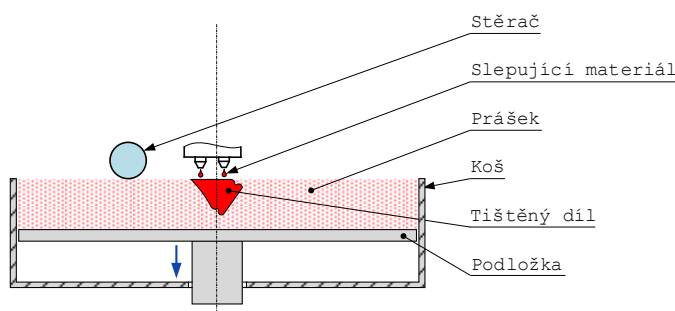
Společnost Formlabs Inc. představila na veletrhu v Hannoveru na konferenci Additive Manufacturing Users Group dvě nové 3D tiskárny Form 3 a Form 3L. Oproti svým předchůdcům využívajícími metodu SLA přicházejí nové 3D tiskárny s metodou LFS. Jedná se o vylepšení metody SLA úpravou vaničky a působením laseru. Vanička s pružným dnem umožňuje jeho prohnutí, tím se v ní snižuje tlak, který je vyvozen ponořením 3D tištěného dílu. Výsledkem je menší namáhání dílu ve vrstvách. Vrstvy nejsou „odlepovány“ a 3D tištěný díl má lepší kvalitu povrchu. Dříve problémová pevnost podpor se menším namáháním zlepšila. Nehrozí prasknutí podpor a tím utržení 3D tištěného dílu z podložky. Pevnější podpory dovolují 3D tisk objemnějších dílů. Zároveň je možné zvýšit rychlost 3D tisku. Zdroj světla je navržen tak, aby světelný paprsek dopadal dokonale kolmo k podložce. Systém je označen jako LPU = Light Processing Unit, jednotka pro zpracování světla. Výsledkem je přesnější 3D tisk [19].

Tryskání pojiva

BJ = Binder Jetting

3DP = Three – Dimension Printing = Trojrozměrný tisk

Metoda je velice podobná MJ a PBF metodám 3D tisku. Tryskání pojiva je možné označovat zkratkou 3DP. Vychází to doslova z podstaty BJ. Podobně jako 2D inkoustová tiskárna tiskne na papír, BJ tiskne na prášek, ale s tím rozdílem, že není nanášen inkoust, ale pojivo. Úkolem pojiva je spojit, slepit prášek. Materiál je nanášen ve formě kapiček, podobně jako u MJ. Prášek je spojován podobně jako u PBF metody, ale s tím rozdílem, že ke spojení prášku není dodávána tepelná energie, ale prášek je slepen nanesenou kapičkou pojiva. Princip metody je znázorněn na Obr. 21.



Obr. 21 – Tryskání pojiva

3D tiskový prostor je podobný PBF metodě. Hlavní složka 3D výtisku je v podobě prášku nasypávaná do koše a nanášená vrstva je zarovnávaná stěračem. 3D tisková hlava je podobná hlavě používané při MJ. Také pro zvýšení rychlosti 3D tisku je na 3D tiskové hlavě více trysek. Při BJ metodě není potřeba 3D tisku podpor, stačí neslepený prášek. Z trysky dopadají kapičky na prášek a slepují jej. Velikost kapiček je velmi malá, do 0,05 mm. Je možné nanášet jak lepicí kapičky, tak i barevné kapičky pro vytvoření barvy BJ 3D výtisku. Jak některé kapičky lepí, nesou barvu. Prakticky ihned po dopadu kapička slepuje prášek za pokojové teploty. Případně může být prostor ohříván. Po nanesení kapiček v průřezu 3D tištěného dílu ve vrstvě je nanášena další vrstva prášku pro slepení s předchozí. Stejně jako u PBF je po dokončení 3D tisku BJ 3D výtisk ponechán v koši. Doba v koši se odvíjí od doby potřebné pro vytvrnutí lepidla. Po vytvrzení lepidla je potřeba BJ 3D výtisk očistit stejnými způsoby jako PBF 3D výtisk. Výhodou metody BJ oproti PBF je téměř 100% recyklovatelnost neslepeného materiálu. Slepit lze prakticky jakýkoliv materiál v podobě prášku, např. polymer, keramika, hliník, kov atd. Z plastů se nejčastěji používá PMMA. Stejně jako u PBF má i BJ 3D výtisk hrubý povrch. Nevýhodou BJ 3D výtisku oproti PBF výtisku jsou horší vlastnosti, BJ 3D výtisk je křehký. Lepení prášku nevytváří tak pevné vazby jako spékání. Zároveň přidání lepidla do struktury mění objem BJ 3D výtisku. Výhodou BJ je možnost 3D tisknout z jakéhokoliv materiálu na poměrně levné BJ 3D tiskárně. Oproti MJ je cena pojiva, lepidla levnější [13], [15].

5 Stávající vstřikování do 3D tištěných plastových vložek

V současné době výrazně převažuje vstřikování do forem vyrobených z konvenčních materiálů a konvenčními technologiemi, jež poskytují velkou životnost. Poměr všech vstřikovaných dílů do konvenčních forem oproti nekonvenčním formám je obrovský. Vzhledem k současnému trendu není předpoklad, že by tento poměr mohl být v blízké době změněn. To způsobuje, že myšlenka použití pro výrobu vstřikovací formy nekonvenční materiály a nekonvenční technologie není příliš známá. Použití plastu a 3D tisku pro výrobu vstřikovací formy však není pouze teorie. Na trhu jsou již řešení nabízející vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Nicméně firem zabývajících se touto problematikou je velmi málo. Velmi často nabízejí možnost 3D tisknout plastové vstřikovací vložky výrobci 3D tiskáren, a to obzvláště při propagaci svých produktů. Jelikož 3D tisk je poměrně mladá technologie, ukazují tím, že i většinu konvenčně vyráběných výrobků jsou schopny nahradit 3D tiskem. A k tomu je nejlepší použít jejich 3D tiskárny. Ve 4. kapitole bylo popsáno 7 metod 3D tisku. Nejvíce se pro 3D tisk vstřikovacích vložek uplatnily metody Fotopolymerace a Tryskání materiálu. Hlavními důvody jsou vysoká výrobní přesnost a hladký povrch 3D výtisků.

V následující části budou představeny poznatky 3D tisku vstřikovacích vložek již používanými metodami. Dále budou představeny zkušenosti se vstřikováním do těchto vložek. Vzhledem k podrobnější rešerši problematiky budou jednotlivé metody 3D tisku používané pro výrobu vložek detailněji popsány v Příloze č. 1 a v Příloze č. 2. V této práci budou shrnuty dosavadní poznatky z obou metod.

5.1 3D tisk vložek metodou fotopolymerizace

Na trhu je mnoho výrobců vyrábějících 3D tiskárny pracující na metodě fotopolymerizace. Známou firmou je americká firma Formlabs Inc. Firma byla založena roku 2011 a krátce po založení se dostává do patentového sporu se známou firmou 3D Systems. Příčinou sporu bylo využívání patentu firmy 3D Systems týkající se SLA metody, ačkoliv doba platnosti dle představitelů Formlabs již vypršela. Tento spor proslavil první SLA 3D tiskárnu od Formlabs označenou Form 1. Další předností Form 1 byla nižší cena, přibližně desítkrát levnější než u konkurenčních SLA 3D tiskáren. V současné době Formlabs nabízí mnoho SLA 3D tiskáren označených Form a různých verzí. Kromě SLA 3D tiskáren i 3D tiskárny pracují na základě metody SLS [19].

Důvodem vybrání Formlabs je propagace 3D tisku vstřikovacích vložek na webových stránkách formou blogů popisujících vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Zároveň Formlabs spolupracuje s mnoha firmami a institucemi zabývajících se touto problematikou. Na Obr. 22 je ukázka 3D tiskárny Form3 vlevo a vpravo ručního vstřikolisu HoliPress. Uprostřed na Obr. 22 jsou různě barevné vstřikované díly a vstřikovací forma s vložkami bílé čiré barvy vlevo dole před 3D tiskárnou.



Obr. 22 – Příprava vstřikování do vložek 3D tištěných metodou fotopolymerizace [19]

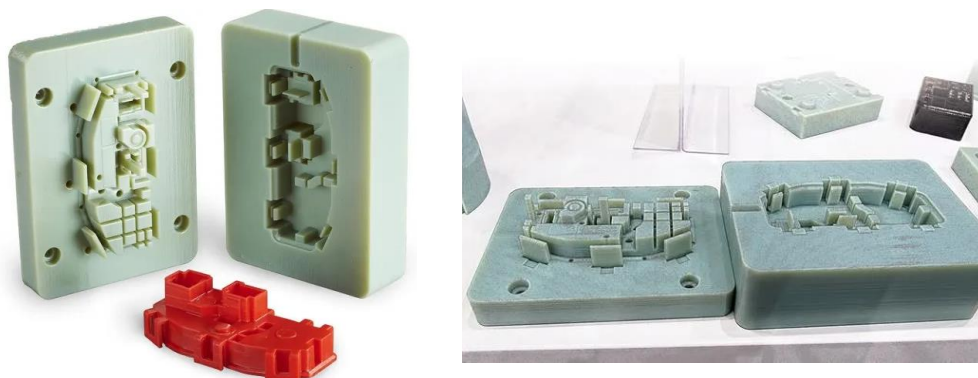
Podrobněji o vstřikovacích vložkách vyráběných na 3D tiskárnách Form od Formlabs včetně spolupracujících firem a francouzského institutu je popsáno v Příloze č. 1.

5.2 3D tisk vložek metodou tryskání materiálu

Stejně jako Formlabs propaguje 3D tisk vstřikovacích vložek metodou fotopolymerizace, firma Stratasys Ltd. se zabývá 3D tiskem vložek metodou tryskání materiálu. Stratasys prezentuje na svých webových stránkách vstřikování do plastových vložek 3D tištěných na jejich 3D tiskárnách, označených PolyJet. Zároveň Stratasys také podkládá své studie spoluprací s mnoha firmami zabývajícími se touto problematikou. Z těchto důvodů byly poznatky prezentované Stratasys vybrány pro představení vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou tryskání materiálu [20].

Americko-izraelská firma Stratasys Ltd. a spoluzakladatel firmy S. Scott Crump se významně zapsali do historie 3D tisku, viz 4. kapitola 3D tisk. Roku 2003 byly FDM 3D tiskárny Stratasys nejvíce prodávané pro rapid prototyping. Z celkového objemu prodeje 3D tiskáren za rok 2007 Stratasys tvořil 44 % a tím byl již šestým rokem v řadě jedničkou na trhu. Následovaly roky, kdy Stratasys uzavírá smlouvy či skupuje ostatní firmy zabývající se 3D tiskem. V současné době některé platnosti patentů Stratasys z 90. let již uplynuly. Na trh vstoupilo mnoho dalších firem, avšak Stratasys zůstává předním výrobcem 3D tiskáren a výrobcem 3D tištěných dílů [21].

Vstřikovací vložky 3D tištěné na PolyJet 3D tiskárně jsou vidět na Obr. 23. Kromě vstřikovacích vložek Stratasys prezentuje možnost výroby na PolyJet 3D tiskárnách vložky pro vyfukování plastů a další.



Obr. 23 – Vstřikovací vložky 3D tištěné metodou tryskání materiálu (zeleně) a vstřikovaný díl [20]

Podrobněji o vstřikovacích vložkách vyráběných na PolyJet 3D tiskárnách od Stratasys včetně spolupracujících firem je popsáno v Příloze č. 2.

5.3 Shrnutí poznatků

Shrnutí poznatků vychází z podrobnějších rešerší provedených v Příloze č. 1 a v Příloze č. 2.

Rešerší dosavadních poznatků se potvrdilo, že má smysl 3D tisknout pouze dutinu vyrobenou ve vstřikovací vložce. Zbývající část formy je označována jako rám a musí dle Tab. 1 zajišťovat více požadavků na vstřikovací formu. Potvrdilo se uplatnění vstřikování do 3D tištěných vložek v prototypové, nejvýše však malosériové výrobě. Větší úsilí spolupracující firmy směřovaly na rychlou výrobu vstřikovaných prototypů a ověření očekávaných vlastností. Vstřikování do konvenčních forem umožňuje vstřikovat díly různých velikostí, zatímco vstřikování do 3D tištěných vložek se zaměřuje spíše na vstřikování malých dílů. To je způsobeno částečně z obavy vyrábět velké 3D tištěné vložky, které nejsou zatím příliš ověřené. Hlavním důvodem je dodržení výrobní přesnosti 3D tisku tiskárnou ve velkém prostoru. Ve srovnání s obráběním je přesnost větších 3D tištěných objemů výrazně horší.

Poznatky byly rozděleny do částí zaměřující se na 3D tisk vložky a realizaci vstřikování.

3D tisk

Některé firmy nepřesnost 3D tisku napravovaly obráběním, broušením atd. Dosažení lepší drsnosti bylo řešeno zpravidla tryskáním. Jedná se však o další operace, které prodlužují čas výroby vložek. Pro minimalizaci nepřesnosti 3D tisku se doporučuje použít doporučení výrobců 3D tiskáren a používat nejmenší možnou výšku vrstvy. U 3D tisku metodou fotopolymerizace se doporučuje 3D tištěný díl umístit

přímo na podložku. Pokud to nelze, má se natočit tak, aby se objem 3D tištěného dílu směrem od podložky zmenšoval. Při 3D tisku pevné a pohyblivé vložky se doporučuje dodržet vzájemnou orientaci. Jelikož 3D tištěný díl visí na podporách, projevuje se na něm nepatrné prodloužení způsobené gravitací. Při vzájemném natočení vložek nebude prodloužení způsobovat nepřesnosti při zavření formy. U 3D tisku metodou tryskání materiálu se doporučuje natočit díl na podložce tak, aby vrstva byla kladená po směru proudění taveniny. Pro obě metody 3D tisku platí, že vložka by měla být navržena tak, aby se minimalizovalo množství podpor [19], [20].

Při konstrukci 3D tištěných plastových vložek je doporučeno využívat dosavadních znalostí konstrukce forem z konvenčních materiálů, avšak s následujícími úpravami: zvětšit zkosení stěn pro snazší vyhození vstříkovaného dílu z formy; zkosit ostré hrany, pokud možno zaoblit ty, které by byly v kontaktu s protilehlou vložkou. Doporučuje se minimalizovat tloušťku stěn vložky. Důvodem je vlastnost plastu tepelně izolovat. Snahou by mělo být co nejvíce zmenšit vzdálenost od taveniny v dutině formy k teplovodivějšímu materiálu. Tloušťka stěny by neměla být menší než 1 až 2 mm, aby vložka odolala působení vysokých teplot. Doporučená tloušťka stěny je 10 mm. Použití chladicích kanálků s ohledem na čas přípravy není moc efektivní [20].

Pro fotopolymerizaci byl nejpoužívanější plast Rigid 10K Resin plněný skelnými vlákny. Pro tryskání materiálu byl jednoznačně nejpoužívanějším plastem Digital ABS.

Vstřikování

Technologie je ovlivněna konstrukcí vstřikovací formy. Při vstřikování do plastových vložek se nejvíce uplatňovaly jednonásobné formy. Pokud rám zachycuje veškerou uzavírací sílu stroje, prodlužuje tím životnost vložky. Velikost uzavírací síly záležela na rovinnosti formy v dělicí rovině. Pokud je vložka společně přebroušena s rámem do jedné roviny, je nejen zabráněno přetokům, ale uzavírací síla může být vyšší. Pokud vložka převyšuje rám, uzavírací síla působí na vložky, a proto musí být tato síla zmenšena. Životnost vložky lze dále prodloužit snížením vstřikovacího tlaku a rychlosti. Při sestavení formy je nutné brát ohled na křehkost plastu. Jelikož plast velmi špatně vede teplo, doba vstřikovacího cyklu je delší. Zkrátit chladnutí vložky lze nejlépe dodatečným chlazením stlačeným vzduchem při otevření formy. Pro snazší vyjmutí vstříkovaných dílů z vložky je doporučeno použít separační spreje [19].

V závislosti na vlastnostech vstříkovaného dílu byl volen i různý vstříkovaný plast. Platí, že s větší vstřikovací teplotou se snižovala životnost vložky. Lepší životnost měly vložky, do kterých se vstříkoval plast o nižší teplotě. Pro své univerzální vlastnosti byl nejčastěji používán PP.

Většina firem se zaměřila na vstřikování malých dílů. Z tohoto důvodu převládal výběr menších vstřikolisů. Menší vstřikolis má zejména menší objem vstřikovací jednoty. Tím bude splněna podmínka vstříkovaného objemu pro malý díl, viz 3.2 podkapitola – Vstřikovací lis. Uplatňují se vstřikolisy s hydraulickým či ručním pohonem [19].

6 Upřesnění cílů disertační práce

Přibližně kolem roku 2012 začínají firmy zabývající se vstřikováním a výrobci 3D tiskáren realizovat vstřikování do 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek. Avšak tento rok nelze určit přesně. Publikovaných studií, viz Příloha č. 1 a Příloha č. 2, je mnoho. Objevují se stále další firmy zabývající se touto problematikou. V přílohách jsou uvedeny i některé firmy spolupracující s výrobci 3D tiskáren Formlabs a Stratasys. Tito výrobci mají ověřené, že některé typy jejich 3D tiskáren jsou schopné vyrobit funkční plastové vstřikovací vložky. K tomu uvádějí i řadu doporučení pro konstrukci vložek. Využití vstřikování do 3D tištěných forem je zaměřeno převážně na výrobu prototypů. Z pochopitelných důvodů jsou prezentovány většinou jen úspěšně realizované prototypy. Není vyloučeno, že se vstřikování do 3D tištěných plastových forem nevyužívalo již dříve. Pro vyzkoušení 3D tisknutí plastových vstřikovacích vložek byly používány i FFF (FDM) 3D tiskárny. Zejména kvůli své nízké pořizovací ceně a nízkým nákladům na 3D tisk jsou dobrou volbou pro experiment. Avšak vložky 3D vytištěné vytlačováním plastového filamentu nesplňovaly požadavky na ně kladené. Publikované experimenty byly nejčastěji provedeny v letech 2014 až 2017. S výběrem lepšího plastu vložky dle Obr. 6 a vývojem FFF (FDM) 3D tiskáren by mohly experimenty v dnešní době dopadnout lépe.

Cílem této disertační práce není zaměřit se na již používané metody 3D tisku pro výrobu plastových vstřikovacích vložek. Používané metody 3D tisku, jimiž jsou fotopolymerizace a tryskání pojiva, mají polotovar v tekutém stavu. Obě metody nabízejí především nejpřesnější 3D tisk a hladký povrch 3D výtisku, což jsou požadavky kladené na vstřikovací vložky. Vytlačování materiálu spolu s laminací plátů a přímým energetickým nanášením mají polotovar v tuhém stavu. Jedná se o metody nejméně přesné. Z této skupiny metod 3D tisku je pro plastový polotovar laminace plátů málo používaná a přímé energetické nanášení ještě méně.

Metody 3D tisku mající polotovar ve formě prášku nejsou pro 3D tisk vstřikovacích vložek téměř využívány. Prozatím nejsou k dispozici studie jako pro 3D tisk metody fotopolymerizace a tryskání pojiva. Ani nejsou k dispozici podklady z experimentů jako u metody vytlačování materiálu. V obecném rozdělení metod 3D tisku podle přesnosti jsou metody mající polotovar ve formě prášku zařazovány za metody mající polotovar v tekutém stavu. Jsou však přesnější než metody mající polotovar v tuhém stavu. Z hlediska přesnosti výroby by tyto metody byly vhodné pro 3D tisk vstřikovacích vložek. Z hlediska kvality povrchu jsou tyto metody méně vhodné. Spojení prášku zanechává větší drsnost 3D výtisku. I přes neustále se zlepšující spojování prášku je větší drsnost oproti metodám majícím polotovar v tekutém stavu hmatatelná. Drsnost vstřikovaného dílu je vytvářena drsností vstřikovací vložky. Pokud by větší drsnost vstřikovaného dílu byla zákazníkem tolerována, jsou tyto metody použitelné pro 3D tisk vstřikovacích vložek. Francouzské průmyslové technické centrum pro plasty a kompozity používalo rámeček 3D tištěný metodou SLS pro umístění vložky 3D tištěné metodou fotopolymerizaci, viz Příloha č. 1. Tento rámeček svojí houževnatostí velice dobře vyrovnával nepřesnosti 3D tisku při uzavření formy. Pokud by mohl plnit i funkci kavity, určitě by to mohlo být výhodou. Metody 3D tisku mající polotovar ve formě prášku jsou spékání práškové vrstvy a tryskání pojiva. S ohledem na mé možnosti jsem zvolil metodu spékání práškové vrstvy. Tato metoda byla popsána v 4.3 podkapitole – Metody 3D tisku, Spékání práškové vrstvy. Nevýhodou této metody by mohla být delší doba chladnutí 3D výtisků.

Cílem této disertační práce je prozkoumat uplatnění vstřikovacích vložek 3D tištěných metodou spékání práškové vrstvy a tím rozšířit možnost výroby plastového výrobku s ohledem na jeho technologii. Následující část práce je shrnuta v této posloupnosti:

1. 3D tisk vstřikovacích vložek.
2. Příprava vstřikování.
3. Výzkum vstřikování do 3D tištěných vložek.
4. Metodika vstřikování do 3D tištěných plastových vložek.

7 3D tisk plastových vstřikovacích vložek

Vlastnosti 3D tištěných plastových vložek budou mít rozhodující vliv na naplnění cíle této práce. S ohledem na mé možnosti výběru metody 3D tisku mající polotovary ve formě prášku byla zvolena metoda MJF a 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200. S výběrem 3D tiskárny souvisí i výběr 3D tiskového plastu, který byl proveden dále v této kapitole. Obecný výrobní postup 3D tisku popsany v 4.2 podkapitole byl v této kapitole specifikován. Všechny vložky použité v této práci byly 3D tisknuty vždy podle specifikovaného postupu. Specifikace byla provedena na základě dostupného vybavení, doporučení výrobce 3D tiskárny a na základě vlastních zkušeností, např. při zkoumání nejlepších podmínek pro docílení nejlepší přesnosti 3D výtisků atd. Při zkoumání MJF metody nebyla opomenuta ani ekonomická stránka. Závěr této kapitoly obsahuje názorný příklad ceny v závislosti na 3D tištěném objemu. Ačkoliv ekonomický poznatek je pro MJF metodu, lze jej použít obecně na kteroukoliv metodu 3D tisku. Poznatek z MJF 3D tisku budou dále použity v této práci pro návrh konstrukce vstřikovací formy, vstřikování atd.

7.1 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200

Vybraná 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200 je produktem nadnárodní firmy HP Inc, založené roku 1934 nedaleko Palo Alto v blízkosti San Franciska v USA. Od svého založení se firma HP zaměřovala na elektronické produkty. V 80. letech zavádí do své výroby inkoustové a laserové tiskárny a v 90. letech počítače. V dnešní době patří HP mezi světové producenty jak tiskáren, tak počítačů i dalších elektrických produktů. Klasické 2D tiskárny jsou HP nabízeny od nejlevnějších modelů přes kancelářské až po určené pro tisk fotografií. Jednou z vlastností, která odlišuje kvalitu tisku, je ostrost jeho rozlišení. Společnost HP je schopna dodávat tiskárny i ve velmi vysokém rozlišení. Podobně jako vznikla myšlenka 3D tisku, viz 4. kapitola – 3D tisk, i společnost HP chtěla využít své bohaté zkušenosti s 2D tiskem a přidáním dalšího rozměru nabízet i 3D tiskárny. Ze sedmi 3D tiskových metod, viz 4.3 podkapitola – Metody 3D tisku, souhrnně zobrazené na Obr. 14, se HP zaměřilo na metody s práškovým polotovarem. Firma HP metodu spékání práškové vrstvy upravila na metodu Multi Jet Fusion (MJF) a nechala si ji patentovat. Krok, kdy je nanášena absorpční látka, je velmi podobný 2D tisku pouze s tím rozdílem, že se netiskne na papír, ale na uhlazený jemný prášek. Roku 2016 představuje HP na výstavě Rapid v americkém Orlando své první modely 3D tiskáren. Jedná se o modely HP Jet Fusion 3200 a HP Jet Fusion 4200. Spolu s 3D tiskárnou je nabízeno i další příslušenství. 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200 spolu s příslušenstvím byla roku 2016 nabízena za cenu 5 500 000 Kč. Příslušenství obsahuje kromě 3D tiskárny jednu Build Unit (stavební jednotku, „vozik“) a Processing Station (procesní stanici), zobrazené na Obr. 24 [22].



Obr. 24 – 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200 a procesní stanice [23]

Rozměry procesní stanice jsou 2 990 × 937 × 2 400 mm a váha je 480 kg. Rozměry 3D tiskárny jsou 2 210 × 1 200 × 1 448 mm a váha je 750 kg, zatímco 3D tiskový prostor je 380 × 284 × 380 mm. Výška nanášené vrstvy je 0,08 mm a rozlišení 3D tisku 1 200 dpi.

Jak na 3D tiskárně, tak na procesní stanici jsou na Obr. 24 otevřená dvířka, přes která do zařízení vjíždí stavební jednotka. Na pracovní stanici se provádí příprava (pre-processing) a opracování (post-processing) 3D tisku. Samotný 3D tisk probíhá na 3D tiskárně bez chladnutí. Pracovní stanice do prázdné stavební jednotky nadávkuje potřebné množství prášku podle zaplnění 3D tiskového objemu 3D modely. Po 3D tisku v pracovní stanici probíhá chlazení. Metoda Spékání práškové vrstvy je charakteristická dlouhou dobou chladnutí, proto výrobce doporučuje zakoupit si při častém 3D tisku druhou stavební jednotku. Po zchlazení prášku ve stavební jednotce následuje vyjmutí 3D výtisků, kdy nespečený prášek je odsáván k recyklaci. Recyklovatelnost závisí na použitém 3D tiskovém plastu. Pro plast HP PA 12 se používá 20 % nového prášku a 80 % použitého prášku. Pro HP PA 11 a HP PA 12 GB lze recyklovat pouze 70 % prášku. Počet cyklů pro recyklovatelnost závisí na doporučeném rozsahu výrobce prášku [22].

Firma HP Inc. je v České republice zastoupena firmou 3Dees Industries s.r.o. Kromě základního příslušenství k 3D tisku metodou MJF nabízí 3Dees i pískovačku přizpůsobenou pro pískování 3D vytištěných dílů metodou MJF, použitým typem je ITB 120 RB. Opískování dílů je nutné pro odstranění nespečeného prášku z povrchu 3D tištěných dílů, protože podtlak vzduchu při odsávání nespečeného prášku nemá tak velkou sílu [23].

Provoz zařízení pracující s práškem nese s sebou i rizika. Pro ochranu zdraví je obsluha 3D tiskárny povinná používat rukavice, brýle a mít zakryté dýchací cesty. Při smíchání velice drobných částic prášku se vzduchem může hrozit i nebezpečí výbuchu. Z tohoto důvodu je eliminován vznik statické elektřiny a všechny části 3D tiskárny jsou dokonale uzemněny. Po každém 3D tisku či práci na procesní stanici je nutné provést čištění. Dle předpisů výrobce by se 3D tiskárna měla nacházet nejlépe v oddělené místnosti, tím se zabrání kontaktu s kouřem, s výparů z svařování, vibracemi a dalším nežádoucím účinkům. Dále pro zaručení stejné kvality 3D tisku je nutné provádět kalibraci v předepsaných intervalech [23].

3D tiskárna HP Jet Fusion 4200 nabízí 3D tisk ve 4 různých režimech. Ale pokud se zvolí plast od HP, je pro zvolený plast doporučeno použít i doporučený 3D tiskový režim. Použitý 3D tiskový režim ovlivňuje konečné vlastnosti 3D výtisků.

Balanced

3D tiskový režim Balanced lze přeložit jako „vyrovnaný“, je možné použít pro všechny 3D tiskové plasty dodávané firmou HP, jimiž jsou PA 11, PA 12 a PA 12 GB. Režim se zaměřuje na vzhled, rozměrovou přesnost a mechanické vlastnosti. 3D výtisk má pak vlastnosti vzniklé kompromisem uvedených zaměření. Přibližná doba 3D tisku při úplném využití celého prostoru je 15 hod [22].

Mechanical

3D tiskový režim mechanical lze přeložit jako „mechanický“, je zaměřený na mechanické vlastnosti 3D výtisku. 3D výtisky tisknuté tímto režimem mají nejlepší houževnatost, tvárnost a pevnost. Při 3D tisku režimem mechanical je dodáváno nejvíce energie ultrafialovým zářením. Lze použít pro 3D tiskové plasty HP PA 11 a PA 12. Lepší mechanické vlastnosti vykazuje 3D výtisk z HP PA 11 [22].

Cosmetic

3D tiskový režim cosmetic lze přeložit jako „kosmetický“. Tento režim je zaměřený na vzhled a kvalitní povrch 3D výtisku. Oproti 3D tiskovému režimu mechanical je dodáváno nejméně energie, proto jsou 3D výtisky méně zkroucené, smršťené atd. Režim cosmetic je doporučován pouze pro HP PA 12 [22].

Fast

3D tiskový režim fast lze přeložit jako „rychlý“. Podle názvu je jeho cílem snížit výrobní čas 3D tisku i náklady. Režim fast se skládá pouze z jednoho kroku. Nanášená je pouze absorpční látka – fusing. Druhý krok, nanášení krycí látky – detailing je vynechán. Vynechání druhého kroku zrychluje dobu 3D tisku a šetří krycí látku. Nevýhodou vynechání druhého kroku je, že fusing tryskami protéká téměř neustále absorpční látka až na dobu, kdy trysky přejíždí nad nově nanesenou vrstvou. Z tohoto důvodu je při častějším používání režimu fast nutné provádět častější servis 3D tiskových hlav. Vynechání nanášení detailingu způsobuje menší přesnost ohraničení 3D výtisku v tištěné vrstvě, tím se snižuje rozměrová přesnost

3D výtisků. Režim fast je doporučován pro materiály HP PA 11 a HP PA 12. Při použití fast režimu na HP PA 11 mají 3D vytištěné díly nejlepší odolnost proti dynamickému zatížení. Pokud se na 3D tisk pospíchá, je doporučena kombinace režimu fast s rychlejší dobou chladnutí [22].

3D tiskové plasty jsou semikrystalické, nejčastěji PA. Doba chladnutí bude mít vliv na tvorbu krystalické fáze. S delší dobou chladnutí procento krystalické fáze přibývá až do teploty zasklení. HP Jet Fusion 4200 nabízí možnost chladnutí v režimech Natural, Slow a Fast. Pro možnost rychlého chladnutí, fast chlazení probíhá v procesní stanici. 3D výtisky spolu s nespečeným práškem chladnou ve stavební jednotce.

Natural (Přírodní)

Přírodní chlazení není nijak urychlováno. Doba chladnutí závisí na využití 3D tiskového prostoru. Na základě toho 3D tiskárna odhadne dobu potřebnou pro zchladnutí. Při úplném využití celého prostoru je doba chladnutí přibližně na 46 hod. Pro přírodní chlazení není potřeba procesní stanice, avšak pro recyklaci prášku ano [22].

Slow (Pomalý)

Pomalá doba chladnutí spočívá v ponechání 3D výtisků ve stavební jednotce déle, než je na odhadovanou dobu přírodního chlazení. Tím je teplota 3D výtisků nižší než teplota přípustná pro vyjmutí. Cílem pomalé doby chladnutí je zajistit největší přesnost 3D výtisků. Doporučený čas pomalého chladnutí je přibližně dvojnásobný než pro přírodní chladnutí.

Fast (Rychlý)

Rychlé chlazení probíhá v procesní stanici. Podstatou je zakrytí prostoru stavební jednotky a připojení odsávání. Nespečený prášek je odsáván a dopravován k recyklaci. Odsávání je připojeno do horní části stavební jednotky. V této části byl 3D tisk dokončen jako poslední a 3D výtisky mají stále vysokou teplotu. Z tohoto důvodu je doporučeno začít rychlé chlazení nejdříve po 3–4 hodinách od dokončení 3D tisku. Prvně je odsán prášek nejdále od 3D tištěných dílů. Tento prášek není ovlivněn tolik teplem, které ho drží u sebe. Postupným odsáváním je zmenšována vrstva prášku, která brání chladnutí 3D vytištěných dílů. Při úplném využití celého 3D tiskového prostoru je doba rychlého chladnutí přibližně 10 hod. Nevýhodou rychlého chladnutí je menší podíl krystalické fáze, který ovlivní vlastnosti 3D výtisků [22].

Pro 3D tisk plastových vstřikovacích vložek bylo použito vždy přírodní chladnutí.

3D tisk jednoho 3D modelu na HP Jet Fusion 4200 je ekonomicky velmi nevýhodný, doporučení je maximálně využít 3D tiskový prostor. Z tohoto důvodu byly vstřikovací vložky vždy 3D tisknuty spolu s dalšími výrobky. Orientace a umístění vložek bylo vždy podle nastavení uvedené dále v této kapitole [22].

7.2 3D tiskový plast – HP

Plastový prášek je dodáván v kontejnerech o rozměrech 600 × 300 × 302 mm. Plnění kontejneru recyklovaným práškem z procesní stanice je vidět na Obr. 24 vpravo. Vzhledem k ceně všech zařízení je doporučeno používat k 3D tisku originální prášek, jenž nabízí přímo HP nebo firmy doporučené HP. Ve spolupráci HP s německou firmou Evonik Industries AG byl vyvinut termoplastický elastomer (TPE Thermoplastic elastomer, termoplast s vlastnostmi elastomeru) pod označením HP 3D High Reusability TPA. HP dále spolupracuje s německými firmami Basf SE, Lehmann & Voss & Co. KG, francouzskou firmou Arkema S. A. a dalšími. Vzhledem k množství nabízených prášků byl výběr omezen pouze na prášek nabízený HP, běžně používané jsou HP PA 11, HP PA 12 a HP PA 12 GB. HP poskytuje několik listů, podle nichž si zákazník může vybrat ten nevhodnější prášek pro své 3D tištěné díly. Z nabízených podkladů lze materiály popsat následovně [22]:

- HP PA 11**
- Houževnatý, tvárný,
 - Vhodný pro 3D tisk detailů,
 - Nejlépe recyklovatelný,
 - Vhodný pro mechanicky namáhané součásti,

- HP PA 12**
- Vyvážené vlastnosti,
 - Vhodný pro univerzální použití,
- HP PA 12 GB**
- Tuhý, rozměrově přesný, teplotně odolný,
 - Plněn ze 40 % skleněnými kuličkami.
 - Vhodný pro kontakt s teplem, 3D tisk nástrojů.

Relativní srovnání prášků je shrnuto do Tab. 3. Pro srovnání byla použita barevná výplň. Zeleně je reprezentováno nejlepší umístění, následuje oranžové a nejhorší umístění je červenou barvou.

	Teplotní odolnost	Rozměrová přesnost	3D tisk detailů	Drsnost povrchu	Rovinnost	Tuhost	Tažnost
HP PA 11							
HP PA 12							
HP PA 12 GB							

Tab. 3 – Relativní hodnocení prášků pro 3D tiskárnu HP Jet Fusion 4200 dle výrobce 3D tiskárny [22]

Vlastnosti prášku od HP mají podobně rozdělené vlastnosti jako pryskyřice od Formlabs uvedené v Příloze č. 1. HP PA 11 se od ostatním práškům odlišuje stejně jako Grey Pro Resin od ostatních pryskyřic. Použitím HP PA 11 lze také očekávat delší životnost a nižší cenu, ale zase na úkor rozměrové přesnosti, teplotní odolnosti atd. Z těchto důvodů stejně jako Grey Pro Resin nalezne uplatnění při snaze dosáhnout co největší životnosti vstřikovací vložky za cenu přesnosti atd. Prášek HP PA 12 lze analogicky podle vlastností srovnat s pryskyřicí Rigid 10K Resin. Podobně lze přirovnat HP PA 12 GB k High Temp Resin. Volba prášku HP PA 12 by byla univerzálním řešením. Rozdíl mezi HP PA 12 a HP PA 12 GB je ve složení prášku. HP PA 12 GB je tvořen ze 40 % skleněnými kuličkami. Zde vzniká jistá analogie spíše s Rigid 10K Resin, který je také plněn sklem. Při porovnání spolupracujících firem s Formlabs tvoří Rigid 10K Resin většinu. Digital ABS používaný v PolyJet 3D tiskárnách má bohužel dominantní použití pro 3D tisk vstřikovacích vložek. Nelze ho tak porovnat s dalšími plasty.

Výzkum použití jednotlivých prášků a vliv na vybrané vlastnosti vložky by byl jistě zajímavý, avšak není v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce. Na základě předběžného testování jsou všechny prášky schopné obstát při vstřikování. Práškem pro 3D tisk vstřikovacích vložek byl zvolen HP PA 12 GB. Důvodem je doporučení HP použít HP PA 12 GB pro výrobu nástrojů, čímž jsou i vstřikovací vložky. Dále HP doporučuje použít HP PA 12 GB pro aplikaci, kde dochází k dlouhodobějšímu teplotnímu zatížení. Dalším důvodem je plnění prášku sklem stejně, jako je plněna nepoužívanější pryskyřice pro 3D tisk metodou fotopolymerizace. Vliv plnění sklem na vlastnosti vstřikovacích vložek nebyl analyzován. Vlastnosti HP PA 12 GB jsou uvedeny v Tab. 4. Uvedené vlastnosti jsou pouze přibližné pro vyrovnaný režim 3D tisku a přírodní doby chladnutí. Pro 3D tisk všech vložek byl použit pouze vyrovnaný režim.

Vlastnosti	Podmínky testování	Metoda testování	Hodnota	Jednotka
Všeobecné				
Teplota tání prášku	Měřeno pomocí DCS	ASTM D3418	186	°C
Velikost částic		ASTM D3451	58	µm
Objemová hmotnost prášku		ASTM D1895	0,47	g/cm ³
Hustota		ASTM D792	1,3	g/cm ³
Mechanické				
Pevnost v tahu XY		ASTM D638	30	MPa
Pevnost v tahu Z		ASTM D638	30	MPa
Modul pružnosti v tahu XY		ASTM D638	2 800	MPa
Modul pružnosti v tahu Z		ASTM D638	2 900	MPa
Prodloužení při přetržení XY		ASTM D638	6,5	%
Prodloužení při přetržení Z		ASTM D638	6,5	%
Vrbova houževnatost	Izod 3,2 mm; 23 °C	ASTM D638	2,7	kJ/m ²
Teplotní				
Teplotní deformace Z	0,45 MPa, metoda A	ASTM D256	173	°C
Teplotní deformace Z	1,82 MPa, metoda A	ASTM D648	121	°C

Tab. 4 – Vlastnosti HP PA 12 GB [24]

Vlastnosti v Tab. 4 jsou ovlivněny natočením dílu při 3D tisku. Vrstva je nanášena ve směru osy Z. Oproti směrům rovnoběžných s podložkou jsou vlastnosti ve směru nanášení vrstvy, kolmo na podložku, lepší.

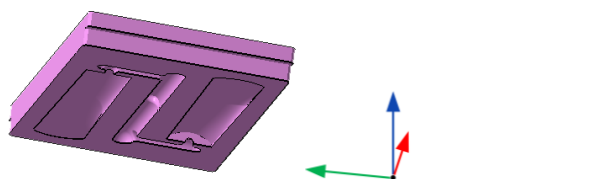
7.3 Výrobní postup

Virtuální 3D modely vstříkovacích vložek byly vždy vytvářeny v softwaru NX ve verzi 1980 od americké firmy Siemens Digital Industries Software, která je dceřinou firmou mezinárodní firmy Siemens AG. Následně byly modely převedeny vždy do formátu STL s nejmenší dovolenou délkovou a úhlovou tolerancí z důvodů uvedených v Tab. 2. Délková tolerance byla vždy 0,0025 mm a úhlová tolerance 1°. Slicer pro vytvoření programu 3D tisku byl použit software Netfabb od mezinárodní firmy Autodesk Inc. Dále 3D tiskárna MultiJet Fusion 4200 pracuje se softwaru Material Build Processor od belgické firmy Materialise a Siemens NX AM od firmy Siemens Digital Industries Software. Důvodem použití Netfabbu je přehledné uživatelské prostředí. Kromě STL formátů slicery zpracují 3D modely ve formátech OBJ, WRML 2.0 a 3MF. Formátem 3MF by HP chtěl nahradit nedostatky formátu SLS. Příprava 3D tiskárny byla vždy dle manuálu výrobce. 3D tisk probíhal podle principu popsaného v 4.3 podkapitole – Spékání práškové vrstvy. Pískování, postprocesing byl vždy proveden podle manuálu výrobce a s max. pečlivostí na odstranění nespečeného prášku.

Umístění a natočení vložek v 3D tiskovém prostoru

Nejvíce kvalitu vstříkovaných vložek ovlivní umístění a natočení v 3D tiskovém prostoru. Vhodné umístění a natočení má vliv na povrchové vlastnosti, vnitřní pnutí 3D výtisků atd. Z úsporných důvodů nebyly vložky 3D tisknuty nikdy samostatně. Ostatně na MJF 3D tiskárnách používaných jinde není z hlediska úspor zpravidla spuštěn 3D tisk jen pro jeden malý 3D tištěný díl. Vyvážení 3D tiskového prostoru bylo vzhledem k rovnoměrnosti nanášení látek (fusing a detailing) provedeno podle doporučení výrobce. Takové uspořádání bylo provedeno v Netfabbu podle předdefinovaných funkcí, avšak je zde možnost umístit vložky do optimálního prostoru. Největší přesnosti vždy dosahovaly vložky umístěné uprostřed 3D tiskového prostoru. Je to způsobené tím, že 3D tištěné díly uprostřed chladnou později. Chladnutí uprostřed je nejrovnoměrnější. Dílům, které jsou blíže u stěny, hrozí, že ta část, která je u stěny blíže, zchladne rychleji, než část dílu blíže ke středu, tím dochází k nerovnoměrnému ochlazení. Zároveň bylo vždy dbáno na to, aby poloha ostatních dílů vůči vložkám byla rovnoměrná a v dostatečné vzdálenosti od vložek.

Umístění je pro MJF metodu 3D tisku jiné než pro metody fotopolymerizace a tryskání materiálu. Natočit vložku nelze tak, aby taveniny proudily ve směru nanášení vrstvy, jako je tomu u tryskání materiálu. Jak u metody tryskání materiálu, tak u metody fotopolymerizace nelze umístit vložku přímo na podložku ani není možné ji natočit tak, aby zůstala rovnoběžně s podložkou. Důvodem je, že spečený prášek (část 3D výtisku) má větší hmotnost než nespečený prášek. Pokud by vložka byla umístěna rovnoběžně s podložkou, propadávala by se nespečeným práškem. Tím by další vrstvy byly tvořeny výše a nedošlo by ke spečení s předchozími. Pro zajištění kvality 3D tištěných dílů je doporučeno výrobcem 3D tištěné díly natočit. Zde platí pravidlo o natočení podobné pro 3D tisk metodu fotopolymerizace s tím rozdílem, že pro 3D tisk metodou MJF by se 3D tištěný objem od podložky neměl zmenšovat, ale zvětšovat. Napřed by měla být spečena nejmenší část 3D tištěného objemu a postupně na objemu přidávat. Tím malý objem tvoří v prášku pevný základ a je možné 3D tisknout zbývající objem dílu s menším rizikem, že dojde k posuvu 3D tištěného dílu. Při 3D tisku se osvědčilo stranu s detaily tisknout směrem k podložce. Detaily 3D tištěného dílu tvoří pevnější základ než rovná plocha. Zároveň je takové natočení doporučeno s ohledem na odvod tepla. Nejlepší kvality 3D tisknutých vložek se docílilo při natočení zobrazeném na Obr. 25.

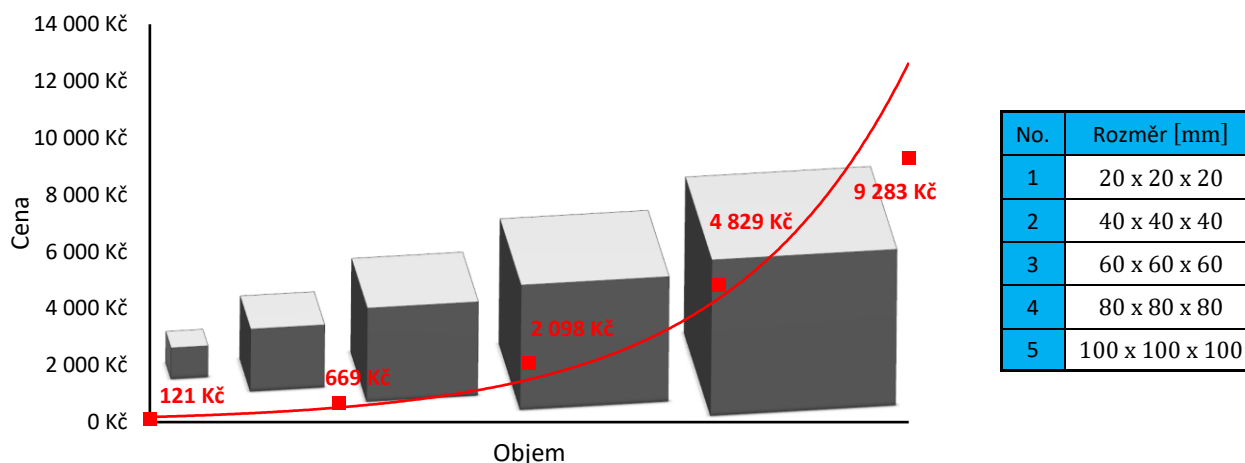


Obr. 25 – Umístění a natočení vstříkovacích vložek při 3D tisku

Úhly natočení vložek se pohybovaly v každé ose přibližně v rozmezí 10–15°. Pokud se pevné a pohyblivé vložky 3D tiskly společně, vždy byly vzájemně natočené. Zároveň byly umístěny blízko sebe a tím bylo zaručeno stejné chladnutí. Vliv umístění a natočení na přesnost 3D tištěného dílu metodou MJF by byl na samostatný výzkum, z hlediska stanoveného cíle práce není v mých možnostech ho realizovat. Z tohoto důvodu bylo vždy pro 3D tisk vložek použito umístění a úhel natočení uvedené výše. Nastavení je podepřeno doporučením výrobce a dále pak zkušenostmi s 3D tiskem.

7.4 Cena 3D tisku

Cena 3D tisku je důležitou hodnotou. Pro 3D tisk je typická větší výhodnost pro malý počet vyráběných kusů, která s přibývajícím počtem vyráběných kusů klesá. I když je 3D tisk výhodný pro malý počet kusů, výroba 3D tištěných dílů být levná nemusí. Při 3D tisku metodou MJF se spotřebovávají kromě prášku i nanášené látky. Při 3D tisku se lze omezit pouze na nanášení fusing a vynechat nanášení detailing agentu za účelem úspory. Bohužel je tomu i za cenu větší přesnosti. S ohledem na požadavek 3D tisknout přesné vstřikovací vložky nelze použít rychlý 3D tiskový režim. Cena 3D tisku v závislosti na 3D tištěném objemu dílu je zobrazená grafem na Obr. 26. 3D tištěným dílem je krychle uvedených rozměrů v tabulce na Obr. 26 vpravo. Uvedená cena zahrnuje spotřebu prášku, nanášených látek, spotřebu elektrické energie 3D tiskárny, opotřebení 3D tiskárny, sazbu obsluhy atd. Body v grafu na Obr. 26 představují cenu jednotlivých krychlí. Proložení cen udává závislost ceny 3D tisku na objemu tištěného dílu.



Obr. 26 – Cena 3D tisku metodou MJF v závislosti na objemu

Odlišnost 3D tisku od ostatních technologií lze shrnout následovně. 3D tisk snadno a levně vyrábí detaily výrobků oproti tvářecím a substantivním technologiím, kde výroba menšího detailu na výrobku znamená prodražení výroby. Opakem je 3D tisk velkých, objemnějších výrobků, pro jejichž výrobu je 3D tisk drahý.

Tento důležitý poznatek o 3D tisku bude rozhodující při návrhu vstřikovací formy. Snahou bude minimalizovat objem vložky, který se vyrábí 3D tiskem, tím bude výroba vstřikovací vložky výrazně levnější. Na Obr. 23 vpravo je prezentována vstřikovací vložka vyrobená na PolyJet 3D tiskárně. Pokud by vstřikovací vložka byla tenčí, jistě by pro 3D tisk bylo potřeba nanášet méně plastových kapiček a celková cena vložky by byla jistě levnější.

8 Příprava vstřikování do 3D tištěných plastových vložek

Příprava vstřikování byla rozdělaná na 3 části. V první části byl zvolen vstřikovaný plast. Při výběru byla zohledněna rešerše provedená v 2. kapitole – Plasty a dosavadní poznatky shrnuté v 5. kapitole Stávající vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Ve druhé části kapitoly je popsán vstřikolis, na němž se bude uskutečňovat vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Jedná se o vstřikolis, který bylo vzhledem k mým možnostem možné použít. Třetí část se věnuje vstřikovací formě. Na trhu není dostupná žádná forma zaměřená na vstřikování do 3D tištěných vložek. V rešerši stávajícího řešení vstřikování do 3D tištěných plastových vložek byly použity různé konstrukce forem lišících se podle použitého vstřikolisu. Při návrhu nové vstřikovací formy budou využity nejen stávající konstrukce forem pro vstřikování do 3D tištěných plastových vložek, ale i poznatky z MJF 3D tisku. Tento návrh bude velmi rozhodující pro uplatnění MJF metody k 3D tisku vstřikovacích vložek. Zároveň bude-li návrh konstrukce zdařilý, lze ho využít i pro vstřikovací vložky vyráběné jakýmkoliv metodami 3D tisku.

8.1 Vstřikovaný plast

PP má jedny z nejvíce univerzálních vlastností pro vstřikování. Přednostmi jsou např. nízký bod tání, dobrá viskozita, vysoká dovolená smyková rychlost atd. Pro vstřikování do vložek 3D tištěných metodou fotopolymerizace a tryskání materiálu byl PP vybrán velmi často, viz Příloha č. 1 a Příloha č. 2. Dle grafu na Obr. 7 se jedná o nejpoužívanější polymer v EU za rok 2019, a proto byl vybrán jako vstřikovací materiál právě PP.

Z dostupných možností byl zvolen PP 100-GB25 od britské nadnárodní firmy INEOS Group Ltd. GB 25 v názvu znamená, že PP je plněn z 25 % skleněnými kuličkami. Plast je tedy ovlivněn přísadami, které mají vliv např. na životnost vstřikovacích vložek atd., v této práci nebude porovnáváno s jiným vstřikovaným plastem. PP 100-GB25 je čiré transparentní barvy, a tak budou případné vady na vstřikovaných dílech dobře viditelné, např. vzduchové bubliny, obtisk drsnosti povrchu vložky atd.

Vlastnosti PP 100-GB25 jsou uvedeny v Příloze č. 3. Příloha je rozdělena na hodnoty garantované výrobcem a testované, nezaručené. Nezaručené hodnoty byly testovány dříve a v současné době již nejsou garantované. Důvodem je finanční náročnost obnovovat materiálové zkoušky. Oproti jiným výrobcům INEOS poskytl tyto informace, které lépe pomohly nalézt optimální parametry vstřikování. Proces vstřikování bude simulován programem Moldex3D. Bohužel PP 100-GB25 není součástí uživatelské knihovny. Cílem virtuálních simulací v této práci je co nejvíce se přiblížit reálnému vstřikování. Aby bylo možné PP 100-GB25 v programu Moldex správně simulovat, bylo zapotřebí stanovit matematické modely, jejichž popis je v Příloze č. 3. Jak pro simulace, tak pro vstřikování všech dílů v této práci je použit pouze PP 100-GB25.

8.2 Vstřikovací lis

Vstřikolisem byl vybrán 470 E 1000-290 G zobrazený na Obr. 16 vlevo a vpravo jsou uvedeny základní parametry. Výrobcem je německá firma ARBURG GmbH + Co KG založené v roce 1923 v Loßburgu ve Schwarzwaldu Arthurem Hehlem. První dvě písmena jména zakladatele spolu s kombinací města založení od roku 1943 udávají jméno firmy. Roku 1954 vyrábí ARBURG pro vlastní potřebu malý vstřikolis na výrobu zástrček blesků a pro velkou oblibu roku 1956 rozbíhá sériovou výrobu. V současné době je ARBURG z předních výrobců vstřikolisů [25].



Parametr	Hodnota	Jednotka
Vstřikovací jednotka	290	EUROMAP
Průměr šneku	35	mm
Max. objem vstřikovaný objem	144	cm ³
Max. hmotnost pohyblivé části formy	760	kg
Max. hmotnost pevné části formy	380	kg
Max. vstřikovací tlak	200	MPa
Upínací plocha montážních desek	600x600	mm

Obr. 27 – Vstřikovací lis 470 E 1000-290 G včetně základních parametrů [25]

Vybraný vstřikolis je plně automatický a vhodný pro sériovou výrobu. Na horní ploše pevné montážní desky je připravena plocha pro upevnění robota. O řízení stroje se stará systém s označením SELOGICA. Vstřikolis je horizontálního provedení a homogenizace plastu ve vstřikovací jednotce je zajištěna šnekem. Vstřikovací tryska má zarovnané čelo. Písmenko E v názvu znamená electric. Vstřikolis je plně elektrický. Všechny pohyby jsou zajištěny servomotory. Vstřikovací jednotka má 5 vyhřívaných válců a 1 vyhřívání pod násypkou [18].

8.3 Modulární vstřikovací forma

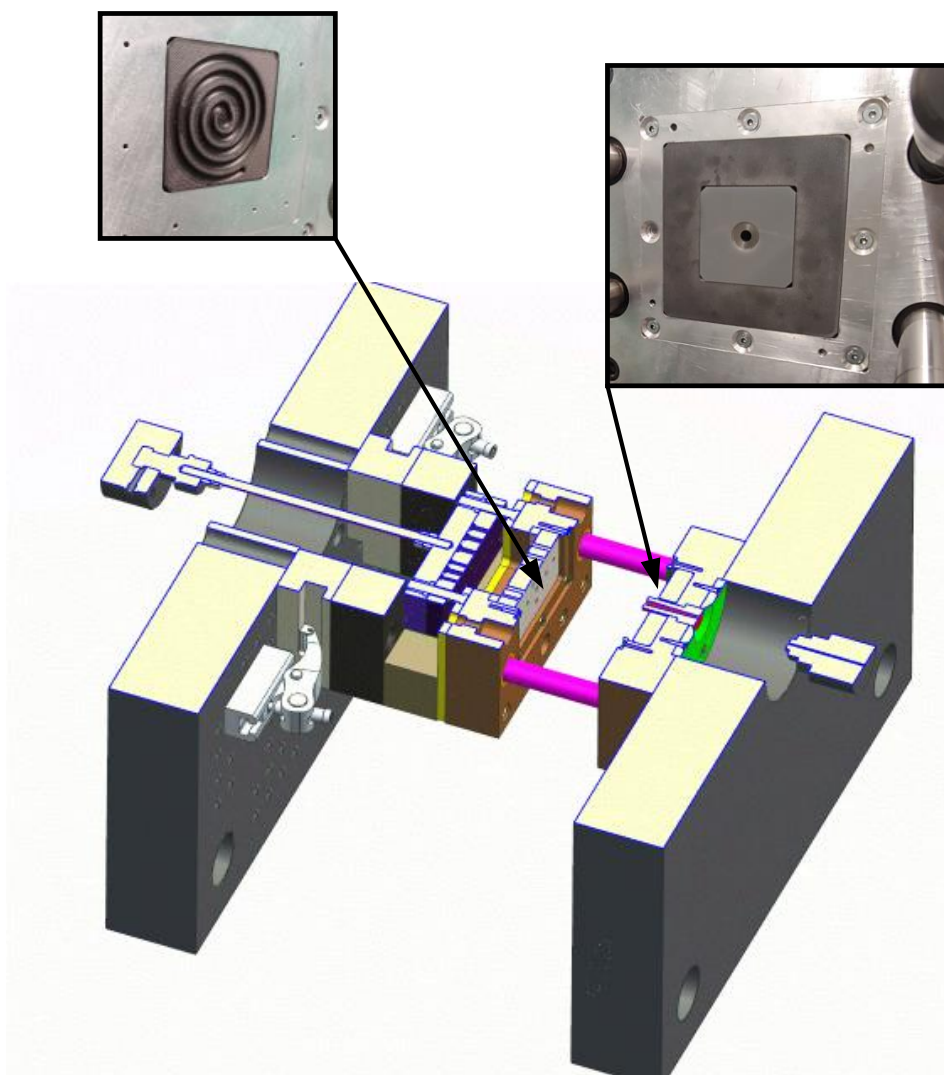
Návrh vstřikovací formy výrazně rozhoduje o uplatnění 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek. Správně navrženou formu lze uplatnit nejen pro 3D tisk vložek metodou MJF, ale i pro vložky 3D tištěné jinými metodami. V úvodu práce byl 3D tisk zvolen z důvodu očekávaného snížení výrobní ceny vložek. Vstřikovací forma byla rozdělena na rám a vložku. Stejný typ konstrukce používají i stávající řešení zabývající se vstřikováním do 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek, poznatky byly shrnuty v 5. kapitole a více jsou popsány v Příloze č. 1 a Příloze č. 2. Rozdělení formy na vložku a rám je nejen z technických důvodů, ale i výrazně snížilo cenu 3D tisku. Vlastnosti MJF 3D tisku byly prozkoumány v 7. kapitole a v závěru kapitoly byl proveden názorný příklad závislosti ceny na objemu 3D tisku. Na základě provedených rešerší je cílem návrhu formy minimalizovat 3D tištěný objem. Nejenže objemnější 3D tisk prodražuje výrobu, ale zároveň se snižuje i přesnost 3D výtisků. Nejúspornější by bylo 3D tisknout pouze dutinu vložky. Tak by byla maximálně využita výhoda 3D tisku před ostatními technologiemi, a to snadná a levná výroba tvarově složitých částí. [26]

Dalším požadavkem kladeným na návrh vstřikovací formy je rychlá a snadná výměna vložek. Rozhodně nesmí být kvůli ní sundávaná celá forma ze vstřikolisu. Tím může být opotřebovaná vložka rychle vyměněna. Zároveň v kusovém či sériovém vstřikování narůstá potřeba rychle přestavit formu a začít („najat“ na) další vstřikování. Univerzálnost formy zajišťují vložky. Jelikož pro výrobu vložky bude použit 3D tisk, není nutné rozdělovat vložku na dvě desky. Rámová část formy je velice podobná konvenčně používané dvoudeskové formě popsané v 3.3 podkapitole – Vstřikovací forma a zobrazené na Obr. 10. Zároveň je rámová část přizpůsobena pro upevnění na vstřikolis 470 E 1000-290. Tím se může odlišovat od rámových částí stávajících řešení vstřikování do 3D tištěných plastových vložek.

Zajištění základních požadavků na vstřikovací formu shrnutých v Tab. 1 bylo provedeno následovně. Udělení tvaru výstřiku bude zajišťovat pouze 3D tištěná plastová vložka. Zároveň se na vstřikovaný díl plně promítnou vlastnosti plastu HP PA 12 GB 3D tištěného MJF metodou. Držet funkční části bude zajišťovat pouze rám. Vést a středit pohybující se části formy bude převážně také zabezpečovat rám. Výjimkou jsou objemnější vložky, které svými rozměry přesahují pro ně určený objem. Další 4 požadavky bude vložka zajišťovat společně s rámem. Prvním požadavkem zajišťovaným společně je rozvod taveniny ze vstřikovací jednotky do dutiny. Vzhledem k mým možnostem lze použít pouze studenou vtokovou soustavu. Důvodem společného zajištění požadavku je, že plastová vložka není schopna dlouho setrvat v kontaktu s horkou tryskou vstřikovací jednotky stroje. Vstupní kanálek je vyroben v nakupované ocelové vtokové vložce. Další rozvod taveniny je zajištěn 3D tištěnými kanálky vložky. Zamrznutá studená vtoková soustava včetně popisu kanálků je zobrazena na Obr. 11. Druhým společným požadavkem je odvod vzduchu z dutiny vložky. Primárně závisí na 3D tištěné vstřikovací vložce. Dále by vzduch neměl být blokován rámem. Podobně je rozloženo i společné zajištění odvodu tepla. Posledním společným požadavkem je vyhození výstřiku z formy. Jak půjde výstřik z plastové 3D tištěné vložky vyjmout, závisí primárně na vlastnostech vložky. Při zkoušení plastových vložek se lze obejít i bez vyhazovačů a výstřik vyndat ručně. Pro lepší vyhození výstřiku jsou použity vyhazovače, uložené v deskách vyhazovače, viz Obr. 10, a vedeny částečně otvory ve spodní desce a primárně ve vložce.

Model navržené formy pro vstřikování do 3D tištěných plastových vložek je vidět v řezu na Obr. 28. Vstřikovací forma byla pro výzkum vyrobena. Fotografie upnutých vložek jsou přiloženy na vyrobené formě. Zároveň na Obr. 28 je zobrazen aktuální stav formy. Prezentovaná konstrukční varianta modulární vstřikovací formy není konečná. Vstřikovací forma je upravována pro účely dalšího výzkumu.

Na jedinečnost formy byla v roce 2022 podána přihláška k patentové ochraně, stále ještě je v procesu.



Obr. 28 – Modulární vstřikovací forma

Pohyblivá část vstřikovací formy je spojena s pohyblivou montážní deskou stroje pomocí upínek. Použití upínek je z důvodu středění pohybujících se částí formy. Při zavření formy jsou pohybující se části vystředěny pomocí kuželových středících kuželů (na Obr. 28 vyjmuty). Poté jsou pohyblivé části formy a stroje pevně spojeny utažením upínek. Vyhazovací systém stroje je vidět na Obr. 28. vlevo. Spolu s vyhazovacím systémem vstřikovací formy je spojen rychloupínkou. Hlavní deska vyhazovače je s ní spojena přes závitovou tyč, která je z každé strany utažena a zajištěna proti povolání dvojicí matic. Přidržovací deska je spojena s hlavní deskou vyhazovače pomocí šroubů. V přidržovací desce jsou vyvrtány otvory se zahlobením pro vyhazovače, které jsou z druhé strany podepřeny hlavní deskou. Vést desky vyhazovače je možné dvěma způsoby. První je použití plastové desky, která je umístěna mezi rozpěru a desky. Druhé, přesnější vedení desek vyhazovače je pomocí vodicích čepů. Čepy se umísťují do ocelové desky, na Obr. 28 zobrazené žlutě. Deska je spojena a vystředěna s hlavní deskou na pohyblivé straně pomocí kolíků. Zároveň je do desek vyhazovače umístěno pouzdro pro vedení s čepy. Vyhazovací desky se pohybují mezi hlavní deskou a rozpěrami. Rozměry je možné různě vytočit o 90°, jak je zobrazeno na Obr. 28, aby fungovaly jako koncový doraz vyhazovače v různé délce. Pohyb desek vyhazovače mezi rozpěrami a hlavní deskou definuje zdvih vyhazovačů. Hlavní desky jsou vedeny pomocí vodicích čepů, zobrazených na Obr. 28 růžovou barvou. Hlavní deska na pohyblivé straně je spojena s montážní deskou stroje pomocí šroubů. V hlavní desce je ocelová vtoková vložka (nakupovaná). Středění hlavní desky s montážní deskou stroje je pomocí středící desky zobrazené na Obr. 28 světle zeleně.

Nejdůležitější části modulární vstřikovací formy jsou zobrazeny v detailech na Obr. 28. Detail je zaměřen na místo pohyblivé a pevné formy, ve které jsou upnuty vstřikovací vložky. Vyplnit tento prostor lze dvěma přístupy. První přístup je ekonomicky nevýhodný. Spočívá v 3D tisku velké vstřikovací vložky,

kteřá vyplní celý prostor. Pokud je využit druhý přístup, hlavní cíl návrhu formy je ekonomicky příznivější. Je založen na myšlence minimalizovat 3D tištěný objem. Lze 3D vytisknout pouze část objemu a zbytek vypodložit. Prostor bude složen z 3D tištěné vložky s dutinou, kavitovou vložkou a vypodložovacími vložkami, které mají různý tvar. V detailu na Obr. 28 je vypodložovací vložka nahrazena rámečkem. Vložka s dutinou je pak umístěna dovnitř rámečku. Na Obr. 28 vlevo je rámeček z hliníku a na Obr. 28 vpravo je rámeček vyroben z plastu. Plastové 3D tištěné vložky postačí pro méně přesné složení prostoru. Pro přesnější vyplnění prostoru se používají obráběné hliníkové vypodložovací vložky, jež mohou být ve tvaru rámečku nebo mohou vypodložit pouze výšku prostoru či prostor z okrajů atd. Vypodložení krajní vložky jsou vidět na krajích Obr. 29.



Obr. 29 – Sestava jednoho modulu

Pro testování vstřikovacích vložek byly vyrobeny různé rozměry hliníkových vypodložovacích vložek. Složením různých vypodložovacích vložek se mění prostor, který musí vyplnit 3D tištěná plastová vstřikovací vložka, viz Obr. 29 tmavě šedě, druhá zprava. Poskládáním vyplňovacích vložek a vždy jedné kavitové vložky vzniká jeden modul. Množství a kombinace vypodložovacích desek určují rozměry kavitové vložky. Modulární vstřikovací forma tak nabízí několik modulů a podle principu vyplnění vnitřního prostoru se forma nazývá modulární. Podle potřebné velikosti dutiny se vybere nejbližší možný modul.

Vložky se upevňují rámečkem, který je přišroubován k hlavní desce pomocí zápustných šroubů. Přišroubovaný rámeček s další možností složení modulu je vidět v detailu vpravo na Obr. 28. Max. šířka vložek v místě rámečku je 115 × 115 mm (vnitřní rozměr rámečku). Pod rámečkem je maximální šířka 121 × 121 mm (v hlavní desce). Vzhledem k rádi v rámečku R4 a v hlavní desce R6 v kontaktu s vložkami je nutné srazit rohy krajních vložek na min. 4 × 4 a 6 × 6 mm. Tloušťka rámečku je 5 mm. Standardní výška vložek je 10 mm. V pohyblivé části modulární vstřikovací formy je možné sundat ocelový vypodložovací rámeček, který je umístěn pod ocelovou deskou, kterou prochází vyhazovače, a zároveň nese vložky. Sundáním rámečku je možné o jeho tloušťku 10 mm zvětšit hloubku prostoru pro vložky. Maximální hloubka v pohyblivé části je 20 mm. V pevné části modulární vstřikovací formy je možné sundat vypodložovací desku o tloušťce 20 mm. Maximální hloubka v pohyblivé části je 30 mm. Prostor v pevné části formy je omezen vtokovou vložkou, která je 18 mm silná a zasahuje až do dělicí roviny.

Pokud je požadavek vstřikovat díly širší, než je objem určený pro vložky, je možnost větší vložku umístit nad hlavní desku. Řešení spočívá v umístění ocelové desky, která zakryje hlavní desku a podepře plastovou vložku. Spolu s 3D tištěnou plastovou vložkou je pak připevněna k hlavní desce. Středění vložek je pak přes kužely, které jsou umístěné na vložce. Jedná se o řešení, které se stále testuje.

Přívod chlazení je ze dvou vzájemně na sebe kolmých stran. Do plastové vložky jsou přišroubovány přípojky, které jsou prostrčené skrze vyvrtané otvory v hlavní desce.

Oproti stávajícím řešením se ale modulární vstřikovací forma odlišuje. Stávající řešení připevňuje vstřikovací vložky převážně pomocí šroubů. Modulární vstřikovací forma nabízí tuto možnost pouze pro vložky, které jsou širší než pro ně určený prostor. Nevýhoda řešení přišroubovat vstřikovací vložku spočívá v dodržení rozměrů pro díry šroubů. Tím je zapotřebí 3D vytisknout větší objem, než který by byl nutný. Zároveň stávající řešení převážně střeďí vložky přes příliš vzdálené hrany, které ovlivní přesnost 3D tisku. Modulární vstřikovací forma nejen nabízí rychlou a snadnou výměnu vložek, ale zároveň je úspornější na 3D tisk vložek.

9 Konstrukce 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek

V předchozích kapitolách byl vybrán materiál a zvolena technologie vložek. Tato kapitola se zaměřuje na konstrukci vložek. Společně mají tyto 3 faktory zásadní vliv na konečné vlastnosti výrobku. Aby splňoval co nejlépe očekávané vlastnosti, je důležité se nezaměřovat odděleně pouze na jeden faktor, ale zohledňovat všechny současně. Vložky budou umístěné v modulární vstřikovací formě, popsané v 8.2 podkapitole – Modulární vstřikovací forma a zobrazené na Obr. 28. Výhodou navržené formy je minimalizace 3D tištěného objemu. Toho lze docílit, pouze pokud prostor určený pro vložky bude tvořen kavitovou vložkou a vypodložovacími vložkami. Avšak aby bylo možné vyplnit tento prostor, je důležitá přesnost vložek. Mnohem přesnější jsou vypodložovací vložky vyrobené obráběním z hliníku v toleranci vnějších délkových rozměrů 0 až $-0,1$ mm. Výšková tolerance byla předepsána 0 až $+0,1$ mm. Uvedené tolerance byly přezkoumány posuvným měřítkem s přesností měření $\pm 0,05$ mm a všechny obráběné hliníkové desky měly vnější rozměry vyrobené v toleranci.

Plastové vložky byly 3D tisknuty podle postupu uvedeného v 7.3 podkapitole – Výrobní postup. I přestože byl zvolen postup, s kterým se dosahovalo nejvyšších přesností, přesnost 3D tištěných vložek byla menší než obráběných. Výsledek byl předpokládaný, viz 5.3 podkapitola – Shrnutí poznatků. Avšak pro používání 3D tištěných vložek bylo zapotřebí stanovit výrobní rozměry. Oproti obrábění nelze výrobě 3D tiskem předepsat na výkres tolerance. Všechny rozměry musí být definované modelem. Nelze tak např. předepsat rozměr X v toleranci 0 až $+0,1$ mm, ale musí být vymodelován rozměr X delší např. o $0,05$ mm. Tím je předpoklad, že rozměr X bude vyroben ve vyžadovaných tolerancích. Jedná se ale pouze o příklad. Výsledný rozměr bude záviset na více vlivech, např. metoda 3D tisku, natočení při 3D tisku a další. Kurčení výrobních rozměrů bylo provedeno měření na 20 vložkách. Všechny vložky byly 3D tisknuty podle stejného modelu, a to v největších možných délkových rozměrech prostoru modulární vstřikovací formy (121×121 mm).

Výška pro upnutí vložky byla zvolena 10 mm. Délka vložek byla měřena na všech 4 hranách a tloušťka na vybraném místě. Označená místa měření včetně naměřených hodnot jsou uvedena v Příloze č. 4. Měření bylo provedeno posuvným měřítkem s přesností měření $\pm 0,05$ mm. Naměřené délkové rozměry byly vyhodnocovány v toleranci $\pm 0,2$ mm. V Příloze č. 4 jsou přesně vyrobené rozměry vyznačené zeleně a rozměry přesahující toleranci červeně. Z 80 měřených délek bylo vyrobeno přesně 22, což odpovídá 27,5 %. Mimo toleranci bylo vyrobeno 7 délek, což odpovídá 8 %. Celková průměrná délka hrany vložky je 120,98 mm.

Celková přesnost vnějších délkových rozměrů vložek je velmi dobrá. Korekci vložek by nemuselo být nutné provádět. Nicméně je potřeba se zaměřit na případy, kdy délkový rozměr je větší, než je rozměr délky prostoru formy. Rozměry prostoru formy 121×121 mm byl vyroben v toleranci $0 + 0,1$ mm. Tím stanovená tolerance $\pm 0,2$ mm je nevyhovující. Při úpravě tolerance vložky na rozměr $121 + 0,1$ mm je počet délek přesahující toleranci 24, což odpovídá 30 %. Pouze 3 vložky mají všechny hrany vyrobené v nově stanovené toleranci. Výsledkem je, že by 17 vložkám musel být dodatečně upraven rozměr, např. broušením. Ačkoliv zabroušení hran např. pilníkem nepředstavuje zdlouhavou činnost, jedná se o dodatečnou úpravu, která prodlužuje výrobu. Výhodou 3D tisku je rychlost vyrobení výrobku. Ovšem pokud 3D tiskem nelze docílit přijatelné přesnosti, je zapotřebí nalézt kompromis mezi přesností a nutností brousit vložky. Na základě provedeného měření a s ohledem na úsporu času byly délkové rozměry vložek stanoveny na $120,8 \times 120,8$ mm. V této disertační práci nebyly stanoveny hodnoty, o kolik je potřeba zkrátit délku vnějších rozměrů vložky s ohledem na její rozměr. Např. tabulkové řešení by bylo jistě zajímavé, avšak není v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce. Téměř všechny vložky v této práci byly 3D tisknuty s vnějšími délkovými rozměry menšími o $0,2$ mm. Výjimkou byly vložky tvořící dutinu na pevné i pohyblivé straně. Tyto vložky měly vnější výrobní rozměr snížen pouze o $0,1$ mm. Důvodem snížení délky je minimalizace přesazení kavitových vložek. Podobně byla délka vložek v místě rámečku upravena ze 115 mm na 114,8 mm a pro přesnější kavitové vložky na 114,9 mm.

Podobně jak byly vyhodnoceny vnější délkové rozměry vložek, byla vyhodnocena i tloušťka vložky v toleranci $\pm 0,1$ mm, viz Příloha č. 4. Z 20 měřených tloušťek byly přesně vyrobeny 2, což odpovídá 10 %. Mimo toleranci bylo vyrobeno 9 délek, což odpovídá 45 %. Celková průměrná tloušťka vložky je 10,45 mm. Průměrná odchylka tloušťky vložky je 0,45 mm. I když byla přesnost tloušťky vložky vyhodnocena pouze

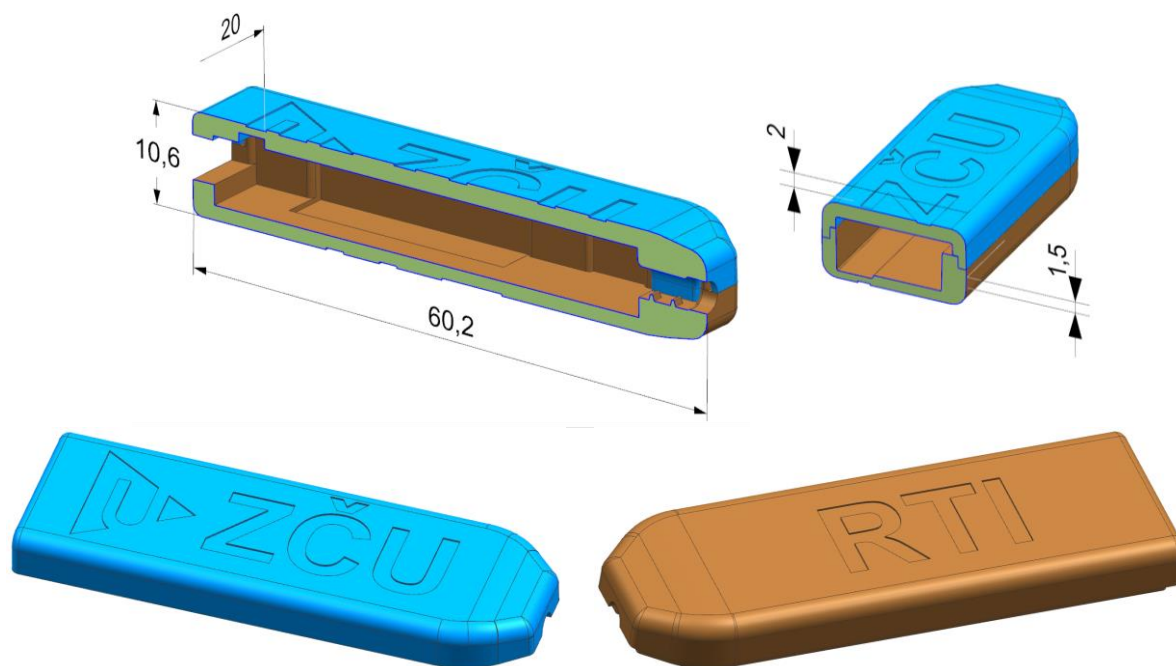
z 1 měřeného místa, je velmi malá. Rovinnost plochy vložky v dělicí rovině a rovnoběžnost této plochy vůči spodní dosedací ploše nebyla změřena. Na základě prvotního měření lze předpokládat, že tyto geometrické tolerance budou o dost vyšší, než jsou přípustné pro vložky vyrobené obráběním, rovnoběžnost nejvýše 0,1 mm.

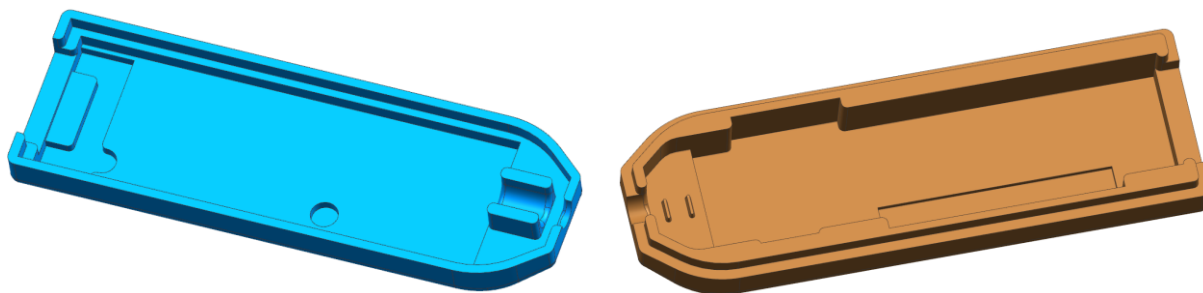
Výška vložky by měla být v ideálním případě taková, aby horní plocha vložky byla v rovině s hlavní deskou formy. Vzhledem k výrobní přesnosti 3D tisku ověřené měřením nelze takové přesnosti dosáhnout. V Příloze č. 1 a v Příloze č. 2 řešilo mnoho firem zabývajících se touto problematikou nepřesnost horní plochy vložky obráběním. Ovšem tím je celá výroba vložek závislá na další technologii. Aby byla zvýšena rovinnost a rovnoběžnost ploch, je nutné obrábět, někdy i brousit horní a spodní plochu vložky. Oproti broušení vnějších délek pilníkem se jedná o náročnější činnosti, které prodlužují výrobní čas vložky. Pokud je horní plocha vložky zarovnaná s horní plochou hlavní desky, je namáhání vložky malé. Jelikož celková průměrná výška vložky byla vyšší než výrobní rozměr, je pravděpodobné, že přesahující část plochy se mírně zdeformuje při zavření formy a horní plocha vložky se zarovná s horní plochou hlavní desky.

Cílem práce definovaným v úvodu je snížení výrobní ceny vstřikovacích vložek. „Výchozím bodem jsou dosavadní limity běžně používaných forem.“ Pro snížení výrobní ceny forem byla použita vložka a výroba 3D tiskem. Přidáním obrábění by sice byly vložky vyrobeny mnohem přesněji, avšak úplně by se vytratil smysl této práce. Z tohoto důvodu budou vložky v této práci vyráběny pouze 3D tiskem, případně broušeny pilníkem. Bez výrazných komplikací lze pilníkem zabrousit vnější délkové rozměry vložek. Úprava výšky vložky, včetně dodržení geometrických tolerancí rovinnosti a rovnoběžnosti je komplikovanější. Jedinou možností zůstává vyrobít horní plochy vložky přesahující dělicí rovinu. V příloze č. 1 tuto možnost vyžádalo Francouzské průmyslové technické centrum pro plasty a kompozity, které používalo rámeček. V příloze č. 2 je doporučeno firmou Stratasys provést přesazení celé horní plochy vložky nad dělicí rovinu o 0,2 mm. Možností, jak řešit menší přesnost 3D tisku, je více. Dalším krokem této práce je ověřit již používaná řešení, případně je upravit pro vložky 3D tištěné metodou MJF nebo přijít s vlastním řešením. K tomuto účelu bylo provedeno vstřikování na testovacím díle.

9.1 Testovací díl

Testovacím dílem pro vstřikování do 3D tištěných plastových vložek byl vybrán kryt elektroniky. V podélném směru krytu jsou různé otvory pro připojení kabelů. Vnitřní prostor krytu je vyhrazen pro umístění elektronických součástek. Obě poloviny krytu jsou spojeny přesahem vnitřní plochy částí krytů do stran. Kryt elektroniky včetně základních rozměrů v mm je zobrazen na Obr. 30.





