



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Návrh tvarové dutiny vstříkovací
formy**

**Design of Shaped Cavity of Injection
Mold**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Bc. Radek SCHÖN

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Petr Karel Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Schön** Jméno: **Radek** Osobní číslo: **438318**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh tvarové dutiny vstříkovací formy

Název diplomové práce anglicky:

Design of Shaped Cavity of Injection Mold

Pokyny pro vypracování:

Cípem práce je kompletní návrh vstříkovací formy pro konkrétní díl. Student provede rešerši materiálů používaných pro vstříkávání. V rámci práce student popíše postup návrhu formy včetně akceptování smrštění, popíše úpravy polymerů pro možnosti vstříkávání, postup návrhu vstříkovacích parametrů. Při samotném návrhu formy pro konkrétní díl student definuje postup návrhu dělicích rovin, volba vyhazovačů, způsob chlazení, popis potřebných simulací, výpočty atd. Součástí práce bude konstrukční úprava zadané součásti pro vytvoření za pomoci vstříkování. Rozsah grafické části: 3D CAD model; sestavný výkres formy; dva výrobní výkresy vybraných částí formy, výrobní výkres součásti pro kterou se vytváří forma.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Zeman Lubomír. Vstříkování plastů - teorie a praxe. 2018. ISBN: 978-80-271-0614-1
- [2] Joseph E. Shigley: Konstruování strojních součástí. 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. Svitavy: Code Creator, 2016 [cit. 2019-11-06]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [4] ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
- [5] Katalogy výrobců.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Karel Petr, Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **29.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Karel Petr, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh tvarové dutiny vstříkovací formy“ vypracoval samostatně pod vedením ing. Karla Petra Ph.D. s použitím odborné literatury uvedené v seznamu na konci diplomové práce.

V Praze 30.04.2020

.....
Bc. Radek Schön

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Karlu Petrovi Ph.D. za cenné rady, připomínky a také trpělivost, se kterou se mi věnoval. Rovněž bych chtěl poděkoval panu Ing. Ondřeji Kociánovi a jeho otci ze společnosti BRONAS s.r.o. za poučné návrhy a vysvětlení tykající se vstřikovacích forem.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Radek Schön
Název BP:	Návrh tvarové dutiny vstřikovací formy
Anglický název:	Design of Shaped Cavity of Injection Mold
Rok:	2019/2020
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Petr Karel Ph.D.
Konzultant:	Ing. Ondřej Kocián
Bibliografické údaje:	počet stran: 77 počet obrázků: 70 počet tabulek: 6 počet příloh: 7
Klíčová slova:	Vstřikovací forma, vstřikování, temperace, odvzdušnění, vtokový systém, simulace
Keywords:	Injection molds, injection, tempering, ventilation, runner systém, simulation
Anotace:	Práce zabývá návrhem a konstrukcí tvarové dutiny vstřikovací formy na plasty. Součástí návrhu je optimální volba polohy vtoku, zaformování a vyhazování vstřikovaného dílu, temperace a odvzdušnění tvarové dutiny. Na základě výsledků simulační analýzy se vhodně určí přídavky.
Abstract:	The work deals with the design and construction of the mold cavity of an injection mold for plastics. The design includes optimal selection of the inlet position, molding and ejection of the injection part, tempering and venting with the cavity. The additions are appropriately determined based on the results of the simulation analysis.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	1
1. Úvod	4
2. Teoretická část.....	5
2.1. Polymery pro vstřikování	5
2.1.1. Základní rozdělení polymerních materiálů	5
2.1.2. Charakteristické teploty polymerů.....	10
2.2. Úprava polymerů pro zpracování a použití.....	11
2.2.1. Příspěvy formující zpracovatelnost tavenin.....	11
2.2.1.1. Stabilizátory.....	11
2.2.1.2. Plastifikátory (změkčovadla)	12
2.2.1.3. Lubrikanty (maziva).....	12
2.2.1.4. Retardéry hoření	12
2.2.1.5. Barviva, pigmenty, barevné koncentráty, optická zjasňovadla	12
2.2.1.6. Plniva (kompozitní materiály)	13
2.3. Smrštění termoplastů	17
2.3.1. Úvod do smrštění	17
2.3.2. Smrštění – tepelná kontrakce, pVt chování termoplastů	18
2.3.3. Závislost výrobního smrštění na procesních parametrech	23
2.3.3.1. Doba dotlaku	24
2.3.3.2. Tlaková úroveň dotlaku.....	24
2.3.3.3. Teplota stěny formy	25
2.3.3.4. Teplota taveniny.....	26
2.3.3.5. Vstřikovací rychlost	26
2.3.3.6. Teplota vyhazování výstřiku z formy.....	27
2.4. Rozměrová a tvarová přesnost výstřiků z termoplastů	27
2.4.1. Definice pojmů pro rozměrovou a tvarovou přesnost.....	28
2.4.2. Toleranční pole součástí z plastů podle ČSN 01 4265 a ČSN 64 0006	29
2.4.3. Praktické dopady lícování.....	29
2.4.4. Další vlivy změny rozměru vstřikovaného dílu.....	31
3. Praktická část.....	32
3.1. Úvod do praktické části.....	32
3.1.1. Specifikace materiálu vstřikovaného dílu	33
3.2. Analýza plnění dílu, určení polohy vtoku.....	33
3.2.1. Analýza plnění vtok 1	35
3.2.2. Analýza plnění vtok 2	36
3.2.3. Analýza plnění vtok 3	37
3.3. Dělicí rovina	39

3.4.	Rozváděcí kanál a ústí vtoku	41
3.5.	Tvarová jádra dutiny	45
3.6.	Vyhazovací systém	46
3.7.	Temperační systém tvarové dutiny	48
3.7.1.	Temperační okruh 1	49
3.7.2.	Temperační okruh 2	51
3.7.3.	Temperační okruh 3	52
3.7.4.	Chladící médium.....	53
3.8.	Odvzdušnění tvarové dutiny formy	53
3.9.	Pohyb boční vložky a pohyblivých jader	55
3.10.	Označení vstřikovaného dílu	57
3.11.	Kontrolní systémy formy.....	58
3.11.1.	Kontrola teploty	58
3.11.2.	Kontrola tlaků	59
3.12.	Kompletní analýza vstřikování v programu Cadmould 3D-F	60
3.12.1.	Import dat vstřikovaného dílu.....	60
3.12.2.	Tvorba výpočtové sítě	60
3.12.3.	Tvorba vtokového systému	61
3.12.4.	Vytvoření temperačních okruhů	62
3.12.5.	Přiřazení materiálů a procesních parametrů.	62
3.12.6.	Připravený model pro spuštění simulační analýzy	63
3.12.7.	Výsledky simulační analýzy, určení a domodelování přísadků	64
3.13.	Kompletní tvarová dutina vstřikovací formy	69
3.14.	Výpočty	70
3.14.1.	Výpočet vyhazovací síly	70
3.14.2.	Kontrola vyhazovače na vzpěr.....	71
3.14.3.	Výpočet uzavírací síly formy.....	72
4.	Závěr	73

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_f	[°C]	Teplota tečení
T_m	[°C]	Teplota tání krystalického podílu
T_c	[°C]	Teplota rozkladu polymeru
T_v	[°C]	Teplota vyhazování výstřiku
S_v	[%]	Celkové objemové smrštění
ΔV	[mm ³]	Objemová změna
S_{vv}	[%]	Výrobní objemové smrštění
V_F	[mm ³]	Objem tvarové dutiny formy
V_v	[mm ³]	Objem výstřiku
S_D	[%]	Smrštění ve směru délky
S_S	[%]	Smrštění ve směru šířky
S_{TL}	[%]	Smrštění ve směru tloušťky stěny
Q_v	[l/min]	Průtok temperačního média
σ_t	[MPa]	Tahové napětí
S_{Fef}	[%]	Efektivní smrštění
E	[MPa]	Modul pružnosti
p_T	[MPa]	Tlak mezi plastem a tvárníkem
s	[mm]	Tloušťka stěny
r_3	[mm]	Střední poloměr
f	[-]	Koeficient tření mezi výliskem a kovem
S_{TV}	[mm ²]	Dosedací plocha výlisku při vyhazování
F_{KR}	[N]	Kritická síla

Symbol	Jednotka	Popis
L	[mm]	Délka vyhazovače
D	[mm]	Průměr vyhazovače
J_{MIN}	[mm ⁴]	Kvadratický průřez
A	[mm ²]	Průřez
p	[MPa]	Vstřikovací tlak
S_{PR}	[mm ²]	Průmětná plocha vylisku
σ_u	[MPa]	Mez úměrnosti
σ_k	[MPa]	Mez kluzu
λ	[-]	Štíhlost
λ_{mez}	[-]	Štíhlost mezní
MoS ₂	-	Disulfid molybdenu
PVC	-	Polvinylchlorid
PS	-	Polystyren
HI-PS	-	Vysokopevnostní polystyren
SAN	-	Styrenakrylonitril
SBS	-	Polysyteren-butadien-styren
ASA	-	Terpolymer akrylonitril-styrén-akrylát
ABS	-	Akrylonitril-butadien-styrenový kopolymer
MABS	-	Methylmetakrylat-styrenový butadien
PMMA	-	Polymethylmetakrylát
PC	-	Polykarbonát
PSU	-	Polysulfon
PES	-	Polyethersulfon
PP	-	Polypropylen

Symbol	Jednotka	Popis
LDPE	-	Nízkohustotní polyethylen
HDPE	-	Vysokohustotní polyethylen
POM	-	Polyoxymethylen
PA	-	Polyamid
PBT	-	Polybutylentereftalát
PET	-	Polyethylenereftalát
PPS	-	Polyfenylsulfid
LCP	-	Polymery tekutých krystalů
PEEK	-	Polyetereterkoten
PA 6	-	Polyamid PA 6
PA 66	-	Polyamid PA 66
PE	-	Polyethylen
EVA	-	Ethylen-vinyl-acetátový kopolymer
PPO	-	Polyfenyloxid

1. Úvod

Jak již je z názvu zřejmé, předmětem této diplomové práce je návrh dutiny vstřikovací formy pro zadaný výlisek. Výlisek je z materiálu PPA SCHUMALID GF33 o hmotnosti 47,6 g. Výlisek má být plněn pomocí studeného vtokového kanálu.

Zadavatelem projektu je firma BRONAS s.r.o. se sídlem v Heřmánkovicích. Jedná se o firmu zaměřenou na výrobu vstřikovacích forem.

Technologie vstřikování je v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu čím dál více populárnější, neboť dnešní doba si čím dál více žádá nejen lehčí, ale hlavně i levnější plastové díly. Jedná se o nejpoužívanější technologii na zpracování termoplastů, reaktoplastů, elastomerů, polymerních směsí, termoplastických elastomerů, kompozitů, kaučuků a pryží. Pomocí této technologie je umožněno vyrábět výrobky velmi složitých tvarů v krátkém čase s vysokou produktivitou. Během posledních let byla vyvinuta řada zpracovatelských postupů, umožňujících vyrábět velmi složité výrobky miniaturních rozměrů, ale i výrobky velkých rozměrů složené z několika homogenních i heterogenních materiálů.

Díly vzniklé vstřikováním se vyznačují vysokou tvarovou a rozměrovou přesností a také dokonalou kvalitou povrchu. Výrobní náklady jsou přitom velmi nízké.

Při konstrukci vstřikovací formy je snaha využívat stavebnicového systému aplikací normálií, které vyrábí velká řada výrobců. Mezi nejznámější výrobce normálií patří zejména Hasco, Meusburger, Cecho, Strack a D-M-E. Díky použití normalizovaných dílů dochází ke zkrácení výrobních časů při výrobě formy. Kromě zkrácení výrobního času jsou mnohdy normalizované díly levnější, než kdyby si je firma sama vyráběla.

Pro vytvoření konstrukce se v dnešní době využívají ve velké míře různé počítačové programy – CAD systémy. Dále je k dispozici řada velmi výkonných simulačních softwarů, které pomáhají konstruktérovi předběžně určit toky taveniny ve složitých geometrických tvarech. Díky těmto simulačním programům lze zkrátit dobu cyklu od návrhu tvarové dutiny po její výrobu. Práce v simulačním softwaru je součástí mé práce a byl použit software Cadmould 3D-F.

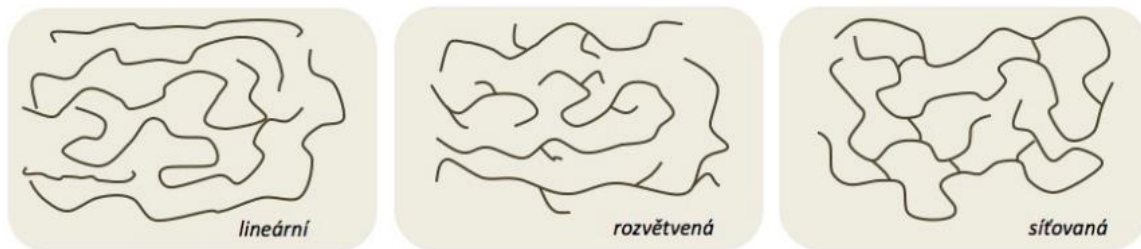
2. Teoretická část

2.1. Polymery pro vstřikování

Polymery jsou látky skládající se z molekul jednoho nebo více atomů (většinou se jedná o atom uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru, křemíku) nebo skupiny spojené ve velkém počtu. Polymery se odlišují od jiných materiálů řetězovou strukturou jejich molekul. Řetězovou strukturou je myšlena dlouhá lineární řada vzájemně spojených atomů nebo skupin atomů. [1]

Všechny syntetické polymery jsou tvořeny makromolekulami, vznikajícími opakovaným spojováním základní jednotky – meru, odvozené od výchozí molekuly – monomeru. Spojováním dvou nebo více druhů základních jednotek vznikají kopolymery.

Makromolekuly lze považovat za řetězce opakujících se merů, rozdělených podle struktury na polymery lineární, rozvětvené a síťované viz. obr.1. [2]



Obr. 1.: Molekulární struktura polymerů [3]

Druh atomů a způsob, kterým se spojují chemickými vazbami určuje základní chemické a fyzikálně-chemické vlastnosti daného polymeru. Další vlastnosti jsou ovlivněny celkovým počtem merů v řetězci, nebo-li délkou řetězce. Kolik merů je v řetězci udává polymerační stupeň, jeho hmotnost se vyjadřuje pomocí molární hmotnosti.

V případě zvyšující se molární hmotnosti polymeru rostou jeho mechanické vlastnosti a zvyšuje se viskozita jeho taveniny při určité teplotě. To znamená, že dochází ke zhoršení jeho tekutosti a zároveň i zpracovatelnost. [2]

2.1.1. Základní rozdělení polymerních materiálů

Přehled polymerních materiálů je uveden na obr.2.

Polymery			
REAKTOPLASTY	TERMOPLASTY	TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY	ELASTOMERY
Fenolické	Částečně krystalické	S vysokou tvrdostí	NR
Melaminové	Amorfní	S nízkou tvrdostí	SBR
Epoxidové			NBS
Polyesterové			EPDM
Další			Další

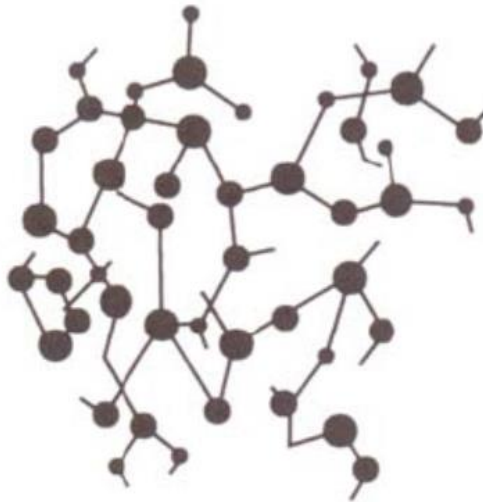
Obr. 2.: Rozdělení polymerních materiálů [2]

Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou plasty s pevně propojenými řetězci vytvořenými síťováním obr.3. Tyto řetězce nelze teplem rozpojit. Z tohoto důvodu jsou tyto materiály tavitelné a tvarovatelné jen určitou dobu po zahřátí, během opětovného zahřívání dochází k chemické změně, při které původní molekuly zesíťují a tím okamžikem se stávají netavitelné a nerozpustné. Chemická reakce která způsobuje vznik zesíťované struktury se nazývá vytvrzování. [2,3]

Hlavními vlastnosti reaktoplastů jsou vysoká chemická a tepelná odolnost, tvrdost a pevnost. Produkty reaktoplastů v nevytvrzeném stavu se nazývají pryskyřice, např. fenol-formaldehydová pryskyřice (PF), epoxidová pryskyřice (EP), polyesterová pryskyřice (UP) apod. [2,3]

Reaktoplasty se používají ve strojírenství, dopravě, chemii, elektrotechnice, stavebnictví atd.

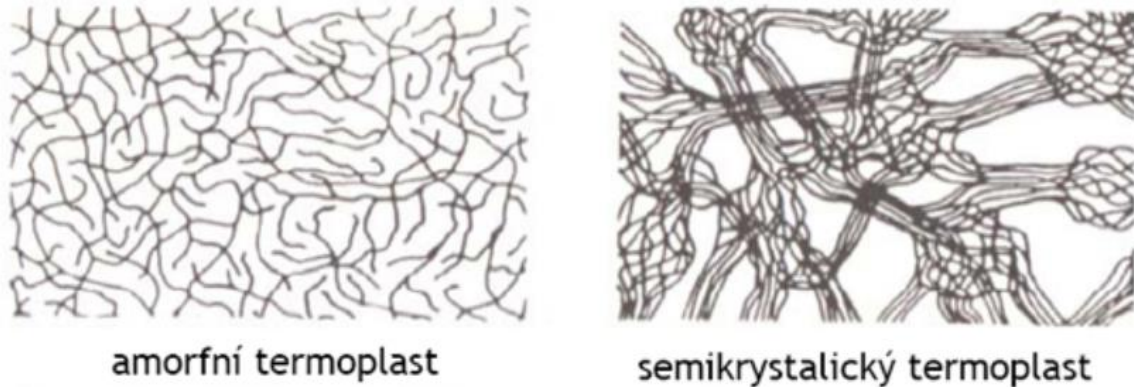


Obr. 3.: Struktura reaktoplastů [5]

Termoplasty

Termoplasty jsou materiály, které působením tepla měknou, přecházejí do plastického stavu, tudíž je lze tvářet. Do oblasti taveniny přecházejí zahřátím nad teplotu tání. Pokud je ochladíme zpět pod teplotu tání, opět přejdou do tuhého stavu. Při zahřívání nedochází k chemické reakci a nemění se jejich chemická struktura. Materiál prochází pouze změny, které mají fyzikální charakter a proces měknutí a tuhnutí je vratný (teoreticky jej lze opakovat do nekonečna). [3]

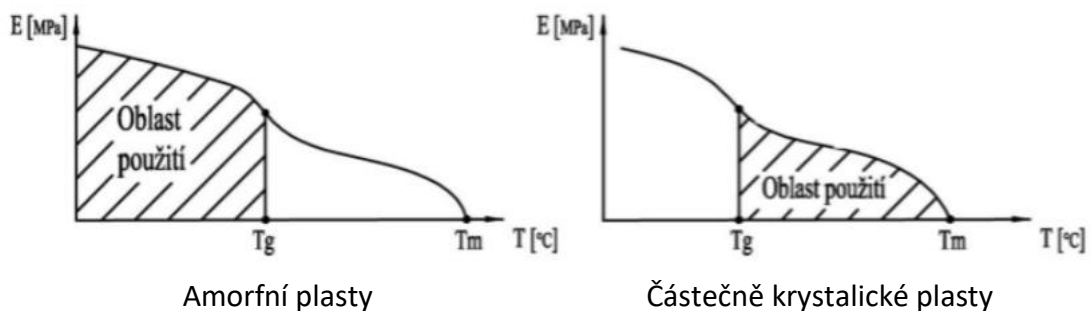
Termoplasty mohou být amorfní i částečně krystalické struktury. Amorfní termoplasty se vyznačují prostorově nepravidelně uspořádanými řetězci, částečně krystalické tím, že podstatná část řetězců je těsně uspořádaná, a tedy tvoří krystalické útvary obr.4.



Obr. 4.: Struktura termoplastu [5]

Výrobky z amorfních plastů se využívají v oblasti pod teplotou skelného přechodu (T_g). Polymer je tedy v tomto stavu nadále pevný. Pokud zvýšíme teplotu nad T_g , začnou postupně lehce slábnout kohezní síly mezi makromolekulami a plast začne přecházet do plastické oblasti, postupně až do viskózního stavu, ve kterém se začíná zpracovávat. Se zvyšující teplotou dochází k nárůstu objemu polymeru.

U částečně krystalických polymerů jsou části makromolekul vázané mnohem pevněji v sférolitech krystalické fáze a v lamelách. Pokud zvyšujeme teplotu, nejprve se uvolní jistá část makromolekul z amorfnní oblasti a následně i další. Tímto je způsoben i objemový nárůst. Tyto plasty se používají nad teplotou T_g , protože tehdy mají vhodnou kombinaci houževnatosti a pevnosti. [3,4]



Obr. 5.: Oblast využití amorfnních a částečně krystalických plastů [4]

Typickými představiteli jsou polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polymethyl-methakrylát (PMMA), polyosymethylen (POM) apod.

Samotné termoplasty bývají v praxi nejčastěji využívány v oblasti automobilového průmyslu, ovšem získávají stále silnější postavení i v řadě dalších odvětví spotřebního průmyslu. Příklady použití termoplastů v automobilovém průmyslu jsou na obr.6.

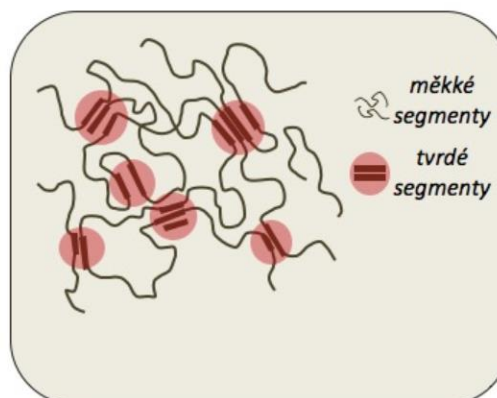


Obr. 6.: Příklad použití termoplastů

Termoplastické elastomery (TPE)

Termoplastické elastomery jsou materiály, které mají elastické polymerní řetězce (zvulkanizované) integrovány do polymerní matrice. Integrace není chemické povahy, je pouze fyzikální – směs. [2]

Vlastnostmi jsou velmi podobné pryžím. Struktura TPE se skládá z tvrdých a měkkých segmentů. Měkké segmenty tvoří elastomery, tvrdé segmenty termoplasty, které tvoří uzly sítě. TPE mají zesíťovanou strukturu viz. obr.7. Na rozdíl od pryží přecházejí při zahřívání do tekutého stavu a je možné je zpracovávat obdobně jako termoplasty. Další hlavní rozdíl mezi TPE a pryžemi udává rozdíl ve vlastnostech uzlů sítě, které jsou u pryží (po vulkanizaci kaučuku) chemické povahy, ale u TPE mají povahu fyzikální a obvykle jsou tvořeny určitým množstvím nemísitelných termoplastických segmentů rozptýlených ve spojitě elastomerní fázi. TPE oproti pryžím nedosahují takových elastických vlastností, ale výhodou je možnost vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty a dále také možnost opětovného zpracování. [3]



Obr. 7.: Struktura termoplastického elastomeru [3]

Termoplastické elastomery se v praxi používají na výrobu měkkých dotykových částí nástrojů, per, zubních kartáčků, holících strojků atd., dále plášťů kabelů, sportovního vybavení, hraček, těsnění oken automobilů, kryty airbagů, kryty přístrojových desek apod.. Příklady použití viz. obr.8.



Obr. 8.: Příklady použití termoplastických elastomerů [3]

Elastomery

Elastomery, jak už je z názvu patrné jsou vysoce pružné (elastické) materiály s nízkou tuhostí. Díky nízké tuhosti je možné za běžných podmínek díly z elastomerů malou silou značně deformovat bez porušení viz. obr.9. Jedná se o deformaci, která je převážně vratná.

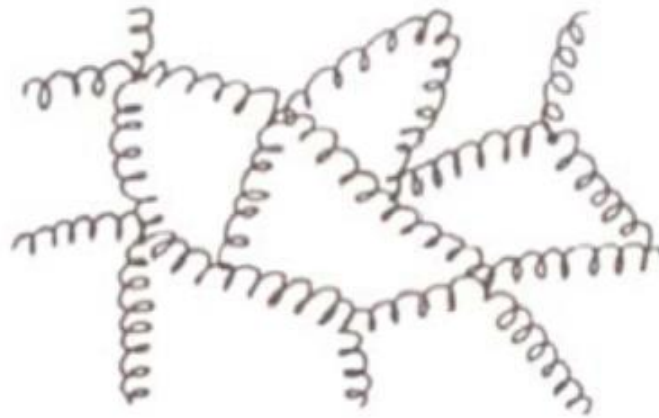


Obr. 9.: Deformace elastomeru [3]

Spoje mezi řetězci jsou aktivovány teplem – vulkanizace. Okolo spojů se řetězce mohou pohybovat, čímž vzniká elasticita. Struktura elastomeru zobrazena na obr.10.

Mezi typické představitele elastomeru se řadí kaučuky, ze kterých se vulkanizací (řídkým zesílením, nejčastěji sírou) vyrábí pryž. Pryž je vysoce pružný materiál, který má schopnost odolávat trvalé deformaci. Pryž je tedy vulkanizovaný elastomer, který je charakterizován příčnými chemickými vazbami mezi makromolekulami, které vytváří uzly prostorové sítě. [1,3]

Elastomery se v praxi používají pro výrobu technické pryže, spotřebního a zdravotnického zboží, pneumatik, hadic, dopravních pásů, gumové obuvi atd.



Obr. 10.: Struktura elastomeru [5]

2.1.2. Charakteristické teploty polymerů

V každém materiálu částice hmoty konají různé rotačně vibrační pohyby. Jejich intenzita a amplituda je úměrná teplotě ve které se právě nacházejí. Těmto pohybům se říká „mikrobrownův pohyb“. U polymerů se tímto pohybem pohybují části řetězců, zvané segmenty. [2]

Pokud zvyšujeme teplotu, dojde k rozvolnění pohybů, čímž dojde k výrazné změně vlastností. Vlastnosti se vztahují na charakteristické teploty. Zvyšováním teploty dochází k uvolnění pohybu segmentů a mění se křehké sklovité chování na chování viskoelastické. Teplota, při které dochází k této změně, se nazývá teplota skelného přechodu (T_g). Pokud dosáhneme teploty T_g , intenzita tepelného pohybu převyší této teplotě odpovídající mezimolekulární síly a dojde k pohybu segmentů. [2]

Pokud dále zvyšujeme teplotu, dochází k růstu amplitudy pohybu segmentů, až se segmenty začnou pohybovat a zejména při působení vnějších sil se celé řetězce pohybují vůči sobě navzájem, což znamená, že dochází k toku. Tato teplota se nazývá teplota tečení (T_f). Teplota tečení se vyskytuje jen u amorfních polymerů, které se po přesažení této teploty nacházejí ve stavu viskózní taveniny. [2]

V krystalické fázi při zvyšování teploty nedochází k uvolňování segmentů, neboť zde dochází k působení podstatně větší mezimolekulární síly. Tyto síly se uvolňují až při dalším zvýšení teploty, kdy se pravidelná krystalická struktura rozpadne přímo na viskózní taveninu. Tato teplota je označována jako teplota tání krystalického podílu (T_m). Žádný reálný polymer není schopen krystalizovat na 100%, ale pouze částečně. Jedná se tak o částečně krystalické polymery. Částečně krystalické polymery obsahují v mezimolekulárních prostorách amorfni části, které mají své T_g . [2]

Zvyšovali bychom dále teplotu, řetězce by se začaly intenzivním tepleným pohybem rozpadat na fragmenty, což by mělo za následek destrukci polymeru. Tato teplota je označována jako teplota rozkladu polymeru (T_c). [2]

2.2. Úprava polymerů pro zpracování a použití

Základní polymery, které jsou vyrobeny jednou z polyreakcí, při níž přecházejí chemickou cestou monomerní jednotky na makromolekulární látky (polymery), nelze obvykle zpracovávat a používat na výstřiky.

Polyreakcí je myšlena buď:

- polymerace – což je výroba polyuretanů, styrenových polymerů, polyakrylátů a PVC
- polyadice – syntéza lineárních polyuretanů
- polykondenzace – výroba polyamidu 6.6, polykarbonátů, nenasycených polyesterů

Aby mohly být polymery použity na výrobu výstřiků a získaly požadované vlastnosti je nutné je upravit vhodnými přísadami, které nazýváme aditivy. [2]

2.2.1. Přísady formující zpracovatelnost tavenin

Do polymerních materiálů se nejčastěji přidávají z důvodu bezproblémového zpracování aditiva:

- tepelné nebo termooxidační stabilizátory – zvyšují stabilitu taveniny po dobu její prodlevy v plastikačním válci, respektive v horkém rozvodu formy
- vnitřní maziva – aplikují se do materiálu již při jeho výrobě a zlepšují tokové vlastnosti taveniny, zaručují dobrou zatékavost taveniny, bezporuchovou plastikaci ve šnekové plastikační komoře, nelepivost taveniny a snadné vyjímání vstřikovaných dílů z formy
- nukleační činidla – používají se pro dosažení rovnoměrné a jemné krystalické struktury u částečně krystalických materiálů [2]

2.2.1.1. Stabilizátory

Tepelné stabilizátory

Tepelné stabilizátory mají za úkol zpomalit degradační procesy a zlepšit odolnost polymerů vůči zvýšeným teplotám, které se používají při jejich vstřikování. Tepelná degradace polymerů má za následek zhoršení jejich užitných vlastností, ale zároveň také změnu zbarvení. Pokud volíme u polymerů vhodné stabilizátory je třeba myslet i na ostatní přísady, kterými jsou zejména změkčovadla a plniva, protože napomáhají urychlování degradačních procesů. [2,3]

Světelné stabilizátory

Světelné stabilizátory zpomalují degradační procesy, vznikající v důsledku slunečního záření a tím prodlužují životnost výstřiků. Nejnebezpečnější pro polymery je UV záření, což je záření o vlnové délce 290 až 400 nm, které vyvolává vznik volných radikálů – volné,

nepárové elektrony. Tyto vzniklé radikály mají schopnost vyvolávat degradační procesy jako je štěpení nebo síťování makromolekul. Ochrana je zajištěna přidáním UV stabilizátoru, který UV záření nepropustí, nebo ho absorbuje a zajistí jeho přeměnu v tepelnou energii, popřípadě na záření o větší vlnové délce, které polymerům neuškodí. [2,3]

2.2.1.2. Plastifikátory (změkčovadla)

Plastifikátory mají za úkol snížit tuhost, tvrdost, zvýšit ohebnost, tažnost a houževnatost zchladnutého polymeru, ovšem na úkor jiným mechanickým vlastnostem polymeru, jako je například mez pevnosti. Změkčovadla působí na polymery tím, že zvyšují vnitřní pohyblivost makromolekul jejich oddálením a následný pokles sil mezi nimi. Nejčastěji se plastifikátory používají u PVC. [2,3]

2.2.1.3. Lubrikanty (maziva)

Lubrikanty snižují viskozitu taveniny, zlepšují odformování a zvyšují lesk výstřiků. Lubrikanty se dělí na lubrikanty s vnějším účinkem a vnitřním účinkem.

Lubrikanty s vnějším účinkem obsahují látky, které jsou málo rozpustné v polymerech, proto vystupují na jejich povrch a vytvářejí na povrchu polymeru vrstvu, pomocí které je snadnější vyjmutí vstříkovaného dílu z formy.

Lubrikanty s vnitřním účinkem obsahují látky, které jsou v polymerech dobře rozpustné, způsobují snížení viskozity taveniny a usnadňují zpracovatelnost polymeru.

O žádném lubrikantu nelze říci, že by plnil jednu nebo druhou úlohu. Všechny lubrikanty plní více nebo méně obě úlohy, záleží pouze na mezi rozpustnosti mezi polymerem a lubrikantem. Pro snadnější vyjímání vstříkovaných dílů z forem se používají také separační činidla, kterými jsou silikonové oleje nebo polytetrafluorethylenové (PTFE) disperze ve formě nástřiků, které vynikají tepelnou stabilitou do cca 300 °C. Nevýhodou separačních činidel jsou případné nesnáze, které mohou vzniknout při následném potiskování nebo pokovování povrchů výrobků. [2,3]

2.2.1.4. Retardéry hoření

Retardéry hoření mají za úkol snížit nebo zmenšit hořlavost termoplastů. Účinnost retardérů hoření funguje až při dosažení vyšších koncentrací, což je 5 až 30 %. Mají vliv jak na zpracovatelské vlastnosti (výdrž taveniny na určité teplotě), tak i na užité vlastnosti. K retardaci hoření přispívají i plniva anorganického původu. [2]

2.2.1.5. Barviva, pigmenty, barevné koncentráty, optická zjasňovadla

Barviva a pigmenty

Barviva a pigmenty způsobují u polymerních materiálů barevný odstín a kryvost. V polymerech jsou nerozpustné. Lze je rozdělit podle původu na anorganická, organická a bronze (kovové prášky) a mohou také působit jako nukleační činidla. Pokud budeme aplikovat různá barviva na stejný polymer, může působením barviv dojít k různému smrštění výstřiků, což má za následek jejich působení jako nukleační činidla. [2]

Mohou se aplikovat buď při výrobě vstřikovaného materiálu u jeho výrobce, nebo ve formě barevných koncentrátů do tzv. přírodních materiálů přímo na vstřikovacích strojích u zpracovatelů granulátů. Pro zabarvování polymerů je používáno více jak 200 pigmentů. Vhodný pigment musí být odolný vůči běžným zpracovatelským teplotám daného polymeru. [2,3]

Barevné koncentráty

Základním prvkem barevného koncentrátu je takzvaný nosič. Nosič je plast, který obsahuje 20krát až 100krát více pigmentů a barviv, než obsahuje původní přírodní granulát. Nabídky barevných koncentrátů jsou dány vzorníky barevných odstínů RAL, PANTONE, HKS-NCS atd., nebo individuálními požadavky zákazníka. [2]

Barevný koncentrát je dodáván na takzvaným universálním nosiči, což jsou obvykle PE vosky, nebo je barevný koncentrát namíchán a zgranulován přímo na polymeru, který se bude obarvovat. Namíchání a zgranulování barevného koncentrátu na polymeru je výhodnější, protože nedochází k ovlivnění vlastností výstřiku při porovnání s nebarevným dílem. [2]

Hlavním požadavkem, který se klade na barevné koncentráty je, aby byly tepelně stálé, to znamená, že nosič, pigment i barvivo musí beze změny odolat výrobním podmínkám i pokud se regenerát několikrát sobě zpracuje. Obecně platí, že tepelně stálější jsou anorganické pigmenty oproti organickým. Nejmenší tepelnou odolnost mají pigmenty červené a žluté. [2]

Optická zjasňovadla

Optická zjasňovadla zlepšují vzhled u přírodních, bílých a světle pigmentovaných výstřiků. Osahují látky, které mají schopnost pohlcovat část UV záření a pohlcenou energii následně vyzařují během osvětlování ve formě fluorescence (záření o větších vlnových délkách). Při pohledu má pak člověk dojem, že sledovaná barva je na denním světle jasnější. [2,3]

2.2.1.6. Plniva (kompozitní materiály)

Polymerní materiály obsahující plniva se nazývají kompozitní materiály. Definice kompozitního materiálu je, že se jedná o materiálovou strukturu, která je složena z jednoho nebo více materiálů o zcela odlišných vlastnostech s výsledným synergickým účinkem. Základní uspořádání kompozitního materiálu podle uvedené definice je matrice, což je pojivo (polymer s aditivou) a plnivo. Jako plnivo se používají plniva částicová, vyztužující a nanoplňiva. [2,3]

Plniva částicová

Částicová plniva tvoří skupinu, do které patří celá řada minerálních plniv, které mají různé velikosti a tvary částic. Tyto plniva obecně zvyšují viskozitu taveniny, čímž zhoršují její tekutost, zvyšují tvrdost, tuhost, tepelnou odolnost výstřiků a zmenšují jejich smrštění.

Specifické typy částicových plniv zlepšují různé vlastnosti určitého polymeru. Například grafit nebo MoS_2 zlepšují kluzné vlastnosti výstřiků, jiné pak snižují povrchový a vnitřně izolační odpor, zvyšují tepelnou vodivost. [2,3]

Částicová plniva se v kompozitu pohybují v koncentraci od nízkých obsahů, jako je obsah pod 1 hmotnostní procento, až po vysoké obsahy jako 62 a více hmotnostního procenta. Částice plniva jsou velké od jednoho až desítek mikronů (například mikromletý grafit má průměr 2 až 5 mikronů, ketonové vysokostrukturní saze průměr pod 1 mikron, aerosil průměr 10 až 30 mikronů) až po desetiny mikronů (například grafit, mikromletý vápenec). Tvary částicových plniv jsou buď kulovité (kaolin, mikromletý vápenec) nebo destičkové (slída, grafit). [2]

Do skupiny částicových plniv řadíme například – skleněné mikrokuličky (balatonina), talek (mastek), kaolin, mikromletý křemen, vápenec, čedič, perlit, živec, případně další minerály, koks, saze, aerosil, slídu, kysličníky kovů, sírany, sirníky, práškové kovy a jejich slitiny, polymerní prášky, dřevo atd. Takováto plniva mohou zároveň také působit jako pigment (saze), retardér hoření (saze), nebo jako nukleační látka, pokud je jejich velikost řádově stejná nebo menší než velikost sferolitů. Skleněné mikrokuličky, se také vyskytují i ve formě dutých skleněných kuliček, které výrazně snižují hmotnost vstřikovaného dílu a zároveň mají výborné viskózní vlastnosti díky svému tvaru. Užívané typy částicových plniv jsou vidět na obr.11.



Obr. 11.: Užívané typy částicových plniv [6]

Vyztužující plniva

Vyztužující plniva se používají především za účelem zvýšení rázové houževnatosti polymerů, které je provázeno zvýšením i dalších mechanických charakteristik jako je mez pevnosti, modul pružnosti, tvarová stálost nebo odolnost toku za studena. Bohužel dochází také ke zhoršení vlastností jako je ohebnost, tažnost, smrštění a kluzné vlastnosti vyjímaje uhlíková vlákna. Vyztužující plniva mají nejčastěji vláknitou strukturu a používají se obvykle ve tvaru sekaných pramenců vláken. [2,7]

Vyztužující efekt vláknitých plniv je závislý zejména na poměru délky k průměru. Vyztužující efekt začíná, pokud je poměr délky vlákna k jeho průměru (l/d) větší než 10. Nejčastější délka vláken u běžného vstřikovacího granulátu je v řádu desetin mm (0,2 až 0,4 mm) až celých mm, což je u materiálů s dlouhými vlákny cca 10 mm. Průměry vláken se pak pohybují v jednotkách mikrometrů. [2]

Vyztužující plniva se obvykle pohybují v koncentraci od 5 do 60 hmotnostních procent. V největším množství se používají skleněná vlákna s různou apretací pro dobré propojení s polymerní matricí daného typu. Mezi další používaná vlákna patří uhlíková vlákna, vlákna z nerezových ocelí, vláknité monokrystaly kovů, kysličníky kovů a karbidů, vlákna z titanátů alkalických kovů, vlákna aromatických polyamidů, minerální vlna (čedič, walastonit) a další. [2]

Při porovnání kompozitů s dlouhými vlákny a kompozitů s krátkými vlákny docházíme k závěru, že kompozity s dlouhými vlákny mají vyšší mechanické vlastnosti, vyšší vrubovou houževnatost, méně tečou za studena, mají sníženou průtažnost a jsou velmi stálé za vyšších teplot i ve vlhkém a teplém klimatu. [2]

Nanoplňiva

Existuje mnoho druhů nanokompozitů, ovšem nejčastěji používaným plnivem jsou vrstevnaté jíly, jako je například montmorillonit (složený hlinítokřemičitan, je součástí bentonitu). Částice mají velikost, nebo alespoň jeden jejich rozměr je v nanometrech ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) a tedy se řádově blíží velikosti molekuly termoplastické matrice. Díky tomuto je umožněno velmi blízké spojení matrice a plniva, přičemž interace mezi částicí a molekulou vytváří na povrchu částice spojenou oblast, která znemožní pohyb příslušné části polymerní matrice. Příklad si můžeme ukázat například na již uvedeném montmorillonitu, jehož 1g má více jak 700m^2 fiktivního povrchu ve styku s polymerní matricí. Běžně používaný talek o stejné hmotnosti má povrch pouze cca 30m^2 . Obvykle je obsah nanoplňiva v kompozitu 3 až 7%. [2]

Nanočástice tedy přispívají ke zlepšení mechanických vlastností polymerní matrice a mohou redukovat obsah přísad, které jsou nutné k dosažení požadovaných výhod kompozitních materiálů a tím i jejich použití vede k redukcí hmotnosti konkrétního výstřiku, v porovnání s tradičními plněnými termoplasty. Nanočástice mohou plně nahradit částicová, minerální, vláknitá plniva (skleněná vlákna) i retardéry hoření. Také zlepšují

nepropustnost, odolnost vůči chemikáliím a navlhkavost, včetně zvýšení jakosti povrchu výstřiků a zvýšení lesku. [2]

Typ a tvar plniva bývá součástí označení polymerů, např. PP T20 nebo PP MX15, PP GF30 apod. Význam jednotlivých symbolů uvádí následující přehled (tab.1):

Tab. 1.: Významy symbolů plniv [7]

CF	uhlíkové vlákno (carbon fibre)
CD	uhlíkový prášek (carbon fines, powder)
GB	skleněné kuličky (glass beads, balls)
GD	skleněný prášek (glass fines, powder)
GF	skleněné vlákno (glass fibre)
GX	skleněné plnivo bez specifikace
K	uhličitan vápenatý (calcium carbonate)
MF(x)	kovové vlákno (metal fibre)
MD(x)	kovový prášek (metal fines, powder)
MF	minerální vlákno (mineral fibre)
MD	minerální prášek (mineral fines, powder)
MX	minerální plnivo bez specifikace
NF	přírodní vlákno (natural fibre)
P	slída (mice)
Q	oxid křemíku (silica)
RF	aramidové vlákno (aramid fibre) – nejznámější Kevlar
T	talek (talcum) – minerální plnivo na bázi křemičitanu

Největší přínos pro oblast polymerních kompozitních materiálů (vyztužených polymerů) mají z mechanického hlediska skleněná, ale také uhlíková vlákna, která mají nejširší spektrum mechanických vlastností. Vliv tvaru plniva na vlastnost termoplastů je uveden v tab.2. [7]

Tab. 2.: Vliv tvaru plniva na vlastnosti termoplastů [2]

	Skleněné vlákno	Azbest	Uhlíkové vlákno	Whiskry	Syntetická vlákna	Celulóza	Slída	Talek	Uhlík	Křemenný písek	Kaolin	Skleněné kuličky	Kaiciumparbonát	Oxidy kovů	Saze
Pevnost v tahu	++	+	+	+ -			+	0				+			
Pevnost v tlaku	+							+		+		+	+		
E-modul	++	++	++	+			++	+		+		+	+	+	+
Rázová houževnatost	- +	-	-	-	++	+	- +	-		-	-	-	- +	-	+
Snížení teplotní roztažnosti	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
Snížení smrštění	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zlepšení vedení tepla		+	+					+	+	+			+		+
Pevnost za tepla	- +	+	- +				+	+			+		+	+	
Elektrická vodivost				+					+						+
Elektrický odpor							++	+			++			+	
Teplotní odolnost							+	+		+	+			+	+
Chemická odolnost		+					+	0	+		+	+			
Zlepšení otěru			+			+	+	+			+				
Erozní rychlost	- +	+					+				-		-		
Abráze forem a strojů	-	0		0	0	0		0	0	-		0	0		0
Snížení ceny	+	+				+	+	+	+	++	+	+	++		
	Vláknitá plniva					Destičková plniva			Plniva tvaru koule						
	Vyztužující plniva					Nevyztužující plniva									

++silný vliv

+ slabý vliv

0 bez vlivu

- negativní vliv

2.3. Smrštění termoplastů

2.3.1. Úvod do smrštění

Smrštění se vyskytuje u všech plastů. Je jedno, zda se jedná o plast amorfni jako je například PS, HI-PS, SAN, SBS, ASA, ABS, MABS, PMMA, PC, PC/ASA, PSU, PES, PSU/ABS nebo o plast částečně krystalický například PP, LDPE, HDPE, POM, PA, PBT, PET, PPS, LCP, PEEK. Dále také platí, že rozměry výstřiku měřené po vyhození z formy jsou rozdílné od rozměrů, měřených po určité době od výroby výstřiku, respektive po jeho skladování. Tyto rozměrové změny jsou nejčastěji způsobeny smrštěním nebo deformací. Ovšem tady je důležité rozlišovat, zda se jedná o smrštění nebo deformaci, protože mezi oběma pojmy je podstatný rozdíl, ke všemu deformace může být a také velmi často je důsledkem smrštění.

[2]

Smrštění je objemová změna při tuhnutí polymerních tavenin, jejíž základní příčinou je stlačitelnost, tepelná kontrakce plastů, u částečně krystalických plastů ještě přistupují krystalizační změny. Deformace je změna tvaru při zachování konstantního objemu výstřiku.

[2]

Základní a očekávaný požadavek uživatelů výstřiků z termoplastů je, že vyráběný díl musí mít požadované rozměry definované jmenovitou hodnotou a tolerancemi, jak rozměrovými, tak i tolerancemi tvaru a polohy. Z tohoto faktu vyplývá, že tvarová dutina formy musí být o příslušné smrštění v určitém místě větší. Možná se zdá, že se jedná o jednoduchý požadavek, ale v praxi se bohužel jedná o velmi obtížně realizovatelný

požadavek. Důvodem obtížné realizovatelnosti je, že na výsledné smrštění působí velké množství ovlivňujících parametrů. Mezi základní považujeme:

- procesní parametry výroby – tlaky, teploty, časy
- typ a vlastnosti zpracovávaného termoplastu – amorfní, částečně krystalické materiály, jejich pvT chování, plněné, neplněné plasty, druh a obsah plniva
- konstrukce výstřiku, resp. formy – zejména se jedná o tloušťku stěn výstřiku, tvary ovlivňující smrštění apod. [2]

2.3.2. Smrštění – tepelná kontrakce, pvT chování termoplastů

Smrštění je v základě tepelná kontrakce, ale v praxi jsme zjistili, že skutečné zmenšení rozměrů výstřiku po vyhození z formy je menší, než by odpovídalo čisté tepelné kontrakci. Tento jev je způsoben dalšími mechanismy, které ovlivňují tepelnou kontrakci a tím také ovlivňují smrštění:

1. působení vnitřního pnutí ve výstřiku
 - vliv teplotního profilu měnícího se v době chlazení
 - vliv teploty stěny tvarové dutiny formy
2. krystalizační pochody u výstřiků z částečně krystalických termoplastů
 - vliv teploty stěny tvarové dutiny formy
 - vliv chladícího profilu
3. zadržení smrštění mechanickými překážkami ve formě
 - vliv vynucený tvarem výstřiku, respektive jeho zaformováním, kdy způsob zaformování některé partie výstřiku „podrží“ a tím ovlivní jejich kontrakci [2]

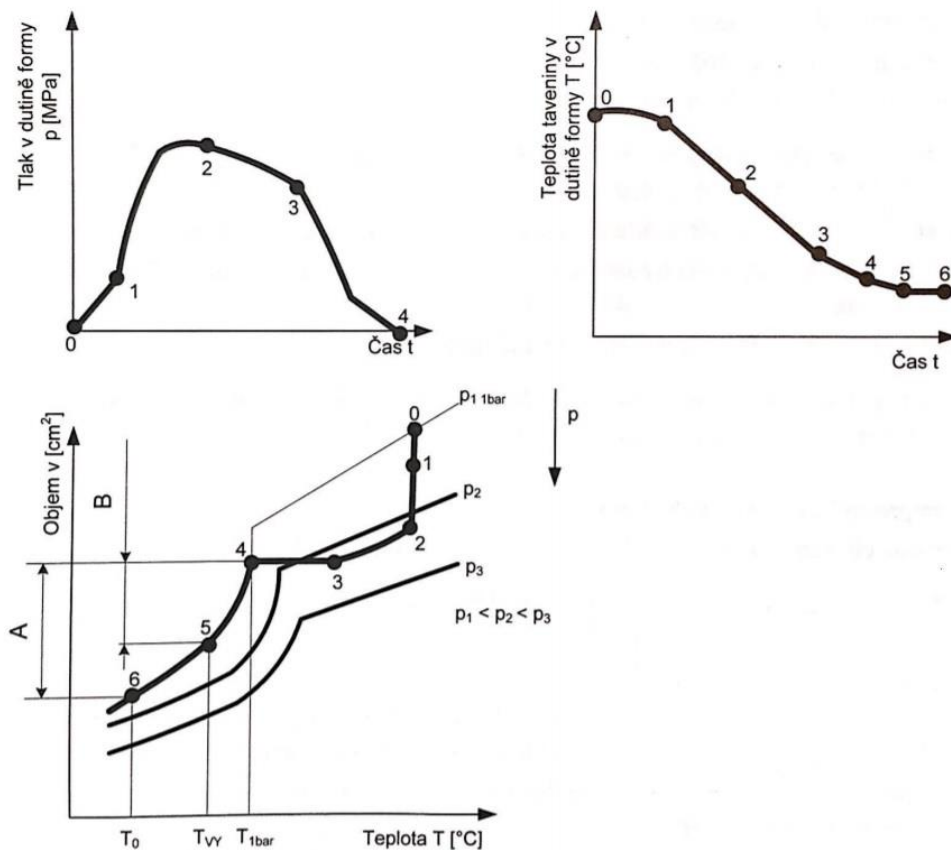
Dalším z podstatných vlivů, které působí na tepelnou kontrakci je účinek termodynamických procesů v tavenině, které působí prostřednictvím:

- tlakového profilu v průřezu dílu po dobu jeho chladnutí na teplotu okolí
- působení tlaku a smykové namáhání (napětí) v závislosti na konstrukci a umístění vtoku na výstřiku
- teploty taveniny a dalších procesních parametrů [2]

Vliv působení termodynamických pochodů na průběhu smrštění velmi dobře popisuje pvT diagram konkrétního vstřikovaného materiálu. Jedná se o diagram p – tlak, v – objem, T – teplota. Tento diagram charakterizuje:

- kompresibilitu – změna objemu v závislosti na tlaku
- tepelné chování – změna objemu v závislosti na změně teploty

Výše uvedené závislosti schematicky znázorňuje obr.12, na kterém je znázorněn průběh tlaků a teplot včetně působení pvT chování při vstřikování termoplastů.



Obr. 12.: Schématické znázornění změny tlaku p , objemu v a teploty T při vstřikování termoplastů [2]

Popis pVT chování:

- bod 0 - Šnek v plastikační komoře vstřikovacího stroje stlačí taveninu o příslušné teplotě taveniny, vyvolá vstřikovací tlak před čelem šneku v dávce taveniny takový, který při požadované vstřikovací rychlosti dopraví taveninu přes odpory vtokového systému do ústí vtoku na výstřiku.
- bod 0-1 - V tomto úseku probíhá objemové naplnění tvarové dutiny formy taveninou. V bodě 1 je již tvarová dutina objemově naplněna.
- bod 1-2 - Tavenina v dutině formy je stlačována, v bodě 2 vnitřní tlak dosahuje maxima při optimálním procesu.
- bod 2 - V tomto bodě dochází k přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak, nebo-li z plnicí fáze na dotlakovou.
- bod 2-3 - Dotlaková fáze, při které dochází k chlazení taveniny a snížení tlaku umožňuje objemovou kontrakci, přičemž zároveň dotlak doplňuje „čerstvou“ taveninu z plastikační komory vstřikovacího stroje a tím dochází ke kompenzaci ztráty

objemu. Pokud špatně zvolíme bod přepnutí v počátku této fáze, může dojít buď k výraznému krátkému poklesu tlaku (předčasné přepnutí), nebo naopak jeho nárůstu (pozdí přepnutí). Oba způsoby jsou, co se týče kvality výstřiku špatné.