Obr. 30 – Vstřikovaný díl – kryt elektroniky

Na Obr. 30 je pro přehlednost horní část krytu zobrazena modře a spodní část hnědě. Pohled na vnější stranu poloviny krytu je na Obr. 30 v prostřední části a ve spodní části je pohled na vnitřní stranu. Pohledovou stranou je vnější plocha. Zároveň byly vnější plochy využity pro umístění loga a zkratk. Na spodní polovině krytu byla umístěna zkratka RTI (Regionální technologický institutu), který kryty vyráběl. Logo Západočeské univerzity v Plzni spolu se zkratkou ZČU, jejíž součástí je RTI, je umístěno na horní polovině krytu.

Kryt elektroniky byl navržen pro vstřikování do kovové formy. Úkosy stěn jsou $0,5^\circ$. Velikost nejmenšího rádiu je 0,4 mm. Jako dělicí rovina byla zvolena čelní plocha, kterou jsou spojeny obě poloviny krytů. Takto navržená geometrie dílu nebyla pro vstřikování do plastové 3D tištěné vložky záměrně změněna. I když v 5. kapitole – Stávající vstřikování do 3D tištěných plastových vložek – byly shrnuty poznatky ze vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodami fotopolymerizace a tryskání materiálu. Důvodem je snazší nalezení odlišností při vstřikování do plastových 3D tištěných vložek vůči kovovým obráběným vložkám. Výzkum vlivu např. úkosů stěn, rádií, minimální tloušťky žebra atd. na životnost, zatečení vstřikovaného plastu atd. by byl jistě zajímavý, ale není v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce. Vyhazovače byly umístěny tak, aby tlačily do vnitřní strany poloviny krytu. Plastové vložky vyrobené 3D tiskem z HP PA 12 GB jsou zobrazeny na Obr. 31 vpravo. K porovnání vlastností plastových 3D tištěných vložek s konvenčními vložkami byly vyrobeny také vložky z hliníku (EN AW 6082) podle běžně používaných tolerancí pro obráběné vložky ve vstřikování, zobrazené na Obr. 31 vlevo.



Obr. 31 – Porovnání hliníkové vložky s plastovou vložkou pro vstřikování testovacího dílu

Vložky na pevné straně formy, pevné vložky, jsou na Obr. 31 umístěny v pozadí a jsou charakteristické otvorem $\varnothing 18$ mm uprostřed vložky pro ocelovou nakupovanou vtokovou vložku. V popředí jsou umístěny vložky upínající se do pohyblivé části formy, pohyblivé vložky. Otvory pro vyhazovače jsou vyrobeny značně nesymetricky. Při konstrukci byly využity již existující otvory ve spodní a přidržovací desce.

Takto rozvržené umístění vyhazovačů není vhodné. Vyhazovací síla by měla na výstřik působit rovnoměrně. Důvodem použití je nejen úspora, ale i odhalení nedostatků vložek a jejich porovnání.

Vnější délkové rozměry hliníkových vložek jsou 121×121 mm a v toleranci 0 až $-0,1$ mm. Pro plastové vložky jsou tyto rozměry $120,9 \times 120,9$ mm, vložky mající kavitu v obou částech formy. Výška plastové 3D tištěné vložky byla pro začátek zvolena 10 mm, stejná jako výška hliníkové vložky.

Vstřikování testovacího dílu

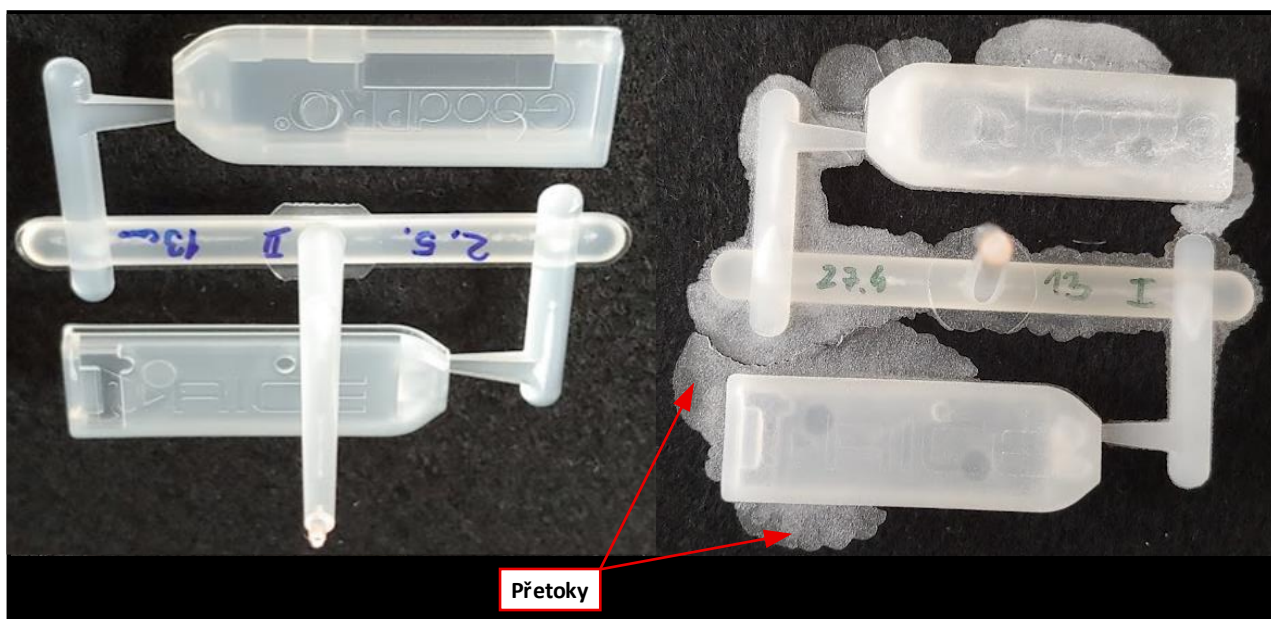
Začátky vstřikování do 3D tištěných plastových vložek doprovázela často vada tvorby přetoků. K vytvoření přetoků dojde tehdy, zateče-li vstřikovaný plast z dutiny nebo kanálků formy, vložky do dělicí roviny. Přeteklá část plastu přes hranu dutiny nebo kanálku do dělicí roviny se nazývá přetok. V případě přetečení plastu z kanálku není problém tak závažný, neboť se celá studená vtoková soustava bude vyhazovat. V případě vytvoření přetoku z dutiny je nutné problém řešit. Přetok představuje vzhledovou vadu na výstřiku a může omezovat vstřikovanému dílu plnit svou funkci. Problém s přetoky lze řešit odstřížením po vstřikování. Takové řešení je snadné a postačí pro kusovou výrobu. V sériové výrobě takové řešení představuje vynaložení značných nákladů a času. Druhé řešení tvorby přetoků je zaměřit se na příčinu vzniku a přetokům zabránit při vstřikování [9].

Vložky zobrazené na Obr. 31 byly vyrobeny s tolerancemi uvedenými výše. Za vstřikovacích podmínek uvedených v Tab. 5 bylo provedeno vstřikování do obou vložek.

Parametry	Hodnota	Jednotka
Objem dílů	6,23	cm ³
Celkový objem (včetně vtokové soustavy)	10,96	cm ³
Dávkovaný objem	18	cm ³
Sušení granulátu	–	min
Objem zpětné dekomprese	5	cm ³
Uzavírací síla	350	kN
Teplota pod násypkou	35	°C
Teplota na topném válci 1	210	°C
Teplota na topném válci 2	215	°C
Teplota na topném válci 3	220	°C
Teplota na topném válci 4	225	°C
Teplota na trysce	225	°C
Dávkování		
Rychlost otáčení šneku	25	m/min
Zpětný tlak	50	bar
Plnění		
Tlakové omezení	300	bar
Rychlost plnění	6	cm ³ /s
Dotlak		
Tlakové omezení	210	bar
Objem pro přepnutí	7,26	cm ³
Doba	10	s
Ostatní		
Doba chlazení	30	s
Doba otevření formy	5	s

Tab. 5 – Parametry vstřikování testovacího dílu, poprvé

Rozdíl mezi kvalitou obráběné hliníkové vložky a plastové vložky 3D tištěnou metodou MJF byl značný. Rozdílná kvalita vstřikovacích vložek výrazně ovlivnila i kvalitu vstřikovaných dílů. Výstřik vstřikovaný do hliníkové vložky je vidět na Obr. 32 vlevo a výstřik vstřikovaný do plastové vložky 3D tištěné metodou MJF je vidět na Obr. 32 vpravo. Jedná se o vstřikované díly, u kterých bylo upraveno logo na RICE a GoodPRO. Jiná úprava než loga provedena na dílech nebyla.



Obr. 32 – Porovnání výstřiků vstřikovaných do obráběné hliníkové vložky a plastové 3D tištěné metodou MJF

Rozdíl mezi výstřikem vstřikovaným do obráběné hliníkové vložky a výstřikem vstřikovaným do plastové vložky 3D tištěné metodou MJF je také značný. Výstřik vstřikovaný do obráběné hliníkové vložky je transparentnější, povrch je hladší, ale především nemá přetoky. Přetok v místě napojení vstupního kanálku na hlavní kanálek je záměrný. Vstupní kanálek je tvořen nakupovanou ocelovou vložkou, jež byla záměrně zkrácena níže, než je plocha hlavní desky v dělicí rovině. Tím bylo možné vtokovou vložku nalisovat do hlavní desky tak, aniž by přesahovala přes hlavní desku. Zároveň odpadla nutnost po nalisování vtokové vložky přerovnávat do jedné roviny vtokovou vložku s hlavní deskou. Tento přetok je vytvořen záměrně na kanálcích a na kvalitu vstřikovaných dílů nemá vliv. Ovšem ostatní přetoky na výstřiku vstřikovaném do plastové vložky 3D tištěné metodou MJF představují vady a k jejich odstranění je nutné analyzovat jejich příčinu.

Příčina tvorby přetoků může být technologická nebo konstrukční. Technologická příčina tvorby přetoků znamená nevhodně nastavené vstřikovací podmínky. Může se jednat o zvolení nedostatečně velké uzavírací síly. Jelikož uzavírací síla, viz Tab. 5, byla zvolena jak pro hliníkové, tak pro plastové vložky stejná, nejedná se o příčinu vzniku přetoků. Nejčastější technologickou příčinou přetoků je nastavení vyšších hodnot teploty, tlaku a vstřikovací rychlosti. Avšak opět byly nastaveny stejné podmínky jak pro hliníkové, tak pro plastové vložky. Vstřikovací rychlost je velmi malá dle doporučení na základě rešerše shrnutí do 5. kapitoly Stávající vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Hodnota teploty byla zvolena doporučená dle Přílohy č. 3. Nicméně pokud se teplota snižovala k minimální hodnotě doporučené výrobcem granulátu a vstřikovaný tlak se také snižoval, zmenšovala se velikost přetoků. Ovšem při velmi malých hodnotách nedocházelo k vyplnění celé dutiny vložky. Úpravou především uvedených parametrů vstřikování se podařilo zmenšit tvorbu přetoků, avšak ne zcela eliminovat [8].

Konstrukční příčina tvorby přetoků znamená, že vstřikovací vložka buď nebyla navržena správně, nebo nebyla vyrobena v předepsané kvalitě. Vytečení plastu do dělicí roviny je možné pouze tehdy, nejsou-li obě části forem, v tomto případě vložek, dokonale v kontaktu. Při zavření formy by vstřikovanému plastu mělo být umožněno téct pouze kanálky až do dutiny. Plochy vložek v dělicí rovině by měly zaručovat dostatečnou vzájemnou rovinnost a mít kvalitní povrch. Jedná se o základní požadavky pro konstrukci vstřikovacích forem. Je tak zaručeno, že v těchto plochách nedojde při vzájemném kontaktu k vytvoření mezery, do níž by vstřikovaný plast zatekl. Přesnost 3D tištěných vložek je velmi malá a drsnost bude analyzována v další části.

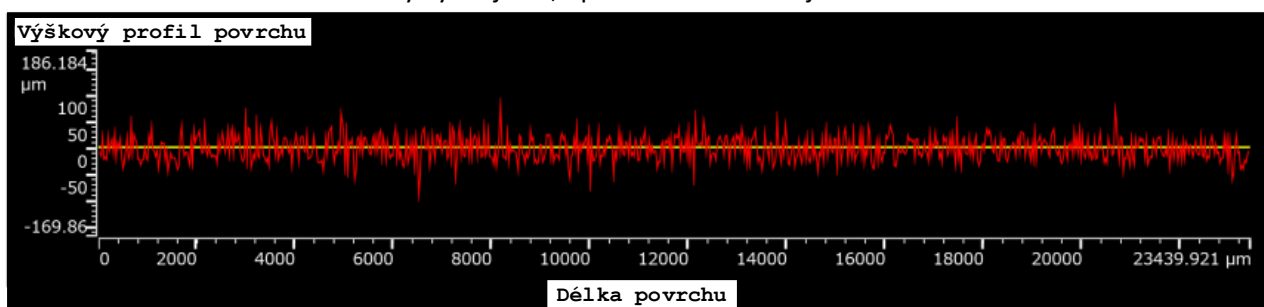
9.2 Drsnost povrchu vložek 3D tištěných metodou MJF

Nejen velká nepřesnost výroby vložky, ale i velká drsnost způsobuje tvorbu přetoků. Pro vložky je doporučeno plochy v dělicí rovině nejčastěji brousit na drsnost menší než $Ra\ 0,8\ \mu\text{m}$. Jelikož tato rovina,

kteřá uzavírá plast, aby nepřetékal z dutiny nebo kanálků, je tvořena dvěma plochami vložek, je důležitá hladká drsnost obou ploch v dělicí rovině. Při zavření formy se opřou o sebe výstupky povrchů vložek. Pokud by drsnost na obou plochách byla příliš vysoká, hrozilo by k průtoku plastu skrze níže umístěnou část křivky drsnosti povrchu.

Již při pouhém doteku povrchu 3D tištěné plastové vložky bylo poznáno, že její drsnost není malá. Hrubá drsnost povrchu je způsobena technologií výroby, více popsané v 4.3 podkapitole Metody 3D tisku – Spékání práškové vrstvy. Tato technologie je založena na spékání prášku teplem. Vložka je tvořena spojenými zrny prášku, která jsou hrubá.

Drsnost plastové vložky 3D tištěné metodou MJF, zobrazené na Obr. 31. vpravo, byla analyzována pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT. Místo měření bylo vybráno náhodně. Měření bylo provedeno ve dvou na sebe kolmých směrech. Počet zorných polí v každém směru byl 10. Během měření bylo pořízeno 5 snímků. Analýza byla provedena vyrovnaním vzorků pomocí tří bodů, což napomohlo redukci šumu. Koeficient λc byl automaticky přiřazen 0,8 mm. Drsnost byla vyhodnocena podle ISO 4287 a hodnota střední aritmetické úchytky R_a je 10,7 μm . Profil drsnosti je zobrazen na Obr. 33.



Obr. 33 – Profil drsnosti plastové vložky 3D tištěné metodou MJF

Hodnota R_a 10,7 μm na ploše vložky v dělicí rovině je pro vstřikování příliš hrubá. Dle vyhodnocení zobrazeného na Obr. 33 má profil povrchu (červeně) příliš velké výchylky, takže není pro vstřikování příliš vhodný nejen na ploše dělicí roviny, kde může být příčinou vzniku přetoků, ale i v místě dutiny. Při vstříknutí plastu do dutiny s hrubým povrchem je zapotřebí vyvodit větší vyhazovací sílu. Hladká drsnost povrchu je žádoucí především u žeber, která jsou kvůli svému tvaru komplikovanější na vyhození výstřiku z vložky.

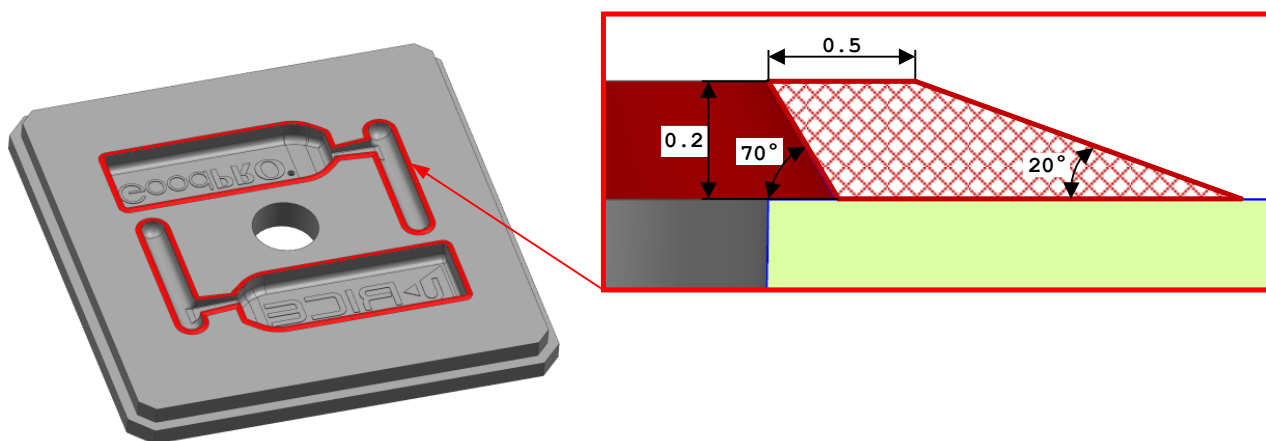
Kromě zjištění povrchu plastové vložky 3D tištěné metodou MJF byla analyzována pro porovnání i drsnost hliníkové vložky, zobrazené na Obr. 31. vlevo. Místo měření bylo vybráno opět náhodně. Předepsaná drsnost na výkresu je R_a 3,2 μm . Záměrně byla předepsána vyšší hodnota drsnosti, než je doporučena. Důvodem je zjistit, jestli i v této drsnosti bude docházet k přetokům. K ověření drsnosti hliníkové vložky byl použit přístroj HOMMEL-ETAMIC T8000 se snímačem TKU300 a s měřicím rozsahem 300 μm . Měřená délka byla 4,8 mm. Změřená hodnota R_a je 3,12 μm a drsnost plochy vložky v dělicí rovině byla vyrobena v předepsané toleranci. I když jsou na Obr. 31. vlevo vidět stopy po obrábění, na výslednou drsnost neměly vliv. Viditelnost stop po fríze je způsobena především vlivem natočení vložky při pořízení fotografie a vlastností hliníku se lesknout.

9.3 Zabránění tvorby přetoků

Z výše uvedeného je jasné, že vytisknout 3D vložku v požadované přesnosti a drsnosti nelze. Použití obrábění by pro uplatnění vložek 3D tištěných metodou spékání práškové vrstvy bylo nevhodné. Jediným možným řešením zůstává vytvoření přesahu horní plochy vložky nad dělicí rovinu. V této práci byla prozkoumána obě používaná řešení, popsána v Příloze č. 1 a Příloze č. 2.

Lemová zábrana

Francouzské průmyslové technické centrum pro plasty (IPC) používalo rámeček z PA 12 a 3D tištěný metodou SLS. Bohužel bližší specifikace o jejich výstupu nejsou uvedeny. Z tohoto důvodu byl navržen lem zobrazený na Obr. 34. V této práci se místo označení výstupu používá častěji označení lem, též ochrana lemem, lemová zábrana atd.



Obr. 34 – Zabránění tvorby přetoků lemem

Tvar lemu zobrazený na Obr. 34 byl navržen s ohledem na předpokládaný průběh deformace. Aby se lem nezdeformoval směrem do dutiny a nezanechal na výstřiku opak přetoku, drážku, je na vnitřní straně lemu podkos. Úhel podkosu byl zvolen přibližně 70° . Lem se při uzavření formy zdeformuje do připraveného prostoru a nezanechá stopy na výstřiku, ale hlavně brání tvorbě přetoků. Šířka horní tloušťky byla zvolena 0,5 mm. Jelikož vnější strana není v kontaktu s plastem, tak nehrozí, že by zanechala stopy na výstřiku, a proto je její úhel skloněn o 20° . Zároveň výrazný nepoměr sklonění stran zajistí deformaci lemu do předem připraveného prostoru.

Životnost výstupku IPC byla 900 cyklů. Pro účely této práce bylo testování prováděno nejvýše pro 150 cyklů. Zároveň bylo zapotřebí stanovit správnou výšku výstupku. Zjistit velikost výstupku s ohledem na životnost vložky, tj. schopnost bránit tvorbě přetoků, by bylo jistě zajímavé, ale není to v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce. Výška lemu 0,2 mm byla zvolena dle rešerše provedené v Příloze č. 2. Avšak při testování přibližně 90 cyklů docházelo k tvorbě přetoků. Při zvýšení výšky lemu až na 0,4 mm bylo možné provádět bezpečně vstřikování bez tvorby přetoků. Nevýhodou lemové zábrany je vyšší náročnost při modelování. Výstupek musel být vymodelován nejen podél dutiny, ale i podél kanálek. K tomu byla využita funkce tažení, kdy průřez výstupku byl vymodelován a tažen po obvodu kanálek a dutiny. Z tohoto důvodu byla také prozkoumána druhá možnost zabránění tvorby výstupků, a to přesah celé horní plochy vložky nad dělicí rovinu.

Přesah celé horní plochy nad dělicí rovinu

Podstatně jednodušší na modelování bylo vytvoření přesahu horní plochy vložky. Funkcí odsadit byla horní plocha modelu odsazena napřed o 0,2 mm, jež však stačilo pouze pro zhruba 80 cyklů. Bezpečně bylo možné vstřikovat při hodnotě vytažení horní plochy o 0,4 mm. Nevýhodou přesahu celé plochy v dělicí rovině je mírně vyšší výrobní cena 3D tisku.

Vzhledem k výrobním přesnostem, které byly vyhodnoceny výše, a hodnotám z měření uvedených v Příloze č. 4, kdy byl průměrný výrobní přesah na tloušťce 10 mm o 0,45 mm, byla zvolena hodnota 0,45 mm pro přesah v dělicí rovině.

Vzhledem k jednoduchosti modelování byly všechny vložky dále použité v této práci modelovány s přesahem 0,45 mm v dělicí rovině. Tato hodnota přesahu zaručila, že problém s přetoky se již dále nevyskytoval.

V této práci nebyly použity vložky, které mají hloubku dutiny od dělicí roviny menší než 0,45 mm. Při vstřikování vložek menší hloubky dutin nastával problém s dodržením předepsané výšky. Částečně tento problém minimalizovala lemová ochrana, ale ne zcela eliminovala. Výzkum velikosti výšky možné vstřikovatelné dutiny vložky i možnosti konstrukčních úprav pro zabránění tvorby přetoků atd. by bylo jistě zajímavé, avšak není v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce.

9.4 Dutina 3D tištěných vložek

V předchozí podkapitole byl vyřešen vnější tvar vložky. Pokud budou vložky navržené podle uvedených požadavků, budou moci být použity v modulární vstřikovací formě. Nepřesnost 3D tisku i zabránění tvorby přetoků lze řešit dvěma způsoby a je na výběr, která možnost bude pro vstřikovaný díl výhodnější.

Návrh dutiny vložky, která bude vyráběna 3D tiskem, se výrazně liší od dutiny, jež bude vyráběna obráběním. Při návrhu dutiny vložky, která bude obráběná, postupuje konstruktér od vložky k výstřiku. Tento postup spočívá v tom, že dutina formy musí být navržena s ohledem na možnosti obrábění. Konstruktér navrhuje vložku a konzultuje ji s technologem. Výsledkem je dutina, která je zvolenou technologií, nejčastěji obráběním, vyrobitelná. Např. velikost rádiů nemůže být příliš malá, neboť by vyžadovala použití příliš malého průměru frézy, která by se při obrábění hlubších částí dutin lehce zlomila. Navržená dutina vložky s ohledem na technologii výroby pak udílí tvar výstřiku. Z tohoto důvodu jsem tento postup označil jako návrh od dutiny k výstřiku. Konečný tvar výstřiku je dán konstrukcí dutiny.

Při návrhu dutiny vložky, která bude 3D tištěná, není zapotřebí postupovat od dutiny k výstřiku. Všechny úpravy konstruktér provádí na 3D modelu výstřiku. Není zapotřebí si např. konečný tvar výstřiku zobrazovat odečítáním geometrie vložek. Pokud je změna prováděná přímo na 3D modelech vstřikovaného dílu, je mnohem přehlednější a snazší. Po provedení úprav modelu následuje odečtení geometrie vložky od modelu vstřikovaného dílu. Z tohoto důvodu jsem tento postup nazval návrhem jako od výstřiku k dutině. Po odečtení geometrie vstřikovaného dílu je zapotřebí zkontrolovat tvar dutiny vložky. Jelikož nebyl zatím publikován dostatek informací o této problematice, je na uvážení konstruktéra, zdali takto vytvořená geometrie je vhodná pro vstřikování, např. zdali hloubka dutiny není příliš velká, jsou-li úkosy stěn dostatečné atd. Zároveň odpadá nutnost vytvářet výkresovou dokumentaci, a proto je výroba vložky 3D tiskem blíže k metodě Rapid prototyping, shrnuté na Obr. 13.

Konstrukce dutiny by byla na samostatný výzkum, který není v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce. Při návrhu dutiny formy je mnoho prvků, které různě ovlivňují vlastnosti vstřikovaných dílů. V Příloze č. 2 jsou firmou Stratasys publikovaná jistá doporučení. Výchozím bodem při návrhu dutiny vložky je využití dosavadních znalostí z konstrukce vstřikovacích forem do kovových materiálů. Na základě zkušeností se vstřikováním do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF je výrazně doporučeno zaměřit se na následující:

Zkosení, úkos stěn

Pokud je to možné, provádět zkosení stěn co možno největší. Při vstřikování do kovových forem stačí zkosení stěn 2°. Při vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF se doporučuje začít od 5°. V závislosti na hloubce stěny je možné úhel zmenšit.

Poměr výška ku šířce stěn

Typickým příkladem jsou žebra a otvory. Firma Stratasys, viz Příloha č. 2, doporučuje poměr průměru díry vůči délce 1 : 3. Pro metodu MJF je s ohledem na hrubost povrchu doporučeno začít minimálně s poměrem 1 : 1. Je lepší, aby šířka byla větší než hloubka. Tak se omezuje možnost použití žebrování na dílu.

Poloměry, rádiie

Pokud je to možné, zvětšovat poloměry. Ostré hrany by nejen způsobovaly koncentraci napětí ve vstřikovaných dílech, ale také by hrozilo výrazné opotřebení. Ostrá hrana by po několika vstřikovacích cyklech byla mnohem zaoblenější než u kovové vložky.

9.5 Tloušťka stěny vložky

Pokud je to možné, konstruovat tloušťku stěny co nejmenší, a to nejen z hlediska finanční úspory, shrnuté grafem na Obr. 26, ale také na základě doporučení, viz Příloha č. 1 a znalost, že plast je tepelný izolant.

10 Simulace vstřikování do 3D tištěných plastových vložek

Ačkoliv virtuální simulací vstřikování lze včas odhalit případný nedostatek v návrhu ještě před výrobou formy, často bývá podceňovanou záležitostí. Při návrhu formy, ať již z finančních, časových nebo jiných důvodů, se může stát, že návrh vstřikování bude proveden bez simulace. Při takovém postupu je úspěšnost návrhu formy závislá pouze na zkušenostech konstruktéra formy. Může být bez simulace a výrazných problémů proveden návrh jednoduchých, opakujících se dílů se znalostmi o chování vstřikovaného plastu atd. Proměnných, které se ve vstřikovacím procesu objevují, je mnoho. Ne vždy se podaří všechny proměnné nastavit správně tak, aby bylo vstřikování provedeno v nejlepším možném řešení. Většina parametrů ve vstřikování se nastavuje v určitém rozmezí, např. vstřikovací teplota je definována minimální, doporučená a maximální, viz Příloha č. 3. Podobně je tomu i s doporučeným tlakem, vstřikovací rychlostí atd. Na základě těchto a dalších parametrů konstruktér navrhuje např. velikost vtokového ústí atd. Nejen k odhalení kritických nedostatků, jako je např. předčasné zamrznutí vtokového ústí atd., ale i k představení, jak bude vstřikování probíhat, je simulace velmi užitečná.

Publikací, doporučení a rad pro vstřikování do kovových forem je mnoho. Jedná se o již poměrně prozkoumanou oblast, na kterou byla vyvinuta i řada specializovaných softwarů, jakými jsou např. Moldex3D, Moldflow atd. Výhodou těchto softwarů je jejich hlavní zaměření na oblast vstřikování. Lépe tak popisují působení tlaku, teploty a rychlosti vstřikovaného plastu než jiné softwary zaměřené na různé simulace. Zároveň je jejich prostředí a efektivita při nastavení parametrů vstřikování mnohem snazší než u jiných softwarů. Softwary pro simulování vstřikování jsou na trhu již několik let a za dobu své existence prošly značným vývojem. Nenabízejí jen nalezení nejlepšího umístění vtoku, analýzu tloušťky dílu atd., to již nabízí řada softwarů pro modelování a další. Softwary zaměřující se na vstřikování jsou v současné době schopny simulovat celý proces vstřikování, rozložení teplot ve formě, chování plastu ve vstřikovací jednotce, stlačení plastu a mnoho dalších užitečných vlastností. Záleží na pokročilosti zakoupené části (balíčku) softwaru a tím i spojené ceně. Pokud je veškeré vybavení pro simulaci dostupné, lze simulovat proces vstřikování do detailů. Nejen nastavení výpočtu, ale i samotný výpočet může trvat v řádu dní. Ne vždy bude takový prostor pro simulaci v projektu vyčleněn. Z tohoto důvodu byly vyvinuty různé úpravy zaměřující se na vybrané části, zjednodušení při modelování formy atd., například i rychlé ověření plnění, jehož cílem je rychlá kontrola, zda při plnění dutiny formy nedochází k nějakému problému atd.

I když vstřikování do plastových 3D tištěných vložek není úplně novou myšlenkou a existuje již několik let, zveřejněných virtuálních simulací je velmi málo. Zároveň jejich vypovídající hodnota není taková, aby objasnila specifika vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Cílem této práce je prozkoumat uplatnění vstřikovacích vložek 3D tištěných metodou MJF. Nejen k odhalení nedostatků, vyplnění mezery v podobě chybějících simulací vstřikování do 3D tištěných vložek atd., ale i k ukázání virtuálního vstřikování by k naplnění cíle této práce bylo velice nápomocné. Ideální by bylo začít simulováním již procesem 3D tisku. Výsledný virtuální 3D výtisk i s jeho vlastnostmi ovlivněnými 3D tiskem, jako např. vneseným vnitřním pnutím, změnou objemu atd. pak přenést do simulace vstřikování. Následně je provedena simulace vstřikování s dostačujícími informacemi o vstřikovaném plastu. Dále by v simulaci procesu vstřikování musela být vymodelována celá vstřikovací forma s minimem zanedbání. Tento výsledek by byl velmi přesný, avšak časově i finančně velmi náročný. Vzhledem k mým možnostem bude simulace 3D tisku vynechána. Ostatně softwary zaměřující se na vstřikování plastů nejsou v současné době schopny zohlednit, např. jak byla při 3D tisku nanášená vrstva atd. Vybraným softwarem pro vstřikování je Moldex3D a prostředím je Studio ve verzi 2022. Záměrně byla vybrána nejnovější verze, která přináší řadu vylepšení, např. vstřikovací jednotky a další.

Simulace vstřikování do 3D tištěných plastových vložek byla provedena pro testovací díl popsáný v 9.1 podkapitole – Testovací díl a zobrazený na Obr. 30. Jelikož byl tento díl používán i k dalšímu výzkumu, byly zejména časy chlazení a otevření formy prodlouženy na dostatečně dlouhou dobu. Simulace testovacího dílu bude popsána v následující části textu. Některé části simulace budou více popsány v Příloze č. 5.

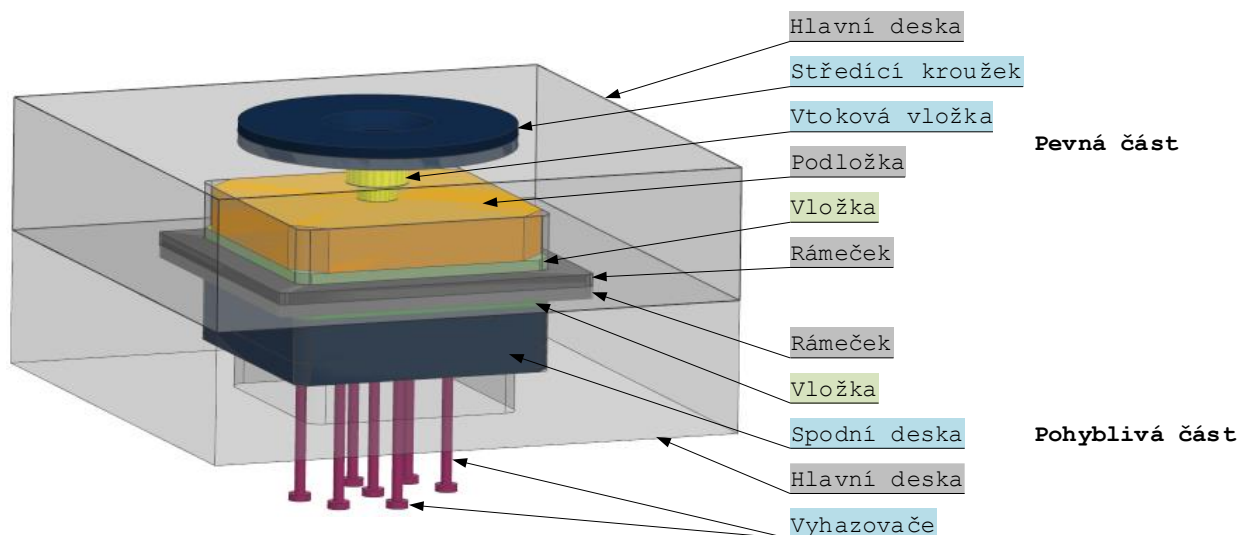
10.1 Okrajové podmínky

Simulování vstřikování do 3D tištěných plastových vložek není příliš známé a zkušeností je zatím velmi málo. Z tohoto důvodu bude první krok simulování proveden s minimem zjednodušení. Cílem první simulace bude důkladně analyzovat vstřikování. Po vyhodnocení bude provedeno zjednodušení simulace. Cílem zjednodušení bude usnadnit definování okrajových podmínek a také snížit náročnost simulace na výpočetní výkon. Výsledkem by do budoucna mělo být doporučení, jak rychle simulovat vstřikování do plastových vložek a tím rychleji získat důležité informace potřebné pro návrh vstřikování.

Modelování okrajových podmínek bylo rozděleno do skupin vstřikovací forma a vstřikovací jednotka. Každá tato skupina obsahuje model včetně definovaných vlastností těles a použitou síť. Další skupinou jsou parametry vstřikování, za kterých bude úloha probíhat.

Model vstřikovací formy

Model vstřikovací formy byl mírně zjednodušen pouze na nezbytně nutné úpravy, jakými jsou odebrání malé velikosti rádiů, sražení, odebrání podkosu na vyhazovačích atd. Tyto prvky by byly z hlediska vytvoření sítě i na výpočet náročné. Buď by nebylo možné na nich vytvořit síť, nebo by síť obsahovala příliš malé velikosti a mnoho elementů, které by zbytečně zatěžovaly výpočet. Dále pak byly odebrány otvory na hlavních deskách, které jsou dostatečně vzdáleny od dutiny a nemají na simulaci vstřikování vliv. Jinak se model snažil přiblížit k reálně složenému modulu použitého pro vstřikování testovacího dílu v modulární vstřikovací formě, zobrazení na Obr. 28. Zjednodušený model vstřikovací formy včetně popisu těles je zobrazen na Obr. 35.



Obr. 35 – Počáteční model vstřikovací formy

Model vstřikovací formy připravený k simulaci, zobrazený na Obr. 35, se skládá z pevné a pohyblivé části. V každé části formy jsou hlavní desky o rozměrech 250 × 250 – 60 mm, kde jsou uloženy další modely těles. Výjimkou jsou vyhazovače v pohyblivé části formy zobrazené na Obr. 35 růžově. Vyhazovače mají průměr 5 mm a hlavička má průměr 10 mm s výškou 3 mm. Rozměry spodní desky jsou 121 × 121 – 20 mm. Dále jsou v pohyblivé části vstřikovací vložka a rámeček, jejichž rozměry jsou uvedeny v 8.3 podkapitole – Modulární vstřikovací forma. V pevné části je vtoková vložka o výšce 58 mm. Uvnitř vtokové vložky je vyroben komolý kužel, který má malou kružnici o průměru 3,5 mm a sklon 3°. Vypodložovací vložka má rozměry 120 × 120 – 20 mm. Vnější průměr středícího kroužku je 125 mm. Studená vtoková soustava a vstřikovaný díl jsou zobrazeny v Příloze č. 5.

Popisky modelů na Obr. 35 jsou různě barevně označeny. Každá barva představuje jiný materiál. Šedě je označen hliník, modře ocel a zeleně plast HP PA 12 GB. Vlastnosti materiálů v simulaci jsou více popsány v Příloze č. 5. Nevýhodou použitého plastu je neznalost jeho vlastností závislých na působení tepla. Z tohoto důvodu byly použity obecné vlastnosti pro PA 12. I přesto je zajímavé srovnání použitých kovů (hliník a ocel) s použitým plastem HP PA 12 GB, které je zobrazeno v Tab. 6.

Vlastnost	Ocel	Hliník	HP PA 12 GB	Vzduch	Jednotka
Měrná tepelná kapacita	445	895	1 600	1,003	J/(kg * K)
Tepelná vodivost při 20 °C	50	205	0,25	0,0256	W/(m * K)
Koeficient lineární teplotní roztažnosti	11	23	0,1	0,01	10 ⁻⁶ /K

Tab. 6 – Teplotní vlastnosti částí formy [24], [26]

Pro zajímavost byl do Tab. 6 přidán i vzduch. Už na první pohled je vidět velký rozdíl, jak na působení tepla reagují kovy a jak plast. Měrná tepelná kapacita určuje, kolik tepla je potřeba k ohřevu 1 kg látky, aby se ohřála o 1 K. Dle teplotních vlastností v Tab. 6 se ihned ohřeje vzduch, dále pak ocel, hliník a jako poslední HP PA 12 GB. Tak je potvrzena vlastnost, že plast je tepelný izolant. Přibližně 4krát více než oceli a 1,7krát více než hliníku je potřeba dodat teplo plastu, aby se ohřál o stejnou hodnotu jako kovy. Jelikož bude plast použit jako vstříkovací vložka, nemělo by docházet k jejímu tepelnému ovlivnění. Ovšem bude-li vstříkovací vložka vystavena delší dobu působení tepla, dojde, i když pomaleji než u kovu, k jejímu ohřevu také. Nevýhodou plastu je jeho horší ochlazení oproti kovům. Důvodem je, že kolik tepelné energie je potřeba pro ohřev tělesa, tolik tepelné energie musí ohřáté těleso zas předat („vrátit“), aby se ochladilo na výchozí stav, tím narůstá náročnost na chlazení plastu.

Tepelná vodivost určuje vlastnost látky vést teplo a je definována jako množství tepelné energie, které za jednotku času projde jednotkovou délkou tělesa, aby byl teplotní spád 1 K vyšší. V případě chlazení, kolik tepla odebírá jednotková délka tělesa za jednotku času, aby došlo k ochlazení o 1 K. Nejlépe dle Tab. 6 je teplo odebíráno hliníkem, přibližně 4krát méně tepla je odebráno za stejných podmínek ocelí. Plast HP PA 12 GB odebere o 820krát méně tepla než hliník. Vzduch odebere tepla přibližně 8 200krát méně než ocel. Je tedy jasné, že pro odebírání tepla z dutiny formy je HP PA 12 GB nevhodný. Zároveň chlazení na vzduchu není také moc efektivní.

Lineární teplotní roztažnost vyjadřuje změnu rozměru tělesa v závislosti na rozdílu teploty. Z tohoto hlediska je použití plastu HP PA 12 GB nejlepší volbou. Ovšem při uzavření formy je plast stlačitelnější než kov. Změna objemu plastové vložky je způsobena vlivem stlačení při zavření formy než vlivem působení tepla.

Sít'

Použitá síť je zobrazena a popsána v Příloze č. 5.

Model vstříkovací jednotky

Model vstříkovací jednotky spolu s použitou sítí je popsán v Příloze č. 5.

Vstříkovací podmínky

Simulace vstříkování probíhala za podmínek uvedených v Tab. 7. Oproti prvnímu vstříkování testovacího dílu za podmínek uvedených v Tab. 5 došlo k následujícím úpravám. Objem dekomprese byl snížen z 5 na 3 cm³ a s tím souvisela i změna objemů. Zpětná dekomprese představuje natažení vzduchu do vstříkovací jednotky a tak zabránění vytékání plastu ze vstříkovací jednotky. Doporučená hodnota 5 cm³ byla zvolena na základě doporučení výrobce vstříkolisu. Jelikož se vstříkují malé objemy, není zapotřebí „vtahovat“ do vstříkovací jednotky téměř stejné množství vzduchu, jako je objem vstříkovaného dílu. Dále byla rychlost plnění zvětšena z 6 na 11 cm³/s. Při odečtení objemu dekomprese by dutina formy měla být naplněna za 1 s. Důvodem předchozího použití malé vstříkovací rychlosti bylo zamezit tvorbě přetoků. S úpravou, kdy celá horní plocha přesahuje dělicí rovinu, je možné vstříkovat větší rychlostí, tím rychleji naplnit dutinu formy. Na základě vstříkování PP byly upraveny parametry dávkování. Doba chlazení byla postupným simulováním prodloužena až na hodnotu 60 s. Důvodem je bezpečné zchlazení výstřiku na vyhazovací teploty. Teplota, při které může být dle výrobce granulátu výstřik bezpečně vyhozen, je 101 °C, viz Příloha č. 3. Výstřik je vyhazován ocelovými vyhazovači. Pokud by nebyla dosažena teplota pro vyhození, hrozilo by, že by vyhazovače mohly „propíchnout“ ještě ne zcela ztuhlý výstřik, v případě testovacího dílu vnitřní stranu krytu a tím by výstřik nebylo možno použít. Dále došlo k úpravě doby otevření formy z 5 s na 120 s. Doba 5 s odpovídala standardní době otevření formy a vykonání činností: vyjetí vyhazovačů vpřed a vyhození výstřiku, zajetí vyhazovačů zpět, dále i zavření formy. Tak dlouhá doba otevření vstříkovací formy není při vstříkování do kovových forem vůbec běžná. Pro případ kovových forem

je tato doba udávaná v sekundách, a pokud možno co nejkratší. Cílem je zbytečně neprodłużovat otevření formy a rychle cyklus ukončit a začít další, aby byla produktivita co možná největší. Ovšem vstřikování do plastových 3D tištěných vložek se výrazně odlišuje, což je způsobeno vlastnostmi plastu popsány v 2.2 podkapitole – Vlastnosti plastů a srovnání vůči kovům bylo shrnuto do Tab. 6. Aby bylo možné zaručit stejnou teplotu vložky dle doporučení výrobce granulátu, viz Příloha č. 3 pro vstřikování všech cyklů, je nutné zahřáté vložky nechat zchladit. V příloze č. 1 byly uvedeny možnosti ochlazení plastových vložek, zde budou prozkoumány také. V prvním kroku bude chlazení plastové vložky vzduchem. Pokud není vložka chlazená, např. protékající kapalinou v kanálcích vložky, nemá smysl prodłużovat dobu chlazení. Daleko účinnější je ponechat povrch vložky na vzduchu, která pomáhá zchladit vložku. Na základě předběžných simulací byla doba otevření formy stanovena v prvním kroku na 120 s.

Parametry	Hodnota	Jednotka
Objem dílů	6,23	cm ³
Celkový objem (včetně vtokové soustavy)	10,96	cm ³
Dávkovaný objem	15	cm ³
Sušení granulátu	–	min
Objem zpětné dekomprese	3	cm ³
Uzavírací síla	350	kN
Teplota pod násypkou	35	°C
Teplota na topném válci 1	210	°C
Teplota na topném válci 2	215	°C
Teplota na topném válci 3	220	°C
Teplota na topném válci 4	225	°C
Teplota na trysce	225	°C
Dávkování		
Rychlost otáčení šneku	20	m/min
Zpětný tlak	80	bar
Plnění		
Tlakové omezení	300	bar
Rychlost plnění	11	cm ³ /s
Dotlak		
Tlakové omezení	210	bar
Objem pro přepnutí	4,26	cm ³
Doba	7	s
Ostatní		
Doba chlazení	50	s
Doba otevření formy	120	s

Tab. 7 – Parametry vstřikování testovacího dílu, podruhé

Vzhledem k mým možnostem výpočtu v Moldex3D nebylo možné simulovat detailněji vyhřívání vstřikovací jednotky. Teplota vstřikovaného plastu byla nastavena v celé jednotce stejná na hodnotu 225 °C, což je teplota odpovídající teplotě na trysce. Důvodem, proč jsou v Tab. 7 uvedeny teploty na válcích, trysce a pod násypkou, je z důvodu experimentálního vstřikování, které bude uvedeno v další kapitole textu.

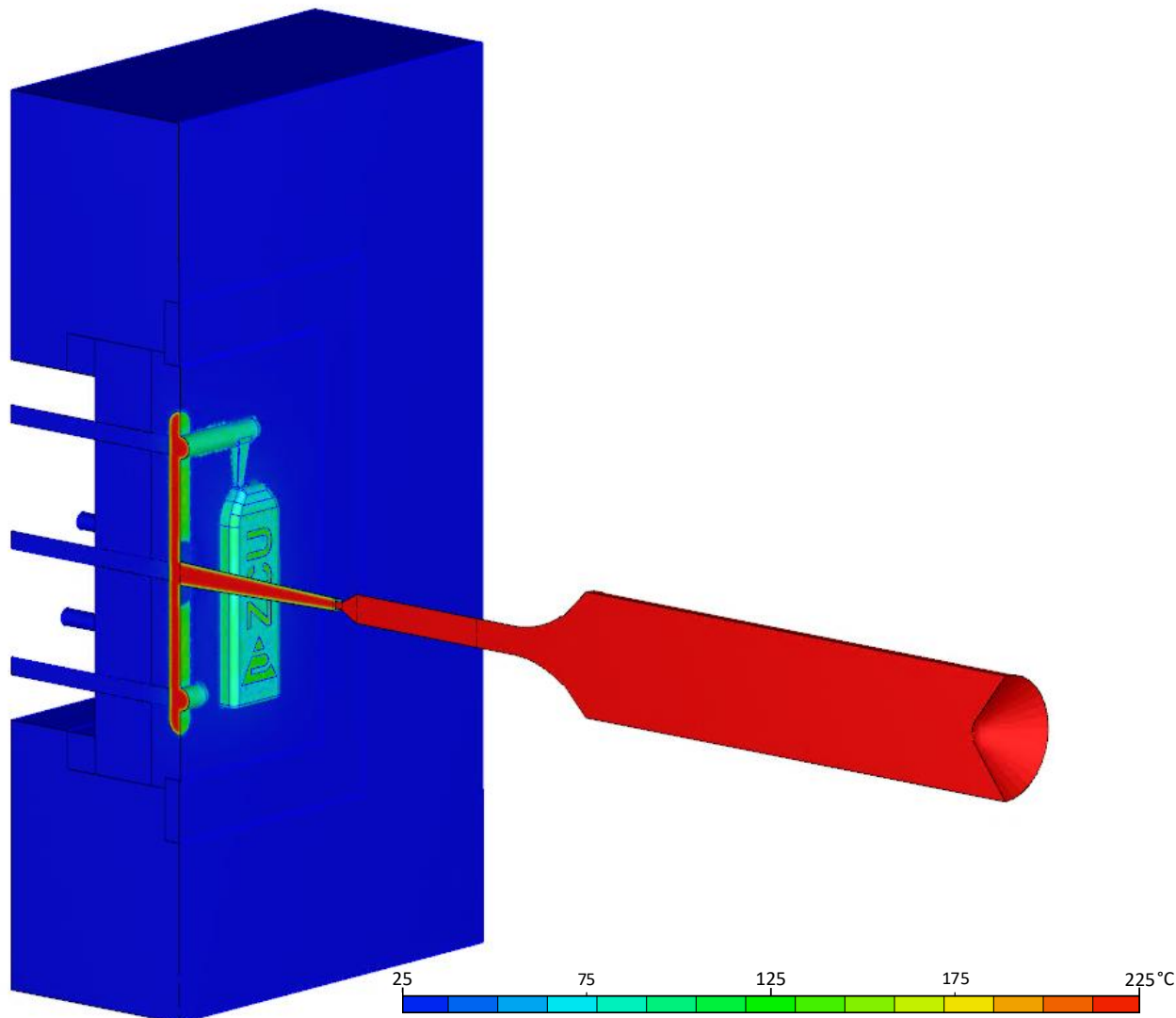
Kromě hodnot uvedených v Tab. 7 byla okolní teplota a tím i počáteční teplota formy nastavena na 25 °C. Jelikož vstřikování probíhalo v letních dnech, odpovídá teplota hodnotě teploměru u vstřikolisu. Dále byly provedeny dvě možnosti řešení, a to pro 1 a 10 cyklů. Důvodem je prozkoumat akumulaci tepla ve vstřikovacích vložkách. Pro vstřikování do kovových forem stačí simulovat vstřikování pro 5 cyklů. Vstřikovací proces je již zpravidla ustálen a nedochází ke změnám. Vzhledem k porovnání vlastností kovu a plastu, viz Tab. 6, byl počet cyklů zvětšen na 10. Vliv akumulace tepla do vložky byl patrný pouhým dotekem rukou na povrch vložky při porovnání teploty po prvním a po více cyklech.

10.2 Výpočet

Za zmínku stojí přibližná doba výpočtu závisující na hardwarovém vybavení. Simulace byla počítána na PC s využitím 16 jader procesoru Xeon E5 2687W v2. I přesto byla doba výpočtu přibližně 2 dny.

10.3 Vyhodnocení

Pohled na vstřikovací jednotku a odkrytou pevnou část formy je zobrazen na Obr. 36, který zobrazuje rozložení teploty v tělesech. Výsledek simulace je po 10 vstřikovacích cyklech. Jak je patrné z Obr. 36, oblast vstřikovací formy, která je teplotně ovlivněná, je velmi malá. Hlavní desky formy nejsou teplotně vůbec ovlivněny. V další části textu budou prozkoumány fáze plnění, dotlaku a dále pak vybrané oblasti vstřikovací formy. Hlavní část textu je doplněna Přílohou č. 5, na kterou se hlavní část textu odkazuje.

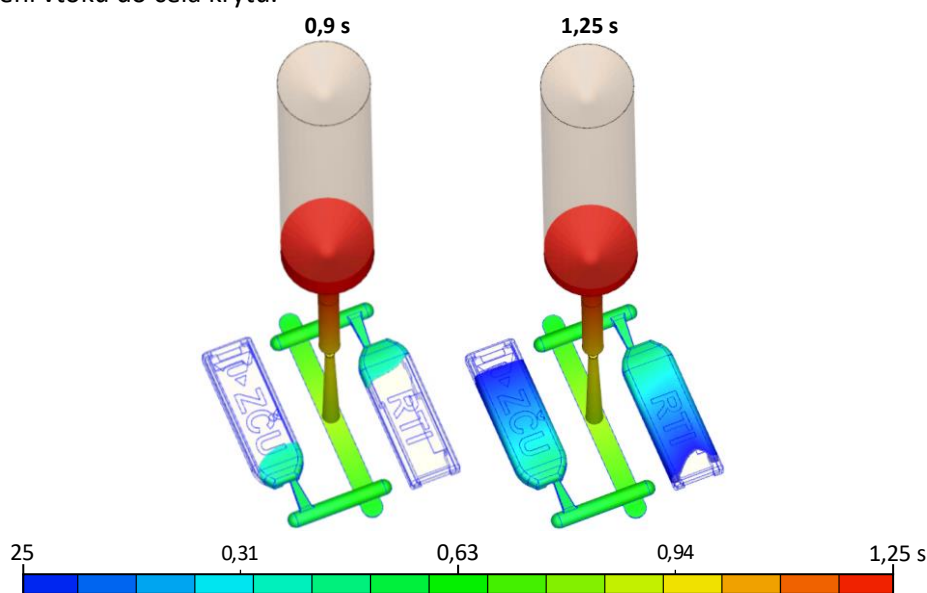


Obr. 36 – Simulace vstřikování, konec fáze plnění – rozložení teploty

Zkoumání vstřikovací formy jako celku je z hlediska teplotního ovlivnění vzdálených míst od dutiny a kanálků vtokové soustavy zbytečné. Na Obr. 36 je zobrazeno rozložení teploty na konci fáze plnění. Vstřikovací jednotka je zobrazena s plným objemem i přesto, že plný objem vstřikovací jednotky nebyl využit a objem je již vstříknut do formy. Dle Tab. 7 by po skončení fáze plnění mělo ve vstřikovací jednotce zůstat pouze 4,26 cm³ taveniny pro doplnění během fáze dotlaku. Bohužel se jedná o zobrazení rozložení teplot v Moldex3D, které uvažuje plný stav objem vstřikovací jednotky a naplněný celý objem dutiny. Takové zobrazení je jen pro rozložení teplot, pro jednotlivé fáze takové zobrazení není. Pokles objemu ve vstřikovací jednotce v závislosti na objemu, který je vstříknut do formy, je vidět na Obr. 37.

Plnění

Podobně – v jakém pořadí probíhá vstřikovací cyklus, bude probíhat vyhodnocení simulace. Prvním v pořadí je fáze plnění. Postup taveniny v čase je zobrazen na Obr. 37. Cílem této analýzy je zjistit, jak tavenina vyplňuje dutinu vložky. Vzhledem k tvaru vstřikovaného dílu a zvolení bodového vtoku bylo vybráno umístění vtoku do čela krytů.



Obr. 37 – Simulace vstřikování, fáze plnění – tečení taveniny v čase

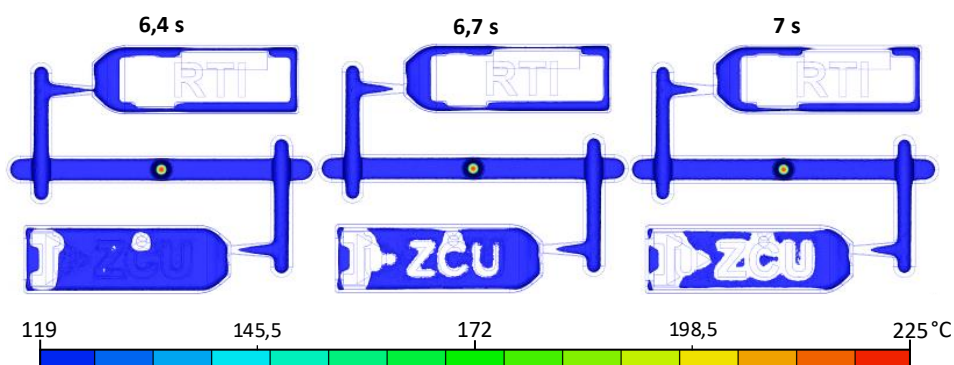
Analýza fáze plnění ukázala nedostatek v návrhu vložky a úprav popsanych v 9.1 podkapitole – Testovací díl. Při návrhu byly nejen využity např. stávající otvory pro vyhazovače, ale návrh vtokového ústí byl proveden pro obě poloviny krytu stejný. Ačkoliv kryt s logem ZČU má objem $2,88 \text{ cm}^3$ a kryt s logem RTI $3,35 \text{ cm}^3$, dochází k naplnění krytu s logem ZČU za kratší dobu než krytu se zkratkou RTI. Přepnutí na dotlak dle Tab. 7 je řízeno objemem a nastane při čase 1,25 s a tomu odpovídajícím objemu naplnění zobrazením na Obr. 37 vpravo. Jak ukázala simulace, přepnutí na dotlak je brzy. Přepnutí vycházelo z teorie, kdy přepnutí je doporučeno při naplnění 98 % dutiny. Ovšem dle výsledku simulace zobrazeného na Obr. 37 vpravo by přepnutí na dotlak mělo za nižší hodnoty přepnutí pro objem, tím by do dutiny bylo vstříknuto větší množství taveniny. Podle pravidla, že tavenina teče cestou nejmenšího odporu, je jasné, že v případě testovacího dílu zobrazeného na Obr. 30 tavenina teče snadněji po obvodu krytu než horní stěnou. Pokud by tavenina zatekla dále, byl by díl plněn v pořádku. Horší situace nastane v případě krytu se zkratkou RTI. Tavenina teče především po obvodu stěn, více však v silnější stěně. Jelikož konec krytu se zkratkou RTI nemá na horní stěně vybrání, je potřeba dotlakem doplnit větší množství taveniny.

Detailnější pohled na analýzu fáze plnění je v Příloze č. 5.

Dotlak

Dotlak následuje po plnění. Fází dotlaku je potřeba dotlačit taveniny do prostoru, který nebyl plněním naplněn. Velikost zbývajícího prostoru je zobrazena na Obr. 37 vpravo. V analýze plnění bylo zjištěno, že velikosti vtokového ústí by neměly být stejné, ale různé. Potom by umožnily rovnoměrnější plnění rozdílných objemů dutin. Výsledkem je, že je potřeba doplnit různé množství objemu do dutiny stejnou vtokovou soustavou a stejnými velikostmi vtokového ústí. Chybějící objem bude do dutiny s logem ZČU doplněn rychleji než do dutiny s logem RTI.

Dalším důvodem použití fáze dotlaku je kompenzace smrštění, viz 3.1 podkapitola – Vstřikovací cyklus, Dotlak (Doplnění). To je možné, jen dokud nezamrzne ve vtokové soustavě nejmenší průřez, zpravidla vtokové ústí. Analýza dotlaku je zobrazena na Obr. 38, kde je použito zobrazení tekutého jádra, což znamená zobrazení teploty taveniny, která má teplotu vyšší, než je teplota zasklení, pro 100-GB25 je to teplota $119 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 38 – Simulace vstřikování, fáze dotlaku – teplota roztaveného jádra

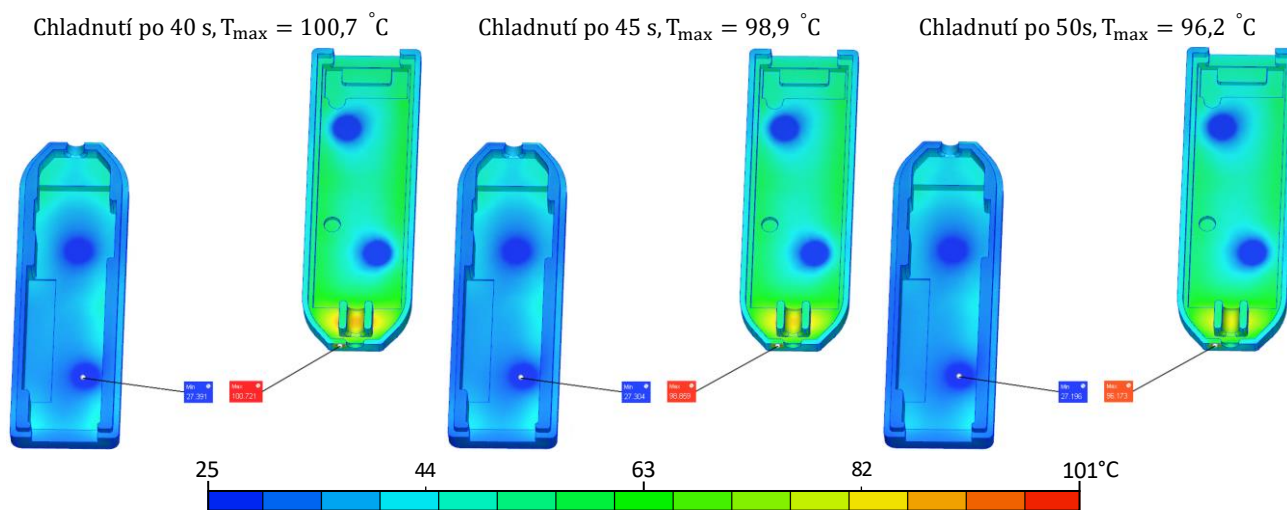
Jelikož vstřikovací vložky akumulovaly s přibývajícím počtem cyklů do sebe čím dál více tepla, doba, kdy dojde ke ztuhnutí taveniny, se prodlužovala, tak i doba, kdy je možné tekutým jádrem doplňovat taveniny do dutiny. Z tohoto důvodu byla analýza doby dotlaku provedena po 10. cyklu. Cílem bylo zjistit maximální dobu, kdy je možné do dutiny ještě dotlačovat taveninu. Na základě předchozích simulací byla doba dotlaku stanovena na 7 s. Tato hodnota je dostatečná, jelikož zamrznutí vtokového ústí dojde přibližně mezi 6,4 s a 6,7 s. Přesnější určení doby zamrznutí cyklu by znamenalo nastavit řešič tak, aby počítal více kroků, a tím prodloužit dobu výpočtu. Zaokrouhlení doby dotlaku nahoru na celé číslo je pro vstřikování do plastových vložek vyhovující. Další navýšení doby dotlaku nemá smysl, jelikož se více taveniny do dutiny nedostane.

Nejenže velikosti vtokových ústí by měly mít rozdílnou velikost, ale především by měly být obě ústí větší. Důvodem je, že v době zamrznutí vtokových ústí stále ještě zůstává dost tekutého jádra v dutinách, které pokud nebude doplňováno, hrozí propadliny, staženiny atd. Ostatně kanálky vtokové soustavy byly navrženy větší a po ukončení doby dotlaku zůstává v nich dost tekutého jádra, které nebude doplňováno. Důsledek je vidět i na výstřicích z prvního vstřikování testovacího dílu zobrazených na Obr. 32. Jak při vstřikování do hliníkových, tak do plastových vložek jsou vidět ve studené vtokové soustavě staženiny. Jelikož studená vtoková sestava představuje odpad, nemá smysl zabývat se jejími vadami. Na vstřikovaném krytu s logem ZČU je tekuté jádro na horní stěně a v přední a zadní části krytu. Horní stěna je oproti přední a zadní stěně mnohem tenčí, oddělená část tekutého jádra v ní ztuhne velmi rychle. Rychlost chladnutí tekutého jádra na horní stěně je vidět na Obr. 38. Prostor pro tvorbu staženin je tak menší a staženiny nejsou ani na výstřicích na Obr. 32 z prvního vstřikování jak do hliníkových, tak do plastových vložek viditelné. Horší případ nastává v přední a zadní části krytu. Velikost tekutého jádra je velká a výsledkem jsou patrné staženiny, nejvíce ve výstupku v přední části, kde je množství staženin velmi vidět. Oddělené tekuté jádro na krytu se zkratkou RTI je po obvodu. Důvod, proč tekuté jádro není i na horní stěně, je ten, že horní stěna z krytu je tenčí než u krytu s logem ZČU, viz řez složeným krytem vpravo nahoře na Obr. 30. Množství odděleného jádra po obvodu krytu i při prvním vstřikování jak do hliníkových, tak do plastových vložek způsobilo značné staženiny

I když byly pro druhé vstřikování testovacího dílu upraveny parametry vstřikování, geometrie vložek zůstala stejná. Vliv předčasného zamrznutí vtokového ústí způsobil ve výstřicích z obou vstřikování stejné problémy. Řešením jsou zvětšení vtokového ústí, zvětšení tlaku při fázi dotlaku atd.

Chlazení

Další v pořadí vstřikovacího cyklu následuje doba chladnutí. Oproti prvnímu vstřikování došlo k jejímu prodloužení. Důvodem je počkat na zchladnutí vstřikovaného dílu na teplotu, kterou výrobce granulátu udává jako bezpečnou pro vyhození výstřiku z formy, případně PP 100-GB25 je to teplota 101 °C. Vyhodnocení potřebné doby pro chladnutí probíhalo podobně jako vyhodnocení doby pro dotlak po 10 cyklech. Jen nebylo použito tekuté jádro jako u dotlaku, ale rozložení teplot zobrazení v čase na Obr. 39. Dále je odkazem zobrazena červeně maximální a modře minimální teplota. Doba chladnutí spolu s maximální teplotou je uvedena na Obr. 39 nahoře.



Obr. 39 – Simulace vstřikování, fáze chladnutí – rozložení teplot

Pod doporučenou teplotu k vyhození výstřiku je vstříknutý plast schopen zchladnout za 40 s. Během vstřikování se tato doba ukázala jako nedostatečná. Důvod je vidět i na Obr. 32. Zatímco plast vstříknutý do hliníkových vložek rychle zchladl, plast vstříknutý do plastových vložek ne. Výstřik vstříknutý do hliníkových vložek dle podmínek uvedených v Tab. 5 bylo možné bez problémů vyhazovači vyhodit, u výstřiku vstříknutého do plastových vložek nastávaly problémy. Jelikož plast vstříknutý do plastových vložek pomaleji chladl, docházelo k jeho vyhození ve stavu, kdy byl ještě tekutý. Analýzou zobrazenou na Obr. 38 se ukázalo, že po obvodu krytu zůstane dost odděleného tekutého jádra, zatímco horní stěna je již zchladlá. Výsledkem bylo, že když vyhazovače vyjely vpřed, v místě napojení horní stěny s bočními docházelo k praskání výstřiku, jak je patrné na Obr. 32 vpravo. I když byla doba chladnutí prodloužena na 40 s, problémy s praskáním výstřiku, i když méně, stále přetrvávaly. Z tohoto důvodu byla doba chladnutí prodloužena na 50 s, kdy bylo výstřiky možné bezpečně z plastových vložek vyhodit.

Rozdíl ve vlastnostech tepelné vodivosti mezi kovem a plastem HP PA 12 GB, viz Tab. 6 je patrný na Obr. 39. Minimální teplota na výstřiku je v místě kontaktu vstřikovaného plastu s ocelovým vyhazovačem. Ocel díky své tepelné vodivosti je vstřikovanému plastu schopna rychleji odebrat teplo než plastová vložka.

Plastové vložky

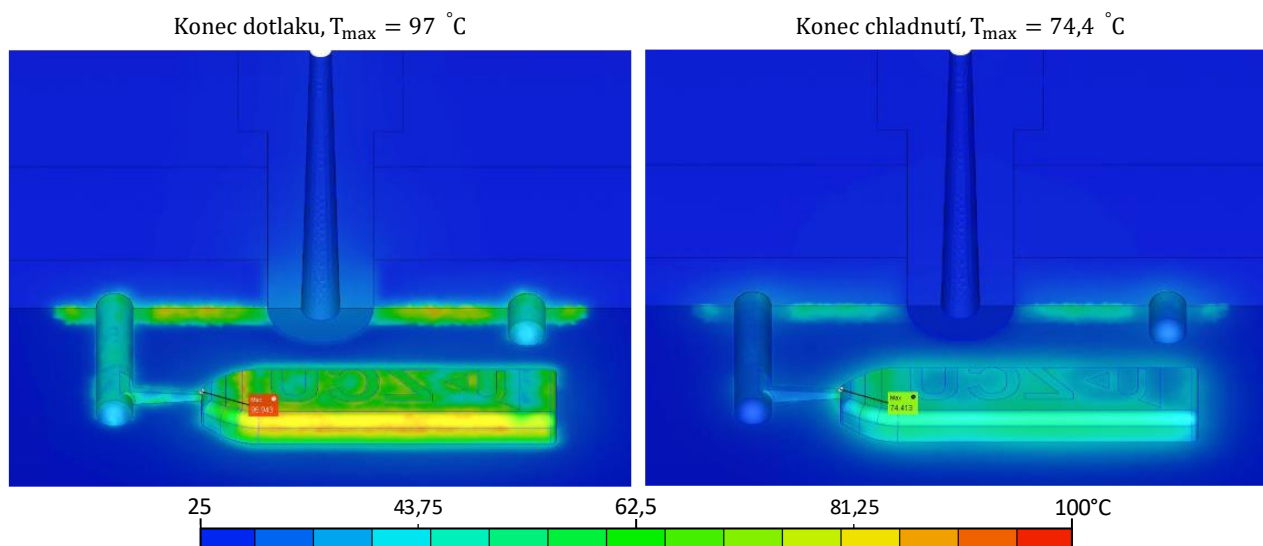
Jak již bylo zmíněno výše, problém s použitím plastových vložek spočívá v tom, že do sebe každým cyklem akumulují teplo. Dále pak nejsou schopny stejně jako kovy odebrat vstřikovanému plastu teplo dostatečně rychle. Rozložení teplot během fází vstřikovacího cyklu je podrobněji prozkoumáno v příloze č. 5. Vzhledem k tvaru vložek bylo více tepla akumulováno do pohyblivé vložky. Rozložení teplot na pevné vložce spolu s ocelovou vtokovou vložkou na začátku a konci chladnutí je zobrazeno na Obr. 40. Po konci fáze plnění byla nejvyšší teplota pohyblivé vložky téměř 180 °C, a to na hranách tvárníku dutiny. Zato na pevné vložce byla nejvyšší teplota o 40 °C nižší a její umístění bylo v místě toku, kde je rychlost tečení taveniny nejvyšší. Po skončení dotlaku (7 s) došlo na obou plastových vložkách k poklesu teploty o 30 °C. Daleko většímu zchladnutí do konce fáze chladnutí došlo u pohyblivé vložky, přibližně o 62 °C, zato u pevné vložky jen přibližně o 23 °C. Po dostatečně dlouhé době otevření formy (120 s) byla teplota vložek přibližně stejná.

Jelikož vlastnosti plastových vložek mají na vstřikování značný vliv, budou dále v textu zkoumány.

Ocelová vtoková vložka

Rozdíl v teplotních vlastnostech mezi ocelí a plastem je značný, viz Tab. 6. Při návrhu modulární vstřikovací formy byla použita nakupovaná ocelová vtoková vložka. Vložka tvoří přechod mezi horkou tryskou vstřikovací jednotky a vstřikovací vložkou. Zároveň se jedná o jednoduché a levné řešení pro vytvoření vstupního kanálku. Ovšem vlastnosti oceli oproti plastu jsou viditelné na studené vtokové soustavě na Obr. 36, kde povrch hlavního kanálku je pod vtokovou vložkou studenější než zbytek vtokové

soustavy. Jelikož vstupním kanálkem je dopravována tavenina do dutiny formy, nesmí se stát, že by kanálek zamrzl. Pokud by se tak stalo, jednalo by se o místo vtokové soustavy, které zamrzne jako první, a ne vtokové ústí. Při návrhu vtokové soustavy platí pravidlo, že by se průřez kanálků měl směrem k dutině zmenšovat a nejmenším průřezem by mělo být vtokové ústí. Ovšem pokud je studená vtoková soustava tvořena dvojicí materiálů, z nichž ocel výrazně odebírá teplo než plast, nastává riziko zamrznutí soustavy v místě, kde je ocel. Z tohoto důvodu bude oblast vstřikovací formy, kde je umístěna ocelová vtoková vložka prozkoumána. Zobrazení oblasti formy s ocelovou vtokovou vložkou v řezu na začátku a na konci fáze chladnutí je zobrazeno na Obr. 40. Dále je na začátku a na konci fáze chladnutí vyznačené praporečkem místo, kde je nejvyšší teplota, hodnota teploty je uvedena v nadpisu.



Obr. 40 – Simulace vstřikování, začátek a konec fáze chladnutí – rozložení teploty

Z Obr. 40 je patrný rozdíl při odebrání tepla vstřiku ocelí oproti plastu HP PA 12 GB. Na začátku fáze chladnutí je teplota spodní části ocelové vtokové vložky nanejvýš $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Zatímco teplota povrchu plastu hlavního kanálku dosahuje přibližně 2krát větší hodnoty. Zároveň teplo z kanálků je ocelí lépe vedeno, proto je spodní část vtokové vložky prohřátá do větší vzdálenosti než u plastové vložky, kde se kvůli vlastnosti plastu izolovat teplo drží na povrchu a minimálně prohřívá vzdálenější místa. Na konci fáze chladnutí je teplota ocelové vtokové vložky rovna přibližně výchozí teplotě $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, zatímco teplota na povrchu plastové vložky dosahuje v kanálcích místy $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Jak moc má vliv použití ocelové vtokové vložky na chladnutí studené vtokové soustavy, je detailněji popsáno v Příloze č. 5. Výsledkem je, že v horní části ocelové vtokové vložky, i jak ukazuje rozložení teplot na Obr. 40, kde je teplota oceli přibližně $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dojde k zamrznutí vstupního kanálku. V případě vstřikování testovacího dílu, kdy dotlak je 7 s, nehrozí nebezpečí zamrznutí soustavy ve vstupním kanálku. Ovšem při vstřikování objemnějších dílů vyžadujících delší dobu dotlaku došlo k zamrznutí studené vtokové soustavy již ve vstupním kanálku.

Pokud je na modulární vstřikovací formě vstřikován jakýkoliv díl, je nutné kontrolovat zamrznutí ve fázi dotlaku jak ve vtokovém ústí, tak ve vstupním kanálku. V případě vstřikovacích podmínek uvedených v Tab. 7 bylo zjištěno, že maximální doba, kterou lze taveninu do dutiny, je nanejvýš 10 s.

Řešení by představovalo zásah do vstřikovací formy. Nejsnazším řešením by bylo vyměnit ocelovou vtokovou vložku za vložku z materiálu, který podobně jako plast hůře vede teplo, ale zároveň je schopen vydržet v kontaktu s teplou tryskou vstřikovací jednotky. Tímto materiálem by např. mohla být keramika. Dalším, ale náročnějším řešením je zkrátit délku vtokové vložky, což by znamenalo větší zásah do vstřikovací formy.

Teplotní spád

Jelikož ocel odebírá teplo rychleji než plast, nastává riziko teplotního spádu, který se projeví smrštěním vstřikovaného dílu. Dojde k tomu, že strana vstřikovaného dílu v kontaktu s ocelí zchladne rychleji než opačná strana, která je v kontaktu s plastem. Výsledek je, že vstřik se zkroutí směrem

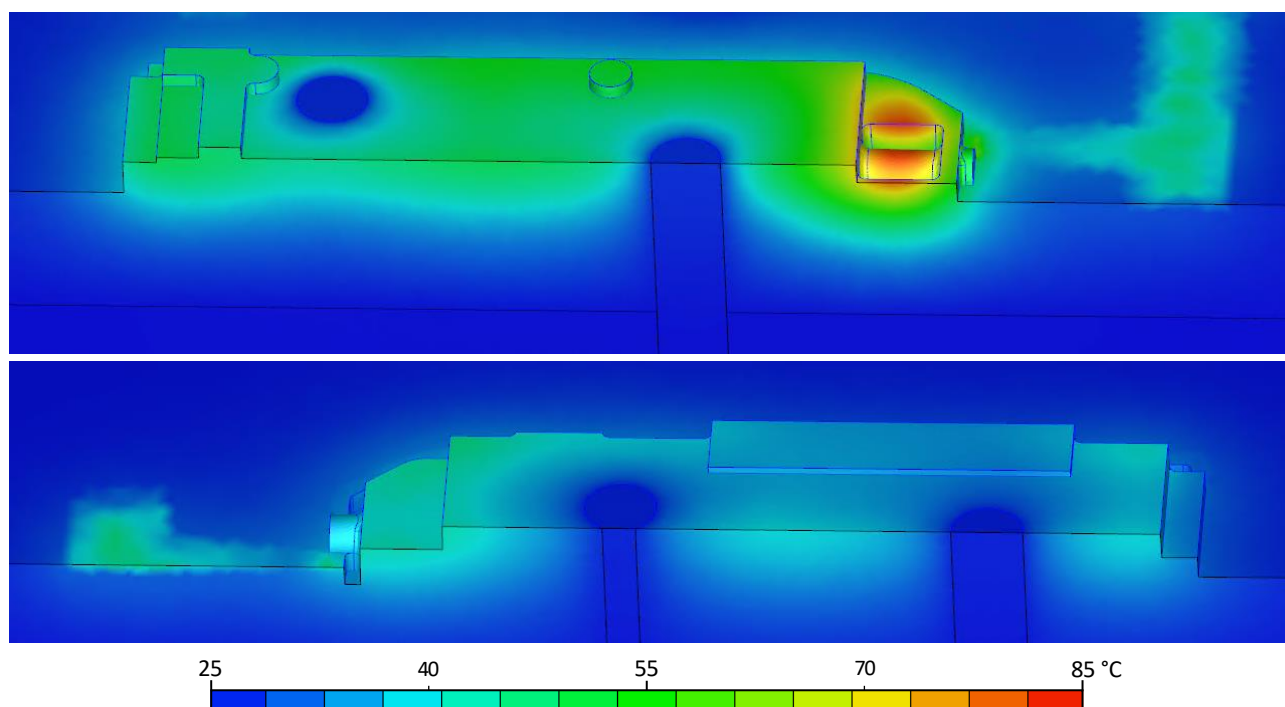
ke straně, kde je plast. Jelikož je na této straně vstřikovaný plast déle tekutý, nastanou zde staženiny později.

Pokud je použita studená vtoková soustava tvořená kanálky, které jsou umístěny pod ocelovou vtokovou vložkou, není zapotřebí teplotní spád řešit. Vtoková soustava po oddělení od výstřiku bude stejně vyhozena. Ovšem pokud je díl vstřikován přímým vtokem, je nutné počítat s teplotním spádem, který ovlivní výsledný tvar výstřiku.

Jelikož modulární vstřikovací forma obsahuje jak hliníkové, tak plastové vložky, je riziko použití zaslepovací hliníkové vložky v pevné části formy a v pohyblivé části formy použití plastových vložek, např. bude-li vstřikovaný díl vstřikován pouze na jednu stranu dělicí roviny. V takovém případě je teplotní spád daleko větší a zkroucení vstřikovaného dílu bude mnohem větší. Z tohoto důvodu platí, že i když vstřikovaný díl vyžaduje vstřikování pouze do jedné poloviny dělicí roviny, je nutné i v druhé části použít vložku ze stejného materiálu.

Ocelové vyhazovače

Přesnost MJF 3D tisku dovolila použití vyhazovačů bez nutnosti díry vyvrtat nebo vystružit otvory. Ačkoliv v případě kovových vložek je doporučeno díru vyrobít nejčastěji v běžné toleranci H7. I když MJF 3D tisk umožnil bez nutnosti obrábět použití vyhazovačů, nastal stejný problém jako v případě použití ocelové vtokové vložky. Řez plastovou vložkou a vyhazovači je vidět na Obr. 41.



Obr. 41 – Simulace vstřikování, konec fáze chlazení – rozložení teploty v pohyblivé vložce a vyhazovačích

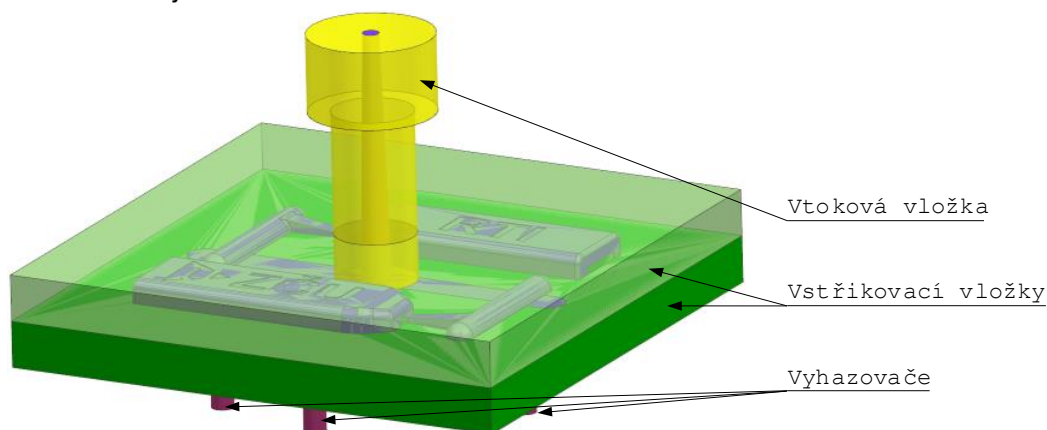
Ocel ze svého okolí odebírá teplo mnohem rychleji než plast. V místě, kde byly použity vyhazovače, docházelo k rychlejšímu ochlazování vstřikovaného dílu, jak ukazují řezy pohyblivou vložkou na Obr. 41. Nastává zde jako v případě ocelové vtokové vložky nebezpečí teplotního spádu, ovšem výrazněji menší než u vtokové vložky. Použitím ocelových vyhazovačů hrozí vstřikovanému dílu mírné staženiny na protější straně, než jsou umístěny vyhazovače.