- bod 3 - Dochází k zamrznutí vtokového ústí, další působení dotlaku je již zbytečné, taveninu není možné dále dodávat do tvarové dutiny, tlačíme ji pouze do vtokového systému.
- bod 3-4 - Tlakový pokles při konstantním objemu výstřiku v počáteční fázi. V bodě 4 tlak v dutině formy dosáhl hodnoty atmosférického tlaku (1bar) a povrch výstřiku se v důsledku smrštění oddaluje od stěn tvarové dutiny formy.
- Bod 4-5 - Dochází k chlazení výstřiku za konstantního tlaku. Během průběhu chlazení celý objem zatuhne, v bodě 5 dosáhne výstřik teploty vyhazování T_v a je z formy vyhozen.
- Bod 5-6 - Dochlazování výstřiku mimo formu až po dosažení konečného rozměrového a tvarového stavu, nejčastěji minimálně 16 hodin, maximálně pak 48 hodin od vyhození z formy [2]

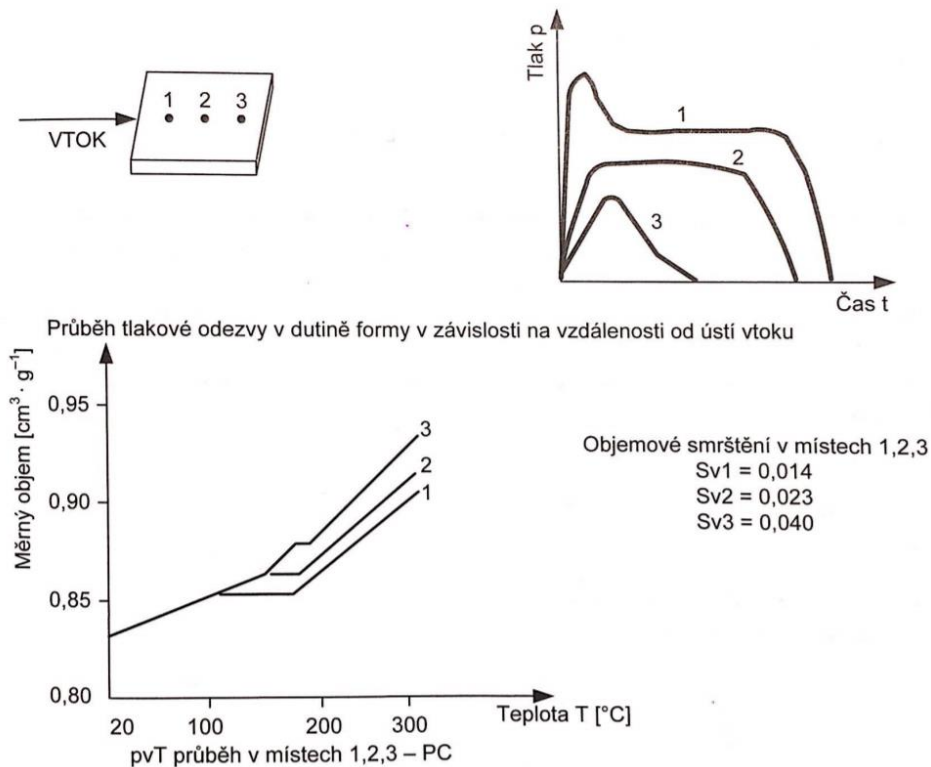
Při posuzování chování polymerních tavenin konstrukčních materiálů je důležité si uvědomit reálné limity pvT diagramů. Zde je třeba zohlednit, že časový průběh tlaku v dutině formy závisí na místě jeho hodnocení. Tlaková historie v různých bodech výstřiku je rozdílná (obr.13), a proto vliv diferencí v tlakové historii má za následek rozdílné smrštění v různých místech výstřiku. Čím blíže jsme u místa vtoku, tím větší je tlaková odezva. Pro místní smrštění platí nepřímá úměra, čím blíže jsme u ústí vtoku, tím je vyšší tlak a z toho vyplývá menší smrštění.

Dále není do průběhu pvT diagramu zahrnuta funkce času. Tím je myšleno, že pvT diagramy neberou ohled na gradient chlazení, což je důležitý parametr pro ovlivnění smrštění. Rychlost ochlazování je nejvíce významná u částečně krystalických plastů.

Není zde zahrnut efekt rozdílných tloušťek stěn na výstřiku ani zohlednění ovlivnění změn objemu v důsledku vnitřního pnutí ve výstřiku.

PvT diagram tedy ukazuje pro každý bod výstřiku jeho tlakovou teplotní historii, včetně doby jeho zatuhnutí a umožňuje provedení odhadu objemového smrštění. Pokud by jsme chtěli určit přesné hodnoty, bylo by nutné znát navíc koeficient teplotní roztažnosti určitého materiálu, průběh relaxace a technologické parametry vstřikování. [2]

Nejdůležitější informace v praxi je celkové objemové smrštění S_v , resp. výrobní. Je tím myšlena objemová změna ΔV mezi body 4 a 6, resp. mezi body 4 a 5 (obr.12), která zároveň definuje potenciaální směrové smrštění. [2]



Obr. 13.: Tlaková historie v různých místech výstřiku a její vliv na pvT chování [2]

Výrobní objemové smrštění lze určit ze vztahu :

$$S_{VV} = \frac{V_F - V_V}{V_F} \quad (1)$$

kde V_F je objem tvarové dutiny formy za teploty okolí 23°C , V_V je objem výstřiku za stejné teploty (23°C), nebo ze vztahu pro směrové smrštění:

$$S_{VV} = 1 - (1 - S_D) \cdot (1 - S_S) \cdot (1 - S_{TL}) \quad (2)$$

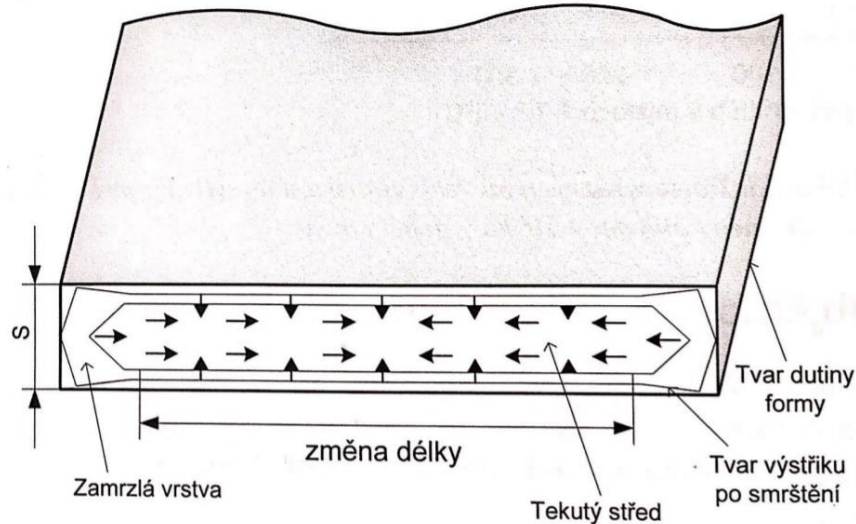
kde S_D je smrštění ve směru délky, S_S smrštění ve směru šířky a S_{TL} smrštění tloušťky stěny. [2]

Z výsledků měření reálných výstřiků je odvozen vztah, pomocí kterého lze určit smrštění tloušťky stěny výstřiku (3) a smrštění ve směru délky, resp. šířky (4), za předpokladu, že známe objemové smrštění:

$$S_{TL} = (0,9 \text{ až } 0,95) \cdot S_{VV} \quad (3)$$

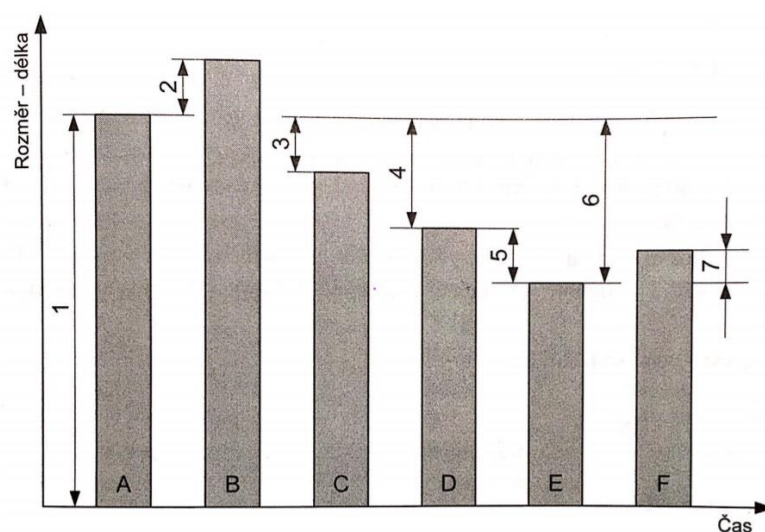
$$S_{D/S} = (0,1 \text{ až } 0,05) \cdot S_{VV} \quad (4)$$

Uvedené smrštění je tedy z uvedeného pohledu zatíženo chybou přibližně 5 až 10%. Musíme zde zdůraznit, že smrštění $S_{D/S}$ nemá význam anizotropie smrštění, jako například anizotropie smrštění plněných termoplastů. Problematika směrového smrštění je znázorněna na obr.14. [2]



Obr. 14.: Průběh smrštění v chladnoucí plastové desce [2]

Hodnota smrštění je hodnota závislá na času, a proto v praxi musíme vždy přesně specifikovat, ve kterém časovém okamžiku o hodnotě smrštění hovoříme. Zde zmíněný časový průběh je zobrazen na obr.15, kde jsou schematicky znázorněny změny výstřiku v závislosti na čase. Z obrázku vyplývá důležitost časové definice rozměru smrštění, neboť je vidět rozdíl mezi rozměrem výstřiku naměřeným hned po vyhození z formy (C), rozměrem v ustáleném stavu, což je výrobní smrštění (D) a dosmrštěním (E). [2]



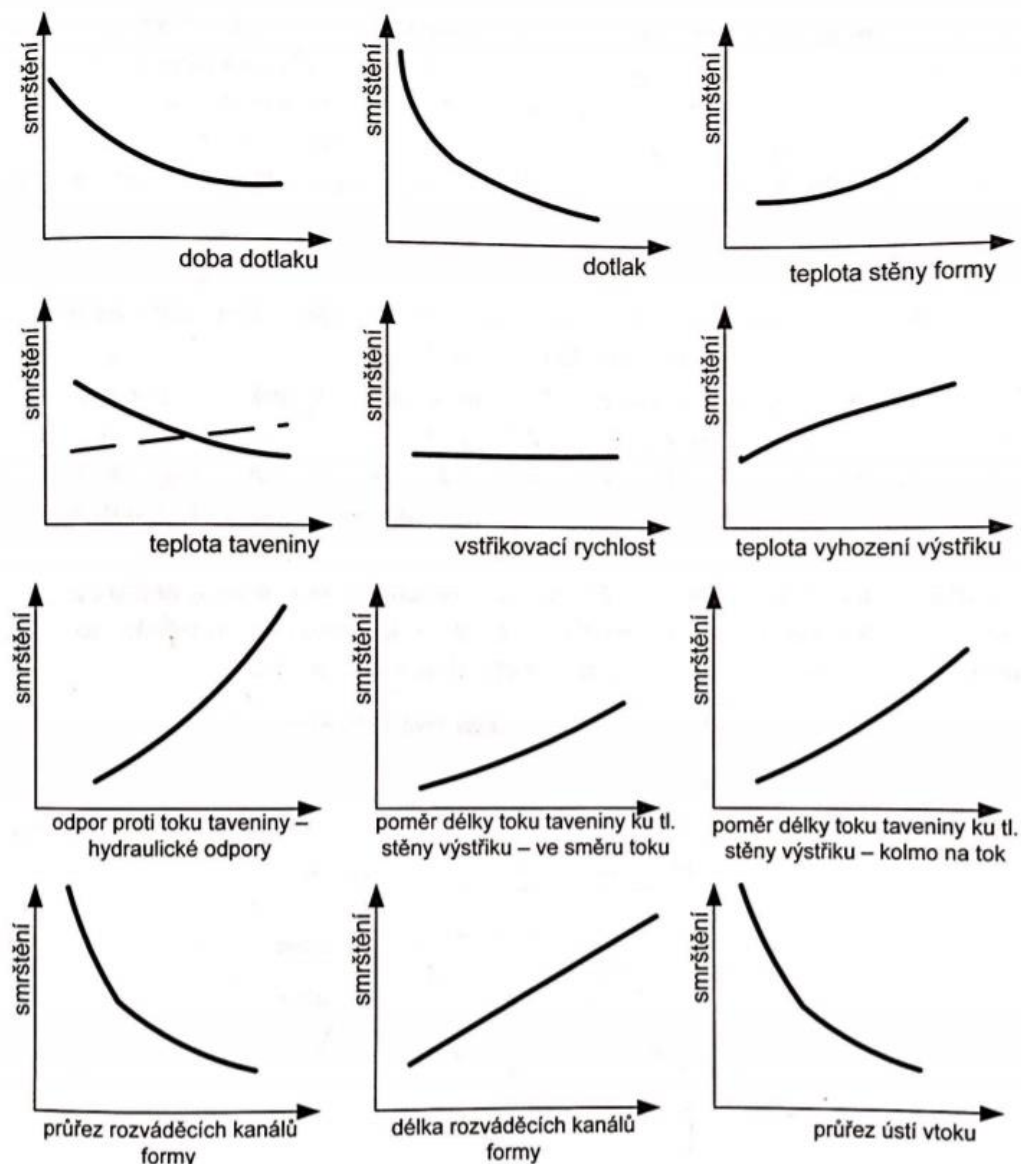
Obr. 15.: Změna rozměru výstřiku v závislosti na čase v důsledku smrštění [2]

Popis obr.15.:

1 – rozměr formy, 2 – tepelná expanze ve formě, 3 – smrštění po vyhození z formy S_c ,
 4 – výrobní smrštění S_D , 5 – dosmrštění S_E , 6 – celkové smrštění S_F , 7 – rozměr po
 kondicionaci, A – studená forma (teplota okolí), B – forma na pracovní teplotě, C – výstřik
 po vyhození z formy, D – výstřik po 24 hodinách od vyhození z formy uložený za normálních
 podmínek, E – výstřik po delším skladování nebo tepelné kondicionaci, F – díl po
 kondicionaci ve vodě.

2.3.3. Závislost výrobního smrštění na procesních parametrech

Souhrn závislosti smrštění na procesních parametrech je vidět na obr.16.



Obr. 16.: Vliv vybraných procesních parametrů na průběh smrštění [2]

2.3.3.1. Doba dotlaku

Po fázi vstřikování (plnění dutiny vstřikovací formy) následuje fáze dotlaku, která má za úkol dopravit do chladnouceho výstřiku takové množství taveniny, které působí proti objemové kontrakci při snižování teploty výstřiku, aby došlo k co nejmenšímu smrštění výstřiku. Tento proces může probíhat pouze do té doby, dokud je možné taveninu vstřikovaného plastu do dutiny vstřikovací formy dodávat. Tím je myšleno, že pokud dojde k zatuhnutí taveniny ve vtokovém systému, je nemožné dodávání taveniny. Ovšem co se týče z hlediska procesu, je výhodné ukončit dotlakovou fázi dříve, než dojde k zatuhnutí vtoku, protože pak by docházelo k „přetlačení“ taveniny plastu v okolí vtoku a tím k velkému pnutí v oblasti vtoku. [2,3]

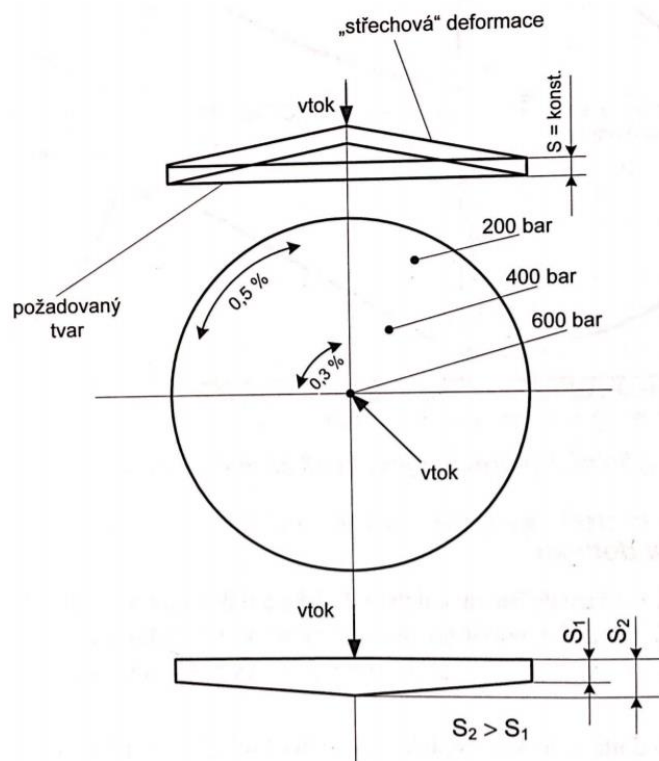
Dobu kterou působí dotlak, můžeme považovat za nejdůležitější technologický parametr kompenzující smrštění. Lze se řídit pravidlem, že čím delší je reálná doba působení dotlaku, tím je smrštění menší. Reálnou dobou je myšlena doba, kdy vtokové ústí pro taveninu je průchozí, není zamrzlé. Z toho vyplývá, že výhodnější je plnit tvarové dutiny forem dostatečně dimenzovanými průřezy ústí vtoku, aby nedocházelo k předčasnému zamrznutí. Důležité je také, aby ústí vtoku (studený rozvod nebo horká tryska) bylo umístěno na výstřiku do největší tloušťky stěny, aby nedošlo k zamrznutí stěny dílu a tím zabránění předčasnému toku taveniny. [2,3]

2.3.3.2. Tlaková úroveň dotlaku

Tlaková úroveň dotlaku má stejně jako doba dotlaku pro oba typy termoplastů (amorfní a částečně krystalické) rozhodující vliv na hodnotu smrštění. Pokud máme vysokou úroveň dotlaku, dojde k vyvolání vysoké tlakové odezvy ve vstřikovaném dílu při zamrznutí jeho průřezu a tím i snížení výrobního smrštění. Lze vyvodit, že vliv tlaku dotlaku je obdobný jako doba jeho působení, ale neplatí zde přímá úměra. S rostoucí hodnotou úrovně dotlaku není snížení smrštění lineární, ale zmenšuje se pomaleji. Vyšší úroveň dotlaku má za následek vyšší obsah vnitřního pnutí ve výstřiku. [2]

Pokud uvažujeme optimálně navržený díl včetně vtokového systému a správného umístění ústí vtoku, je možné zvýšením dotlaku zmenšit smrštění u částečně krystalických materiálů až o 0,5%. U amorfních materiálů jsme schopni ovlivnit smrštění maximálně o 0,2%. [2]

Velikost tlakové odezvy ve vstřikovaném dílu při zamrznutí ústí vtoku je závislá na vzdálenosti od ústí vtoku. Čím větší je vzdálenost od ústí vtoku, tím menší je dotlak a tudíž dochází k vzrůstu smrštění. Tento vliv je znázorněn na obr.17, kde máme jako příklad kruhový vstřikovaný díl se středovým ústím vtoku z neplněného materiálu a dojde zde k tzv. „střechové“ deformaci. [2]



Obr. 17.: Rozdílné působení dotlaku v závislosti na vzdálenosti od ústí vtoku [2]

2.3.3.3. Teplota stěny formy

Teplotou stěny formy je míněna teplota, která je na povrchu tvarové dutiny vstřikovací formy. Pokud vzrůstá teplota stěny formy, stejně jako zvětšující se tloušťka stěny výstřiku, vzrůstá zároveň i hodnota smrštění. Čas zamrznutí průřezu stěny se v důsledku zvýšeného obsahu tepla ve vstřikovaném dílu prodlužuje a tím dochází zároveň ke zvýšení smrštění. Důvodem je pomalejší odvod tepla. [2,3]

Teplota stěny formy neovlivňuje pouze smrštění, ale také tokové chování taveniny, krystalizační pochody u částečně krystalických materiálů a profil vnitřního pnutí ve výstřiku.

Pro uvedení příkladu, jaký vliv má teplota stěny formy na výrobní smrštění a dosmrštění pro neplněný PA6 je dán změřenými hodnotami na zkušební destičce o rozměrech 3 x 90 x 150 mm v tab.3 . [2]

Tab. 3.: Vliv teploty stěny formy na smrštění PA 6 [2]

PA 6	Teplota formy	
	40 °C	120 °C
Výrobní smrštění rovnoběžně s tokem taveniny	0,8 %	1,4 %
Dosmrštění rovnoběžné s tokem taveniny	1,4 %	1,46 %
Výrobní smrštění kolmo na tok taveniny	0,9 %	1,6 %
Dosmrštění kolmo na tok taveniny	1,5 %	1,67 %

Nízká teplota formy (40 °C) vyvolá vysoký gradient chlazení a je příčinou nízké úrovně krystalického podílu v PA 6. Nízká úroveň krystalického podílu způsobí nízké výrobní smrštění, ale to vede k výrazně velkému dosmrštění.

Vysoká teplota formy (120 °C) způsobí vysoký stupeň krystalizace a tedy i velké smrštění, ale následné dosmrštění je malé. Celkové smrštění, jako součet výrobního smrštění a dosmrštění, je ale pro obě teploty stěny formy v delším časovém úseku prakticky stejné. [2]

2.3.3.4. Teplota taveniny

Polymerní materiály mají v závislosti na teplotě velmi proměnlivé termodynamické vlastnosti, především se jedná o viskozitu a specifický objem. Zjednodušeně můžeme říci, že čím nižší je teplota taveniny, tím větší je viskozita a z toho plynoucí horší zpracovatelnost a nutnost použití vyšších tlaků. [3]

Vliv teploty taveniny na smrštění není jednoznačný a z toho důvodu ani předpověď vlivu není jednoduchá. Z pohledu na smrštění působí teplota taveniny dvěma proti sobě jdoucími efekty. [2]

První efekt – zvyšování teploty taveniny – zvyšuje i její tepelnou kontrakci, a tedy i smrštění, což je znázorněno na obr. 16 na křivce kreslené přerušovanou čarou.

Druhý efekt – zvýšená teplota taveniny – dochází ke snížení viskozity (zlepšení tekutosti) a tím umožňuje vyšší tlakovou odezvu ve výstřiku při dotlaku, což vede ke zmenšení smrštění. Zobrazeno na obr. 16 křivkou plnou čarou.

Superpozice obou efektů v daném okamžiku určuje hodnotu smrštění. Většinou je působení fáze dotlaku výraznější než tepelná kontrakce a z toho důvodu je pro určení vlivu teploty taveniny na smrštění důležitější křivka kreslená plnou čarou tzn. s rostoucí teplotou taveniny klesá hodnota velikosti smrštění. [2]

2.3.3.5. Vstřikovací rychlost

Jednou z nejdůležitějších sledovaných rychlostí je vstřikovací rychlost, která také bývá označována jako rychlost axiálního pohybu šneku během fáze plnění dutiny formy. Vliv vstřikovací rychlosti na smrštění je podobně nejednoznačný, jako teplota taveniny. Zvyšování vstřikovací rychlosti vede ke zvýšení teploty taveniny, což, je způsobeno zvýšením smykového namáhání taveniny a tím dochází k větší tlakové odezvě v dutině formy. Proti ovšem působí disipace energie, nekonstantní viskozita taveniny, efekty orientace a reorientace a rozdělení vnitřního pnutí. Tyto jevy mohou mít za následek obrácený vliv a smrštění zvyšovat. Nízká rychlost vstřikování obvykle vyvolá nutnost zvýšení teploty taveniny, abychom dosáhli tokového naplnění tvarové dutiny formy. To vede ke zlepšení přenosu tlaku a dochází ke zmenšení smrštění. [2,3]

Využitím interakce popsaných vlivů se obvykle může působení rychlosti vstřikování na smrštění zanedbat a vstřikovací rychlost se s ohledem na smrštění zanedbává. [2]

2.3.3.6. Teplota vyhazování výstřiku z formy

Ve fázi chlazení dochází ke chladnutí taveniny plastu v dutině vstřikovací formy, neboť pro vyhození vstřikovaného dílu z formy musí být plast v tuhém stavu. Fáze chlazení je započata již při prvním styku taveniny plastu s formou, protože forma je chladnější a pokračuje během fáze dotlaku. Chlazení plastu následně probíhá až do úplného zatuhnutí plastu v dutině formy. [3]

Pokud vstřikovaný díl setrvá v dutině formy delší dobu v důsledku dlouhého času chlazení, respektive pokud vyhazujeme vstřikovaný díl z dutiny formy při nízké teplotě, dojde ke snížení hodnoty smrštění.

Pokud je krátký čas chlazení, zvyšuje se ekonomická úspora, vstřikovaný díl má vyšší povrchovou teplotu, ale následkem je zvýšení hodnoty smrštění. [2]

2.4. Rozměrová a tvarová přesnost výstřiků z termoplastů

Technologie vstřikování patří do oblasti cyklicky tvářecích procesů. Tyto procesy se vyznačují tím, že vstřikovaný materiál se v rámci cyklu v žádném okamžiku nedostává z termodynamického hlediska do zcela rovnovážného stavu vzhledem k podmínkám, ve kterých se momentálně nachází. [8]

Podmínky vycházející z teploty, doby procesu, velikosti napětí nebo rychlosti deformace se během výrobního cyklu nacházejí na různých úrovních a dost rychle se mění. Podmínky se odlišují i v různých částech tvarové dutiny vstřikovací formy. Soubor těchto podmínek představuje historii dějů, kterými plast prošel při svém zpracování ve výstřik. Obecně lze říci, že výsledné vlastnosti výstřiku jsou také funkcí této historie. V případě vstřikování je dána způsobem a podmínkami přípravy taveniny, podmínkami dopravy taveniny do formy a jejího rozvodu v dutině formy, podmínkami dotlaku a chlazení až do otevření formy. [8]

Fyzikální procesy zmíněné výše, probíhající při vstřikování termoplastů se ve skutečném výrobním procesu promítají do hodnocení jakosti finálního produktu. Tím je myšleno, že se promítají do konkrétního výstřiku, respektive do jeho kvalitativních kritérií. Mezi nejčastější kritéria jakosti patří rozměrová a tvarová přesnost, včetně jakosti povrchu výstřiku. [8]

Výrobní tolerance rozměrů vstřikovaných dílů z termoplastů jsou stanoveny normou ČSN 64 0006 Plasty. V praxi se na výkresech vstřikovaných dílů z termoplastů předepisuje tolerance stejně jako u součástí kokových, ve třídách přesnosti IT podle ISO (ČSN EN 20 286 – Soustava tolerancí a uložení ISO). Vztah mezi oběma tolerančníma soustavama je uveden v normě ČSN 64 0006. Stupeň přesnosti IT zahrnuje pouze toleranci výrobního smrštění. Výrobní smrštění se zjišťuje měřením vstřikovaného dílu v ustáleném stavu, tím je myšleno cca 24 hodin po výrobě při uložení v suchém prostředí při teplotě $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Ostatní rozměrové změny v této toleranci nejsou zahrnuty. [2]

2.4.1. Definice pojmů pro rozměrovou a tvarovou přesnost

Hromadná výroba a montáž klade požadavky sestavování k sobě příslušících součástí bez nutnosti přizpůsobování. Z tohoto důvodu musí být na výkrese předepsány úchytky (nepřesnosti výroby) tak, abychom byli schopni zaručit funkčnost výrobku, ale zároveň musí zůstat cena výrobku přijatelná. Z hlediska tolerancí jsou definovány 3 typy kót. Jedná se o kóty funkční, nefunkční a informativní. [2,8]

1. Kóty funkční – funkční kóty jsou důležité z hlediska funkce, mezní úchytky nebo toleranční značky se zapisují za jmenovitou hodnotu daného rozměru
2. Kóty nefunkční – nefunkčním kótám se také říká volné, platí pro ně všeobecné mezní úchytky (ČSN 01 4240 – ISO 2768-1), dělí se to 4 tříd přesnosti

Tab. 4.: Všeobecné tolerance délkových rozměrů [8]

Všeobecné tolerance délkových rozměrů	
Označení	Název tolerance
f	Jemná (fine)
m	Střední (middle)
c	Hrubá (coarse)
v	Velmi hrubá (very coarse)

Všeobecné tolerance se předepisují v popisovém poli nebo v jeho blízkosti, například ISO 2768 – m.

3. Kóty informativní – informativní kóty jako jediné nemají toleranci, jmenovitý rozměr je uváděn v kulatých závorkách. Kóta informativní je buď kótou celkovou, v řetězci kót nebo jednou z řetězce kót.

Mezní úchytky (rozměru, tvaru a polohy) se definují pomocí tzv. obalových ploch, případně obalových čar. Obalové plochy (čáry) jsou geometrické plochy (čáry) stejného druhu jako plochy určené svými rozměry na výkresu a přiřkládají se tečně vně materiálu ke skutečné ploše (profilu).

Pro předepisování přesnosti délek a průměrů byly z ekonomického hlediska vytvořeny 2 soustavy, které obsahují vybraná uložení. Dochází tak k omezení počtu potřebných pomůcek pro výrobu a měření. [2,8]

1. Soustava jednotné díry – různých vŭlů a přesahů se dosahuje kombinací několika vŭlů pro hřídle a jednotné tolerance pro díru. Tolerance díry má polohu **H** s nulovou dolní mezní úchytkou. Soustava jednotné díry se používá nejčastěji,

důvodem je ekonomické hledisko, protože různé velikosti hřídelů je možné vyrobit snadněji než díry.

2. Soustava jednotného hřídele – různých vůlí a přesahů se dosahuje kombinací několika vůlí pro díry a jednotné tolerance pro hřídel. Tolerance hřídele má polohu h s nulovou horní mezní úchytkou.

Správná funkčnost součásti nezávisí pouze na dodržení požadované přesnosti rozměru, ale také na předepsání geometrického tvaru ploch a jejich vzájemné polohy. Pro vyhodnocování tolerancí polohy je vždy jeden prvek zvolen jako základna a od ní se úchytky měří. Základnou může být například plocha, hrana nebo osa. [2,8]

2.4.2. Toleranční pole součástí z plastů podle ČSN 01 4265 a ČSN 64 0006

Technické postupy pro tolerování a lícování popsané v kapitole 2.4.1. platí obecně i v oboru vstřikování termoplastů. Pro tolerování rozměrů vstřikovaných dílů z termoplastů se vychází ze znalostí vlastností vstřikovaných materiálů, včetně technologického procesu a ne pouze z intuice konstruktéra. Konstruktér by měl znát alespoň jednu z norem, na které je tato kapitola zaměřena. Jedná se o normy zaměřené na technologické procesy vstřikování a lisování. [2,8]

Česká norma ČSN 01 4265-1982 Toleranční pole součástí z plastů se zabývá pouze tolerančními poli tolerovaných rozměrů. Pro netolerované rozměry platí původní norma ČSN 64 0006-1974 Tolerance a mezní úchytky rozměrů pro tvářené výrobky z plastů. ČSN 01 4265 vychází z původní ČSN 64 0006.

Normy jsou komerčně k dostání u jejich vydavatele – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, dříve Český normalizační institut, v příslušných prodejnách, knihovnách nebo elektronicky, například CSN ONLINE. [2,8]

2.4.3. Praktické dopady lícování

Obecně lze dosažitelnou přesnost vstřikovaných dílů z termoplastů při výrobě definovat takto:

IT 10 až IT 12 – amorfni termoplasty – PS, SAN, PVC, PC, ...

IT 11 až IT 13 – částečně krystalické termoplasty – HD-PE, PP, PA, POM, PBT, PET, ...

IT 14 až IT 16 - „měkké“ termoplasty – LD-PE, EVA, TPE, ...

Větší přesnost, což je nižší stupeň IT lze dosáhnout u menších vstřikovaných dílů z jednonásobných forem. Zároveň to platí u rozměrů vázaných formou, obvykle kolmo ke směru otevírání formy. Vzniklý rozdíl v přesnosti je přibližně jeden stupeň IT. Důvodem je, že rozměry vstřikovaného dílu ve směru otevírání formy mohou být ovlivněny pružnou deformací formy, kterou má za následek použití vyššího vstřikovacího tlaku nebo rychlosti

vstřikování. Lepší výsledky jsou dosažitelné na elektricky poháněných vstřikovacích strojích oproti strojům hydraulickým. Co se týká strojů, platí, že čím více výrobních parametrů je možné regulovat, včetně tepelného režimu vstřikovací formy, tím lze dosáhnout větší přesnosti vstřikovaných dílů, a to o jeden až dva stupně IT. [2,8]

Přesnost rozměru a tvaru je obvykle hlavním požadavkem kladeným na technické výstřiky z pohledu jejich jakosti. Normy uvedené výše nejsou závazné, a proto tolerance rozměrů včetně úchylek tvarů a polohy jsou obvykle smluvní, jakostní podmínky dohodnuté oběma stranami, výrobcem a odběratelem. Jak bylo zmiňováno, přesnost vstřikovaných dílů z termoplastů je ovlivněna celou řadou faktorů a z toho důvodu by mezi dohodnutými podmínkami pro vzájemnou kontrolu jakosti měly být uvedeny i přesné podmínky, při kterých jsou zejména rozměry měřeny. Jedná se například o teplotu, čas po vstřikování, vlhkost, provozní a skladové podmínky. Teprve po dodržení těchto podmínek má předepisování užších tolerančních polí, než je uvedeno v ČSN 01 4265 smysl. Důležité je si uvědomit, že tolerance rozměrů se nestanovuje tak přesně, jak to dovoluje výrobní tolerance, ale pouze tak, jak je potřeba s ohledem na funkci výstřiku. Pokud je to nutné a jsme ochotni obětovat vysoké výrobní náklady, lze docílit IT 9 a IT 8. Co se týká tolerance ISO řady IT 5, IT 6 a IT 7, tak jsou v běžné praxi nedosažitelné. [2,8]

Přesto se běžně setkáváme s tolerancemi rozměrů v setinách milimetrů, např. $\pm 0,05$ mm. Zde je nutné si uvědomit, že takovou toleranci mnohdy neguje koeficient lineární teplotní roztažnosti vstřikovaných materiálů. Rozdíl mezi koeficientem lineární teplotní roztažnosti ocelí a plastů je cca jeden řád: uhlíková ocel $11,7 \times 10^{-6}$, antikorozi ocel $10,0 \times 10^{-6}$, manganová austenitická ocel $16,0 \times 10^{-6}$, PE, EVA 24×10^{-5} , PP 18×10^{-5} , PS, PS-HI, ABS, SAN, ASA 8×10^{-5} , PA66 8×10^{-5} , PA6 10×10^{-5} , POM 12×10^{-5} , PC 6 až 7×10^{-5} , PC/ABS 7 až 8×10^{-5} , PET 7 až 8×10^{-5} , PBT 6 až 9×10^{-5} , PPO 6 až 7×10^{-5} . [2,8]

Také je třeba si uvědomit, že ve velkém množství případů nelze přímo měřit požadovaný rozměr, ale pro jeho změření je potřeba vstřikovaný díl v daném místě rozříznout. Po rozříznutí ovšem v daném objemu vstřikovaného dílu dochází k uvolnění obsahu vnitřního pnutí, případně k dalším relaxačním pochodům. Tím dochází k velmi výraznému ovlivnění požadovaného rozměru na výkrese. Dále také platí, že v důsledkem reprodukovatelnosti vstřikovacího procesu v určitých tolerančních mezích v každém výrobním cyklu je obsah vnitřního pnutí cyklus od cyklu jiný a z toho vyplývá, že i rozměry budou jiné. [2,8]

Jako příklad si můžeme vzít vstřikovaný díl z PA66 s průměrnou hodnotou součinitele délkové teplotní roztažnosti $8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Budeme mít na dílu rozteč dvou otvorů kótovanou jmenovitou hodnotou 115 mm s tolerancí $\pm 0,05$ mm a ohřejeme díl o $7 \text{ }^\circ\text{C}$ z teploty okolí $23 \text{ }^\circ\text{C}$ na teplotu $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní prodloužení jmenovité hodnoty 115 mm je 0,0644 mm, tudíž už se nevejdeme do povolené tolerance.

2.4.4. Další vlivy změny rozměru vstřikovaného dílu

Dalším vlivem, který se podílí na změně rozměru dílu je nasákavost. Nasákavost jako vratný proces je jedním z dalších parametrů, který ovlivňuje rozměrovou přesnost vstřikovaných dílů vyrobených z navlhavých termoplastů.

Jedná se o složitý proces, který lze zjednodušeně popsat změnou hmotnosti a objemu vstřikovaného dílu. Změna hmotnosti vede ke změně objemu vstřikovaného dílu. Pokud si uvědomíme, že u reálných vstřikovaných dílů jsou všechny změny anizotropické, lze říci, že změna lineárního rozměru pro isotropní chování ve všech třech osách je rovna přibližně jedné třetině změny objemu vstřikovaného dílu. Součinitel změny lineárního rozměru vlivem nasákavosti = změna objemu / 3x jmenovitý rozměr, neboli změna lineárního rozměru = jmenovitý rozměr x součinitel změny lineárního rozměru vlivem nasákavosti. Jmenovitý rozměr se uvádí v [mm], součinitel nasákavosti má rozměr 0,01 x hodnota součinitele nasákavosti v [%]. Příklad si uvedeme opět na vstřikovaném dílu z PA66 se jmenovitým rozměrem 115 mm, který má při užívání rovnovážný obsah vlhkosti – nasákavost přibližně 1,5 %. Jedna třetina z 1,5 % je 0,5 %, změna rozměru 115 mm je důsledkem nasákavosti $115 \times 0,005 = 0,575$ mm. [2,8]

Dalším vlivem je změna rozměru od mechanického zatížení výstřiku. Tato změna rozměru by neměla překročit přípustné protažení. Změna rozměru = přípustné protažení v 0,01 % x jmenovitá délka [mm]. Pro příklad máme jmenovitý rozměr 115 mm, vstřikovaný díl z PP. Přípustná změna od mechanického zatížení = $115 \times 0,015 = 1,725$ mm. Příslušné hodnoty protažení pro vybrané termoplasty jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5.: Přípustné protažení pro vybrané termoplasty [8]

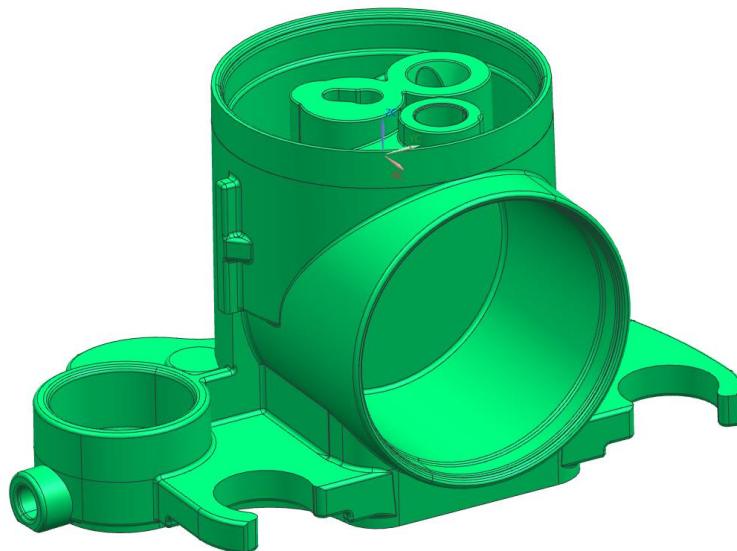
Materiál	Přípustné protažení
PMMA	0,5 až 1,0 %
PC	0,5 až 1,0 %
PS	0,15 až 0,3 %
POM	1,0 až 2,0 %
PP	1,0 až 2,0 %
LDPE	2,5 až 4,0 %
HDPE	1,5 až 3,0 %

3. Praktická část

3.1. Úvod do praktické části

Praktická část diplomové práce je zaměřena na návrh tvarové dutiny vstřikovací formy pro zadaný výlisek. Výlisek je určen pro automobilový průmysl (obr.18). Materiál výlisku je SCHULAMID PPA GF33. Požadavkem pro návrh tvarové dutiny vstřikovací formy je simulace plnění v programu Cadmould 3D-F Version 11.0.4.0, pomocí které bude vhodně zvolena poloha vtoku. Dalším požadavkem je, že výlisek bude plněn pomocí studeného vtoku. Po dokončení 3D modelu tvarové dutiny bude provedena kompletní analýza ve stejném simulačním programu, do které budou zahrnuty všechny parametry tvarové dutiny, včetně vtoku, chlazení, materiálů a procesních parametrů. Cílem této kompletní analýzy je co nejbližší přiblížení se reálným hodnotám, které bude výlisek vykazovat ve své finální podobě. Na základě výsledků analýzy budou porovnány rozměry výkresové s rozměry výlisku. Pomocí tohoto porovnání zvolíme vhodné přídatky u rozměrů, kde se musíme vejít do rozměrové, případně tvarové tolerance. Zvolené přídatky budou domodelovány v tvarové dutině. Posledním úkolem bude provedení předdeformací na místech, která budou nejvíce deformována.

Tvarová dutina je navrhována a modelována v programu SIEMENS NX 11. Součástí práce je výkres sestavy tvarové dutiny, výrobní výkres tvarové vložky DS, jádra 1 a výkres výlisku. Tyto výkresy jsou součástí příloh diplomové práce.



Obr. 18.: Výlisek

3.1.1. Specifikace materiálu vstřikovaného dílu

Materiál vstřikovaného sílu je SCHUMALID PPA GF33 od výrobce Lyondell Basell Industries. Tento materiál patří do polyftalamidové (PPA) skupiny a jedná se o materiál, který je vyztužen 33% skleněných vláken, jak již je z názvu patrné (GF33). Vyznačuje se vysokou pevností a tuhostí při vysokých teplotách, má dobrou tepelnou stabilitu, velmi vysokou chemickou odolnost a velkou odolnost proti oděru. Díky těmto vlastnostem je vhodný pro použití v automobilovém průmyslu.

Jedná se o materiál, ve kterém jsou jako plnivo použita skleněná vlákna, a to má za následek špatně odhadnutelné chování vstřikovaného dílu, co se týká smrštění. U materiálů, které mají jako plnivo skleněná vlákna, záleží na natočení skleněných vláken v materiálu. Tento použitý materiál má smrštění v rovnoběžném směru na skleněná vlákna 0,631%, v kolmém směru na skleněná vlákna 2,484% a celkové smrštění je stanoveno na 1,400%. O toto celkové smrštění bude model vstřikovaného dílu zvětšen. Materiálový list vstřikovaného materiálu SCHUMALID PPA GF33 je součástí příloh.

3.2. Analýza plnění dílu, určení polohy vtoku

Poloha vtoku je nejčastěji dána zadavatelem vstřikovací formy. V jiném případě jsou zadané stěny, na kterých může být v tok umístěn, nebo vtok volí vhodně konstruktér a následně polohu umístění vtoku konzultuje se zadavatelem.

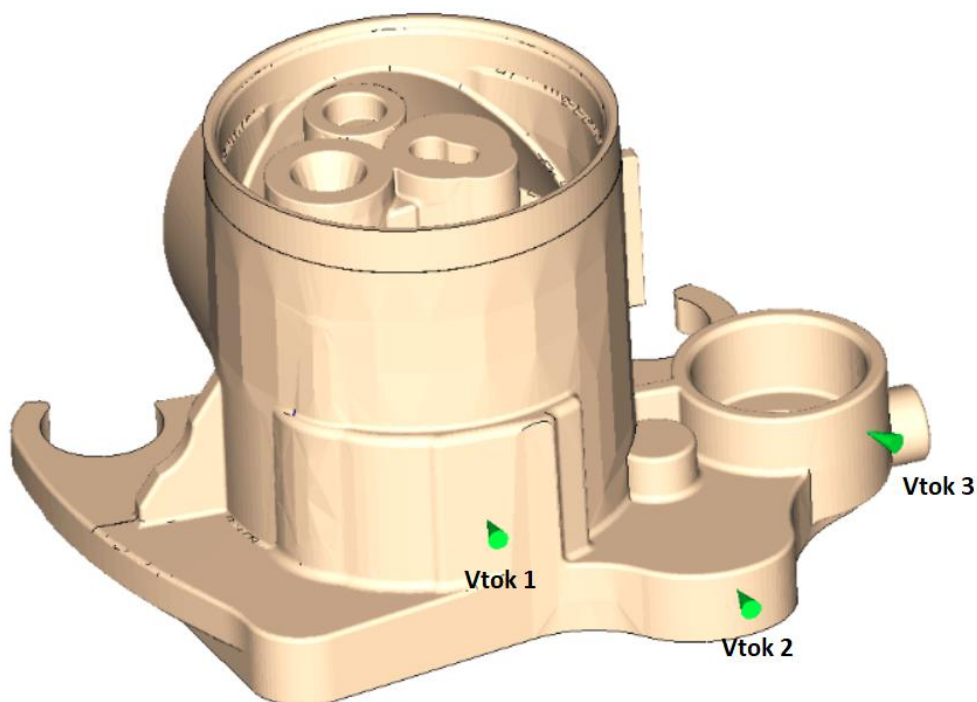
Vtok musí být umístěn tak, aby materiál po vstřiku do dutiny formy narazil na stěnu formy. Pokud tomu tak není vznikají stopy po volném proudu taveniny. Je to způsobeno tím, že proud taveniny prostupuje volně středem tvarové dutiny, zastaví se u protilehlé stěny, případně o nějakou překážku a teprve potom následuje zaplnění celé tvarové dutiny. Prvotní proud taveniny se bohužel na povrchu ochladil a vzniká viditelná stopa po volném proudu jako vzhledový defekt. Jedná se o kombinaci vady vzhledové, spojené s menším zeslabením výstřiku v důsledku sekundárního studeného spoje (obr.19).



Obr. 19.: Stopy po volném proudu taveniny [9]

Technologicky se tato vada dá odstranit velmi obtížně. Nejčastěji je nutné přemístit ústí vtoku tak, aby tavenina po vstřiku do tvarové dutiny formy narazila na stěnu a pokračovalo klasické plnění celé tvarové dutiny. Pokud se dostaneme do situace, že vtokové ústí nelze z konstrukčních důvodů přemístit, je nutné vytvořit proti ústí vtoku překážku, na kterou tavenina narazí a volný proud se tak rozruší. Překážkou je míněno například umístění jádra nebo kolíku. [9]

Na výlisku, pro který tvořím tvarovou dutinu formy, jsem zvolil 3 polohy vtoku. Vtoky jsou na modelu označeny zelenými kužely (obr.20). Jaká poloha vtoku je nejvhodnější budu zjišťovat pomocí analýzy plnění v programu Cadmould 3D-F.



Obr. 20.: Rozmístění poloh vtoků

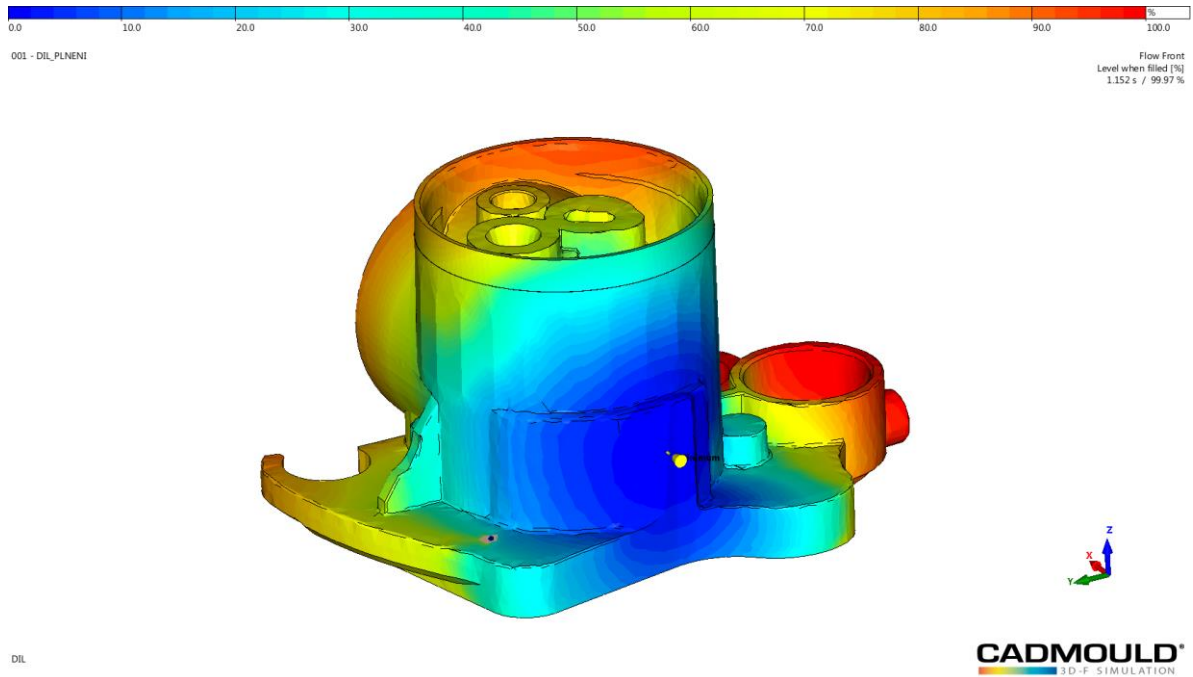
Stručné popsání analýzy plnění:

1. Import vstupních dat (výlisek stp.)
2. Vytvoření výpočtové sítě
3. Definování polohy vtoky
4. Výběr vstřikovaného materiálu
5. Spuštění simulace
6. Vyhodnocení výsledků skončené analýzy

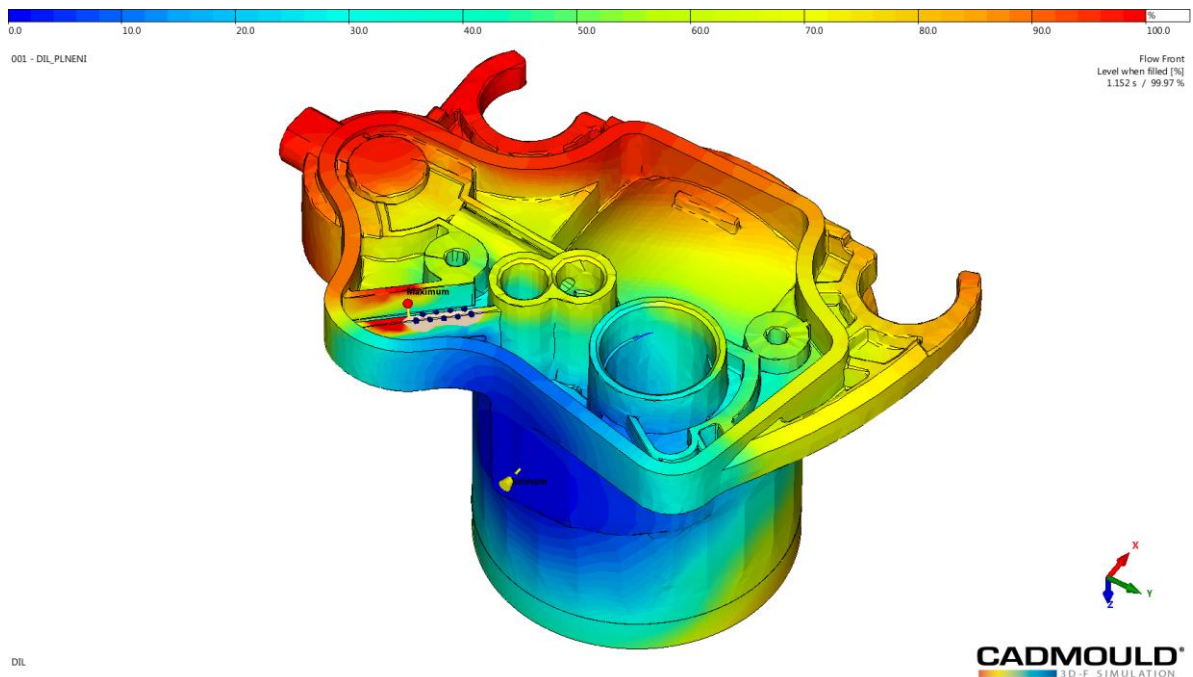
Detailněji bude práce v programu Cadmould 3D-F popsána v kapitole zaměřené na kompletní analýzu vstřikovaného dílu.

3.2.1. Analýza plnění vtok 1

Jak je vidět na simulaci, nedošlo ke kompletnímu naplnění dutiny. Plnění dutiny se zastavilo na 99,97% ze 100%, což nepřipadá v úvahu. Vtok 1 tedy můžeme rovnou zavrhnout, protože není vhodný. Na obr. 21 a 22 jsou místa, na která se tavenina nedostala označeny tmavě modrými puntíky. Tavenina na tato označená místa nedotekla z důvodu zatuhnutí taveniny v předchozích partiích.