Řešením by bylo použití jiného materiálu vyhazovačů jako v případě vtokové vložky.

V řezu na Obr. 41 je dobře vidět rozdíl mezi teplotou vyhazovače a teplotou plastu. Ovšem v tomto případě je teplota chlazení nastavena na 50 s. Pokud by doba chlazení byla nastavena kratší jako v případě prvního vstřikování, nastává riziko, že teplota vyhazovače a okolního plastu bude výrazněji odlišná. Tím hrozí, že hrany studených vyhazovačů budou vedeny horkým plastem vložky. Výsledným efektem bude, že se hrany vyhazovačů budou snadněji opotřebovávat, budou ubírat díru vložky. Po absolvování určitého počtu vstřikovacích cyklů hrozí, že díra bude natolik vydřená, že jí bude moci protékat vstřikovaný plast.

10.4 Zjednodušení simulace

Smyslem simulace vstřikování je pomoci konstruktérovi při návrhu formy. Často je rychlá simulace vybrané oblasti pro správný návrh mnohem důležitější než komplexní analýza formy. Cílem provedené simulace bylo analyzovat vstřikování s minimem zjednodušení a zanedbání prvků. Simulace poskytla názorný přehled o chování celé vstřikovací formy. Nevýhodou provedené simulace byla její časová náročnost jak na přípravu, tak na výpočet. Výsledky simulace potvrdily vlastnost plastu fungovat jako tepelný izolant. Z tohoto důvodu nemá smysl nastavovat simulaci pro části formy za plastovými vložkami, protože plastová vložka je schopna takové izolace, že na vstřikování nemají vliv. Ani vnější tvar vložek nemusí být modelován podle reálného tvaru. K simulaci postačí kvádrové zakončení, které bude snazší pro tvorbu sítě. Z ostatních dílů má vliv určitě modelovat díly, které jsou v kontaktu s taveninou, jako je vtoková vložka, a pokud jsou pro vyhazování použity vyhazovače, připravit i jejich model. Ovšem není zapotřebí modelovat jejich hlavičky, ale vyhazovač modelovat jako válec. Takto zjednodušený model pro simulaci vstřikování je zobrazen na Obr. 42.



Obr. 42 – Zjednodušený model vstřikovací formy

Zjednodušenému modelu na Obr. 42. pak v Moldex3D stačí definovat hranice vstřikovací formy (mouldbase) a automaticky je ohraničený prostor, který není tvořen připravenými modely, zasítěván. Vytvořené síti mouldbase pak stačí přiřadit vlastnosti hliníkového materiálu.

Simulace zjednodušeného modelu byla porovnána s původní simulací a hodnoty se přibližně shodovaly. Stačí tak simulovat až na vtokovou vložku pouze ty části formy, které se pro nový vstřikovaný díl mění. Nově zjednodušený model tak simuluje pouze tu část formy, která je zpravidla při změně dílu vyrobena jako nová.

Rozdíl je však v době potřebné pro přípravu a výpočet. Zjednodušený model zabere na přípravu několik hodin a výpočet je vyřešen do 10 hod. Lze tak během dne navrhnout formu a výpočet spustit přes noc a druhý den mít výsledek. Jelikož vstřikování do 3D tištěných plastových vložek se očekává rychlé ověření dílů, rychlý návrh a výroba dílů atd., není prostor pro simulaci příliš velký. Rychlost nastavení simulace je díky možnému zjednodušení jistě dalším přínosem v této problematice.

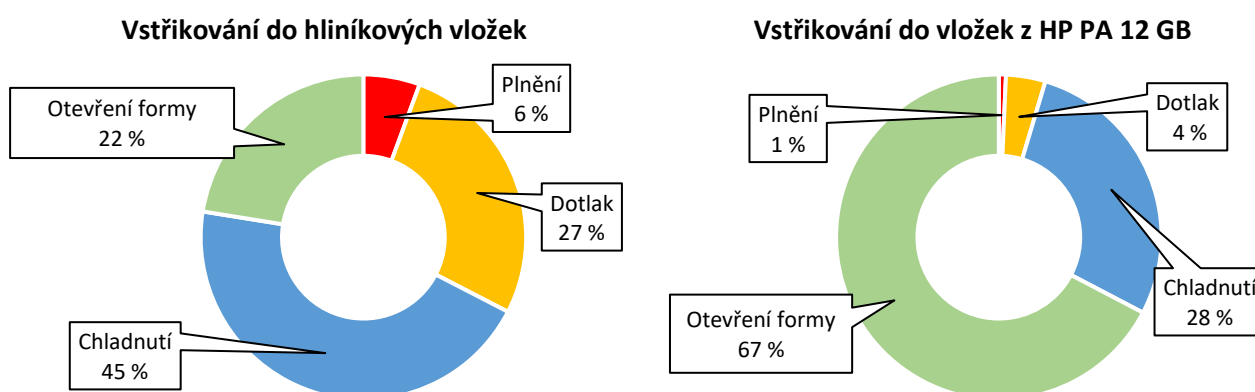
10.5 Porovnání vstřikování do plastových vložek s hliníkovými vložkami

Pro porovnání vlastností plastových vložek s hliníkovými byla původní simulace provedena znovu s následujícími změnami. Materiál vstřikovacích vložek byl změněn z HP PA 12 GB na hliník obecných vlastností, dle Tab. 6. Tím byla v simulaci provedena změna odpovídající výměně vložek zobrazených na Obr. 31. V předchozí části textu probíhala simulace za podmínek uvedených v Tab. 7. Zároveň byly v této kapitole popsány důvody úprav podmínek oproti prvnímu vstřikování probíhající za podmínek uvedených v Tab. 5. Při použití hliníkových vložek není zapotřebí prodlužovat vstřikovací cyklus, zejména dlouhou dobu chladnutí a otevření formy. Postupnými kroky simulování vstřikování do hliníkových vložek byly doby fází dotlaku, chlazení a otevření formy zkráceny na hodnoty uvedené v Tab. 8.

Parametry	Hodnota	Jednotka
Doba dotlaku	6	s
Doba chlazení	10	s
Doba otevření formy	5	s

Tab. 8 – Doby fází dotlaku, chlazení a otevření formy při vstřikování do hliníkových vložek.

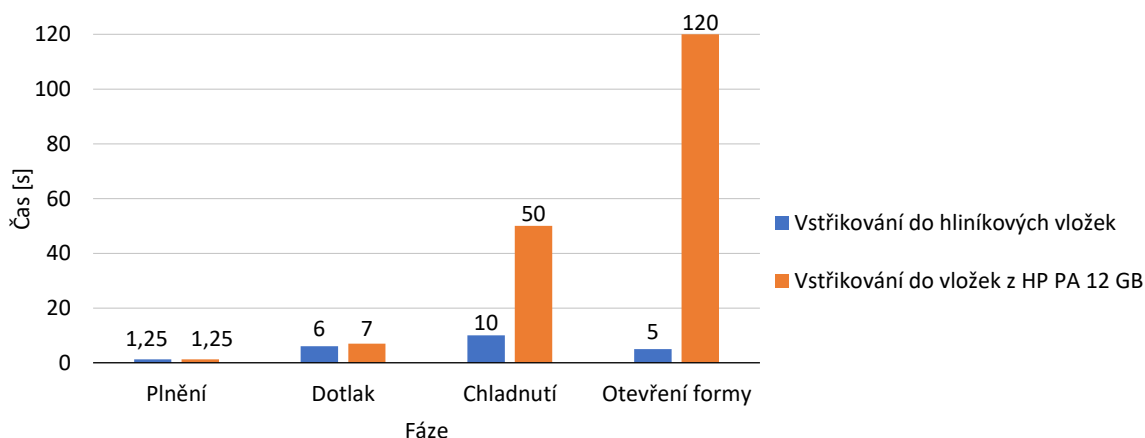
Z časových intervalů pro fáze vstřikovacího cyklu nebyla jediná doba plnění změněna. Tyto fáze závisí především na vstřikovací rychlosti, která jako ostatní parametry uvedené v Tab. 5, kromě změněných parametrů uvedených v Tab. 8, byla ponechána. Potřebné doby pro fáze dotlaku, chlazení a otevření formy byly stanoveny stejným způsobem jako v 10. kapitole. Výsledkem bylo výrazné zkrácení doby vstřikovacího cyklu. Pro porovnání cyklů mezi vstřikování do hliníkových vložek se vstřikování do vložek z HP PA 12 GB byly sestrojeny grafy vycházející z grafu na Obr. 9, ale s tím rozdílem, že byly zahrnuty pouze činnosti uskutečňující se ve vstřikovací formě. Oproti grafu na Obr. 9 byly činnosti otevření formy, vyhození výstřiku a zavření formy sloučeny pod jednu činnost nazývanou otevření formy. Grafy vstřikovacího cyklu vstřikování do hliníkových vložek a do vložek z HP PA 12 GB jsou zobrazeny na Obr. 43.



Obr. 43 – Porovnání vstřikovacích cyklů pro hliníkovou vložku a vložku z HP PA 12 GB

Grafy vstřikovacího cyklu na Obr. 9 jsou pro vstřikování do kovových forem. Z tohoto důvodu je mu graf vstřikování do hliníkových vložek Obr. 43 vlevo podobný. Nejdéle zabere doba chlazení nutná pro zchlazení vstřikovaného dílu na teplotu, kdy je možné výstřik bezpečně vyhodit z formy. Ostatní fáze závisí na objemu dutiny, návrhu vtokové soustavy atd. nebo na možnostech vstřikolisu. Cyklus vstřikování do hliníkových vložek lze zkrátit přidáním chlazení vložek.

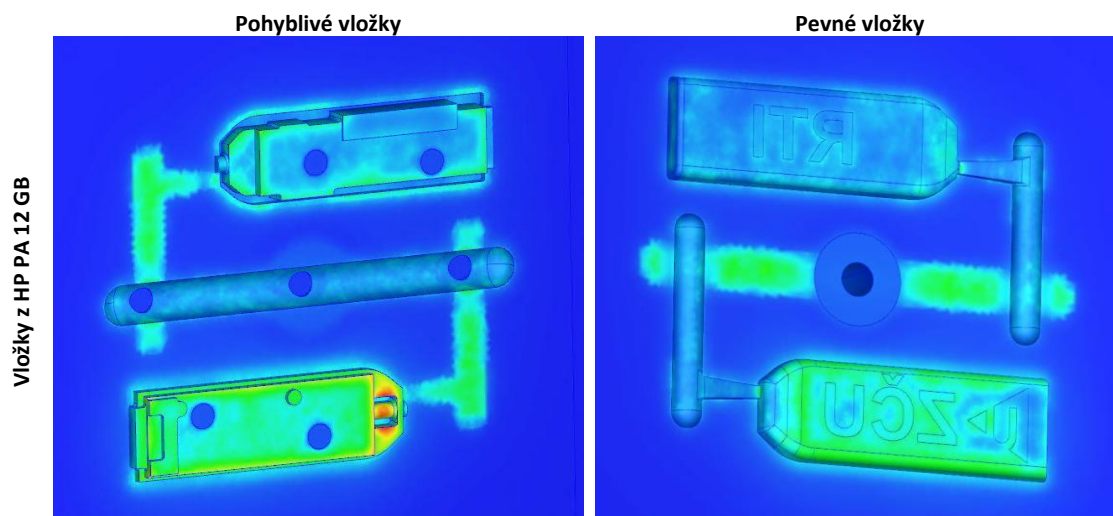
Fáze plnění zabírá jak pro vstřikování do hliníkových, tak do plastových vložek stejnou dobu, 1,25 s. Přesto v cyklu vstřikování do hliníkových vložek zabírá 6 %, Obr. 43. vlevo, a při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB jen 1 %, Obr. 43. vpravo. Důvodem je nutnost prodloužení doby dotlaku, ale především chlazení a otevření formy. Porovnání časů při vstřikování do hliníkových vložek s časy, které jsou potřebné při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB, znázorňuje graf na Obr. 44.

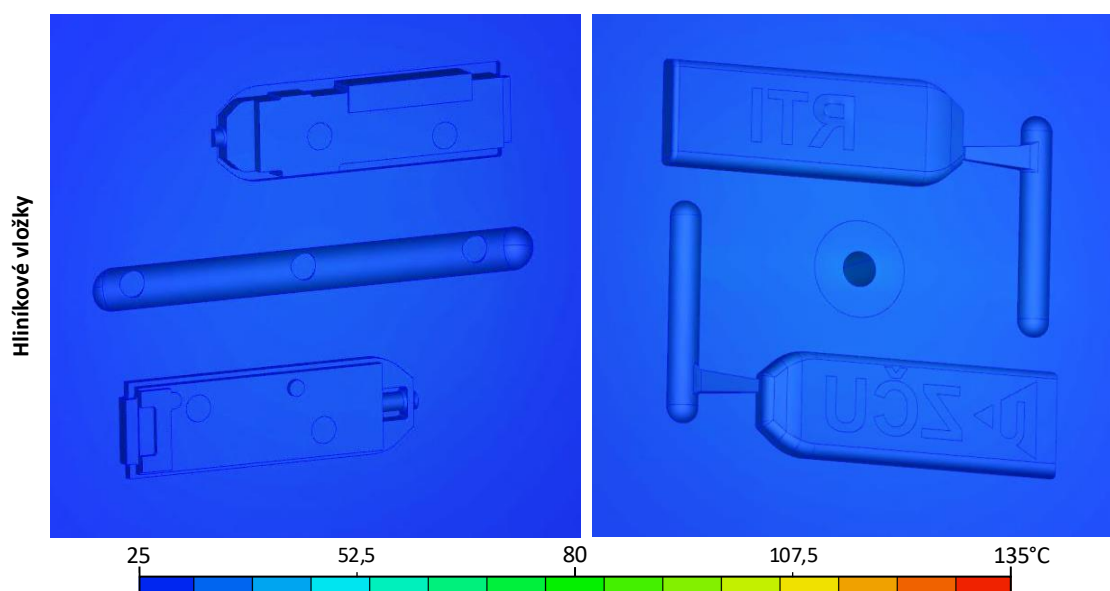


Obr. 44 – Porovnání časů fází vstřikování do hliníkových vložek s časy fází vstřikování do vložek z HP PA 12 GB

Doba potřebná pro fáze při vstřikování do hliníkových vložek je na Obr. 44 zobrazena modře a doba potřebná pro fáze při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB oranžově. Již při fázi dotlaku bylo možné čas zkrátit o jednu sekundu. Hliníková vložka odebírá vstříknutému plastu teplo rychleji než vložka HP PA 12 GB, a proto dojde k zamrznutí vtoku dříve. Podobně je tomu i při fázi chladnutí. Aby mohl být výstřik bezpečně z formy vyhozen, je při vstřikování do hliníkových vložek potřeba o 40 s méně než při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB. Po skončení fáze chladnutí je výstřik vyhozen z formy. Hliníkové vložky chladnou velmi rychle, a tak není zapotřebí dobu otevření formy prodlužovat. Doporučené teploty formy dosáhnou dle Přílohy č. 3 hliníkové vložky již na konci fáze chladnutí. Čas potřebný pro činnosti otevření formy, vyhození výstřiku a zavření formy byl zvolen 5 s. Jedná se o přibližnou dobu, po kterou vstřikolisu trvá provést uvedené činnosti. Ovšem vložky z HP PA 12 GB po absolvování 10 cyklů do sebe akumulovaly značné množství tepla, a proto je potřeba jejich teplotu snížit. Vstřikováním se ukázalo, že efektivnější je zchladnutí vložek při otevření formy a s přístupem k okolnímu vzduchu než při fázi chladnutí. Z tohoto důvodu byla doba otevření formy zvolena na 2 min. Důsledek prodloužení doby otevření formy i doby chladnutí velmi dobře znázorňuje graf vstřikovacího cyklu na Obr. 44 vpravo a jeho porovnání se vstřikováním do kovových vložek na Obr. 44 vlevo.

Důvod prodloužení doby chladnutí i otevření formy je znázorněn na Obr. 45, kde je v simulaci zobrazeno rozložení teploty na vložkách z HP PA 12 GB a hliníkových vložkách. Pro porovnání byl zvolen stejný čas jak pro vstřikování do vložek z HP PA 12 GB, tak do hliníkových vložek. Pohled na hliníkové vložky je na konci fáze chladnutí, tj. v 10 s. Jelikož doba dotlaku při vstřikování do hliníkových vložek je o 1 s kratší než při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB, je fáze chladnutí ve vložkách z HP PA 12 GB zobrazená v čase 11 s. Pohyblivé vložky jsou na Obr. 45 zobrazeny vlevo a pevné vložky na Obr. 45 vpravo. V horní části Obr. 45 jsou zobrazeny vložky z HP PA 12GB a ve spodní části Obr. 45 jsou zobrazeny hliníkové vložky. Pro oba materiály vložek byla použita jednotná stupnice teploty zobrazená na Obr. 45 dole.





Obr. 45 – Simulace vstřikování, fáze chladnutí – rozložení teploty v plastové vložce po 11 s a hliníkové po 10 s

Ačkoliv jsou vstřikovací vložky na Obr. 45 zobrazeny ve stejném čase od začátku, kdy byl do nich vstříknut plast, jsou jejich velikosti teploty a rozložení výrazně jiné. Zatímco hliníkové vložky mají na konci fáze chladnutí teplotu nejvýše 40 °C, vložky z HP PA 12 GB mají ve stejnou dobu teplotu podstatně vyšší. Větší teplota je na pohyblivé vložce než na pevné vložce, a to téměř 135 °C. Ve srovnání s hliníkovými vložkami je teplota vyšší přibližně o 100 °C.

Vložky z HP PA 12 GB nejsou kvůli svým fyzikálním vlastnostem schopny odvádět teplo tak dobře jako kovy, a proto dochází k výraznému prodlužování vstřikovacího cyklu, jenž byl více popsán v 3.1 podkapitole – Vstřikovací cyklus. I v této kapitole se potvrdilo, že zkrácení doby chladnutí výstřiku má na celkové zkrácení celého vstřikovacího cyklu velký vliv. Aby bylo možné zchladit vstřikovaný díl, je nutné mu odebrat teplo vedením přes vložku. V této simulaci bylo zvoleno ochlazení vložky okolním vzduchem při otevření formy. Jelikož vložky nemají chladicí kanálky, musí být chlazeny z vnějšku. Dále jsou vložky v modulární vstřikovací formě umístěny v hlavní desce. Pohyblivá vložka je spodní plochou v kontaktu s ocelovou deskou a pevná vložka s hliníkovou vypodložovací deskou. Z tohoto důvodu jiná možnost ochlazovat vložky než přes dělicí rovinu není. Tím je možné chladit jen horní plochu vložky při otevření formy. Po ochlazení této plochy po dostatečně dlouhou dobu otevření formy je možné cyklus opakovat za stejných podmínek. Pokud by doba otevření byla zvolena příliš krátká, hrozí, že vložky z HP PA 12 GB se neochladí na stejnou teplotu jako v předchozím cyklu. Tím nastává riziko postupné akumulace tepla do vložek, které může výrazně ovlivnit vstřikování. Např. při fázi chladnutí vlivem nahřátých vložek výstřik nezchladne na požadovanou teplotu a při vyhození z formy vyhazovače propíchnou výstřik, akumulace tepla může poškodit vložky atd. Aby byl vstřikovací proces stabilní, je nutné mít pro každý vstřikovací cyklus stejné podmínky.

10.6 Chlazení plastových vložek

Zkrátit dobu trvání vstřikovacího cyklu lze především zvýšením efektivity chlazení vstřikovaného dílu. Možností, jak chladit vstřikovací vložku, je více. Základní rozdělení je vnitřkem, nebo vnějškem. Vnitřní chlazení znamená ochlazovat vložku vnitřními kanálky, kterými protéká chladnější médium a odebírá teplo z vložky. Vnější chlazení je z hlediska konstrukce modulární vstřikovací formy možné jen přes dělicí rovinu, a jen pokud je otevřena vstřikovací forma. Oproti tomu vnitřní chlazení vložky není závislé na otevření formy a je možné při všech fázích vstřikovacího cyklu, což je velkou výhodou zejména při fázi chladnutí, kterou lze tak zkrátit. Naopak vnější chlazení fázi chlazení ovlivnit nemůže. Cílem vnějšího chlazení je zchladit vložku pokud možno na konstantní teplotu pro další cyklus.

V 5. kapitole – Stávající vstřikování do 3D tištěných plastových vložek, vycházejících z Přílohy č. 1 a Přílohy č. 2 – bylo využíváno jak vnitřní, tak vnější chlazení. Vnější chlazení bylo realizováno buď ponecháním formy dostatečně dlouhou dobu otevřenou, nebo urychlením ochlazování povrchu

stlačeným vzduchem. Při vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF byly vyzkoušeny všechny používané možnosti.

Chlazení vnitřními kanálky

Oproti metodám 3D tisku fotopolymerizace a tryskání materiálu je odstranění podpor z MJF 3D tisku snazší, viz 4.3 podkapitola – Metody 3D tisku. Je tak možné navrhnout chladicí kanálky složitější a menšího průřezu. V praxi se osvědčilo jako nejsnadnější vyjmout nespečený prášek z kanálků drátem.

Chlazení vnitřními kanálky je v případě kovových vložek velmi využíván zejména kvůli své efektivitě. Ovšem v případě plastových vložek tento způsob naráží na vlastnost plastu, a to tepelně izolovat. Použité plastové vložky mají tloušťku od dělicí roviny ke spodní ploše pouhých 10 mm. Vlastnost plastu tepelně izolovat je dobře viditelná na simulaci vstřikování v řezech formou na Obr. 40 (porovnání s ocelovou vtokovou vložkou), Obr. 41 (porovnání s ocelovými vyhazovači) a více v Příloze č. 5. Ve všech případech je vysoká teplota v místě kontaktu s taveninou, ale na druhé straně je vložka studená. Opakem je vlastnost oceli vést teplo 200krát lépe než HP PA 12 GB. Jak ukazuje Obr. 40 vlevo – začátek fáze chladnutí, ocelová vtoková vložka lépe vede, rozvádí teplo od místa kontaktu s taveninou dále. Vlastnost vést teplo je pro chlazení vložek zásadní.

Další nevýhodou plastových vložek oproti kovovým je jejich menší odolnost v tlaku. Při návrhu chladicích kanálků v kovové vložce je doporučeno umístit chladicí kanálek v minimální vzdálenosti trojnásobku průměru chladicího kanálku od dutiny. To je v případě plastové vložky velice nevyhovující, jelikož plast, aby mělo smysl chlazení vstřikovaného dílu, je nutné umístit chladicí kanálek co nejbližší k dutině. Ovšem tím narůstá riziko zborcení stěny, která odděluje chladivo v kanálku od vstřikovaného plastu, jak se i při zkoušení chladit vložku kanálky stalo a jak je zobrazeno na Obr. 46. Při experimentu byly nastaveny parametry vstřikování, především vstřikovací tlak velmi podobně parametrům uvedených v Tab. 7.



Obr. 46 – Pokus chladit plastovou vložku kanálkem

Po neúspěšných končících zborcením stěny bylo chlazení vložek kanálky zastaveno. Dalším důvodem byla i vyšší cena 3D tisku. S rostoucím objemem 3D tisku cena roste exponenciálně, jak ukazuje graf na Obr. 26. Chlazená vložka zobrazená na Obr. 46 je 2krát vyšší než vložky zobrazené na Obr. 31. Pokud je vstřikovací vložka chlazená chladicím kanálkem, výrazně dojde k nárůstu výrobní ceny. Aby nedošlo ke zborcení stěny po pár cyklech, jako se stalo vložce zobrazené Obr. 46, je důležité nastavit především vstřikovací tlak na malou hodnotu, přibližně 100 bar. Ovšem tak nízká hodnota vstřikovacího tlaku může být příčinou nezatečení plastu atd.

Možným řešením chladicích kanálků v plastové vložce by mohlo být použití kovových trubek, které by se do 3D vytištěné vložky zasouvaly a u nichž by nehrozilo zborcení jako u plastu. Dalším řešením by bylo použití malého množství kanálků s malým průřezem atd. Nicméně jakékoliv přidání objemu plastové vložce prodražuje 3D tisk a je na zvážení, jestli je výroba vložky stále ještě ekonomicky výhodná.

Chlazení stlačeným vzduchem

Při vstřikování a simulaci bylo použito chlazení vložky vzduchem. Tento výchozí krok vnějšího chlazení vložky je velmi zdoluhavý. Chlazení stlačeným vzduchem výrazně pomohlo k ochlazení povrchu vložky a bylo provedeno pocitově. Pokud jsou vložky chlazeny stlačeným vzduchem, je důležité stanovit dostatečnou dobu chlazení v závislosti na intenzitě proudění a místě dopadu stlačeného vzduchu, úhlu atd. Nicméně v současné chvíli se jedná o nejúčinnější způsob chlazení plastových vložek.

11 Validace teplotního zatížení vložek

V této kapitole bude provedeno měření teploty povrchu vložek za účelem ověřit hodnoty získané simulací. Bohužel simulaci vstřikování provedenou v 10. kapitole nebylo vzhledem k možnostem této práce možné provést se zahrnutím všech vlivů, zejména nebylo možné simulovat vlastnosti vložky získané 3D tiskem, dále pak podrobnější znalosti vlastností HP PA 12 GB nejen pro správné definování simulace, ale i k porozumění chování plastu plnit funkci vstřikovací vložky chybí. I když hodnoty získané simulací jsou velmi užitečné a pomáhají přiblížit více problematiku vstřikování do 3D tištěných vložek, bez validace simulace nemají takovou vypovídající hodnotu.

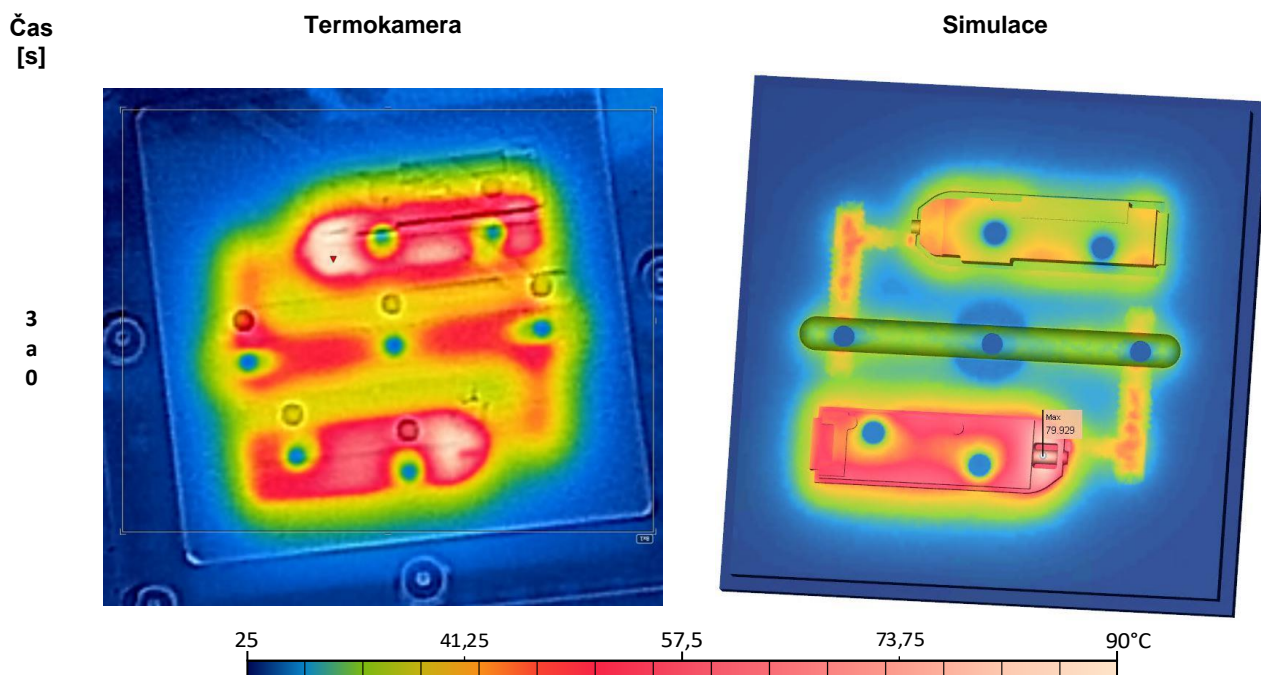
Vstřikování testovacího dílu zobrazeného na Obr. 30 probíhalo ve dvou krocích. V prvním kroku byly nastaveny parametry vstřikování dle Tab. 5. Tyto parametry byly použity i pro vstřikování do hliníkových vložek. Avšak pro vstřikování do vložek z HP PA 12 GB se ukázaly jako nevhodné. Důvodem byla vlastnost plastu teplo izolovat, a jelikož teplo nemohlo vedením přes vložku procházet a fáze chladnutí a otevření formy byly příliš krátké, docházelo k akumulaci tepla na povrchu plastových vložek. Tím se měnily parametry vstřikování a bylo potřeba je upravit. K této úpravě byla využita simulace vstřikování. Výsledky simulace pomohly parametry vstřikování upravit na hodnoty uvedené v Tab. 7. Především musely být prodlouženy doby chlazení a dotlaku. Cílem měření bude ověřit, jestli parametry nastavené pomocí údajů ze simulace, především doba pro zchlazení vložek byla dostatečná.

K měření byla použita termokamera FLIR E5-XT. Její popis včetně umístění pro snímání a měřená oblast a další je popsáno více v Příloze č. 6. Jak simulace, viz Obr. 45 nahoře a detailněji v Příloze č. 5, tak i měření termokamerou potvrdily, že se větší teplota vyskytuje na pohyblivé vložce, ne na pevné. Z tohoto důvodu byla měřená oblast na pohyblivé vložce. Simulace vstřikování v 10. kapitole byla vyhodnocena převážně po provedení 10 vstřikovacích cyklů. Avšak simulace byla provedena i pro 1 cyklus. I když byla především doba otevření formy prodloužena za účelem ochlazení vložek, nárůst teploty byl znatelný. Tento rozdíl nárůstu teploty bude měřením ověřen, proto měření bude provedeno jak po 1. cyklu, tak i po provedení všech 10. Nárůst teploty vložky má velký vliv na vstřikování. Doporučeno je dodržovat teplotu na vložce nižší, než je max. teplota určená výrobcem granulátu, ale především pro zaručení stejné kvality vstřikovaných dílů dodržovat teplotu pokud možno konstantní v každém cyklu.

Před měřením byl na vstřikolisu proveden patřičný počet cyklů za podmínek uvedených v Tab. 7. To samé bylo provedeno v simulaci. Avšak na vstřikolisu bylo možné měřit teplotu i po 120 s. V simulaci by bylo možné nastavit dobu otevření formy na více než 120 s pouze v případě provedení 1 cyklu. Aby byla simulace nastavená stejně, tzn. pro oba typy cyklů, budou výsledky pouze do 120 s. Na vstřikolisu s možností případně prodloužit dobu otevření formy bude probíhat měření teploty déle, a to až do 240 s.

Při měření termokamerou nebylo možné z důvodů uvedených v Příloze č. 6 pořizovat první snímek ihned po otevření formy. Z tohoto důvodu údaje z termokamery začínají v čase 3 s od otevření formy. Důvodem je horší přístupnost k měřené oblasti při otevření formy. Jelikož nebyla dodržena minimální vzdálenost pro měření termokamerou daná výrobcem, který udává při dodržení podmínek přesnost měření ± 2 °C., lze přesnost měření stanovit odhadem na ± 5 °C.

Kromě časového posunu pořízení prvního snímku, byly další snímky pořízeny po následujících intervalech od doby otevření formy. Čas byl měřen stejně jako na vstřikolisu, tj. od doby, kdy se forma začala otevírat. Interval pořízení snímku byly po 10 s do 90 s. Poté byly intervaly prodlouženy na 30 s až do 240 s. Výsledky měření spolu s porovnáním se simulací pro uvedené časy jsou zobrazeny v Příloze č. 6. Aby bylo možné porovnat rozložení teplot z měření se simulací, muselo být sjednoceno barevné spektrum stupnic tak, že barevné spektrum stupnice ze simulace se přizpůsobilo barevnému spektru z termokamery, které nelze měnit. Na Obr. 47 je porovnání snímku z termokamery se simulací po provedení 10 cyklů a po otevření vstřikovací formy. Upravené barevné spektrum teplotní stupnice je zobrazené na Obr. 47 dole.



Obr. 47 – Porovnání rozložení teplot z termokamery a simulace po otevření formy a po provedení 10 cyklů

Zatímco simulace označuje místo největší teploty praporkem, viz Obr. 47 vpravo a uvedením max. hodnoty, termokamera používá označení červeným trojúhelníkem, viz Obr. 47 vlevo. Avšak simulace ukázala na jiné místo výskytu maximální teploty než snímek pořízený termokamerou. Označila nejvyšší teploty na místo výstupku vložky pod krytem s logem ZČU, termokamera na místo výstupku krytu se zkratkou RTI. Jak simulace, tak termokamera ukazují na čelo výstupku. I když bylo měření několikrát zopakováno, ukázalo vždy přibližně stejné místo. Podobně byla simulace upravena několikrát a vždy se stejným výsledkem. Nejenže se neshodovalo umístění nejteplejšího místa, ale zároveň byla jiná i hodnota. Simulace ukázala max. teplotu 79,9 °C, zatímco termokamera 97,7 °C. Odečtením teploty ze simulace, kde termokamera naměřila nejvíce, je hodnota přibližně 50 °C, což představuje rozdíl téměř dvojnásobný, než je skutečná hodnota. Ovšem pokud bude postup obrácený, termokamera ukazuje přibližně stejnou hodnotu, jako určila simulace. Při porovnání spodních výstupků vložky, tj. oblast pod krytem s logem ZČU, lze říci, že simulace vstřikování se přibližně shodovala s teplotami naměřenými termokamerou.

Při porovnání rozložení teplot na vložce bez zahrnutí výstupků pod kryty se simulace shodovala s termokamerou až na místo pod hlavním kanálkem, kde skutečná hodnota teploty byla vyšší, než určila simulace. Oblasti vyhazovačů se shodovaly a správně bylo simulováno chladnější místo na vyhazovači a v jeho okolí.

I když bylo pro simulaci použito Moldex3D Studio ve verzi 2022, nepodařilo se správně určit rozložení teplot. Pravděpodobným důvodem je omezená možnost definovat vlastnosti vstřikovací vložky, podobně jako i u dalších softwarů zaměřujících se na vstřikování plastů. Většina těchto softwarů předpokládá, že se plast bude vstřikovat do kovu, ne do plastu. S tím je spojena i definice materiálů formy, která je určena spíše pro kovy. Potřebné vlastnosti HP PA 12 GB k definování úlohy jsou uvedeny v Příloze č. 5. Dále byly v simulaci definovány některé vlastnosti obecně, ne pro HP PA 12 GB. I kdyby tyto hodnoty byly známy, záleží na tom, jak moc by změnilo výsledek simulace.

11.1 Oblast výstupku pohyblivé vložky pod krytem RTI

Jednou z možných příčin, proč se nepodařilo správně určit teplotu v této oblasti, může být rozdílnost v průřezích tloušťky kavit. Dle Obr. 30 vpravo nahoře mají poloviny krytu elektroniky rozdílné tloušťky horní stěny. Zatímco kryt s logem ZČU má tloušťku 2 mm, kryt se zkratkou RTI má tloušťku pouze 1,5 mm. Proudící tavenině je tak kladen větší odpor při plnění dutiny krytu se zkratkou RTI než dutinou krytu s logem ZČU. To ovšem ukázala i simulace proudění, zobrazená na Obr. 37, kde dutina krytu s logem ZČU je plněna rovnoměrně, zato dutina krytu se zkratkou RTI je plněna napřed po stranách a pak horní stěnou. Proudění

taveniny menším průřezem způsobuje nárůst smykového napětí, které je důvodem ohřevu jak taveniny, tak stěn vložky. Při proudění taveniny vtokovou soustavou je zpravidla největší smykové napětí ve vtokovém ústí. V případě kovových materiálů je teplo snadněji odváděno, v případě plastu nikoliv. V 3.2 podkapitole – Vstřikovací lis – byla popsána vstřikovací jednotka, jak je v ní ohříván plast, který je sice ohříván topnými válci, ale větší část tepla vzniká třením šneku o plast. V případě plochy vstřikovací vložky tvořící dutiny malého průřezu, může být třením akumulováno značné množství tepla. Ke vzniku tepla třením taveniny v malém průřezu může přispívat i drsnost povrchu vložky. V 9.2 podkapitole – Drsnost povrchu vložek 3D tištěných metodou MJF byla zjištěno drsnost Ra 10,7 μm. Oproti běžně používaným drsnostem kovových vložek se jedná o velmi vysokou hodnotu. Nevýhodou je, že teplo vzniklé třením taveniny o vložku se obtížněji simuluje.

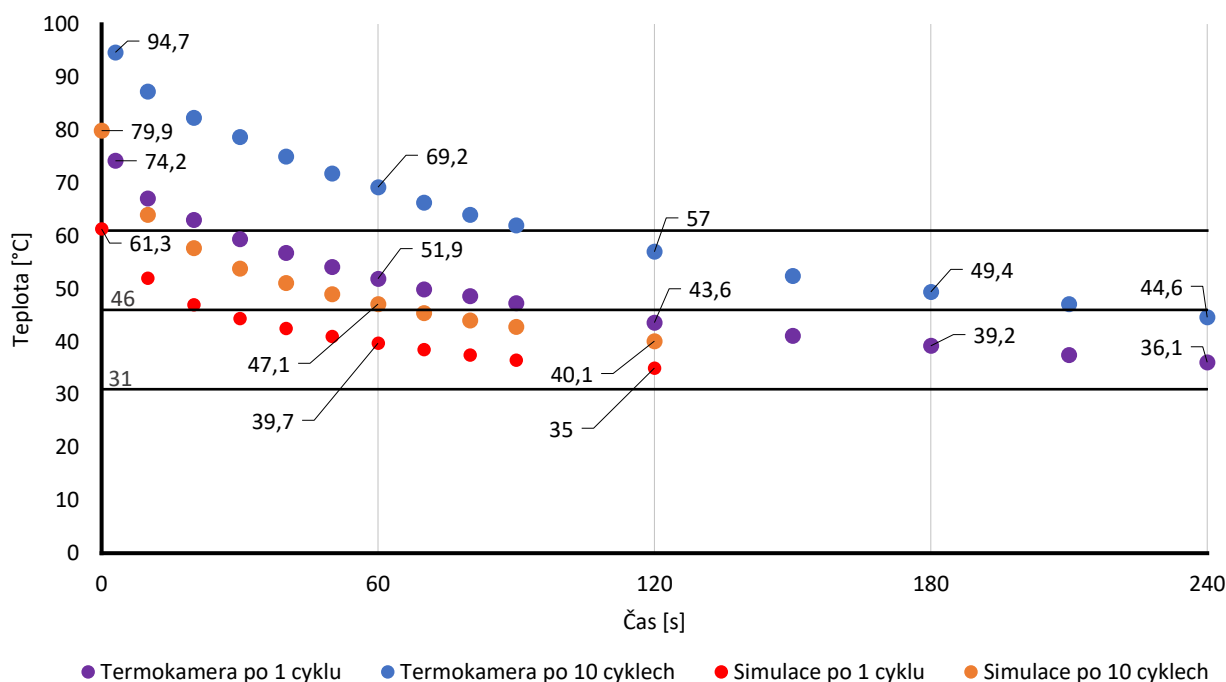
Druhou možnou příčinou vzniku tepla je zamrznutí vtoku před dutinou krytu se zkratkou RTI dále než před dutinou krytu s logem ZČU, viz Obr. 38 za doby, kdy fáze dotlaku neskončila. Ovšem to se liší max. o 1 s. Spíše vliv dotlaku může být zdrojem tepla v oblasti pod hlavním kanálkem.

11.2 Oblast pohyblivé vložky pod hlavním kanálkem

Dle provedené analýzy dotlaku, viz Obr. 38 je v hlavním a vedlejším kanálku tekuté jádro po celou dobu dotlaku. Možnou příčinou větší teploty vložky pod hlavním kanálkem, než ukázala simulace, je delší doba tlačení taveniny a zároveň i tření.

11.3 Ověření doby zchladnutí vložky během otevření formy

I když se místa výskytu s maximální teplotou neshodovala, bylo zapotřebí ověřit původní myšlenku validace, zdali simulací určený čas pro zchladnutí vložky při otevření vstřikovací formy po dobu 120 s je dostatečný. Maximální hodnoty teplot ze simulace a termokamery z jednotlivých časových intervalů jsou uvedeny v Příloze č. 6 a z těchto hodnot byl sestaven graf zobrazený na Obr. 48.



Obr. 48 – Porovnání měření teploty termokamerou se simulací

Graf na Obr. 48. znázorňuje průběh max. teplot na pohyblivé vložce v čase při otevření vstřikovací formy. Výsledky ze snímků z termokamery a ze simulace byly pro definované časové intervaly vyneseny do grafu. Na vodorovné ose jsou znázorněny časové úseky po 1 min, kde důležitý je čas 2 min po otevření formy, v tento čas zároveň končí jeden cyklus a začíná další. Výrobce granulátu dle Přílohy č. 3 udává pro vstřikování min. doporučenou a max. teplotu formy. Tyto hodnoty jsou v grafu na Obr. 48 zobrazeny vodorovnou černou čarou. Důvodem změny parametrů, především doby prodloužení doby chlazení

a otevření formy, bylo ochladit formu na teplotu vložky doporučenou výrobcem granulátu. Průběh teploty zjištěné simulací po 10 cyklech, Obr. 48 oranžově, je po 120 s mezi minimální a doporučenou teplotou. S ohledem na rostoucí akumulaci tepla v plastové vložce se podle simulace doba otevření 120 s jeví jako dostatečná. Ovšem měření kamerou, Obr. 48 modře, ukázalo, že po 120 s se vložka ochladí na 57 °C, což je jen 3 °C pod maximální teplotou formy doporučenou výrobcem granulátu. Při zohlednění chyby měření termokamerou se jedná o velmi hraniční hodnotu. Na základě měření termokamerou by bylo vhodnější dobu otevření formy prodloužit. Ideální řešení by bylo zchladnutí vložky na doporučenou teplotu formy, avšak to by znamenalo ponechat formu otevřenou po dobu 4 min vzduchem. Zároveň průběh teplot potvrzuje, že čím větší je teplotní spád, tím rychlejší vyrovnání teplot probíhá ochlazení vložky. Z tohoto důvodu je po otevření formy rozdíl mezi okolní teplotou vzduchu a vložkou velký a vložka chladne rychleji. S prodlužující se dobou otevření formy se teplota vložky začíná přibližovat pomaleji k teplotě okolního vzduchu. Z grafu na Obr. 48 vyplývá jasný závěr, že než čekat 4 min, je spíše doporučeno vložku ochlazovat stlačeným vzduchem

Průběh teploty vložky v čase sestrojený simulací vstřikování po jednom cyklu, Obr. 48 červeně, se neshodoval ani s průběhem hodnot naměřených termokamerou Obr. 48 fialově. Přibližná shoda by mohla být na začátku grafu, tedy ihned po otevření formy, ovšem pak následuje ve skutečnosti pomalejší ochlazení na vzduchu, než vyhodnotila simulace.

11.4 Závěr

Ačkoliv simulace pomohla přiblížit vstřikování do 3D tištěných plastových vložek a pomoci k nastavení parametrů, nemohla postihnout všechny vlivy. Výsledkem bylo neodhalení místa s největší teplotou. Důvodem může být zmiňovaná neznalost o chování plastu HP PA 12 GB při procesu vstřikování. A zároveň v současné době neexistuje software na simulování vstřikování plastů, který by zohlednil vlastnosti 3D tištěných plastových vložek. Takový software by se musel naprogramovat, zohledňovat např. akumulaci tepla při vstřikování, drsnost povrchu vložek atd., ale především by měl zohledňovat vlastnosti plastových 3D tištěných vložek.

2.2 podkapitola – Vlastnosti plastů byla věnována právě vlastnostem plastů. V grafu na Obr. 4 je zobrazena – Závislost pevnosti plastů na teplotě, která popisuje pokles pevnosti plastu s rostoucí teplotou. Se změnou teploty plastu souvisí i změna stavu. Dle Tab. 4 je teplota tání prášku vložky 186 °C. Zajímavostí je, že i když byl pod tlakem do vložky vstřikován plast o teplotě 225 °C, vložka se neroztavila. S ohledem na možnosti této práce nebyly bohužel provedeny zkoušky plastu, které by zkoumaly jeho závislost na teplotě, času a rychlosti zatěžování.

Za stávajících možností je simulace vstřikování provedena v Moldex3D stále velmi nápomocná. Pokud bude provedena dle 10.4 podkapitoly – Zjednodušení simulace, může poskytnout kvalitní výsledek za krátkou dobu. S ohledem na provedenou validaci teplotního zatížení vložky z HP PA 12 GB je však nutné při návrhu formy počítat s tím, že skutečná teplota bude vyšší, zejména nezapomenout prodloužit dobu nutnou pro ochlazení vložky.

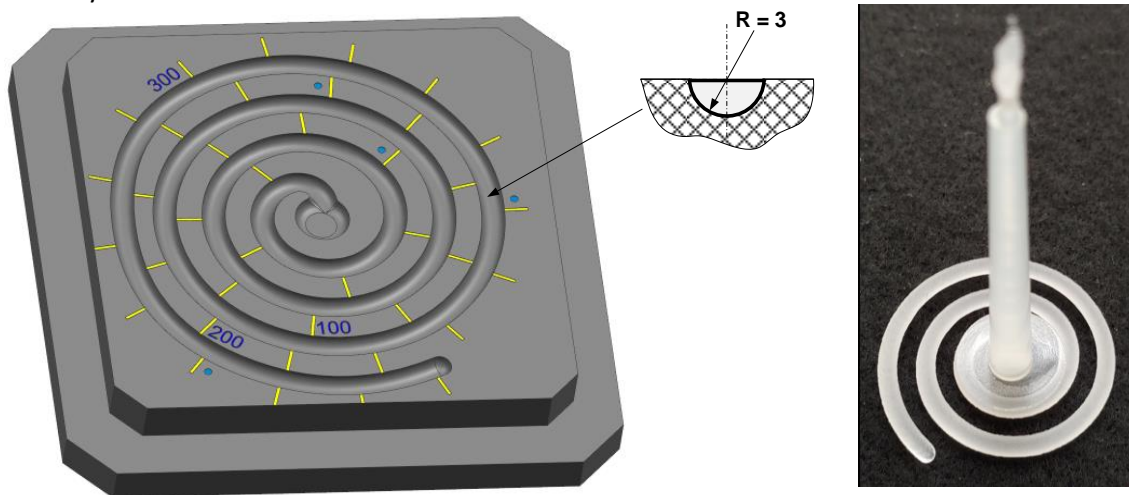
12 Zatékavost

Na základě 11. kapitoly – Validace teplotního zatížení vložek, která měla ověřit správnost výsledků získaných v 10. kapitole – Simulace vstřikování do 3D tištěných plastových vložek, byla zjištěna neshoda. Závěrem bylo, že i když simulace pomohla k lepšímu nastavení vstřikování, není schopna popsat v plném rozsahu vstřikování do 3D tištěných metod MJF a z HP PA 12 GB. Z tohoto důvodu bylo další zkoumání vlastností vložek řešeno formou testování.

Hlavní příčinu neshody simulace s termokamerou mohly způsobovat především povrchové vlastnosti vložek, které mají na vstřikování velký vliv. V příloze č. 5 byl povrch vložek v dutině síťován lepšími elementy z hlediska výpočtu než zbytek tělesa. Důvodem bylo lépe analyzovat právě vlastnosti na povrchu. V případě plastových vložek je navíc teplo z povrchu hůře odváděno, spíše izolováno, a při nedostatečné době pro zchladnutí vložek teplo narůstá. Nejen vliv tepla, ale i vyšší drsnosti má vliv na vstřikování, zejména tyto vlastnosti plastových vložek 3D tištěných metodou MJF a možná i další odlišují plastové vložky od kovových.

K prozkoumání vlastností plastových vložek, zejména povrchových, byla zvolena technologická zkouška zatékavosti. Jedná se o technologickou zkoušku vhodnou pro porovnání materiálů vložek, vstřikovacích podmínek, vstřikovaného plastu atd. Podstatou zkoušky je vstřikovat taveninu kanálkem, jehož délka je tak dlouhá, aby tavenina nikdy nevyplnila celý objem. K tomu je zapotřebí takový průřez, aby se tavenina v nějaké délce zastavila. Vzhledem k tomu, že objem dutiny nebude záměrně do značné míry vyplněn celý, je použití softwarů zaměřujících se na vstřikování ne zcela správnou volbou. I když dokáží odhalit nedotečení taveniny, jedná se však o malé nedotečení. K nevyplnění např. poloviny objemu jsou nevhodné. I pokusy simulací určit délku zatečení skončily neúspěchem.

Hodnotícím kritériem zkoušky zatékavosti je délka zatečení plastu do dutiny. V této kapitole bude porovnávána vložka z HP PA 12 GB s hliníkovou vložkou. Průřez ani délka tvaru kanálku nejsou definovány. Pro tvar délky kanálku je doporučeno použít tvar Archimedovy spirály, která byla v tomto případě použita. 3D model vložky pro testování zatékavosti je zobrazen na Obr. 49 vlevo, včetně detailu s rozměrem průřezu kanálku dutiny.



Obr. 49 – Vložka pro testování zatékavosti a výstřik

Pro změření délky zatečení má 3D model zobrazený na Obr. 49 stupnice. Jednotlivé vzdálenosti jsou vzdáleny od sebe 10 mm a na Obr. 49 jsou zvýrazněny žlutou barvou. Vzdálenosti po 100 mm jsou navíc označeny hodnotou vzdálenosti a na Obr. 49 jsou zobrazeny modře. Vzdálenosti po 50 mm jsou kromě hodnot označených svou hodnotou označeny tečkou, na Obr. 49 jsou zvýrazněny světle modře. Maximální měřitelná vzdálenost, kam může tavenina zateci, je 383 mm. 3D model i se stupnicí a popisem vzdáleností byl 3D vytištěn a použit pro měření délek zatečení. S ohledem na přesnější odečet vzdáleností bylo nutné k stupnici přidat hodnoty po 1 mm, které byly na 3D vytištěnou vložku dorýsovány. Tak bylo možné přesnost měření stanovit na ± 1 mm. Výstřik zobrazený na Obr. 49 vpravo byl pak vkládán do 3D vytištěné vložky se stupnicí, kde byla změřena jeho délka zatečení. Na výstřiku se projevila mezera mezi ocelovou vtokovou vložkou a pohyblivou vložkou, která tvořila přetok, Obr. 49 vpravo prostřední část výstřiku. Vliv mezery se projevil při testování vrstev nanášených sprejem a popsanych v Příloze č. 7.

3D model zobrazený na Obr. 49 ale bez stupnice a popisu vzdáleností byl upraven na rozměry popsané v 9. kapitole – Konstrukce 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek a 3D vytisknut podle 7.3 podkapitoly – Výrobní postup. Rozměry 3D tištěné vložky jsou 71,8 × 71,8 – 10,45 mm. Hliníková vložka byla vyrobena obráběním podle běžně používaných tolerancí a drsností stejně jako vložka pro vstřikování testovacího dílu, zobrazená na Obr. 31 vlevo. Rozměry hliníkové vložky jsou 72 × 72 – 10 mm. K pohyblivým vstřikovacím vložkám byly ze stejného materiálu vyrobeny pevné vložky. V modulární vstřikovací formě byla vždy dutina tvořena vložkami stejného materiálu. Zatímco pár hliníkových vložek bylo možné použít pro měření všech tlaků, vložky z HP PA 12 GB musely být často měněny, jelikož zejména při vyšších tlacích docházelo k tvorbě přetoků. Na základě výsledků byl pro měření tlaků do 300 bar použit stejný pár vložek z HP PA 12 GB. Pro další hodnoty byly 3D tištěny nové páry.

Vstřikování dutiny při zkoušce zatékavosti bylo přímým vtokem. Z tohoto důvodu má vložka v místě napojení s vtokovou vložkou větší středový otvor dutiny v dělicí rovině. Vstup do Archimédovy spirály, střed vložky je širší než zbytek kanálku, tak aby průměr rozšířené části byl větší než vnitřní průměr konce vtokové vložky, viz Obr. 49. Vstřikování probíhalo za podmínek uvedených v Tab. 7 a dále v textu zdůvodněno.

Parametry	Hodnota	Jednotka
Objem dílů	1,39	cm ³
Celkový objem (včetně vtokové soustavy)	2,64	cm ³
Dávkovaný objem	20	cm ³
Sušení granulátu	–	min
Objem zpětné dekomprese	3	cm ³
Uzavírací síla	X + 50	kN
Teplota pod násypkou	35	°C
Teplota na topném válci 1	210	°C
Teplota na topném válci 2	215	°C
Teplota na topném válci 3	220	°C
Teplota na topném válci 4	225	°C
Teplota na trysce	225	°C
Dávkování		
Rychlost otáčení šneku	20	m/min
Zpětný tlak	80	bar
Plnění		
Tlakové omezení	X	bar
Rychlost plnění	6	cm ³ /s
Dotlak		
Tlakové omezení	25	bar
Objem pro přepnutí	Y	cm ³
Doba	0,01	s
Ostatní		
Doba chlazení	10	s
Doba otevření formy	5	s

Tab. 9 – Parametry vstřikování zatékavosti

Vstřikování zatékavosti probíhalo bez dotlaku, proto byly v Tab. 9 nastaveny minimální možné hodnoty tlaku a doby trvání, které nemohou délku zatečení z předchozí fáze plnění měnit. Dotlak byl vynechán z důvodu zjednodušení testování, jelikož by bylo téměř nemožné stanovit délku zatečení při plnění a změně délky dotlakem. Oproti předchozím parametrům byla rychlost plnění snížena na 6 cm³/s. Důvodem je snížit vliv ohřevu povrchu vložek prouděním taveniny, který se obtížně určuje. Pro lepší porovnání chování vložky z HP PA 12 GB vůči hliníkové byly doby chlazení a otevření formy zkráceny na hodnoty stejné pro vstřikování testovacího dílu do hliníkových vložek dle Tab. 8. Tyto časy byly ověřeny simulací. Zároveň objem vložky pro zkoušku zatékavosti je menší než objem vložky pro vstřikování testovacího dílu, u kterého bylo zjištěno, že doba chlazení a otevření formy je dostatečná. Dále pak

i vstřikovaný objem je menší u zkoušky zatečení. Časy fází chlazení a otevření formy v Tab. 9 jsou pro zchlazení hliníkové vložky dostačující.

V parametrech vstřikování zatékavosti v Tab. 7 nejsou uvedeny hodnoty uzavírací síly, tlakového omezení při plnění a objem pro přepnutí. Důvodem je, že tyto parametry byly různé podle varianty testování zatékavosti a omezujícího tlaku. Velikost uzavírací síly byla vždy nastavena o 50 kN větší, než je hodnota tlakového omezení. Výchozím tlakovým omezením bylo 100 bar a po 100 bar byla hodnota tlaku navyšována až do hodnoty, při které bylo vstřikování ještě proveditelné s ohledem na tvorbu přetoků ve vložkách z HP PA 12 GB.

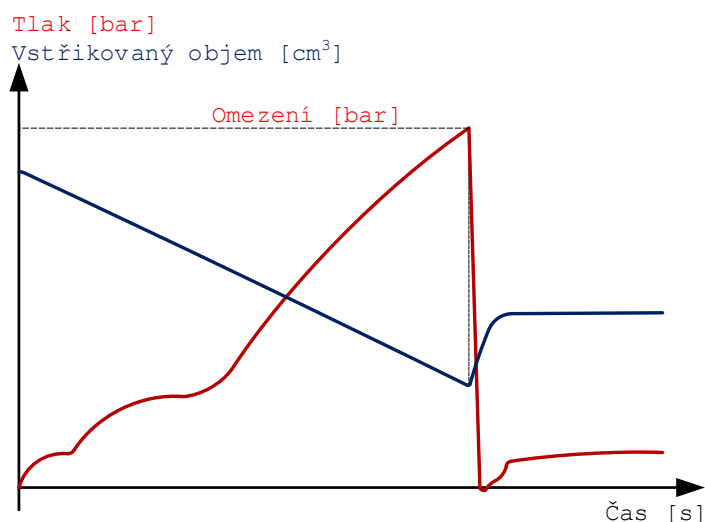
12.1 Varianty testování

Aby měla zkouška zatékavosti dobrou vypovídací hodnotu, je nutné omezit počet vlivů na testování. Za prvé byla vynechána fáze dotlaku. Za druhé je zapotřebí odlišit, jaký má vliv na proudění taveniny a s tím související zatékavost na povrchu a jaký na vedení tepla v případě plastových vložek izolace tepla. Z tohoto důvodu byla zkouška zatékavosti testována ve dvou variantách, kdy každá varianta se zaměřuje na jinou vlastnost vstřikovací vložky. Varianty testování zatékavosti se lišily objemem pro přepnutí. Pro variantu „Plnění do tlakového omezení“ byl objem pro přepnutí proměnný v závislosti na tlakovém omezení. Ve variantě „Plnění do 10 s“ byl objem pro přepnutí pevně nastaven 5 cm³.

I když testovat délku zatékavosti je možné ve dvou variantách, je doporučeno provést obě varianty a výsledek mezi nimi porovnat.

Plnění do tlakového omezení

První varianta testování zatékavosti je do tlakového omezení či „Do omezení“, „Omezení“. Podstatou varianty je plnit dutiny do hodnoty tlakového omezení a při jejím dosažení ihned zastavit plnění. Z tohoto důvodu má objem pro přepnutí proměnnou hodnotu. Průběh tlaku a velikost vstřikovaného objemu jsou zobrazeny v grafu na Obr. 50.



Obr. 50 – Podstata vstřikování zatékavosti variantou „Omezení“

Důležitým parametrem vstřikování, které jsou ve variantě „Omezení“ sledovány na displeji vstřikolisu, jsou vstřikovaný tlak zobrazený v grafu na Obr. 50 červeně a vstřikovaný objem zobrazený v grafu na Obr. 50 modře. Při vstřikování měly všechny cykly průběh tlaku a vstřikovaného objemu v čase podobný. Z tohoto důvodu nejsou v grafu na Obr. 50 zobrazeny hodnoty. Křivka tlaku je charakteristická dvěma zakřiveními. První zakřivení znázorňuje plnění vstupního kanálku v ocelové vtokové vložce. Druhé zakřivení znázorňuje plnění dutiny až do zamrznutí čela taveniny. Jakmile k němu dojde, následuje nárůst tlaku až do tlakového omezení. Průběh vstřikovaného objemu sleduje objem plastu ve vstřikovací jednotce, který postupně ubývá až do doby, kdy je plnění na vstřikolisu obsluhou zastaveno. Po ukončení fáze plnění probíhá dále na vstřikolisu velmi krátký dotlak, doba chlazení a otevření formy. Při variantě „Omezení“ je důležité na vstřikolisu ve správném okamžiku zastavit fázi plnění. Pokud by tak učiněno nebylo, podstata

zkoušky by ztratila svůj význam. Jakmile je fáze plnění zastavena, následuje prudké snížení tlaku i zastavení přísunu další taveniny do formy. Oba sledované parametry se postupem času dostávají na dále nastavené hodnoty na vstřikolisu. V případě tlaku na hodnotu při dávkování a hodnota objemu narůstají do doby, než nebude ve vstřikovací jednotce připraven požadovaný objem pro další cyklus.

Cílem varianty „Omezení“ je zjistit, jak moc povrch vložky klade odpor, který ovlivňuje délku zatečení. Velice důležité je ukončení fáze dotlaku při dosažení tlakového omezení. Pokud by k ukončení plnění nedošlo, tavenina by tekla dále při tlaku daném tlakovým omezením. Výsledkem varianty zatékavosti „Omezení“ je zjistit, kam až tavenina do nastaveného tlakového omezení dotekla, aniž by bylo nuceno pokračovat v tečení při daném tlaku, což je podstata druhé varianty testování zatékavosti.

Plnění do 10 s

Druhá varianta testování zatékavosti je pojmenována „Plnění po dobu 10 s“ či „Plnění do 10 s“, „10 s“. Varianta pokračuje v plnění i po dosažení tlakového omezení. Podstatou zkoušky je plnit dutinu po dobu 10 s. Začátek průběhu vstřikovaného tlaku by byl podobný, jako je v první variantě dle grafu na Obr. 50 červeně, avšak při dosažení tlakového omezení nedojde k ukončení fáze plnění, ale plnění pokračuje dále při daném tlaku, aby doba plnění byla 10 s. Tato varianta testování délky zatečení je pro obsluhu vstřikolisu podstatně jednodušší.

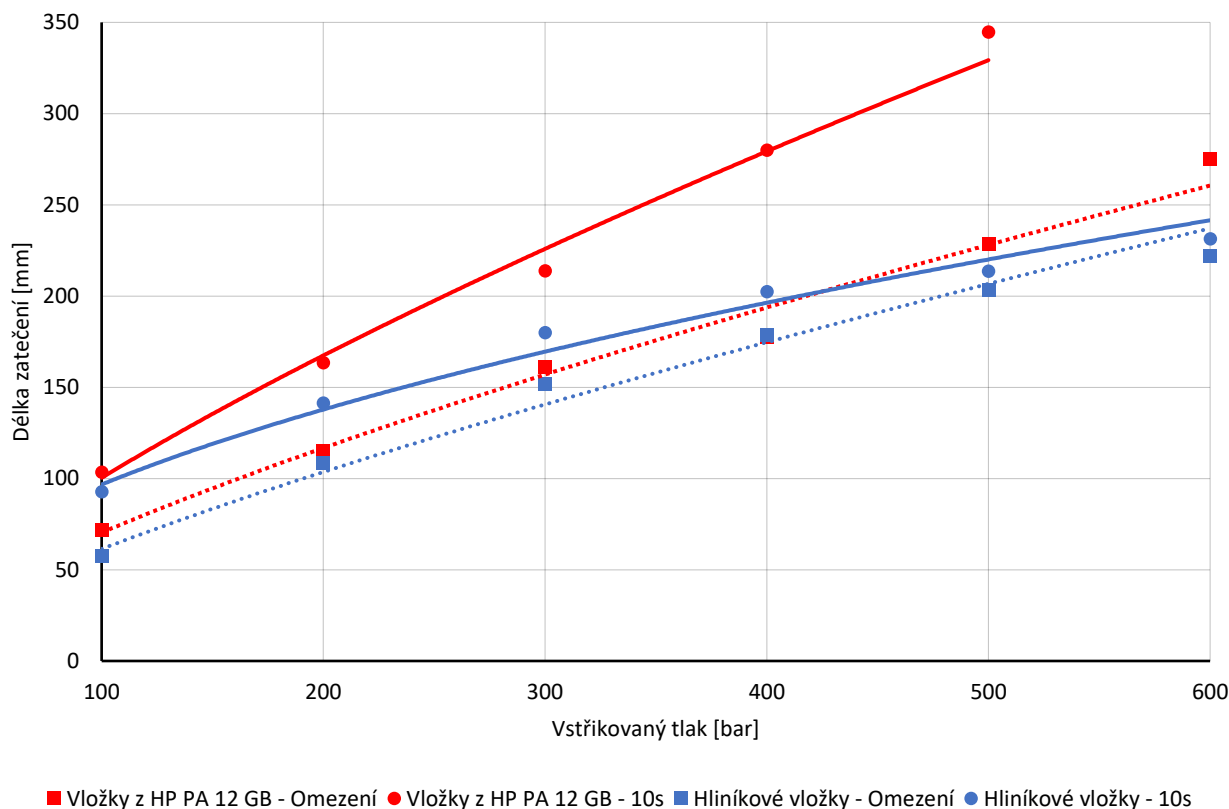
Cílem varianty „Plnění po dobu 10 s“ je zjistit, jak moc v dané vložce tuhne vstřikovaný plast, tj. jak moc odebírá vstřikovanému plastu teplo vedením. Jak bylo popsáno v 3.1 podkapitole – Vstřikovací cyklus – a jak je i zobrazeno na dotlaku při vstřikování testovacího dílu na Obr. 38., taveninu je možné jádrem tlačit tak dlouho, dokud nedojde k zamrznutí v nejtěsnějším místě. Vstříknutý plast začíná chladnout od studenějších stěn, které mu odebírají teplo až do doby, kdy dojde k zamrznutí tekutého jádra. V případě plnění do objemu, který není tavenina schopna vyplnit celý, dojde k zamrznutí nejdříve čela taveniny. Je to způsobeno tím, že zbývající část taveniny je stále teplým jádrem doplňována plastem ze vstřikovací jednotky. Jelikož je čelo taveniny od ní nejvzdálenější, dojde k zamrznutí právě nejdříve čela taveniny. Délka zatečení je závislá především na hodnotě tlaku.

Jak bylo popsáno v 10.3 podkapitole – Vyhodnocení simulace – Ocelová vtoková vložka, doba dotlaku v modulární vstřikovací formě používající ocelovou vtokovou vložku nemá smysl delší, než je 10 s, protože pak dojde k zamrznutí vstupního kanálku. Ovšem tato doba byla stanovena po fázi plnění, která v případě vstřikování testovacího dílu trvala 1,25 s. Zkouška zatékavosti je bez dotlaku a navíc je vstřikován objem dle Tab. 9 menší o $8,32 \text{ cm}^3$ než v případě vstřikování testovacího dílu dle podmínek uvedených v Tab. 7. I když byla rychlost vstřikování snížena o $5 \text{ cm}^3/\text{s}$, nehrozí, že by došlo k zamrznutí vstupního kanálku. Během plnění po dobu 10 s tak k němu nedojde, což bylo ověřeno i simulací vstřikování na dílu o stejném objemu.

12.2 Porovnání délek zatečení do plastových vložek s hliníkovými

Všechny výsledky z obou variant testování zatékavosti do vložek z HP PA 12 GB i hliníkových vložek jsou uvedeny v Příloze č. 7, která obsahuje i vyhodnocení naměřených hodnot. Dále je v této příloze uveden vzorec pro výpočet průměrné délky zatečení pro obě varianty i materiály vložek. Rozdíl délek zatečení z obou variant testování je vyhodnocen v Příloze č. 7.

Souhrnný graf z porovnání variant i materiálů vložek je zobrazen na Obr. 51.



Obr. 51 – Zátékavost pro ocelovou a plastovou vložku v obou variantách testování

Graf na Obr. 51 udává závislost délky zatečení (svislá osa) na velikosti vstřikovaného tlaku (vodorovná osa). Body zanesené do grafu jsou průměrné délky zatečení, viz Příloha č. 7. Body z jednotlivých variant testování a materiálů vložek jsou proloženy celkem 4 křivkami. Hodnoty a křivky zobrazené červenou barvou v grafu na Obr. 51 jsou získány ze vstřikování do vložek z HP PA 12 GB, modře jsou zobrazeny hodnoty a křivky získané při vstřikování do hliníkových vložek. Průměrné délky zatečení z varianty testování „Omezení“ jsou zobrazeny kolečkem a jsou proloženy plnou čarou. Průměrné délky zatečení z varianty testování „10 s“ jsou zobrazeny čtverečkem a jsou proloženy čárkovanou čarou.

Podle předpokladu s vyšším tlakovým omezením roste i délka zatečení. Avšak zvyšování tlaku vstřikovaného plastu do vložek z HP PA 12 GB nebylo možné do takových hodnot jako při vstřikování do vložek hliníkových. Důvodem jsou již zmiňované horší vlastnosti plastu. Vyšší vstřikovací tlak znamená i nutnost použít vyšší uzavírací sílu pro testování zabíhavosti dle vzorce uvedeného v Tab. 9. I když tato hodnota byla dostačující a nedošlo k otevření formy, s ohledem na bezpečnost vstřikování by měla být vyšší. I přesto větší uzavírací síla a větší vstřikovaný tlak byly důvodem omezení vstřikování do vložek z HP PA 12 GB při tlaku 500 až 600 bar, kdy kratší doba působení tlaku dovolila vstřikovat do plastových vložek při tlakovém omezení 600 bar. Jelikož při druhé variantě testování působí vstřikovaný tlak delší dobu, bylo možné do vložky z HP PA 12 GB vstřikovat při tlakovém omezení pouze při tlaku 500 bar. Z tohoto důvodu je v grafu na Obr. 51 varianta testování „Omezení“ ukončena právě tlakem 500 bar. Dále se na vložce z HP PA 12 GB tvořily přetoky podobně jako při vstřikování testovacího dílu zobrazeného na Obr. 32. Jelikož vstřikování zátékavosti do vložek z HP PA 12 GB bylo porovnáváno s hliníkovými, nemělo smysl pokračovat vstřikovat dále do hliníkových vložek za vyšších tlaků a testování bylo ukončeno při hodnotě omezujícího tlaku 600 bar.

Při vstřikování omezením tlakem 100 bar se délka zatečení do vložky z HP PA 12 GB nejvíce blížila k délce zatečení do hliníkových vložek. S přibývajícím tlakem se rozdíl délek zatečení mírně zvětšoval. Vstřikování zátékavosti variantou plnění po dobu 10 s byly délky zatečení do obou materiálů vložek při omezení tlakem 100 bar téměř stejné. Ovšem s přibývajícím tlakem docházelo k výraznému rozdílu. Zatímco délky zatečení z obou variant testování do hliníkových vložek se sbíhaly, při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB se délky zatečení oddalovaly.

Vstřikování zkoušky zatékavosti také částečně ukázalo životnost vložek z HP PA 12 GB v závislosti na vstřikovaném tlaku. Vstřikovat tlakem 600 a 500 bar je možné, ale jen při malém počtu cyklů. Životnost vložky při tlaku 400 bar byla vyhovující. Výzkum životnosti vložek s ohledem na vstřikovaný tlak by byl jistě zajímavý, není ale v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce. S ohledem na životnost byla stanovena tlaková hranice pro vstřikování do vložek z HP PA 12 GB hodnota 300 bar.

Závěr

Pravděpodobnými příčinami větší délky zatečení do vložek z HP PA 12 GB než do hliníkových vložek je drsnost povrchu vložky z HP PA 12 GB a horší odvod tepla.

Horší odvod tepla zároveň způsobuje i větší drsnost, která je viditelná pohledem, např. při srovnání hliníkových vložek s vložkami z HP PA 12 GB zobrazenými na Obr. 31 nebo pak v Příloze č. 5 a v Příloze č. 6. Větší drsnost povrchu je charakterizována i větším rozptylem profilu drsnosti, viz Obr. 31. Příčinou tak může být snazší uvěznění vzduchu na povrchu vložky. V Tab. 6 je porovnání teplotních vlastností vzduchu s HP PA 12 GB a hliníkem. Z Tab. 6 vyplývá, že HP PA 12 GB vede teplo 820krát hůře než hliník. Ovšem pokud se mezi vstřikovaný plast a vložku uvězní vzduch, tak oproti HP PA 12 GB vede teplo přibližně 10krát hůře a oproti hliníku přibližně 8 200krát hůře.

Drsnost hliníkových vložek je nanejvýš 3,2 μm , zato drsnost vložek z HP PA 12 GB je 10,7 μm . Tak může být množství vzduchu uvězněného na povrchu větší. Nejen vlastnost plastu teplo izolovat, tzn. neodvádět z povrchu, ale pravděpodobnost uvěznění na povrchu více vzduchu zhoršuje odvod tepla z dutiny. Uvězněný vzduch se chová jako „vzduchová izolační vrstva“. Důsledkem horšího odvodu tepla a uvěznění více vzduchu na hrubém povrchu pravděpodobně způsobuje větší délku zatečení ve vložkách z HP PA 12 GB než v hliníkových vložkách.

„Izolační vrstva vzduchu“ a vlastnost plastu tepelně izolovat se v případě první varianty testování projeví větší délkou zatečení ve vložkách z HP PA 12 GB než ve vložkách z hliníku. Avšak rozdíl není velký. Daleko více se projeví při druhé variantě testování „10 s“, kdy tloušťka zmrzlé vrstvy postupuje od povrchu dutiny vložky z HP A 12 GB podstatně pomaleji k hliníkové. Tak déle zůstává jádro tekuté a tím delší dobu je možné dotlačovat taveninu kanálkem dále.

Při vstřikování do hliníkových vložek se délky zatečení získané z obou variant přibližují, což je způsobeno narůstající vzdáleností čela od trysky. Vzdálenost čela od teplé trysky je tak čím dál větší a hliníkem je teplo odebíráno rychleji, takže mezi první a druhou variantou testování není rozdíl. Tzn. že délku zatečení po překročení tlakového omezení není možné dále prodlužovat kvůli rychlému zamrzávání čela taveniny v hliníkové vložce.

Naopak při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB je odebírání tepla pomalejší, že kdyby nebyla použita ocelová vtoková vložka, bylo by možné dobu dotlaku prodloužit na mnohem delší dobu. Tím se nabízí využití vlastností plastu HP PA 12 GB ke vstřikování dílů s delší dobou dotlaku za předpokladu, že bude pozměněna konstrukce vstřikovací formy tak, aby v žádném prvku tvořícím studenou vtokovou soustavu nedocházelo k zamrznutí kanálku.

Pokud by byla dělicí rovina plastové vložky zarovnaná obráběním s hlavní deskou, je možnost používat vyšší vstřikovací tlaky, aniž by docházelo k výraznému namáhání plastových vložek. Tak by bylo možné např. vstřikovat díly, které mají od vtoku větší vzdálenost, kde by při použití kovové vložky a rychlém odebírání tepla jistě došlo k zamrznutí.

12.3 Nanesení vrstvy sprejem

Nejen vlastnosti plastových vložek z HP PA 12 GB nejsou pro vstřikování tak vhodné jako kovové vložky, ale i povrchové vlastnosti jsou horší. Nabízí se možnost zlepšit povrchové vlastnosti nanesením povrchové vrstvy. Vzhledem k vysoké drsnosti povrchu HP PA 12 GB je předpoklad, že by se na tento povrch dobře nanášela povrchová vrstva.

Ovšem použitím povrchové vrstvy by se celá výroba vložek stala závislou na další technologii. Již v úvodu disertační práce byl jako materiál zvolen plast a k výrobě byl použit 3D tisk z důvodu snížit výrobní náklady vstřikovacích vložek. Přidáním další technologie nejen narůstají náklady, ale i čas výroby. Z tohoto

důvodu nanášení povrchové vrstvy, např. povlakování, máčení atd., nemá smysl. Ovšem levným a rychlým řešením je nanést na povrch vrstvu sprejem. Navíc v Příloze č. 2 byly použity spreje na bázi silikonu pro vstřikování do 3D tištěných plastových vložek doporučeno.

Vzhledem k velké drsnosti povrchu vložek z HP PA 12 GB použití sprejů mnohokrát ulehčilo vyhození výstřiků z vložek, které z hliníkových vložek byly vyhazovány bez problémů i bez použití sprejů. I když je použití sprejů spíše určeno pro ulehčení vyhození výstřiku z formy, bude jejich vliv prozkoumán na zkoušce zatékavosti. V této podkapitole bude porovnáno více separačních sprejů dodaných firmou WEICON Czech Republic s.r.o., která pro testování spreje dodala, a tímto jim děkuji [27].

Měření bylo provedeno podle postupu uvedeného v Příloze č. 7. Před každým vstřikováním byla na povrch dutiny nanášena vrstva sprejem.

Silikónový sprej

WEICON silikónový sprej odolává teplotám do 250 °C. Zabraňuje ukládání a ulpívání nečistot na površích. Ošetřuje a chrání plastové a kovové prvky. Zabraňuje slepování a umožňuje hladké vedení [27].

PTFE – sprej

WEICON PTFE–sprej je suché mazivo bez tuků se separačním účinkem na bázi PTFE. Díky vysokému podílu PTFE výrazně snižuje součinitel tření. Povlak odpuzuje nečistoty, prach a vodu, je odolný proti olejům, tukům a mnoha chemikáliím. WEICON PTFE sprej se používá jako dlouhodobé mazivo pro kluzné vedení, slouží také jako voděodolný povlak papírových a korkových těsnění a ucpávek, dále jako náhrada za silikonové separátory a všude tam, kde je mazání tukem nepřijatelné nebo nežádoucí [27].

AT – 44 sprej

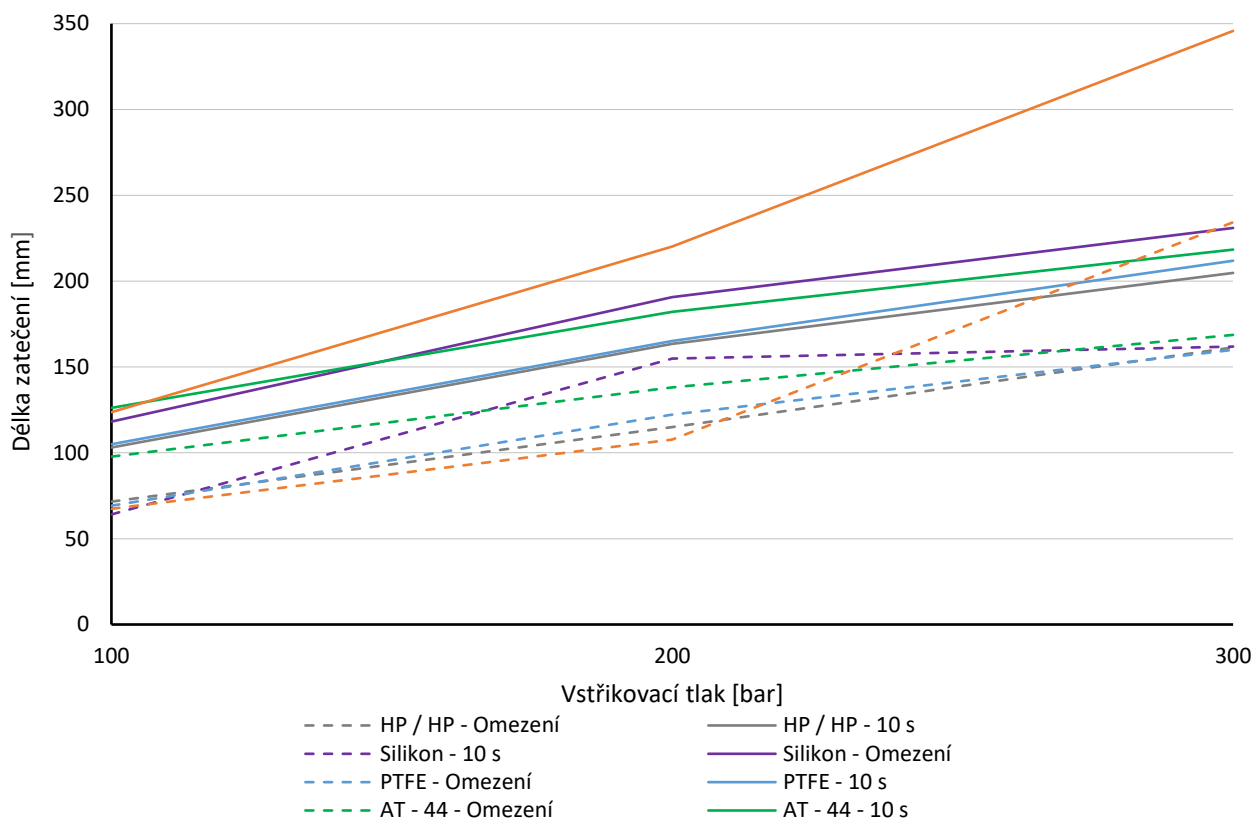
WEICON AT-44 je univerzální sprej s PTFE a bez silikonu. Díky jeho speciálnímu složení z účinných látek a velmi nízkému součiniteli tření slučuje protikorozní ochranu, vodoodpudivost, mazání a konzervaci a čištění v jediném produktu. AT-44 zabraňuje zadírání, vytěsňuje vlhkost, odstraňuje vrzavé a skřípavé pohyby pohybujících se součástí. Zanechaný tenký povlak nemaže, nelepí ani nepřitahuje prach, ale ošetřuje, chrání povrch [27].

Sprej – Oddělovač forem

Mazivo a separátor bez silikonu je vysoce kvalitní kombinace účinných látek s vysokým mazacím účinkem, složená z přírodních produktů. Zabraňuje ulpívání na plastech, formách, kovech a nástrojích. Doporučeno je používat ho při vstřikování plastů [27].

Délky zatečení při nanesení vrstvy sprejem

Podobně jako byl sestaven graf na Obr. 51, byl sestaven i graf délek zatečení pro vložky z HP PA 12 GB, na jejichž povrch byly nanášeny sprejem různé vrstvy. Povrchové vrstvy nanášené spreji byly testovány do tlaku 300 bar. Výsledky naměřených délek a jejich vyhodnocení je uvedeno v Příloze č. 7. Dále příloha obsahuje výpočet průměrné délky zatečení pro obě varianty testování a čtyři použité spreje. Závislost délky zatečení na tlakovém omezení je zobrazena v grafu na Obr. 52.



Obr. 52 – Porovnání zatékavosti ve vložkách z HP PA 12 GB po nanesení různých vrstev spreji

Všechny použité spreje zlepšily délku zatečení, tím se mezera mezi vtokovou vložkou a pohyblivou vložkou tvořící přetok zobrazený na Obr. 49 vpravo zvětšovala. Důsledkem bylo větší opotřebení „uhlazení“ povrchu vložky.

Běžně používaným sprejem pro kovové formy je oddělovač forem. Tento sprej byl první myšlenkou při použití spreje na 3D tištěné plastové vložky. Ovšem jeho podstata spočívá v zabránění usazování plastu na kovu. Pokud je sprej stříkán na plastovou vložku, je velmi pravděpodobné, že na povrchu nevytvoří ochrannou vrstvu, jak je uvedeno v Příloze č. 7. Výsledkem bude, že vrstva nanesená sprejem stéká po povrchu vložky. Vrstva spreje stéká především přes stěny dutiny. A jelikož sprej zlepšoval zatečení plastu, usnadnil i jeho přetékání přes stěny vložky. Při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB, na jejichž povrch byla nastříkána vrstva sprejem – oddělovač forem, je velká pravděpodobnost tvorby přetoků. Důsledek je vidět v grafu na Obr. 52 oranžově. Především pokud plnění trvalo 10 s, na vložce bylo přítomno hodně přetoků, které způsobovaly mírné otevření formy a vyplnění celé dutiny.

Doporučovaný silikonový sprej neměl délku zatečení přibližně konstantní, viz Příloha č. 7. Při aplikaci silikonové vrstvy docházelo k velkým rozptylům délek. Na Obr. 52 je čárkovaně fialově vidět, že při testování variantou plnění do omezení je délka zatečení menší než délka zatečení při vstřikování na neupravený povrch vložky z HP PA 12 GB, zobrazeno na Obr. 52 čárkovanou šedou čarou.

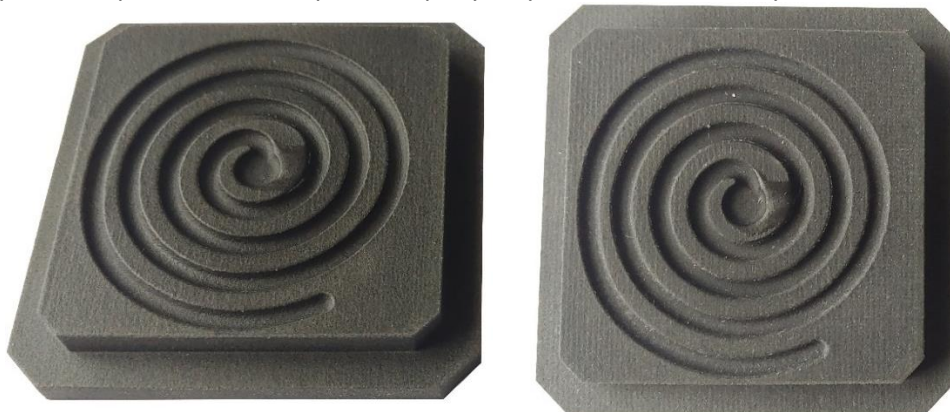
Oproti silikonovému spreji se více osvědčilo použít spreje bez tuků a s obsahem PTFE, které zlepšovaly délku zatečení. Z hlediska délky zatečení je lepší použít sprej AT-44, zobrazený na Obr. 52 zelenými čarami. Navíc tento sprej nezanechával na povrchu vložky bílé skvrny jako PTFE sprej. Jelikož PTFE izoluje teplo, je možnou příčinou větší délky zatečení. Pokud je požadavek zlepšit vyndání z formy, ale nezvětšit délku zatečení, pravděpodobně větší izolací přestupu tepla, je lepší použít PTFE sprej.

Použití vrstvy nanášené spreji pomáhá ke snazšímu vyhození výstřiků z vložek, avšak je potřeba zvolit správný sprej a před použitím provést jeho testování. Oproti použití silikonového spreje se osvědčilo použít spreje obsahující PTFE. Jak ukázala zkouška zatékavosti, tyto spreje pravděpodobně pomáhají izolovat více teplo a tím pomáhají zlepšit délku zatečení. Výzkum vrstev nanášených sprejem, ale nejen těch, by byl jistě zajímavý, avšak není v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce

13 Opotřebení vložek

Jednou předpokládanou nevýhodou 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek oproti kovovým vložkám je větší opotřebení, na nějž má vliv mnoho faktorů. Ve 12. kapitole – Zatékavost byla zkouška zatékavosti testována pro různá tlaková omezení. Hliníkové vložky bylo možné testovat bez problémů pro všechny vstřikovací tlaky. Oproti tomu se vložky z HP PA 12 GB s rostoucím vstřikovacím tlakem začínaly více opotřebovávat. Aby se vložky neponičily při zavření formy, byla uzavírací síla zvolena dle Tab. 9 jen o 50 kN vyšší, než byla hodnota vstřikovacího tlaku. Malá uzavírací síla se neprojevila při malých vstřikovacích tlacích. Ovšem při vyšších vstřikovacích tlacích byla síla taveniny natolik velká, že způsobovala mírné otevření formy, což bylo důvodem tvorby přetoků. Další možnou příčinou tvorby přetoků bylo stlačení vložky při vstřikování taveninou o velkém tlaku, který způsoboval mírný propad okolních stěn, a to mohlo způsobovat tvorbu přetoků. Důvodem menší odolnosti plastových vložek zabránit tvorbě přetokům je i jejich výrobní přesnost, které byla věnována 9. kapitola – Konstrukce 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek, z ní vychází i konstrukční úprava pro zabránění tvorby přetoků. Ovšem ani při vyšších vstřikovacích tlacích konstrukční úprava nezabránila vzniku přetoků. I přes konstrukční úpravy bránící přetokům je doporučeno vstřikovat do vložek z HP PA 12 GB tlakem max. 300 bar.

Opotřebení vložek z HP PA 12 GB bylo patrné i při testování zatékavosti s použitím vrstev nanášených spreji, viz Příloha č. 7. Všechny vrstvy zlepšovaly délku zatečení dokonce i v nežádoucím případě, v mezeře mezi vtokovou vložkou a pohyblivou vložkou. S přibývajícím počtem cyklů se velikost mezery zvětšovala. Výsledkem bylo větší opotřebení stěn uprostřed pohyblivých vložek, zobrazených na Obr. 53.



Obr. 53 – Vstřikovací vložky z HP PA 12 GB po testování vrstev silikonu a AT - 44

Bohužel vliv opotřebení vložek není možné simulací vstřikování plastů odhalit. Musela by se vytvořit speciálně simulace na opotřebení, která by simulovala tečení plastu vložkou. Dále by bylo zapotřebí získané výsledky validovat. Jednalo by se sice o zajímavý výzkum, avšak velmi náročný, který není ani v možnostech, ani hlavním cílem této disertační práce.

V případě zvětšení mezery a tím i většího opotřebovávání vložky viz Obr. 53 může docházet i k většímu množství akumulovaného tepla. Teplo je generováno větším třením horké taveniny o plastový povrch. Může se tak jednat o pravděpodobnou příčinu neúspěchu simulace vstřikování provedenou v 10. kapitole určit správnou polohu nejteplejšího místa na vložce.

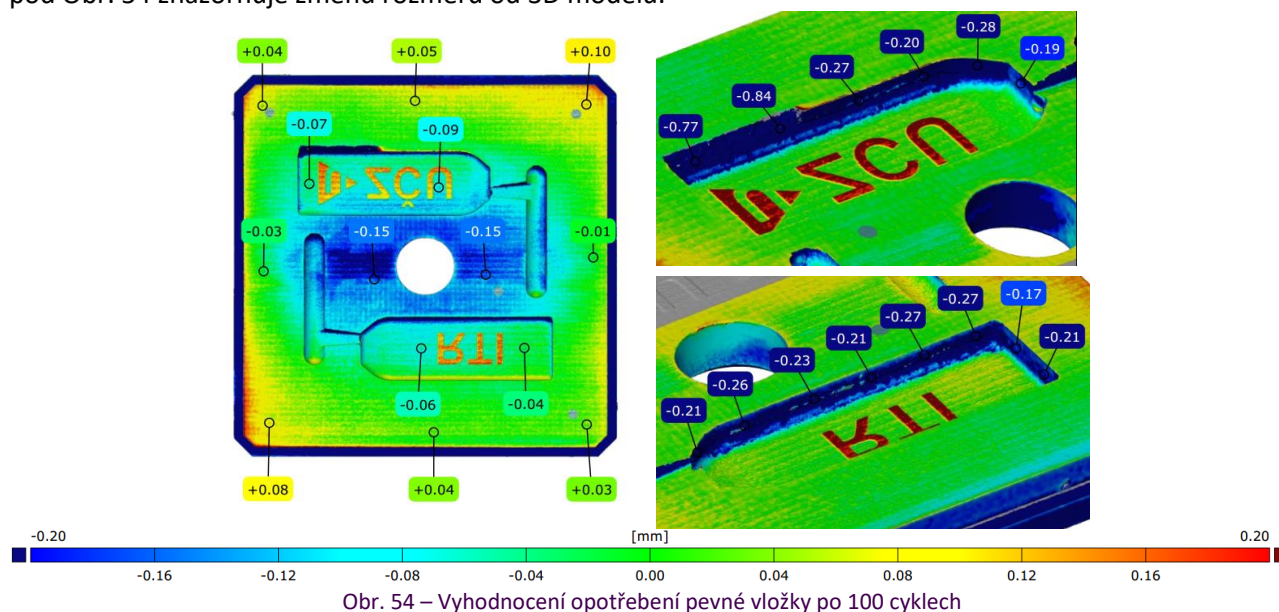
13.1 Měření opotřebení

Opotřebení bylo testováno na vložkách z HP PA 12 GB zobrazených na Obr. 31 vpravo, určených pro vstřikování testovacího dílu zobrazeného na Obr. 30. Vstřikování probíhalo za podmínek uvedených v Tab. 7 se zkrácenými časy pro chlazení a otevření formy, které byly sníženy z důvodu časové náročnosti zkoušky. Doba chlazení byla zkrácena na čas 30 s a doba otevření formy na 10 s. Po provedení 50 cyklů byly vložky z formy vyjmuty, proměřeny a opět namontovány zpět. I když doba změny kavity v modulární vstřikovací formě je jednoduchá a rychlá, měření zabere podstatně delší dobu. Zchladnutí vložky na okolní teplotu bohužel ovlivnilo měření opotřebení po 100 cyklech.

K měření byl použit 3D sken, který je popsán v Příloze č. 8, jež dále obsahuje všechny výsledky z měření, které probíhalo ve třech krocích. Všechny odchylky měření se vztahovaly k 3D modelu, jehož geometrie byla zvolena jako ideální. Prvním krokem měření bylo stanovit odchylky po 3D tisku. Druhý a třetí krok měření byl po 50 a po 100 cyklech. Před začátkem 3D skenování byly na vložky nalepeny značky, které sloužily pro vykreslení 3D měřeného objektu. Při zobrazení výsledku na Obr. 54, Obr. 55 a v Příloze č. 8 jsou tyto značky zobrazeny šedým kolečkem. Jelikož se vstříkoval testovací díl, který i po vyrobení 100 kusů bylo možné složit, jak je zobrazeno na Obr. 30 nahoře, lze říci, že vložka z HP PA 12 GB posloužila svému účelu. Do hodnocení nebyla zahrnuta utržení vnitřních částí krytů způsobená krátkou dobou pro ochlazení vložky, popsáno dále v textu. Účelem této kapitoly je ukázat, jak dochází k opotřebování vložek z HP PA 12 GB při vstřikování. V úvodu disertační práce byla správně vytyčena kusová či malosériová výroba. V tomto objemu výroby má smysl nanejvýš použití 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek. Avšak velikost, umístění, opotřebením atd. závisí na funkci, kterou bude díl vstřikován do 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek plnit.

Pevná vložka

Výsledek z měření pevné vložky je zobrazen po provedení 100 cyklů. Měření po 3D tisku a po 50 cyklech včetně vyhodnocení detailů je uvedeno v Příloze č. 8. Pohled na stranu pevné vložky z dělicí roviny je zobrazen na Obr. 54 vlevo. Detaily na dutiny vložky jsou zobrazeny na Obr. 54 vpravo. Stupnice pod Obr. 54 znázorňuje změnu rozměrů od 3D modelu.



Studená vtoková soustava spolu s výtřikem je vidět na Obr. 32 a Obr. 11 vlevo. Hlavní kanálek je půlkruhového tvaru, kdy půlkruhová část je v pohyblivé vložce a rovná stěna kanálku je tvořena pevnou vložkou. Právě v místě rovné stěny kanálku je vidět na Obr. 54 vlevo buď úbytek, nebo stlačení plastu HP PA 12 GB (tzn. posunutí 3D skenovaného objektu do 3D modelu). Jedná se pravděpodobně o opotřebením „uhlazení“ povrchu vložky prouděním taveniny o vysoké teplotě a tlaku. O tom svědčí i okolí vložky, které je zobrazeno světlejší modrou barvou. Ovšem v okolí kanálku neproudila tavenina a k záporné změně 3D skenu vložky zde došlo. Průběh stlačení je největší na středu vložky a rovnoměrně se zvětšuje ke krajům. Průhyb vložky je pouze na přední stěně, není na zadní straně dle Přílohy č. 8. Jedná se tak pravděpodobně o stlačení vložky vlivem působení vstřikovací taveniny o velkém tlaku a teplotě. Toto tvrzení potvrzuje také rozložení tlakového zatížení, tlak taveniny vstříknutý do středu vložky je zde největší a směrem ke koncům dutiny se snižuje. I při dotlaku dochází nejdříve k zamrznutí nejvzdálenějších míst a v místech blíže ke vtoku je stále v tekutém jádře taveniny pod tlakem.

Malé výstupky v dutinách pro logo a zkratkou ZČU a zkratku RTI jsou po 3D tisku dle Přílohy č. 8 zobrazeny tmavě červeně (tzn. posunutí 3D skenovaného objektu od 3D modelu). S přibývajícím počtem cyklů se výstupky prouděním taveniny opotřebovaly, „uhlazovaly“ až do stavu zobrazeném na Obr. 54

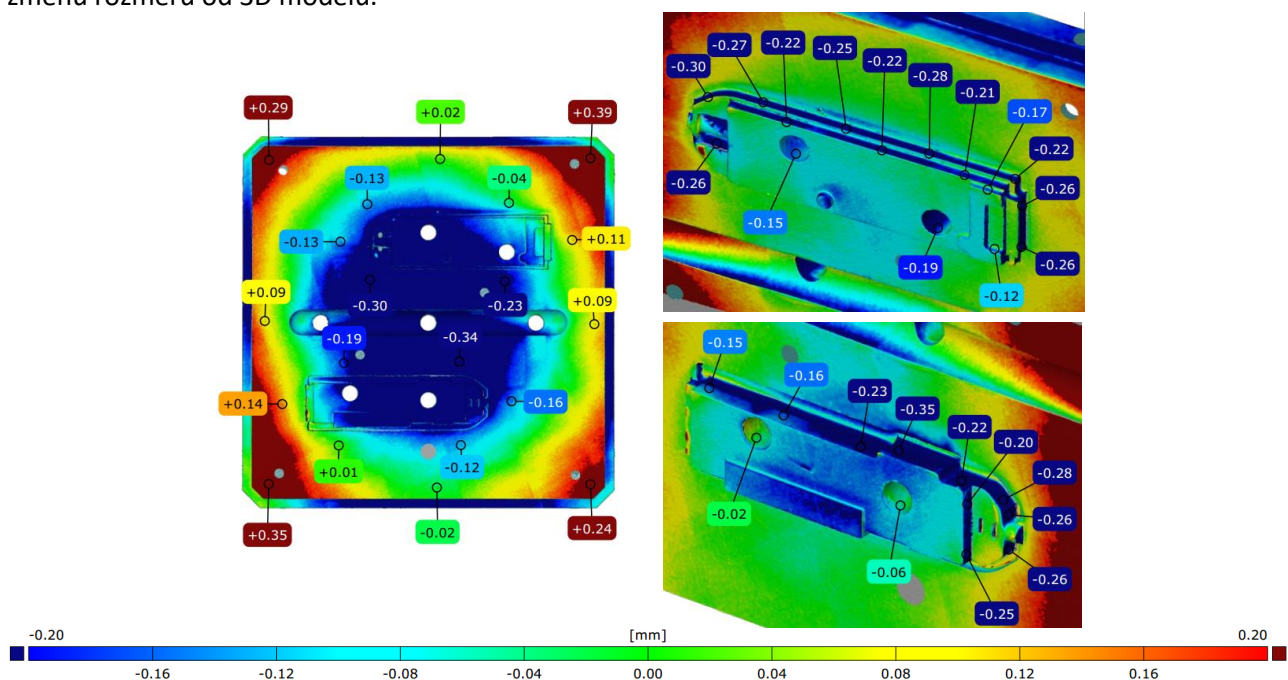
Stejně jako se opotřebovávala rovná stěna hlavního kanálu, docházelo i k opotřebení stěn dutiny zobrazené v detailech na Obr. 54 vpravo. Vzhledem k tomu, že protější strana pohyblivé vložky tvoří výstupek, při zavření formy průřez, kudy tekla tavenina, nebyl široký. Povrch vložek opotřebovala nejen proudící teplá tavenina pod tlakem, ale i výstřik. Forma byla navržena tak, aby vstříkovaný díl zůstával, ztuhl na pohyblivé vložce a tak tomu bylo po všech otevření forem. Především to bylo způsobeno vlastností plastu smršťovat se, tj. směrem od stěn k výstupku. Není však vyloučeno, že část vstříkovaného dílu „přituhla“, ztuhla na pevné pohyblivé vložce a při otevření formy byla tato část vytržena.

Další možnou příčinou utržení části stěny dutiny pevné vložky může být tření výstřiku o stěny při otevírání formy. To je způsobené s největší pravděpodobností nevhodnou volbou úkosu stěny, pouze $0,5^\circ$. V 9.4 podkapitole – Dutina 3D tištěných vložek – bylo doporučeno úkos stěny volit větší než 5° . Důvodem této volby je zmenšení síly potřebné pro vyhození výstřiku. U kovových vložek, pokud je povrch dostatečně hladký, jsou typickým příkladem žebra, je doporučeno úkos konstruovat přibližně do $0,5^\circ$. Méně důležité stěny pro kovové vložky je doporučeno konstruovat s úkosem přibližně do 1° . Všechny ostatní stěny kovových vložek se má konstruovat do úkosu max. 2° , samozřejmě s ohledem na výšku stěny. Bohužel během vstříkování do plastových vložek z HP PA 12 GB byly s úkosem menším než 5° výše zmiňované problémy. Volba úkosu závisí samozřejmě na výšce stěny, avšak výchozí hodnotou by mělo být 5° , ve výjimečných případech lze i méně. Při konstrukci úkosu více jak 15° je již úkos viditelný. Tím se omezuje možnost vstříkovat hluboké výstřiky. Vlastnosti 3D tištěného plastu HP PA 12 GB prozkoumaných v 13. kapitole – Opatření vložek – ukázaly, že je možné provádět dotlak po delší dobu a do větší vzdálenosti od vtoku než v kovových vložkách. Na základě těchto zjištění je vstříkování do vložek z HP PA 12 GB vhodné pro široké, tenké díly.

Dalším důvodem utržení stěny může být ostrá hrana. Ovšem v případě pevné vložky nelze použít rádius, jelikož by způsoboval přetoky. V Příloze č. 2 je doporučeno se ostrým hranám vyhýbat, a pokud je to možné, používat rádius. K utržení stěny jistě přispěla akumulace tepla způsobená nedostatečnou dobou chladnutí a otevření formy. Jelikož nebyly provedeny zkoušky HP PA 12 GB, nelze určit, jak moc se vlivem tepla snižuje pevnost vložky. Ovšem zvětšením úkosu je možné zvětšit i objem v hraně stěny.

Pohyblivá vložka

Výsledek z měření je zobrazen po provedení 100 cyklů. Měření po 3D tisku a po 50 cyklech včetně vyhodnocení detailů je v Příloze č. 8. Pohled na stranu pohyblivé vložky z dělicí roviny je zobrazen na Obr. 55 vlevo. Detaily na dutiny vložky jsou zobrazeny na Obr. 55 vpravo. Stupnice pod Obr. 55 znázorňuje změnu rozměrů od 3D modelu.



Obr. 55 – Vyhodnocení opotřebení pohyblivé vložky po 100 cyklech

Na Obr. 55 vlevo je vidět větší stlačení vložky než v případě pevné vložky zobrazené na Obr. 53. Stejně jako v případě pevné vložky je stlačení nejvyšší na středu vložky, rovnoměrně se zvětšuje ke krajům. Avšak na rozdíl od pevné vložky došlo na zadní straně pohyblivé vložky k průhybu, viz Příloha č. 8. Průhyb je způsoben prohnutím spodní desky pod vložkou, důvod a popsání je více uvedeno v Příloze č. 8. A protože mezi spodní ocelovou deskou a pevnou vložkou byla mezera, začala se tato mezera vyplňovat a docházelo k prohýbání pohyblivé vložky. Výsledkem je větší prohloubení středu pohyblivé vložky. Tvorbě přetoků po celou dobu 100 cyklů bránila konstrukční úprava.

V dutině v přední části výstupku s logem ZČU zůstal plast, který se odtrhnul při vyhazování od zbytku výstřiku. Důvodem je nedostatečná doba pro ochlazení vložek (rychlá doba fází chladnutí a otevření formy).

Při porovnání horních stěn výstupků je více opotřebovaná („modřejší“) stěna výstupku se zkratkou RTI, Obr. 55 vlevo dole, než horní stěna výstupku krytu s logem ZČU, Obr. 55 vpravo nahoře. Pravděpodobné příčiny jsou stejné jako v případě pevné vložky kromě tření výstřiku o pevnou vložku při otevření formy. Důvodem většího opotřebení výstupku krytu se zkratkou RTI může být, že má složitější tvar stěn.

I když v případě pohyblivé vložky nedochází ke tření mezi výstřikem, dochází k němu při vyhazování výstřiku. V tomto případě má vliv stěn a hran také vliv, ale především je zde větší „přituhnutí“ (ztuhnutí) výstřiku k povrchu vložky. Důvodem je, že o pár sekund více je vstřikovaný díl v kontaktu s pohyblivou vložkou, než s pevnou. Avšak v případě vstřikování testovacího dílu nedocházelo k odtržení části stěn výstupků či jiných částí vložky.

Velký vliv na opotřebení pohyblivé vložky má rozmístění vyhazovačů. Při konstrukci formy bylo zvoleno nerovnoměrné rozmístění vyhazovačů. Tím i namáhání vložek bylo nerovnoměrné, ale i vyhazování ve výstřiku. Kromě nedostatečné doby pro ochlazení vložky je i vzdálenost vyhazovače od dutiny výstupku v přední části s logem ZČU možnou příčinou ulamování části výstřiku. Z hlediska namáhání formy, ale i výstřiků, které v případě vstřikování do 3D tištěných plastových vložek nemusí být ještě zchladlé, může docházet k jejich pokroucení, propíchnutí vyhazovači atd.

13.2 Doba chladnutí

Nejen provedení správné konstrukce vložky jako např. rovnoměrné umístění vyhazovačů, provedení velkých úkosů, rádiů atd. jsou zárukou malého opotřebení vložek, delší doby životnosti. I parametry vstřikování značně ovlivňují životnost vložek. V 10. kapitole – Simulace vstřikování do 3D tištěných plastových vložek byly stanoveny až neobvykle dlouhé doby chladnutí a otevření formy, spíše však doba fáze otevření formy, kterou je doporučeno prodlužovat ji více než dobu fáze chladnutí. Ačkoliv validace teplotního zatížení vložky provedená v 11. kapitole – Validace teplotního zatížení vložek – se plně neshodovala s výsledky simulace, je i přesto simulace vstřikování do 3D tištěných vložek velmi užitečná. Pokud je simulace provedena podle 10.4 podkapitoly – Zjednodušení simulace – je výsledek získán za kratší dobu.

Avšak pokud možnost simulace není k dispozici, určitě se doporučuje dobu otevření zvolit co nejdelší a postupně zkracovat podle teploty vložky, naopak dobu chlazení kratší a pak postupně prodlužovat, a to i za cenu vyhazování výstřiků o teplotě vyšší, než je doporučená teplota pro vyhození. Tzn. že vstřikovaný díl bude ještě výrazně neztuhlý, místy v tekutém stavu a bude se při vyhazování trhat. Pořád se jedná o příznivější směr volby. Vstřikovaný díl lze buď s obtížemi z plastové vložky vyjmout a dobu chlazení pro další cyklus prodloužit. Pokud by byla doba chladnutí příliš dlouhá, hrozí ztuhnutí, „přituhnutí“ vstřikovaného dílu ve více místech k vložce. Důsledek příliš dlouhé doby chladnutí je zobrazen na Obr. 56.



Obr. 56 – Důsledek příliš dlouhé doby chlazení

Doba chlazení vstřikovaného dílu zobrazeného na Obr. 56 byla natolik dlouhá, že došlo ke ztuhnutí plastu vložky s plastem vstřikovaného dílu, pravděpodobně v celé možné ploše dutiny. Spojení obou plastů bylo natolik silné, že při vyhození vyhazovače rozpůlily vložku.

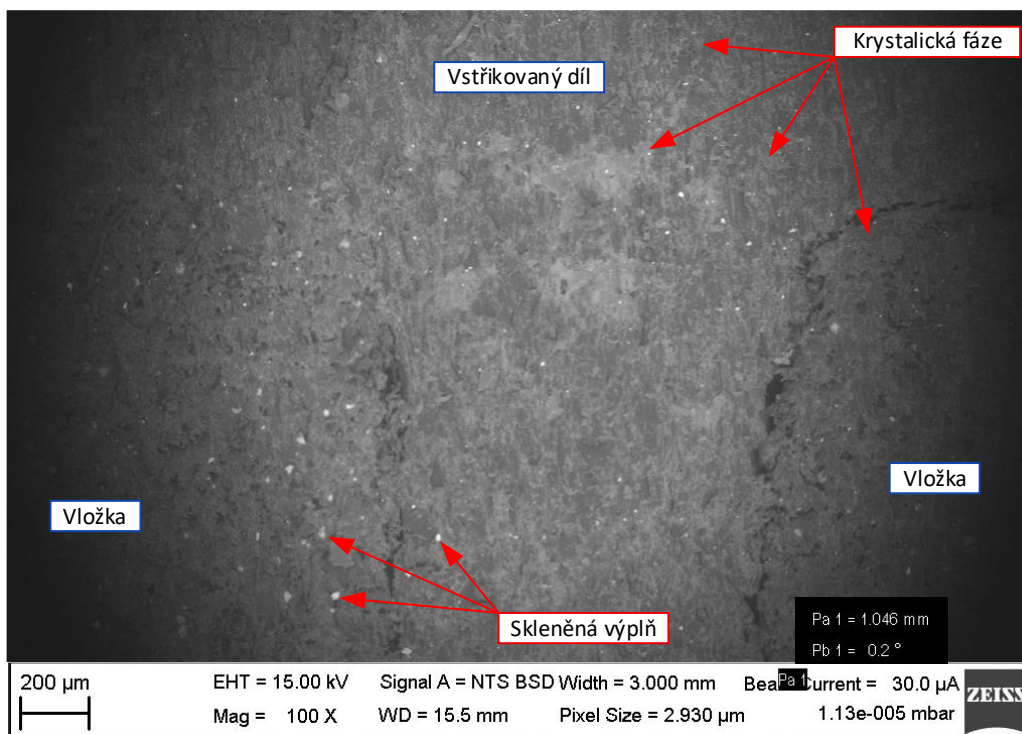
I když simulace vstřikování do 3D tištěných plastových vložek není schopna postihnout a správně popsat všechny problémy jako simulace vstřikování do kovových vložek, určitě je dobré ji před vstřikováním provést. Pokud byla při vstřikování do vložek z HP PA 12 GB doba chlazení stanovena simulací, byla přibližně stejná jako skutečná. Nenastalo tak riziko ztuhnutí vstřikovaného plastu v plastové vložce. I přesto je doporučeno začít s kratší dobou chlazení.

Mikroskopický řez ztuhlým výstřikem ve vložce

V případě, že nastane ztuhnutí výstřiku ke kovové vložce, je možnost ztuhlý plast z formy vypálit. Ovšem v případě plastových vložek vypálit ztuhlý výstřik nelze, neboť by došlo i k roztavení vložky. Pokud vstřikovaný plast ztuhne na plastové vložce jako na Obr. 56, nedá se nic dělat a vložka musí být vyhozena. Ztuhne-li plast, ztuhne lokálně k plastové vložce a je možné plast nějakým nástrojem z plastové vložky odstranit bez jejího poškození, jedná se o lepší možnost. Ovšem to vyžaduje kontrolovat vstřikovaný díl, zejména pokud je složitější, po každém vstřikovacím cyklu. Jenom tak lze ztuhnutí plastu odhalit včas před dalším cyklem a opravit je. Pokud dojde k poškození vložky podobně jako v na Obr. 54, záleží na míře poškození a na místě poškozeného vstřikovaného dílu. Pokud poškození plochy není velké a je v místě nefunkční plochy vstřikovaného dílu, je možné pokračovat dále. Záleží na tom, zda vada bude při plnění funkcí očekávaných od vstřikovaného dílu vadit, zda ji bude zákazník tolerovat atd. Pokud je možnost opravy vložky, určitě se vyplatí provést opravu. Avšak vzhledem k výrobní ceně vložky se složitější, náročnější opravy nevyplatí. Stejně jako v případě zobrazeném na Obr. 56 je snazší a levnější než vložku opravovat 3D vytisknout novou. Ovšem nový 3D tisk vložky prodlužuje dobu potřebnou pro vstřikování nových dílů.

Nejlepším způsobem vstřikování do 3D tištěných plastových vložek je předcházet jejich poničení. Podobně jako byla popsána v 9. kapitole – Konstrukce 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek – aby se omezila tvorba přetoků, poničení stěn atd., je důležité správně nastavit i vstřikovací parametry. Oproti kovovým vložkám jsou plastové vložky náchylnější na velikost uzavírací síly, vstřikovací tlak, teplotu, rychlost a další parametry vstřikování.

V následující části textu bude prozkoumáno rozhraní mezi vstřikovaným dílem a plastovou vložkou pomocí mikroskopického řezu. Cílem bude zjistit, jak vypadá plast, který se vstřikuje vůči plastu, který tvoří vložku. Řez byl proveden pomocí světelné a rastrovací elektronové mikroskopie (SEM) s použitím rastrovacího elektronového mikroskopu Zeiss EVO 25 s katodou LaB6. Vzorky pro pozorování byly připraveny vyříznutím vložky s výstřikem pomocí metalografické frézy. Pozorování a dokumentace povrchů byly prováděny převážně v režimu zpětného rozptylu (BSE). Rozdíl mezi vstřikovaným plastem (PP 100-GB25) a plastem vložky (HP PA 12 GB) je patrný viz Obr. 57. Žebro vstřikovaného dílu je na Obr. 57 uprostřed mezi stěnami vložky.

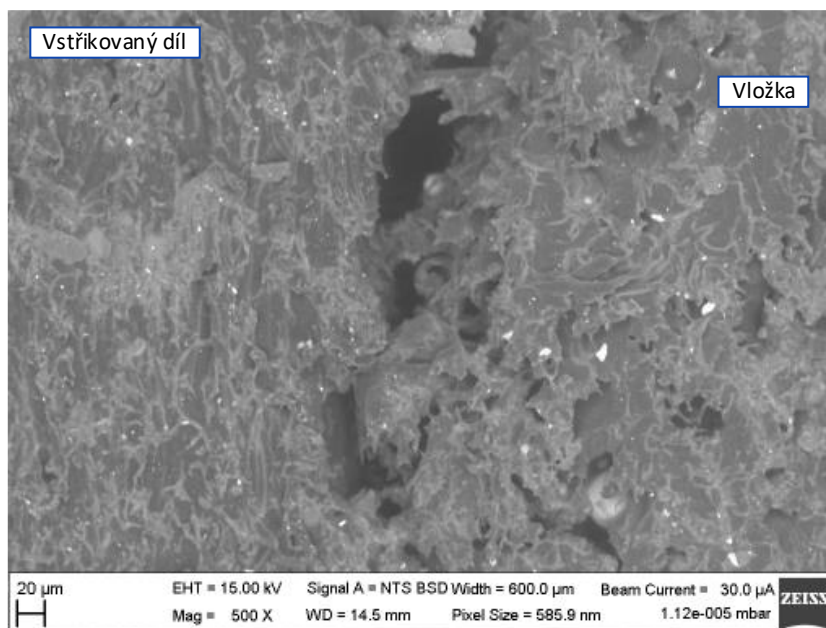


Obr. 57 – Mikroskopický řez zatuhlého dílu

Bílé tečky na Obr. 57 představují skleněnou výplň. Jak vstříkovaný díl, tak vložka jsou plněny skleněnými vlákny, zatímco PP 100–GB25 je plněn pouze 25 %, HP PA 12 GB je plněn 40 % skleněných vláken. Tento rozdíl je patrný zejména na Obr. 57 mezi levou stěnou vložky a žebrem vstříkovaného dílu. Rozdíl mezi strukturou vstříkovaného plastu a strukturou vložky je při menším zvětšení hůře rozeznatelný, více je rozhraní patrné v detailu zobrazeném na Obr. 58. Rozhraní dílu a vložky je však zcela zřejmé kvůli mezerám, tmavým oblastem lemujícím okraje vstříkovaného dílu. Tyto oblasti vznikají smršťováním vstříkovaného dílu během chlazení.

Dále je na Obr. 57 vyznačená krystalická fáze. Rozdíl mezi amorfni a semikrystalickou (zčásti krystalickou) strukturou je zobrazen na Obr. 5 a více popsán v 2.3 podkapitole – Rozdělení plastů podle pravidelnosti geometrie. Podíl krystalické fáze je mnohem větší ve vstříkovací vložce než ve vstříkovaném plastu. Důvodem je dlouhá doba chlazení 3D vložek, viz 4.3 podkapitola – Metody 3D tisku – Spékání práškové vrstvy a použití MJF 3D tisku podle postupu uvedeném 7.3 podkapitole – Výrobní postup a chlazení prášku ve stavební jednotce přírodním chlazením. Vstříkovaný plast chladne podstatně kratší dobu, tím je méně času pro vytvoření krystalické fáze. Při vstříkování do kovových vložek je vstříkovaný plast téměř ihned ochlazen. Ovšem při vstříkování do plastových vložek je doba chlazení delší, tím i doba pro vytvoření krystalické fáze. Příkladem jsou doby chlazení při vstříkování testovacího dílu do hliníkových vložek, viz Tab. 8 – 10 s a doba chlazení při vstříkování stejného dílu do plastových vložek dle Tab. 7 – 60 s. Při vstříkování do plastových vložek trvá o 50 s déle zchlazení vstříkovaného dílu na teplotu vyhození než dílu vstříknutím do hliníkových vložek. Teplotu zasklení, viz Příloha č. 3, udává výrobce granulátu 119 °C. Význam teploty zasklení je popsán v 2.2 podkapitole – Vlastnosti plastů. Do teploty zasklení je možné krystalizovat. A právě pomalejší chlazení je příčinou většího podílu krystalické fáze ve výstřících vstříkovaných do plastových 3D tištěných vložek než do kovových vložek. Porovnání podílu krystalické fáze mezi výstřiky vstříkovanými do plastových a kovových vložek by bylo jistě zajímavé, avšak není v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce.

Rozdíl mezi strukturou vstříkovaného plastu (PP 100-GB25) a strukturou plastu vložky (HP PA 12 GB) je v detailu zobrazen na Obr. 58, kde vlevo je vstříkovaný díl a vpravo vložka. Plasty jsou odděleny mezerou tmavé barvy.



Obr. 58 – Mikroskopický řez v detailním zobrazení

Oba plasty na Obr. 58 jsou semikrystalické. 3D tištěná plastová vložka chladla přibližně den, což poskytlo dostatek času na vytvoření semikrystalické fáze. Z tohoto důvodu jsou na Obr. 58 vpravo hrubé a velké částice. Vstříknutý plast chladl několik sekund, a proto je tvořen jemnými a malými částicemi. Zároveň je vidět zchladnutí vstříkovaného plastu ve směru proudění taveniny, tj. na Obr. 58 směrem shora dolů.

Závěr

Provedení mikroskopického řezu ukázalo vlastnosti vložek a jejich vliv na vstříkovaný díl. V 9.2 podkapitole – Drsnost povrchu vložek 3D tištěných metodou MJF – byla zjištěna drsnost 10,7 µm, při pohledu na stěnu vložky na Obr. 58 je vidět, proč byly dosaženy takové vysoké hodnoty. Pohled na Obr. 58 zároveň vysvětluje to, že díl vstříkovaný do vložky z HP PA 12 GB na Obr. 32 vpravo je hrubší a neprůhledný ve srovnání s dílem vstříkovaným do hliníkových vložek zobrazených na Obr. 32 vlevo. Dále povrch vložky zobrazený na Obr. 58 potvrzuje možnost uvěznění vzduchu na povrchu vložky a jeho vliv na délku zatečení provedenou ve 12. kapitole – Zatékavost. Uvěznění vzduchu na hrubém povrchu vložky vysvětluje možnou příčinu neshody simulace provedené v 10. kapitole – Simulace vstříkování do 3D tištěných plastových vložek s její validací provedenou v 11. kapitole – Validace teplotního zatížení vložek. Důvodem je, že uvěznění vzduch nebyl simulován. Zároveň vede vzduch hůře teplo než plast či hliník podle Tab. 6. Uvěznění vzduch na hrubém povrchu vložky, viz Obr. 58, je také příčinou skutečně delší doby potřebné pro ochlazení plastových vložek, než určila simulace, viz Obr. 48.

I když ve 12. kapitole – Zatékavost – byla pravděpodobná přítomnost uvěznění vzduchu na povrchu důvodem větší délky zatečení, nebylo v disertační práci zkoumáno, jak moc má vliv uvěznění vzduch na povrchu vložky na zatékavost do uzavřených prostorů, typickým představitelem jsou žebra. Zdaje možné i při nižším vstříkovacím tlaku žebra vyplnit, zda nedochází k Dieselu efektu, viz 3.3 podkapitola – Vstříkovací forma – Odvzdušnění formy a dalším vlivům souvisejícím s odvzdušněním formy. Vliv uvěznění vzduchu uvnitř dutin a kanálků vložek z HP PA 12 GB bude o to horší, jelikož v 9.3 podkapitole – Zabránění tvorby přetoků – bylo využito poddajnosti plastu, který se při zavření formy zmáčkne a zabráni vytékání plastu do dělicí roviny. Nejenže ochrana proti lemu zabráni úniku plastu, ale také zabráni i úniku vzduchu. Vliv vzduchu na vstříkování do 3D tištěných vložek metodou MJF by byl jistě zajímavý, avšak není v možnostech této disertační práce. Nejen pravděpodobné větší uvěznění vzduchu v dutině vložky, ale i nutnost konstruovat kavity s většími úkoly omezuje vstříkování hlubokých dílů do plastových vložek.

14 Výhodnost 3D tištěných plastových vložek

Cílem této kapitoly je shrnout výhody 3D tištěných plastových vložek vůči kovovým vložkám. S ohledem na vlastnosti plastu byla již v úvodu vybrána kusová či malosériová výroba. Plastové vložky nemohou v sériové nebo hromadné výrobě konkurovat kovovým vložkám. Hlavním důvodem je jejich velké opotřebení prozkoumané ve 13. kapitole – Opotřebení vložek. Nejen větší opotřebení, ale i v dalších vlastnostech jsou plastové vložky horší než kovové. Zvolená technologie výroby vložek 3D tisk není zase tak přesnou technologií. Pro použití ve vstřikování je potřeba provést úpravy popsané v 9. kapitole – Konstrukce 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek. I když bude 3D vytištěná vložka připravena pro vstřikování, budou její vlastnosti horší, než bude mít kovová vložka. Především simulace vstřikování bude méně přesná pro plastové vložky než kovové. O to více bude potřeba vhodné parametry vstřikování zjišťovat při zkušebním vstřikování na vstřikolisu. Dále je potřeba při použití 3D tištěných plastových vložek počítat s horším vedením, odvodem tepla, s větším množstvím uvězněného vzduchu atd.

Na uplatnění jakéhokoliv výrobku mají vliv 3 faktory – kvalita, rychlost a cena výroby. Shrnutím technických vlastností lze jednoznačně prohlásit, že 3D tištěné plastové vložky mají horší vlastnosti než obráběné kovové vložky. Aby byly 3D tištěné plastové vložky uplatnitelné, je důležité, aby byly rychleji a levněji vyrobené než kovové obráběné vložky.

14.1 Rychlost výroby

Porovnat rychlost výroby 3D tisku s obráběním není tak snadné, aby bylo možno potvrdit výsledky z Přílohy č. 2. Do porovnání je třeba zahrnout více faktorů.

Prvním faktorem je zajištění polotovaru. Pro obráběné je potřeba dodat polotovar definovaného tvaru, zato pro MJF 3D tisk stačí prášek. 3D tisk je tak nezávislý na tvaru 3D výtisku a je možné 3D tisknout do omezení 3D tiskovým prostorem. V případě obrábění kavitových vložek do modulární vstřikovací formy je možné polotovary objednat dopředu. Ovšem tím hrozí, že objednaný polotovar, když nebude spotřebován, bude zabírat místo ve skladu. Z hlediska zajištění polotovaru je 3D tisk výhodnější.

Druhým faktorem je příprava výroby. Je mnohem jednodušší připravit výrobu 3D tiskem mající blíže k Rapid prototyping, zobrazeném na Obr. 13, než vytvoření výkresů, naprogramování CNC stroje atd.

Třetím faktorem je příprava stroje. Připravit 3D tiskárnu mající polotovar ve formě prášku bude náročnější než připravit frézku. S tím souvisí i zahrnutí činností po výrobě, kde je potřeba v případě MJF 3D tiskárny vykonat více činností, viz 7.1 podkapitola – 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200.

Čtvrtým faktorem je rychlost výroby. Při zohlednění tohoto faktoru je potřeba se zaměřit především na složitost výroby dutiny vložky. Modulární vstřikovací forma byla navržena tak, aby bylo zapotřebí měnit pouze tu část, která tvoří dutinu. Z tohoto hlediska bude 3D tisk rychlejší, ale při započítání dlouhé doby chladnutí po 3D tisku je obrábění rychlejší. Avšak tento faktor je velice závislý na složitosti dutiny. Pro velmi složité dutiny mající malý rádius mezi stěnou a dnem, např. 0,4 mm, bude 3D tisk rychlejší než obrábění 0,8 mm kulovou frézou.

Pátým faktorem je zohlednění výrobní kapacity. Zde je předpoklad, že vzhledem k vysoké pořizovací ceně jak 3D tiskárny, tak obráběcího stroje budou obě zařízení plně vytížená. Pokud bude každý MJF 3D tisk spouštěn s nějakou rezervou, místem v 3D tiskovém prostoru, je přidání nové vložky, která bude nutná na výrobu, snadné. Pokud bude 3D tiskový prostor plně využit, je možné jej přeskládat, případně vložku urgentní na výrobu zařadit do dalšího 3D tisku. V případě obrábění to znamená dokončení právě probíhající výroby a podle možností zařadit do výroby vložku naléhající na výrobu. Teoreticky je možné obrábět vložku urgentní na výrobu ihned, ale vzhledem k vytížení obráběcích strojů je to prakticky málo reálné.

Šestý faktor zahrnuje dobu dodání. Zde je rozhodující, pokud je potřeba výrobek dovážet, nebo je 3D tiskárna či obráběcí stroj k dispozici.

Výše jsou uvedeny zásadní faktory odlišující rychlost výroby MJF 3D tiskem od obrábění. Patrně pátý a šestý faktor jsou důvodem, proč v Příloze č. 2 byla doba výroby obráběním o několik týdnů delší.

Doba výroby je především závislá na možnostech firmy. Ovšem pokud je plánováno vstřikování do 3D tištěných plastových vložek, je předpoklad, že 3D tiskárna i vstřikolis nebudou od sebe vzdáleny natolik, že bude potřeba zajišťovat dopravu výrobků. Ideální stav je podobný stavu zobrazenému na Obr. 22. Avšak v případě práškových 3D tiskáren není možné do stejné místnosti umístit i vstřikolis. V případě 3D tisku vložek v této disertační práci byla MJF 3D tiskárna umístěna v jiné místnosti než vstřikolis.

Vložky v této práci byly obráběné ve stejné výrobní hale, kde je vstřikolis. Šestý faktor tak při porovnání s 3D tiskem nemá význam. Na základě především pátého faktoru lze dobu výroby vložek obrábění přibližně stanovit o 1 týden delší než při 3D tisku. Jedná se však o velmi přibližný odhad. Především pátý faktor je závislý na mnoha dalších faktorech.

14.2 Cena výroby

Jelikož vlastnosti 3D tištěných plastových vložek jsou horší než obráběných kovových vložek, ale doba výroby je rychlejší. Pro celkové hodnocení bude výrobní cena rozhodující. Výrobní cena byla stanovena přibližně pro vložky testovacího dílu zobrazeného pro obráběné hliníkové vložky z EN AW 6082 na Obr. 31 vlevo a pro MJF 3D tištěné z HP PA 12 GB na Obr. 31 vpravo. Ceny vložek jsou komerční po zahrnutí DPH a jsou uvedeny v Tab. 10

Technologie a materiál	Vložka	Cena	Jednotka	Podíl ceny obráběného hliníku	Jednotka
Obrábění a hliník	Pevná	16 450	Kč		–
	Pohyblivá	16 155	Kč		–
MJF 3D tisk a HP PA 12 GB	Pevná	1 330	Kč	8,1	%
	Pohyblivá	1 520	Kč	9,4	%

Tab. 10 – Porovnání výrobních cen vložek

Z Tab. 10 je jasné, že výrobní cena MJF 3D tištěných vložek z HP PA 12 GB je nižší než v případě obrábění do hliníku o 29 755 Kč. Dále je v Tab. 10 pro zajímavost uvedeno, kolik procentuálně stojí cena MJF 3D tištěné vložky z HP PA 12 GB oproti obrábění do hliníku. Výrobní cena 3D tisku by mohla být při použití vhodnějšího modulu nižší. Snadněji by došlo ke snížení výrobní ceny 3D tisku, viz graf zobrazený na Obr. 26, než v případě obrábění. Tím se potvrdil předpoklad uvažovaný v úvodu disertační práce. „Snížit výrobní cenu vstřikovací vložky lze použitím levnějšího materiálu než kovu“. A dále použitím 3D tisku za předpokladu, že se bude 3D tisknout pouze nutná část viz graf ceny 3D tisku na Obr. 26 a hlavní myšlenka konstrukce formy popsané v 8.3 podkapitole – Modulární vstřikovací forma.

Především nižší výrobní cena a rychlejší výroba jsou hlavními výhodami 3D tištěných plastových vložek oproti obráběným kovovým vložkám. Tyto dva faktory jsou hlavním důvodem výzkumu této problematiky. Ovšem pro uplatnění plastového MJF 3D tisku i 3D tisku obecně je zapotřebí stanovit metodiku, jak postupovat od návrhu vložek až po úspěšné vstřikování dílů. Ke stanovení metodiky budou použity poznatky získané při vstřikování do MJF 3D tištěných plastových vložek z HP PA 12 GB. Tak bude naplněn poslední bod stanovený v 6. kapitole – Upřesnění cílů disertační práce.

15 Metodika vstřikování do plastových vložek 3D tisknutých metodou MJF

Důležitou součástí této disertační práce je kromě představení získaných poznatků stanovit metodiku vstřikování do plastových vložek 3D tisknutých metodou MJF. Nejenže bude oblast vstřikování do plastových 3D tištěných vložek rozšířena touto prací o metodu 3D tisku mající polotovar v prášku, ale i obohacena o metodiku. Při tvorbě rešerše shrnuté do 5. kapitoly – Stávající vstřikování do 3D tištěných plastových vložek vycházející z Přílohy č. 1 a Přílohy č. 2 nebyla nalezena žádná metodika, která by pomohla přiblížit více tuto problematiku. Existuje však řada doporučení týkajících se vybraných problémů, ale i když jsou doporučení bezesporu přínosem, souhrnný přehled jak postupovat při vstřikování do 3D tištěných vložek chybí. Vzhledem k tomu, že pro používané metody 3D tisku vstřikovacích vložek – fotopolymerizace a tryskání materiálu žádná metodika neexistuje, je možné po přizpůsobení se možnostem metod 3D tisku používat metodiku vstřikování do plastových vložek 3D tisknutých metodou MJF z této práce. Rozdíly 3D tiskových metod jsou popsány v 4.3 podkapitole – Metody 3D tisku. S použitou metodou souvisí i cena 3D tiskárny atd. Dále je pak potřeba provést správnou strategii 3D tisku, konstrukci formy atd. jako v případě MJF 3D tisku popsané v 9. kapitole – Konstrukce 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek.

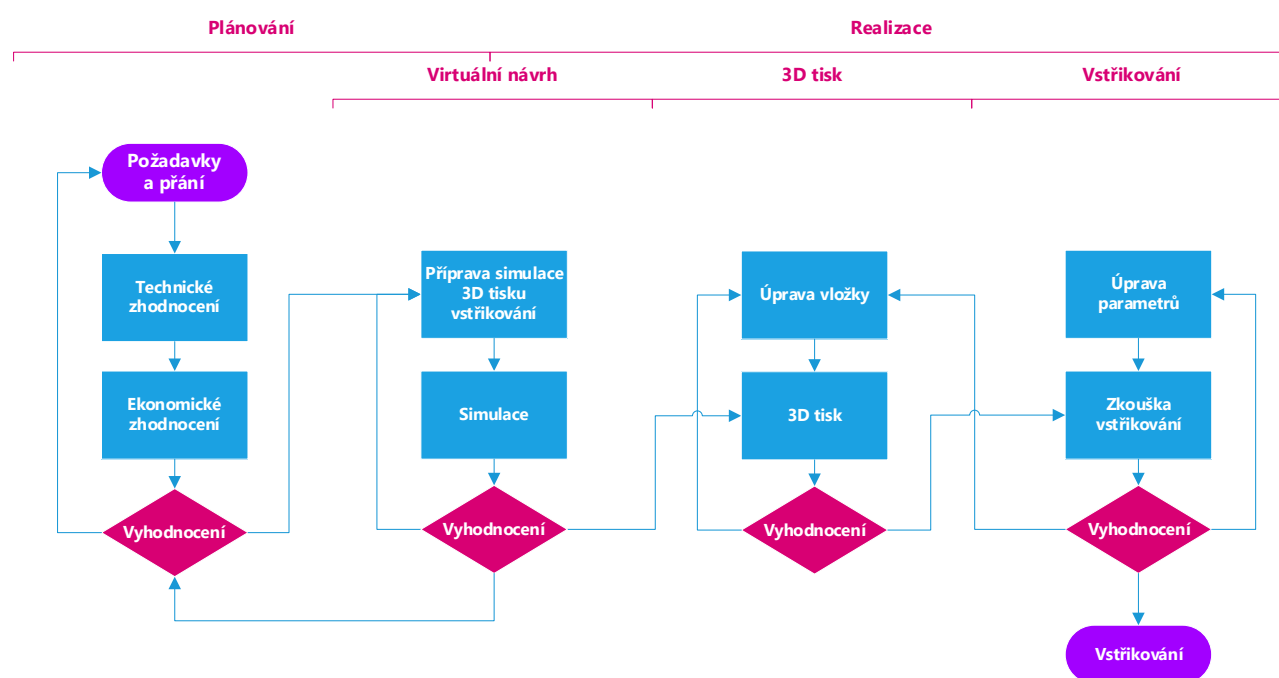
Jelikož vstřikování do 3D tištěných plastových vložek je relativně novou myšlenkou, která není prozatím moc používaná, jsou s ní spojeny i přehnaná očekávání. V historii 3D tisku je jeho využívání spojeno s rozvojem jeho vlastností, více popsané v úvodu 4. kapitoly – 3D tisk. Neustálé zlepšování vlastností 3D tištěných dílů vedlo k čim dál většímu nahrazování výrobků vyráběných stávajícími technologiemi 3D tiskem. Výhodou 3D tisku je velké přiblížení se k metodě Rapid prototyping zobrazené na Obr. 13. Lze tak snadno, ale především rychle produkovat nové výrobky. Náhrada 3D výtiskem ale nemusí být vždy adekvátní. Stejně tomu je i při vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Je pravdou, dle 14. kapitoly – Výhodnost 3D tištěných plastových vložek, že výroba plastových vložek 3D tiskem je rychlejší i levnější než obráběním kovu, ale bohužel náhrada není adekvátní. Především vlastnosti 3D tištěných plastových vložek při vstřikování jsou často přeceňované. Plastu a jeho vlastnostem byla věnována 2. kapitola a 3D tisku 4. kapitola. Stávajícím používaným 3D tištěným plastovým vložkám byla věnována 5. kapitola a Příloha č. 1 s Přílohou č. 2. Vstřikování a s tím související i požadavky na vstřikovací vložky byla věnována 3. kapitola. Na základě požadavků vstřikování a možnostem MJF 3D tisku i 3D tisku obecně byla provedena příprava pro vstřikování v 7. a 8. kapitole. Vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF se zabývaly kapitoly 9–14, podrobněji 4.–8. příloha. I když byla tato oblast prozkoumaná maximálně dle mých možností, ideální popis chování vložek 3D tištěných metodou MJF při vstřikování se nepodařilo přesně stanovit, ale pouze přiblížit.

Na základě provedeného výzkumu je možnost vstřikovat do 3D tištěných plastových vložek za účelem ověřit vlastnosti obráběných kovových vložek téměř bezvýznamná. Důvodem je, že vlastnosti 3D tištěných plastových vložek jsou při vstřikování odlišné od vstřikování do obráběných kovových vložek. Lze však jen říci, že bude-li vstřikování do plastových vložek 3D tištěných vložek snadné na vyndání, výstřiky nebudou mít staženiny atd., vstřikování do obráběných kovových vložek bude s největší pravděpodobností bezproblémové. Zároveň se tím vyvrací i další mylná představa o ponechání stejných parametrů pro vstřikování do kovových i plastových vložek. Především velká hodnota uzavírací síly, vstřikovacího tlaku, rychlosti atd. by plastové vložky zničily hned v prvním cyklu, nebo by je výrazně opotřebovaly po pár cyklech.

Vstřikování do 3D tištěných plastových vložek není tak jednoduché, jak se na první pohled může zdát. Cílem metodiky vstřikování do plastových vložek 3D tisknutých metodou MJF je co nejvíce usnadnit tuto problematiku tak, aby pro vstřikování v kusové či malosériové výrobě nacházelo čím dál větší uplatnění.

Výchozím bodem je příprava vstřikování do 3D tištěných plastových vložek, která byla provedena dle mých možností a zkušeností s 3D tiskem i vstřikováním a je uvedena do 7. a 8. kapitoly. Především výběr 3D tiskového prášku a vstřikovaného materiálu by byl jistě zajímavý, avšak není v možnostech této práce. K výběru 3D tiskového prášku se vycházelo z rešerše provedené v 5. kapitole – Stávající vstřikování do 3D tištěných plastových vložek vycházející z Přílohy č. 1 a Přílohy č. 2. Jako vstřikovaný plast byl vybrán nejvíce vyráběný druh – PP v EU za rok 2019 dle grafu zobrazeném na Obr. 7. Do metodiky je možné zahrnout jakýkoliv druh prášku i vstřikovaný plast. Je však důležité správně volit podle očekávaných

vlastností jak vstřikovacích vložek, tak vstřikovaných dílů. Na základě získaných zkušeností a dále dle 3.2 podkapitoly – Vstřikovací lis – je pro vstřikování do 3D tištěných plastových vložek doporučeno používat malý vstřikolis, tj. lis s malou vstřikovací jednotkou, malým vstřikovaným objemem. Jelikož vstřikování do 3D tištěných plastových vložek je oblast, která je teprve zkoumaná, je doporučeno začít vstřikovat malé díly. Ideální je použití levného ručního lisu zobrazeného na Obr. 22 vpravo. Návrh vstřikovací formy bude mít značný vliv na vstřikování a uplatnitelnost. V této práci byl proveden návrh modulární vstřikovací formy, ve které bylo provedeno veškeré vstřikování uvedené v této práci, zároveň byly popsány výhody a nevýhody formy. Na základě poznatků uvedených v této práci a praktických zkušeností byla sestrojena metodika vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF. Praktické zkušenosti byly získány i při vstřikování dílů, které nejsou v této práci uvedeny. Tato metodika byla mnou pro plánování i realizaci používaná a je zobrazena na Obr. 59. V horní části jsou popsány jednotlivé fáze a ve spodní části kroky seřazené v časové posloupnosti.



Obr. 59 – Schéma postupu vstřikování do plastových vložek 3D tisknutých metodou MJF

Metodika na Obr. 59 začíná od požadavků a představ zákazníka a popisuje proces až do výroby vstřikovaných dílů s ohledem na technologii výroby. Základní rozdělení je na fáze plánování a realizace. Virtuální návrh může být součástí jak plánování, bude-li ho potřeba, nebo může pomáhat k realizaci. Realizací pak zahrnuje výrobu vložek 3D tiskem a vstřikování.

15.1 Plánování

Vstřikování do 3D tištěných plastových vložek není prozatím příliš prozkoumanou oblastí. Z tohoto důvodu je fáze plánování velmi důležitá. Na Obr. 59 je zobrazena vlevo. Cílem této fáze je především plánovat vstřikování dílů, které je reálné na základě dosavadních zkušeností. V této fázi stanovení cílů, jejichž naplnění MJF 3D tiskem, konstrukcí formy atd., není možné, např. vyvarovat se vstřikování hlubokých dílů, které by nebylo možné z vložky vyhodit, zohlednit možnosti dotlaku, zohlednit drsnost povrchu vložek atd. S přibývajícimi zkušenostmi, vlastnostmi MJF 3D tisku, možnostmi atd. bude jistě vstřikování složitějších dílů do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF přibývat, podobně jako tomu bylo při rozvoji vstřikování a 3D tisku. V současné chvíli je však zkušeností s touto problematikou málo, a proto je výrazně doporučeno vyvarovat se nesplnitelných nebo jen velmi stěží splnitelných cílů, a to nejen z hlediska technických možností, ale i z ekonomických. Spíše je vhodné postupně plnit databázi znalostmi, zkušenostmi se vstřikováním do 3D tištěných plastových vložek metodou MJF.

Začátek plánování začíná požadavky a přáními zákazníka na vstřikovaný díl. Více než ekonomickými možnostmi je vstřikování do plastových vložek omezeno technickými. Z tohoto důvodu v metodice zobrazené na Obr. 59 je technické zhodnocení v pořadí před ekonomickým.

Technické zhodnocení

Prvně je nutné provést technické zhodnocení vstřikovaného dílu s cílem zjistit, zda je možné MJF 3D tištěnou plastovou vložkou splnit představy a přání zákazníka o vstřikovaném dílu, např. přání na drsnost, smrštění, tolerance atd. Vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF není vhodné pro každý tvar výrobku. V případech, že nebude možné požadavky zákazníka o vstřikování do 3D tištěných plastových vložek naplnit, je možné ekonomické zhodnocení přeskóčit a rozhodnout se pro odmítnutí zakázky. Ovšem nabízí se možnost provedení úprav, ať již na vstřikovaném dílu nebo formě, které by představy a přání zákazníka mohly naplnit. Rozsah úprav zohledňuje následné ekonomické zhodnocení.

Modulární vstřikovací forma zobrazená na Obr. 28 a více popsána v 8.3 podkapitole je navržena tak, aby ji bylo možné snadno upravit. Např. přesahují-li rozměry vložek prostor pro ně určený, je možnost vložky umístit nad hlavní desky. Ovšem tím se vytrácí strategie návrhu vložek vycházející z grafu na Obr. 26 a je nutné v následném ekonomickém zhodnocení počítat s její vyšší cenou. Stejně tak jako každá další úprava formy prodražuje cenu výroby vstřikovaných dílů.

Návrh na úpravu vstřikovaných dílů vychází z Přílohy č. 1 a Přílohy č. 2, ale především ze zkušeností uvedených v 9. kapitole – Konstrukce 3D tištěných plastových vstřikovacích vložek. Cílem návrhu úprav vstřikovaného dílu je zjistit od zákazníka především přípustné meze, toleranci. V následující části textu jsou uvedena nejčastější omezení, se kterými jsem se setkal.

Drsnost

Drsnost vložky z HP PA 12 GB je Ra 10,7 μm , která byla změřena v 9.2 podkapitole – Drsnost povrchu vložek 3D tištěných metodou MJF. Jak je zobrazeno v mikroskopickém řezu na Obr. 58, tato drsnost se promítne na drsnost vstřikovaného dílu. Porovnání dílu vstřikovaného do plastových 3D tištěných vložek z HP PA 12 GB s dílem vstřikovaným do obráběných hliníkových vložek je zobrazeno na Obr. 32. Cílem technického zhodnocení drsnosti je upozornit zákazníka na hrubost vstřikovaných dílů. Bohužel tuto drsnost nezlepšily ani použité vrstvy nanesené spreji – popsané v 12.3 podkapitole – Nanesení vrstvy sprejem. Aby byla drsnost vstřikovaných dílů snížena, musela by být nanesena na povrch vložky vrstva určitou technologií. Je to možné, i když se to netýká výzkumu této práce, ale ztrácí se tím převážně rychlost i cena výroby vložek.

Dutina vložek

Dutinu vložek je doporučeno konstruovat podle doporučení popsanych v 9.4 podkapitole – Dutina 3D tištěných vložek. Cílem technického zhodnocení je zjistit, jaký je např. max. tolerovaný, dovolený, úkos, poměr výšky ku šířce stěn a radius od zákazníka vstřikovaného dílu.

Dle poznatků z 11. kapitoly – Validace teplotního zatížení vložek a 13. kapitola – Opotřebení vložek je doporučeno vyvarovat se příliš mělkých stěn, které jsou příčinou tření taveniny a tím akumulace tepla a také důvodem většího opotřebení vložek.

Přesnost vstřikovaných dílů

13. kapitola – Opotřebení vložek a Příloha č. 8. prozkoumaly opotřebení vložek po 50 a 100 cyklech. Při vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF je nutné počítat s opotřebením plastových vložek větším než u kovových vložek. Cílem technického zhodnocení je zjistit, jakou přesnost a v jakém místě zákazník na vstřikovaném dílu toleruje. Tato část technického zhodnocení je důležitým podkladem pro ekonomické zhodnocení. Např. bude-li zjištěno, že přesnost je příliš vysoká a k výrobě 100 kusů je potřeba 10 vložek, určitě se to negativně projeví v ekonomickém zhodnocení.

Nejen opotřebení na přesnost, ale i další faktory mají vliv, např. přesnost výroby vnějších rozměrů kavitových vložek. Pokud je díl vstřikován do pevné i pohyblivé vložky, viz 9. kapitola, platí, že čím větší je přesnost, tím větší je pravděpodobnost nutnosti brousit vnější rozměry vložek. Dále je pak doporučeno zvážit přesnost 3D tisku pro naplnění představ o přesnosti vstřikovaného dílu zákazníkem a další. To vše má vliv nejen na přesnost, ale pokud má být přesnost zlepšena, tak i na čas a rychlost výroby, které musí zohlednit ekonomické zhodnocení.

Velikost dílu v závislosti na dotlaku

V 10.3 podkapitole – Vyhodnocení – Ocelová vtoková vložka byla max. doba dotlaku stanovena na dobu 10 s. Doba plnění testovacího dílu zobrazeného na Obr. 30 při parametrech vstřikování uvedených v Tab. 7 je 1,25 s. Lze tedy počítat s dobou, kdy je možné tlačit taveninu do dutiny formy nanejvýš 11 s. Pak vlivem použití ocelové vtokové vložky v modulární vstřikovací formě dojde k zamrznutí vstupního kanálku, jak je více popsáno v Příloze č. 5. Jelikož doba, kdy je možné tlačit taveninu do formy, není omezena velikostí ústí vtoku, je důležité správně rozvrhnout fáze plnění a dotlaku. Pokud by byl např. vstřikovaný díl příliš objemný a vzhledem k doporučení používat nižší vstřikovací rychlosti, hrozilo by, že celý čas, kdy je možné tlačit taveninu do formy, by byl využit pouze k naplnění dutiny formy taveninou. Vynecháním fáze dotlaku by nastaly komplikace popsané v 3.1 podkapitole – Vstřikovací cyklus – Dotlak (Doplnění). Návrhy úpravy modulární vstřikovací formy, které by umožnily prodloužit dobu, kdy je možné do dutiny tlačit taveninu, byly popsány v 10.3 podkapitole – Vyhodnocení – Ocelová vtoková vložka. V současné době se jedná o omezení, se kterým je nutné počítat při plánování v technickém zhodnocení. Případné úpravy modulární vstřikovací formy by se musely zahrnout do ekonomického zhodnocení.

V příloze č. 1 a v Příloze č. 2 byly konstrukce vstřikovacích forem převážně řešeny použitím ocelové vtokové vložky stejně jako modulární vstřikovací forma. Na základě výše popsaného je vstřikování do plastových 3D tištěných vstřikovacích vložek metodou MJF vhodné pro vstřikování malých dílů. Stejně tomu bylo i v případě 3D tisku vložek metody fotopolymeryzace a tryskání materiálů. Výzkum úprav modulární vstřikovací formy a vliv na parametry vstřikování by byl jistě zajímavý, avšak není v možnostech ani hlavním cílem této disertační práce. Jelikož se jedná o vstřikování vhodné pro malé díly, je i doporučení pořídit malý vstřikolis správné.

Ekonomické zhodnocení

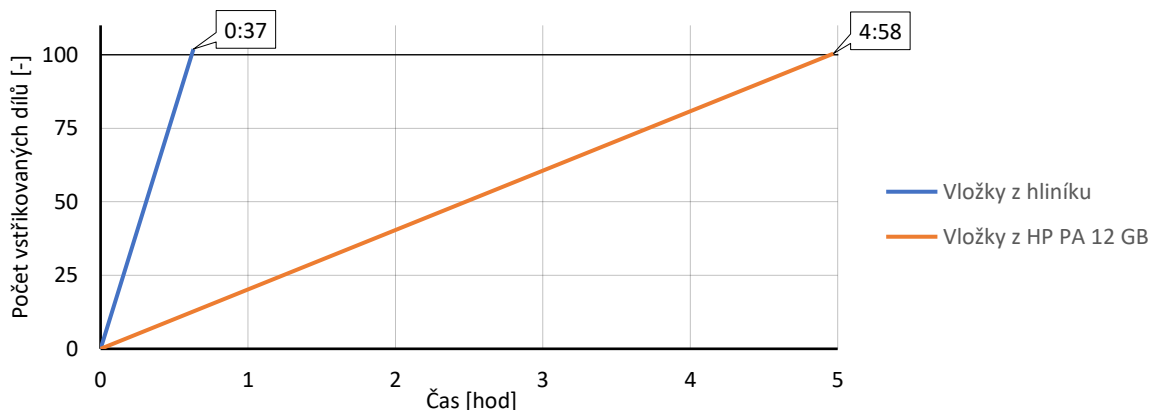
Hlavní výhody plastových vložek 3D tištěných metodou MJF byly představeny ve 14. kapitole – Výhodnost 3D tištěných plastových vložek. Ovšem tím jsou myšleny jen náklady na výrobu vložek. Při vstřikování je nutné počítat i s delší dobou vstřikovacího cyklu, nižší životností plastových vložek atd. Cílem ekonomického zhodnocení je vyhodnotit, zdali je vstřikování dílů výhodné. Do ekonomického hodnocení mohou být zahrnuty i požadavky na úpravu modulární vstřikovací formy. Bude-li se jednat o drobné úpravy, budou z ekonomického hlediska proveditelné. Rozsáhlejší úpravy jsou na zvažování jejich realizace. Výsledkem ekonomického zhodnocení je buď schválení zakázky, nebo konzultace se zákazníkem o navýšení ceny.

Příklad ekonomického zhodnocení je představen na vstřikování testovacího dílu zobrazeného na Obr. 30. Rychlost výroby vložek oproti obrábění kovu je rychlejší, dle 14.1 podkapitoly – Rychlost výroby přibližně o 1 týden. Cena plastových vložek zobrazených na Obr. 31 vpravo je přibližně o 29 755 Kč levnější než výroba obráběním hliníkových vložek zobrazených na Obr. 31 vlevo. V rychlosti výroby a v ceně jsou výrazně výhodnější plastové vložky 3D tištěné metodou MJF z HP PA 12 GB. Ovšem dále je potřeba zohlednit vstřikování. Porovnání cyklu vstřikování testovacího dílu při vstřikování do plastových vložek s cyklem vstřikování do hliníkových vložek je zobrazeno na Obr. 43 a Obr. 44. Výsledkem je, že cyklus vstřikování do hliníkových vložek trvá přibližně pouhých 22 s, zato cyklus vstřikování do plastových vložek z HP PA 12 GB trvá přibližně 178 s. Navíc dle 11. kapitoly – Validace teplotního zatížení vložek by měla být doba otevření formy chlazené okolním vzduchem prodloužena, viz graf zobrazený na Obr. 48. Pro ukázkou bude čas cyklu vstřikování do plastové vložky ponechán a bude přidáno chlazení při otevření formy stlačeným vzduchem. Tím budou vstřikovací parametry uvedené v Tab. 7 dostatečné.

Na ekonomické zhodnocení mají značný vliv dovolené tolerance na vstřikovaném dílu zákazníkem. Pokud by byla v dutině vložky testovacího dílu provedena konstrukční doporučení z 9.4 podkapitoly – Dutina 3D tištěných vložek, určitě by opotřebení zkoumané ve 13. kapitole – Opotřebení vložek, nebylo tak velké. A jistě by se předešlo utržení stěny dutiny vložky zobrazené na Obr. 54. Pro příklad ekonomického zhodnocení bude zákazník vyžadovat vstřikovat pouze 100 kusů. Jelikož dutina vložky je tvořena dvěma polovinami krytu elektroniky, na jeden vstřikovací cyklus se vyrobí jeden díl. Pro vstřikování testovacího dílu bude od plastové vložky z HP PA 12 GB vyžadováno umožnit vstřikování 100 cyklů a zhruba 20 cyklů pro testování, zkoušení vstřikování do plastových vložek. Dále bude předpoklad, že provedené konstrukční

úpravy vložek zmenší opotřebení dutin natolik, že bude vstřikovaný 120. díl v toleranci vyžadované zákazníkem. Zároveň nedojde k poškození vložek.

Pokud plastové vložky umožní na jedno upnutí vstřikování stejného počtu cyklů, bude moci být provedeno jednoduché porovnání mezi vstřikováním do kovové a do plastové vložky. Při zohlednění časů vstřikovacích cyklů do kovových a plastových vložek, výsledný čas pro výrobu 100 kusů udává graf na Obr. 60.



Obr. 60 – Porovnání doby výroby 100 kusů vstřikováním do hliníkových a plastových vložek

Graf na Obr. 60 udává závislost mezi počtem vstřikovaných dílů, cyklů na svislé ose, s dobou výroby na vodorovné ose. Závislost vyráběných dílů vstřikovaných do hliníkové vložky na čase je zobrazena v grafu na Obr. 60 modře a do plastových vložek oranžově. Obě křivky mají lineární průběh a zohledňují dobu vstřikovacího cyklu. Výsledkem je, že nepřetržitým vstřikováním do hliníkových vložek se 100 kusů vyrobí zhruba za 37 min, zato nepřetržitým vstřikováním do vložek z HP PA 12 GB se 100 kusů vyrobí přibližně za 5 hod. Celkově zabere vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF přibližně 8krát více času než při vstřikování do hliníkových vložek.

Graf na Obr. 60 udává pouze čas potřebný pro výrobu 100 kusů. Do ekonomického zhodnocení je nutné zahrnout i dobu chodu vstřikolisu, mzdu obsluhy stroje, nutnost chladit povrch plastových vložek. Nižší náklady na výrobu vložek 3D tiskem a použitím plastu jsou pouze na začátku, s přibývajícím počtem dílů, cyklů se výhodnost plastových vložek postupně zmenšuje. Pokud by tolerance vstřikovaného dílu zákazníkem vyžadovaly použití druhé či více vstřikovacích vložek, znamenalo by to nejen větší vstupní náklady, ale je nutné i zahrnout čas potřebný pro výměnu vložek v modulární vstřikovací formě.

Nevýhodou plastových vložek je větší opotřebení a delší doba potřebná pro nastavení, přiblížení se k optimálním parametrům vstřikování. Při tomto zkoušení se plastové vložky zpravidla více opotřebovávají. Může také nastat případ jejich poničení při testovacím vstřikování. Z těchto důvodů je doporučeno plastové vstřikovací vložky 3D tisknout min. ve 2 párech (pevná a pohyblivá vložka).

Plastové vstřikovací vložky je možné v závislosti na případném poškození opravit, případně nevyhovující vložky v závislosti na potřebě úpravy upravit např. zvětšením vtokového ústí, zvětšením úkosů stěn atd. Vzhledem k výrobní ceně MJF 3D tisku je na zvážení, zda nebude výhodnější vložku 3D vytisknout znovu. Je však nutné to zahrnout do ekonomického zhodnocení. V tomto je rychlejší a levnější výroba 3D tiskem dle 14. kapitoly než obráběním kovu.

Závěr

Na příkladu testovacího dílu byla ukázána oblast, kdy zvolení MJF 3D tisku a plastu pro výrobu vstřikovacích vložek je výhodnější než zvolení obrábění kovu. I když rychlost a náklady při vstřikování do plastových vložek jsou méně příznivé, pořád jsou při požadavku vstřikovat pouze 100 kusů proveditelné za jednu směnu, tj. 8 hod. Náklady spojené s 3D tiskem vložek a vstřikováním mají na vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF největší vliv. Při ekonomickém zhodnocení by jim měla být věnována největší pozornost.

Pokud bude potřeba, je možné plánování podpořit virtuálním návrhem, simulací.

15.2 Virtuální návrh

Virtuální návrh je zobrazen v metodice na Obr. 59 ve druhém sloupečku. Následuje po technickém a ekonomickém zhodnocení z fáze plánování. Použití virtuálního návrhu může být vynecháno, pokud k němu nejsou potřebná vybavení. Je-li tak učiněno, následuje po zhodnocení rovnou 3D tisk vložky. Pokud je možné virtuální návrh, ověření provést, je vždy doporučeno tak učinit a tím předejít případným komplikacím. Ve virtuálním návrhu je možné simulovat jak 3D tisk vložky, tak proces vstřikování. S ohledem na mé možnosti byla simulace 3D tisku vložek vynechána. Simulaci vstřikování byla věnována 10. kapitola – Simulace vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. I když následná 11. kapitola – Validace teplotního zatížení vložek nepotvrdila plnou shodu se simulací, simulace pomohla k přiblížení se ideálními parametry vstřikování. Převedším je doporučeno provést zjednodušenou simulaci vstřikování popsanou v 10.4 podkapitole – Zjednodušení simulace. Výsledkem virtuálního návrhu je vyhodnocení simulací, případné provedení nových simulací s provedením patřičných úprav.

Provedená simulace v této práci nezohlednila vlastnosti 3D tisku. Lze tak jednoduše v simulaci upravit vlastnosti plastu a simulovat tak vlastnosti plastů používaných v 3D tiskových metodách fotopolymerizace a tryskání materiálu.

15.3 3D tisk

3D tisk je zobrazen v metodice na Obr. 59 ve třetím sloupečku a je pouze ve fázi realizace. Po zhodnocení a virtuálním návrhu následuje výroba 3D tištěných vložek. Pro MJF 3D tisk je doporučeno postupovat podle 7.3 podkapitoly – Výrobní postup. Důležitou částí je vyhodnocení, které slouží jako kontrola pro případný návrh na úpravu vložek. Pokud je rozhodnuto, že vložky jsou 3D vytištěny správně, mohou vstupovat do další fáze.

15.4 Vstřikování

Vstřikování je poslední fází metodiky, a proto je zobrazeno v pravém sloupečku na Obr. 59. 3D vytištěné vložky jsou nejprve zařazeny do zkušebního testovacího prvního vstřikování. Výrazně je doporučeno tento krok provést, i když se může zdát jako zbytečný. Vždyť nalezení optimálních parametrů vstřikování výrazně ovlivňuje opotřebení plastových vložek. Výchozími parametry jsou hodnoty získané virtuální simulací. Cílem tohoto kroku je se přiblížit, pokud možno nalézt optimální parametry vstřikování. V tomto kroku je doporučeno měnit pouze jeden parametr a ostatní ponechat beze změny. Důvodem je minimalizace vlivu proměnných na vstřikování.

Na základě zkušeností se vstřikováním do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF je doporučeno nastavit první parametry vstřikování následovně:

- Doba chladnutí – krátká.
- Doba otevření formy – dlouhá.
- Vstřikovaný tlak – malý.
- Teplota – malá.
- Vstřikovací rychlost – malá.

Zejména uvedené parametry výše mají na opotřebení vložek velký vliv. Kdyby např. byl zvolen vysoký vstřikovací tlak, s tím související i uzavírací síla, mohla by se plastová vložka hned v prvním vstřikovacím cyklu poškodit, což by způsobilo nejen časové zpoždění, ale i finanční ztrátu. Téměř po několika cyklech probíhá vyhodnocení, jehož jedním závěrem je podnět k úpravě vstřikovacích parametrů.

Pokud lze výstřik hůře vyndat, je jeho délka zatečení nedostatečná atd., je možnost použít spreje, viz 12.3 podkapitola – Nanesení vrstvy sprejem a více v Příloze č. 7.

Pokud zkušební vstřikování vyrábí díly v požadované kvalitě, následuje vstřikování požadovaného počtu kusů. Tím je metodika vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF znázorněná na Obr. 59 ukončena, neboť její cíle jsou naplněny. Zákazníkovi jsou dle požadavků a přání dodány požadované počty dílů vstřikovaných do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF.

16 Shrnutí disertační práce

Výzkum plastových výrobků s ohledem na jejich technologii výroby se zaměřil na technologie 3D tisku a vstřikování, především na relativně novou myšlenku použití plastových 3D tištěných vložek při vstřikování. V úvodu práce byl vysvětlen smysl a cíl této myšlenky. Výchozím bodem byly současné možnosti snížení ceny vložek vyráběných obráběním kovu. S ohledem na vlastnosti 3D tištěných plastových vložek se výzkum práce zaměřil na kusovou výrobu. Bohužel využití v malosériové výrobě je s ohledem na životnost plastových vložek v současné době ekonomicky nevýhodné.

Na základě provedených rešerší a stávajících řešení bylo v upřesňujících cílech disertační práce rozhodnuto nepokračovat v používaných metodách 3D tisku, ale přijít se zatím nepoužívanou metodou. Důvodem je rychlý vývoj ve vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Během tvorby disertační práce byla tato problematika obohacována o nové výzkumy, možnosti 3D tisku atd. Pokračováním ve stávajících používaných metodách 3D tisku by hrozilo překrývání výzkumu s jinou prací atd. Z tohoto důvodu se práce zaměřila na metody 3D tisku mající polotovar ve formě prášku. S ohledem na mé možnosti byla vybrána metoda MJF.

Upřesňující cíle této disertační práce byly zvoleny 4 a všechny byly v rámci možností maximálně naplněny. Jelikož je téma poměrně široké, nebylo možné provést detailnější výzkum dalších oblastí.

16.1 Přínosy práce

Přínosy této disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- Prozkoumání další metody 3D tisku pro vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Rozšíření uplatnitelnosti metod 3D tisku mající polotovar ve formě prášku, MJF metoda.
- Návrh vstřikovací formy pro uplatnění 3D tištěných plastových vložek.
- Představení možnosti na zjednodušení simulování vstřikování do 3D tištěných plastových vložek.
- Varianty testování zatékavosti.
- Metodika vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF.

16.2 Směry výzkumu

Čas pro disertační práci je omezen. Z toho důvodu nebylo možné prozkoumat podrobněji některé problémy související se vstřikováním do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF. V této kapitole jsou uvedeny některé směry výzkumu, které nebyly více prozkoumány, ale které by byly jistě užitečné.