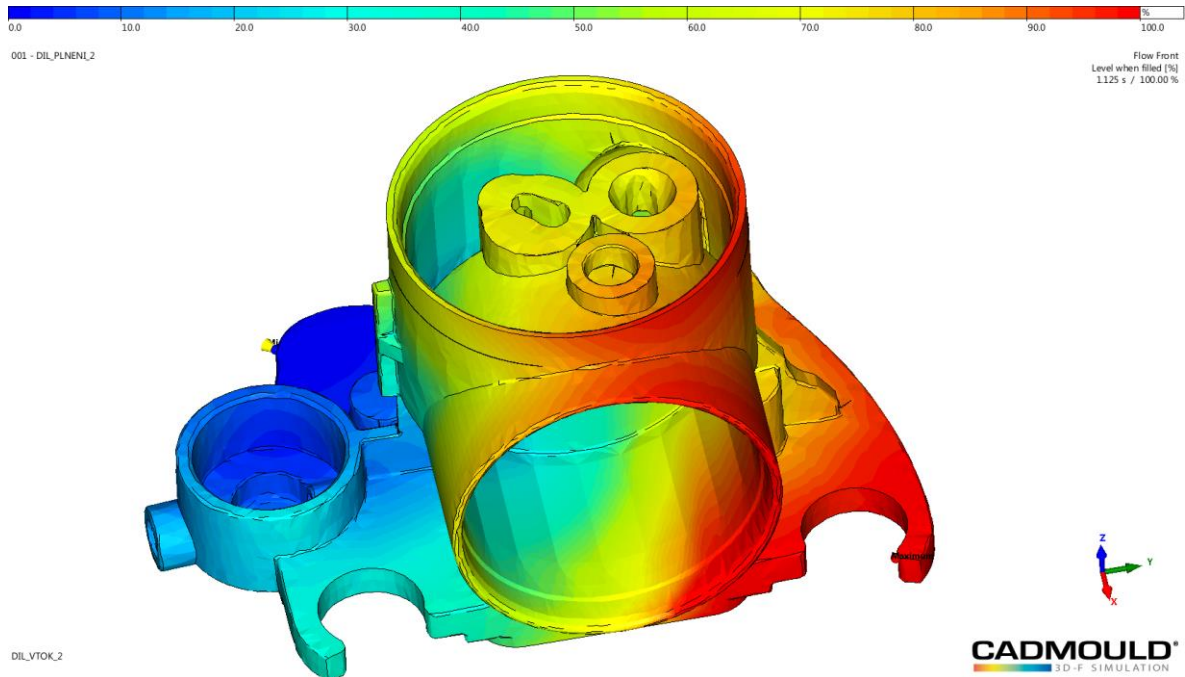
Obr. 21.: Analýza plnění vtok 1 - horní pohled



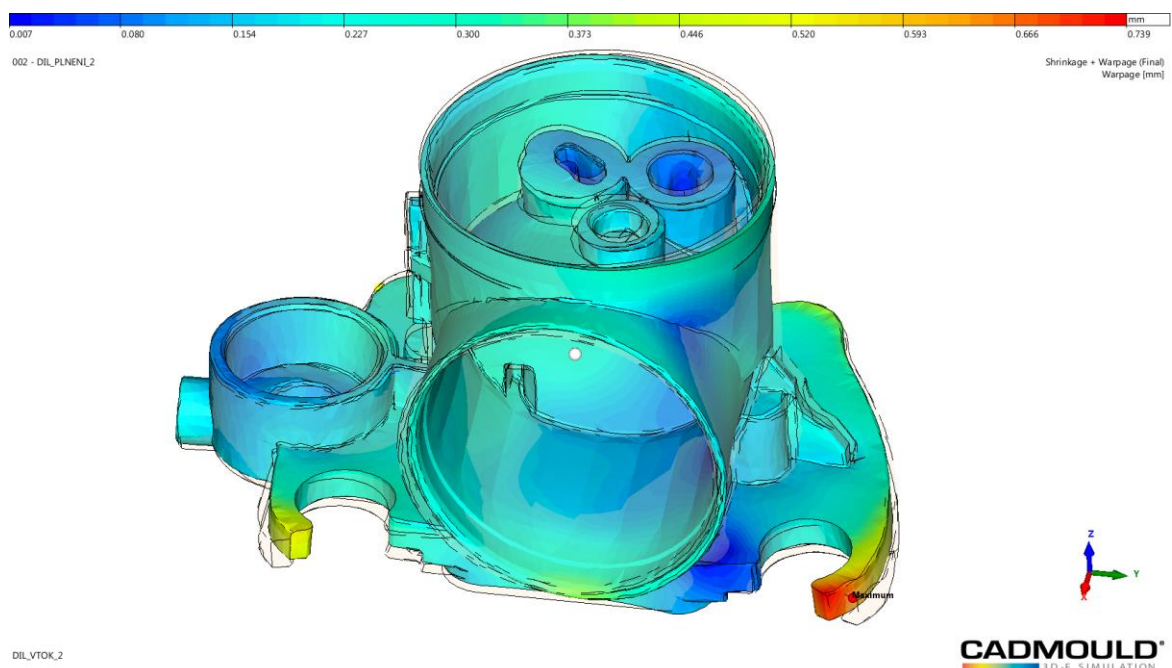
Obr. 22.: Analýza plnění vtok 1 - spodní pohled

3.2.2. Analýza plnění vtok 2

Simulace plnění s vtokem 2 dopadla lépe. Vstřikovaný díl byl naplněn na 100%, jak je vidět na obr.22. Simulace plnění nám také poskytuje nahlédnutí jak bude vstřikovaný díl finálně zdeformován. Deformace je vidět na obr.23, maximální hodnota deformace je zobrazena červeně a má hodnotu 0,739 mm. Tato hodnota je zatím pouze orientační, protože analýza plnění neobsahuje všechny parametry tvarové dutiny.



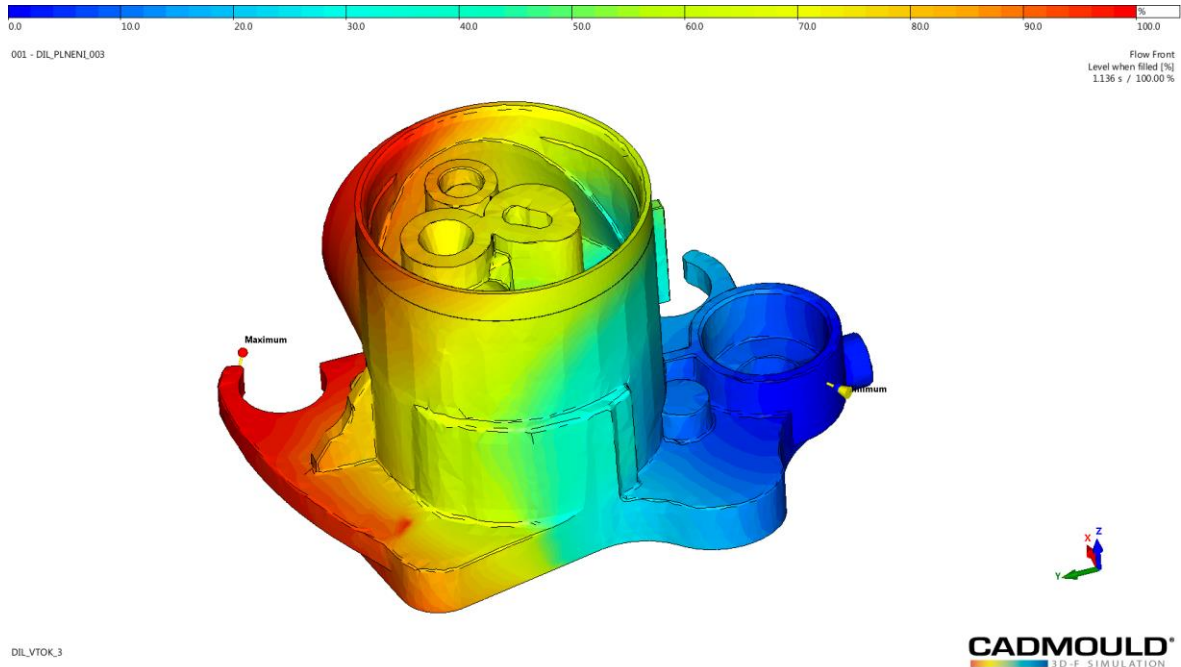
Obr. 23.: Analýza plnění vtok 2 - horní pohled



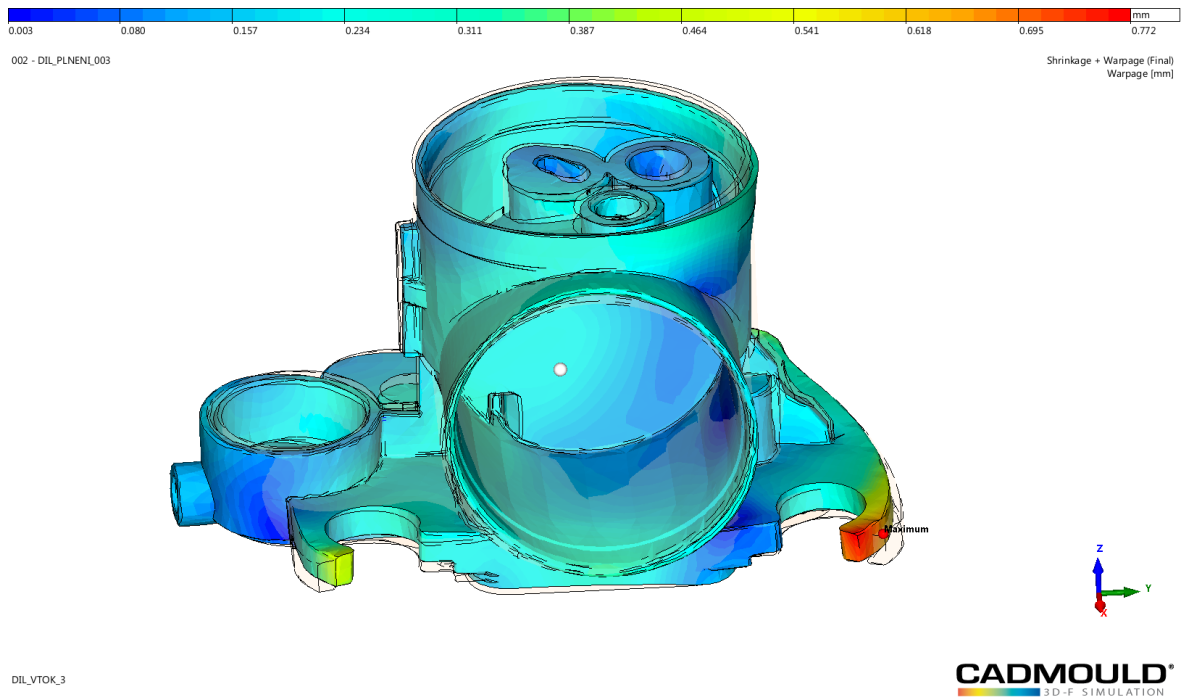
Obr. 24.: Analýza plnění vtok 2 - deformace

3.2.3. Analýza plnění vtok 3

Simulace plnění s vtokem 3 dopadla také dobře, vstřikovaný díl byl naplněn na 100%, jak je vidět na obr.25. Deformace je opět vidět na obr.26 a její maximální hodnota je 0,772 mm.



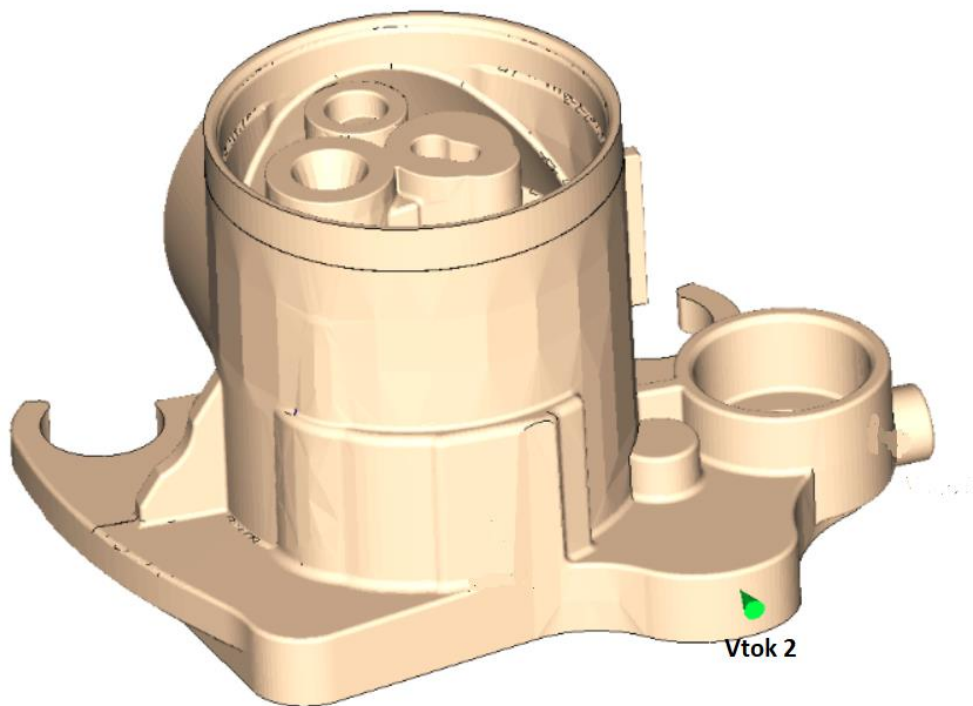
Obr. 25.: Analýza plnění vtok 3 - horní pohled



Obr. 26.: Analýza plnění vtok 3 - deformace

Na základě výsledků simulací se nyní můžu rozhodnout, jaký vtok na výlisku použiji. Vtok 1 rovnou z výběru vyřadím z důvodu neúplného naplnění dílu. Vtoky 2 a 3 naplnily výlisek na 100%, takže se budu rozhodovat mezi nimi. Mohu zohlednit, že díl s vtokem 2 má menší hodnotu deformace než díl s vtokem 3. Dalším kritériem, pomocí kterého se mohu rozhodovat, je konstrukční uspořádání. Zvolím vtok na tom místě, na kterém budu mít více místa pro umístění vtokové vložky.

Na základě zohlednění simulací a konstrukčního uspořádání volím variantu vtoku 2 (obr.27).



Obr. 27.: Vtok 2

3.3. Dělicí rovina

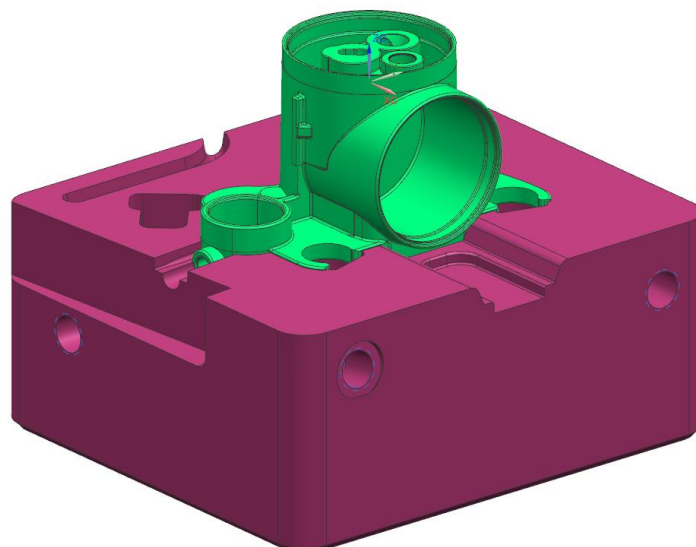
Dělicí rovina je styková plocha mezi pevnou a pohyblivou částí vstřikovací formy. U dělicí roviny je důležité kvalitní utěsnění dutiny vstřikovací formy, abychom zabránili úniku taveniny plastu. Utěsnění je dosaženo přesnou výrobou dělicí roviny a uzavírací silou v řádu několik desítek tun, která působí kolmo na dělicí rovinu. Dělicí rovina může být rovinného i obecného tvaru. Pokud by nebyla dělicí rovina přesně vyrobena, může dojít k úniku vstřikovaného materiálu a vytvoří se tzv. zástřík.

Mírná stopa v oblasti dělicí roviny je na vstřikovaném dílu vždy přítomna. Přesností a správností provozu vstřikovací formy rozhodujeme o tom, jak moc tato stopa bude výrazná. Z těchto informací vyplývá, že dělicí rovina by měla být navržena tak, aby mírná vzhledová stopa neovlivňovala používání výrobku. Nejčastěji se dělicí rovina navrhuje na nevhledové nebo nefunkční plochy vstřikovaného dílu.

Vstřikovaný díl bude zaformován pomocí hlavní dělicí roviny a vedlejších dělicích rovin. Vedlejší dělicí roviny musí být zvoleny z důvodu složitosti dílu, protože díl by nebylo možné pomocí hlavní dělicí roviny odformovat. Zaformování vstřikovaného dílu bude do vložek. Zaformování do vložek je používáno u většiny vstřikovacích forem. Důvodem je kromě úspory kvalitnějšího materiálu, ze kterého musí být vstřikovací dutina vyrobena také ohled na případné opravy defektů či korekce. Opravy provádím pouze na poškozené vložce.

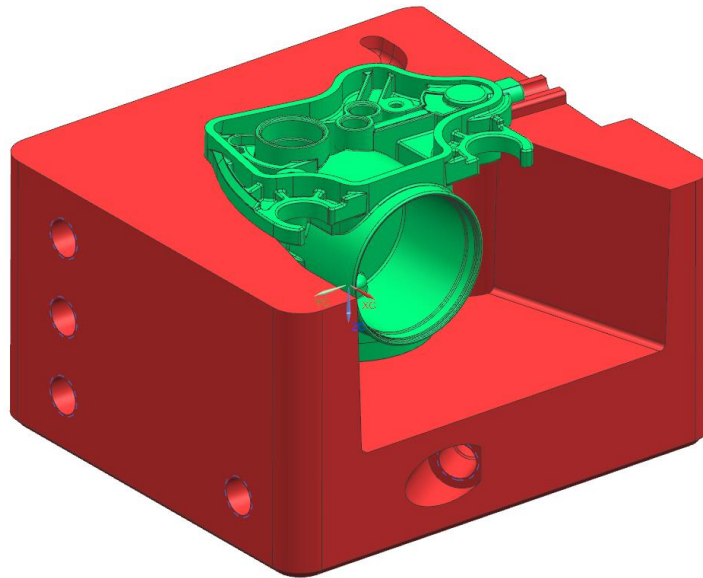
Rozměry vložek musí být navrhovány tak, aby splňovaly všechny důležité požadavky. Musí být odolné vůči značnému mechanickému namáhání, které zde vzniká působením vysokých tlaků taveniny plastu při jeho vstřikování do formy. Další nutností je, že rozměr vložek musí být takový, aby bylo dost místa na navrtání temperačních kanálů, pomocí kterých odvádíme z formy teplo a dost místa pro umístění ostatních komponent jako jsou montážní šrouby, vyhazovače, jádra apod..

Na obr.28 je vidět hlavní dělicí rovina a zaformování výlisku ve tvarové vložce AS pohyblivé strany.

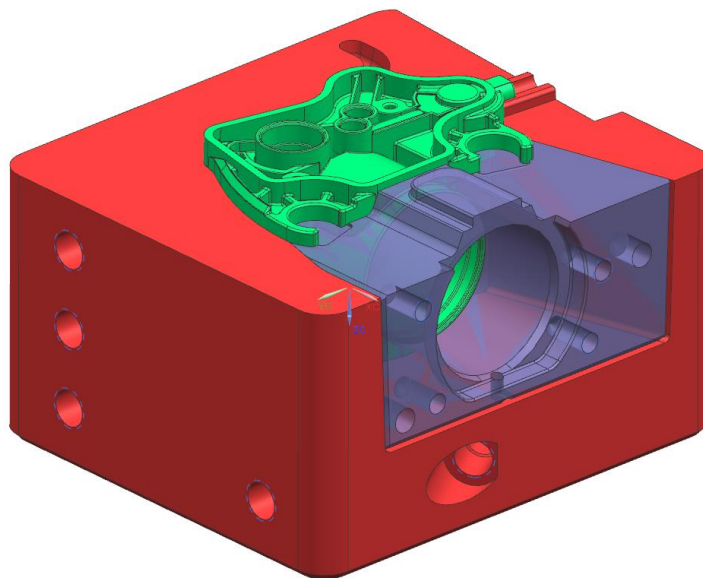


Obr. 28.: Zaformování - tvarová vložka AS

Na obr.29 je vidět zaformování vylisku ve tvarové vložce DS pevné strany. Také je z tohoto obrázku vidět kde budou vedlejší dělicí roviny z důvodu, aby bylo možné vylisek odformovat. Odformování je možné pomocí tvarové vložky boční, která bude vyjždět z tvarové vložky DS (obr.30).



Obr. 29.: Zaformování - tvarová vložka DS

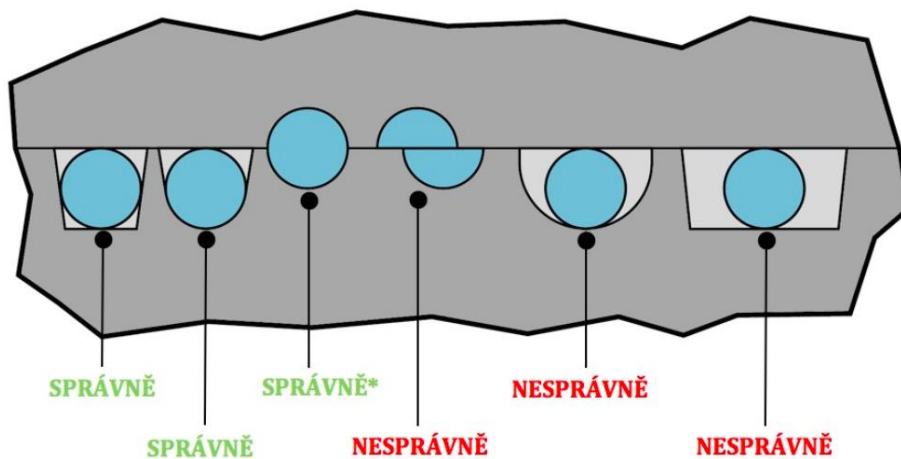


Obr. 30.: Zaformování - tvarová vložka DS + tvarová vložka boční

Tvarová vložka AS, tvarová vložka DS a tvarová vložka boční jsou vyrobeny z materiálu 1.2367 52-56 HRC.

3.4. Rozváděcí kanál a ústí vtoku

Rozváděcí kanály dopravují taveninu vstřikovaného plastu v dělicí rovině od středu formy. Nejčastěji bývají obrobeny do dělicí roviny vstřikovací formy. Konstrukce a rozměr rozváděcího kanálu ovlivňuje kvalitu vstřikovaného dílu a efektivitu celého procesu vstřikování. Pokud má rozváděcí kanál příliš velký průřez, může dojít k neúměrnému prodloužení výrobního cyklu, zvýšení podílu odpadního materiálu a celkovému zvýšení výrobních nákladů na každý výlisek. Opakem je kanál, který má příliš malý průřez. Takový kanál způsobuje značné navýšení vstřikovacích tlaků a s tím spojené komplikace při procesu vstřikování. Optimální rozměr rozváděcího kanálu je nejčastěji kompromis mezi snadným plněním dutiny formy, proveditelností ve formě a objemem rozváděcích kanálů.



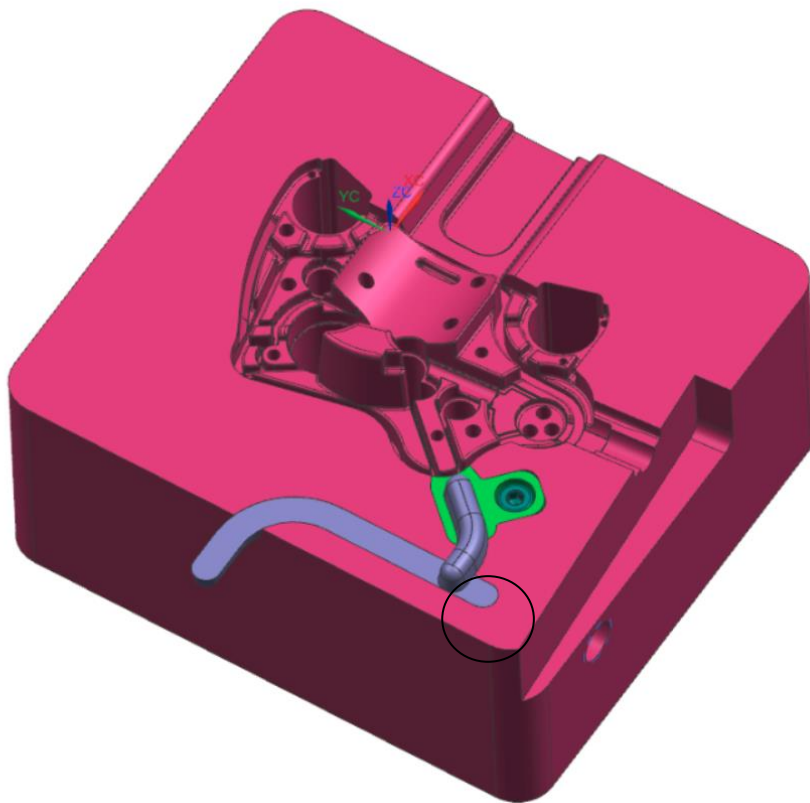
Obr. 31.: Provedení rozváděcích kanálů [3]

Na obr.31 jsou zobrazeny varianty průřezů rozváděcích kanálů, varianta označená * se považuje za nejlepší variantu.

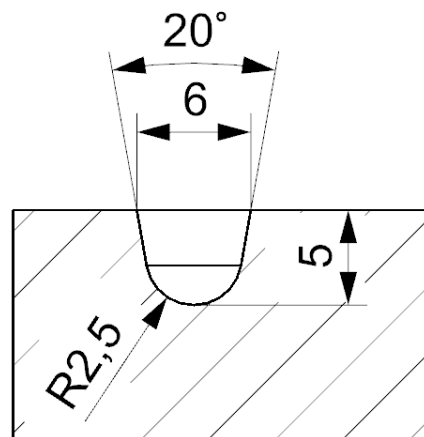
Důležité je si uvědomit, že tavenina vstřikovaného materiálu procházející přes rozváděcí kanály utváří na přiléhající stěně rozváděcího kanálu tzv. zamrzlou vrstvu v důsledku odebrání tepla tavenině. Vzniklá zamrzlá vrstva snižuje průřez, kterým tavenina proudí a zvyšuje tak pokles tlaku směrem od čela trysky vstřikovacího stroje. Rozváděcí kanály kruhového průřezu minimalizují kontakt s povrchem formy, proudící tavenina vytváří nejmenší podíl zamrzlé vrstvy. Vzdalováním se průřezu rozváděcího kanálu od kruhového průřezu klesá efektivita rozváděcího kanálu, zobrazeno na obr.31. Nevýhodou optimálního kruhového průřezu je riziko vzniku nepřesného průřezu vlivem nepřesnosti obrábění, protože rozváděcí kanál je obráběn do obou polovin formy. Toto riziko platilo především v minulosti, v dnešní době jsou obráběcí stroje dostatečně přesné. I přes to vzniklé nepřesnosti mohou negativně ovlivňovat tečení taveniny. Dobrým řešením je v tomto případě průřez ve tvaru na dně zaobleného lichoběžníku, který je obráběn pouze do jedné poloviny vstřikovací formy. Úkos lichoběžníku zlepšující odformování by měl být

alespoň 5° na každé straně. Rozváděcí kanál by měl být vzhledem na tlakové ztráty co nejkratší a doporučuje se vyhnout ostrým záhybům.