Vlastnosti plastových MJF 3D tištěných vložek při vstřikování

Výzkum vlastností plastových MJF 3D tištěných vložek při vstřikování je pro uplatnění těchto vložek klíčový. Především chování MJF 3D tištěného plastu za teploty, tlaku, kombinace atd. Málo prozkoumanými vlastnostmi jsou např. akumulace tepla, odvod tepla, teplotní stálost atd.

Vstřikovaný plast

V této práci byl bohužel zvolen pouze nejvíce vyráběný druh plastu – PP. Dle pyramidy zobrazené na Obr. 6 se jedná o komoditní semikrystalický plast. Možnost vyzkoušet např. amorfni či konstrukční nebo jiný druh či směs atd. by bylo jistě zajímavé, avšak nebylo v možnostech této disertační práce.

Simulace

Pokud budou dostatečně prozkoumány vlastnosti plastových vložek 3D tištěných metodou MJF, bude určitě zajímavé tyto prozkoumané vlastnosti zahrnout do simulace. Nejen nové poznatky, ale i stávající nejsou simulacemi správně zohledněny.

Vložky s vloženými elementy

Jednou z možností je použití vložek s vkládanými elementy. Elementy mohou být např. ocelové a mohou sloužit pro rychlejší odvod tepla. Dále mohou být plastové vložky opatřeny elementy pro odvod vzduchu atd.

Povrchové úpravy

V této disertační práci byly prozkoumány povrchové vrstvy nanášené spreji, a to především z důvodu jednoduchého nanášení a dále z důvodu použití myšlenky Rapid prototyping. Pokud by se použily další technologie, bylo by možné ne příliš vhodné vlastnosti MJF 3D tištěných vložek zlepšit. Jednalo by se sice o dražší a delší dobu výroby, nicméně pokud by povrchové vrstvy zlepšily životnost a vlastnosti vložek, určitě by byly přínosem.

Zálisky

Při vstřikování do hrubého povrchu plastových vložek 3D tištěných metodou MJF se nabízí možnost využití povrchu, např. pro výrobu nástrojů, kde by se rukojeť vstřikovala, a tělo nástroje by bylo ocelové.

Ekologické řešení

Zatím velice vzdáleným, ale ideálním řešením by bylo použití vstřikovacích vložek ze snadno recyklovatelného plastu. V 2.6 podkapitole – Likvidace a recyklace plastů byla popsána náročnost likvidace plastů a navrácení plastu zpátky do oběhu, recyklace. Pokud by vstřikovací vložku bylo snadné recyklovat, mohla by být zpátky navracená do oběhu pro 3D tisk nové vložky pro jiný vstřikovaný díl. Tím by se zmenšilo množství odpadu a celý proces by se stal šetrnějším k životnímu prostředí.

Metoda MJF popsaná více v 7. kapitole – 3D tisk plastových vstřikovacích vložek, pro 3D tisk využívá prášku v závislosti na druhu z předchozího 3D tisku. Avšak jedná se o prášek, který není nijak znečištěn. Při použití recyklovatelné vstřikovací vložky by muselo být v prvním kroku odstraněny zbytky vstřikovaného plastu na povrchu vložky. Dále by muselo být provedeno rozdrčení vložky na prášek. Tento proces je v současné době velmi složitý a jistě by byl závislý na vstřikovaném plastu, parametrech vstřikování atd.

17 Závěr

Disertační práce se zabývala plastovými výrobky, jejichž použití ve světě rychle přibývá a z plastu se tak stal nejvíce používaný materiál. Technologie výroby plastových výrobků byly zvoleny dvě: vstřikování jako představitel již konvenční technologie, zato nejvíce využívané, a 3D tisk. Obliba a použití 3D tisku v posledních letech rychle roste. I když se jedná o relativně novou technologii, 3D výtisky jsou již stejně, jako byly plasty, schopny nahrazovat čím dál více výrobků. A jednou z relativně nových oblastí využití plastu a 3D tisku jsou vstřikovací vložky. V úvodu disertační práce byla stanovena předpokládaná oblast uplatnění a zvolen výchozí stav. Důvodem použití 3D tištěných plastových vložek bylo snížení výrobních nákladů a zkrácení doby výroby obráběných kovových vložek, které lze již považovat za konvenční.

I když 3D tištěné plastové vstřikovací vložky jsou relativně novou myšlenkou, nejedná se o myšlenku zcela neznámou. V disertační práci jsou prozkoumány stávající možnosti vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. Nejvíce se pro 3D tisk plastových vstřikovacích vložek využívají dvě metody 3D tisku, z toho jedna metoda byla často zkoušená. Na základě provedené důkladnější rešerše plastů, vstřikování a 3D tisku bylo možné provést upřesnění cílů disertační práce. Výsledkem bylo využití další metody 3D tisku, a to především možností, které 3D tisk nabízí, ale doposud nebyly využívané.

Z rešerše bylo čerpáno pro návrh modulární vstřikovací formy a k výběru nejvíce vyráběného plastu v EU pro vstřikování, k výběru plastu pro 3D tisk vložky, zvolení správného výrobního postupu atd. Již při MJF 3D tisku vložek a přípravě vstřikování byly v disertační práci popsány možnosti řešení problémů. Především byly popsány rozdíly mezi 3D tiskem a obráběním a jejich důsledek použití s ohledem na vlastnosti vstřikovacích vložek. Provedení přípravy, především návrh modulární vstřikovací formy je jiný než konstrukce stávajících forem pro vstřikování do plastových 3D tištěných vložek. V práci byly představeny výhody i nevýhody modulární vstřikovací formy. Celkově lze návrh formy hodnotit jako přínos v této problematice.

Třetím upřesňujícím cílem disertační práce po 3D tisku vložek a přípravě vstřikování byl výzkum vstřikování do 3D tištěných plastových vložek. K výzkumu byly využity moje maximální možnosti. Byla využita virtuální simulace vstřikování, validace teplotního zatížení termokamerou, zkoumání vlastností vložek na délku zatečení, analýza opotřebení 3D skenem, byl proveden mikroskopický řez a další. Kromě prozkoumání technických vlastností plastových vložek 3D tištěných metodou MJF z HP PA 12 GB bylo provedeno ekonomické srovnání s obráběnými hliníkovými vložkami. K porovnání byl zvolen testovací vstřikovací díl – kryt elektroniky. Provedený výzkum potvrdil ekonomickou výhodnost plastových vložek, ale především ukázal výrazně horší technické vlastnosti. Aby bylo možné lépe simulovat, predikovat vlastnosti plastových vložek 3D tištěných metodou MJF při vstřikování, bylo by nutné provést širší výzkum.

Dalším přínosem této disertační práce je poslední stanovený upřesňující cíl, a to metodika vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF. Vypracovaná metodika jistě pomůže rozšířit znalosti této problematiky.

Problematika vstřikování do 3D tištěných plastových vložek skrývala spoustu problémů, které nebyly na začátku tvorby práce známy ani rešersemi plně odhaleny, přesto poskytuje tato práce více přínosů. Podobně jako open source projekty, především RepRep a sdílené know-how, pomohly přiblížit a rozšířit 3D tisk. Jsem přesvědčen, že tato práce svými závěry a možnostmi využití uvedené metodiky pomůže přiblížit a rozšířit problematiku vstřikování do 3D tištěných plastových vložek.

18 Použitá literatura

1. **Blabolil, F.** *Přehled výroby, zpracování a použití plastických hmot*. Praha : Práce, vydavatelství a nakladatelství ROH, 1956.
2. **PlasticsEurope.** [Online] [Citace: 4. 5. 2021.] Dostupné z: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.
3. **Duchek, P., Šmídová H.** *Chemie*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2007. ISBN: 978-80-7043-587-8.
4. **ČSN EN ISO 1133-1.** *Plasty – Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů – Část 1: Standardní metoda*. Praha : Česká agentura pro standardizaci, 2012.
5. **Růžička, Z. et al.** *Podklady ze školení*. Bratrská 1114, Lipník nad Bečvou : SimulPlast s.r.o. <https://www.simulplast.cz>.
6. **Ausperger, A.** publi.cz. *Technologie zpracování plastů*. [Online] Code Creator, s.r.o., 2016. [Citace: 9. 6. 2021.] Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Uvod.html>. 978-80-88058-77-9.
7. **Wang, M. Chang, R. a Hsu, Ch.** *Molding Simulation: Theory and Practice*. Mnichov : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 11. 6. 2018. ISBN: 78-1-56990-619-4, E-Book ISBN: 978-1-56990-620-0.
8. **Zeman, L.** *Vstřikování plastů*. Praha : Garda Publishing, a.s., 2018. ISBN: 978-80-271-0614-1.
9. **Shoemaker, J.** *Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engine*. Mnichov : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 1. 6. 2006. ISBN-10: 3-446-40640-9, ISBN-13: 978-3-446-40640-7.
10. **Bobek, J.** Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů. publi.cz. [Online] Code Creator, s.r.o., 2016. [Citace: 22. 6. 2021.] Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/01.html>. 978-80-88058-65-6.
11. **Polimold.** Conventional hot runner system. [Online] [Citace: 29. 7. 2021.] Dostupné z: <https://www.polimold.com.br/en/plastic-injection/hot-runner-systems/conventional/>.
12. **Heinrich, K., Dieter, E. an Harald, V.** *1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug- und Formenbau beim Spritzgießen*. místo neznámé : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2008. ISBN: 978-3-446-41243-9.
13. **Redwood, Ben. Schöffner, Filemon. Garret, Brian.** *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. místo neznámé : 3D Hubs, 14. 11. 2017. str. 304. ISBN-10: 9082748509, ISB-13: 978-9082748505.
14. **Josef Průša.** Co je RepRap? [Online] [Citace: 31. 7. 2021.] Dostupné z: <https://josefprusa.cz/co-je-reprap/>.
15. **Gibson, I. Rosen W. a Stucker, B.** *Additive Manufacturing Technologies*. 2. New York : Springer, 2010. str. 498. ISBN: 978-1-4939-2112-6, E-Book ISBN: 978-1-4939-2113-3, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
16. **Wikipedie.** STL. [Online] [Citace: 13. 4. 2021.] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/STL>.
17. **All3DP.** The Best Free 3D Printing Software of 2021. [Online] All3DP GmbH. [Citace: 28. 4. 2021.] Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/#kisslicer>.
18. **ČSN EN ISO/ASTM 52900.** *Aditivní výroba – Obecné zásady – Terminologie*. Praha : Česká agentura pro standardizaci, 2017.
19. **Formlabs Inc.** Blogy Formlabs. [Online] [Citace: 4. 10. 2022.] Dostupné z: <https://formlabs.com/blog>.
20. **Stratasys Ltd.** Aplikace 3D tiskáren Stratasys ve vstřikování. [Online] [Citace: 23. 1. 2023.] Dostupné z: <https://support.stratasys.com/en/applications/molding>.
21. **Wikipedia.** Stratasys. [Online] [Citace: 11. 3. 2023.] Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stratasys>.

22. **HP Inc.** HP Jet Fusion 4200. [Online] [Citace: 21. 8. 2022.] Dostupné z: <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-4200.html>.
23. **3Dees Industries s.r.o.** HP Jet Fusion 4200. [Online] [Citace: 21. 8. 2022.] Dostupné z: <https://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d>.
24. **HP Inc.** HP 3D Printing materials. [Online] [Citace: 2. 8. 2023.] Dostupné z: https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/materials.html?jumpid=va_ajmvr6tde9.
25. **ARBURG GmbH + CoKG.** Prospektová dokumentace. [Online] [Citace: 28. 8. 2021.] Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/>.
26. **CoreTech System Co., Ltd.** Návod pro Moldex3D. [Online] [Citace: 10. 1. 2023.] Dostupné z: <http://support.moldex3d.com/2022/en/index.html>.
27. **WEICON Czech Republic s.r.o.** Technické spreje. [Online] [Citace: 11. 8. 2023.] Dostupné z: <https://www.weicon.cz/produkty/weicon-chemie/technicke-spreje/?order=topseller&p=1>.
28. **Formlabs.** *How to Use 3D Printing for Injection Molding.* [Online] Formlabs Inc. [Citace: 17. 7. 2022.] Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-for-injection-molding/>.
29. **ČSN EN ISO 75-1.** *Plasty – Stanovení teploty průhybu při zatížení – Část 1: Obecná metoda zkoušení.* Praha : Česká agentura pro standardizaci, 2020.
30. **ČSN EN ISO 75-2.** *Plasty – Stanovení teploty průhybu při zatížení – Část 2 Plasty a ebonit.* Praha : Česká agentura pro standardizaci, 2013.
31. **Formlabs Inc.** Blog: Low-Volume Rapid Injection Molding With 3D Printed Molds. [Online] [Citace: 19. 10. 2022.] Dostupné z: <https://3d.formlabs.com/injection-molding/>.
32. —. Info Sheet: Injection Molding with 3D Printed Molds Process Conditions. [Online] [Citace: 19. 10. 2022.] Dostupné z: <https://formlabs.com/blog>.

19 Publikační činnosti autora

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Články v časopisech

- [A1] Habrman, M. et al. Injection Moulding into 3D-Printed Plastic Inserts Produced Using the Multi Jet Fusion Method. Materials. Switzerland, Basel: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. roč. 2023, č. May. Vol 16, s. 4747
- [A2] Habrman, M. et al. Preventing flash occurrence in the injection plastic mould. MM Science Journal. Praha: MM Science Journal. roč. 2022, č. October 2022, s. 5854–5857. ISSN: 1803-1269
- [A3] Ráž, K., Chval, Z., Habrman, M a Milsimerová A. Thermal specification of 3D printed injection moulds made from PA12GB. Conference Series Materials Science and Engineering. England, Bristol: IOP Publishing. 2021. 1199(1):012009
- [A4] Habrman, M., Ráž, K. a Kalina, T. Effect of the Cascade Injection Molding on the Filling Behaviour. Manufacturing Technology. Ústí nad Labem: J. E. Purkyně University in Ústí nad Labem, roč. (19) 2019, č. 6, s. 936–940. ISSN: 1213-2489

Příspěvky ve sbornících

- [A5] Habrman, M. Influence of the Infill on the Tensile Strength and the Economic Factors of 3D Printing. In: Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium „Intelligent Manufacturing & Automation“. Vídeň: DAAAM International Vienna, 2019, s. 1056–1060. ISBN: 978-3-902734-22-8, ISSN: 1726-9679

Patenty

- [A6] Západočeská univerzita v Plzni. Modulární vstřikovací forma [patent]. Původci: Habrman, M., Ráž, K. a Chval, Z. V řízení, zatím nepublikováno.

Publikace nevztahující se k tématu disertační práce

Články v časopisech

- [A7] Habrman, M. Chval, Z. a Riedl, V. Welded ribbed manhole cover – FEM analysis and prototype testing. MM Science Journal. Praha: MM Science Journal. roč. 2021, č. March 2021, s. 4328–4332.

Funkční vzorky

- [A8] Západočeská univerzita v Plzni. 3D tištěné měrky na lahve [funkční vzorek]. Původci: Chval, Z. a Habrman M. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni. Evidenční číslo: FV003/2020/21200
- [A9] Západočeská univerzita v Plzni. Držák číselníkového úchylkoměru [funkční vzorek]. Původci: Chval, Z. a Habrman M. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni. Evidenční číslo: FV013/2019/21200
- [A10] Západočeská univerzita v Plzni. Vypalované měrky na lahve [funkční vzorek]. Původci: Chval, Z. a Habrman M. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni. Evidenční číslo: FV014/2019//21200

Příloha č. 1

**Vstřikování
do plastových vložek
tištěných
na 3D tiskárnách
Formlabs
metodou
fotopolymerizace**

Obsah

1	3D tiskárny	3
2	3D tiskový plast	4
3	Spolupracující firmy a institut	4
3.1	MultiPlus	5
3.2	Novus Applications	6
3.3	HoliMaker	8
3.4	Braskem	9
3.5	Ostatní firmy	10
3.6	The French Industrial Technical Center for Plastics and Composites (IPC).....	10
4	Zkouška 3D tisku vstřikovacích vložek	12
5	Použitá literatura	12

Seznam obrázků

Obr. 1 – 3D tiskárny Formlabs [2].....	3
Obr. 2 – Posprocessingová zařízení Formlabs [2].....	3
Obr. 3 – Vstřikování do 3D tištěných plastových vložek ve firmě MultiPlus [4].....	5
Obr. 4 – MultiPlus – Forma s 3D tištěnou plastovou vložkou a výtřik – Pouzdro elektroniky [4], [1]	5
Obr. 5 – Novus Applications – Uzávěr se závitem [1].....	6
Obr. 6 – HoliMaker – Příslušenství pro využití 3D tištěných plastových vložek [1].....	8
Obr. 7 – Braskem – Držák roušky [4]	9
Obr. 8 – Vstřikované díly ostatních spolupracujících firem [4]	10
Obr. 9 – IPC – Testovací díl [1].....	11
Obr. 10 – Vstřikovací vložka z High Temp Resign	12
Obr. 11 – Vstřikovací vložka z Tough 1500	12

Seznam tabulek

Tab. 1 – Přehled firem a jejich poznatků se vstřikováním do 3D tištěných plastových vložek [1]	2
Tab. 2 – Porovnání 3D tiskových materiálů Formlabs doporučených pro 3D tisk vstřikovacích vložek.....	4
Tab. 3 – Přehled parametrů pro vstřikované plasty [1].....	6
Tab. 4 – Novus Applications – Parametry vstřikování pro testované plasty [1].....	7
Tab. 5 – Novus Applications – Vyhodnocení geometrické stálosti vstřikovaných plastů na díle [1].....	7
Tab. 6 – Výsledky firmy HoliMaker při vstřikování do 3D tištěných plastových vložek [1]	9
Tab. 7 – Doporučení pro zvýšení počtu cyklů [1].....	9
Tab. 8 – Porovnání 3D tisku se vstřikováním do kovové a 3D tištěné formy [1]	10
Tab. 9 – Parametry při testování dílu IPC [1].....	11

Firma	Díl	3D tiskárna	3D tiskový plast	Další posprocesing (kromě omytí a sušení)	Vstříkolis	Vstříkovaný plast	Vstříkovací teplota [°C]	Uzavírací síla [t]	Vstříkovací tlak [bar]	Způsob chlazení	Způsob vyhození	Čas cyklu [s]	Počet cyklů na formu
Multiplus	Pouzdro hřídele	F. 3	R. 10K	Obráběno	Babyplast 10/12	ABS	220	10	95	Stlač. vzduch	Vyhazovači	160	60+
HoliMaker	Pouzdro hřídele	F. 3	G. P.	Broušeno	HoliPress	ASA	240	NA	NA	Bez	Ručně	120	70
Novus Applications	Uzávěr se závitem	F. 3	R. 10K	Obráběno	Sumitomo 50 Ton	HDPE	204	30	496	Bez	Ručně	68	100
Shoptbotix	Pouzdro hřídele	F. 3	H. T.	Broušeno	Micromolder	HDPE	250	1,2	NA	Bez	Vyhazovači	200	100+
HoliMaker	Obroučky brýlí	F. 3	G. P.	Broušeno	HoliPress	PA	240	NA	NA	Bez	Ručně	120	70
HoliMaker	Špunty na kopačky	F. 3	G. P.	Broušeno	HoliPress	PA 6,6	270	NA	NA	Bez	Ručně	120	12
Multiplus	Pouzdro elektroniky	F. 3	R. 10K	Obráběno	Babyplast 10/12	PC	260	10	110	Stlač. vzduch	Vyhazovači	180	4
Multiplus	Pouzdro elektroniky	F. 3	R. 10K	Obráběno	Babyplast 10/12	PC-ABS	240	10	95	Stlač. vzduch	Vyhazovači	160	60+
HoliMaker	Špunty na kopačky	F. 3	G. P.	Broušeno	HoliPress	POM	180	NA	NA	Bez	Ručně	120	60+
Braskem	Držák roušky	F. 3	H. T.	Broušeno	Cincinnati Milacron 110 Ton Roboshot	PP	230	5	345	Kanálky	Ručně	30	1500
HoliMaker	Špunty na kopačky	F. 3	G. P.	Broušeno	HoliPress	PP	210	NA	NA	Bez	Ručně	120	60+
IPC	Testovací díl	F. 3	H. T.	Obráběno	Engel 150T	PP	200	12,5	180	Bez	Vyhazovači	150	90
IPC	Testovací díl	F. 3	R. 10K	Obráběno	Engel 150T	PP	200	12,5	180	Bez	Vyhazovači	150	1000
Moraine Park Technical College	Forma na vaření	F. 3L	R. 10K	Ručně vyroben vtok	Mitsubishi 90 Ton	PP	225	10	200	Bez	Vyhazovači	180	50+
Multiplus	Pouzdro elektroniky	F. 3	R. 10K	Obráběno	Babyplast 10/12	PP	180	10	60	Stlač. vzduch	Vyhazovači	160	100+
Novus Applications	Uzávěr se závitem	F. 3	R. 10K	Obráběno	Sumitomo 50 Ton	PP	19	30	469	Bez	Ručně	48	100
Novus Applications	Uzávěr se závitem	F. 3	R. 10K	Obráběno	Sumitomo 50 Ton	PP	21	30	655	Bez	Ručně	50	100
3D Strong	Část testu objektivu	F. 3	H. T.	Obráběno	NA	PP	23	NA	35	Stlač. vzduch	Ručně	51	150
Glassboard	Pevná trubka	F. 2	R. 10K	Leštěno	LNS Technologies Model 150A	PP	215	NA	NA	Bez	Ručně	300	9+
HoliMaker	Klip štítu na obličej	F. 3	G. P.	Broušeno	HoliPress	PP – potravina	220	NA	NA	Bez	Ručně	120	100
Bedal NV	Katetr	F. 3	H. T.	Bez	Galomb inc B-100	TPE	218	NA	NA	Bez	Ručně	120	20+
Bedal NV	Katetr	F. 3	R. 10K	Bez	Galomb inc B-100	TPE	218	NA	NA	Bez	Ručně	120	30+
Glassboard	Elastomerová koncovka	F. 2	R. 10K	Leštěno	LNS Technologies Model 150A	TPU Pellethane 55D	20	NA	NA	Bez	Ručně	300	10+
Glassboard	Elastomerová koncovka	F. 2	R. 10K	Leštěno	LNS Technologies Model 150A	TPU Pellethane 55D	204	NA	NA	Bez	Ručně	300	12+
Prototyping Tech	Držák kamery - 2 kavit	F. 3	R. 10K	Tryskání, leptání, broušení	Morgan Press	TPU Pellethane 95A	205	275	275	Bez	Ručně	180	100+
Prototyping Tech	Držák kamery - 2 kavit	F. 3	H. T.	Tryskání, leptání, broušení	Morgan Press	TPU Pellethane 95A	205	275	275	Bez	Ručně	180	100+

Tab. 1 – Přehled firem a jejich poznatků se vstříkáváním do 3D tištěných plastových vložek [1]

Vysvětlivky k Tab. 1.

3D tiskárna	3D tiskový materiál
F. 2 Form 2	G. P. Grey Pro
F. 3 Form 3	R. 10K Rigid 10K
F. 2L Form 3L	H. T. High Temp

Ostatní

60+ Zákazník zastavil vstřikování po 60 cyklech, ačkoliv forma byla schopna ve vstřikování pokračovat

Chlazení formy během fáze plnění, dotlaku a chlazení zajišťují chladicí kanálky. Po vyhození vstřikovaného dílu a otevření formy dochází ochlazování přes dělicí rovinu. Forma se ochladí okolním vzduchem nebo je chlazení urychlováno stlačeným vzduchem.

1 3D tiskárny

Firmy spolupracující s Formlabs Inc. pro výrobu 3D tištěných vložek používaly 3D tiskárny zobrazené na Obr. 1. Vanička je umístěna ve spodní části 3D tiskárny. Na podložce 3D tiskáren jsou vidět různé 3D tištěné díly. Ochranný kryt je v oranžovém provedení typickém pro 3D tiskárny Formlabs Inc.



Obr. 1 – 3D tiskárny Formlabs [2]

Nejstarší z 3D tiskáren na Obr. 1 je Form 2, která byla uvedena na trh roku 2015. Jako jediná používá metodu SLA. 3D tiskárny Form 3 a Form 3L byly na trh uvedeny roku 2019 a využívají metodu LFS. V kapitole 3D tisk – Metody 3D tisku – Fotopolymerizace je popsána metoda SLA i vylepšená metoda LFS, která dovoluje 3D tisk objemnějších dílů. Z tohoto důvodu není levnější 3D tiskárna Form 2 spolupracujícími firmy příliš používaná, viz Tab. 1. Rozdíl 3D tiskového prostoru Form 3L oproti Form 3 je více jak dvojnásobný. Písmeno L znamená velký (large). SLA 3D tiskárna Form 2 tiskne oproti LFS 3D tiskárnám hůře detaily. Minimální výšku vrstvy mají všechny 3D tiskárny na Obr. 1 stejnou, 0,025 mm. Pro postprocessing je potřeba dvou zařízení zobrazených na Obr. 2. Ve Form Wash probíhá mytí a ve Form Cure je díl vytvrzen působením tepla [2].



Obr. 2 – Posprocessingová zařízení Formlabs [2]

2 3D tiskový plast

V kapitole 3D tisk – Metody 3D tisku – Fotopolymerizace jsou popsány podmínky kladené na 3D tiskový plast metodou fotopolymerizace. Formlabs označuje 3D tiskové plasty svými komerčními názvy. Pro rychlý výběr vhodného 3D tiskového plastu jsou nápomocny různé grafy, ve kterých jsou zobrazeny vlastnosti nabízených plastů a relativně porovnány. Pro získání konkrétních hodnot je nutné použít detailnější materiálové listy. Spolupracující firmy pro 3D tisk vstřikovacích vložek vybíraly následující pryskyřice.

Rigid 10K Resin

Rigid 10K Resin je plast speciálně vyvinut pro 3D tisk vstřikovacích vložek. Dobře kombinuje pevnost, tuhost a tepelnou odolnost. Tím vstřikovací vložka zachovává svůj tvar pod tlakem i za působení tepla. Rigid 10K Resin je plněn sklem. Modul pružnosti v tahu je 10 000 MPa. Teplota průhybu při zatížení 0,45 MPa, stanovená metodou dle ISO 75/B, je 218 °C [3].

High Temp Resin

High Temp Resin je alternativou k Rigid 10K Resin. Nabízí nejlepší tepelnou odolnost a odvod tepla, jenž je důležitou vlastností pro chlazení vložky. Nevýhodou je vysoká křehkost, která nedovoluje plast vystavit stejným vstřikovacím tlakům a uzavíracím silám jako Rigid 10K Resin. Při 3D tisku složitějších tvarů nastává kroucení a praskání 3D tištěných dílů. Teplota průhybu při zatížení 0,45 MPa, stanovená metodou dle ISO 75/B, je 238 °C [3].

Grey Pro Resin

Jedná se o univerzální plast. Oproti předchozím plastům má nejnižší tepelnou vodivost. Výhodou je velká houževnatost.

Porovnání

V Tab. 2 je uvedeno relativní srovnání plastů používaných pro 3D tisk vstřikovacích vložek. Pro srovnání byla použita barevná výplň. Zeleně je označeno nejlepší umístění, následuje oranžově a nejhorší umístění je zobrazeno červenou barvou.

	Zachování tvaru při zatížení		Přesnost	Životnost	Cena
	tlakem	teplem			
Rigid 10K Resin	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red
High Temp Resin	Yellow	Green	Green	Red	Yellow
Grey Pro Resin	Red	Red	Red	Green	Green

Tab. 2 – Porovnání 3D tiskových materiálů Formlabs doporučených pro 3D tisk vstřikovacích vložek

Vlastnosti uvedené v Tab. 2 byly vybrány jako rozhodující pro 3D tisk vstřikovací vložky. Nejlepší vlastnosti má High Temp Resin. Grey Pro Resin je sice nejlevnější a má nejlepší životnost, ale ta je způsobena schopností plastu se deformovat bez přerušení v malém rozsahu.

Nejvíce používaným plastem, dle Tab. 1 je Rigid 10K Resin. Plast vyniká nejlepší odolností v tlaku při zachování tvaru. I když má High Temp Resin lepší přesnost po 3D vytištění. Po cyklickém namáhání vložky je důležitá přesnost, nejen po prvních cyklech.

3 Spolupracující firmy a institut

V následující části budou představeny spolupracující firmy a jejich zkušenosti. Na závěr budou představeny výsledky z výzkumu Francouzského průmyslového technického centra pro plasty. Vzhledem k rychle se rozvíjícímu zájmu firem o vstřikování do 3D tištěných plastových vložek není seznam úplný.

3.1 MultiPlus

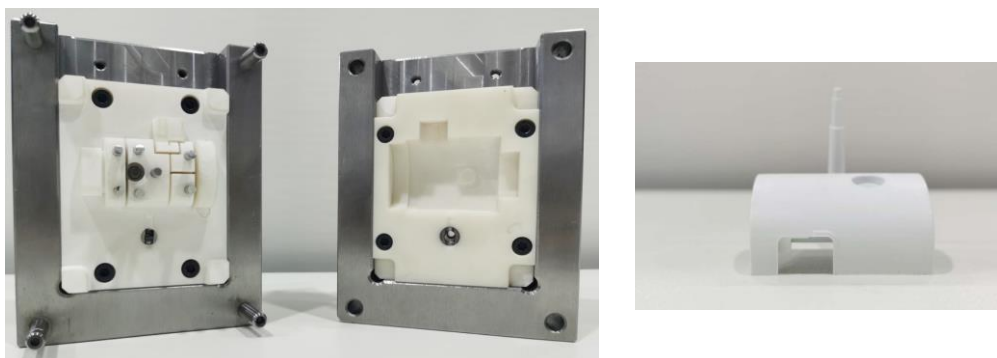
Roku 2001 Čína vstupuje do světové obchodní organizace (WTO). V následujících letech se stává světovým výrobcem. V Číně se začínají zakládat firmy, především v oblasti delty Perlové řeky, kde se nachází město Šen-čen, kde v roce 2005 byla založena firma MultiPlus. Zpočátku MultiPlus nabízel vstřikování malých dílů. V současné době MultiPlus nabízí veškeré služby spojené se vstřikováním od konstrukce po výrobu. I nadále však nabízí vstřikování malých dílů. Ve snaze snížit výrobní náklady se MultiPlus rozhodl pro 3D tisk vstřikovacích forem. Pro tento krok si vybral 3D tiskárny od firmy Formlabs, které jsou vidět na Obr. 3 vpravo. Napravo od 3D tiskáren jsou na stole zařízení pro postprocessing [1].



Obr. 3 – Vstřikování do 3D tištěných plastových vložek ve firmě MultiPlus [4]

Na Obr. 3 vlevo jsou vidět dva vstřikolisy Babyplast od italské firmy Rambaldi+Co I.T. s.r.l. MultiPlus používá verze Babyplast 10/12 Standard. Při porovnání vstřikolisu Babyplast s obsluhou na Obr. 3 je vidět, že se jedná o malé vstřikovací lisy vhodné pro vstřikování malých dílů.

Řešení vstřikovací formy je vidět na Obr. 4 vlevo a vstřikovaný díl je zobrazen na Obr. 4 vpravo. Vzhledem k malým upínacím rozměrům Babyplastu je forma jednonásobná.



Obr. 4 – MultiPlus – Forma s 3D tištěnou plastovou vložkou a výstřik – Pouzdro elektroniky [4], [1]

Vstřikovací forma je tvořena rámem a vstřikovací vložkou (na Obr. 4 bíle). Kromě držení funkčních částí rám vykonává funkci vedení a středění pohybujících se částí formy. V pevné části formy (vlevo) jsou v rozích umístěny vodící sloupky a v pohyblivé části (vpravo) jsou pro ně připravené otvory. Ostatní požadavky na vstřikovací formu zajišťuje vložka. Spojení vložky s rámem je pomocí čtyř šroubů. Rozvod taveniny je řešen přímým vtokem. Dle Tab. 1 MultiPlus chladí formu stlačeným vzduchem. Dále MultiPlus udává, že finálního tvaru vložky je docíleno obráběním [1].

MultiPlus používá plast pro 3D tisk vložky High Temp Resin, častěji však Rigid 10K Resin. Hlavním důvodem je životnost vložky. Jelikož MultiPlus nejčastěji vstřikuje plasty PP, ABS a PC-ABS, je plast Rigid 10K Resin dostačující, znázorněno v Tab. 3. Kromě vstřikování PC je životnost vložky 3D vytištěné z Rigid 10K

Resin přibližně 100 cyklů. Při použití ABS a PC-ABS byl požadovaný počet cyklů 60. Pro zajištění kvality vstřikovaných dílů MultiPlus do vložky nevstřikuje nikdy více jak 100krát. Při 3D tisknutí z plastu High Temp Resin je životnost vložky přibližně 10 až 20 cyklů [1].

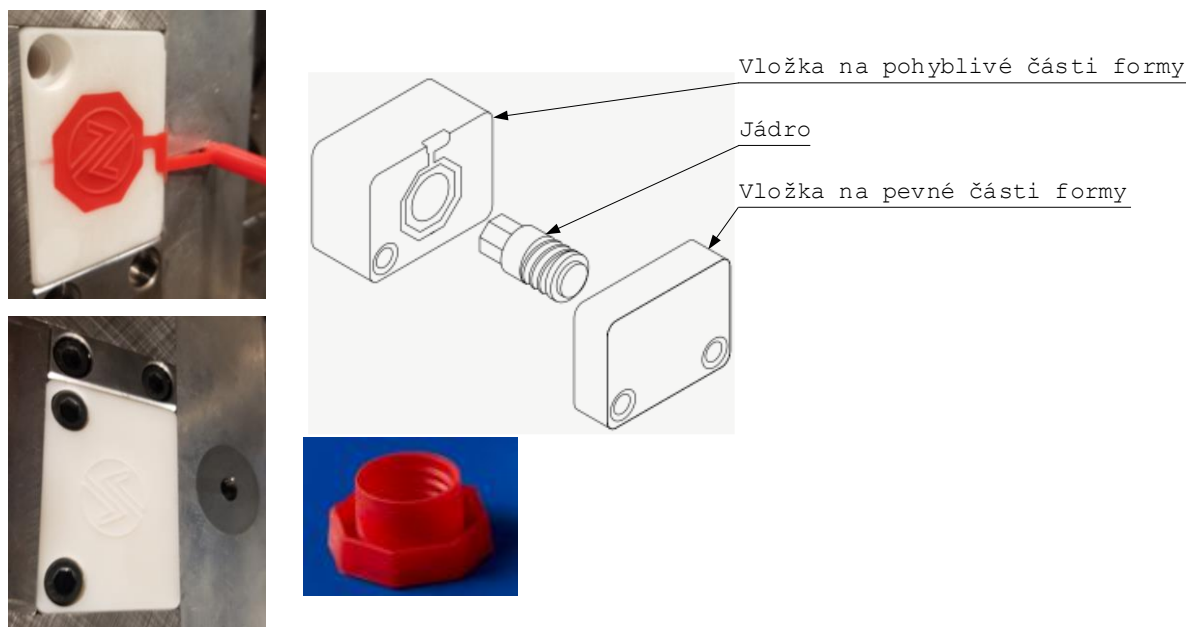
	PP	ABS	PC-ABS	PC
Vstřikovací teplota [°C]	180	220	240	260
Vstřikovací objem [cm ³]	36	39	37	40
Čas chladnutí [s]	80	60	50	90
Vstřikovací tlak [bar]	60	95	95	110
Uzavírací síla [bar]	35	30	25	80
Počet cyklů [-]	100+	60+	60+	4

Tab. 3 – Přehled parametrů pro vstřikované plasty [1]

Využití 3D tisku pro výrobu vstřikovací formy v MultiPlastu shrnuje generální manažer Kevin Li následovně: "Díky tomu, že máme Form 3 v naší továrně, je náš proces výroby forem mnohem svižnější a Rigid 10K Resin je jednou z nejlepších pryskyřic, které jsme dosud pro vstřikování používali. Nyní jsme schopni reagovat na požadavky zákazníků mnohem rychleji" [1].

3.2 Novus Applications

Americká firma Novus Applications, LLC zabývající se konstrukcí a výrobou vstřikovacích forem se zabývala možností využití 3D tisku pro výrobu vstřikovacích forem. Zpočátku k výrobě vstřikovacích forem používala technologii FDM. Z důvodu kvality 3D výtisku od této metody ustoupila. Mnohem kvalitnější byly výtisky z SLA 3D tiskáren. Pro tyto účely zvolil Novus Applications 3D tiskárny Form. K výrobě vstřikovací formy 3D tiskem používá doporučený plast Rigid 10K Resin. Své zkušenosti s využitím 3D tisku prezentuje na uzávěru se závitem, vstřikovaný díl v červeném provedení je vidět na Obr. 5 dole. Uzávěr lze použít jak pro trubky, tak pro lahve. Vstřikování uzávěru je složitější. Forma se skládá kromě pevné a pohyblivé části ještě z jádra, viz Obr. 5 a popis vpravo. Na jádru je vyrobený závit. Po vystříknutí se jádro z formy vyšroubuje [1].



Obr. 5 – Novus Applications – Uzávěr se závitem [1]

Konstrukce vstřikovací formy je opět rozdělená na vložku a rám, viz Obr. 5 vlevo nahoře pohyblivá a dole pevná část formy. Vstřikovací forma není chlazená chladicími kanálky. Jelikož plast je tepelný izolant a teplo přes něj vede velmi pomalu, je vzdálenost vložky k hliníkovému rámu co nejmenší. Vstřikovací vložka je po 3D vytištění za účelem přesnosti obráběna.

Uzávěr se závitem je náročnější na výrobu. Novus Applications jej zkoušel vstřikovat třemi plasty, které mezi sebou porovnával. Prvně zvoleným je PP, který byl testován pro různé stupně viskozity. Méně

viskózní PP nese označení P5M6K-048 Red a je červené barvy. Větší viskozitu má PP1013H1 White, který je bílé barvy. Rozdíl ve viskozitě je nepřímě popsán indexem toku taveniny uvedeném pro oba PP v Tab. 4. Dalším druhem plastu je PE s označením Marlex 9018 HDPE.

Vlastnosti vstřikovaných plastů, především index toku taveniny, ovlivnily ostatní parametry vstřikování. V Tab. 4 jsou uvedené parametry, které dosahovaly nejlepších výsledků při vstřikování.

	P5M6K-048 Red	PP1013H1 White	Marlex 9018 HDPE
Index toku taveniny MFR [g/10min]	35	7,5	20
Vstřikovač teplota [°C]	199	210	204
Vstřikovací tlak [bar]	469	655	496
Čas cyklu[s]	48	50	68
Počet cyklů [-]	30	30	30

Tab. 4 – Novus Applications – Parametry vstřikování pro testované plasty [1]

Pro parametry vstřikování uvedené v Tab. 4 byla provedena analýza životnosti vložky. Smyslem analýzy bylo zjistit, jak rozměry vložky odolávají působení tepla a tlaku při vstřikování. Životnost se posuzovala na rozměrové stálosti malého průměru závitů. Po každém cyklu bylo provedeno měření. Odchylka oproti původnímu rozměru byla zanesena do Tab. 5.

Vstřikovaný plast	P5M6K-048 Red	PP1013H1 White	Marlex 9018 HDPE
Průměrná hodnota [mm]	13,072	13,207	13,134
Počet cyklů	Odchylka [mm]	Odchylka [mm]	Odchylka [mm]
1	0,009	0,052	- 0,003
2	0,06	0,027	0,047
3	0,034	0,001	- 0,053
4	0,136	0,027	0,099
5	0,009	- 0,024	0,074
6	- 0,017	- 0,024	- 0,003
7	- 0,017	- 0,1	- 0,028
8	- 0,042	0,052	- 0,028
9	- 0,042	- 0,05	- 0,003
10	0,009	- 0,075	- 0,023
11	0,009	- 0,103	- 0,028
12	- 0,067	0,027	- 0,028
13	0,009	- 0,024	0,047
14	- 0,042	- 0,024	0,048
15	0,085	0,077	- 0,053
16	0,009	0,052	- 0,028
17	- 0,042	- 0,05	- 0,053
18	- 0,067	- 0,075	0,023
19	0,009	0,052	- 0,003
20	- 0,042	- 0,024	- 0,053
Průměrná odchylka	0,038	0,047	0,036

Tab. 5 – Novus Applications – Vyhodnocení geometrické stálosti vstřikovaných plastů na díle [1]

Průměrná odchylka v Tab. 5 malého průměru matice pro všechny tři vstřikované plasty je minimální. Rozměrová stálost vložky se po 20 cyklech téměř nezměnila.

Výroba 3D tištěné plastové vstřikovací vložky oproti vložce vyrobené z oceli, hliníku atd. prodlužuje dobu vstřikovacího cyklu. Především je zapotřebí více času pro zchlazení. Dále s ohledem na pevnost plastu musí být vstřikovací rychlost a tlak nižší. Oproti tomu Novus Applications odhaduje při použití 3D tištěné vstřikovací vložky snížení nákladů o více jak 50%. Doba pro realizaci projektu Novus Applications popisuje: „Formu navrhne během několika hodin. Přes noc ji vytiskneme. Následující den dopoledne připravujeme formu a odpoledne vstřikujeme.“ Zakladatel a ředitel společnosti Mark Bartlett popisuje použití 3D tištěných plastových vložek pro vstřikování následovně: "Pokud náš zákazník potřebuje vstřikovat pouze 20 dílů, proč bych potřeboval hliníkovou formu? Díky technologii 3D tisku je doba od návrhu k výrobě mnohem rychlejší. Konkrétně díky 3D tiskárně Form 3 je 3D tisk téměř bezobsluhový" [1].

3.3 HoliMaker

Cílem francouzské firmy HoliMaker je zpřístupnit vstřikování malých dílů pro výrobu prototypů nebo malých sérií. K tomu používá, ale i nabízí, své ruční vstřikovací lisy pod označením HoliPress. Jedná se o stolní vstřikolisy, snadné na údržbu, vhodné pro výrobu malého počtu vstřikovaných dílů. Porovnání ručního vstřikolisu Holipress vůči 3D tiskárně Form 3 je na Obr. 6 [1].




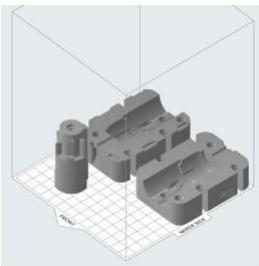
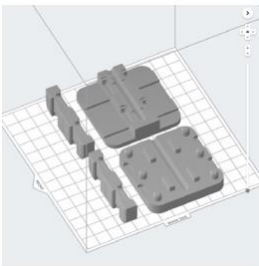
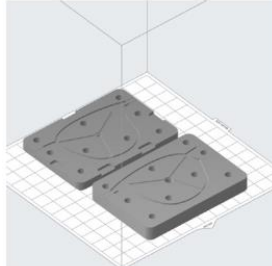


Obr. 6 – HoliMaker – Příslušenství pro využití 3D tištěných plastových vložek [1]

V současné době firma HoliMaker vstřikuje do 3D tištěných vložek 80 až 90 % svých projektů. Ředitel HoliMaker Aurélien Stoky říká „Často navrhujeme formu ráno, přes den ji vytiskneme a odpoledne můžeme testovat vstřikování, abychom upravili návrh a přes noc zahájili druhý tisk. Při tradiční metodě bychom museli formu znova obrábět, což by trvalo týdny“. Kromě řady doporučení HoliMaker prezentuje své poznatky v různých studiích [1].

Vstřikovací forma je řešena podobně jako u firmy MultiPlus, viz Obr. 4. Pro konstrukci vložky HoliMaker doporučuje dodržovat obecná doporučení pro konstrukci vstřikovacích forem. Pro odvod vzduchu HoliMaker doporučuje otvory o velikosti 0,1 až 0,5 mm. Aby se ostré hrany vložek vzájemně do sebe neobtiskly, použít zkosení. Tloušťku vložky cca 10 mm. Tloušťky 1 až 2 mm nevydrží působení teploty, 3D tisk přímo na podložku. Kromě nepoužití podpor se zlepší přesnost 3D tisku. Případná odchylka je v kolmém směru a je snadno předvídatelná. HoliMaker používá pro výrobu kvalitnější vložky Rigid 10K Resin a pro vstřikování více dílů Grey Pro Resin. Přesnost vložek vůči rámu je dosažena broušením. Podle počtu vstřikovaných dílů nejen, že doporučuje použití různých plastů vložek, ale i různé vstřikovací plasty. Pro vstřikování do cca 10 kusů je vhodný PA vstřikovaný při teplotě 270 °C. Pro vstřikování do cca 100 kusů PP, TPE nebo POM vstřikovaný při nižších teplotách [1].

Jedna z prezentovaných studií je shrnuta v Tab. 6. Studie prezentuje tři různé výrobky vstřikované do 3D tištěných plastových vložek. Uvedeny jsou základní údaje o vstřikování, 3D tisku vložek a dosažených výsledků.

Výrobek	Konektor ventilu	Klip pro obličejový štít	Obroučky brýlí
			
Orientace dílu při 3D tisku			

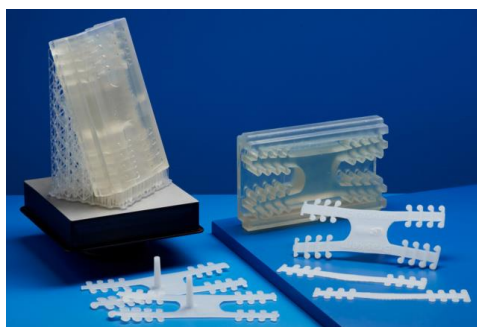
Účel vstřikování	Vytvoření prototypu za účelem provedení zkoušek odolnosti vůči tlaku vody	Testování návrhu před sériovou výrobou 10 000 kusů	Testování kompatibilních plastů pro výrobu série o velikosti 200 kusů
Plast vložky	Rigid 10K Resin	Grey Pro Resin	Grey Pro Resin
Vstřikovaný plast	POM (190°C), PA6 15% (190°C) GF (280°C)	PP (potravinářský, 220 °C)	ASA (240°C), PA (240°C)
Počet cyklů na vložku	12+	100	70
Čas cyklu	5 min.	2 min.	2 min.
Doba projektování	2 týdny	1 týden	2 týdny

Tab. 6 – Výsledky firmy HoliMaker při vstřikování do 3D tištěných plastových vložek [1]

Pro zkrácení doby cyklu se HoliMaker věnuje možnostem chlazení 3D tištěné vstřikovací vložky.

3.4 Braskem

Vstřikování do 3D tištěných vložek se také zabývala brazilská petrochemická společnost Braskem S.A. Jedná se o největší petrochemickou společnost v Latinské Americe. Do problematiky vstřikování do 3D tištěných vložek vložila své bohaté zkušenosti z petrochemického oboru. Při pandemii COVID-19 nastala náhle potřeba velkého množství roušek. Roušky bylo potřeba během krátké doby distribuovat zaměstnancům společnosti Braskem. Správné nasazení roušky je za držák, nikoliv za uši. Pro výrobu držáků Braskem zvažoval možnosti 3D tisku metodou FDM, nebo vstřikování do hliníkové formy. Zároveň byla možnost držáky vstřikovat do 3D vytištěných plastových vložek. Držák roušky je vidět na Obr. 5 vpravo [1].



Obr. 7 – Braskem – Držák roušky [4]

Na Obr. 5 vpravo je vidět konstrukce vstřikovací formy. Dutina vstřikovací formy je vyrobena do vložky pohyblivé části formy. V pevné části formy je jen přímý vtok. Vstřikovací vložka je vyrobena z plastu High Temp Resin na 3D tiskárně Form 3. Poloha vložky při 3D tisku vůči podložce je vidět na Obr. 5 vlevo. Výška vrstvy je, nejmenší možná, 0,05 mm. Spolu s rámem formy byla vložka přebroušena a zarovnána do roviny [1].

Pro vstřikování byl zvolen plně elektrický vstřikolis horizontálního provedení Roboshot 165 od americké firmy Milacron. Vstřikovací rychlost byla nastavena 12,7 mm/s. Uzavírací tlak byl 345 bar.

Pro lepší zatečení plastu do formy, nutnosti menších vstřikovacích tlaků byl vybrán PP. Vstřikovací teplota byla 230°C.

Vstřikování probíhala pro 3 různé verze vstřikovací vložky. Cílem testování bylo uskutečnit co nejvíce cyklů, vyrobit co nejvíce dílů, na jednu vložku. Úpravy verzí a výsledky jsou shrnuty do Tab. 7.

	Verze 1	Verze 2	Verze 3
Úprava	Zvětšit úhel podkosů	Zvětšit úhel podkosů Zvětšení vtoku	Zvětšit úhel podkosů Zvětšení vtoku Zvětšeno odvzdušnění V některých místech zmenšen průřez
Výsledek	500 cyklů	1500 cyklů	2500 cyklů Zmírnění přetoků 28% úspora plastu při 3D tisku

Tab. 7 – Doporučení pro zvýšení počtu cyklů [1]

Použití k výrobě držáků roušek vstřikováním do 3D tištěných vložek se společností Braskem vyplatilo. Náklady a čas na výrobu jsou uvedeny v Tab. 8. Dále je v Tab. 8 porovnáno vstřikování do kovové a 3D tištěné vložky s 3D tiskem metodou FDM. Při náhlém požadavku vyrobit velké množství držáků roušek byl FDM 3D tisk zprvu velmi zvažován.

	3D tisk	Vstřikování do formy	
		kovové	3D tištěné z plastu
Doba výroby formy	0	30 dní	1 den
Náklady na výrobu formy	0	250 000 až 375 000 Kč	5 000 Kč
Celková doba realizace projektu pro 8 000 kusů	72 dní	32 dní	3 dni
Náklady na projekt	52 000 Kč	254 000 až 379 000 Kč	9 000 Kč

Tab. 8 – Porovnání 3D tisku se vstřikováním do kovové a 3D tištěné formy [1]

3.5 Ostatní firmy

Spolupracujících firem s Formlabs je více. Jejich studie nejsou moc prezentovány, nebo se překrývají s poznatky uvedenými výše. Na Obr. 8 jsou zobrazeny jen vstřikované díly.



Shoptbotix – Pouzdro na hřídel



Glassboard – Elastomerová koncovka



Prototyping Tech – Držák kamery - 6 kavit

Obr. 8 – Vstřikované díly ostatních spolupracujících firem [4]

3.6 The French Industrial Technical Center for Plastics and Composites (IPC)

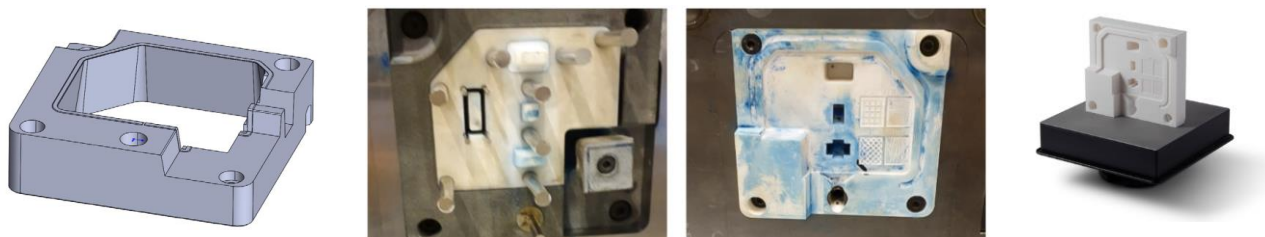
Francouzské průmyslové technické centrum pro plasty a kompozity provedlo výzkum s cílem vyhodnotit využitelnost 3D tištěných vložek pro vstřikování. Svůj výzkum začalo nalezením nejvhodnějšího plastu pro výrobu vstřikovacích vložek. Došli k závěru, že vysoké přesnosti a hladkosti povrchu se nejlépe docílí použitím plastu na bázi pryskyřice. Polotovár plastu na bázi pryskyřice je 3D tištěn na 3D tiskárnách využívající metodu fotopolymeryzace. Pro 3D tisk IPC vybrala 3D tiskárny Form [1].

Pro 3D tisk IPC doporučuje následující nastavení. Zvolit nejmenší možnou vrstvu pro docílení co nejlepší hladkosti 3D výtisků. Umístit 3D tištěný díl nejlépe přímo na podložku 3D tiskárny pro zvýšení přesnosti a zabránění deformacím. Doporučení pro umístění 3D výtisku je aplikováno na vstřikovací vložce na Obr. 9 vpravo. Pokud není možné umístit díl přímo na podložku 3D tiskárny, na plochu, je doporučeno orientovat následovně s použitím podpor. Orientovat tak, aby se minimalizovalo množství převislých částí 3D tištěného dílu. Zároveň tak, aby obě části forem byly orientovány stejně s ohledem na jejich případné prodloužení při 3D tisku. Tím případné proplouzení ponechat v jednom směru. Při návrhu 3D tištěného dílu je doporučeno se vyhýbat drobným částem. Především omezit jakýkoliv výstupek tak, aby jeho výška nebyla delší než průřez. Velikost 3D tištěného dílu by neměla v jednom směru přesahovat 400 mm. Pro větší vzdálenost není zajištěna vyhovující přesnost, především detailů dílu [1].

Po 3D vytištění je doporučeno formu obrobit. Při návrhu formy je nutné zahrnout přídavky pro obrábění. Hlavní důraz je kladen na přesnost 3D výtisku v dělicí rovině a tím zabránění tvorbě přetoků. Doporučená přesnost rozměrů zasahující do dělicí roviny je 0,02 mm. Zároveň zaručit dostatečnou rovinnost. Otvory mají tendenci se při 3D tisku deformovat. Záleží-li na válcovitosti otvoru, je doporučeno díru převrtat. Obrábění je velmi citlivou operací, protože 3D výtisky z pryskyřice jsou křehké a hrozí jejich odlamování, či zlomení [1].

3D tištěná forma může být poškozena jak při obrábění, tak při samotném vstřikování, proto je doporučeno 3D tisknout více kusů. Tím je k dispozici náhradní kus v případě poškození [1].

Konstrukci vstřikovací formy IPC řešilo dvěma způsoby. U obou způsobů rozdělilo formu na rám a vložku. Rám zajišťuje držení funkčních částí, dále pak vedení a středění pohybujících se částí formy. Pohled do dělicí roviny formy je vidět na obrázcích uprostřed na Obr. 9.



Obr. 9 – IPC – Testovací díl [1]

První řešení se nijak neliší od ostatních používaných jinými firmami využívajících 3D tisk pro výrobu vstřikovacích forem. Vložka je spojená s rámem a ve spodní části se opírá o rám, aby nedoházelo k jejímu prohýbání či zlomení vlivem působení upínacích sil. Druhé řešení má navíc rámeček, model rámečku je vidět na Obr. 9. vlevo. Rámeček je také vyroben na 3D tiskárnách Form, ale metodou SLS. Materiál rámečku je plast PA 12, který je měkčí než plast na bázi pryskyřice, a proto je vhodný pro kompenzaci nerovností v dělicí rovině. Na Obr. 9. vlevo je vidět, že kolem vnitřního prostoru je pro tyto účely navíc modelován výstupek. Při zavření formy dochází k deformaci rámečku z PA 12, především výstupku a tím je bráněno přetoku. Avšak po více cyklech, cca 900, docházelo přetékání plastu. Vstřikovaný plast byl modré barvy. Při pohledu do dělicí roviny, Obr. 9 uprostřed vpravo, je vidět přetékání vstřikovaného plastu. Důvod, proč nepoužívá IPC PA 12 a metodu SLS pro výrobu vložky je velká drsnost povrchu vložky a tavení PA 12 při vysokých teplotách [1].

Výběr vhodného plastu na bázi pryskyřice pro vstřikovací vložku IPC testovalo při podmínkách uvedených v Tab. 9.

Parametr	Hodnota
Vstřikolis	Engel 150T
Vstřikovaný plast	PP
Vstřikovací teplota [°C]	200
Teplota formy pro další cyklus [°C] (kontrolováno termokamerou)	36
Vstřikovací tlak [bar]	180
Uzavírací síla [KN]	125
Použití separačního spreje	žádné
Čas cyklu [s]	150

Tab. 9 – Parametry při testování dílu IPC [1]

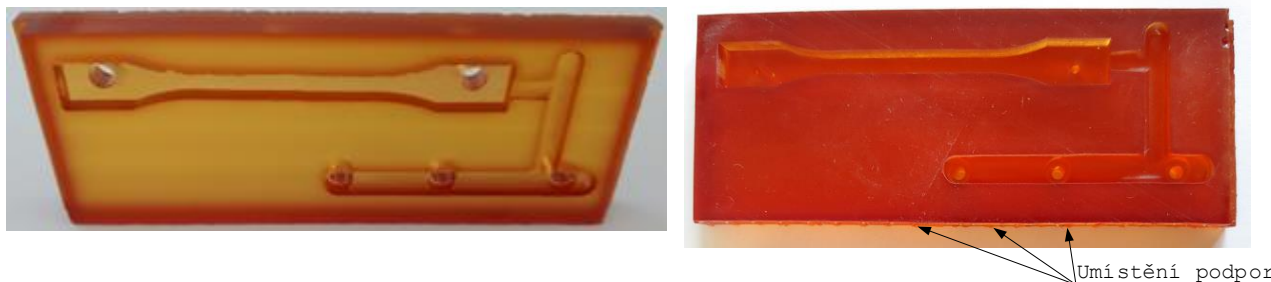
IPC doporučuje použití Rigid 10K Resin než High Temp Resin. Při použití Rigid 10K Resin dosahovala životnost vložky v řádu 100 kusů, zato vložka 3D vytištěná z High Temp Resin se po 31 cyklech rozlomila. Pro High Temp Resin IPC používalo první řešení formy a pro Rigid 10K Resin řešení s rámečkem PA 12, který je vidět i při pohledu do dělicí roviny na Obr. 9 uprostřed. Obě navržená řešení se osvědčila a řešení s rámečkem je vhodnější pro větší rozměrové nepřesnosti [1].

Pro vstřikování viskóznějších plastů, jakým je např. PC při teplotě 240 °C, je doporučeno použít pro plast vložky High Temp Resin. Použité plasty, stejně jako plast obecně, jsou izolanty. IPC nedoporučuje použití chladících kanálků. Teplo při tuhnutí taveniny se odebrá přes vložku. Jelikož plast teplo izoluje je odebrání tepla přes vložku výrazně komplikované. V případě náročných konstrukcí vstřikovacích vložek chladící kanálky nepatrně zlepšují odvod tepla. Při nízké efektivitě chladících kanálků je na zvážení, jestli úsilí vynaložené do konstruování chladících kanálků bude přínosem [1].

Odhad úspor při použití 3D tištěné plastové vstřikovací vložky oproti použitím konvenčních kovů IPC odhaduje na 80 až 90 % [1].

4 Zkouška 3D tisku vstřikovacích vložek

Uvedené poznatky výše byly aplikovány na 3D tisk vstřikovacích vložek. S ohledem na mé možnosti byla zvolena 3D tiskárna Form 2. 3D tiskovými plasty byly High Temp Resin a Grey Pro Resin. Mytí a sušení vložek probíhalo podle doporučení Formlabs. Při 3D tisku High Temp Resin nastaly problémy s udržení se 3D tištěného dílu na podložce kvůli objemu vložky. Prvně byla vložka položena na podložku, po odtržení se od podložky byla vložka natočena. I přes pokusy různě natočit 3D tištěný díl, byl výsledek stejný a díl při 3D tisku se odlepoval od podložky. 3D tištěná vstřikovací vložka musela být zmenšena na objem 50 cm³. Vložka je vidět na Obr. 10. Vložka byla natočena tak, aby podpory spojovaly podložku s vložkou přes její podélnou stranou z boku. Na Obr. 10 vpravo jsou vidět zbytky odlomených podpor.



Obr. 10 – Vstřikovací vložka z High Temp Resin

Celkem byly 3D vytisknuty 2 stejné vložky. Na Obr. 10 je vidět problém s dosažením pravého úhlu a hrany jsou „potrhané“. To je způsobeno působením gravitační síly při 3D tisku. Tyto nepřesnosti musely být dalším opracováním napraveny, které značně komplikovala křehkost High Temp Resin. Nejlépe se osvědčilo broušení. Použití 3D tiskárny Form 2 místo 3D tiskáren třetí generace využívajících metodu LFS výrazně omezilo objem 3D tiskového dílu. Použití plastu High Temp Resin na 3D tiskárně Form 2 je vhodné pro 3D tisk malých objemů. Výhodnější bylo použití plastu Grey Pro Resin. Objem vložky byl přibližně stejný jako v předchozím případě. 3D tištěná vložka byla orientována podle doporučení Formlabs. Natočení dílu při 3D tisku je patrné na Obr. 11 na horní ploše vložky, kde jsou vidět stopy po vrstvách.



Obr. 11 – Vstřikovací vložka z Tough 1500

5 Použitá literatura

1. **Formlabs Inc.** Blog: Low-Volume Rapid Injection Molding With 3D Printed Molds. [Online] [Citace: 19. 10. 2022.] Dostupné z: <https://3d.formlabs.com/injection-molding/>.
2. —. Blogy Formlabs. [Online] [Citace: 17. 10. 2022.] Dostupné z: <https://formlabs.com/blog>.
3. —. *Blog: How to Use 3D Printing for Injection Molding.* [Online] Formlabs Inc. [Citace: 17. 7. 2022.] Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-for-injection-molding/>.
4. —. Info Sheet: Injection Molding with 3D Printed Molds Process Conditions. [Online] [Citace: 19. 10. 2022.] Dostupné z: <https://formlabs.com/blog>.

Příloha č. 2

**Vstřikování
do plastových vložek
tištěných
na 3D tiskárnách
Stratasys
metodou
tryskání materiálu**

Obsah

1	3D tiskárny	2
2	Konstrukce vstříkovacích forem	3
2.1	Doporučení pro návrh vložek	3
	Zkosení stěn	3
	Poloměry	3
	Dělicí rovina	3
	Uzavření výstupků vložky s protilehlou dutinou vložky	4
	Díry	4
2.2	Vtoková soustava	4
2.3	Ventilační systém	5
2.4	Temperanční (chladicí) systém	5
2.5	Vyhazovací systém	5
2.6	Doporučení pro 3D tisk	5
2.7	Postprocessing	6
3	Vstříkování	6
4	Spolupracující firmy	7
4.1	Diversified Plastics, Inc.	7
4.2	Worrell	7
4.3	Unilever	8
4.4	AST International GmbH (dříve Seuffer)	8
4.5	Grundfos	9
4.6	Whale	9
4.7	Promolding	10
5	Použitá literatura	10

Seznam obrázků

Obr. 1	– 3D tiskárna Objet500 Connex [1]	2
Obr. 2	– Závislost životnosti vložky na použité metodě výroby a vstříkovaném plastu [2]	2
Obr. 3	– Vstříkovací forma rozdělená na rám a vložku [1]	3
Obr. 4	– Doporučený úhel zkosení [1]	3
Obr. 5	– Doporučený přesah vložky nad dělicí rovnu [1]	3
Obr. 6	– Kontakt s uzavřenými prvky [1]	4
Obr. 7	– Napojení obráběného kovového kanálku na plastový 3D tištěný [1]	4
Obr. 8	– Připojení chlazení [1]	5
Obr. 9	– Vyhazovací systém – vyhazovače červeně [1]	5
Obr. 10	– Natočení vložky při 3D tisku s ohledem na proudění taveniny [1]	6
Obr. 11	– Chlazení dutiny vložky stlačeným vzduchem [1]	6
Obr. 12	– Diversified Plastics, Inc. – Zdravotnický prototyp [1]	7
Obr. 13	– Worrell – Zdravotnický prototyp [1]	7
Obr. 14	– Unilever – Držák vůně do záchodu [1]	8
Obr. 15	– AST International GmbH – Prototyp [1]	9
Obr. 16	– Grundfos – Část čerpadla [1]	9
Obr. 17	– Whale – Ukázka 3D tištěných vložek a vstříkovaných dílů [1]	9
Obr. 18	– Promolding – 3D tištěná pouzdra optických senzorů [1]	10
Obr. 19	– Promolding – Ukázka vstříkování do 3D tištěných plastových forem [4]	10

1 3D tiskárny

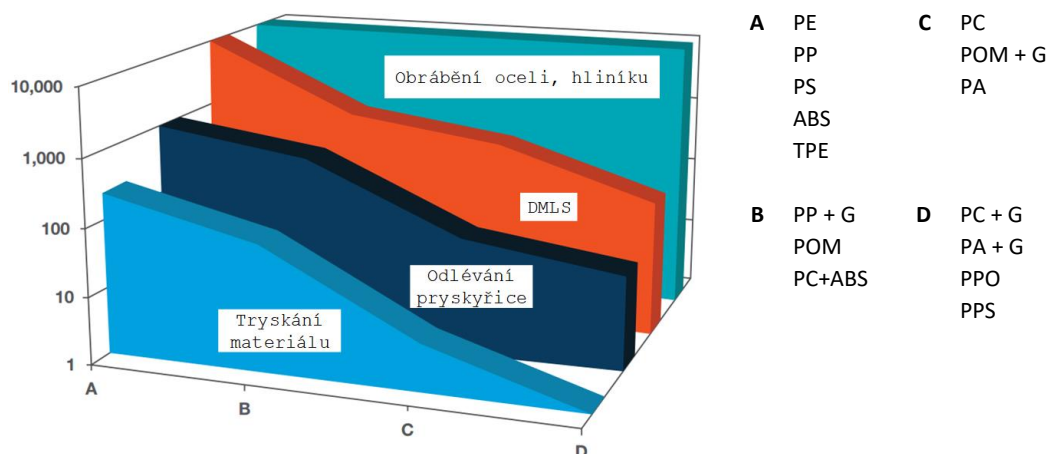
Princip 3D tisku využívající metodu MJ byl popsán V kapitole 3D tisk – Metody 3D tisku – Tryskání materiálu. Firma Stratasys Ltd. vyvíjí MJ pod svým označením PolyJet. Často jsou jejich 3D tiskárny označovány jako PolyJet 3D tiskárny a tiskový plast jako PolyJet plast. PolyJet 3D tiskáren jsou velmi přesné. Výška vrstvy může být až 0,014 mm. Stratasys Ltd. spolupracuje na vývoji 3D tištěných forem s mnoha firmami. Nejčastěji firmy pro 3D tisk forem volili PolyJet 3D tiskárny Objet500 Connex (viz Obr. 1), Objet500 Connex3 a Objet260 Connex [2].



Obr. 1 – 3D tiskárna Objet500 Connex [1]

Na výběr je mnoho PolyJet 3D tiskových plastů. Tekutý plast je dodáván v náplni, cartridge. Podle typu PolyJet 3D tiskárny je nabízen i příslušný tvar cartridge. Do zvolené PolyJet 3D tiskárny je pak možné vložit pouze podporovaný typ cartridge. Ne všechny plasty jsou distribuovány ve všech typech náplní. Zpravidla nový typ plastu podporují nové PolyJet 3D tiskárny. Nejčastěji spolupracující firmy 3D tiskly z upraveného ABS, označení Digital ABS, typicky zelené barvy.

Volba plastu formy závisí na vstřikovaném plastu. Doporučuje se vstřikovat plast s dobrou tekutostí, nízkou teplotou tání. Tím je se prodlužuje životnost vložky a zlepšuje kvalita dílů. Životnost plastové PolyJet formy v závislosti s ostatními metody výroby je ukázána na Obr. 2 [2].

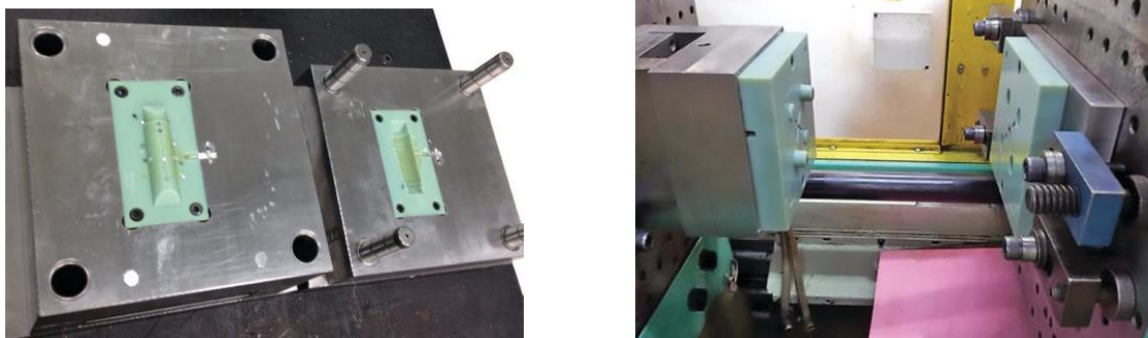


Obr. 2 – Závislost životnosti vložky na použité metodě výroby a vstřikovaném plastu [2]

Na Obr. 2 je životnost formy prezentována počtem cyklů do porušení, či viditelných vad na svislé ose. Vodorovnou osu tvoří 4 skupiny plastů Skupina A je nejvíce vhodná. Plasty mají dobré vlastnosti pro vstřikování jako nízký bod tání a dobrou viskozitu. + G na Obr. 2 znamená plast je plněn skelnými vlákny. Skelná vlákna v plastu fungují jako abrazivo, které při tečení plastu dutinou formy opotřebává povrch. Z tohoto důvodu jsou plasty, které mají v sobě skelná vlákna ve druhé skupině. Zároveň proto, že jejich teplota tání a viskozita je vyšší. Další skupiny plastů jsou méně vhodné pro vstřikování do plastových forem [2].

2 Konstrukce vstřikovacích forem

Podobně jako firmy využívající metodu fotopolymerizace pro vstřikování do plastových vložek, viz Příloha č. 1 i firmy využívající metodu tryskání pojiva rozdělily formu na rám a vložku. viz ukázka na Obr. 3.



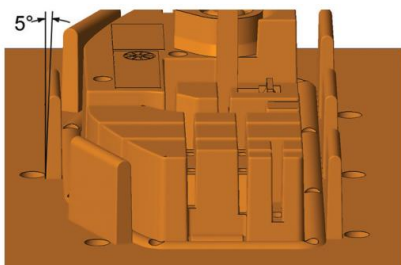
Obr. 3 – Vstřikovací forma rozdělená na rám a vložku [1]

Na Obr. 3 vlevo je vložka zapuštěná do rámu. Tento typ konstrukce je vhodný pro vložky z křehkého plastu. Druhou možností uložení vložky je na hlavní desku, jak je vidět na Obr. 3 vpravo. Tento typ konstrukce vyžaduje od plastu vložky jistou odolnost v tlaku, aby se vložka uzavíracími silami nerozdrtila.

2.1 Doporučení pro návrh vložek

Ze spolupráce s firmami zabývajícími se vstřikováním do plastových vložek a svými zkušenostmi Stratasys Ltd. publikoval následující doporučení. Výchozím bodem je začít konstrukci vložek dle osvědčených postupů pro vstřikovací formy z konvenčních materiálů (ocel, hliník). Dále je třeba zohlednit mechanické a tepelné namáhání, kterému je schopen plast vložky odolat. Doporučení pro konstrukci určitých prvků je následující.

Zkosení stěn



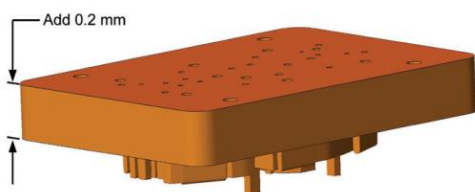
Obr. 4 – Doporučený úhel zkosení [1]

Zvětšit úhly zkosení na maximální povolenou hodnotu, kterou dovoluje konstrukce. Čím větší úhel zkosení, tím snazší vyhození vstřikovaného dílu z formy. Také se tím minimalizuje vznik poruch. Doporučený úhel zkosení je 5°, viz Obr. 4 [1].

Poloměry

Pro snížení koncentrace napětí a zabránění poškození vložky je doporučeno používat rádiusy. Výrazně je doporučeno vyhnout se ostrým hranám a nahradit je byť i malými rádiy [1].

Dělicí rovina

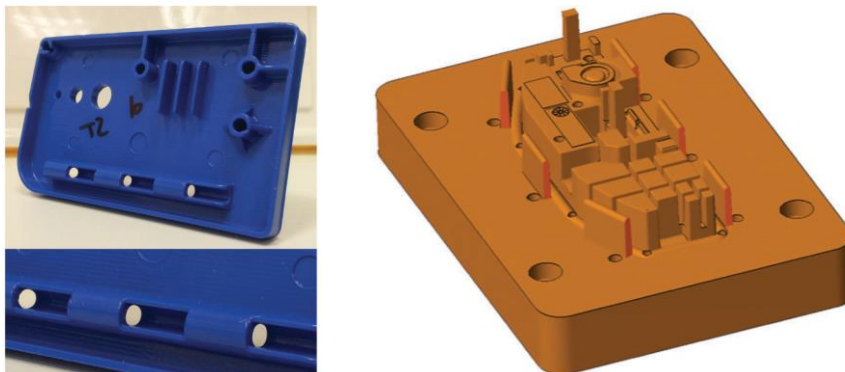


Obr. 5 – Doporučený přesah vložky nad dělicí rovinu [1]

Vložka v dělicí rovině musí být navržena tak, aby se zabránilo přetečení taveniny. Jsou dvě možnosti, jak navrhnout vložku. První možností je s přidáním obrábění, kdy vložka a rám jsou společně obrobeny do společné roviny. Tím je nepřesnost vložky a rámu zarovnána a není prostor, kudy může téct tavenina. Druhou možností je vytvoření výstupku, kdy vložka přesahuje přes okraj rámu. Při uzavření formy se počítá se stlačením plastu vložky a tím stlačením nerovností. Pro druhou možnost je doporučený přesah 0,2 mm, viz Obr. 5 [1].

Uzavření výstupků vložky s protilehlou dutinou vložky

Někdy je při konstrukci vložky žádoucí, aby výstupky jedné vložky byly v kontaktu s protilehlou částí dutinou vložky a tavenina skrze tyto plochy neprotekla. Výstupky dlouhé do 6 mm je možné ponechat kolmé na dělicí rovinu, viz Obr. 6 vlevo. U delších výstupků se doporučuje provést osazení 0,05 až 0,1 mm vůči protilehlé části vložky, viz Obr. 6 vpravo zvýraznění plochy [1].



Obr. 6 – Kontakt s uzavřenými prvky [1]

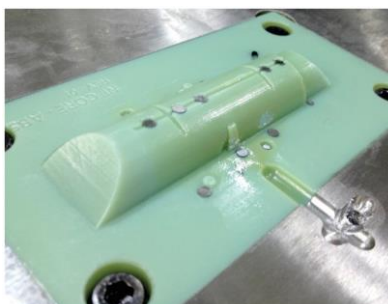
Díry

Všechny díry ve vložce by měly mít průměr větší než 0,8 mm. Menší díry je nutné převrtat. Díry pro vodící sloupky je doporučeno ještě vystružit, poněvadž špatné vedení kovového vodícího sloupku by mohlo způsobit poškození křehké plastové vložky. Doporučený poměr hloubky díry vůči průměru je 3 : 1. Pro vedení vodících sloupků je doporučeno i použít nakupovaná kovová pouzdra [1].

2.2 Vtoková soustava

Pro vstřikování do vložek 3D tisknutých na PolyJet 3D tiskárnách byla použita studená vtoková soustava. Teplé vtoky se nedoporučuje použít.

Vstupní 3D tištěný kanálek nesmí být v kontaktu s horkou tryskou stroje. Nejlepší způsob řešení je rozdělit vstupní kanálek na kovový a 3D tištěný plastový kanálek. Napojení kovového a 3D tištěného kanálku je vidět na Obr. 7. Další možností je použít nakupovanou kovovou vtokovou vložku. Rozváděcí kanálky mohou být buď vyrobeny v plastové 3D tištěné vložce nebo být dělené jako je vidět na Obr. 7 [1].



Obr. 7 – Napojení obráběného kovového kanálku na plastový 3D tištěný [1]

Vtok

Z hlediska opotřebení povrchu 3D tištěných plastových vložek je doporučeno minimalizovat smykové síly v proudící tavenině. Toho lze docílit správnou volbou vtoku. Nejvýhodnější je použití přímého vtoku. Konstrukce přímého vtoku je snadná a proudění do dutiny je rovnoměrné. Dále je vhodné použít vtoky ve tvaru přímky nebo kruhu. Kromě přímého vtoku je nejméně vhodné použít bodové vtoky. Nejméně vhodné bodové vtoky jsou vtoky tunelové a banánové. Obecně platí, že vtoky by měly být dvakrát až třikrát větší než vtoky použité v kovových formách [1].

Velikost vtokového ústí závisí na vstřikovaném plastu, geometrii, složitosti kavity atd. Obecně lze doporučit velikost vtokového ústí následovně.

Průměr vtokového ústí 5 až 8 mm pro vložky menší než 100 x 52 x 25 mm. Tloušťka vstříkovaného dílu je 1 až 2 mm. Vstříkovaný plast má nízkou teplotu tání a malou viskozitu [1].

Průměr vtokového ústí 8 až 9 mm při vstříkovaní plastu s vyšší teplotou tání a vysokou viskozitou. Navíc pro vstříkované plasty, které jsou plněny skelnými vlákny. Za takových podmínek je výrazněji doporučeno použít přímý vtok [1].

2.3 Ventilační systém

Odvzdušnění kavity je možné provést buď odvzdušněním skrze vkládané, nakupované části nebo odvzdušňovacími kanálky v dělicí rovině. Odvzdušňovacích dílů je na trhu mnoho. Podstatou je, že vkládaná část formy má v sobě již vyrobené kanálky pro odvod vzduchu. Pokud jsou ve vložce 3D tisknuty odvzdušňovací kanálky je doporučena hloubka kanálku 0,2 mm od dělicí roviny v délce 5 mm od kavity. Vzhledem k malé tvrdosti plastu je doporučeno při přetrvávajících potížích s uvězněným vzduchem v dělicí rovině vyrobít („vyškrábat“) drážky pro odvod vzduchu [1].

2.4 Temperanční (chladicí) systém

Plast je tepelný izolant. I když bude chlazen, nezkrátí dobu cyklu ani nezlepší kvalitu vstříkovaného dílu. Chlazení však může zvýšit životnost formy, přibližně o 20 % [1].

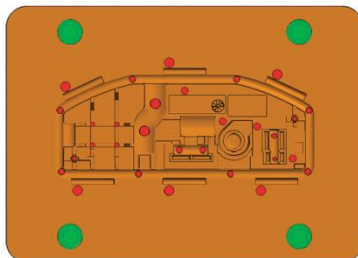
Chladicí systém se nedoporučuje navrhovat příliš složitý, kvůli odstranění podpor po 3D tisku. Průměr chladicího kanálku závisí na velikosti vložky. Doporučuje se použít průměr 8 až 10 mm a pro malé vložky 6 mm. Pro připojení chladicího systému k vložce se doporučuje použít přípojky, viz Obr. 8 [1].



Obr. 8 – Připojení chlazení [1]

2.5 Vyhazovací systém

Spolupracující firmy se Stratasys pro vyhození vstříkovaných dílů používaly jen vyhazovací kolíky. Díry vyhazovacích kolíků je doporučeno navrhovat s přídávkem a následně převrtat či ještě vystružit. Důvodem je dosažení přesného rozměru takového, aby s tolerancí vyhazovacího kolíku zabránilo uniku taveniny skrze vůli. Vzhledem ke křehkosti plastové vložky se doporučuje umísťovat díry pro vyhazovače dále od krajů vložky v min. vzdálenosti 3 mm. Ukázka vyhazovačů (červeně) je na Obr. 9 [1].

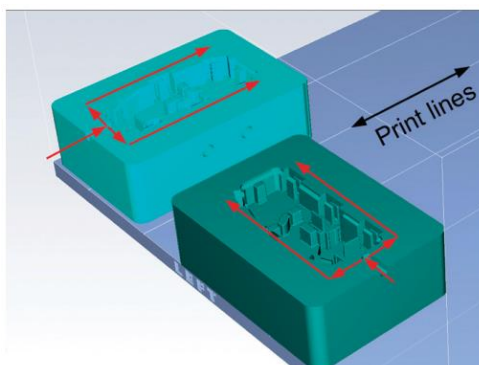


Obr. 9 – Vyhazovací systém – vyhazovače červeně [1]

2.6 Doporučení pro 3D tisk

Nejlepší umístění vložky při 3D tisk je položení na podložku dutinou nahoru. Takové umístění redukuje množství podpor na minimum. Množství podpor je výrazně doporučeno minimalizovat. Při natočení vložky je důležité respektovat směr tečení taveniny, znázorněno na Obr. 10 červenými šipkami. Tavenina by měla téci po směru 3D tisknutí vrstvy, viz Obr. 10 znázorněno černými šipkami. Pokud tavenina

teče po tomto směru, odpor který klade vložka tavenině je menší. Ze dvou případů natočení vložky na Obr. 10 je výhodnější vložka, která je umístěna v rohu 3D tiskové podložky [1].



Obr. 10 – Natočení vložky při 3D tisku s ohledem na proudění taveniny [1]

Vzhledem k přesnostem PolyJet 3D tiskáren je doporučeno 3D tisknout objem vložek do 165 cm^3 [1].

2.7 Postprocessing

Doporučený přesah v dělicí rovině, zobrazený na Obr. 5, je doporučeno obráběním zarovnat do roviny v toleranci $0,008 \text{ mm}$. Dále je potřeba obráběním zpřesnit průměry děr. Kromě frézování a vrtání je doporučeno použít broušení. Cílem je docílit hladkosti povrchu vložky, aby vstřikovaný díl měl kosmeticky hezký povrch a snáze jej bylo možné vyhodit z vložky. Pro pokrytí napojení vrstev po 3D tisku je doporučeno použít pískování. Postprocessing může také zahrnovat přípravu chladicího okruhu jako připojení přípojek atd [1].

3 Vstřikování

Doporučení pro vstřikování se příliš neliší od doporučení, které udává Formlabs Inc. S ohledem na životnost 3D tištěné plastové vložky je doporučeno snížit zejména vstřikovací tlak, teplotu a rychlost. Velikost uzavírací síly závisí na vstřikovaném tlaku. Analyticky se uzavírací síla spočte jako vstřikovaný tlak vynásobený plochou dutiny promítnutou do dělicí roviny. Zpravidla je vypočítaná hodnota uzavírací síly procentuálně zvětšena. Pro vložky 3D tištěné na PolyJet 3D tiskárnách se doporučuje zvětšení vypočtené uzavírací síly max. o 10 %. Uzavírací síla by neměla přesáhnout hodnotu $2\,000 \text{ kN}$ [1].

Před výrobou vstřikovaných dílů se doporučuje testování. Testování spočívá začít s minimálním doporučeným vstřikovacím tlakem, teplotou a rychlostí a postupně zvyšovat. Úspěšné vstřikování s uvedenými minimálními hodnotami výrazně prodlužuje životnost vložky [1].

Dále je doporučeno použít oddělovací spreje pro snazší vyhození vstřikovaného dílu z vložky. Doporučeno je použít silikonový přípravek.

Plast je tepelný izolant, teplota vložky se zvýší natolik, že vstřikované díly neztuhnou. Pro udržení konstantní teploty formy je doporučeno po vyhození vstřikovaného dílu ponechat formu otevřenou a vhánět na dutinu formy stlačený vzduch, jak je vidět na Obr. 11. To lze provádět ručně nebo pomocí automatického chladicího zařízení. Doporučeno je plastovou vložku zchladit na 50 °C [1].



Obr. 11 – Chlazení dutiny vložky stlačeným vzduchem [1]

4 Spolupracující firmy

V následující části budou představeny spolupracující firmy a jejich zkušenosti. Vzhledem k rychle se rozvíjícímu zájmu firem o vstřikování do 3D tištěných plastových vložek není seznam úplný.

4.1 Diversified Plastics, Inc.

Americká firma Diversified Plastics, Inc. se sídlem v Minneapolis byla založena roku 1977, se zaměřuje na zakázkové vstřikování plastů pro zákazníky v oblasti zdravotnictví, filtrace, letecký, zbrojní průmysl a další. Diversified Plastics dříve pro výrobu prototypů vstřikovaných dílů vyráběl formy z oceli P20 nebo z hliníku. Nejen cena materiálu, ale i obrobení formy v řádu týdnů bylo náročné. Z tohoto důvodu Diversified Plastics pro výrobu prototypů hledá nové možnosti. Prototypy byly 3D tisknuty metodami SLA a FDM. Avšak tyto prototypy neprezentovaly vlastnosti vstřikovaných dílů. Pro 3D tisk vložek Diversified Plastics začal využívat PolyJet 3D tiskárny, model PolyJet 3D tiskárnu Objet260™ Connex [1].

Prezentovaný prototyp na Obr. 12 vznikl ve spolupráci s dánskou firmou Coloplast A/S, která se zabývá výrobou zdravotnických potřeb. Firma Coloplast A/S se obrátila na Diversified Plastics s prosbou o výrobu vstřikovaných prototypů, na kterých by bylo možné vyhodnotit geometrii, design a pocit z prototypu před přistoupením k sériové výrobě. Vstřikovaným plastem byl TPE. S využitím PolyJet 3D tisku bylo možné 3D vytisknout prototyp i s jádrem (na Obr. 12 bíle) za 11 hodin. Celý proces od počátečních diskusí po výrobu prototypů trval pouhých pět pracovních dnů [1].



Obr. 12 – Diversified Plastics, Inc. – Zdravotnický prototyp [1]

Ocelová forma by stála přibližně 288 000 Kč. Zato při použití 3D tištěné plastové vložky byla cena formy přibližně pouze 33 250 Kč. Úspora nákladů činí 88 % a úspora času je odhadována na 80 % [1].

4.2 Worrell

Americká firma Worrell se sídlem v Minneapolis byla založena roku 1976. Worrell je přední konstrukční firma s odbornými znalostmi se vstřikováním plastů. 30. října 2014 Worrell uzavírá partnerství se Stratasys. Pro výrobu vstřikovacích vložek Worrell využívá PolyJet 3D tiskárnu Objet500 Connex. Důvodem pořízení je rychlejší a levnější výroba vstřikovacích forem pro odzkoušení vstřikovaných prototypů [1].

Prezentovaným prototypem je bezjehlový systém pro odběr krve se dvěma průtoky, který by snížil potřebu opakovaných injekcí, a tím zvýšil pohodlí pacientů a efektivitu nemocnice. Vstřikovaný díl je na Obr. 13 vlevo a připravená forma s vložkou pro vstřikování Obr. 13 vpravo [1].



Obr. 13 – Worrell – Zdravotnický prototyp [1]

Worrel projekt využití 3D tisku pro vývoj lékařských pomůcek prostřednictvím 3D tištěných vstřikovacích vložek nazývá 3DP IM. Kai Worrell, generální ředitel společnosti Worrell říká: "Pomocí 3D tištěných vstřikovacích vložek jsme schopni vytvořit prototyp za zlomek nákladů a během několika dní ve srovnání s osmítýdenní dobou přípravy spojenou s tradičními formami. „Toto úsilí ukazuje na drastický pokles času a peněz potřebných k vytvoření lékařských prototypů s finálními výrobními materiály“. „Statistiky jsou působivé 90 % snížení času a 70 % snížení nákladů“ [1].

4.3 Unilever

Společnost Unilever je jedním z největších výrobců potravin, výrobků pro péči o tělo, domácnost atd. Ve světě má své pobočky ve více než 100 zemí. Unilever má ve svých čtyřech divizích více než 400 značek a potřebuje zajistit, aby všechny byly konkurenceschopné, splňovaly neustále se měnící standardy výrobků a odlišovaly se na pultech. To se týká části firmy mající na starost výrobu plastových výrobků vstřikováním, vyfukováním a dalších technologií. Cílem bylo přejít co nejrychleji od obrázků a 3D modelů k prototypům. K výrobě vstřikovacích vložek byla pořízena PolyJet 3D tiskárna Objet 500 Connex. Snahou bylo zkrátit dobu potřebnou pro vyzkoušení výrobků a tím zkrátit uvedení na trh. Prezentovaným prototypem je držák vůně do záchodu spolu se vstřikovací vložkou je vidět na Obr. 14 [1].



Obr. 14 – Unilever – Držák vůně do záchodu [1]

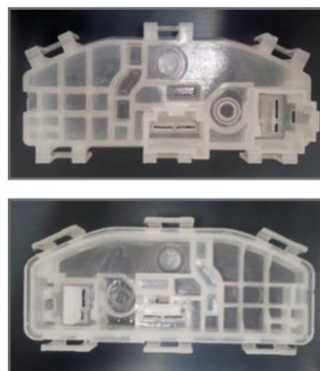
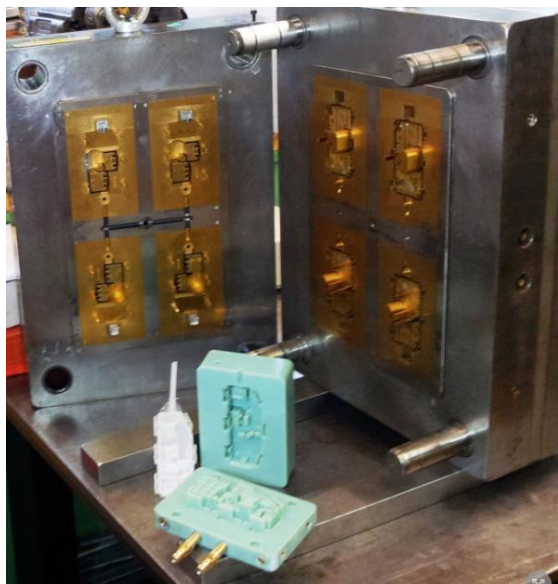
Dříve bylo potřeba na výrobu prototypů čekat několik týdnů. Výroba na PolyJet 3D tiskárně oproti výrobě formy tradičním způsobem výrazně zrychlila přípravu vstřikování. Také náklady byly sníženy, především pokud by pro výrobu formy byla potřeba kooperace s obráběcí firmou. Prototypy se osvědčilo vstřikovat PP. Celkové hodnocení použití 3D tištěných plastových vložek ušetřeno 80 % ceny a 50 % času oproti tradičním přístupům výroby [1].

4.4 AST International GmbH (dříve Seuffer)

Německá firma Seuffer se sídlem v Calw – Hirsau byla výrobcem senzorů, spínačů a ovládacích prvků pro užitková vozidla, automobily, domácí spotřebiče a další. Se zhoršující se finanční situací se firma dostala do bankrotu. Roku 2019 část firmy koupila společnost AST (Advanced Sensor Technologies) International. Odkoupená část firmy místo Seuffer se přejmenovala na AST International GmbH. Sídlo firmy zůstává stejné [3].

Andreas Buchholz, vedoucí výzkumu a vývoje ve společnosti Seuffer, 2013 vysvětluje následující: "Při spolupráci s automobilovým průmyslem je třeba testovat vzorové díly s mechanickým, teplotním atd. zatížením." „Díky 3D tisku Stratasys můžeme během několika dní navrhnout první návrhy vstřikovacích forem a za méně než 24 hodin je vytisknout pro vyhodnocení dílů.“ „Tradičně by výroba nástroje z kovu pomocí konvenčního CNC procesu trvala osm týdnů. A zatímco konvenční nástroj nás stojí přibližně 950 000 Kč, 3D vytištěný nástroj stojí méně než 24 000 Kč, což představuje úsporu přibližně 97 %." Pro výrobu vstřikovacích vložek byly použity PolyJet 3D tiskárny Objet30 Pro a Objet500 Connex [1].

Prezentovaný díl je vidět na Obr. 15 spolu se čtyřnásobnou formou. Záměrně byl vybrán složitější díl pro vstřikování.



Obr. 15 – AST International GmbH – Prototyp [1]

4.5 Grundfos

Grundfos je dánská firma známá výrobou vodních čerpadel. Pro výrobu vstřikovacích vložek používá PolyJet 3D tiskárnu Objet500 Connex 3. Prezentovaný díl je vidět na Obr. 16 spolu se vstřikovací formou [1].



Obr. 16 – Grundfos – Část čerpadla [1]

4.6 Whale

Irská firma Whale je součástí americké společnosti Brunswick Corporation ve skupině Navico. Whale je známá svými nízkonapěťovými čerpadly, instalatérskými a topnými systémy atd. speciálně navržené pro mobilní aplikace. K výrobě prototypů Whale začala používat PolyJet 3D tiskárnu Objet500 Connex3. Whale odhaduje zkrácení procesu výzkumu a vývoje až o 35 %. Ukázka 3D vložek je vidět na Obr. 17 [1].



Obr. 17 – Whale – Ukázka 3D tištěných vložek a vstřikovaných dílů [1]

Patrick Hurst, generální ředitel Whale říká následující: „Viděli jsme, jak 3D tisk nabízí obrovskou příležitost změnit naše podnikání, snížit rizika a eliminovat potřebu technických změn.“ „Doslova týden po obdržení stroje byl stroj již plně vytížen. „Vzhledem k obrovské poptávce jsme o několik měsíců později zakoupili další PolyJet 3D tiskárnu“, vzpomíná. „Můžeme během dne navrhnout vložku, přes noc 3D vytisknout a druhý den ráno testovat.“ „Pro naši firmu je to revoluční“, 2016.

4.7 Promolding

Nizozemská firma Promolding se sídlem v Haagu byla založena teprve roku 1997. Promolding se specializuje na vstřikování polymerových high-tech dílů a komponent. Zákazníci Promolding jsou společnosti Airbus, Heineken a další. Při plnění přání zákazníků na vstřikování složitějších výrobků a rychlejší realizaci bylo zapotřebí přijít s rychlejším řešením výroby formy pro testování prototypů než nabízelo tradiční řešení. Přání zákazníků se lišila a počáteční fáze vývoje formy je pro úspěch firmy zásadní. Z těchto důvodů se Promolding obrací na Stratasys a zakupuje PolyJet 3D tiskárnu Connex3. 3D tisk vstřikovacích vložek se osvědčil. V současné době Promolding používá i další Polyjet 3D tiskárny, kterými jsou Connex 3 Objet 350 a Dimension SST 120es [4], [1].

Ředitel společnosti Jeroen Gross, manažer vývoje produktů řekl následující: „Tradiční vývoj a výroba vstřikovací formy trvá šest týdnů, ale díky PolyJet 3D tiskárnám jsme schopni přímo ve firmě vyrobit složité díly za pouhé tři dny.“ „Firmu využítí 3D tištěných plastových vložek vedl k 93 % úspoře dodacích lhůt oproti vstřikování do tradičních forem [1].

Prezentovaným dílem je pouzdro optického senzoru. Senzor je vidět na Obr. 18 vlevo a vpravo je vstřikovací vložka. Zadavatelem byla nizozemská firma Fugro N.V., která se specializuje na sběr a analýzu geologických dat na souši i na moři. Za několik dní Promolding byla schopna vyrobit 50 vzorků pouzder z různých vstřikovaných polymerů. To umožnilo rychlé testování vhodného materiálu pouzdra pro citlivé senzory [1].



Obr. 18 – Promolding – 3D tištěná pouzdra optických senzorů [1]

Promolding v současné době nabízí jako jednu z možností výroby malé série vstřikováním do 3D tištěných plastových vložek. Ukázka vstřikovaných dílů včetně vložek je vidět na Obr. 19.



Obr. 19 – Promolding – Ukázka vstřikování do 3D tištěných plastových forem [4]

5 Použitá literatura

1. **Stratasys Ltd.** Aplikace 3D tiskáren Stratasys ve vstřikování. [Online] [Citace: 23. 1. 2023.] Dostupné z: <https://support.stratasys.com/en/applications/molding>.
2. **Scott J Grunewald.** 3DPrint.com. *Stratasys 3D Printers Help HASCO Make Low-Volume Injection Molding Cost Effective*. [Online] 9. 9 2015. [Citace: 12. 2. 2023.] Dostupné z: <https://3dprint.com/95743/stratasys-hasco-injection-mold/>.
3. **Schwarzwälder Bote.** Firma Seuffer heißt seit September AST International. [Online] 19. 9. 2019. [Citace: 29. 2 2023.] Dostupné z: <https://www.schwarzwaelder-bote.de/inhalt.calw-firma-seuffer-heisst-seit-september-ast-international.a3486489-ed46-458c-9b3a-4e8807bf9ec5.html>.
4. **Promolding.** PRIM | Printed Injection Mould. [Online] [Citace: 19. 2. 2023.] Dostupné z: <https://www.p3d-prim.com>.

Příloha č. 3

Vstříkovaný plast

PP 100-GB25

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Zaručené hodnoty	2
3	Testované, nezaručené	2
4	Matematické modely	3
	Závislost viskozity na teplotě	3
	Model viskozity druhého řádu	5
	Tail model.....	5
4.1	Ostatní hodnoty nutné pro simulaci.....	6
	Tepelná vodivost	6
	Viskoelastičita	6
	Struktura VE	7
5	Použitá literatura	7

Seznam obrázků

Obr. 1 – Granulát	2
Obr. 3 – Závislost viskozity na smykové rychlosti	4
Obr. 4 – Závislost objemu na tlaku a teplotě.....	6
Obr. 5 – Viskoelastičita	7
Obr. 6 – VE model.....	7

Seznam tabulek

Tab. 1 – Zaručené hodnoty [1].....	2
Tab. 2 – Testované, nezaručené hodnoty – Označení materiálového listu [2].....	2
Tab. 3 – Testované, nezaručené hodnoty doporučené pro vstřikování [2]	3
Tab. 4 – Ostatní vlastnosti [2]	3
Tab. 5 – Hodnoty pro WLC model [2]	4
Tab. 6 – Hodnoty pro model viskozity druhého řádu [2].....	5
Tab. 7 – Hodnoty pro Tail model [2]	6

1 Úvod

V této příloze jsou uvedeny hodnoty vstřikovaného PP 100-GB25 od firmy INEOS Group Ltd. Jedná se o plast čiré barvy. Granulát je zobrazený na Obr. 1.



Obr. 1 – Granulát

2 Zaručené hodnoty

Zaručené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1.

Vlastnosti	Podmínky testování	Metoda testování	Hodnota	Jednotka
Fyzikální				
Hmotnostní index toku taveniny MFR	230 °C/2,1 6kg	ISO 1130	0,01	g/10 min
Mechanické				
Modul pevnosti v ohybu	23 °C	ISO 178	1200	MPa
Pevnost v tahu		ISO 527-1,-2	32	MPa
Vrbová houževnatost dle Izoda	23 °C	ISO 180/1A	3,2	kJ/m ²
Vrbová houževnatost dle Charpyho	23 °C	ISO 179/1eA	2,4	kJ/m ²
Teplotní				
Teplota průhybu při zatížení	0,45 MPa	ISO 75/B	102	°C

Tab. 1 – Zaručené hodnoty [1]

3 Testované, nezaručené

Bližší specifikace nezaručených hodnot, včetně data testování, je uvedena v Tab. 2. Pro virtuální simulaci jsou tyto hodnoty velmi důležité, i když již v současné době nejsou garantované. Stále však umožňují bližší přiblížení se virtuální simulace k realitě. Méně přesnější by bylo pro virtuální simulaci použít PP s obecnými vlastnostmi.

Vlastnosti	Hodnota
Druh	PP
Struktura	Krystalická
Označení	100-GB25
Výrobce	INEOS Olefins & Polymers Europe
Označení mat. listu	53755
Datum testování	1. 7. 1996
Datum poslední úpravy	16. 5. 2011
Výchozí model smrštění	CRIMS (Corrected Residual In-Mold Stress)

Tab. 2 – Testované, nezaručené hodnoty – Označení materiálového listu [2]

Hodnoty v Tab. 3 jsou doporučené hodnoty pro vstřikování. Z původních podkladů byly hodnoty teplot převedeny z K na °C.

Vlastnosti		Hodnota	Jednotka
Vstřikovací teplota	Min.	210	°C
	Doporučená	225	°C
	Max.	240	°C
Teplota formy	Min.	31	°C
	Doporučená	46	°C
	Max.	61	°C
Teplota zasklení		119	°C
Teplota pro vyhození		101	°C
Max. smykové napětí		25 000	Pa
Max. smyková rychlost		100 000	1/s

Tab. 3 – Testované, nezaručené hodnoty doporučené pro vstřikování [2]

Hodnoty v Tab. 4 vypovídají o chování plastu při mechanickém a tepelném zatížení.

Vlastnosti	Značka	Hodnota	Jednotka
Modul pružnosti v tahu	E_1	1340	MPa
Modul pružnosti v tahu	E_1	1340	MPa
Poissonova konstanta	ν_1	0,39199	–
Poissonova konstanta	ν_2	0,39199	–
Modul pružnosti ve smyku	G	481,3	MPa
Koeficient tepelné roztažnosti	CTE1	0,000090499	1/ °C
Koeficient tepelné roztažnosti	CTE2	0,000090499	1/ °C

Tab. 4 – Ostatní vlastnosti [2]

4 Matematické modely

Chování plastu za určitých podmínek lze popsat následujícími modely. Zároveň tyto modely budou použity pro definování vlastností vybraného PP pro virtuální simulaci.

Závislost viskozity na teplotě

Viskozita je jednou z důležitých vlastností odlišující plasty. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5. Pro definování závislosti viskozity na teplotě byl použit empirický WLC model, popsaný rovnicí (1). [3]

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 * \dot{\gamma}}{\tau_k}\right)^{1-n}} \quad (1)$$

η	Viskozita, [Pa/s]
η_0	Nulová viskozita /Newtonovská mez/ [Pa/s] Viskozita se blíží konstantě při velmi nízkých smykových rychlostí
$\dot{\gamma}$	Smyková rychlost, [1/s]
τ_k	Kritická úroveň napětí [Pa]
n	Index mocninného zákona v režimu vysoké smykové rychlosti [–]

Rovnice (2) definuje vztah pro výpočet nulové viskozity.

$$\eta_0 = D_1 * \exp \left[- \frac{A_1 * (T - T_g)}{A_2 + (T - T_g)} \right] \quad (2)$$

D_1	Koeficient, [Pa/s]
T	Teplota, [K]
T_g	Teplota zasklení, [K]
A_1	Koeficient [–]

A_2 Koeficient určený rovnicí (3), [K]

$$A_2 = A_3 + D_3 * p \quad (3)$$

A_3 , Koeficient, [K]

D_3 Koeficient, [K/Pa]

p Tlak, [Pa]

T_g Teplota zasklení určená rovnicí (4)

$$T^* = D_2 + D_3 * p \quad (4)$$

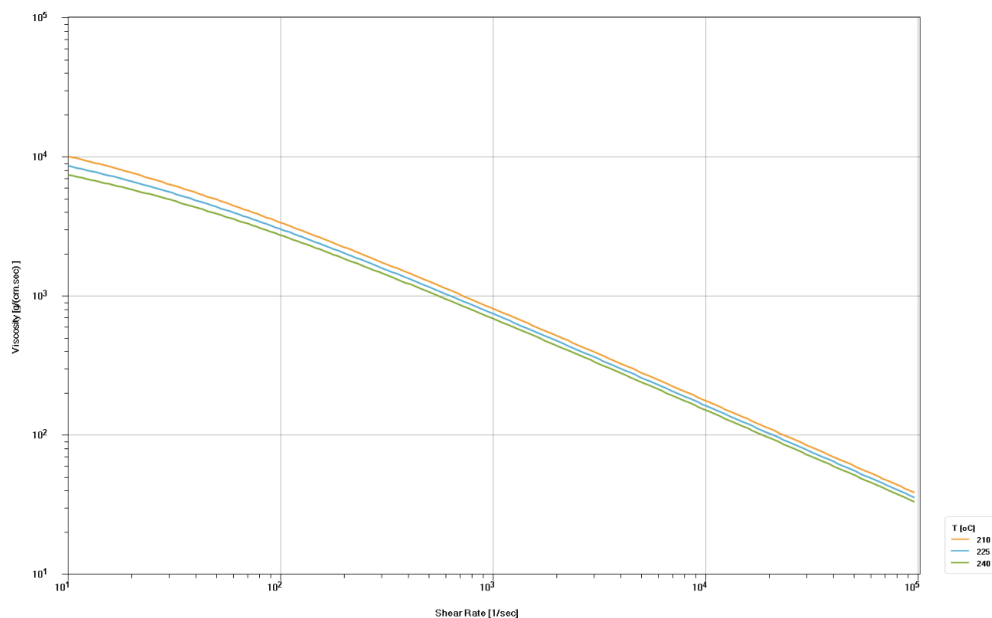
D_2 Koeficient, [K]

Parametr	Hodnota	Jednotka
n	0,3254	–
τ	17 700	Pa
D_1	$1,12 * 10^{12}$	Pa/s
D_2	263,15	K
D_3	0	–
A_1	24,75514	–
A_2	51,6	K

Tab. 5 – Hodnoty pro WLC model [2]

Pro zápis hodnot z Tab. 5. do Moldex3D bylo zapotřebí převést některé hodnoty do jednotek [dyne], v základních jednotkách [(g * cm)/s²]. Jedná se o jednotky v systému CGS (centimetr – gram – sekunda). Např. 1 [Pa] = 10 [dyne/cm²].

Závislost viskozity na smykové rychlosti je popsána grafem na Obr. 2.



Obr. 2 – Závislost viskozity na smykové rychlosti

Křivky v grafu na Obr. 2. udávají minimální, doporučenou a maximální vstřikovací teplotu pro vybraný PP.

Model viskozity druhého řádu

Model viskozity druhého řádu popisuje závislost viskozity na teplotě a smykové rychlosti, popsanou rovnicí (5). Hodnoty PP jsou uvedené v Tab. 6 [3].

$$\ln(\eta) = B_1 + B_2 * \ln(\dot{\gamma}) + B_3 * T + B_4 * [\ln(\dot{\gamma})]^2 + B_5 * \ln(\dot{\gamma}) * T + B_6 * T^2 \quad (5)$$

B_1 až B_6 Koeficienty s příslušnými jednotkami uvedenými v Tab. 6.

Parametr	Hodnota	Jednotka
B_1	11,2543	–
B_2	–0,61194	–
B_3	–0,0174616	K^{-1}
B_4	–0,0224273	–
B_5	0,00126898	K^{-1}
B_6	$6,91116 * 10^{-6}$	K^{-2}

Tab. 6 – Hodnoty pro model viskozity druhého řádu [2]

Tail model

Tail model popisuje objem plastu jako funkci teploty a tlaku. Výsledek je prezentován pVT diagramu. Jedná se o model, který má dopad na mnoho vlivů během proudění plastu. Tail model se definuje rovnicí (6). Hodnoty vstříkovaného PP jsou uvedeny v Tab. 7 [3], [4].

$$v(T, p) = v_0(T) * \left[1 - C * \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_t(T, p) \quad (6)$$

$v(T, p)$ Objem závislý na teplotě a tlaku

$v_0(T)$ Měrný objem při nulovém měrném tlaku, závislý pouze na teplotě

C Konstanta = 0,0894

B Koeficient zohlednění citlivosti materiálu na tlaku

$$v_0(T) = \begin{cases} b_{1S} + b_{2S} * (T - b_5) & ; \text{pokud } T \leq T_t \\ b_{1L} + b_{2L} * (T - b_5) & ; \text{pokud } T > T_t \end{cases} \quad (7)$$

$$B = \begin{cases} b_{3S} * \exp(-b_{4S} * (T - b_5)) & ; \text{pokud } T \leq T_t \\ b_{3L} * \exp(-b_{4L} * (T - b_5)) & ; \text{pokud } T > T_t \end{cases} \quad (8)$$

$$v_t(T, p) = \begin{cases} b_7 * \exp(b_8 * (T - b_5) - b_9 * p) & ; \text{pokud } T \leq T_t \\ 0 & ; \text{pokud } T > T_t \end{cases} \quad (9)$$

T_t Teplota závislá na tlaku, [K]

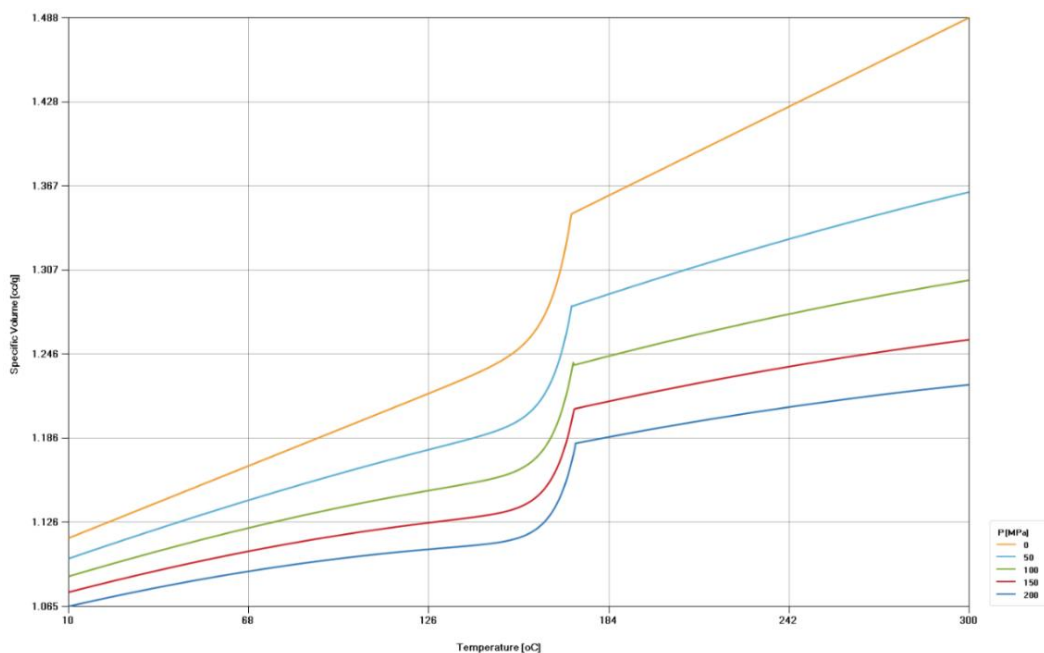
$$T_t = b_5 + b_6 * p \quad (10)$$

b_5 až b_9 ; b_{1S} až b_{4S} ; b_{1L} až b_{4L} Koeficienty s příslušnými jednotky uvedenými v Tab. 7.

Parametr	Hodnota	Jednotka
b _{1L}	1,347064	cm ³ /kg
b _{2L}	0,0011	cm ³ /(kg * K)
b _{3L}	67876200	Pa
b _{4L}	0,005870102	1/K
b _{1S}	1,259191	cm ³ /kg
b _{2S}	0,000895	cm ³ /(kg * K)
b _{3S}	73947940	Pa
b _{4S}	0,008943042	1/K
b ₅	445,05	K
b ₆	0,00000000625	K/Pa
b ₇	0,0878	m ³ /kg
b ₈	0,155	1/K
b ₉	0,0000000022	1/Pa

Tab. 7 – Hodnoty pro Tail model [2]

V Tab. 7. jsou již hodnoty z materiálového listu převedeny do jednotek Moldex3D. pVT diagram je zobrazen na Obr. 3.



Obr. 3 – Závislost objemu na tlaku a teplotě

4.1 Ostatní hodnoty nutné pro simulaci

Byly použity obecné hodnoty pro PP.

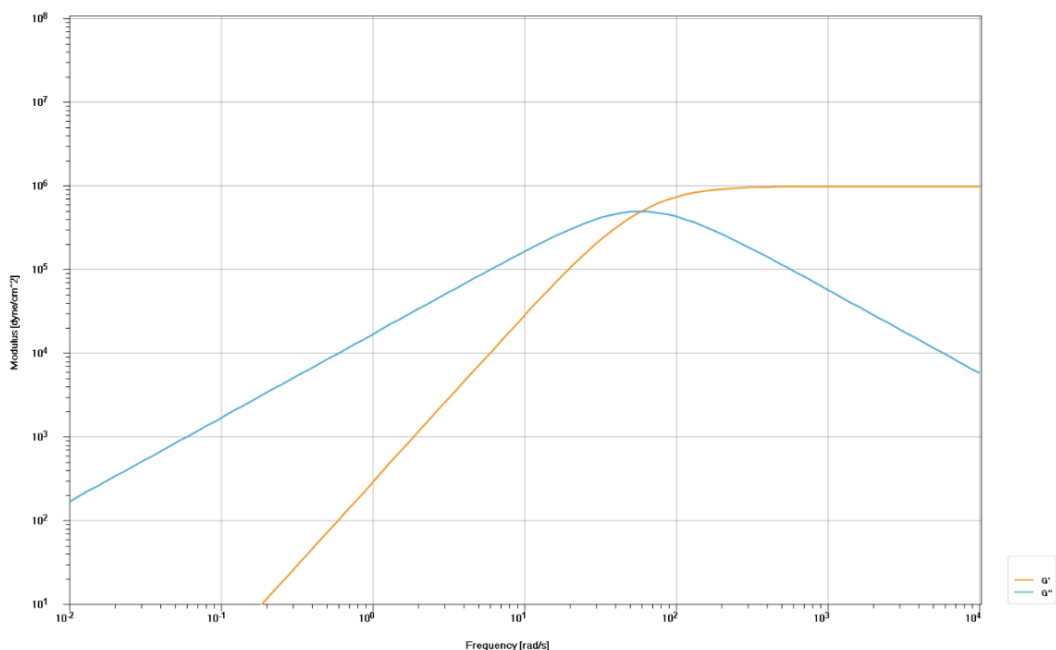
Tepelná vodivost

$$K = 21\,500 \text{ [erg/(s * cm * °C)]}$$

Viskoelasticita

Dle modelu White-Metzner a graf zobrazený na Obr. 4.

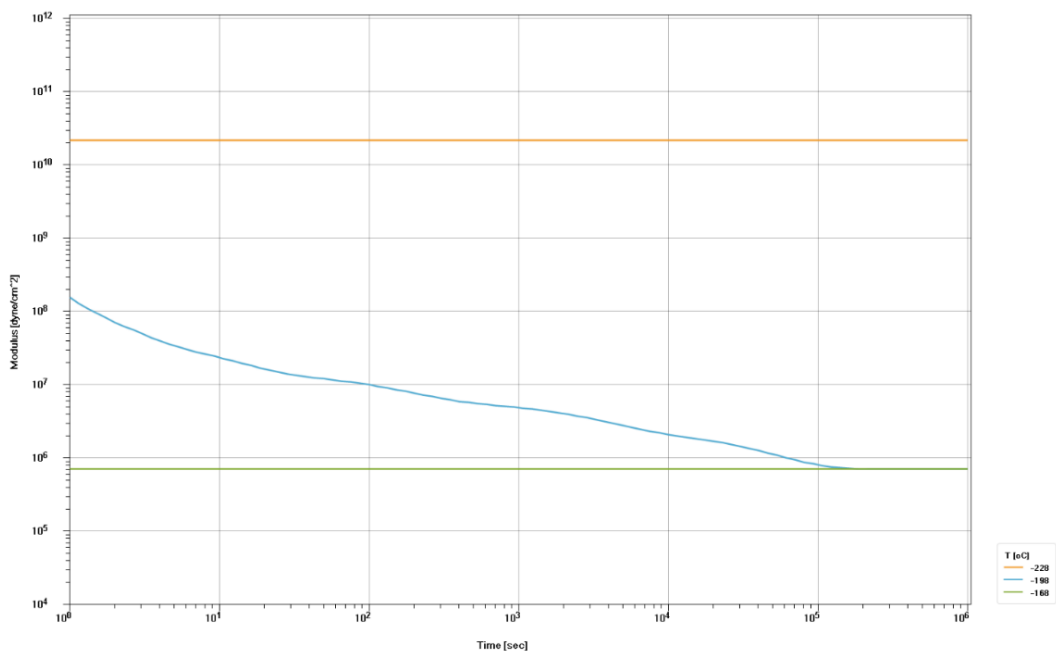
$$G = 10^6 \text{ [dyne/cm}^2\text{]}$$



Obr. 4 – Viskoelasticita

Struktura VE

Dle obecného Maxwell modelu. Výsledek obecných hodnot je znázorněn grafem na Obr. 5.



Obr. 5 – VE model

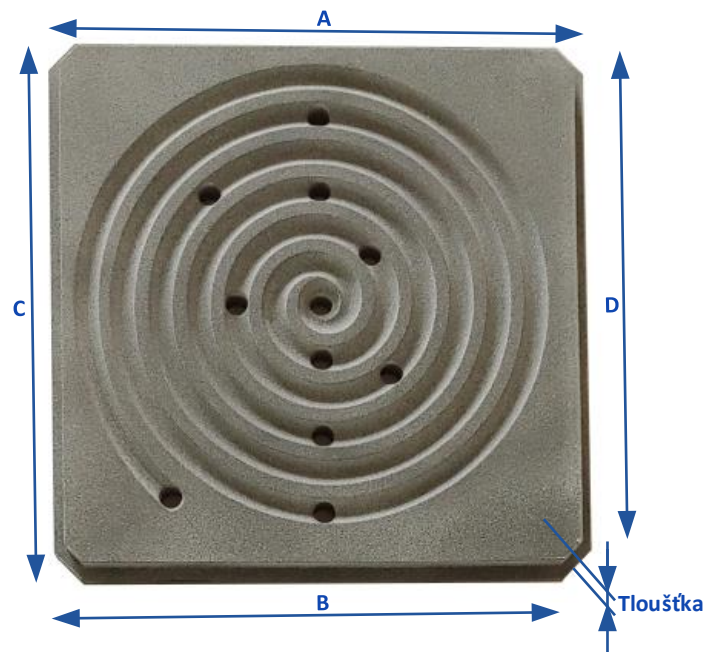
5 Použitá literatura

1. **INEOS Group Ltd.** *Materiálový list 100-GB25*. [Online] [Citace: 10. 1. 2023.] Dostupné z: <https://www.ineos.com>.
2. —. *Materiálové list 100-GB25 (starší)*. [Online]
3. **Autodesk Inc.** *Návoděda pro Autodesk Moldflow Insight*. [Online] [Citace: 10. 1. 2023.] Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight>.
4. **CoreTech System Co., Ltd.** *Návoděda pro Moldex3D*. [Online] [Citace: 10. 1. 2023.] Dostupné z: <http://support.moldex3d.com/2022/en/index.html>.

Příloha č. 4

Přesnost plastových vložek 3D tištěných metodou MJF

Rozměry modelu vložky jsou 121 x 121–10 mm.



Obr. 1 - Vložka a měřená místa

Měřené délkové rozměry a výškový rozměr (tloušťka) jsou zobrazené na Obr. 1 modře. Naměřené hodnoty rozměrů z 20 vložek jsou uvedené v Tab. 1, kde červeně jsou zvýrazněné rozměry přesahující toleranci $\pm 0,2$ mm pro rozměry A, B, C a D a tolerance pro tloušťku je $\pm 0,1$ mm. Zeleně jsou zvýrazněné přesně 3D vytištěné rozměry.

Vzorek	Stěna				Tloušťka
	A	B	C	D	
1	121,2	121	121,1	121,2	10,1
2	121	120,95	120,9	120,9	10,05
3	121,15	120,8	12,95	120,85	10
4	121	121	120,75	121	9,9
5	121,1	120,9	121	120,8	10,05
6	121,1	120,9	121	120,7	10,05
7	121,2	121	120,9	120,85	10,05
8	121,1	121	120,9	120,85	10
9	121,2	121,05	121,1	120,8	10,15
10	121,25	121,2	121,3	120,85	10,15
11	121	121,1	120,9	121	9,95
12	120,8	120,9	120,8	120,8	9,85
13	120,95	121	120,8	121	9,85
14	120,9	121	120,9	120,8	9,95
15	121	121	120,8	120,9	9,85
16	121	121,05	120,8	120,9	9,8
17	121	121,1	120,85	121	9,85
18	121,05	121	121,1	120,8	9,9
19	121,1	121	121,1	120,8	10,2
20	121,3	121,3	121,3	121	10,15
Průměr	121,07	121,01	120,96	120,89	10,45
Průměrná odchylka	0,11	0,07	0,14	0,13	0,1

Tab. 1 – Rozměry vložek

V Tab. 1 je vyhodnocení průměrné hodnoty provedeno aritmetickým průměrem, označen jako průměr. Stejně bylo provedeno vyhodnocení průměrné odchylky od požadovaného rozměru.

Příloha č. 5

Simulace vstřikování do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Vstřikovací forma	2
2.1	Materiálové vlastnosti	2
2.2	Síť.....	2
3	Vstřikovací jednotka	3
4	Plnění.....	4
5	Plastové vložky.....	5
6	Ocelová vtoková vložka.....	7
7	Porovnání vstřikování do plastových vložek s hliníkovými vložky	8
8	Použitá literatura	10

Seznam obrázků

Obr. 1	– Vstřikovaný díl a studená vtoková soustava	2
Obr. 2	– Síť modelu v řezu a detailem na dutinu	3
Obr. 3	– Model vstřikovací jednotky s použitou sítí [4]	4
Obr. 4	– Simulace vstřikování, fáze plnění – tečení taveniny v čase.....	4
Obr. 5	– Pohled na upnutí vstřikovací vložky ve formě na vstřikolisu	5
Obr. 6	– Simulace vstřikování – rozložení teploty v průběhu cyklu na vložkách	7
Obr. 7	– Simulace vstřikování – rozložení teploty v průběhu cyklu řezu formy.....	8
Obr. 8	– Simulace vstřikování, fáze chladnutí – rozložení teploty ve vložce z HP PA 12 GB po 11 s a hliníkové po 10 s....	9

Seznam tabulek

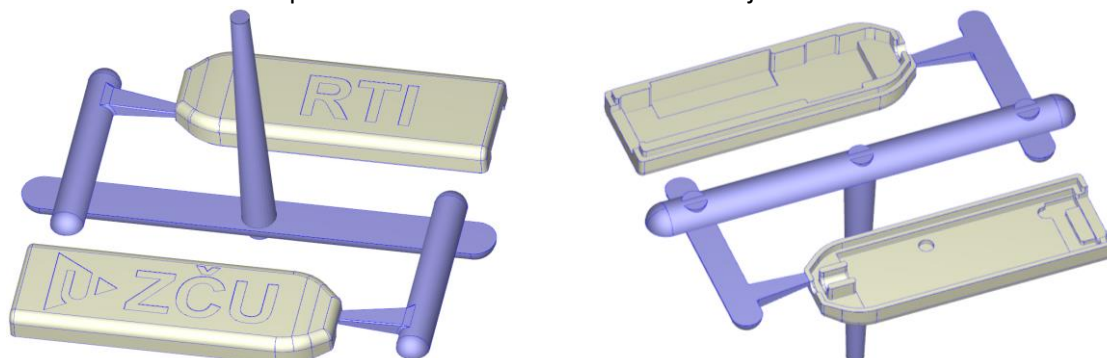
Tab. 1	– Vlastnosti modelů [1], [2].....	2
Tab. 2	– Počet prvků a uzlů sítě	2

1 Úvod

Tato příloha doplňuje vstřikování do plastových vložek popsané v hlavní části textu disertační práce. Zde jsou uvedeny pouze části simulace, které nebyly z důvodu úspory místa umístěny do hlavní části. Úvod k simulování je popsán v hlavní části textu a zde jsou uvedeny následující doplňující části.

2 Vstřikovací forma

Model vstřikovaného dílu spolu se studenou vtokovou soustavou je zobrazen na Obr. 1.



Obr. 1 – Vstřikovaný díl a studená vtoková soustava

Obr. 1. byl generován z Moldex3D Studia v typickém označení výstřiku slabě žlutě a studené vtokové soustavy fialově. Ve spodní části vtokové soustavy, Obr. 1 vpravo jsou vidět zjednodušeně plochy pro vyhazovače na hlavním kanálku. Ve skutečnosti byl použit vyhazovač s podkosem pod vtokovým kuželem. Pro usnadnění simulace byl podkos odebrán a proto jsou všechny tři plochy pro vyhazovače zarovnané stejně.

2.1 Materiálové vlastnosti

Hlavním objektem zkoumání je plast HP PA 12 GB, nikoliv hliník a kov. Pro simulaci nebyly nastavené přesné hodnoty těchto kovů odpovídající jejich konkrétnímu výrobnímu označení a třídě. Jak pro hliník, tak pro ocel byly použity obecné hodnoty. Lze tak zkoumaný plast porovnávat s obecně definovanými kovy. Obecné vlastnosti hliníku a oceli jsou uvedeny v Tab. 1.

Vlastnost	Ocel	Hliník	HP PA 12 GB	Jednotka
Hustota	7,85	2,7	1,3	g/(cm ³)
Měrná tepelná kapacita	445	895	1 600	J/(kg * K)
Tepelná vodivost	50	205	0,25	W/(m * K)
Modul pružnosti v tahu	210	70	2,8	GPa
Poissonova konstanta	0,228	0,334	0,43	–
Koeficient lineární teplotní roztažnosti	11	23	0,1	10 ⁻⁶ /K

Tab. 1 – Vlastnosti modelů [1], [2]

K určení vlastností plastu HP PA 12 GB byly použity materiálové listy poskytované výrobcem. Bohužel vlastnosti jako měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost a lineární teplotní roztažnost výrobce neuvádí. Zjištění těchto vlastností by bylo náročně, a proto k simulaci byly použity obecné hodnoty pro PA 12.

2.2 Síť

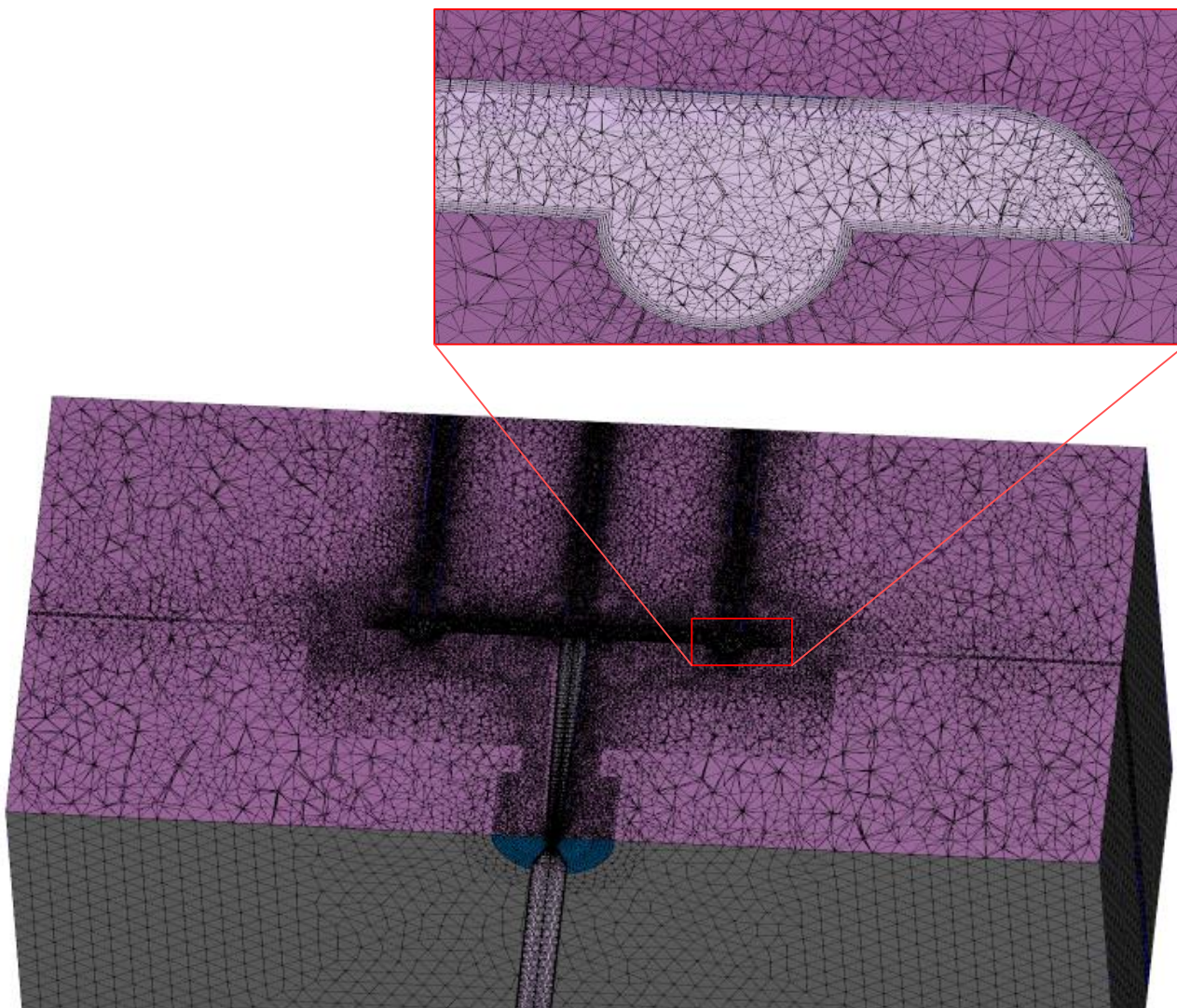
Síť vstřikovací formy byla vybírána s ohledem na správný popis tělesa a zároveň s ohledem na výpočetní výkon. Počet uzlů a elementů sítě je uveden v Tab. 2.

Těleso	Počet uzlů	Počet elementů
Vstřikované díly	347 770	937 324
Studená vtoková soustava	214 455	622 444

Tab. 2 – Počet prvků a uzlů sítě

Při síťování vstřikovaného dílu a studené vtokové soustavy byla použita BLM síť (Boundary Layer Mesh), což lze přeložit jako „síť hraniční vrstvy“. Jedná se o jednu z nevhodnějších sítí pro vstřikování plastů a o kombinaci čtyřstěnných (tetrahedrů) prvků a obdélníkových (bricků). Výsledkem takové hybridní sítě je umístění bricků na rozhraní těles, jimiž teče plast a zbylá část tělesa je vysíťována tetrahedrovou sítí. K získání přesnějšího výsledku je bricková síť mnohem lepší než tetrahedrová. Z tohoto důvodu byla bricková síť aplikována na rozhraní těles, kde dochází k chladnutí, tření atd. [3].

Řez sítí vstřikovací formy, včetně vstřikovací jednotky je vidět na Obr. 2. Použité bricky BLM sítě na rozhraní studené vtokové soustavy se stěnou vložky jsou vidět v detailu umístěním na Obr. 2 nahoře.

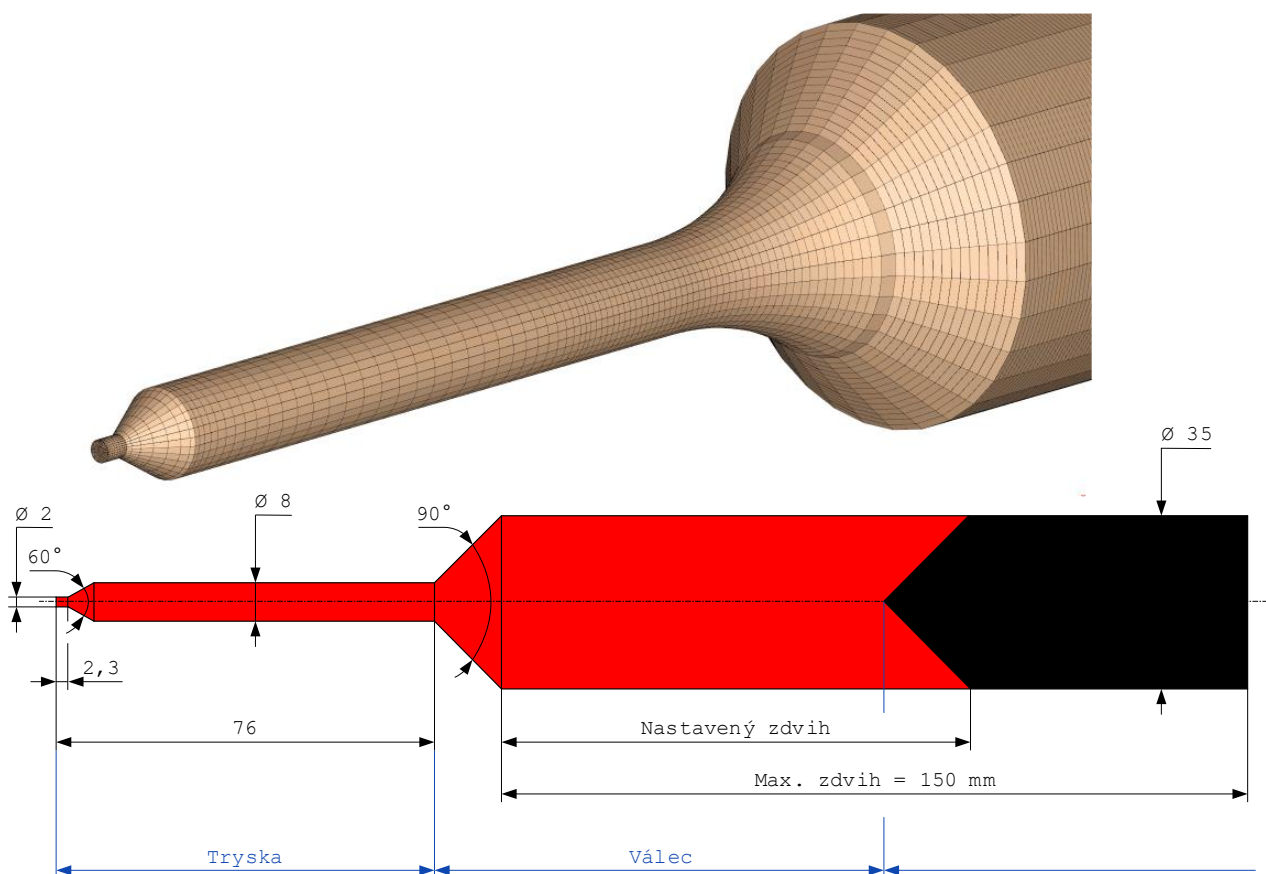


Obr. 2 – Síť modelu v řezu a detailem na dutinu

3 Vstřikovací jednotka

Zahrnout do simulace i vstřikovací jednotku je z důvodu, co nejvíce se přiblížit k reálnému vstřikování. Rozměry vnitřku jednotky jsou stejné jako rozměry použité jednotky vstřikolisu 470 E 1000-290.

Model vstřikovací jednotky včetně vnitřních rozměrů je zobrazen na Obr. 3 dole. Proces síťování vstřikovací jednotky je v Moldex3D automatický, lze změnit pouze velikost elementu. Síť vstřikovací jednotky je zobrazena na Obr. 3 nahoře.

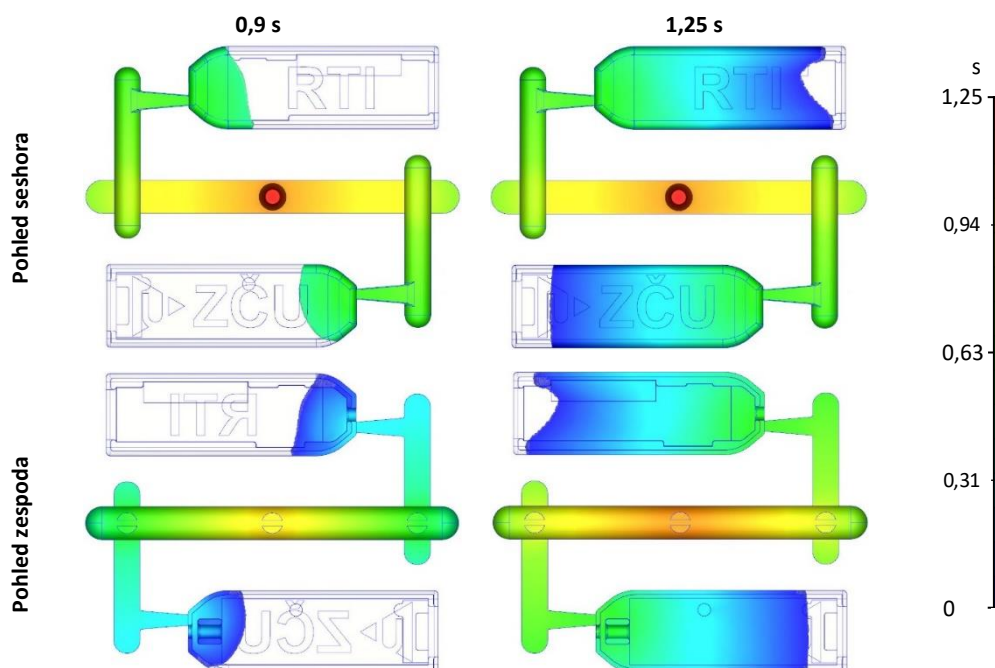


Obr. 3 – Model vstřikovací jednotky s použitou sítí [4]

Na kuželové ploše vedené pod úhlem 90° je vidět „odskočení“ sítě ve vrstvě. I přes snahu volby různé velikosti elementů, nebylo možné uvedený nedostatek odstranit.

4 Plnění

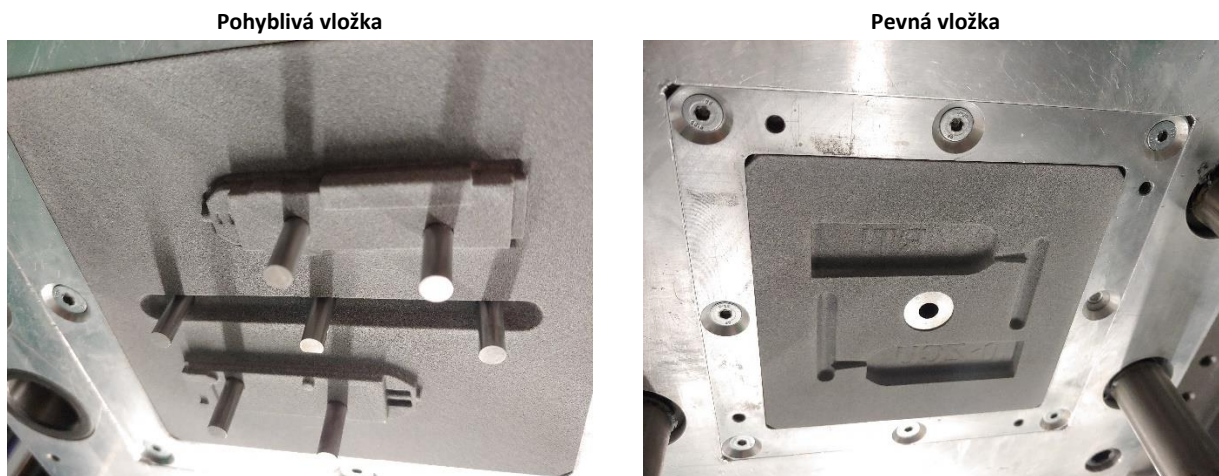
Vyhodnocení fáze plnění je popsáno v hlavní části textu. Na Obr. 4 je zobrazen detail plnění dutiny a vtokové soustavy taveninou. Obr. 4 je rozdělen na pohled seshora a zespoda na vstřikovaný díl. Především pohled zespoda více znázorňuje proudění taveniny u stěn, více u krytu se zkratkou RTI.



Obr. 4 – Simulace vstřikování, fáze plnění – tečení taveniny v čase

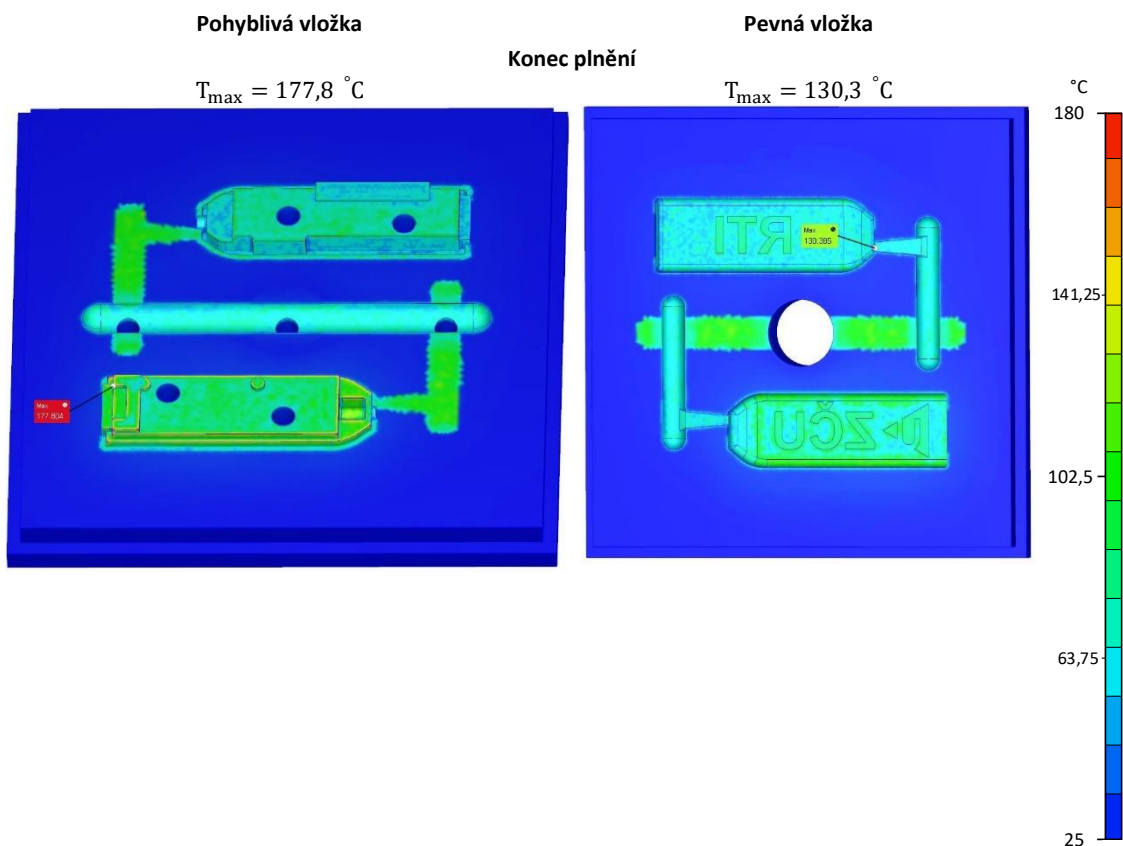
5 Plastové vložky

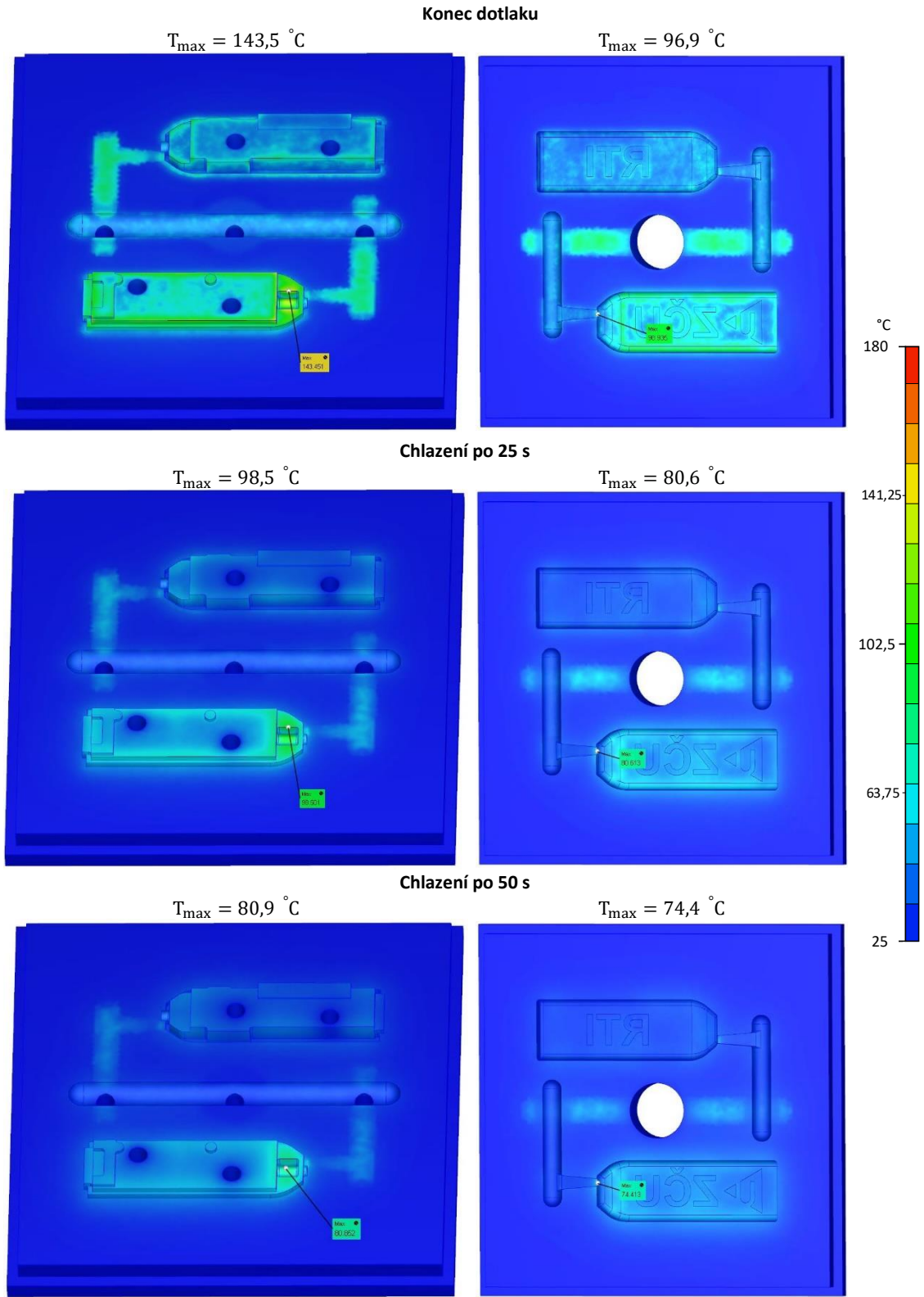
Upnutá plastová vložka spolu s vyhazovači je zobrazena na Obr. 5 vlevo. Pevná plastová vložka spolu s vtokovou vložkou je zobrazena na Obr. 5 vpravo.

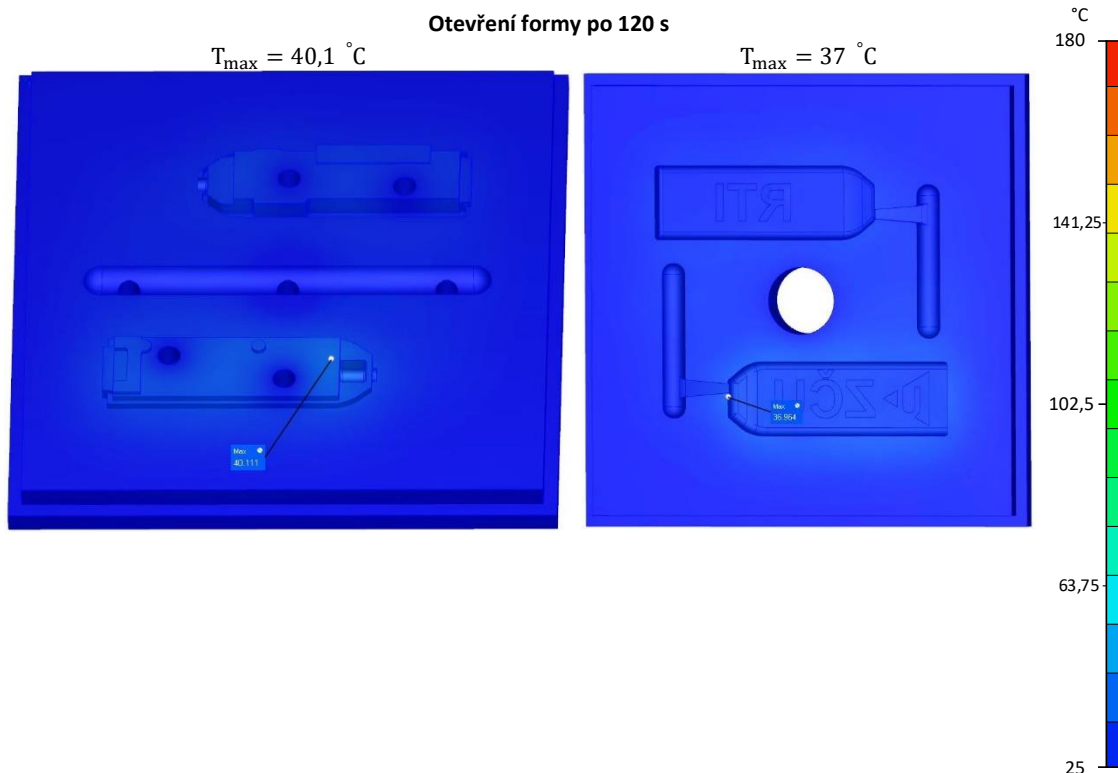


Obr. 5 – Pohled na upnutí vstřikovací vložky ve formě na vstřikolisu

Cílem této části textu je pomocí simulace prozkoumat rozložení teplot na plastových vložkách během fází vstřikování. K vyhodnocení byl vybrán konec plnění a dotlaku, chlazení v polovině a na konci doby trvání (tj. ve 25 a 50 s) a otevření formy opět v polovině a na konci doby trvání (tj. 60 a 120 s). Na Obr. 6 jsou jednotlivé zkoumané fáze nadepsány nad výsledky zkoumaných vložek. Na levé straně Obr. 6 jsou pohledy na pohyblivou vložku a na pravé straně před teplotní stupnicí pevné vložky. Umístění vložek je podobné jako na Obr. 5. Pod každou fází jsou uvedeny maximální teploty, které byly na vložce dosaženy. Na každém modelu je praporek odkazující na oblast, kde bylo maximální teploty dosaženo. Barva praporeku odpovídá dle teplotní stupnice umístěné na Obr. 6 vpravo. Vyhodnocení teplot bylo provedeno po 10 cyklech.





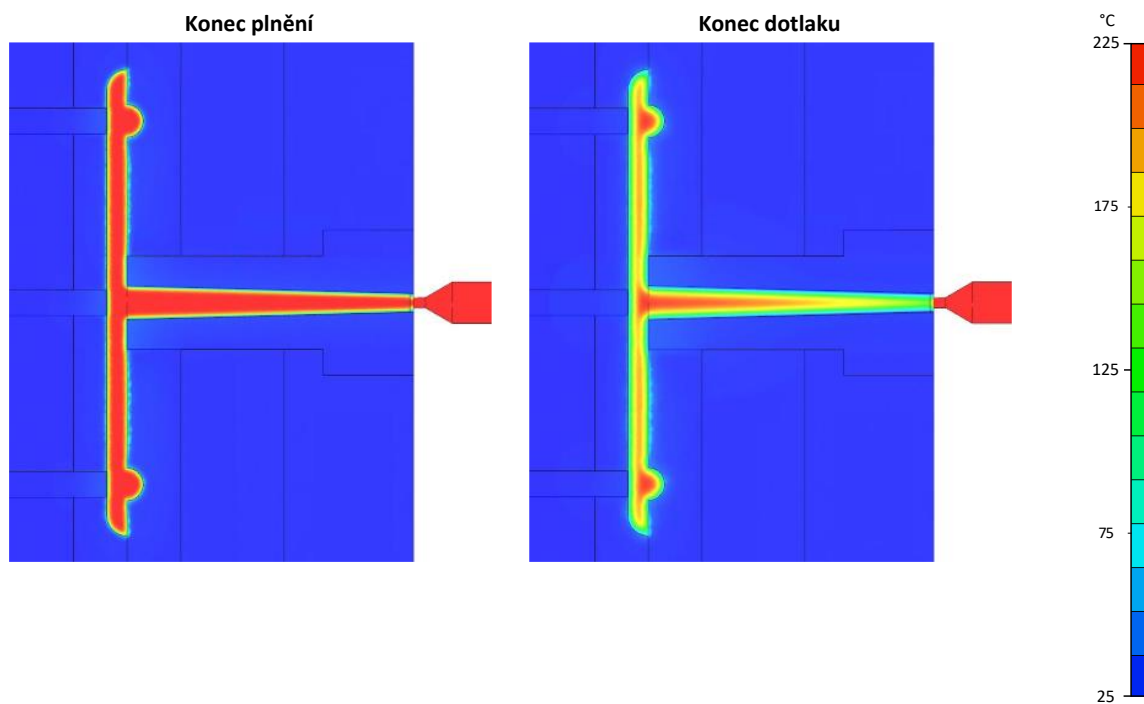


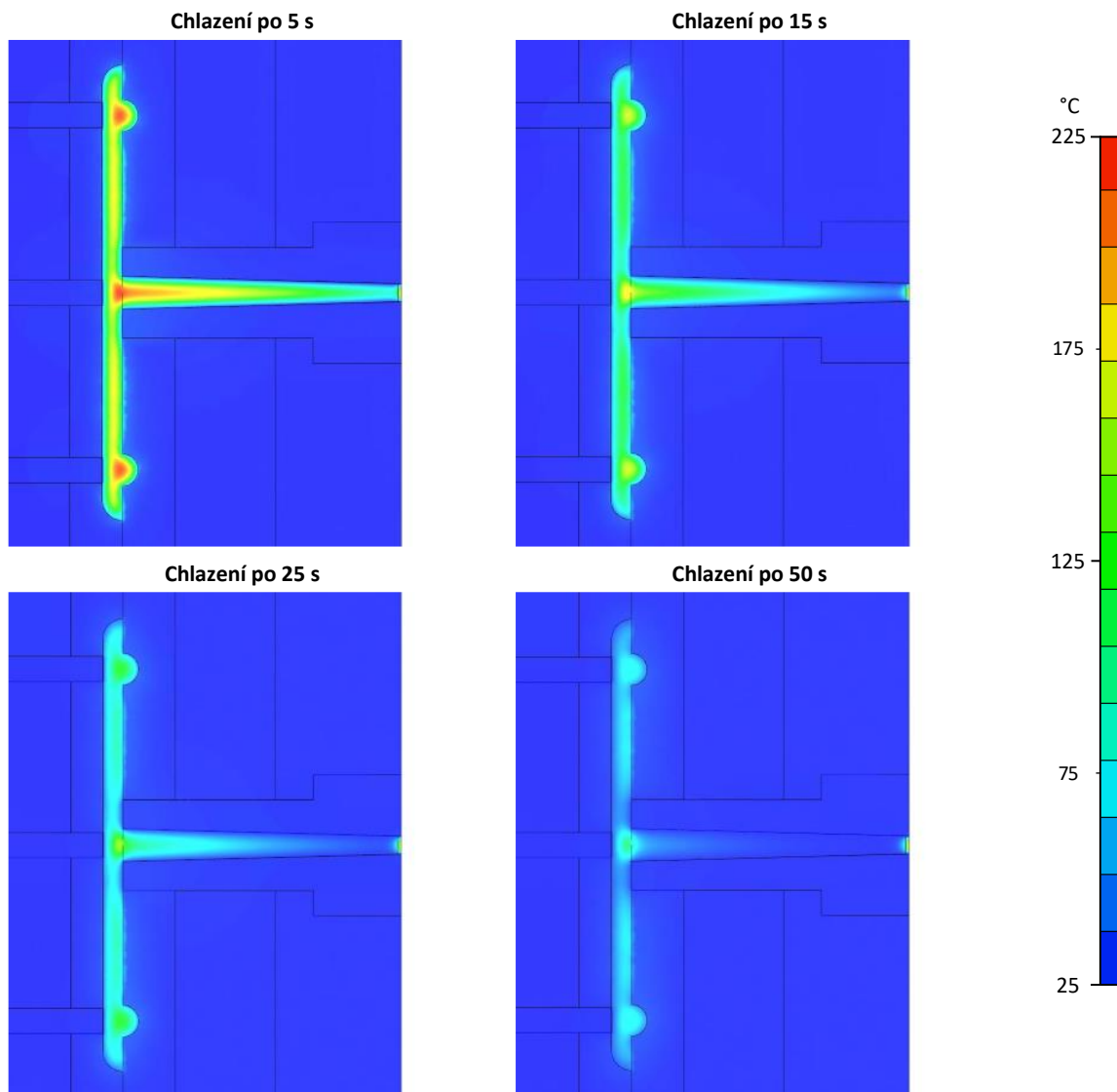
Obr. 6 – Simulace vstřikování – rozložení teploty v průběhu cyklu na vložkách

Z průběhu fází na Obr. 6 je vidět velmi pomalý průběh chladnutí plastové vložky.

6 Ocelová vtoková vložka

Cílem této části textu je popsat vliv ocelové vtokové vložky na chladnutí studené vtokové soustavy. Podobně jako povrch plastových vložek bude během cyklů vstřikování prozkoumán vliv ocelové vtokové vložky na studenou vtokovou soustavu jen s tím rozdílem, že fáze otevření formy, kdy vtoková soustava není ve formě, nebude zahrnuta. Chladnutí vtokové soustavy během cyklů vstřikování je zobrazeno na Obr. 7.





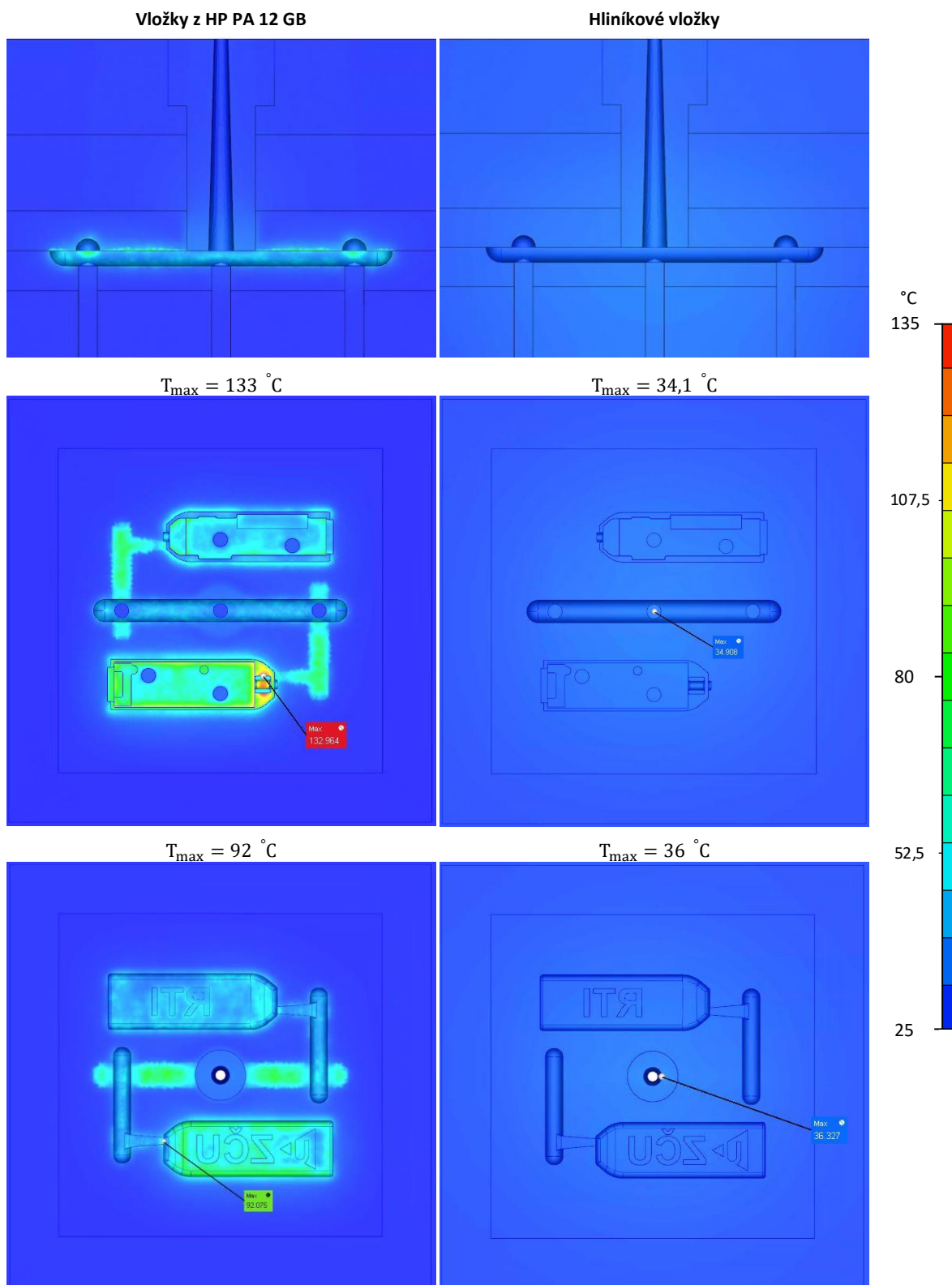
Obr. 7 – Simulace vstřikování – rozložení teploty v průběhu cyklu řezu formy

Z výsledků simulace na Obr. 7 je jasné, že neodjede-li vstřikovací jednotka daleko od formy, pomůže udržovat začátek vtokového kanálku trochu teplý. I tak při fázi chladnutí nastává riziko zamrznutí vtoku v ocelové vložce. Zhruba do 15 s dojde k zamrznutí vtokového kanálku. Zamrznutí lze oddálit prodloužením doby dotlaku, zvětšením tlaku, vstřikované teploty atd., avšak kvůli rozdílným vlastnostem oceli a plastu k zamrznutí vtokového kanálku dojde. Důvod, proč je v místě napojení vstupního kanálku na hlavní kanálek téměř vždy staženina, vysvětluje Obr. 7. Na konci fáze chladnutí je v tomto místě přibližně 100 °C, zatímco pod spodní čelní plochou ocelové vtokové vložky je teplota výrazně nižší a v horní části je vstupní kanálek v ocelové vtokové vložce již zamrzlý.