Na obr. 32 je vidět rozváděcí kanál, který vede ve tvarové vložce AS i DS. Tvarová vložka DS je skryta pro přehlednost. Rozváděcí kanál vede ze středu formy, kam bude tavenina přiváděna a směřuje k vložce s tunelovým ústím vtoku. Oblast označená černým kruhem se nazývá lapač studeného čela taveniny. Jeho funkce je, že při vstřikování dalšího výlisku zachytí zchlazené čelo taveniny, které zchladlo mezitím co se předešlý výlisek s vtokovým systémem vyhazoval. Zvolený průřez rozváděcího kanálu je vidět na obr.33.



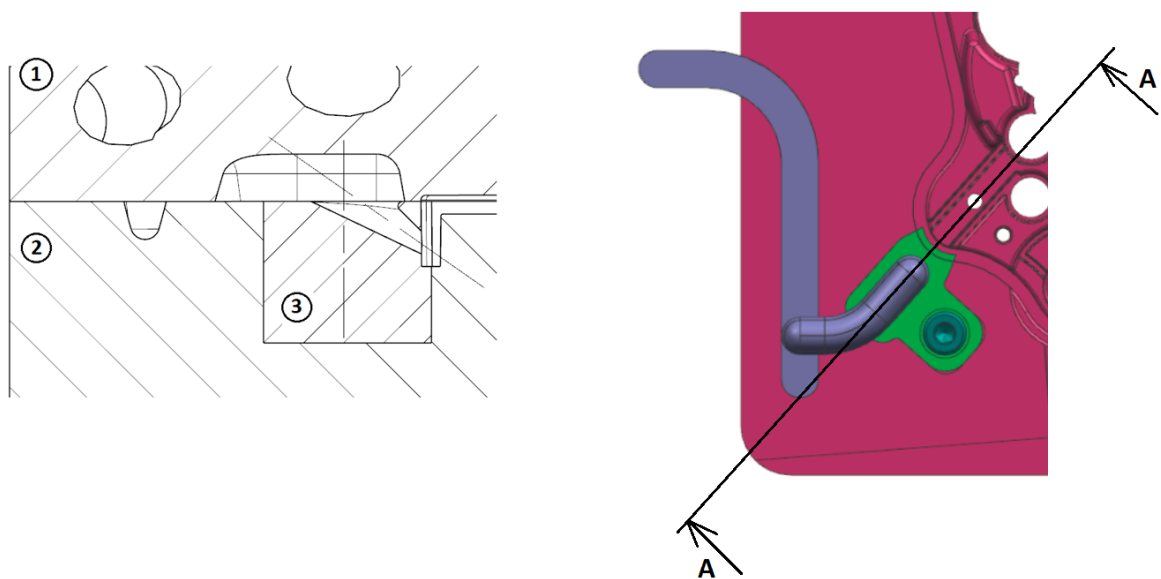
Obr. 32.: Tvarová vložka AS - rozváděcí kanál



Obr. 33.: Průřez rozváděcího kanálu

Ústí vtoku je spojovací prvek mezi rozváděcím kanálem a výliskem. Ústí vtoku by mělo mít menší tloušťku, než je tloušťka rozváděcího kanálu a tloušťka stěny výlisku. Na konci vstřikovacího cyklu zamrzá materiál v ústí vtoku a brání tak zpětnému unikání materiálu do rozváděcího kanálu po fázi dotlaku. Používaný tlak vyvinutý vstřikovacím lisem může tedy odeznít dříve, než je materiál v rozváděcím kanálu kompletně tuhý. Díky tomu šetříme energii i namáhání stroje a formy. Další funkcí ústí vtoku je snadné oddělení dílu od rozváděcího kanálu.

Používá se řada provedení ústí vtoku. V mém případě jsem použil tunelové ústí vtoku, které je vidět na obr.34. Pro přehlednost je v modelu, ze kterého byl prováděn řez skryta tvarová vložka DS a zobrazen model rozváděcího kanálu.



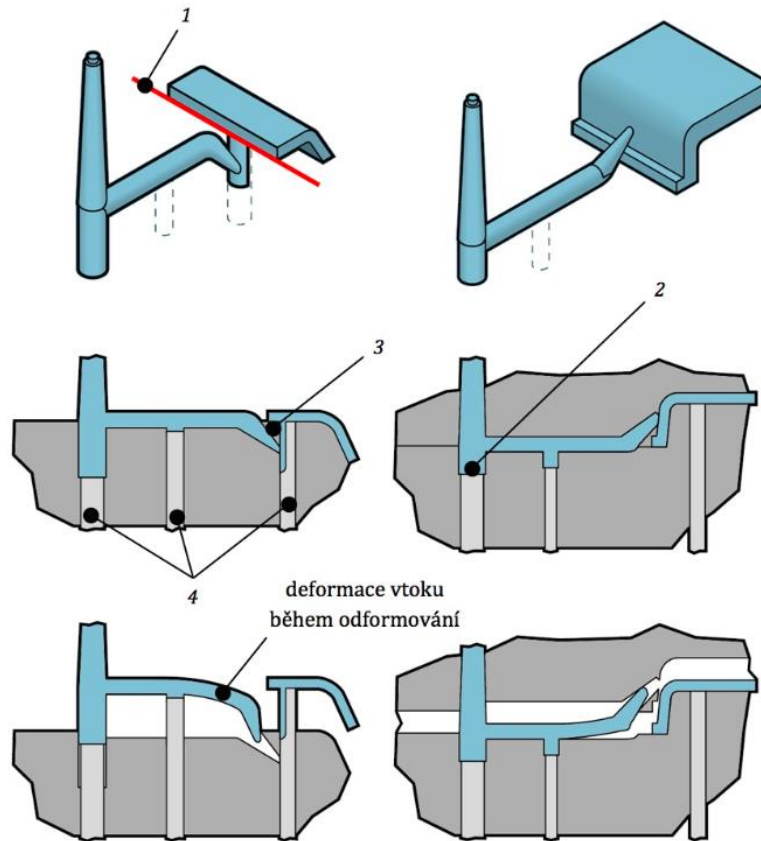
Obr. 34.: Řez ústí vtoku

1 – tvarová vložka DS, 2 – tvarová vložka AS, 3 – vtoková vložka

Tunelové ústí vtoku umožňuje plnit dutinu vstřikovací formy mimo dělicí rovinu. V závislosti na konkrétní konstrukci tunelového ústí, plní tento typ ústí funkci samooddělení od výlisku.

V případě, že použijeme tunelové ústí vtoku, je nutné vytvořit tzv. přidržovač vtoku, nebo jiný konstrukční prvek. Přidržovač vtoku zajišťuje udržení celého vtokového systému na vyhazovací straně vstřikovací formy a následné vyhození zatuhlého vtokového systému. Vtokový systém se při fázi odformování deformuje a je oddělen od výlisku pomocí řezné hrany (obr.35). Řezná hrana by měla být obrobena tak, aby byla co nejostřejší a docházelo ke kvalitnímu oddělení výlisku od vtokového systému.

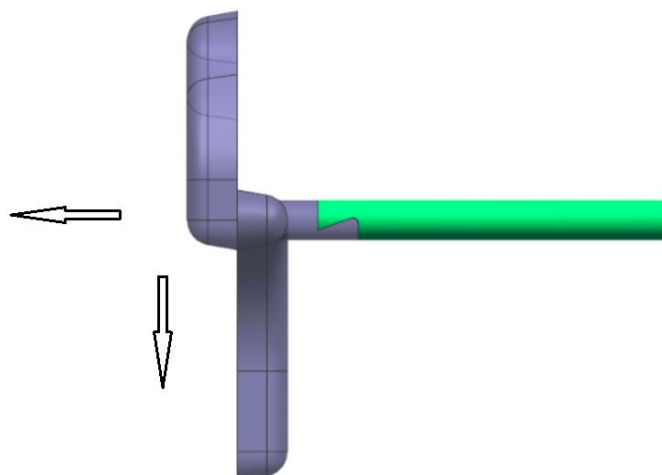
Pokud vstřikujeme abrazivní materiály (např. materiály se skleněnými vlákny nebo minerálními plnivými), je nutné tepelné zpracování materiálu dutiny formy. Dutiny forem jsou ve všech případech z kaleného materiálu, výjimkou jsou prototypové formy. V některých případech se používají také rychlořezné oceli.



Obr. 35.: Princip samooddělení tunelového ústí vtoku [3]

1 – dělicí rovina, 2 – přidržovač vtoku, 3 – řezná hrana, 4 – vyhazovače

Jak už bylo zmíněno, tunelové ústí vtoku vyžaduje tzv. přidržovač vtoku. Přidržovač vtoku jsem v mém případě vyrobil z vyhazovače. Vyhazovač díky vyrobenému zubu vtokový systém přidrží na vyhazovací straně vstřikovací formy a následně z formy vyhodí (obr.36). Pokud je použit tento typ přidržovače vtoku, je důležité si uvědomit, jak je forma upnuta na vstřikovacím lisu. Zub vyhazovače musí být orientován tak, aby při otevření formy a následném vysunutí vyhazovače vtokový systém sám odpadl.

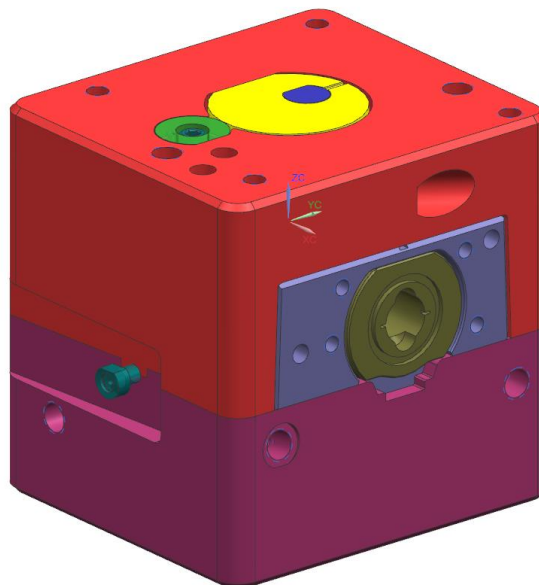


Obr. 36.: Přidržovač vtoku

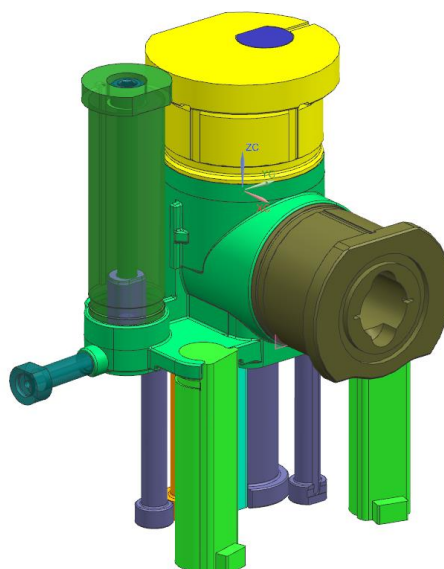
3.5. Tvarová jádra dutiny

Tvarová dutina vstříkovací formy se skládá ze dvou hlavních tvarových vložek, a to vložky pohyblivé AS a pevné DS, jak už bylo zmíněno v kapitole 3.3. Jelikož se jedná o tvarově složitý díl, který má navíc v sobě otvory, je zapotřebí použít tvarová jádra. Použití jader nám pomůže s odvzdušněním dutiny formy. Další výhodou použití tvarových jader je, že pokud jsou použita v místech, kde jsou na výlisku tolerované rozměry otvorů, dochází ke korigování rozměrů na samotném jádru nikoliv na celé vložce. V jiném případě je možnost zhotovení celého jádra nového. Tvarová jádra jsou umístěna ve tvarových vložkách a zabezpečena proti pootočení.

Ve tvarové dutině formy je použito celkem 13 tvarových jader. Na obr.37 jsou vidět jádra umístěna ve tvarových vložkách, na obr.38 jsou pak tvarové vložky AS, DS a tvarová vložka boční skryty pro přehlednost.



Obr. 37.: Tvarové vložky s jádry



Obr. 38.: Tvarová jádra

Volba oceli ze které jsou tvarové vložky a jádra zhotoveny se odvíjí od vlastností vstřikovaného granulátu (měkké plasty jako TPE, EVA, PE..., standardní neplněné plasty, plasty plněné abrazivními plnivými, či skleněnými vlákny), požadované životnosti formy, způsobu výroby tvarových částí formy a jejich velikostí.

Výběr vhodného materiálu tvarových částí formy souvisí také s jakostí povrchu tvářecích dílů formy. Je nutné rozlišovat, zda se jedná o díly vzhledové, nebo o díly bez požadavků na jakost povrchu. U výstřiků bez požadavku na jakost povrchu platí, že jakost povrchu musí být taková, aby bylo umožněno jejich bezproblémové vyhození z dutiny formy. Vzhledové plochy výstřiků je možné leštit v některé z jakostních tříd leštění. Rozlišujeme technický lesk, lesk a zrcadlový lesk. Případně mohou být vzhledové plochy výstřiků desénované, například technologií elektroerozivního obrábění, technologií fotochemického leptání, technologií laserového pálení atd..

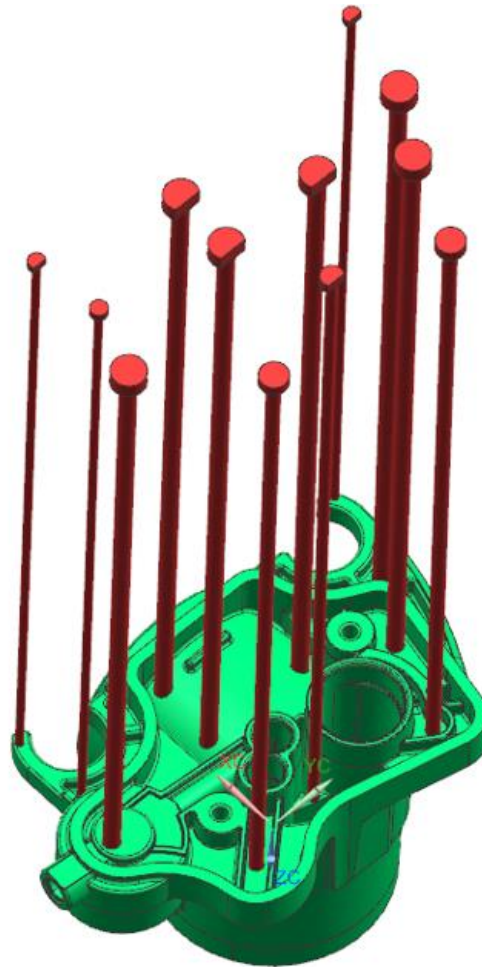
Materiál tvarových vložek a některých jader jsem použil 1.2367 52-56 HRC. Zbylá tvarová jádra jsou z materiálu AMPCOLOY 940, důvod volby tohoto materiálu bude zmíněn v kapitole o temperaci tvarových vložek a jader. Příslušný materiál jednotlivých dílů je k nalezení v kusovníku na výkrese sestavy tvarové části formy, který je součástí příloh.

3.6. Vyhazovací systém

Vyhazovací systém vstřikovací formy má za úkol vyhození vylisku z dutiny formy po otevření formy. Důležitá je volba rozložení vyhazovačů na vstřikovaném vylisku, aby došlo ke správnému vyhození vylisku z tvarové dutiny a nedošlo k jeho poškození.

Vyhazovače jsou ukotveny mezi kotevní a přidržovací vyhazovací deskou. Tento celek se nazývá vyhazovací paket a je připojen pomocí vyhazovací tyče k vyhazovacímu mechanismu vstřikovacího stroje, který je obvykle hydraulický. Po otevření vstřikovací formy vysune vstřikovací stroj svůj vyhazovací mechanismus do dané vzdálenosti a tím dojde zároveň k vysunutí vyhazovacího systému vstřikovací formy. Vylisek je vysunut – odformován z tvarové dutiny vstřikovací formy. Následuje zasunutí vyhazovacího mechanismu, zavření vstřikovací formy a cyklus se opakuje. Zasunutí vyhazovacího systému může být dosaženo zasunutím vyhazovacího mechanismu vstřikovacího stroje. Může být ale také řešen, při kterém vstřikovací stroj vyhazovací systém pouze vysouvá a do zadní (původní) pozice se vyhazovací systém vrací prostřednictvím uzavíracího pohybu formy a vratných kolíků. Vratné kolíky mají rovněž bezpečnostní funkci v případě přerušení spojení vyhazovacího mechanismu stroje a vyhazovacího systému formy. V případě přerušení by bez použití vratných kolíků hrozilo poškození tvarové dutiny formy, z důvodu kolize vyhazovačů s protilehlou tvarovou vložkou.

Zvolené rozmístění vyhazovačů je vidět na obr.39. U většiny vyhazovačů se jedná o vyhazovače tvarové, které musí být v kotevní desce zabezpečeny proti pootočení. Jako opatření proti pootočení se seřezávají kulaté hlavy vyhazovačů, pro které jsou uzpůsobeny otvory v kotevní desce.



Obr. 39.: Rozmístění vyhazovačů

Vyhazovače se nevyrábí, ale nakupují se již vyrobené a tepelně zpracované polotovary. U mě použité vyhazovače jsou od firmy MEUSBURGER. Vyhazovače je možné nakupovat v různých průměrech a délkách. V následujících krocích se zkracují na požadovanou délku, popřípadě se seřezávají hlavy proti pootočení. U tvarových vyhazovačů dochází k obrábění přeného tvaru na čelo vyhazovače. Obrábění tvarů tvarových vyhazovačů musí být co nejpřesnější. Důvodem přesného obrábění je, aby vyhazovač zanechal na vstřikovaném dílu co nejmenší stopu.

3.7. Temperační systém tvarové dutiny

Temperace vstřikovacích forem je faktor, který má velký vliv na dobu výrobního cyklu včetně celé řady kvalitativních parametrů, jako je rozměrová a tvarová stálost, deformace, jakost povrchu, mechanické vlastnosti atd..

Temperace je těsně spjata s požadavky na co nejefektivnější ekonomiku provozu vstřikovací formy. Obecně platí, že při standartním vstřikování zabírá cca 70% výrobního cyklu doba chlazení výstřiku ve tvarové dutině formy. Tato doba se počítá od konce fáze dotlaku, přes plastifikaci až po vyhození dílu z formy. Na ostatní fáze vstřikovacího cyklu zbývá cca 5% pro vstřikovací fázi, cca 10% pro dotlakovou fázi a cca 15% z doby cyklu představují nezbytné strojní pohyby. [10]

Hlavním úkolem temperačního systému vstřikovací formy je ustavit během procesu vstřikování plastů požadovanou teplotu dutiny vstřikovací formy v krátkém čase a udržet tuto teplotu v minimálním rozsahu. Temperace formy samozřejmě zahrnuje také činnost odvodu tepla při chlazení výrobku tak, aby mohl být vyjmut z formy, popřípadě i činnost vyhřívání dutiny formy s cílem dosáhnout vhodné teploty pro vstříknutí plastu. [3]

Temperační systém se obvykle skládá z následujících částí:

- temperační a řídicí jednotka
- temperační kanály
- spojovací prvky
- temperační médium

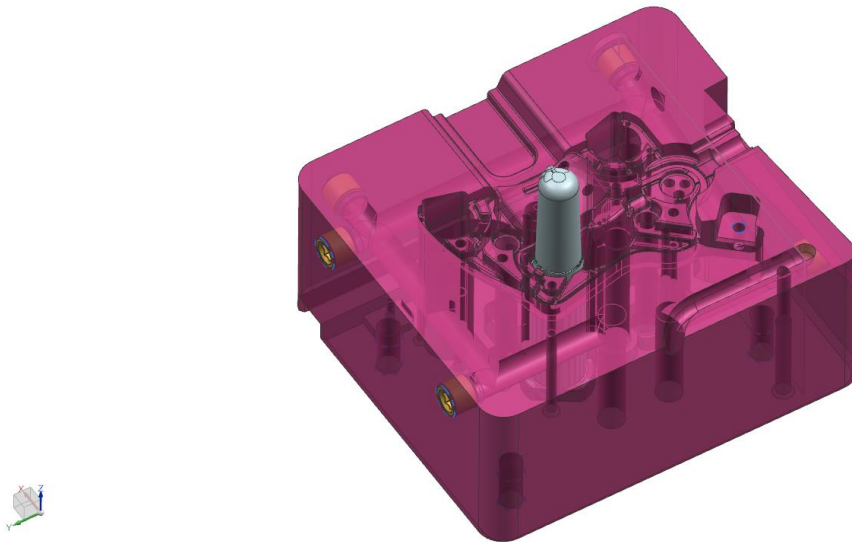
Temperační systém by měl splňovat následující kritéria:

- temperační okruh by neměl obsahovat tzv. mrtvá místa, kde neproudí kapalina z důvodu zvýšeného rizika zanášení nečistotami, vodním kamenem apod.
- temperační kanály do průměru 6 mm je nutné provozovat s upravenou vodou, či adekvátním temperačním médiem z důvodu rychlého zanášení malých průměrů např. vodním kamenem
- temperační účinek zesílit v oblasti vtokové vložky a ústí vtoku
- temperační kanály by mezi sebou, případně tvarovou částí formy měly mít minimální tloušťku stěny 4 mm proti proreznutí. [3]

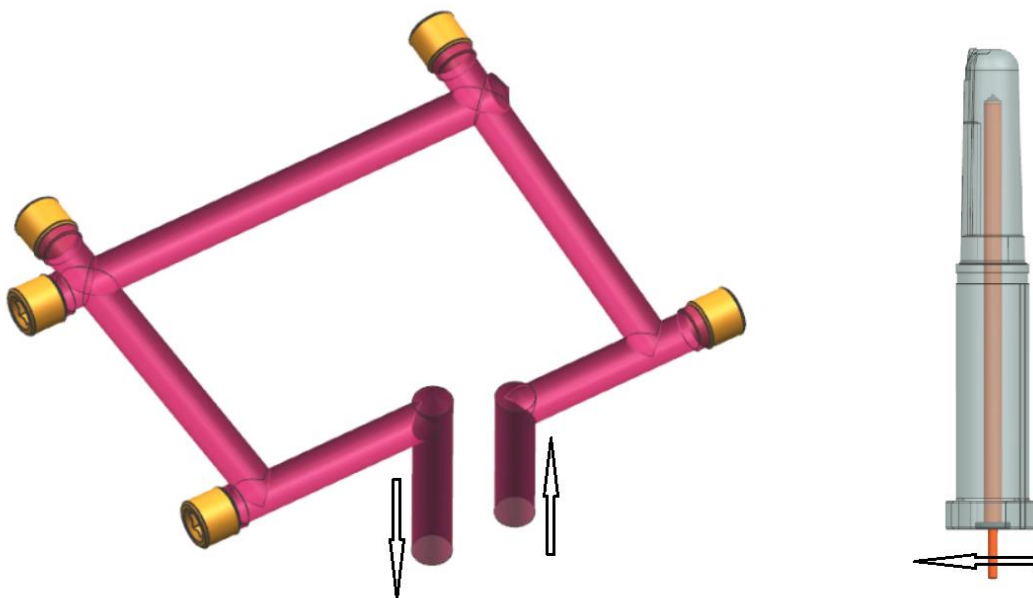
V mém případě jsem navrhl temperační systém, který se skládá ze tří temperačních okruhů.

3.7.1. Temperační okruh 1

První temperační okruh je ve tvarové vložce AS pohyblivé strany formy, ze které následně pokračuje do středové desky pohyblivé strany formy (obr.40, 41). Těsnost napojení temperačních kanálů mezi tvarovou vložkou a středovou deskou je zajištěna pomocí o-kroužků.



Obr. 40.: Temperační okruh 1 – vložka AS



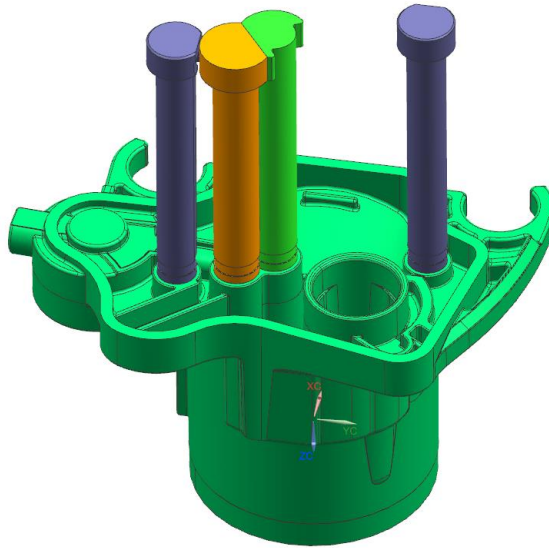
Obr. 41.: Temperační okruh 1, jádro 4

Součástí temperačního okruhu 1 je tvarové jádro 4, které má v sobě zalisovanou měděnou tyčku, která je smáčena v pokračujícím temperačním okruhu vedoucím středovou deskou (obr.41).

Průměr vrtaných temperačních kanálů jsem volil 8 mm. Pro uzavření temperačního okruhu jsou použity záslepky Z940/10x1 od firmy HASCO.

Jelikož se temperační okruh 1 nachází na pohyblivé straně formy, zmíním ještě tvarová jádra 5, 7, 8 a 9. Na obr.42 je vidět uspořádání tvarových jader ve výlisku, přičemž pořadí tvarových jader je z pravé strany na levou. Tyto jádra nejsou přímo napojena na temperační okruh, ale jsou vyrobena ze speciálního materiálu AMPCOLOY 940, který má vynikající tepelnou vodivost.

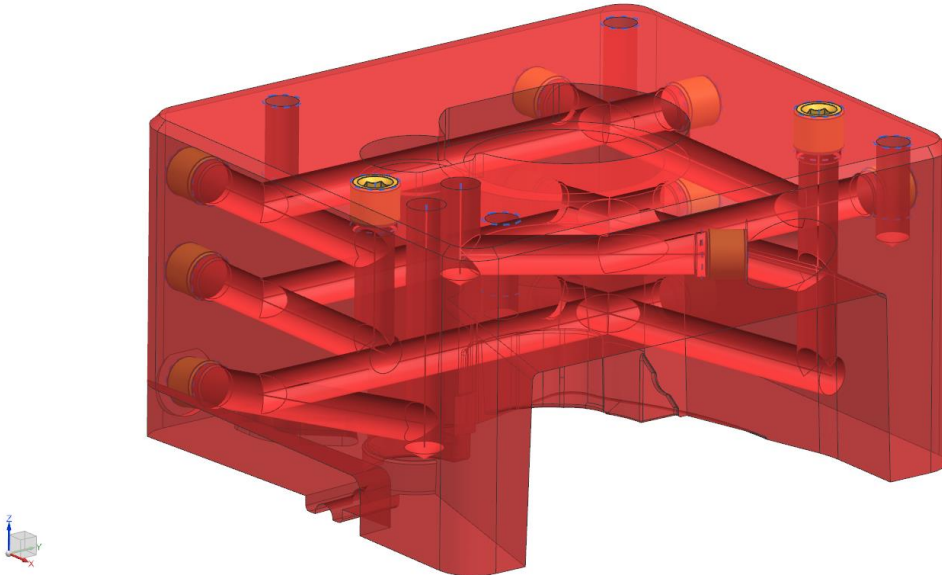
Materiál AMPCOLOY 940 se skládá z 2,5% niklu, 0,7% křemíku, 0,4% chromu a zbytek tvoří měď. Pro představu například ocel má tepelnou vodivost $\lambda_o = 50 \text{ W/m}^*\text{K}$, přičemž AMPCOLOY 940 má tepelnou vodivost $\lambda_A = 208 \text{ W/m}^*\text{K}$. Ostatní vlastnosti tohoto materiálu jsou k nahlédnutí v materiálovém listu AMPCOLOY 940, který je součástí příloh.