7 Porovnání vstřikování do plastových vložek s hliníkovými vložkami

Tato část textu navazuje na hlavní text, kde jsou uvedeny podmínky simulování vstřikování do hliníkových vložek. Na Obr. 8 je zobrazeno porovnání na rozložení teplot při fázi chladnutí ve vstřikovací formě, kde vlevo jsou zobrazeny vložky z HP PA 12 GB a uprostřed hliníkové vložky. Čas zobrazení je jak pro vložky z HP PA 12 GB, tak pro hliníkové vložky stejný, viz. hlavní text. Pro lepší zobrazení teplot na formě nebyly zobrazeny vstřikovaný díl a vtoková soustava, jelikož mají teplotu vyšší než vstřikovací forma. Řez formou je zobrazen na Obr. 8 nahoře, zde je vidět i vliv vtokové ocelové vložky. Po skrytí druhé poloviny formy je zobrazen pohled na pevnou část na Obr. 8 uprostřed a pohyblivou část formy na Obr. 8 dole. Nad těmito pohledy je uvedena maximální teplota na formě a v obrázku je praporek, který ukazuje na její

polohu. Zabarvení praporkku odpovídá teplotě dle teplotní stupnice zobrazené na Obr. 8 vpravo. Pro řezy i pohledy byla použita jednotná stupnice.



Obr. 8 – Simulace vstřikování, fáze chladnutí – rozložení teploty ve vložce z HP PA 12 GB po 11 s a hliníkové po 10 s

I když ocelí je teplo odebráno 4krát pomaleji než hliníkem, není vliv ocelové vtokové vložky zase tak znatelný jako v případě vložek z HP PA 12 GB. Na Obr. 8 jsou dobře vidět rozdílné vlastnosti mezi HP PA 12 GB a hliníkem. Plastem je teplo z výstřiku odebráno mnohem pomaleji než hliníkem. Za stejný časový úsek je hliníková vložka výrazně chladnější. To umožňuje hliníkovým vložkám výrazně zkrátit vstřikovací cyklus.

8 Použitá literatura

1. **HP Inc.** HP 3D Printing materials. [Online] [Citace: 2. 8. 2023.] Dostupné z: https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/materials.html?jumpid=va_ajmvr6tde9.
2. **CoreTech System Co., Ltd.** Návod pro Moldex3D. [Online] [Citace: 10. 1. 2023.] Dostupné z: <http://support.moldex3d.com/2022/en/index.html>.
3. —. BLM (Boundary Layer Mesh). [Online] [Citace: 5. 8. 2023.] Dostupné z: <https://www.moldex3d.com/products/software/moldex3d/blm/>.
4. **ARBURG GmbH + CoKG.** Prospektová dokumentace. [Online] [Citace: 28. 8. 2021.] Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/>.

Příloha č. 6

Validace teplotního zatížení plastové vložky 3D tištěné metodou MJF

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Měření termokamerou	2
3	Termokamera FLIR E5-XT.....	3
4	Porovnání výsledků po 1 cyklu.....	4
5	Porovnání výsledků po 10 cyklech.....	9
6	Vyhodnocení a porovnání cyklů	14
7	Použitá literatura	14

Seznam obrázků

Obr. 1 – Měřená oblast.....	2
Obr. 2 – Termokamera s parametry [1]	3
Obr. 3 – Detail měřeného povrchu	3
Obr. 4 – Porovnání teplot z termokamery se simulací po 1 cyklu	8
Obr. 5 – Porovnání teplot z termokamery se simulací po 10 cyklech.....	13

Seznam tabulek

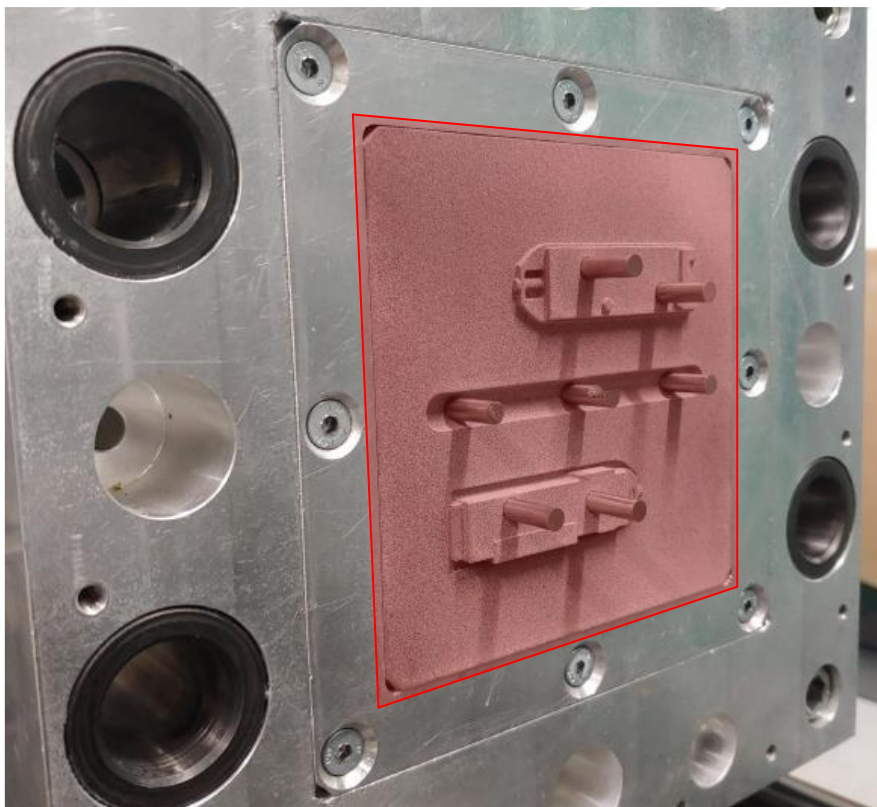
Tab. 1 – Porovnání maximálních hodnot z měření se simulací.....	14
---	----

1 Úvod

Tato příloha doplňuje validaci teplotního zatížení vložek popsané v hlavní části textu disertační práce. Zde jsou uvedeny především snímky z termokamery a porovnání ze simulace a částečný popis měření. Vzhledem k množství pořízených snímků a s nimi porovnávané výsledky ze simulace nebylo možné tuto část zahrnout do hlavního části textu. Vyhodnocení a závěr je provedeno v hlavní části textu této práce.

2 Měření termokamerou

Jak simulace, tak i měření termokamerou ukázaly, že větších teplot je dosahováno na pohyblivé vložce, než na pevné, proto měřenou oblastí je pohyblivá vložka upnutá v pohyblivé části formy zobrazená na Obr. 1. červeně.



Obr. 1 – Měřená oblast

Měřenou oblast na Obr. 1 je možné měřit jen při otevření formy, které není velké, a tím komplikuje umístění termokamery. Nabízejí se dvě možnosti, kam umístit termokameru. První znamená umístit termokameru mimo vstříkolis, a tím je možné dodržet minimální doporučenou vzdálenost pro měření. Ovšem úhel, pod kterým by se měřilo, by byl příliš ostrý a zkresloval by pořízený snímek. Nejlepší řešení by spočívalo v umístění termokamery tak, aby měřila kolmo k dělicí rovině. I přes maximální otevření formy a umístěním termokamery co nejbližší pevné části formy, není možné dodržet minimální vzdálenost pro měření. Při obou možnostech měření je nutné počítat s nějakou dobou nutnou k otevření krytu vstříkolisu. Není možné pořizovat snímek měřené oblasti termokamerou přes průhledné plexisklo krytu vstříkolisu. Důvodem je okolí měřené oblasti, viz Obr. 1, které je tvořeno hliníkem, jehož vlastností je se lesknout. Odlesky by se promítaly do termokamery a pořízený snímek by neměl požadovanou kvalitu. Po otevření krytu je možné u první možnosti rovnou pořizovat snímek, u druhé je nutné počítat ještě s dobou nutnou pro umístění termokamery do otevřeného prostoru formy. Pro pořízení snímku měřené oblasti byla vybrána druhá možnost. I když nebude dodržena minimální vzdálenost a pořízení zabere delší dobu, nebude docházet ke zkreslení teplotního spektra posunem kvůli úhlu snímání povrchu. Pořízení prvního snímku trvalo přibližně 3 s.

3 Termokamera FLIR E5-XT

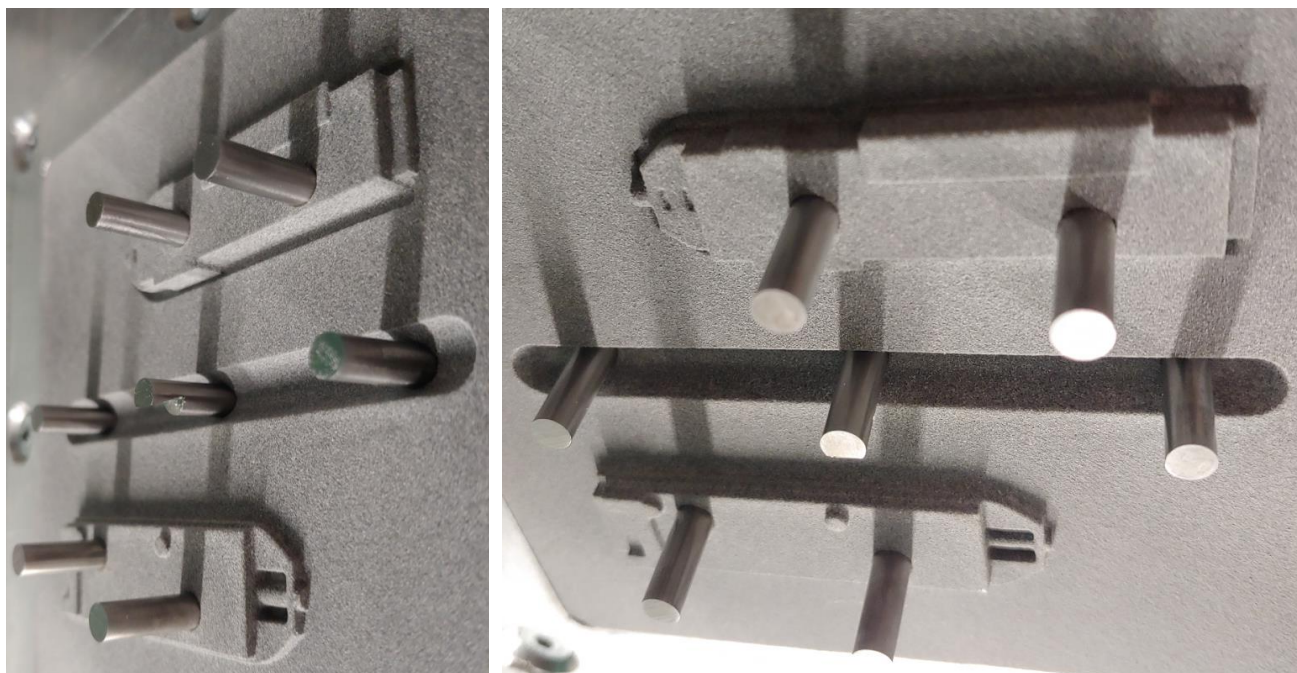
K měření teploty povrchu vložky byla zvolena termokamera FLIR E5-XT, zobrazena na Obr. 2 vlevo. Jedná se o snadno přemístitelnou kameru vhodnou pro orientační měření teploty. Princip termokamery kamery je založen na vlastnosti těles vyřazovat při teplotě vyšší než je absolutní nula elektromagnetické záření. Termokamera stejně jako videokamera snímá tělesa a pomocí termočipu vyhodnocuje intenzitu záření. Lze tak vyhodnocovat pouze teplotu na povrchu těles. Pořízený snímek je termokamerou zpracován a pořízený obraz je zobrazen v barevné stanici charakterizující teplotu těles. Základní parametry termokamery FLIR E5-XT jsou uvedeny v tabulce na Obr. 2 vpravo [1].



Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozlišení termočipu	120 x 90	px
MSX rozlišení	320 x 240	px
Teplotní rozsah	-20 až 400	°C
Přesnost měření	± 2	°C
Při teplotě okolí 10 až 35 °C a teplotě objektu nad 0 °C Z a jiných podmínek ±2 %		
Teplotní citlivost	0,1	°C
Nastavení emisivity	0,1 až 1	
Zorné pole	45x34	°
Minimální vzdálenost	50	mm
Ostření	Pevné ohnisko	
Rozměry	244 x 95 x 140	mm
Hmotnost	575	g

Obr. 2 – Termokamera s parametry [1]

Před začátkem měření je nutné stanovit emisivitu vzorového povrchu. Často pro kalibraci měření je využíváno černého nátěru, který pomáhá snížit odlesky těles a je u něj známá emisivita. Emisivita může nabývat hodnot od 0 do 1, kdy 1 odpovídá absolutně černému tělesu. Jelikož cílem měření je zjistit teplotu na povrchu plastové vložky, zobrazené na Obr. 1 a v detailech na Obr. 3, lze využít barvy vložky a emisivita byla stanovena na 0,95.



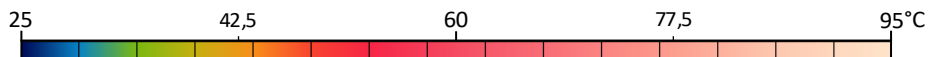
Obr. 3 – Detail měřeného povrchu

4 Porovnání výsledků po 1 cyklu

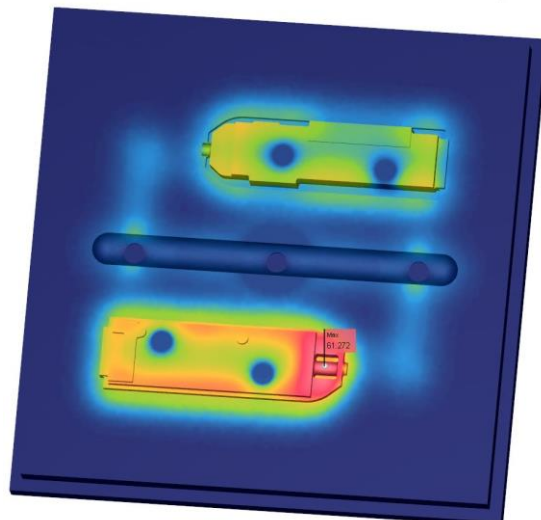
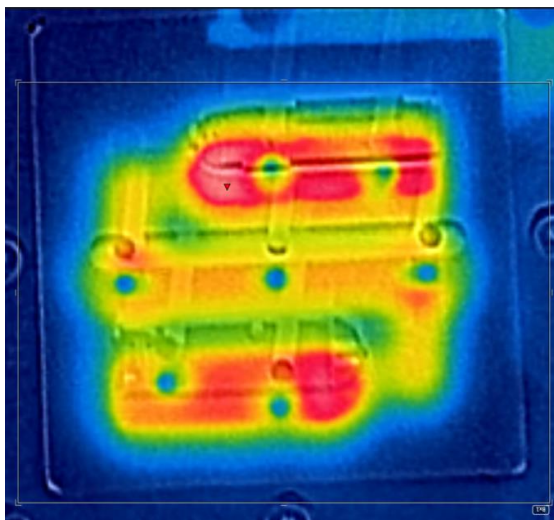
Čas
[s]

Termokamera

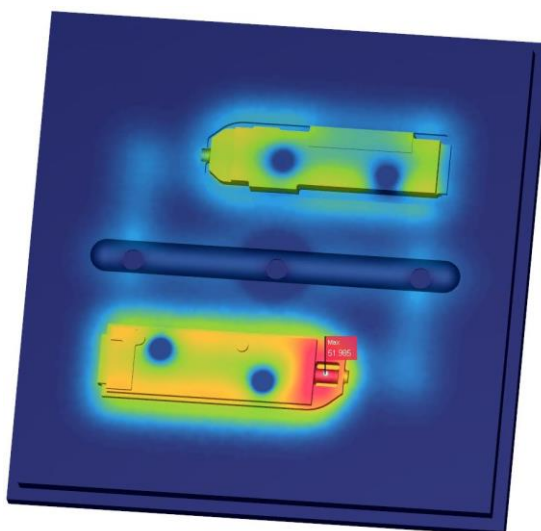
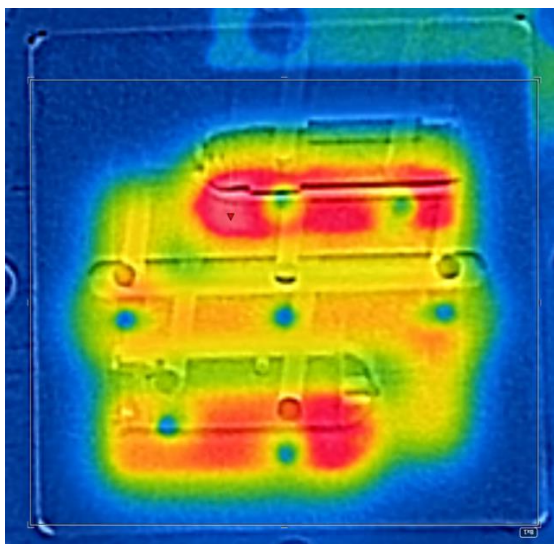
Simulace



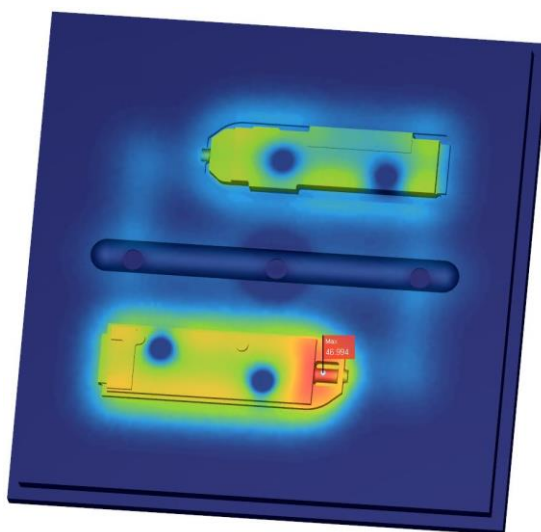
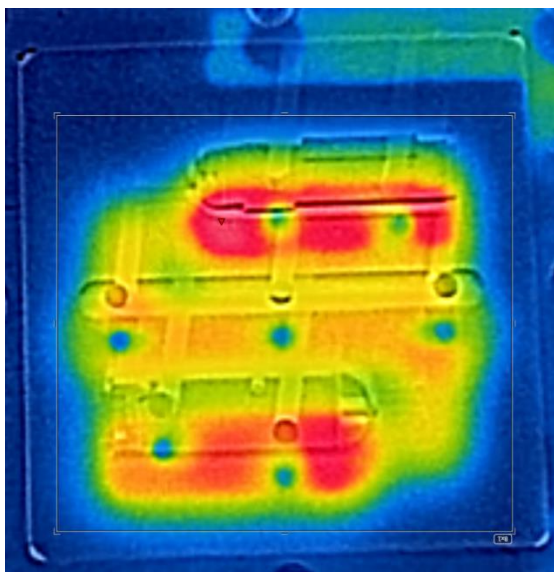
3
a
0



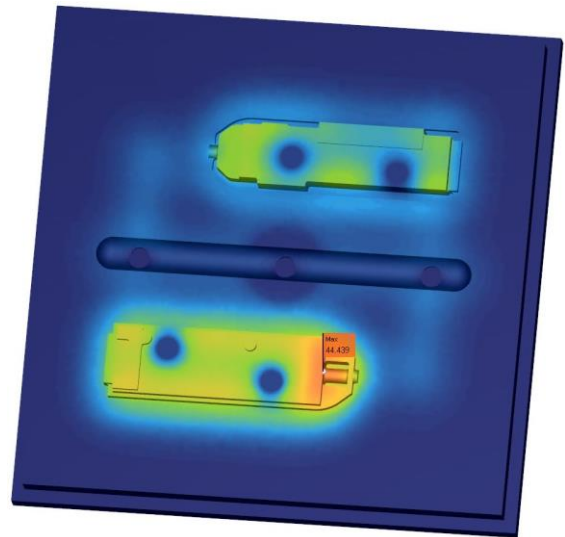
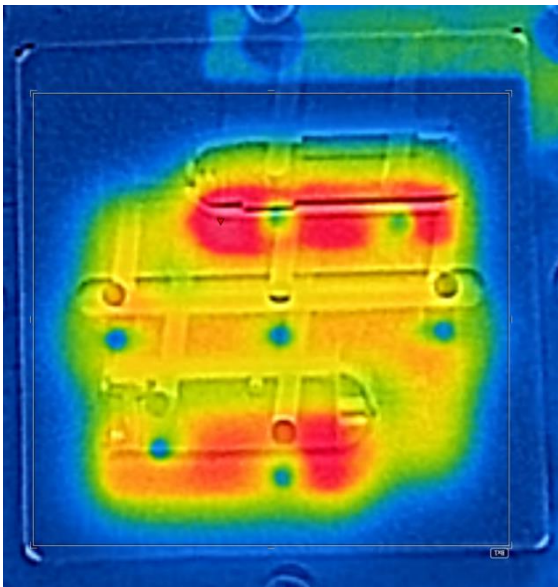
10



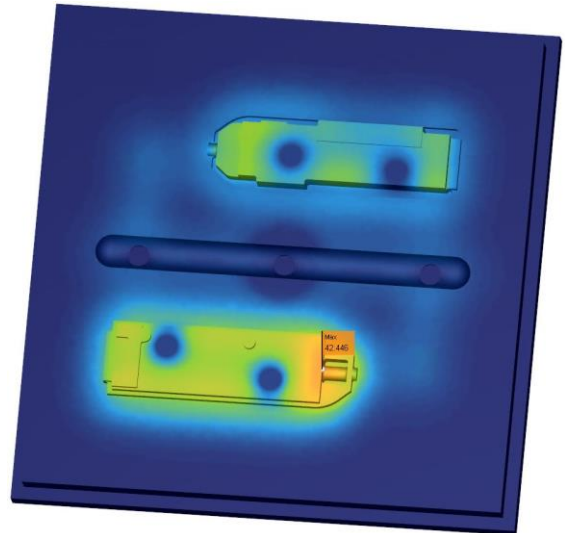
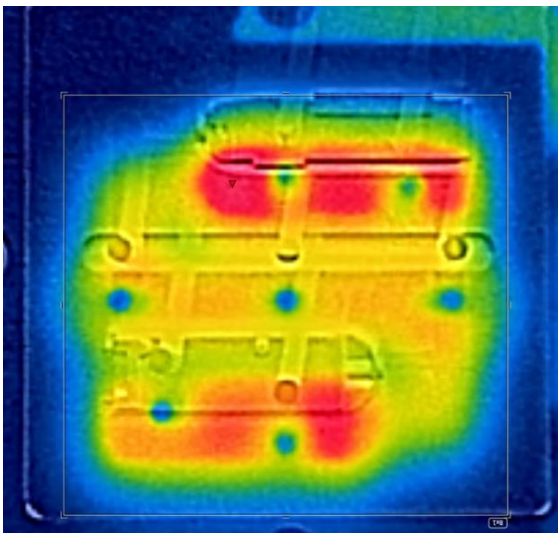
20



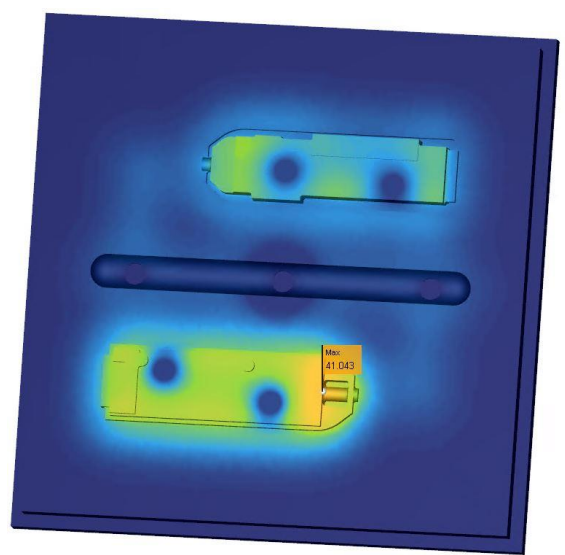
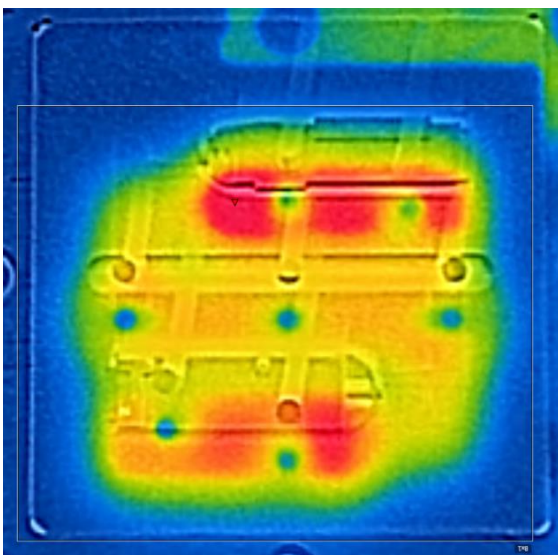
30



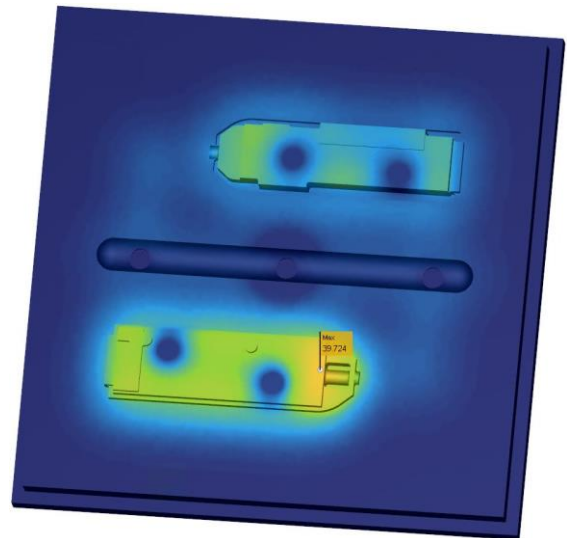
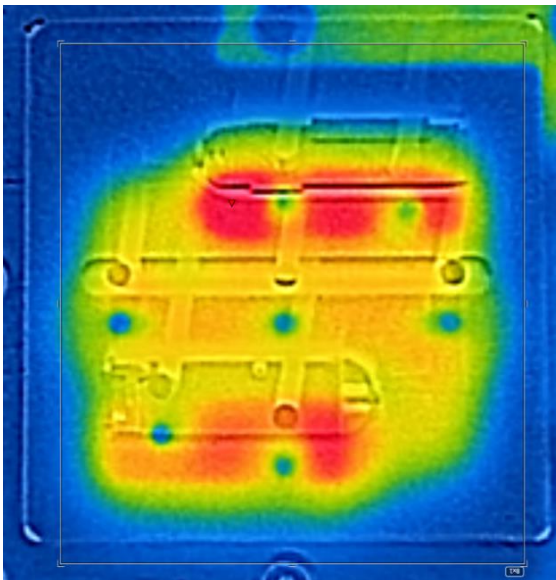
40



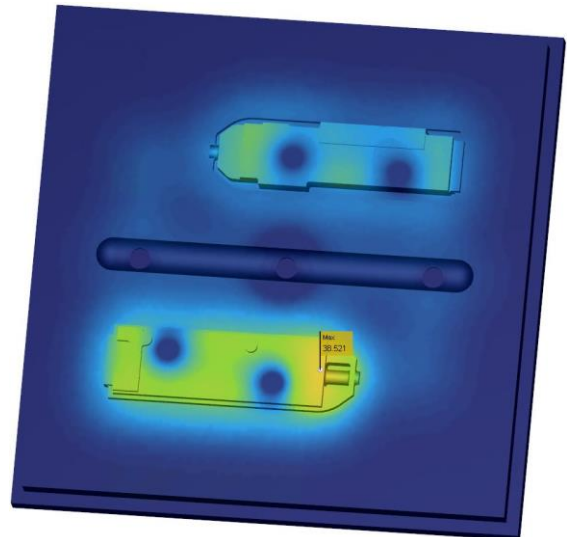
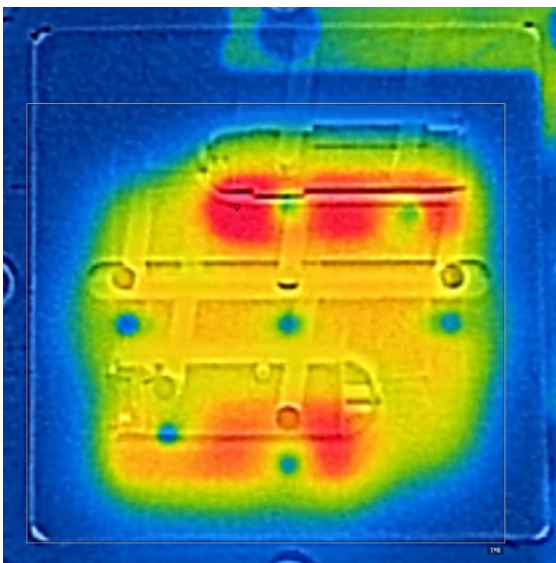
50



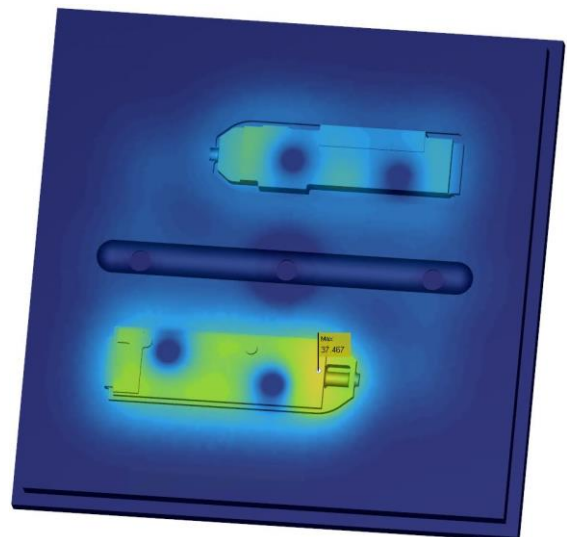
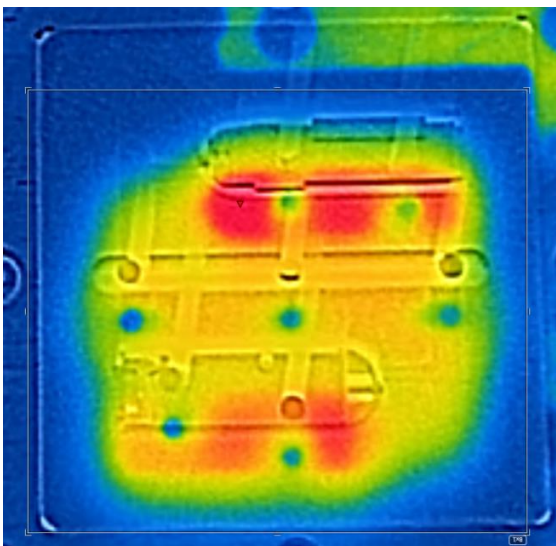
60



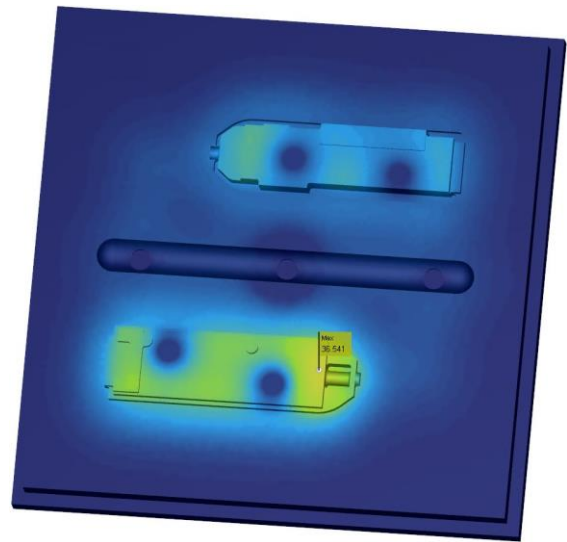
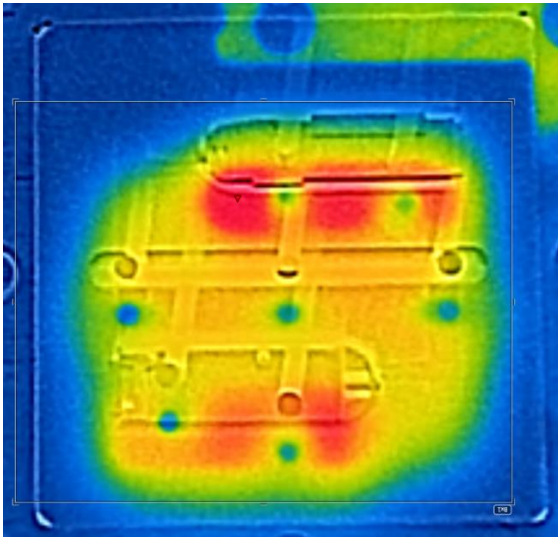
70



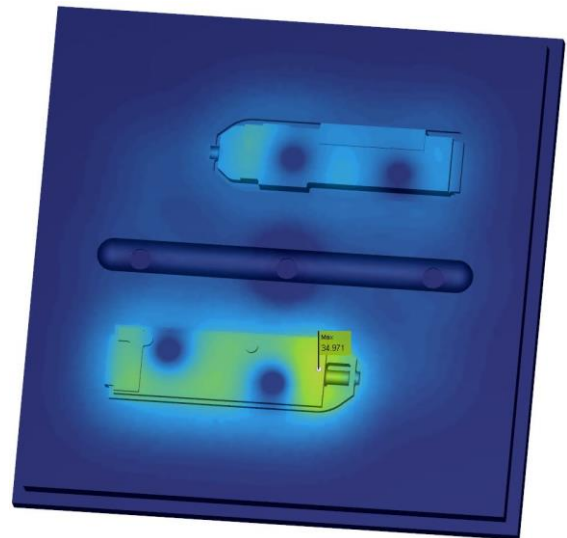
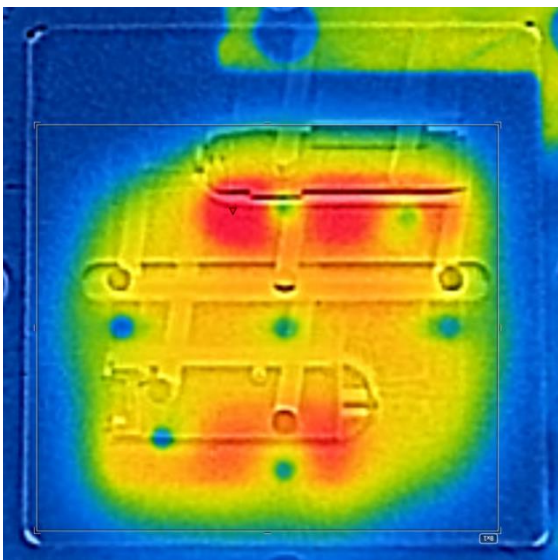
80



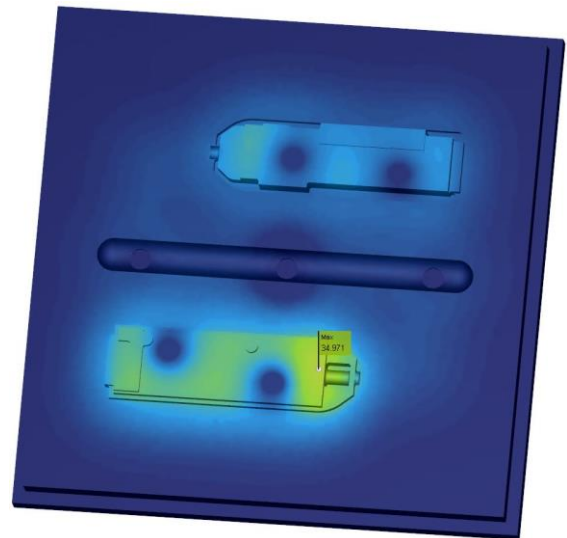
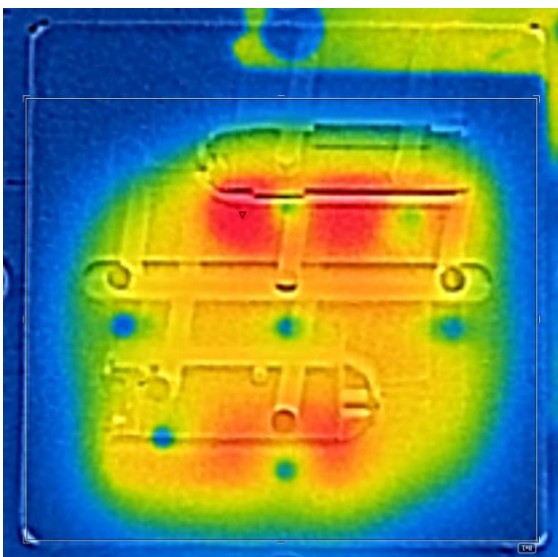
90



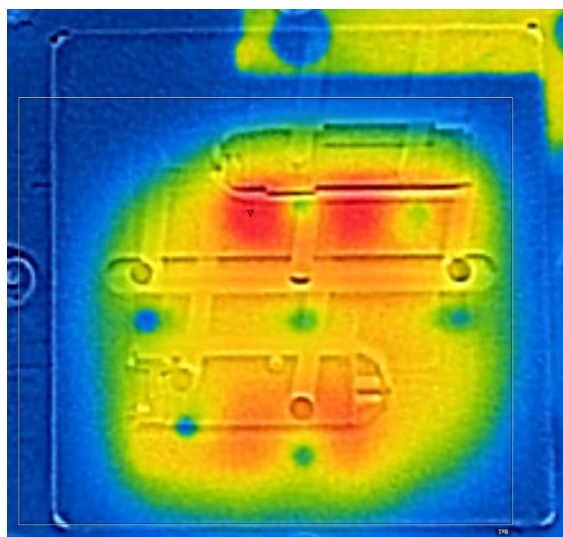
120



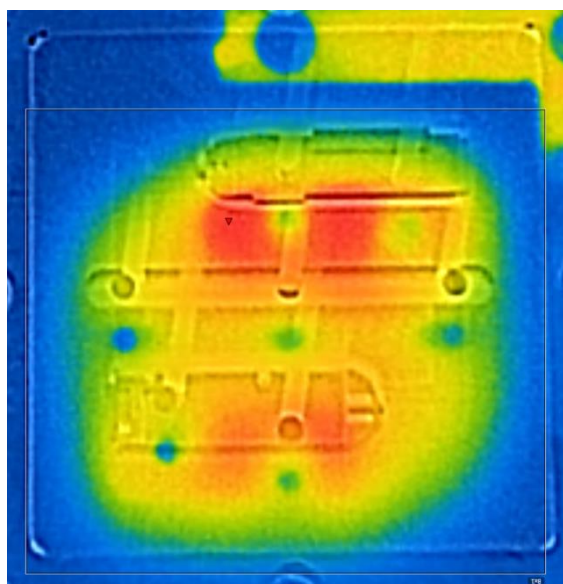
150



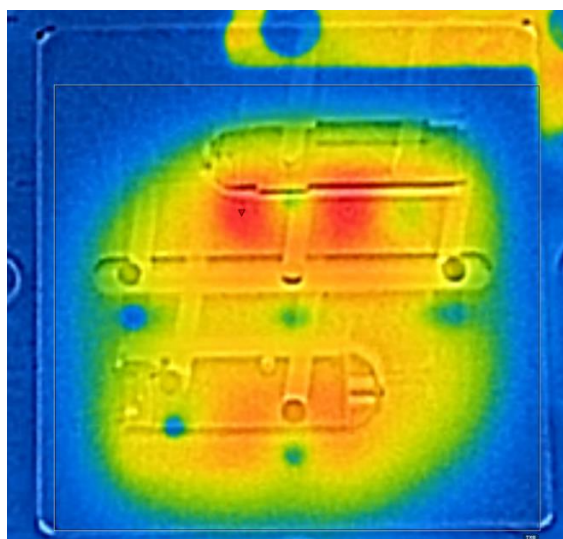
180



210



240



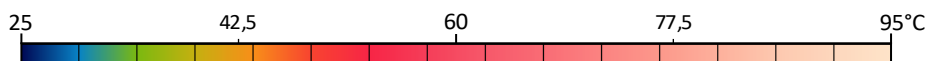
Obr. 4 – Porovnání teplot z termokamery se simulací po 1 cyklu

5 Porovnání výsledků po 10 cyklech

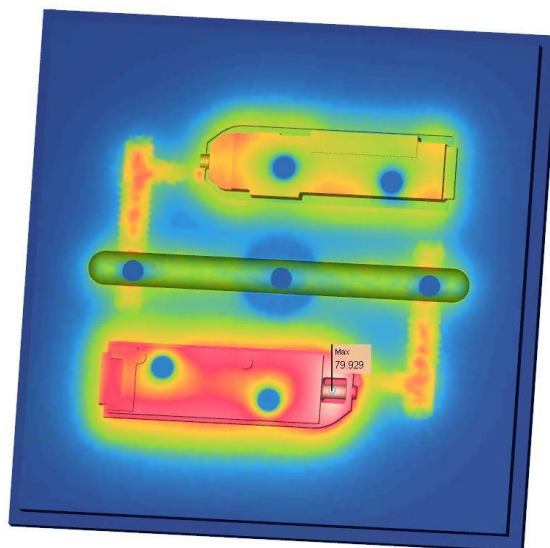
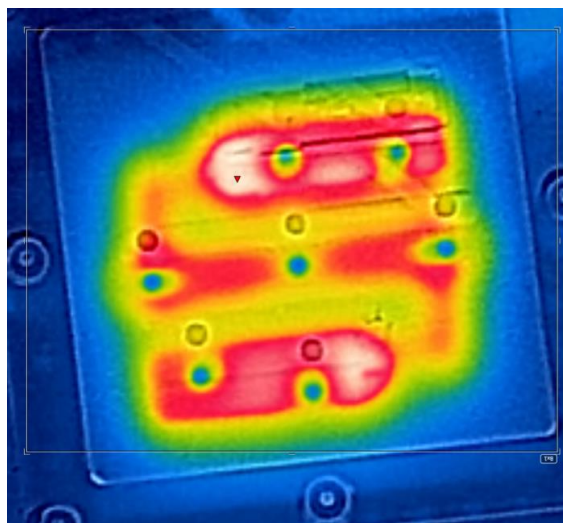
Čas
[s]

Termokamera

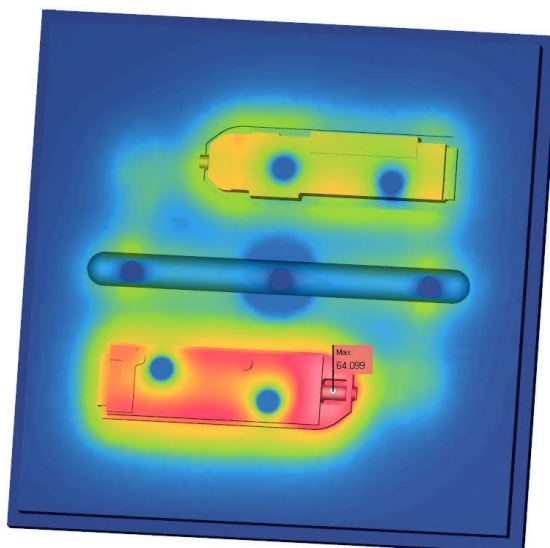
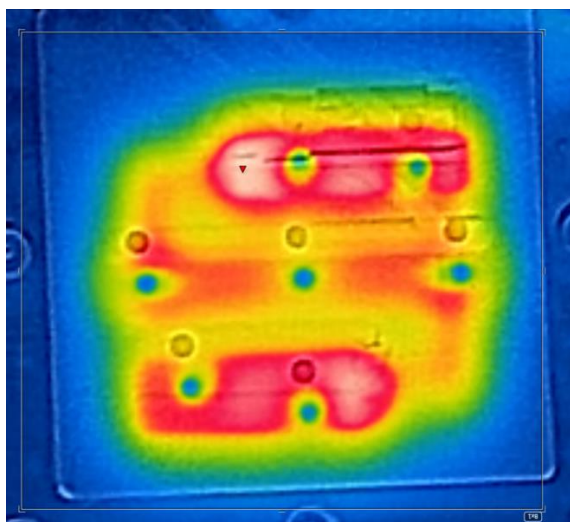
Simulace



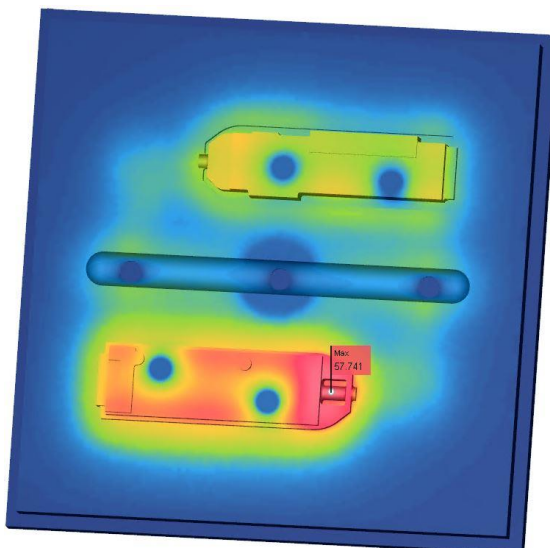
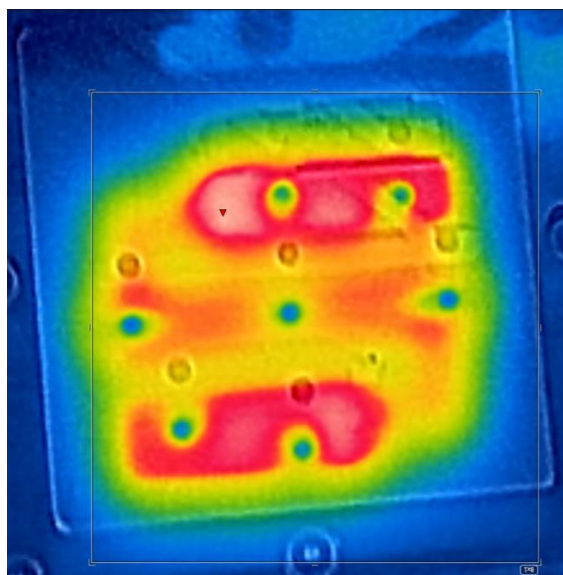
3
a
0



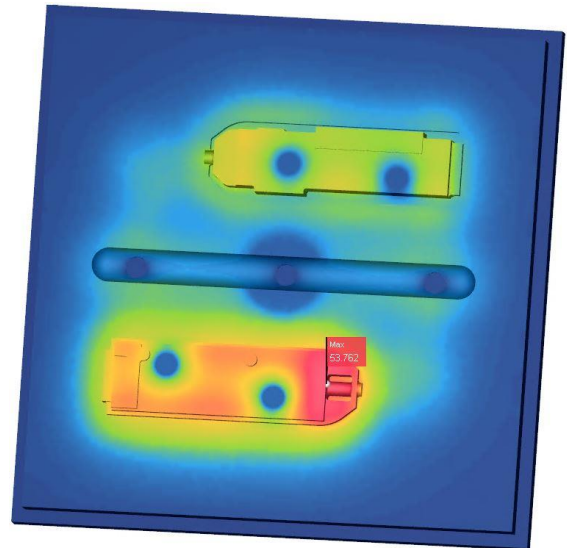
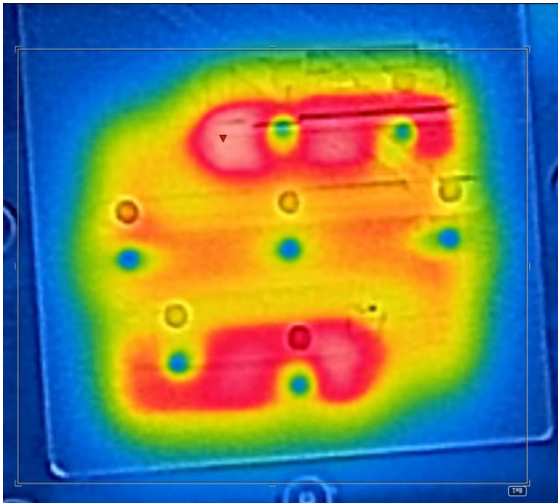
10



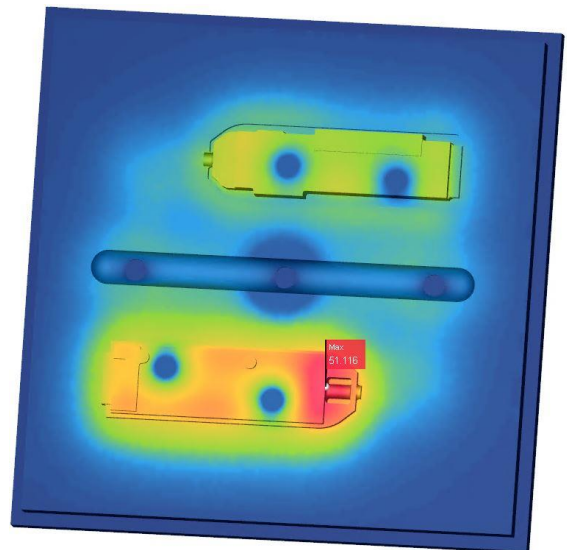
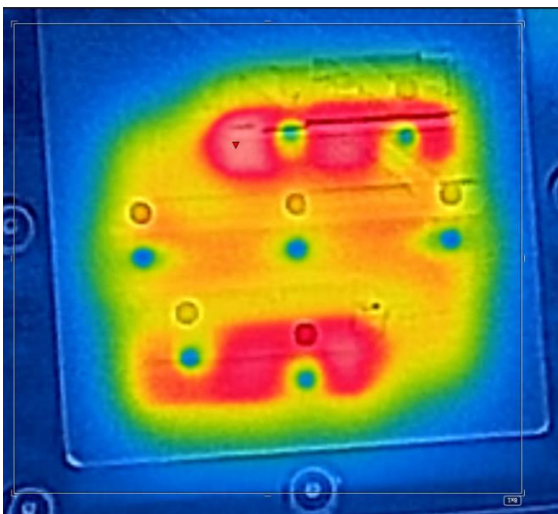
20



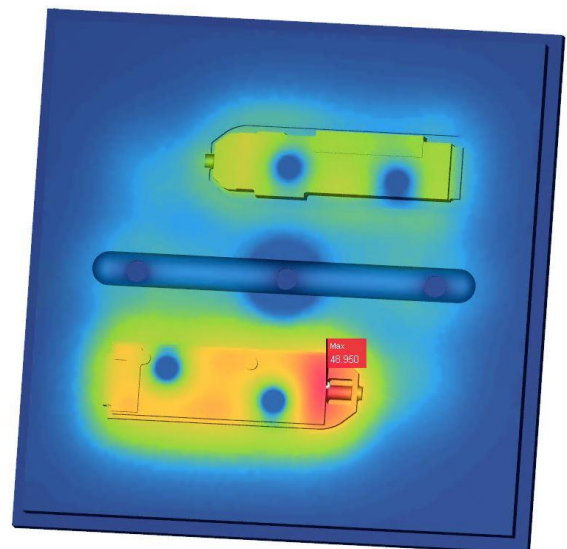
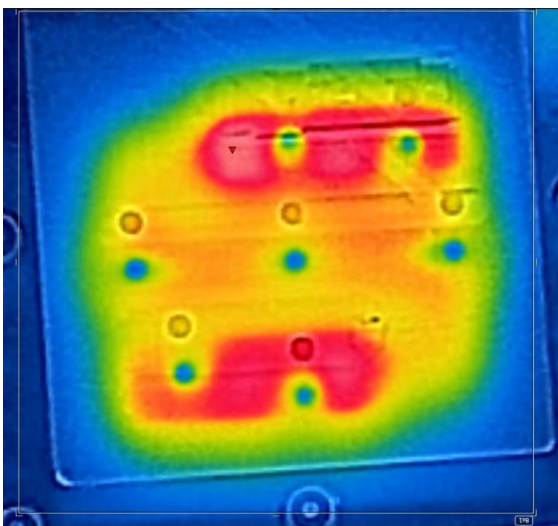
30



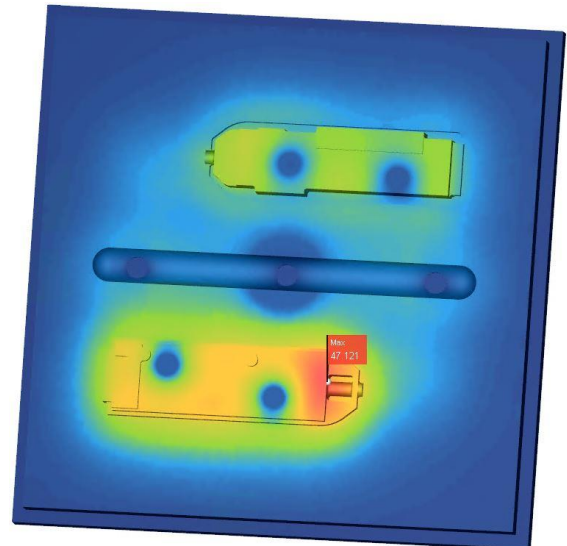
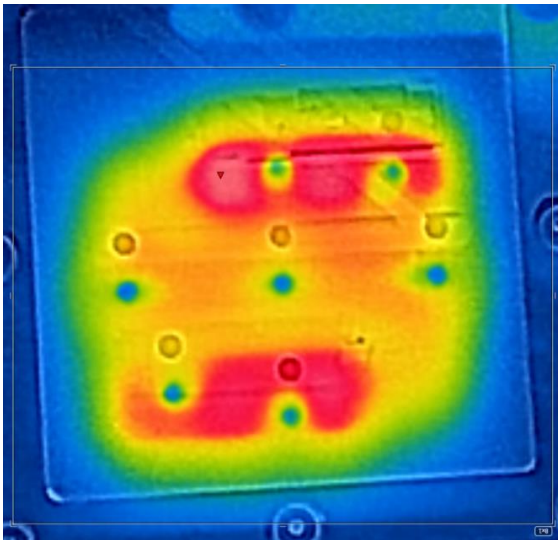
40



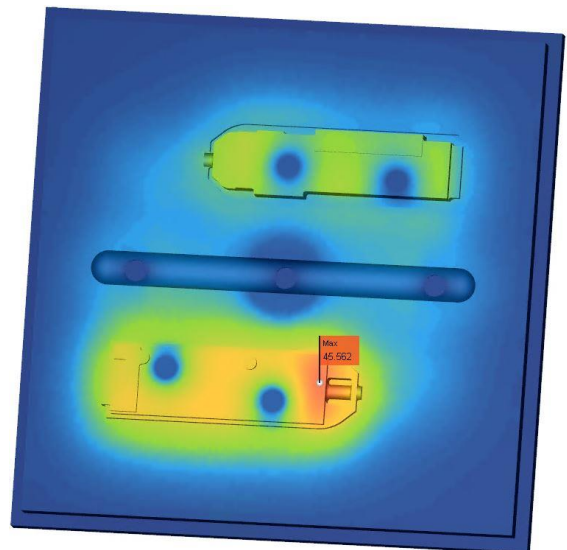
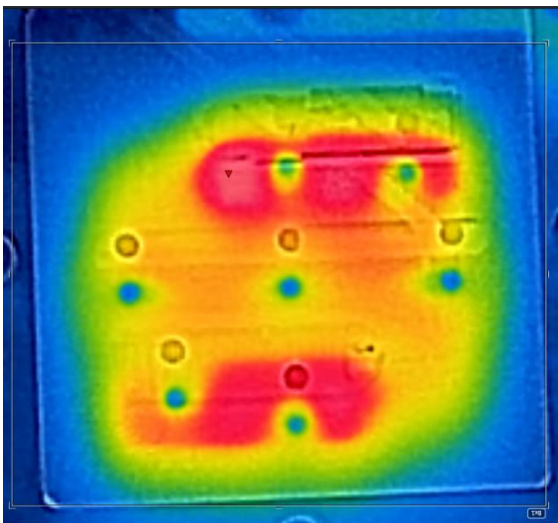
50



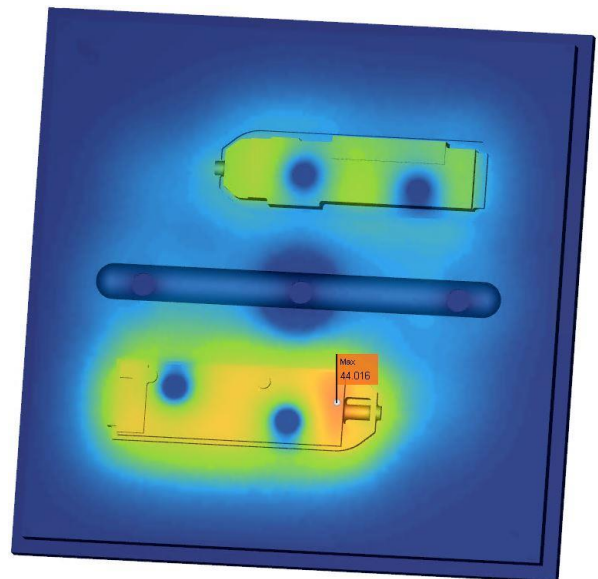
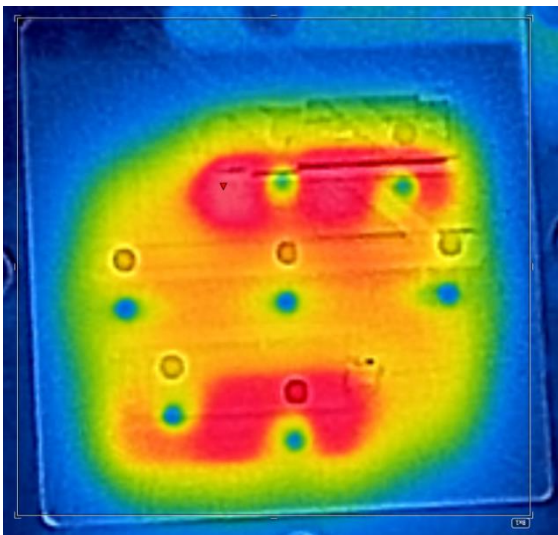
60



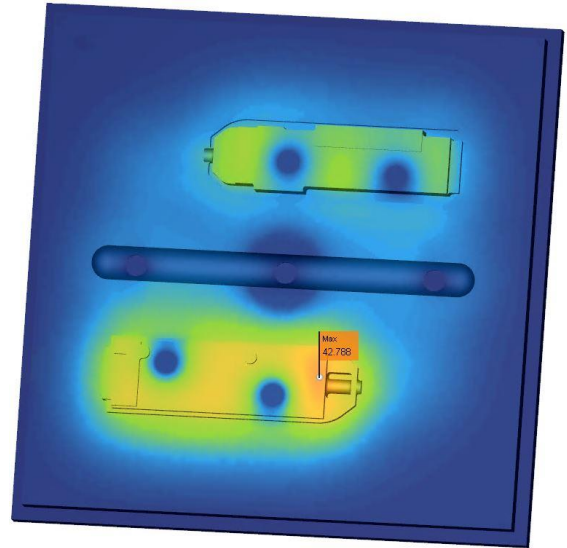
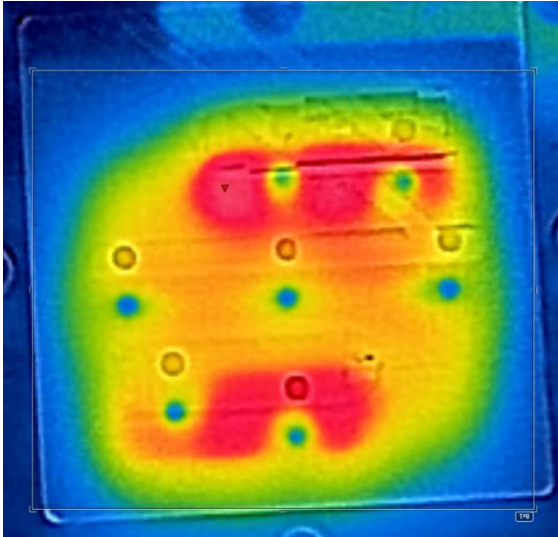
70



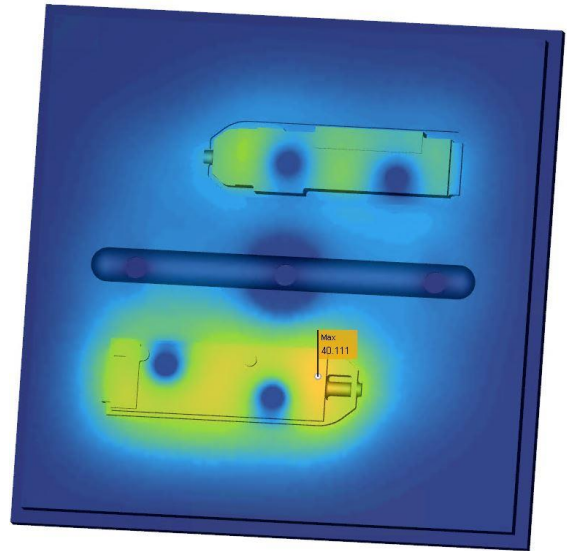
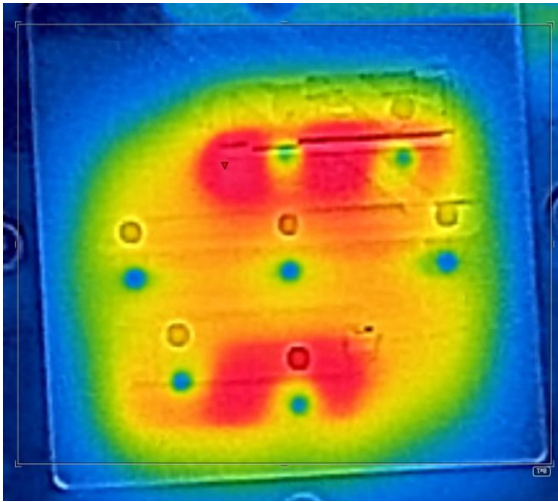
80



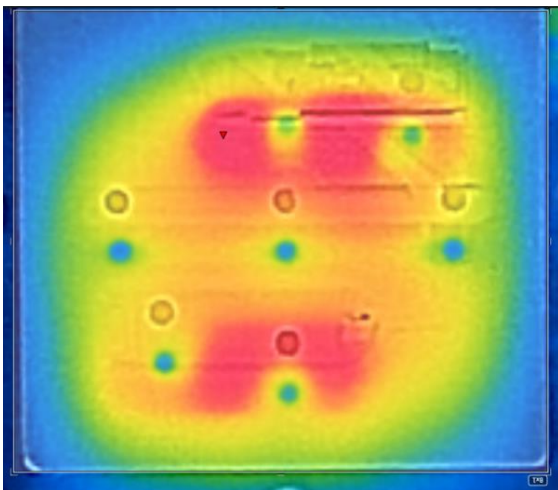
90



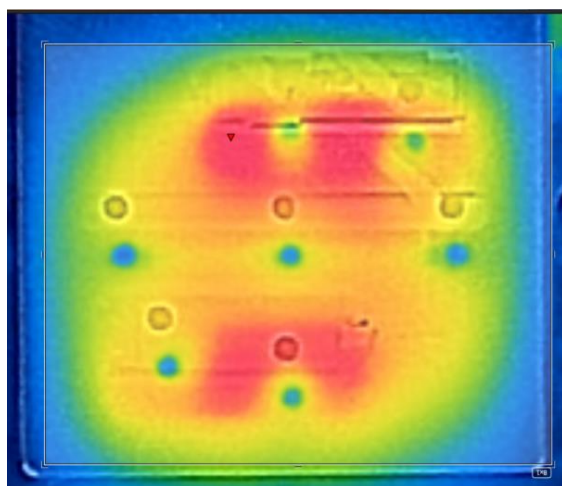
120



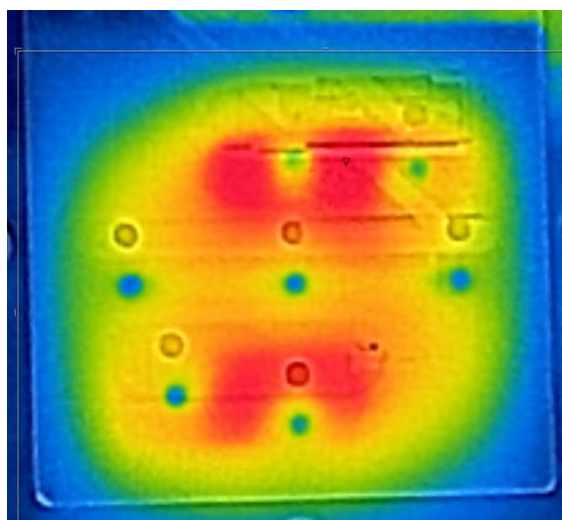
150



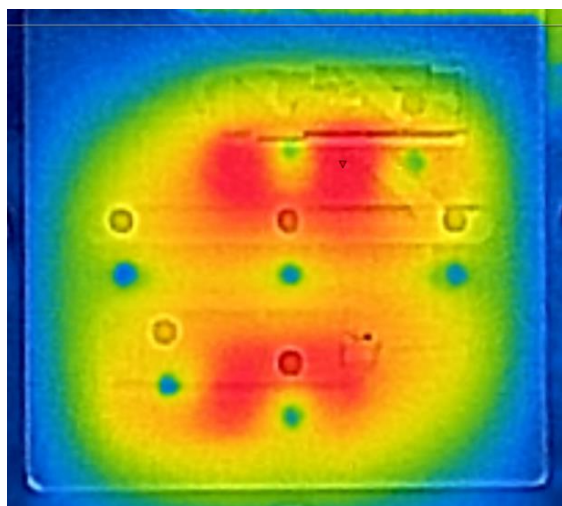
180



210



240



Obr. 5 – Porovnání teplot z termokamery se simulací po 10 cyklech

6 Vyhodnocení a porovnání cyklů

Aby bylo možné porovnat rozložení teplot z měření se simulací, muselo být sjednoceno barevné spektrum na spektrum používané termokamerou. To znamenalo upravit barevné spektrum v simulaci. Výsledky rozložení teplot ze simulace odpovídají plně stupnici zobrazené na Obr. 4 a Obr. 5 vpravo. I když bylo nastaveno stejné rozmezí teplot pro vyhodnocování snímků z termokamery, docházelo k mírnému posunutí barevného spektra při teplotách blízkých se k minimu stupnice. Posunutí barevného spektra se zvětšovalo s delší dobou chladnutí, tj poklesu teplot. Ačkoliv posunutí stupnice není velké, může způsobovat nepřesnost. Z tohoto důvodu byla stupnice jak po provedení 1 cyklu, tak po 10 cyklech uvedena pouze na začátku Obr. 4 a Obr. 5. V závěru chladnutí plastových vložek je rozdíl teplotního spektra snímku oproti stupnici největší. Avšak v Tab. 1 jsou uvedeny maximální hodnota teploty pro každý měřený časový úsek. Při vyhodnocení bylo využito údaje maximální teploty a barevného spektra rozložení.

Čas [s]	Termokamera		Simulace	
	1 cyklus	10 cyklů	1 cyklus	10 cyklů
0	74,2	94,7	61,3	79,9
10	67,1	87,3	52	64
20	63	82,3	47	57,7
30	59,4	78,7	44,4	53,8
40	56,8	75	42,5	51,1
50	54,1	71,8	41	49
60	51,9	69,2	39,7	47,1
70	49,9	66,3	38,5	45,4
80	48,6	64	37,5	44
90	47,3	62	36,5	42,8
120	43,6	57	35	40,1
150	41,1	52,4		
180	39,2	49,4		
210	37,5	47,1		
240	36,1	44,6		

Tab. 1 – Porovnání maximálních hodnot z měření se simulací

Vyhodnocení validace simulace měřením termokamerou je provedena v hlavní části textu. Bohužel simulace neurčila stejné místo s maximální teplotou, jako termokamera. Možné důvody jsou popsány v hlavní části textu. Dále hlavní část textu obsahuje závěrečné shrnutí simulace její validace.

7 Použitá literatura

1. **Blue Panther s.r.o.** Termokamera Flir E5 XT. [Online] [Citace: 3. 8. 2023.] Dostupné z: <https://www.blue-panther.cz/termokamera-flir-e5>.

Příloha č. 7

Zatékavost plastu vstřikovaného do plastových vložek 3D tištěných metodou MJF

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Testování.....	2
3	Hliníkové vložky.....	2
4	Vložky z HP PA 12 GB.....	3
5	Porovnání.....	4
6	Spreje.....	5
6.1	Silikonový sprej.....	5
6.2	PTFE – sprej.....	7
6.3	AT – 44 sprej.....	8
6.4	Sprej – Oddělovač forem.....	10
6.5	Porovnání sprejů.....	12

Seznam obrázků

Obr. 1	– Pohyblivá vložka z HP PA 12 GB pro zkoušku zatékavosti.....	2
Obr. 2	– Vyhodnocení délky zatečení v hliníkových vložkách.....	3
Obr. 3	– Vyhodnocení délky zatečení ve vložkách z HP PA 12 GB.....	4
Obr. 4	– Porovnání rozdílu délek zatečení ve vložkách z HP PA 12 GB s hliníkovými vložky.....	5
Obr. 5	– Vyhodnocení délky zatečení při použití silikonové vrstvy.....	6
Obr. 6	– Vstřikovací vložky z HP PA 12 GB po testování silikonové vrstvy.....	6
Obr. 7	– Vyhodnocení délky zatečení při použití vrstvy PTFE.....	7
Obr. 8	– Vstřikovací vložky z HP PA 12 GB po testování vrstvy PTFE.....	8
Obr. 9	– Vyhodnocení délky zatečení při použití vrstvy AT – 44.....	9
Obr. 10	– Vstřikovací vložky po testování z HP PA 12 GB po testování vrstvy AT – 44.....	9
Obr. 11	– Vyhodnocení délky zatečení použití vrstvy nanášené Oddělovačem forem.....	10
Obr. 12	– Výstřik s upnutou vložkou z HP PA 12 GB, na kterou byla nanášena vrstva Oddělovačem forem.....	11
Obr. 13	– Vstřikovací vložky z HP PA 12 GB po testování vrstvy nanášené oddělovačem forem.....	11
Obr. 14	– Porovnání rozdílu délek zatečení při použití vrstev nanášené spreji.....	12

Seznam tabulek

Tab. 1	– Délky zatečení vstřikovaného plastu v hliníkových vložkách.....	2
Tab. 2	– Délky zatečení vstřikovaného plastu ve vložkách z HP PA 12 GB.....	3
Tab. 3	– Délky zatečení při použití silikonové vrstvy.....	5
Tab. 4	– Délky zatečení při použití vrstvy PTFE.....	7
Tab. 5	– Délky zatečení při použití vrstvy AT – 44.....	8
Tab. 6	– Délky zatečení při použití vrstvy nanášené Oddělovačem forem.....	10

1 Úvod

Tato příloha doplňuje zkoušku zatékavosti popsanou v hlavní části textu disertační práce. Zde jsou uvedeny naměřené a vyhodnocené jednotlivé délky zatékavosti ve vložkách z HP PA 12 GB a hliníkových vložkách a dále porovnání hodnot z obou vložek, které je více popsáno v hlavní části textu. V příloze jsou uvedeny a vyhodnoceny jednotlivé délky zatékavosti při nanesení na povrch vložky z HP PA 12 GB vrstvy sprejem. Dále je zde porovnání vlivu vrstev na délku zatečení, která je více popsána v hlavní části textu.

2 Testování

Příprava vstřikování, včetně vstřikovacích podmínek a popsání variant testování je uvedeno v hlavní části textu. Vložka pro testování z HP PA 12 GB je zobrazena na Obr. 1.



Obr. 1 – Pohyblivá vložka z HP PA 12 GB pro zkoušku zatékavosti

Vyhodnocení naměřených hodnot

Pro stanovení délky zatečení bylo použito hodnot ze 12 vstřikovaných dílů. Průměrná hodnota délky zatečení byla stanovena podle vzorce (1).

$$\text{Průměr} = \frac{(\text{Součet naměřených hodnot délek} - \text{Min. hodnota} - \text{Max. hodnota})}{\text{Počet} - 2} \quad (1)$$

Snahou minimalizovat nepřesnost měření byly min. a max. hodnoty délek odečteny od součtu všech naměřených délek, a proto ve jmenovateli byl celkový počet snížen o 2.

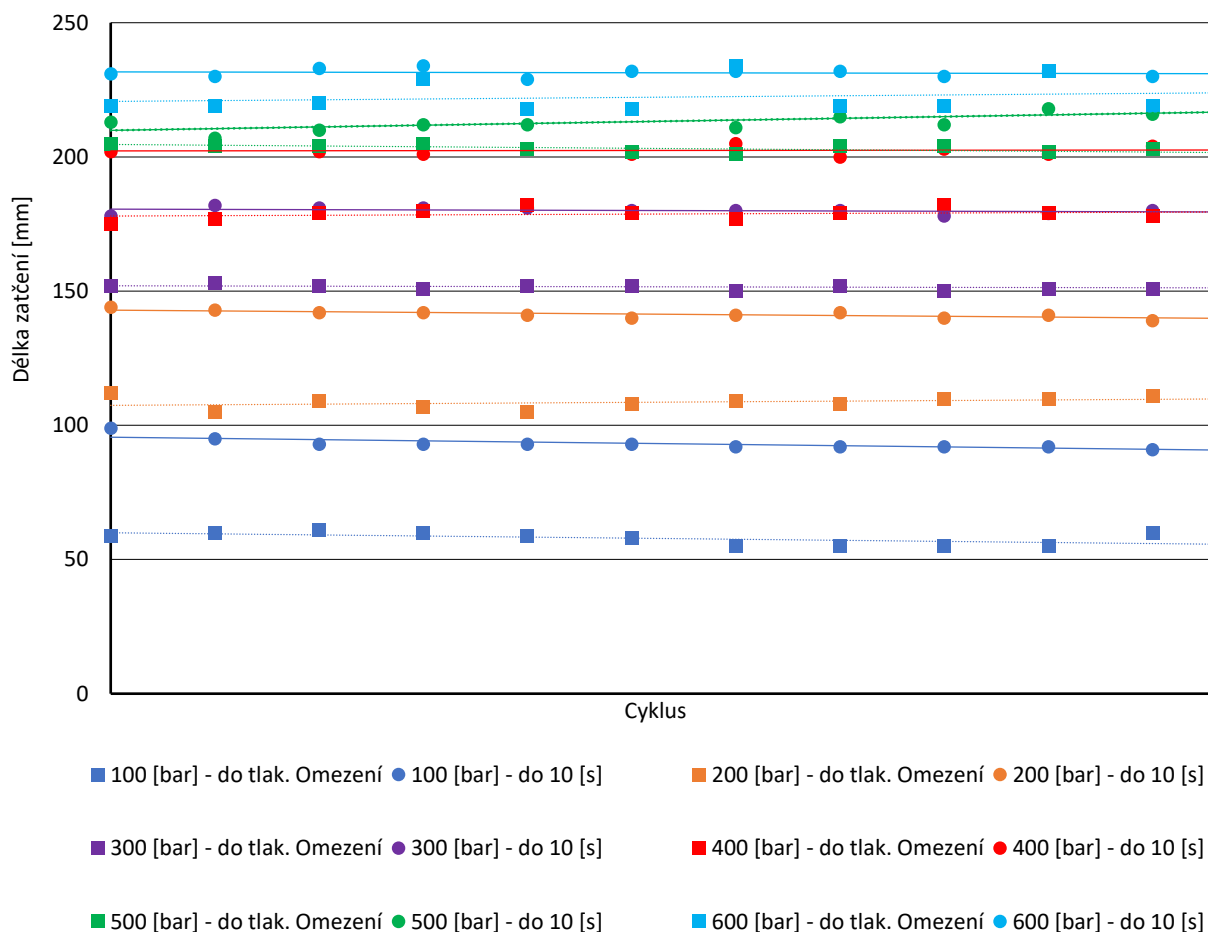
3 Hliníkové vložky

Naměřené hodnoty délek zatečení v hliníkových vložkách a vypočítaná průměrná hodnota pro každou variantu testování v každém měřeném tlaku jsou uvedeny v Tab. 1.

Tlak [bar]	Plnění	Délka zatečení [mm]												Průměr
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	Do tlak. omezení	59	60	61	60	59	58	55	55	55	55	60	56	57,7
	Do 10 s	99	95	93	93	93	93	92	92	92	92	91	92	92,7
200	Do tlak. omezení	112	105	109	107	105	108	109	108	110	110	111	110	108,7
	Do 10 s	144	143	142	142	141	140	141	142	140	141	139	141	141,3
300	Do tlak. omezení	152	153	152	151	152	152	150	152	150	151	151	153	151,6
	Do 10 s	178	182	181	181	181	180	180	180	178	179	180	180	180
400	Do tlak. omezení	175	177	179	180	182	179	177	179	182	179	178	178	178,8
	Do 10 s	202	204	202	201	203	201	205	200	203	201	204	203	202,4
500	Do tlak. omezení	205	204	204	205	203	202	201	204	204	202	203	200	203,2
	Do 10 s	213	207	210	212	212	218	211	215	212	218	216	217	213,6
600	Do tlak. omezení	219	219	220	229	218	218	234	219	219	232	219	222	221,6
	Do 10 s	231	230	233	234	229	232	232	232	230	232	230	231	231,3

Tab. 1 – Délky zatečení vstřikovaného plastu v hliníkových vložkách

Hodnoty uvedené v Tab. 1 byly vyneseny do grafu na Obr. 2. Ve všech grafech v této příloze bylo použito stejných značek a stylu proložení hodnot jako v hlavním textu práce. Hodnoty délek zatečení z varianty měření do tlakového omezení mají symbol hodnot čtvereček a jsou proloženy čárkovanou čarou. Hodnoty délek zatečení u varianty plnění po dobu 10 s mají symbol hodnot kolečko a jsou proloženy plnou čarou.



Obr. 2 – Vyhodnocení délky zatečení v hliníkových vložkách

Z grafu na Obr. 2 je vidět, že rozptyl měřených délek zatečení je malý. Dále je z grafu vidět, že s rostoucím tlakem se délky zatečení přibližovaly (čárkované čáry k plným).

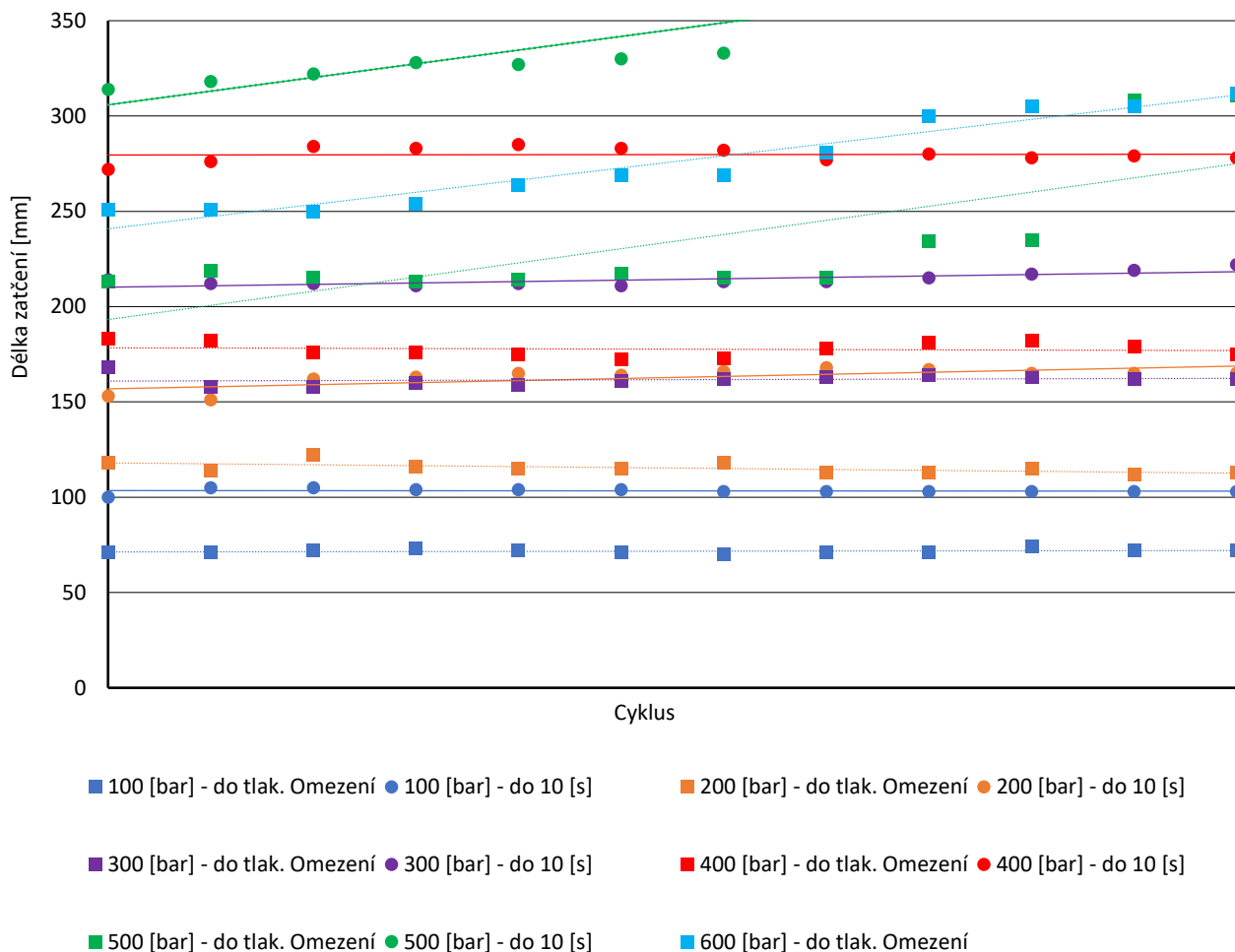
4 Vložky z HP PA 12 GB

Naměřené hodnoty délek zatečení ve vložkách z HP PA 12 GB a vypočítaná průměrná hodnota pro každou variantu testování v každém měřeném tlaku jsou uvedeny v Tab. 2.