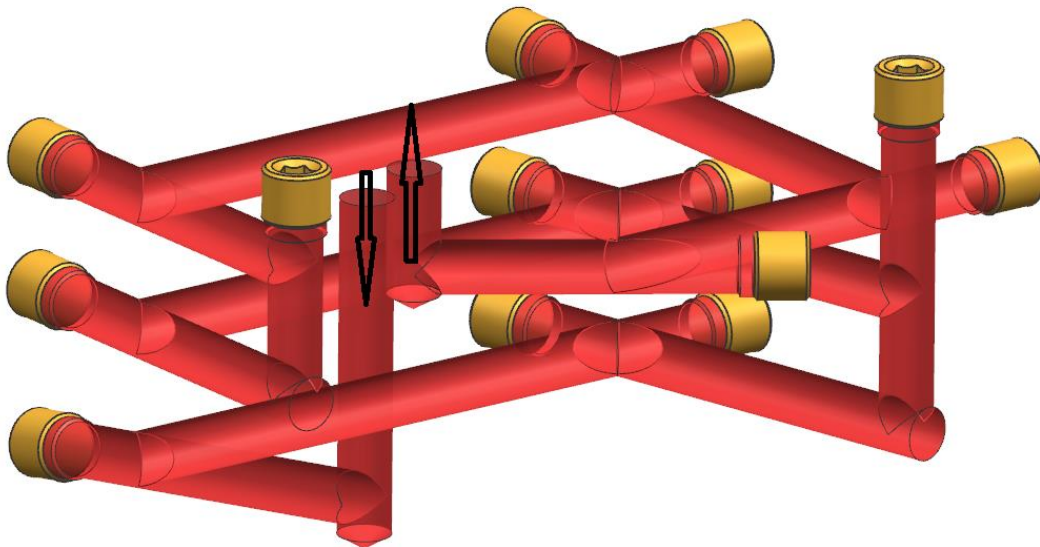
Obr. 42.: Tvarová jádra 5, 7, 8 a 9

3.7.2. Temperační okruh 2

Druhý temperační okruh je ve tvarové vložce DS pevné strany formy, ze které následně pokračuje do středové desky pevné strany formy (obr.43, 44). Těsnost napojení temperačních kanálů mezi tvarovou vložkou a středovou deskou je stejně jako u předchozího temperačního okruhu zajištěna pomocí o-kroužků.



Obr. 43.: Temperační okruh 2 - vložka DS

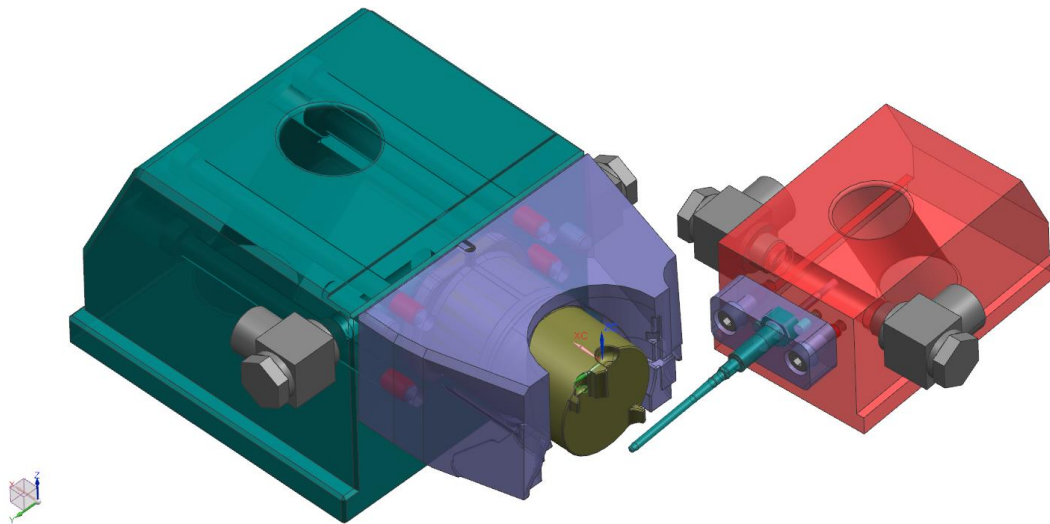


Obr. 44.: Temperační okruh 2

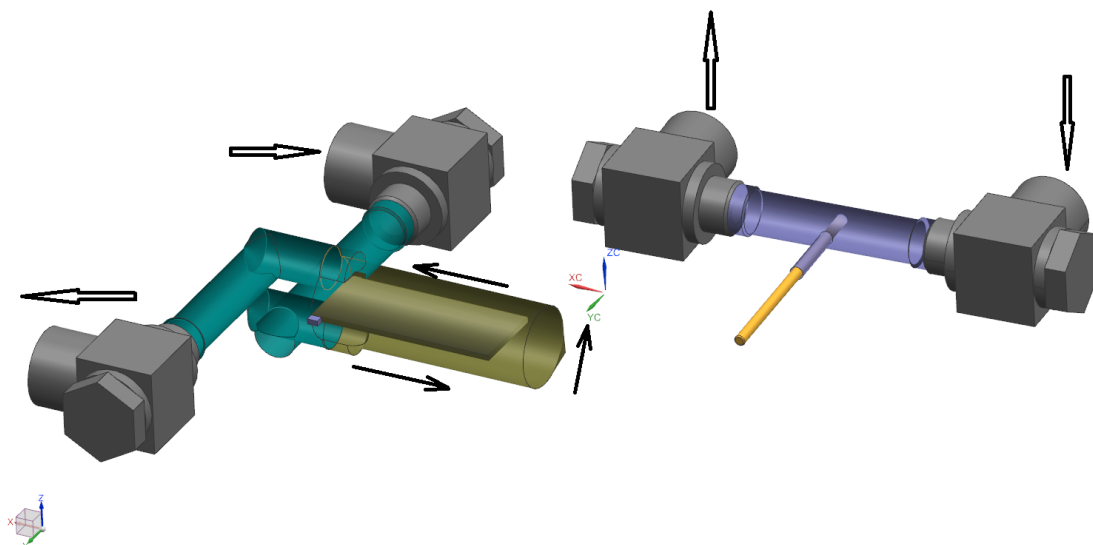
Průměr vrtaných temperačních kanálů je 8 mm. Pro uzavření temperačního okruhu jsou použity záslepky Z940/10x1 od firmy HASCO.

3.7.3. Temperační okruh 3

Temperační okruh 3 prochází vozíkem bočním, vozíkem hlavním a jádrem 1 (obr.45). Na obr. 46, kde jsou některé komponenty skryté pro přehlednost, je vidět, že v bočním jádru je zalisovaná měděná tyčka, která je v temperačním kanálu vozíku bočního smáčena. Těsnost je zajištěna použitím o-kroužku na dosedajícím čele bočního jádra na boční vozík. Dále okruh pokračuje do vozíku hlavního, ze kterého vede přes jádro 1 zpět do hlavního vozíku a ven. V jádru 1 je temperační okruh vytvořen pomocí ploché přepážky, která nám rozdělí jeden velký temperační kanál na dva menší. Těsnost mezi jádrem 1 a hlavním vozíkem je opět zajištěna pomocí o-kroužku na čele dosedání. Oba vozíky (temperační okruhy) jsou opatřeny otočnými přípojkami E 2090 od firmy MEUSBURGER a pomocí chladících hadic propojeny. Tímto propojením nám vzniká jeden temperační okruh. Směr proudění temperačního média je na obr.46 naznačen šipkami.



Obr. 45.: Temperační okruh 3



Obr. 46.: Temperační kanály 3

3.7.4. Chladící médium

Chladící médium je u všech tří okruhů stejné a jedná se o tlakovou vodu. Rozdílné jsou průtoky jednotlivými temperačními okruhy. Temperační okruh 3 má rychlost proudění chladícího média menší, protože se jedná o kratší okruh, a takovýto průtok je dostačující. Rychlost proudění chladícího média musí být zvolena optimálně, pokud chladící médium proudí velkou rychlostí, nedojde k plnému využití jeho kapacity chlazení, naopak pokud proudí příliš pomalu, nedochází k dostatečnému chlazení formy.

Níže jsou uvedeny hodnoty průtoků jednotlivých temperačních okruhů a teploty tlakové vody. Tyto hodnoty jsou určeny lisovnou, ve které bude forma používána, závisí na průměru temperačních kanálů a materiálu, ze kterého je vstřikovaný díl vyráběn.

- Temperační okruh 1 – $Q_V = 12 \text{ l/min}$, $T_{V \text{ in}} = 140 \text{ °C}$
- Temperační okruh 2 – $Q_V = 12 \text{ l/min}$, $T_{V \text{ in}} = 140 \text{ °C}$
- Temperační okruh 3 – $Q_V = 6 \text{ l/min}$, $T_{V \text{ in}} = 140 \text{ °C}$

3.8. Odvzdušnění tvarové dutiny formy

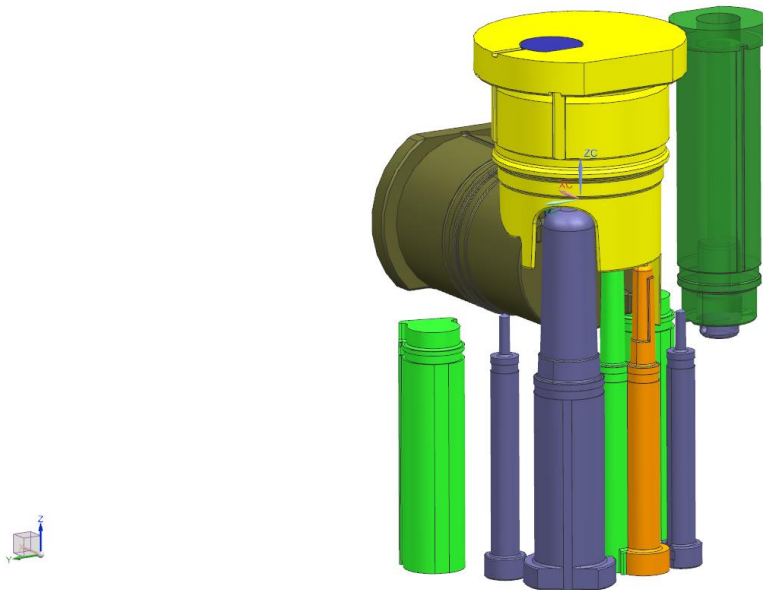
Tvarová dutina vstřikovací formy je před vstřikováním zaplněna vzduchem. Při jejím následném plnění taveninou je třeba zajistit únik vzduchu a zplodin polykondenzace. Čím rychleji tvarovou dutinu formy plníme, tím účinnější musí být odvzdušnění.

Při rychlém plnění tvarové dutiny dochází ke stlačení vzduchu, který se působením vysokého tlaku silně ohřívá a způsobuje tzv. Dieselův efekt. Dieselův efekt se na výlisku projevuje ve formě spálených míst. Ze vzhledových a pevnostních důvodů nesmí k tomuto efektu docházet.

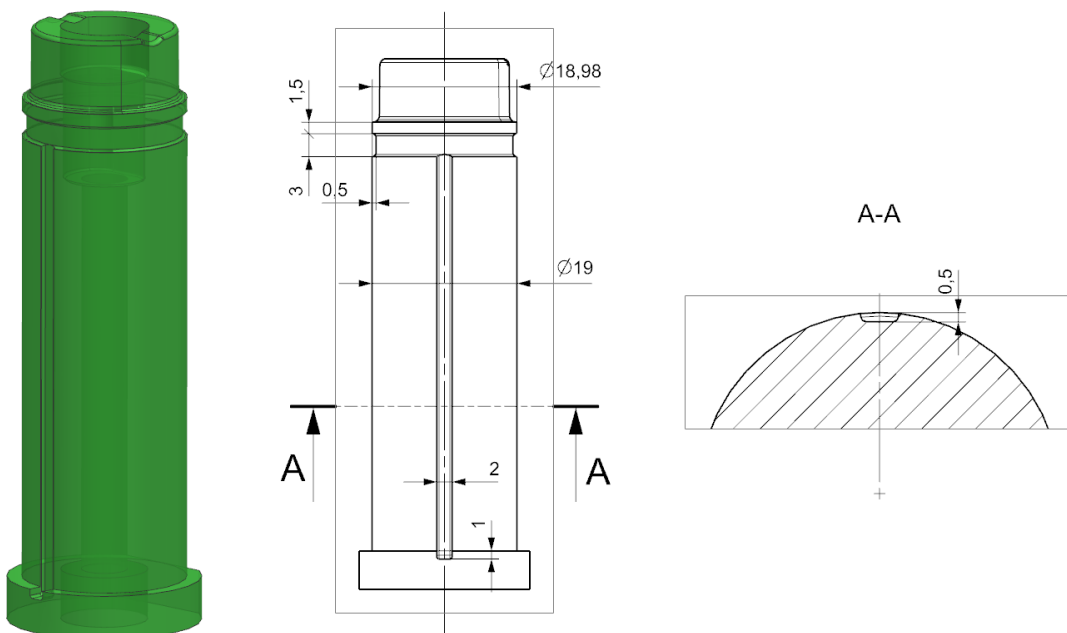
Určité množství stlačeného vzduchu unikne přes dělicí rovinu, popř. vodícími plochami vyhazovačů. I přes to musí být většina vstřikovacích forem opatřena dalšími konstrukčními prvky, které umožní úplný a rychlý odvod vzduchu z dutiny vstřikovací formy.

Při konstrukci tvarové dutiny formy jsem provedl odvzdušnění na tvarových jádrech formy v kritických místech, kde by mohlo dojít k uzavírání stlačeného vzduchu. Všechna tvarová jádra, na kterých je provedeno odvzdušnění, jsou vidět na obr.47.

Princip odvzdušnění je u všech tvarových jader totožný, proto bude detailně popsán například na tvarovém jádře 12. Na tvarovém jádře jsem vytvořil odvzdušňovací drážku vzdálenou 1,5 mm od kraje tvarové plochy s odváděcí drážkou, která je vyvedená k hlavě jádra. Průměr jádra mezi odvzdušňovací drážkou a okrajem tvarové plochy je menší o 0,02 mm na průměru. Tato hodnota zmenšení průměru dovolí uniknutí stlačeného vzduchu a zároveň nezpůsobí zastříknutí taveniny. Kdyby byla tato hodnota větší, došlo by k zastříknutí taveniny, protože polyamid velmi dobře teče za vstřikovacích teplot. U různých materiálů se tato hodnota liší. Odvzdušnění na tvarovém jádře 12 je vidět na obr.48, včetně rozměrů odvzdušňovacích drážek.



Obr. 47.: Odvzdušňovací jádra



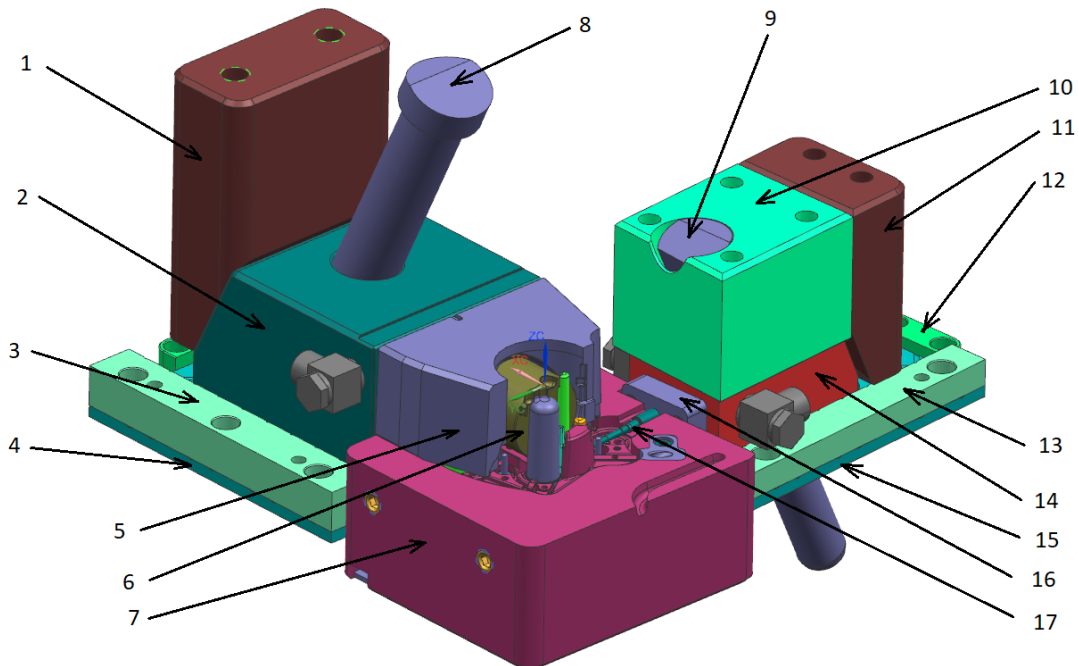
Obr. 48.: Odvzdušnění tvarového jádra 12

Stlačený vzduch je odveden odváděcí drážkou k hlavě tvarového jádra, které je zapuštěno ve tvarové vložce, zpod které může vzduch uniknout. Pokud by vzduch nemohl zpod tvarové vložky uniknout, je možné udělat odváděcí drážky navíc ze spodní strany tvarové vložky.

Odvzdušnění tvarové dutiny se provádí na místech, kde je patrné, že bude docházet k uzavírání vzduchu, případně lze místa odhalit pomocí simulace v programu Cadmould 3D-F. Případně lze odvzdušnění dodatečně dodělat po kontrole prvních vylisků.

3.9. Pohyb boční vložky a pohyblivých jader

Pohyb tvarové vložky boční, jádra 1 a jádra bočního je umožněn spojením s pohyblivými vozíky. Jedná se o spoj šrouby s použitím kolíků pro zajištění přesné polohy. Tvarovou vložkou boční a jádrem 1 pohybuje hlavní vozík, jádrem bočním vozík boční (obr.49)



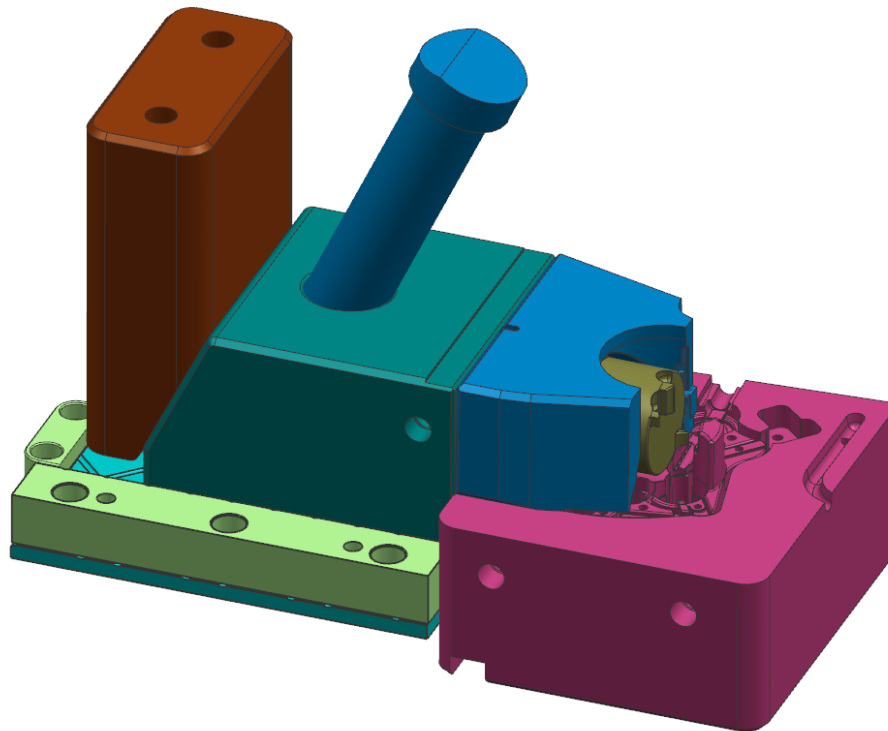
Obr. 49.: Pohyb boční vložky a pohyblivých jader

- 1 – klín 1, 2 – vozík hlavní, 3 – vedení 2, 4 – kluzná deska 2, 5 – tvarová vložka boční,
 6 – jádro 1, 7 – tvarová vložka AS, 8 – šikmý kolík hlavní, 9 – šikmý kolík boční,
 10 – kostka kolíku, 11 – klín 2, 12 – doraz vozíku, 13 – vedení 1, 14 – vozík boční,
 15 – kluzná deska 1, 16 – přítlačná deska, 17 – boční jádro

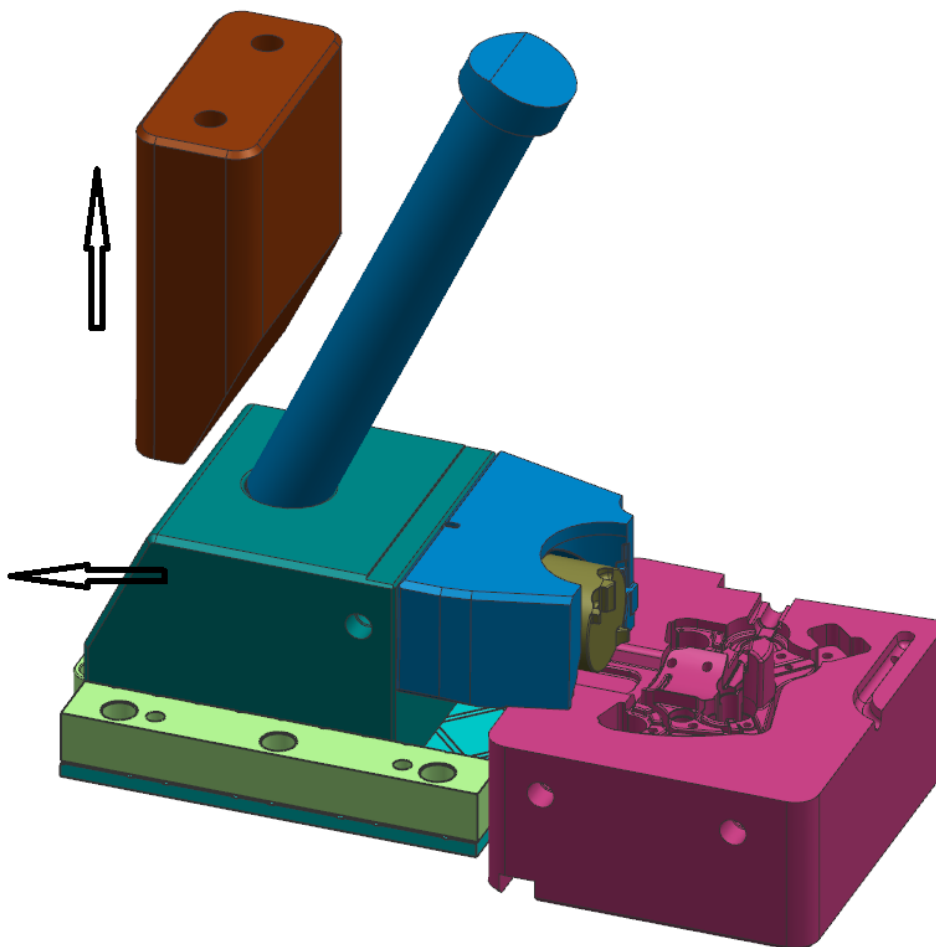
Vozíky hlavní a boční jsou posuvně uloženy mezi vedeními na kluzných deskách a jsou na pohyblivé straně formy. V pohyblivé straně formy jsou umístěny ve středové desce AS. Pohyb při otevírání formy je vyvozen prostřednictvím šikmých kolíků, které jsou součástí pevné strany formy. Dále jsou součástí pevné strany formy klíny, které zajišťují přesnou polohu vozíků při uzavření formy a při plnění tvarové dutiny taveninou brání posunu vozíku. Šikmé kolíky a klíny jsou umístěny v pevné straně formy ve středové desce DS.

Na obr.50 je vidět vozík hlavní v poloze vstřikování. V této poloze je forma uzavřená, šikmý kolík je zajetý ve vozíku a klín dosedá na vozík. Když se forma otvírá, dojde k odjetí pohyblivé strany formy od pevné strany formy, pomocí šikmého kolíku odjede vozík a vstřikovaný díl je odformován (obr.51). Případné úplné vyjetí vozíku je zajištěno pomocí dorazu.

Po vyhození dílu z tvarové dutiny formy se forma uzavírá a vozík se vrací do původní polohy. Na stejném principu funguje vozík boční.



Obr. 50.: Vozík hlavní v poloze vstřikování



Obr. 51.: Vozík hlavní v poloze odformování

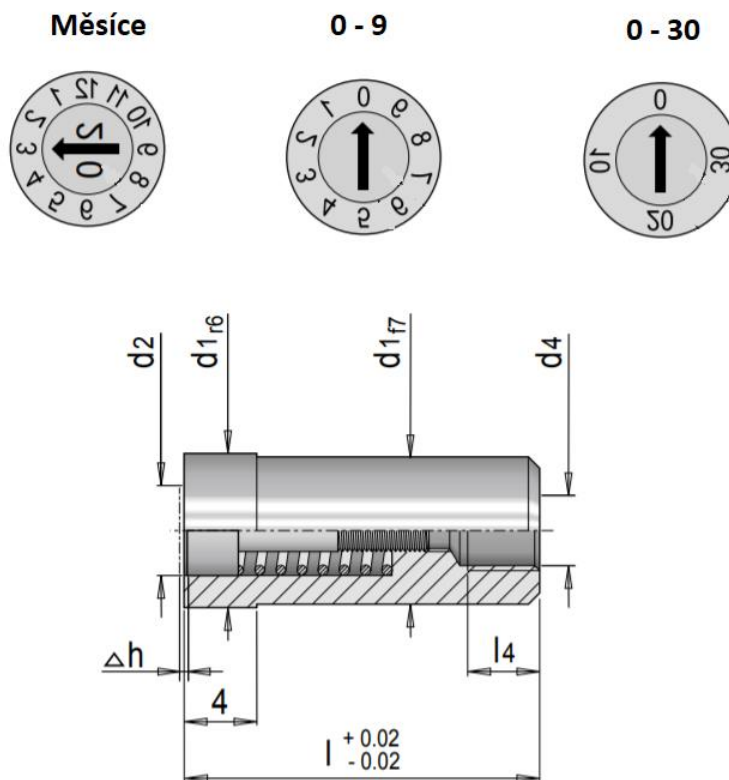
3.10. Označení vstřikovaného dílu

Na vstřikovaný díl se ve většině případech vytvářejí popisy, které obsahují datum výroby, materiál, recyklační značku, popřípadě další informace. Pro některé druhy popisů existují normalizované díly od výrobců jako je např. Hasco nebo MEUSBURGER. V jejich sortimentu jsou normalizované díly označující den, týden, měsíc, rok, kvartál, pracovní směna, číslovky 0 – 9, písmena A – Z, označení produktu a bez popisu.