Tlak [bar]	Plnění	Délka zatečení [mm]												Průměr
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	Do tlak. omezení	71	71	72	73	72	71	70	71	71	74	72	72	71,6
	Do 10 s	100	105	105	104	104	104	103	103	103	103	103	103	103,1
200	Do tlak. omezení	118	114	122	116	115	115	118	113	113	115	112	113	115
	Do 10 s	153	151	162	163	165	164	166	168	167	165	165	165	163,5
300	Do tlak. omezení	168	158	158	160	159	161	162	163	164	163	162	162	161,4
	Do 10 s	214	212	212	211	212	211	213	213	215	217	219	222	213,8
400	Do tlak. omezení	183	182	176	176	175	172	173	178	181	182	179	175	177,7
	Do 10 s	272	276	284	283	285	283	282	277	280	278	279	278	280
500	Do tlak. omezení	213	219	215	213	214	217	215	215	234	235	308	311	228,5
	Do 10 s	314	318	322	328	327	330	333	355	374	375	383	383	344,6
600	Do tlak. omezení	251	251	250	254	264	269	269	281	300	305	305	312	274,9
	Do 10 s													

Tab. 2 – Délky zatečení vstřikovaného plastu ve vložkách z HP PA 12 GB

Hodnoty uvedené v Tab. 2 byly vyneseny do grafu na Obr. 2.



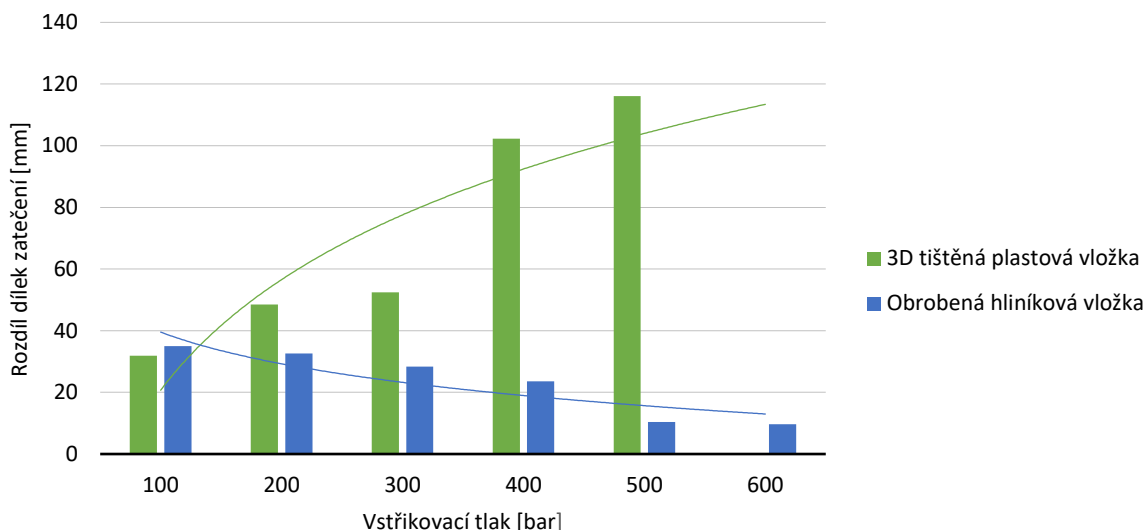
Obr. 3 – Vyhodnocení délky zatečení ve vložkách z HP PA 12 GB

Z grafu na Obr. 3 je vidět, že rozptyl měřených délek je při vyšších omezujících tlacích velký. Dokonce v některých případech byla délka zatečení 383 mm, což je maximální možná délka zatečení. Důvodem zatečení taveniny až do konce délky kanálku je tvorba přetoků a částečné otevření formy, které umožnilo tavenině téci přes stěny kanálků. Tyto problémy se objevovaly často při vstřikování 500 bar a při tlaku 600 bar nebylo možné plnit po dobu 10 s, jelikož na vložkách se vytvářely téměř ihned přetoky.

Oproti délkám vstřikovaných do hliníkových vložek, kde se délky zatečení s přibývajícím tlakem k sobě přibližovaly, při vstřikování do vložky z HP PA 12 GB se délky zatečení od sebe oddalovaly. V hlavní části textu je popsána pravděpodobná příčina.

5 Porovnání

Pro porovnání bylo využito údajů z grafů na Tab. 1 a Tab. 2. Aby bylo možné popsat rozdílnost chování mezi vložkami z HP PA 12 GB a hliníkovými, bylo provedeno následující. Při daném tlakovém omezení byla průměrná délka zatečení získaná variantou plnění do omezení odečtena od průměrné délky zatečení získaná variantou plnění do 10 s. Rozdíl byl stanoven pro oba použité materiály vložek a vnesen do grafu na Obr. 4.



Obr. 4 – Porovnání rozdílů délek zatečení ve vložkách z HP PA 12 GB s hliníkovými vložky

Graf na Obr. 4 potvrzuje rozdílné vlastnosti vložek zjištěnou z grafů na Obr. 2 a Obr. 3, že délkový rozdíl délky zatečení stanovené variantou „10 s“ a „Omezení“ se v případě plastové vložky zvětšuje, zato v případě hliníkové vložky zmenšuje. Pravděpodobná příčina je vysvětlena v hlavní části textu.

6 Spreje

Zkouška různých vrstev nanášených spreji byla testována na povrchu vložek z HP PA 12 GB. Důvod je uveden a vysvětlen v hlavní části textu, stejně tak i vlastnosti použitých sprejů. Před každým cyklem byla na povrch nanášena vrstva sprejem. Aby bylo možné prozkoumat vliv vrstvy na délku zatečení, byla záměrně nanášena silnější vrstva. Nanášená vrstva byla na pohyblivou i na pevnou vložku, tak aby dutina, kterou teče plast, byla celá opatřena vrstvou.

Jelikož vstřikování do plastových vložek nemá za vyšších tlaků význam s ohledem na životnost vložky, bylo testování separačních sprejů provedeno do tlaku 300 bar.

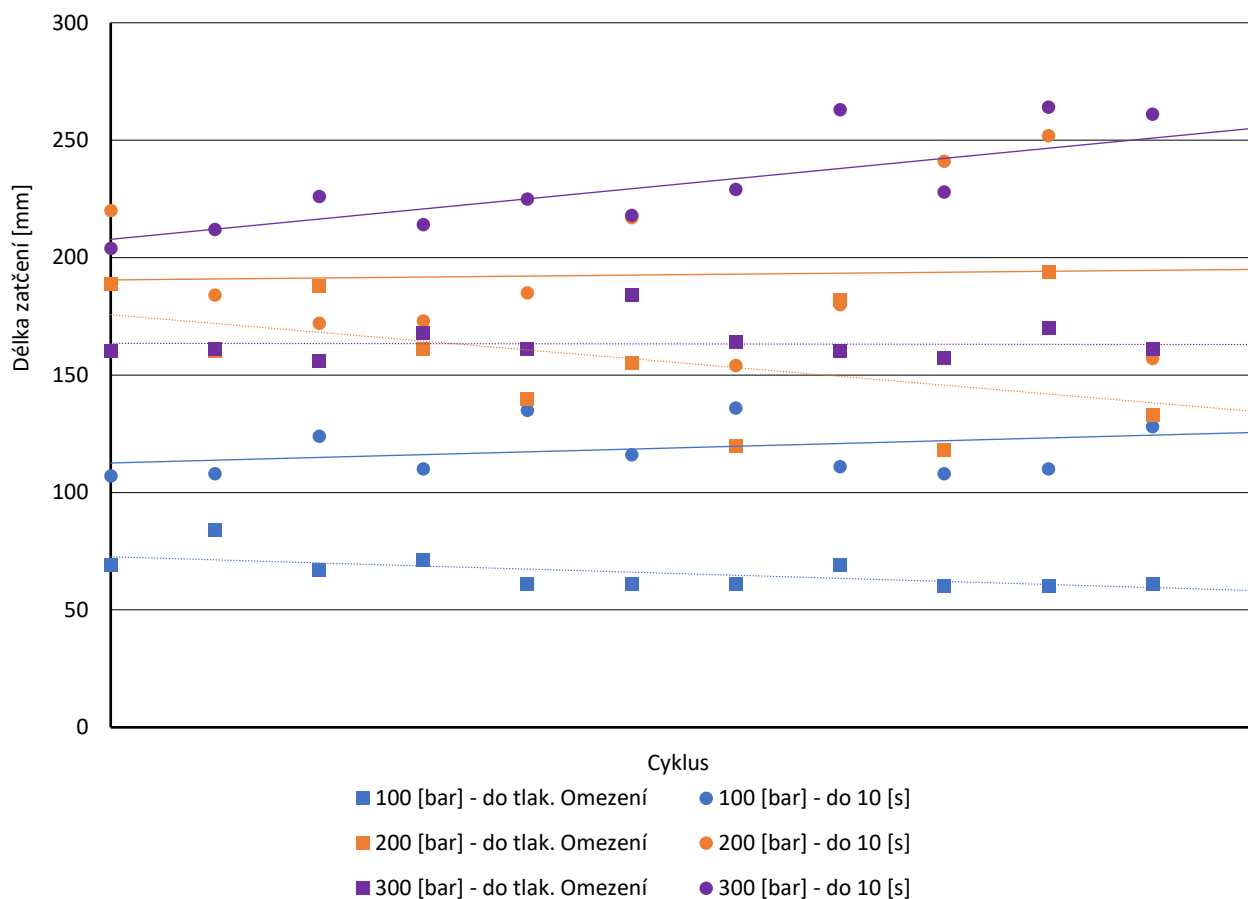
6.1 Silikonový sprej

Naměřené hodnoty délek zatečení při použití silikonové vrstvy a vypočítaná průměrná hodnota pro každou variantu testování v každém měřeném tlaku jsou uvedeny v Tab. 3.

Tlak [bar]	Plnění	Délka zatečení [mm]												Průměr
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	Do tlak. omezení	69	84	67	71	61	61	61	69	60	60	61	61	64,1
	Do 10 s	107	108	124	110	135	116	136	111	108	110	128	136	118,6
200	Do tlak. omezení	189	160	188	161	140	155	120	182	118	194	133	121	154,9
	Do 10 s	220	184	172	173	185	217	154	180	241	252	157	178	190,7
300	Do tlak. omezení	160	161	156	168	161	184	164	160	157	170	161	157	161,9
	Do 10 s	204	212	226	214	225	218	229	263	228	264	261	234	231

Tab. 3 – Délky zatečení při použití silikonové vrstvy

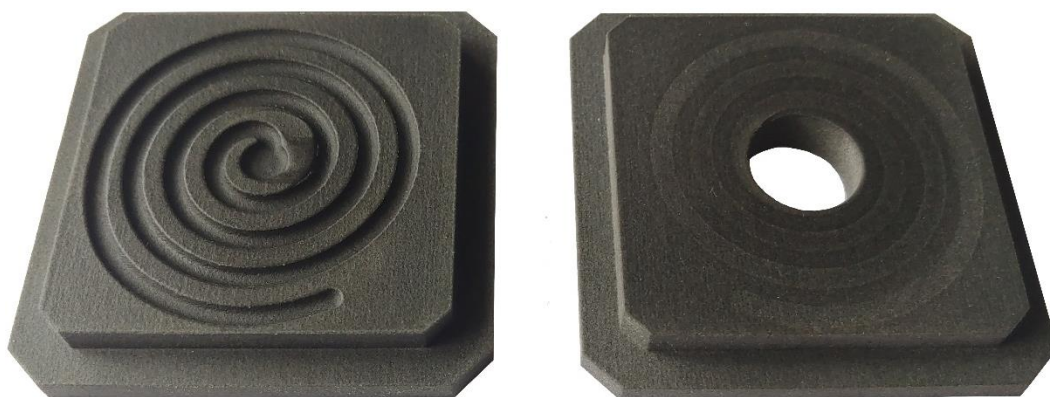
Hodnoty uvedené v Tab. 3 byly vyneseny do grafu na Obr. 5.



Obr. 5 – Vyhodnocení délky zatečení při použití silikonové vrstvy

Z grafu na Obr. 5 je malý rozptyl naměřených hodnot délek zatečení pouze při tlaku 100 bar, při tlacích 200 a 300 bar je již značný rozptyl. Důvodem může být nerovnoměrné ulpívání silikonové vrstvy na povrchu vložky. Při použití silikonového spreje je délka zatečení při tlacích vyšších jak 200 bar obtížně předvídatelná.

Vstříkovací vložky z HP PA 12 GB po testování silikonové vrstvy jsou zobrazeny na Obr. 6.



Obr. 6 – Vstříkovací vložky z HP PA 12 GB po testování silikonové vrstvy

Na pohyblivé vložce, zobrazené na Obr. 6. vlevo, je vidět protékání taveniny ze středu přes stěnu do druhého kanálku. To je způsobeno konstrukcí formy, kdy mezi ocelovou vtokovou vložkou a pohyblivou vložkou je mezera. Jelikož tloušťka stěny není příliš široká, vzniká tak mezera, kterou může tavenina protékat. Výsledkem je opotřebení stěny, „uhlazení“, které je vidět na Obr. 6 vlevo. Zároveň to vypovídá o dobré vlastnosti silikonového spreje pomoci vstříkovanému plástu lépe plnit malé dutiny vložky.

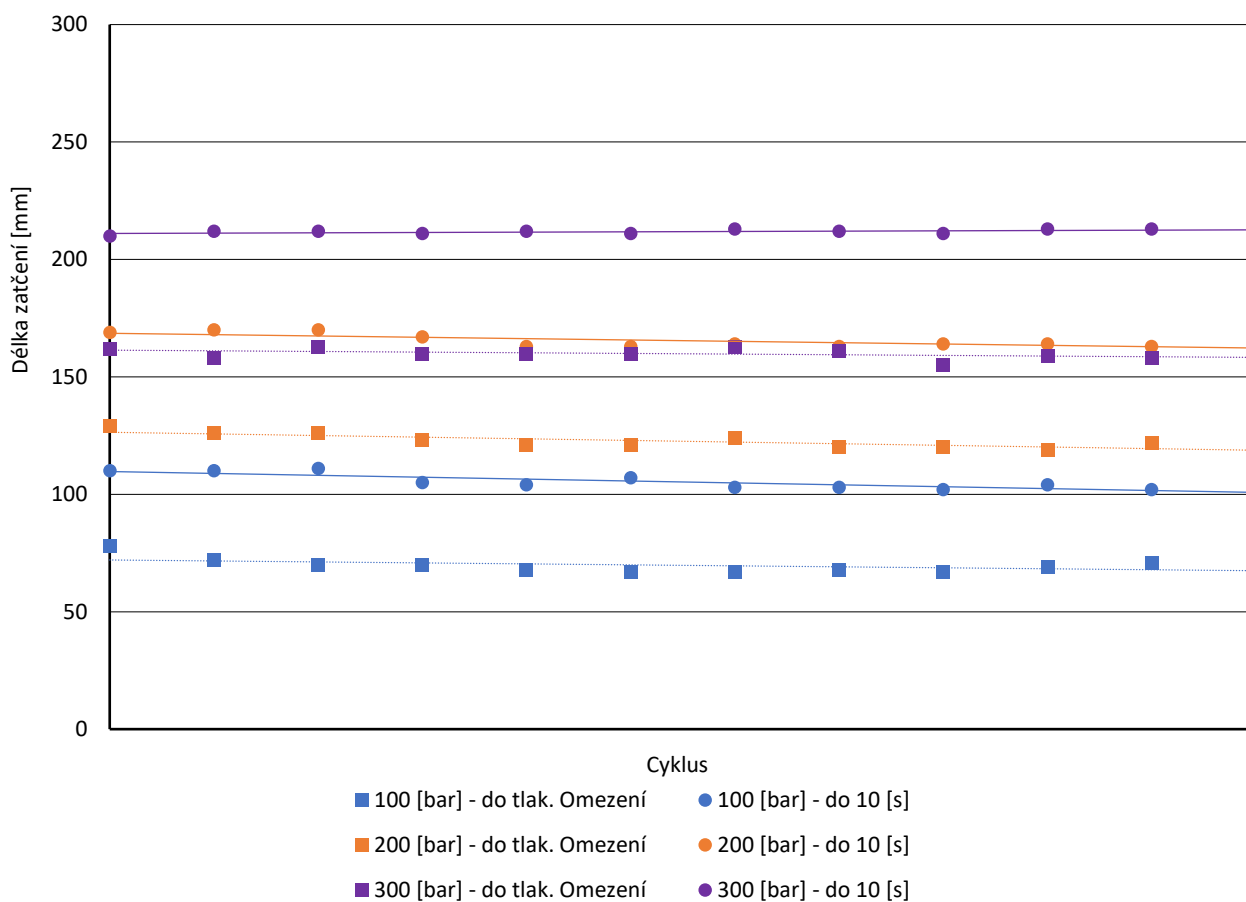
6.2 PTFE – sprej

Naměřené hodnoty délek zatečení při použití vrstvy PTFE a vypočítaná průměrná hodnota pro každou variantu testování v každém měřeném tlaku jsou uvedeny v Tab. 4

Tlak [bar]	Plnění	Délka zatečení [mm]												Průměr
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	Do tlak. omezení	78	72	70	70	68	67	67	68	67	69	71	70	69,2
	Do 10 s	110	110	111	105	104	107	103	103	102	104	102	102	105
200	Do tlak. omezení	129	126	126	123	121	121	124	120	120	119	122	120	122,3
	Do 10 s	169	170	170	167	163	163	164	163	164	164	163	165	165,2
300	Do tlak. omezení	162	158	163	160	160	160	163	161	155	159	158	159	160
	Do 10 s	210	212	212	211	212	211	213	212	211	213	213	212	211,9

Tab. 4 – Délky zatečení při použití vrstvy PTFE

Hodnoty uvedené v Tab. 4 byly vyneseny do grafu na Obr. 7.



Obr. 7 – Vyhodnocení délky zatečení při použití vrstvy PTFE

Z grafu na Obr. 7. je vidět malý rozptyl naměřených délek zatečení při všech tlakových omezeních. Ulpívání vrstvy PTFE je tak mnohem rovnoměrnější než při použití silikonového spreje.

Vstřikovací vložky z HP PA 12 GB po testování vrstvy PTFE jsou zobrazeny na Obr. 8.



Obr. 8 – Vstřikovací vložky z HP PA 12 GB po testování vrstvy PTFE

PTFE – sprej podobně jako silikonový sprej zlepšoval délku zatečení taveniny do mezery mezi ocelovou vtokovou vložkou a pohyblivou vložkou z HP PA 12 GB. Dále sprej zanechával na povrchu vložek bílé skvrny, jak je zobrazeno na Obr. 8. Nejvíce je vidět bílá skvrna na místě, kde byl konec dutiny pohyblivé vložky. Do této části povrchu vložky byla vrstva (nanesená sprejem) proudící taveninou dotlačována. Při testování byla záměrně sprejem nanášena silná vrstva s cílem odhalit lépe vlastnosti vrstvy. Pokud by se nanášela slabá vrstva, problém s bílými skvrnami na povrchu by se podstatně zlepšil. Ačkoliv povrch vstřikovacích vložek byl po testování zabarven místy doběla, na vstřikované díly použití spreje nemělo vliv. Stejně jako při použití silikonového spreje po utření výstřiku byl zbytek vrstvy odstraněn.

Vlastnosti vrstvy PTFE byly lepší, než při použití silikonové vrstvy.

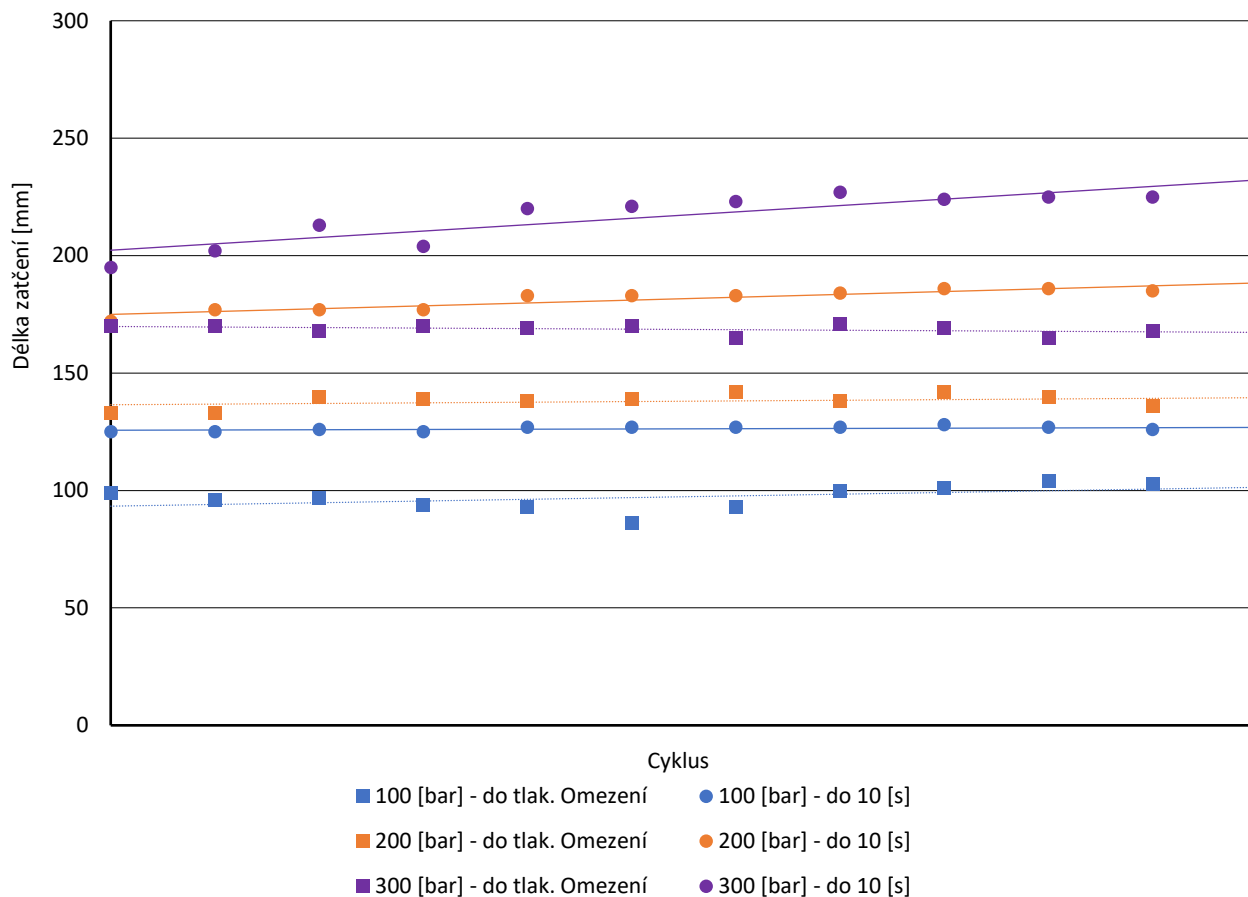
6.3 AT – 44 sprej

Naměřené hodnoty délek zatečení při použití vrstvy AT – 44 a vypočítaná průměrná hodnota pro každou variantu testování v každém měřeném tlaku jsou uvedeny v Tab. 5.

Tlak [bar]	Plnění	Délka zatečení [mm]												Průměr
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	Do tlak. omezení	99	96	97	94	93	86	93	100	101	104	103	102	97,8
	Do 10 s	125	125	126	125	127	127	127	127	128	127	126	125	126,2
200	Do tlak. omezení	133	133	140	139	138	139	142	138	142	140	136	136	138,1
	Do 10 s	172	177	177	177	183	183	183	184	186	186	185	187	182,1
300	Do tlak. omezení	170	170	168	170	169	170	165	171	169	165	168	168	168,7
	Do 10 s	195	202	213	204	220	221	223	227	224	225	225	228	218,4

Tab. 5 – Délky zatečení při použití vrstvy AT – 44

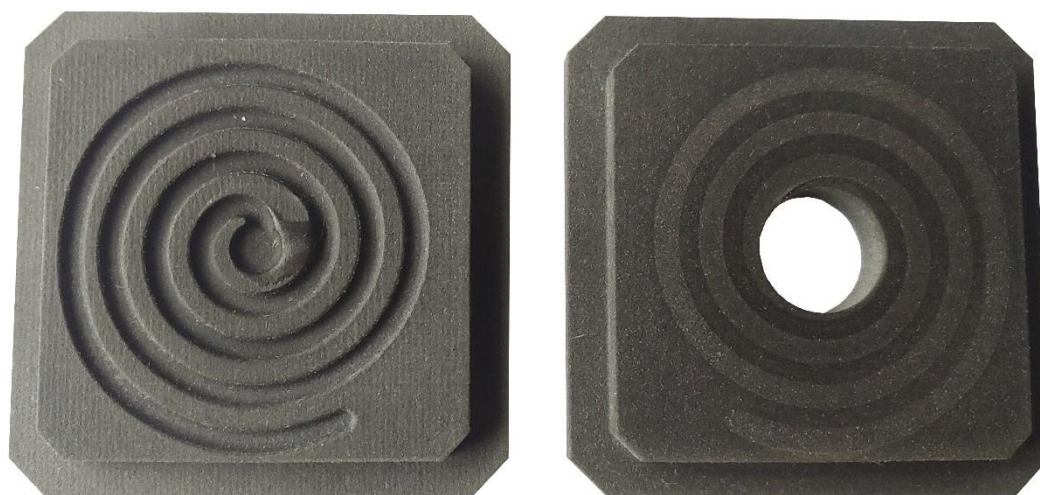
Hodnoty uvedené v Tab. 5 byly vyneseny do grafu na Obr. 9.



Obr. 9 – Vyhodnocení délky zatečení při použití vrstvy AT – 44

Z grafu na Obr. 9 je vidět, že k rozptylu naměřených délek dochází především při omezujících tlacích 200 a 300 bar, a to při testování varianty plnění do 10 s, kdy s přibývajícím počtem cyklů rostla délka zatečení. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že vrstva AT – 44 vede teplo lépe, než vrstva PTFE, i když PTFE je v AT – 44 také obsažen.

Vstříkovací vložky z HP PA 12 GB po testování vrstvy AT – 44 jsou zobrazeny na Obr. 10.



Obr. 10 – Vstříkovací vložky po testování z HP PA 12 GB po testování vrstvy AT – 44

AT – 44 sprej podobně jako silikonový a PTFE sprej usnadňovaly tavenině zatékat do mezery mezi ocelovou vtokovou vložkou a pohyblivou vložkou. Výhodou AT – 44 spreje je, že nezanechává jako sprej – PTFE na povrchu bílé skvrny.

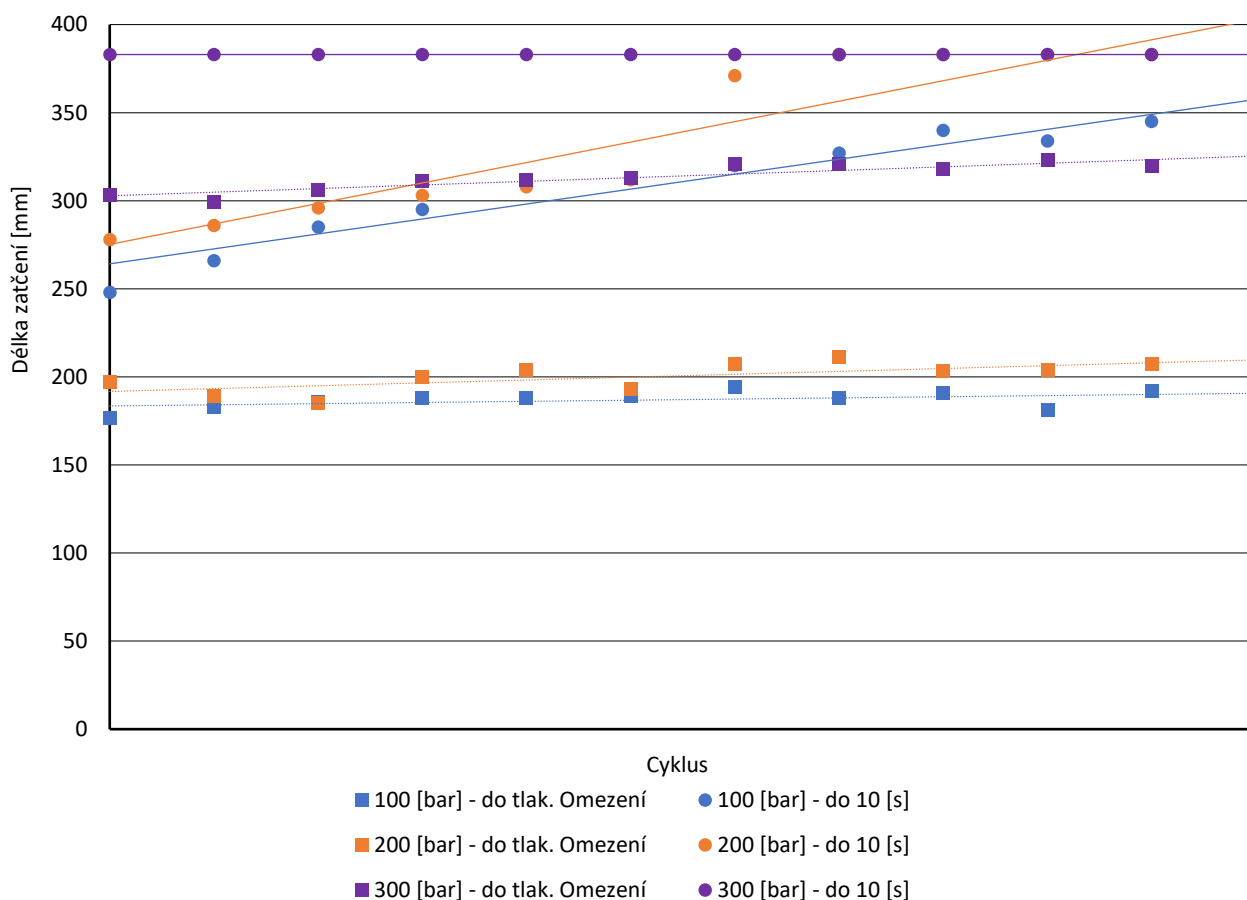
6.4 Sprej – Oddělovač forem

Naměřené hodnoty délek zatečení při použití vrstvy nanesené Oddělovačem forem a vypočítaná průměrná hodnota pro každou variantu testování v každém měřeném tlaku jsou uvedeny v Tab. 6.

Tlak [bar]	Plnění	Délka zatečení [mm]												Průměr
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	Do tlak. omezení	177	183	186	188	188	189	194	188	191	181	192	188	187,4
	Do 10 s	248	266	285	295	310	313	320	327	340	334	345	347	313,5
200	Do tlak. omezení	197	189	185	200	204	193	207	211	203	204	207	208	201,2
	Do 10 s	278	286	296	303	308	312	371	383	383	383	383	383	340,8
300	Do tlak. omezení	303	299	306	311	312	313	321	321	318	323	320	322	314,7
	Do 10 s	383	383	383	383	383	383	383	383	383	383	383	383	383

Tab. 6 – Délky zatečení při použití vrstvy nanesené Oddělovačem forem

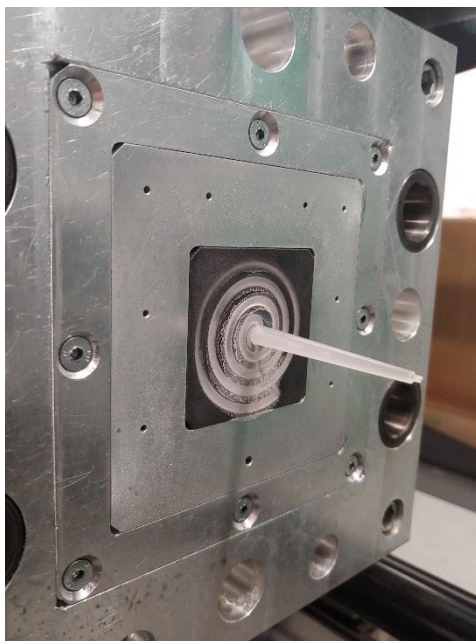
Hodnoty uvedené v Tab. 6 byly vyneseny do grafu na Obr. 11.



Obr. 11 – Vyhodnocení délek zatečení použitých vrstev nanesených Oddělovačem forem

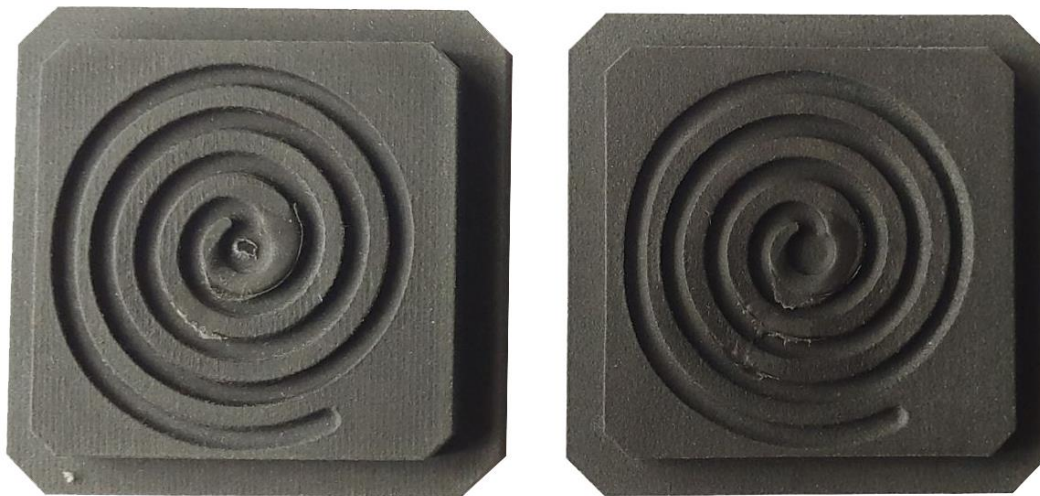
Z grafu na Obr. 11 je vidět vhodnost použití spreje – Oddělovač forem pouze do tlaku 100 bar. Za vyšších hodnot tlaku je použití spreje velmi nedoporučeno. Navíc byla při testování několikrát vyplněna celá dutina formy, tj. dosažena maximální měřená délka zatečení. Při vstřikování bylo nutné použít několik párů vložek. Zobrazení varianty testování do omezení při tlaku 300 bar s minimálním rozptylem je spíše náhodné.

Důvod nedoporučení spreje – Oddělovač forem vychází z jeho chování při vstřikování do 3D tištěných plastových vložek, čem vypovídá i Obr. 12 ze vstřikování.



Obr. 12 – Výstřik s upnutou vložkou z HP PA 12 GB, na kterou byla nanášena vrstva Oddělovačem forem

Použití spreje – Oddělovač forem není dobrým řešením. Vložky po nanášení vrstvy jsou zobrazeny na Obr. 12, kdy při vstřikování docházelo k tomu, že vstřikovaný plast se nejspíš odděloval od povrchu vložky již při vstřikování. Důsledkem bylo snazší tečení vstřikovaného plastu přes stěny vložky, jak je zobrazeno na Obr. 13.



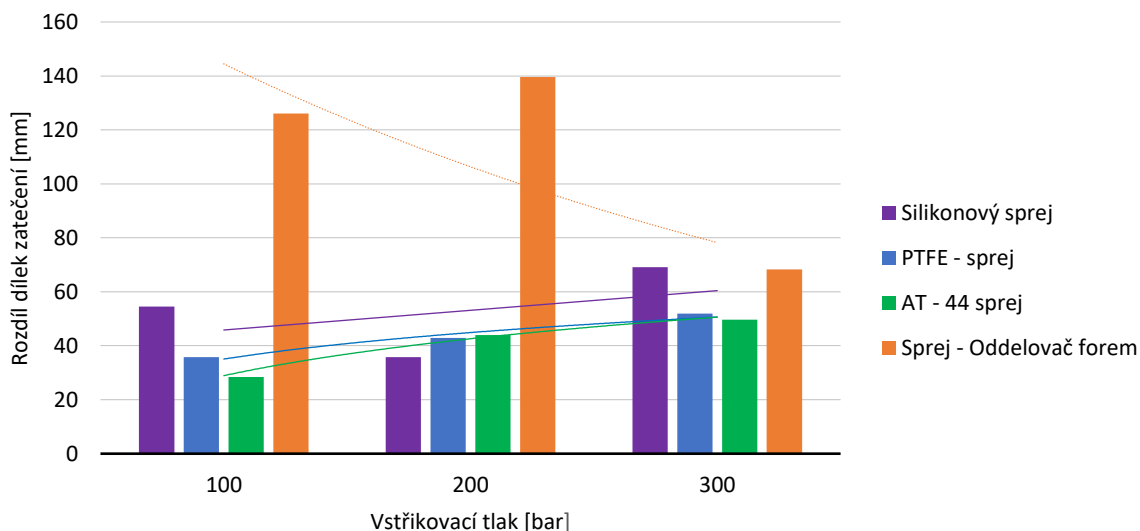
Obr. 13 – Vstřikovací vložky z HP PA 12 GB po testování vrstvy nanášené oddělovačem forem

Pohyblivé vložky byly na vstřikolislu upnuty tak, jak jsou zobrazeny na Obr. 13. Neusazené vrstvy spreje stékávaly po povrchu vložky, tím pomáhaly tavenině snadněji překonávat stěny dutiny. Tato vlastnost by byla při použití tenké vrstvy těžko odhalitelná.

I při použití malé nanesené vrstvy je doporučení spreje – Oddělovač forem výrazně nedoporučeno. Tento sprej velice dobře plní svoji funkci, pokud je nanášen na kov, a tím brání plastu, aby se na něj usazoval. Ovšem v případě vstřikování do 3D tištěných plastových vložek s malou přesností výroby není tento efekt žádaný. Spíše naopak prohlubuje nedostatky vložky, o čemž svědčí i snazší protékání taveniny mezerou mezi ocelovou vtokovou vložkou a pohyblivou vložkou, které bylo ze všech vstřikovaných sprejů největší.

6.5 Porovnání sprejů

Porovnání rozdílů délek zatečení při použití sprejů je zobrazeno v grafu na Obr. 14. Graf byl sestaven stejně jako graf zobrazený na Obr. 4.



Obr. 14 – Porovnání rozdílů délek zatečení při použití vrstev nanášené spreji

Z grafu na Obr. 14 jsou vidět velké rozdíly v délkách zatečení mezi variantami testování při použití spreje – Oddělovače forem. To je způsobeno tím, že při testování variantou plnění do 10 s byla vyplněna několikrát celá dutina. V grafu na Obr. 14 je Oddělovač forem zobrazen pro ukázkou, jak moc dokáže testování zkomplikovat tvorbou přetoků.

AT – 44 sprej byl jediným sprejem, u kterého se rozdíl délek zatečení podobal průběhu rozdílu při vstřikování do neupraveného povrchu vložek z HP PA 12 GB zobrazené v grafu na Obr. 3.

Pro PTFE a silikonový sprej byl rozdíl v délkách zatečení vyšší při tlaku 100 bar, dále pak kopíroval průběh délek zatečení v neupraveném povrchu vložek z HP PA 12 GB zobrazené v grafu na Obr. 3.

Vyhodnocení sprejů je více popsáno v hlavní části textu.

Příloha č. 8

Opotřebení plastových vložek 3D tištěných metodou MJF po vstřikování

Obsah

1	Úvod	2
2	3D měřicí systém	2
3	Zobrazení výsledků	2
4	Pevné vložky	2
4.1	Strana v dělicí rovině	2
	Dutina krytu s logem ZČU – detail 1	3
	Dutina krytu s logem ZČU – detail 2	3
	Dutina krytu s logem ZČU – detail 3	4
	Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 1	4
	Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 2	4
	Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 3	5
4.2	Zadní strana	5
5	Pohyblivá vložka	5
5.1	Strana v dělicí rovině	5
	Výstupek krytu s logem ZČU – detail 1	6
	Výstupek krytu s logem ZČU – detail 2	7
	Výstupek krytu s logem ZČU – detail 3	7
	Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 1	7
	Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 2	8
	Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 3	8
5.2	Zadní strana	8
6	Použitá literatura	9

Seznam obrázků

Obr. 1	– 3D sken s parametry [1]	2
Obr. 2	– Pevná vložka – Strana v dělicí rovině	2
Obr. 3	– Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu s logem ZČU – detail 1	3
Obr. 4	– Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu s logem ZČU – detail 2	3
Obr. 5	– Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu s logem ZČU – detail 3	4
Obr. 6	– Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 1	4
Obr. 7	– Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 2	4
Obr. 8	– Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 3	5
Obr. 9	– Pevná vložka – Zadní strana	5
Obr. 10	– Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině	6
Obr. 11	– Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu s logem ZČU – detail 1	6
Obr. 12	– Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu s logem ZČU – detail 2	7
Obr. 13	– Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu s logem ZČU – detail 3	7
Obr. 14	– Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 1	7
Obr. 15	– Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 2	8
Obr. 16	– Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 3	8
Obr. 17	– Pohyblivá vložka – Zadní strana	8

1 Úvod

Tato příloha doplňuje opotřebení vložek popsané v hlavní části textu disertační práce. Zde jsou uvedeny výsledky z měření. Vyhodnocení opotřebení je provedeno v hlavní části textu.

2 3D měřicí systém

3D měřicí systém spolu se je zobrazen na Obr. 2, kde jsou i uvedeny základní parametry.



Parametr	Hodnota	Jednotka
Světelný zdroj	LED	–
Počet bodů na záběr	12	10 ⁶
Měřená oblast	100 x 70 500 x 370	mm ²
Vzdálenost naměřených bodů	0,03 – 0,12	mm
Měřená vzdálenost	490	mm
Teplota měření	23	°C
Hmotnost	cca. 4	mm
Rozměry	340 x 240 x 83	mm

Obr. 1 – 3D sken s parametry [1]

Při měření byla teplota okolí přibližně 25 °C, odchylka od požadované je minimální.

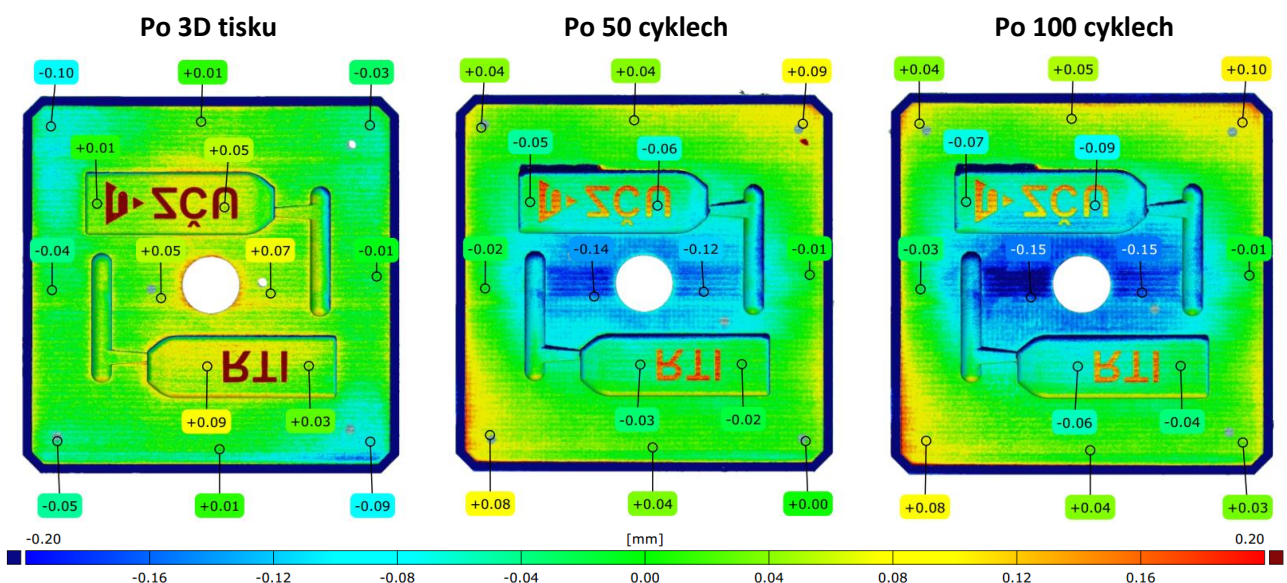
3 Zobrazení výsledků

Všechny výsledky z měření byly vyhodnocovány k 3D modelu. 3D skenování probíhalo po 3D tisku, po 50 a po 100 cyklech. Kdyby byly vložky 3D vytištěny ideálně, nebyla by na nich změřena žádná odchylka a jejich zabarvení by bylo zelenou barvou. Stlačení či úbytek materiálu vložky je zobrazen podle velikosti od zelené k tmavomodré barvě. Naopak posunutí vložky oproti 3D modelu je zobrazeno podle intenzity k červené barvě.

4 Pevné vložky

4.1 Strana v dělicí rovině

Výsledky z 3D skenování strany v dělicí rovině pevné vložky jsou zobrazeny na Obr. 2.



Obr. 2 – Pevná vložka – Strana v dělicí rovině

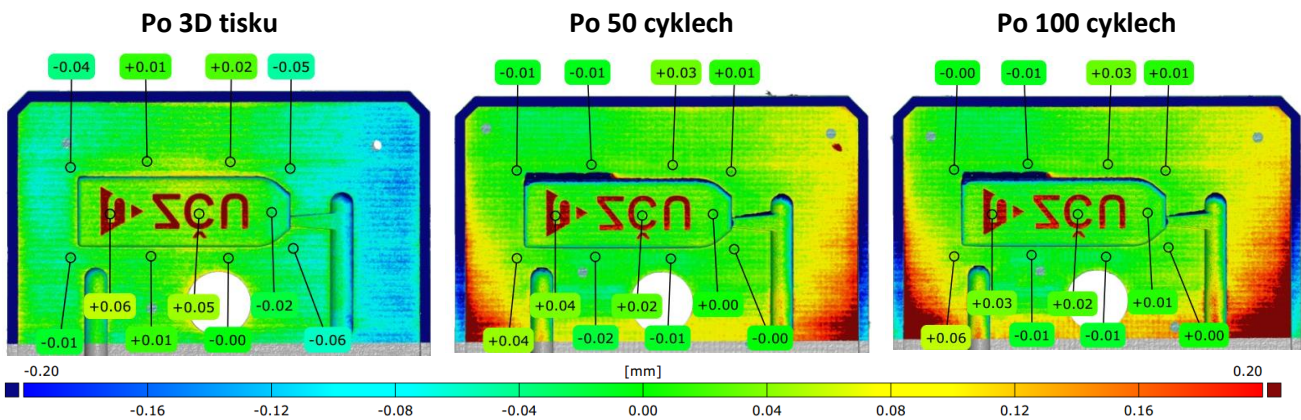
Logo se zkratkou ZČU a zkratka RTI jsou zbarveny červeně, (tzn. posunutí 3D skenovaného objektu od 3D modelu). Tyto popisy jsou do krytu výstřiku zapařeny do hloubky 0,2 mm, a proto ve vložce tvoří výstupek. Jelikož výška výstupu je po 3D tisku vyšší, než v 3D modelu, jedná se o nepřesnost 3D tisku. S přibývajícím počtem cyklů zobrazeno na Obr. 2 zleva doprava je vidět postupné zbarvení výstupku čím dál tím světlejší barvou. To znamená, že vlivem proudící taveniny docházelo k opotřebení, „uhlazování“ výstupku.

Ačkoliv rovinnost strany v dělicí rovině při stanovení rozměrů vložek nebyla měřena, z Obr. 2 vlevo je vidět, že až na oblasti hran je možné uvažovat o odchylce do 0,2 mm. Použitá zábrana tvorby přetokům – přesah celé horní plochy nad dělicí rovinu je dostačující.

Již po provedení 50 cyklů, Obr. 2 uprostřed, je vidět stlačení středu vložky (tzn. posunutí 3D skenovaného objektu do 3D modelu), které se s rostoucím počtem cyklů zvětšovalo až do měřené hodnoty 100 cyklů, zobrazené na Obr. 2 vpravo. Dále je na stěně dutiny s logem ZČU vidět utržení části stěny. Pravděpodobné příčiny poškození vložky jsou popsány v hlavní části práce.

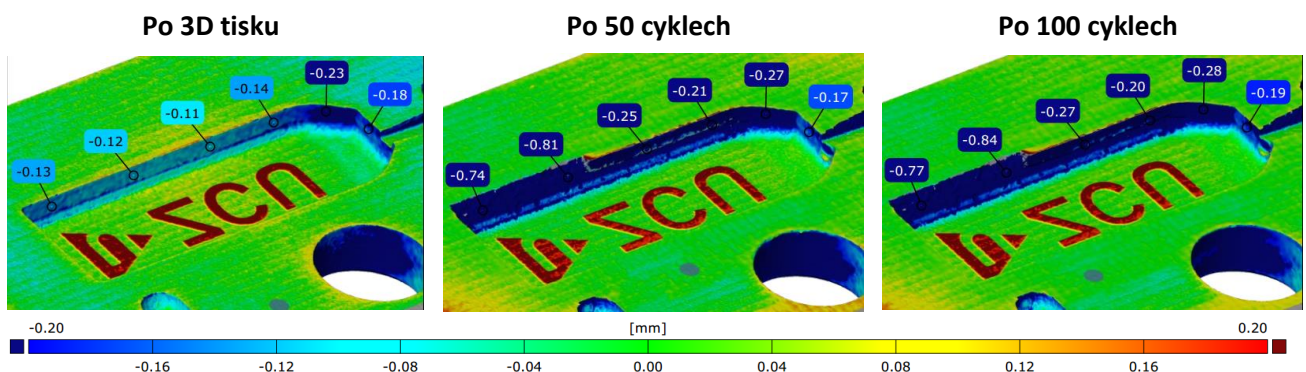
V další části textu jsou proměřeny dutiny v různém natočení, detailech.

Dutina krytu s logem ZČU – detail 1



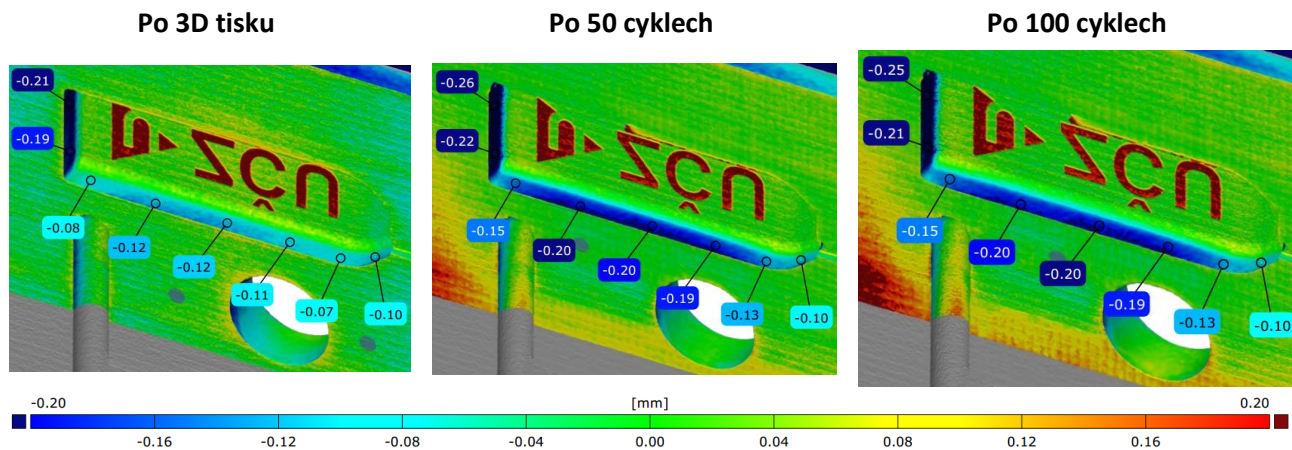
Obr. 3 – Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu s logem ZČU – detail 1

Dutina krytu s logem ZČU – detail 2



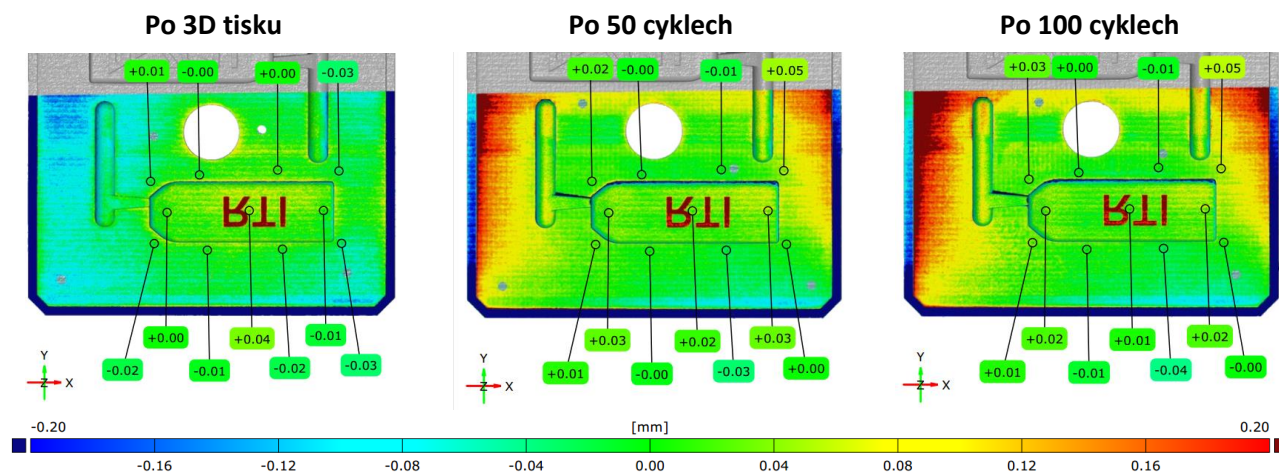
Obr. 4 – Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu s logem ZČU – detail 2

Dutina krytu s logem ZČU – detail 3



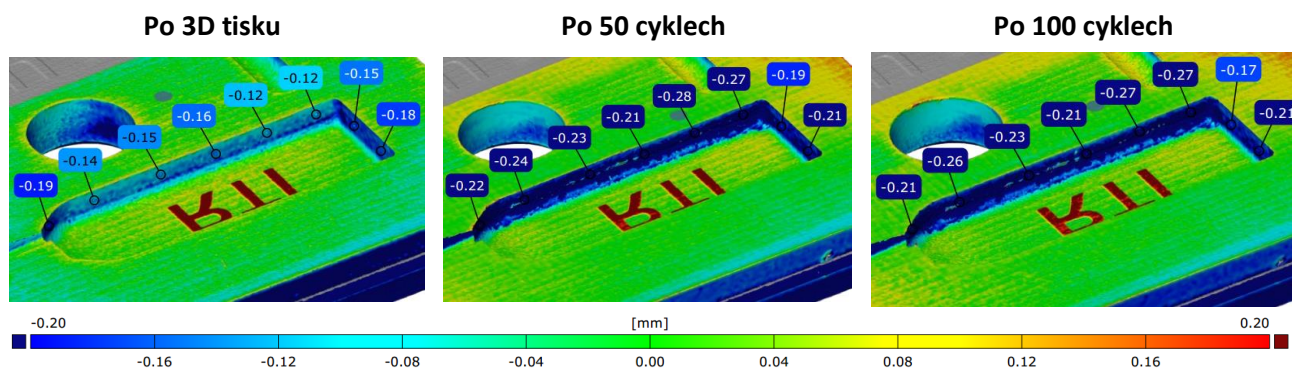
Obr. 5 – Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu s logem ZČU – detail 3

Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 1



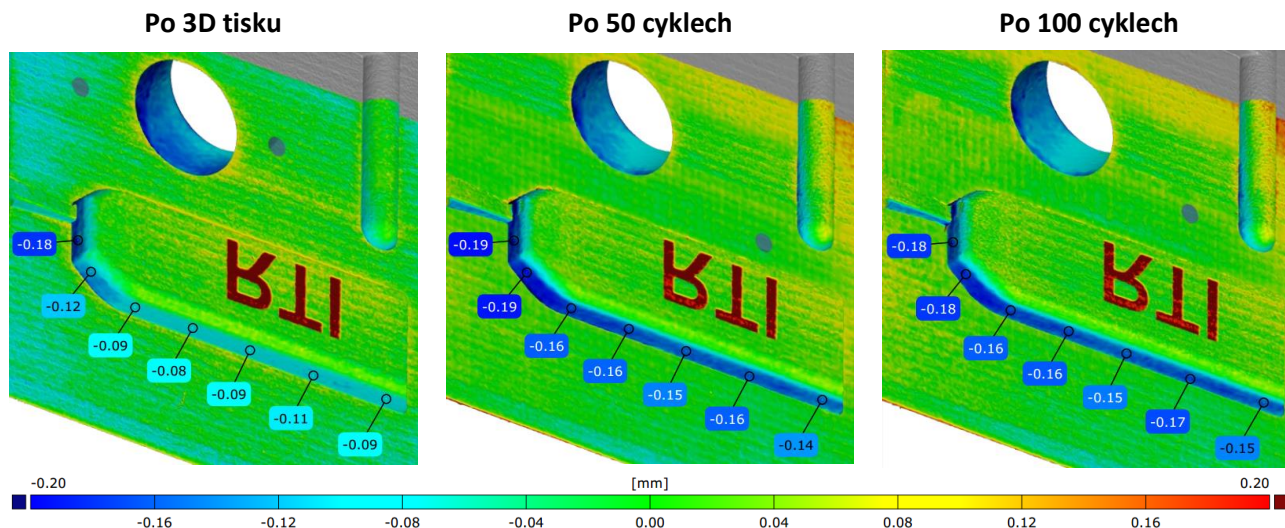
Obr. 6 – Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 1

Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 2



Obr. 7 – Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 2

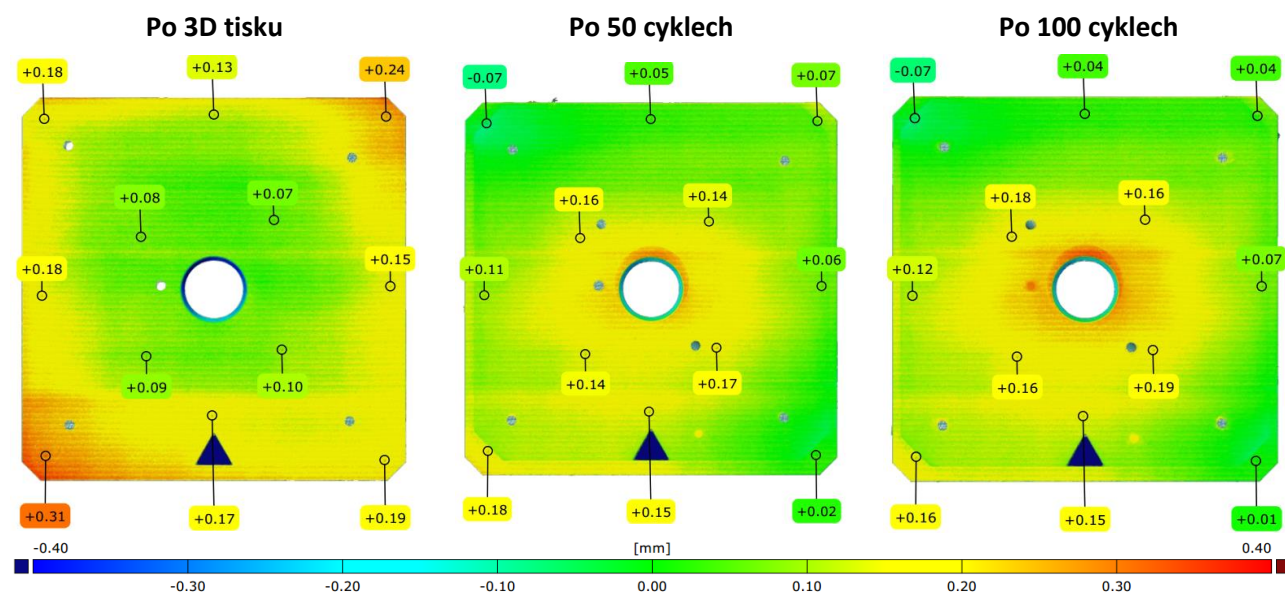
Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 3



Obr. 8 – Pevná vložka – Strana v dělicí rovině – Dutina krytu se zkratkou RTI – detail 3

4.2 Zadní strana

Na zadní straně pevné vložky, zobrazené na Obr. 9, je značka trojúhelníku pro správné natočení vložky ve formě. Důvodem je, aby nedošlo k otočení vložek a tím k záměně výstupků se správným tvarem výstupků pohyblivé vložky.



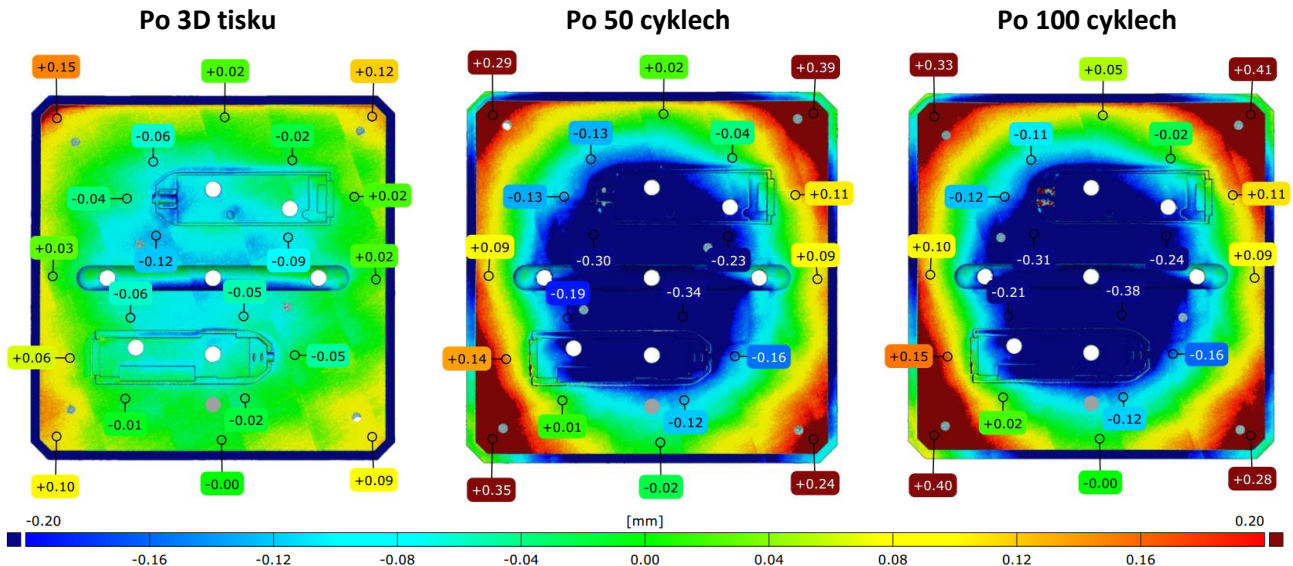
Obr. 9 – Pevná vložka – Zadní strana

Rovinnost zadní plochy pevné vložky po 3D tisku, Obr. 9 vlevo, je v protilehlých rozích větší než ve středu. Při porovnání s přední stranou, zobrazenou na Obr. 2, lze rovnovážnost ploch v doporučených hodnotách pro obrábění kovových vložek stěží docílit.

5 Pohyblivá vložka

5.1 Strana v dělicí rovině

Výsledky z 3D skenování strany v dělicí rovině pohyblivé vložky jsou zobrazeny na Obr. 10



Obr. 10 – Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině

Rovinnost horních ploch výstupků s horní plochou vložky, Obr. 10 vlevo, je značná. Zároveň je vidět posunutí hlavního kanálku, způsobené pravděpodobně natočením vložky při 3D tisku.

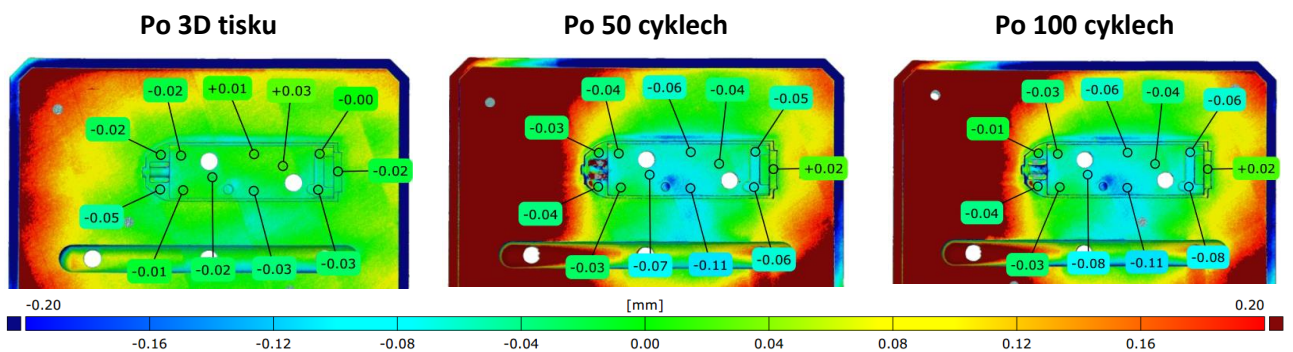
Stlačování středu pohyblivé vložky při vstřikování s přibývajícím počtem cyklů narůstalo, jak ukazují výsledky 3D skenování vložky na Obr. 10 uprostřed a vpravo. Zde tvorbě přetoků zabránila konstrukční zábrana – přesah celého horní plochy nad dělicí rovinu vysoká 0,45 mm. I když při stanovení výšky nebylo určeno přesného počtu cyklů, při kterých je zábrana schopna bránit přetokům zabránit. Na Obr. 10 vpravo je vidět značné opotřebení vložky, i přesto zábrana dokázala tvorbu přeskoků zastavit.

Při porovnání 3D skenu předních stran pevné vložky zobrazené Obr. 2 s pohyblivou vložkou Obr. 10 po 50 a 100 cyklech je vidět větší stlačení pohyblivé vložky, což je způsobeno tím, že tavenina z vtokové vložky naráží a tlačí do pohyblivé vložky a pak je rozváděna dále kanálky studené vtokové soustavy.

V místě výstupku krytu s logem ZČU docházelo k utrnutí části výstřiku v přední části. To se projevilo na výsledcích z 3D měření na Obr. 10 uprostřed a vpravo červeným zabarvením. Pravděpodobnou příčinou je nedostatečná doba chladnutí a doba otevření formy, která pomáhá ochladit vložku.

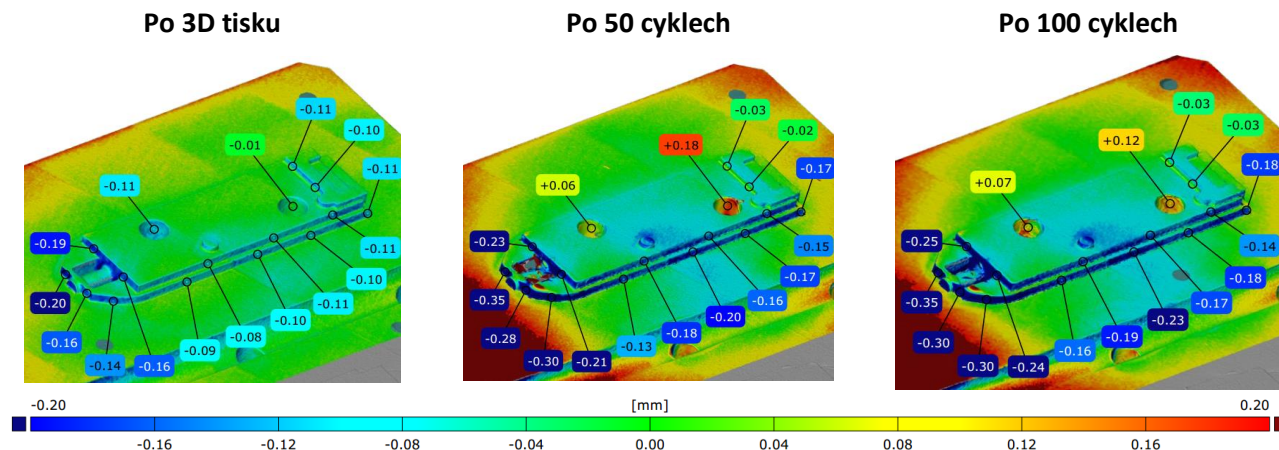
V další části textu jsou proměřeny výstupky v různém natočení, detailech.

Výstupek krytu s logem ZČU – detail 1



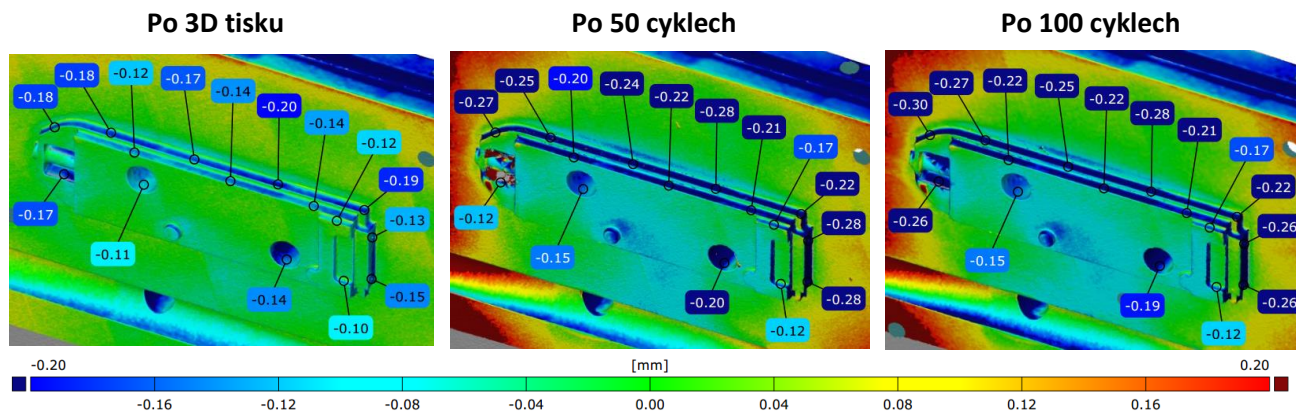
Obr. 11 – Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu s logem ZČU – detail 1

Výstupek krytu s logem ZČU – detail 2



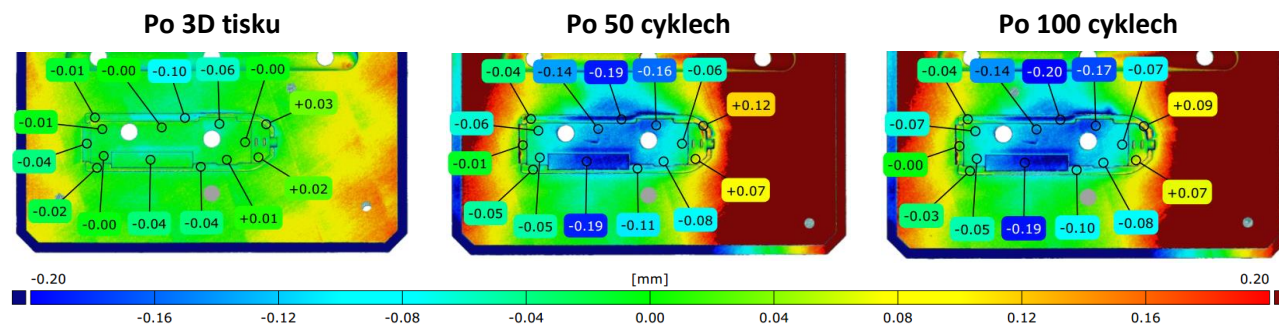
Obr. 12 – Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu s logem ZČU – detail 2

Výstupek krytu s logem ZČU – detail 3



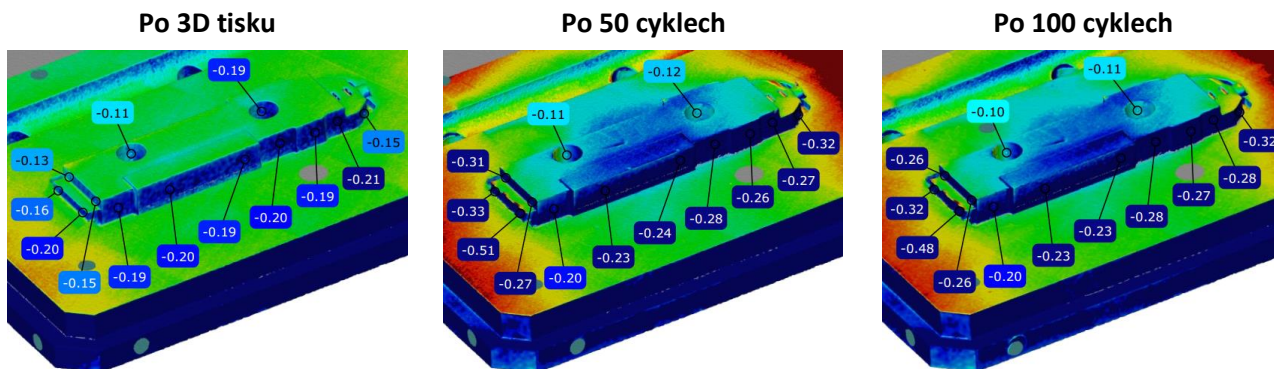
Obr. 13 – Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu s logem ZČU – detail 3

Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 1



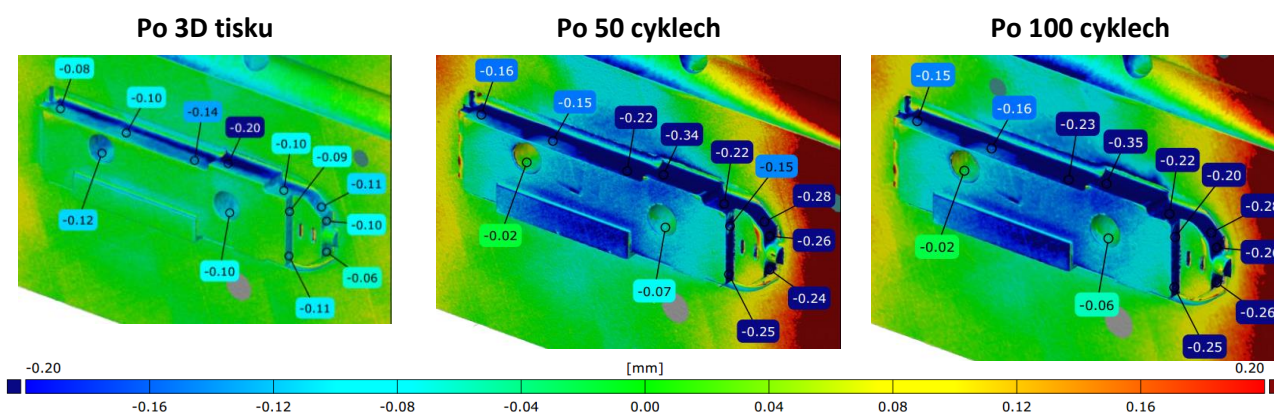
Obr. 14 – Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 1

Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 2



Obr. 15 – Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 2

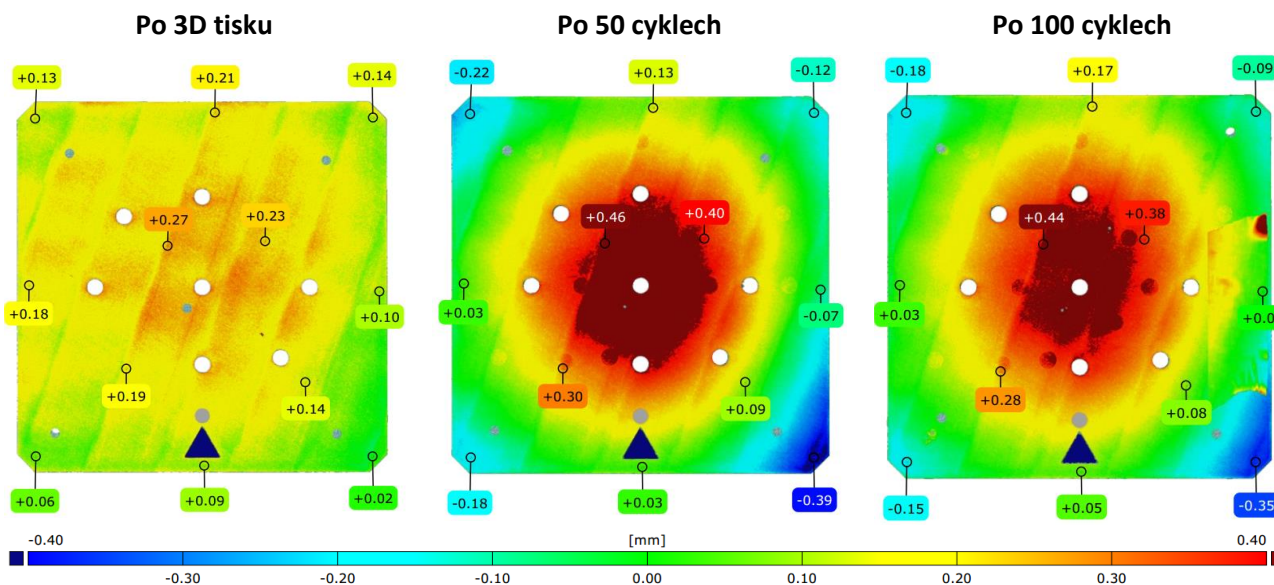
Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 3



Obr. 16 – Pohyblivá vložka – Strana v dělicí rovině – Výstupek krytu se zkratkou RTI – detail 3

5.2 Zadní strana

Na zadní straně pohyblivé vložky, zobrazené na Obr. 17 je správně trojúhelník v dolní části, stěně jako na Obr. 9, tím je správně zaručena orientace vložek.



Obr. 17 – Pohyblivá vložka – Zadní strana

Po provedení měření po 50 cyklech se na zadní stranu vložky přichytila část izolepy, jak je vidět na Obr. 17 vpravo. Avšak přichycená izolepa neovlivnila měření, není v místě největšího prohnutí.

Oproti zadní straně pevné vložky zobrazené na Obr. 9 je prohnutí zadní strany pohyblivé vložky, viz Obr. 17 mnohem větší. Pravděpodobnou příčinou je i zjištěné prohnutí ocelové spodní desky v modulární vstřikovací formě. Původně byla spodní deska modulární vstřikovací formy vyrobena z hliníku, avšak docházelo k jejímu častému prohýbání a tak byl materiál spodní desky změněn na ocel. Jelikož není známo, kolik cyklů z různých měření spodní deska prodělala, nedá se určit její životnost. Důsledkem toho byla třída oceli vyměněna za lepší a častěji bylo vložka měněna. Tak se našlo slabé místo v konstrukci modulární vstřikovací formy. Zesílení tloušťky desky by znamenalo buď nenasazovat vypodložovací rámeček a spodní desku vyrobít silnější, nebo by to znamenalo větší zásah do konstrukce formy.

6 Použitá literatura

1. **MCAE Systems, s.r.o.** ATOS Q. [Online] [Citace: 3. 4. 2023.] Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/atos-q/>.