Výše uvedené normalizované díly mohou být ve tvarové vložce pouze naraženy, případně přišroubovány šroubem skrz desku.

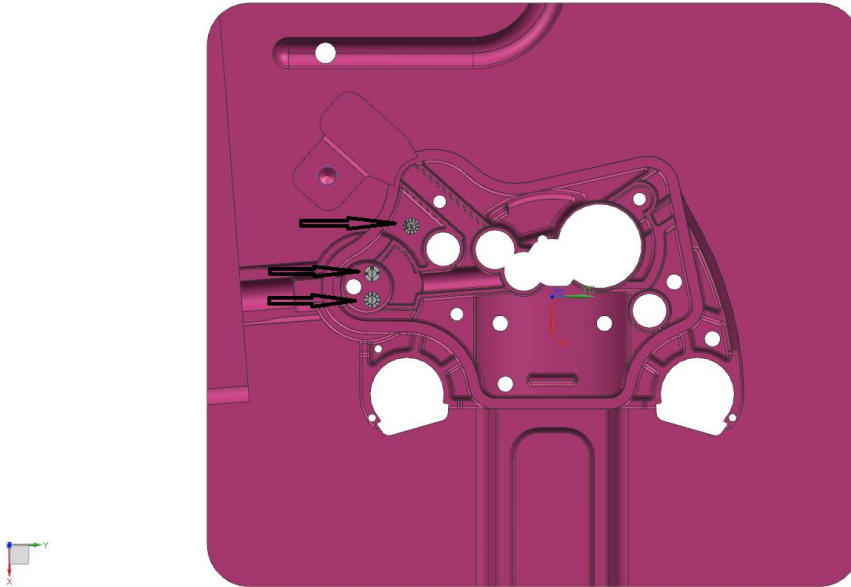
Normalizované díly označující datum výroby se nazývají datumovky. Nastavení požadované hodnoty na datumovce se provádí otočením jejího středu s ukazatelem. Střed s ukazatelem je v těle datumovky uložen otočně a tření vyvozené pružinou drží správnou polohu natočení ukazatele.

V mé práci byly použity tři druhy datumovek. Datumovka s měsíci, datumovka s čísly 0 – 9 a 0 – 30 od firmy MESUBURGER (obr.52).



Obr. 52.: Použité datumovky

Datumovky jsou ve tvarové vložce AS upevněny pomocí šroubů, které jsou přišroubovány skrz tvarovou vložku (obr.53).



Obr. 53.: Umístění datumovek ve tvarové vložce AS [11]

3.11. Kontrolní systémy formy

Přesné řízení procesu a zajištění vysoké a reprodukovatelné kvality výlisku závisí na sledování teploty a tlaků. Jejich průběhy jsou během jednotlivých výrobních cyklů ukládány. Tyto uložené zdroje informací se využívají při případném poklesu kvality výlisků a pomáhají vyloučit chybně nastavené technologické parametry jako příčinu vyrobených zmetků. Pokud dojde k vychýlení sledovaných technologických parametrů z nastaveného intervalu hodnot, je možné vstřikovací cyklus v jakékoli fázi přerušit a výlisek tak automaticky vyloučit z produkce. Díky tomuto procesu dochází k maximálnímu zajištění vysoké výstupní kvality produkce.

3.11.1. Kontrola teploty

Na polymerní materiál během procesu vstřikování působí teplo. Nejdůležitější teplo, které na materiál působí je teplo v tavící komoře vstřikovací jednotky. S ohledem na citlivost plastů a jejich aditiv na zvýšenou teplotu, musí být tepelná energie, která je předávána zpracovávanému materiálu přesně řízena. Teplota je sledována v různých zónách tavící komory a na výstupu z tavící komory, nejčastěji v trysce vstřikovací jednotky, kde je teplotní sonda v přímém styku s taveninou.

Dále se sleduje teplota tvarové dutiny formy, která má také vliv na průběh procesu a kvalitu výrobku. Nejčastěji se teplota měří pomocí termočlánků, ale používají se i odporová teplotní čidla. Teplotní čidla musí být schopna zajistit rychlý přenos signálu nesoucího informaci o teplotě do řídicí jednotky, aby systém mohl udržovat požadované hodnoty s co nejmenšími odchylkami.

Ve tvarové dutině jsem umístil teplotní čidlo NR33.500-177 od firmy Horst Igel. Jedná se o teplotní čidlo typu termočlánek s kabelovým vyvedením. Umístění teplotního čidla je vidět na výkresu sestavy, který je součástí příloh.

3.11.2. Kontrola tlaků

Z hlediska přesnosti rozměrů vylisků má největší vliv tlak uvnitř tvarové dutiny formy. Srovnatelné tlakové poměry při jednotlivých výrobních cyklech jsou dobrým signálem reprodukovatelnosti. Z toho důvodu je tlak uvnitř vstřikovací formy velmi důležitým technologickým parametrem, který má kvalitativně vypovídající hodnotu.

Velký důraz je především kladen na měření tlaku taveniny v systému vstřikolisu. Dále dochází ke kontaktnímu měření tlaku taveniny ve tvarové dutině formy.

Ve tvarové dutině jsem umístil tlakové čidlo 6159AE od firmy Kistler (obr.54). Jedná se o piezoelektrický tlakový snímač dutin s malým předním průměrem pro přímé měření tlaku. Umístění tlakového čidla je vidět na výkresu sestavy, který je součástí příloh.



Obr. 54.: Tlakové čidlo 6159AE Kistler [12]

3.12. Kompletní analýza vstřikování v programu Cadmould 3D-F

Po vytvoření kompletního 3D modelu tvarové dutiny je vhodné provést kompletní analýzu vstřikování vylisku. Nastavení všech parametrů, které mají vliv na vstřikování musí co nejvíce odpovídat realitě, aby byla analýza co nejpřesnější.

Nyní provedu detailnější popis jednotlivých kroků

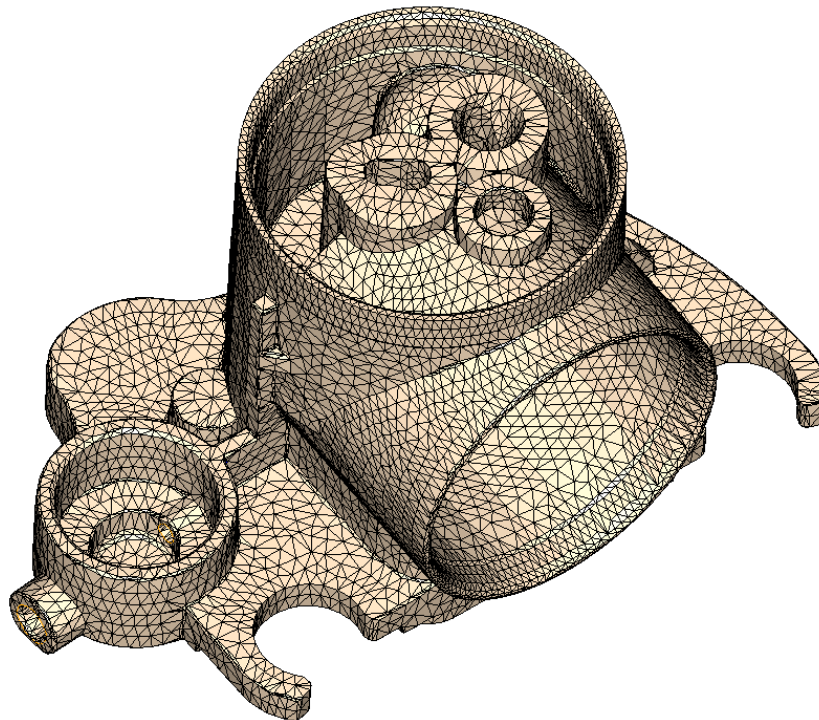
3.12.1. Import dat vstřikovaného dílu

Standardním vstupním formátem dat pro program Cadmould 3D-F je formát STL nebo STEP. Pokud se použije formát STEP, program Cadmould 3D-F si tento formát automaticky převede na formát STL. Program Cadmould 3D-F provádí veškeré matematické výpočty na modelu ve formátu STL.

Cadmould 3D-F převezme souřadnicový systém, který byl použit při exportu CAD dat. Pokud by nám souřadnicový systém nevyhovoval, je možnost ho importovat, transformovat do již zavedeného nebo námi požadovaného souřadnicového systému.

3.12.2. Tvorba výpočtové sítě

Výpočtová síť může být vytvořena zcela automaticky při spuštění analýzy, nebo je možné vytvořit výpočtovou síť dle vlastních požadavků. Výpočtová síť byla vytvořena podle vlastních požadavků, velikost elementů byla zvolena podle nejmenší tloušťky stěny vylisku (obr.55). Absolutní délka elementu má hodnotu 1,665 mm.

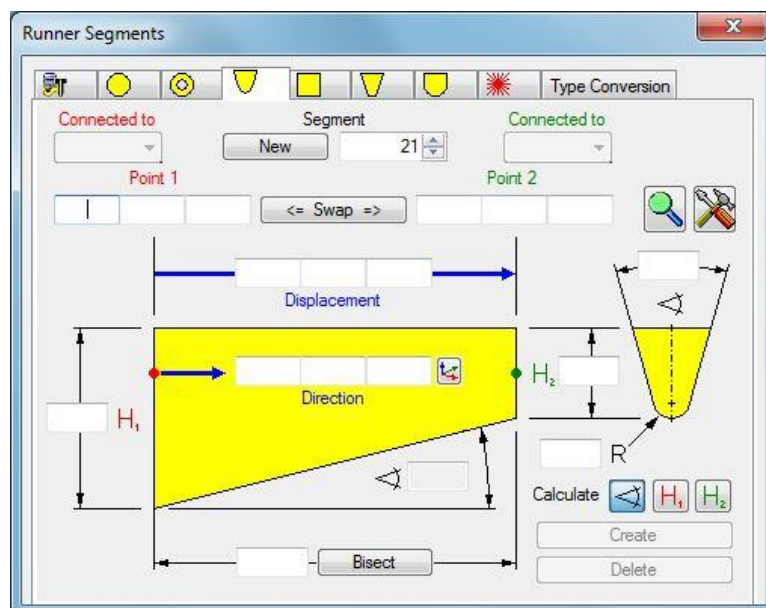


Obr. 55.: Výpočtová síť

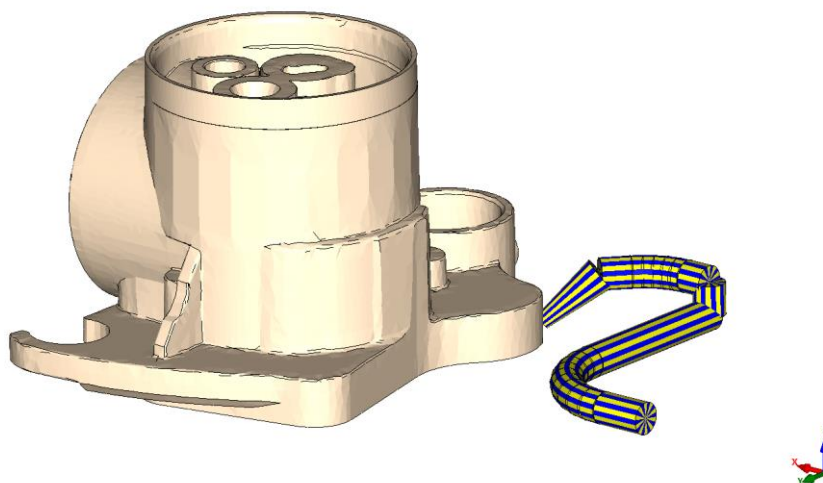
3.12.3. Tvorba vtokového systému

V programu Cadmould 3D-F je možné v simulaci vytvářet různé vtokové systémy (studené i horké kanály). V mém případě se jedná o studený vtokový kanál s tunelovým vtokem. Vtokový kanál je tvořen z určitých segmentů a z důvodu co nejpřesnější simulace by měl být vytvořen co nejvíce se podobající realitě. Pro co nejpřesnější vytvoření vtokového kanálu je možnost importování křivky (osy) z konstrukčního programu ve formátu IGES. Kanál se automaticky rozdělí na elementy a každému elementu jsou přiřazeny hodnoty. Jak je vidět na obr.56, je zde možnost volby různých tvarů vtokových kanálů.

Kompletní vytvořený vtokový kanál s tunelovým vtokem je vidět na obr.57.



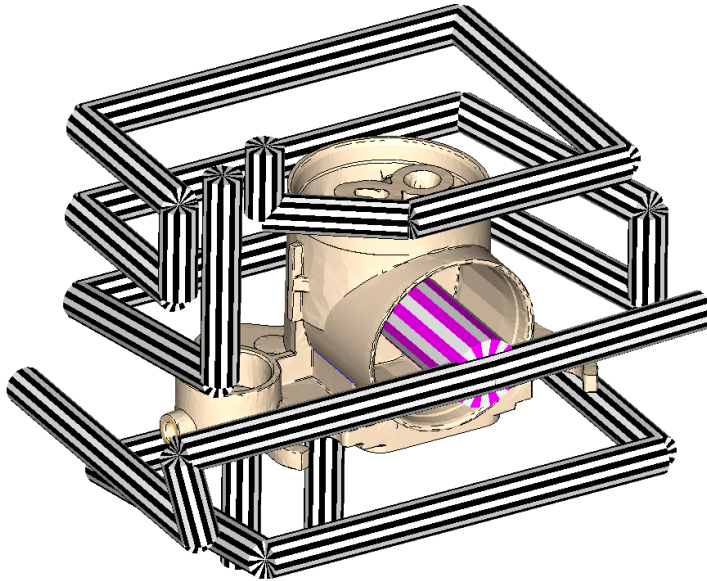
Obr. 56.: Segmenty vtokového kanálu



Obr. 57.: Vtokový kanál s tunelovým vtokem

3.12.4. Vytvoření temperačních okruhů

Pro simulaci je důležité vytvoření temperačních okruhů, které by zase měly odpovídat co nejvíce realitě. Jednoduché temperační okruhy jdou v programu tvořit přímo. Co se týká složitějších kanálů, lze stejně jak u vtokových kanálů importovat křivky (osy) ve formátu IGES. Tímto způsobem byly temperační okruhy vytvořeny i v mém případě. Po importu křivek, se jednotlivým okruhům přiřadí průměry vrtaných kanálů. V mém případě je průměr temperačních kanálů 8 mm.




CADMOULD®
3D-F SIMULATION

Obr. 58.: Temperační okruhy

V programu Cadmould 3D-F je také možnost zvolit oblasti tvořené vložkami z jiných materiálů, případně vložkami, které jsou smáčené. Vybere se daná oblast, se kterou je jádro v dotyku a přiřadí se příslušný temperační kanál, ve kterém je jádro smáčeno. Tento postup byl proveden u dvou smáčených jader, které se v mé tvarové dutině vyskytují.

Po vytvoření temperačních okruhů je důležité zadat temperační podmínky pro jednotlivé temperační okruhy. Je třeba stanovit typ, průtočné množství, vstupní teplotu a směr průtoku temperačního média. Zde byly nastaveny hodnoty uvedené v předchozí kapitole 3.7.4 Temperační médium.

3.12.5. Přiřazení materiálů a procesních parametrů.

Dalším důležitým krokem je přiřazení materiálu, ze kterého jsou vložky tvarové dutiny formy. Zde se jedná o materiál 1.2367. Dále se přiřadí materiál tvarovým jádrům, které jsou z jiného materiálu. V mém případě jsou tvarová jádra z materiálu AMPCOLOY 940. Poslední

materiál, který zbývá přiřadit, je materiál vstřikovaného dílu. Jedná se o PPA SCHULAMID GF33.

Jedním z posledních kroků je nastavení procesních parametrů. Procesní parametry lze nastavit pomocí tlačítka „Default“ a získáme návrh procesních parametrů od programu Cadmould 3D-F. Jedná se o procesní parametry jako jsou doba vstřikovacího času, návrh hodnot teplot, čas dotlaku a doba ochlazování.

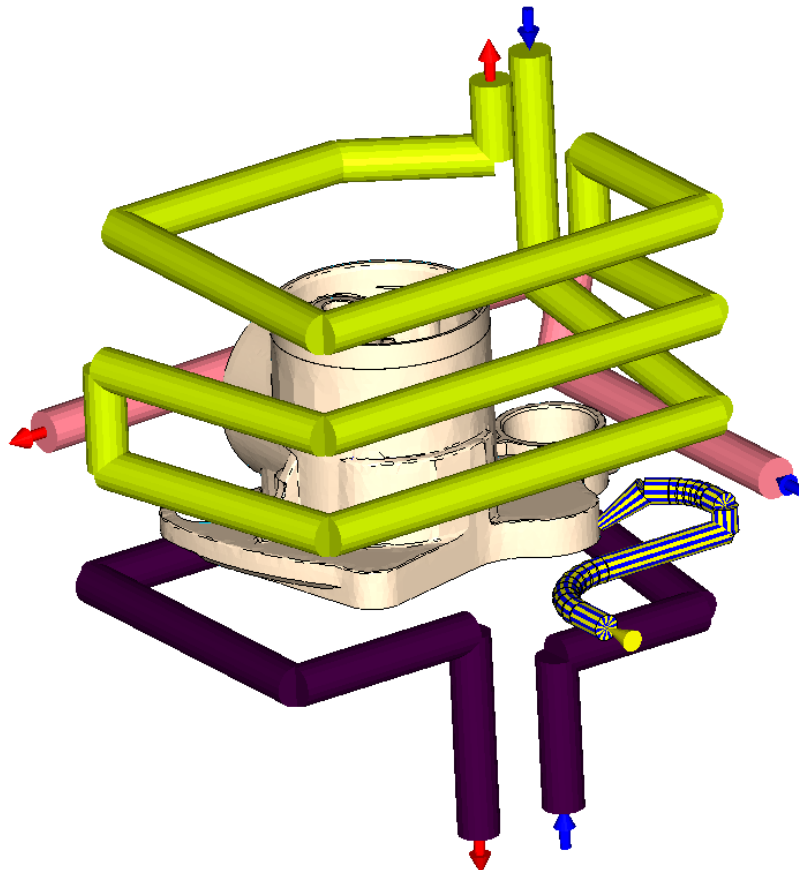
Návrh doby vstřikovacího času se odvíjí od tvaru dílu, počtu vtoků, jejich pozic a také použitého materiálu.

Navrhované hodnoty teplot jsou přebírány z materiálové databáze.

Čas dotlaku a doba ochlazování vycházejí z algoritmu, který zohledňuje tloušťky stěn a parametry materiálu – jako optimální teploty taveniny a nástroje a také teploty tání, tuhnutí a odformování.

3.12.6. Připravený model pro spuštění simulační analýzy

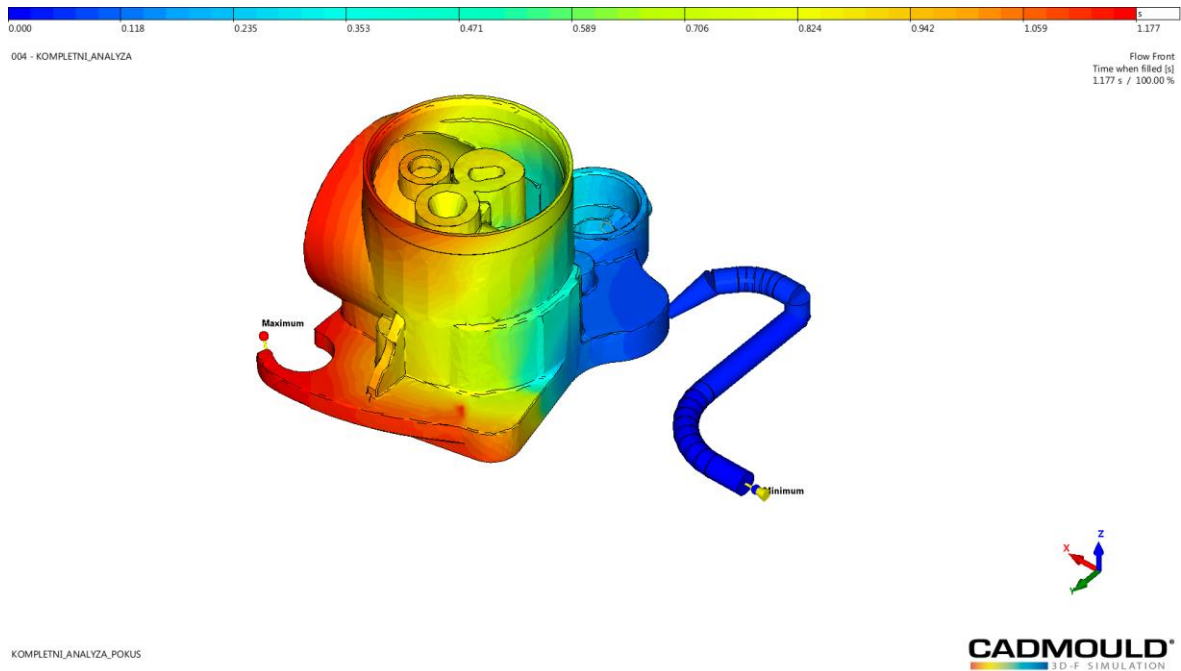
Na obr.59 je již vidět připravený model a stačí zahájit simulační výpočet.



Obr. 59.: Připravený simulační model

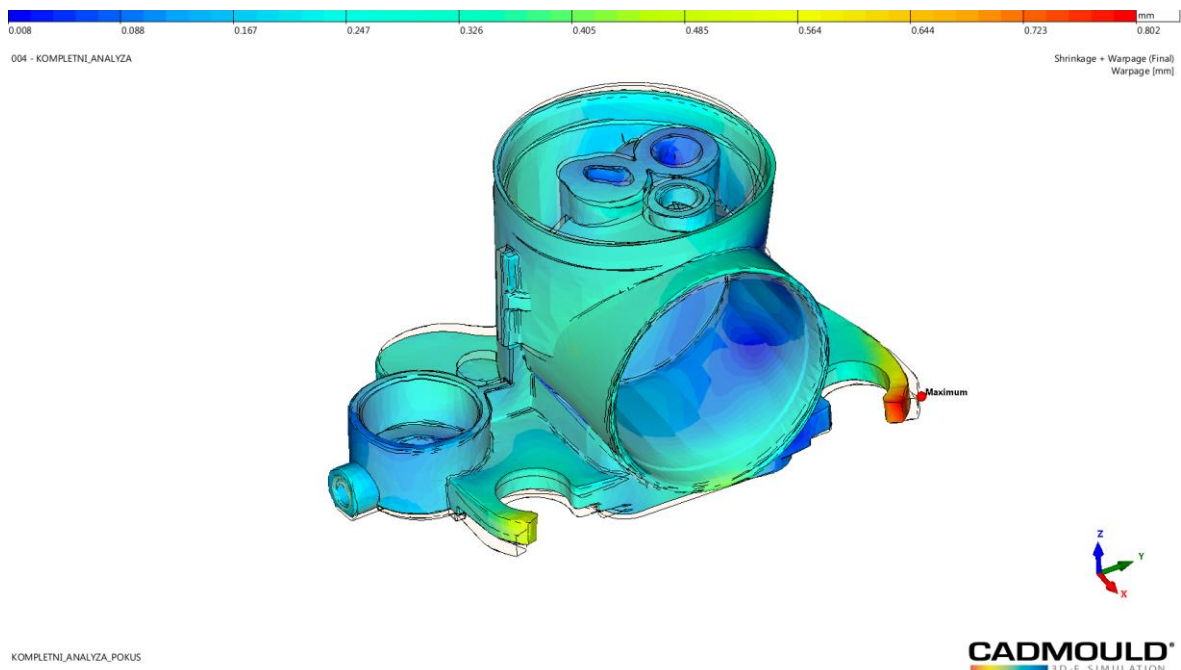
3.12.7. Výsledky simulační analýzy, určení a domodelování přídavek

Po dokončení simulační analýzy je vidět, že k naplnění tvarové dutiny formy dojde v čase 1,177 s (obr.60).



Obr. 60.: Dokončení simulační analýzy

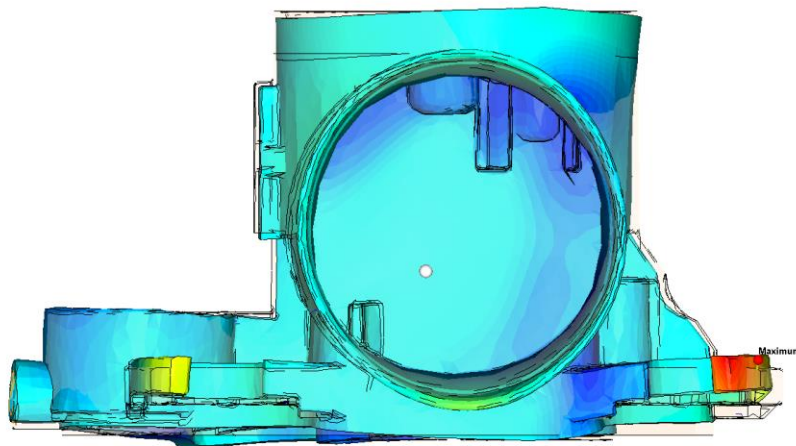
Simulační program Cadmould 3D-F nabízí celou řadu výsledků, mě nejvíce zajímalo vyhodnocení deformací na výlisku. Největší deformace je u zobáčků, které se krouží ve směru osy z. Velikost této deformace je 0,802 mm (obr.61, 62). Ve tvarové dutině formy bude potřeba vymodelovat protideformaci, aby došlo k eliminování tohoto kroucení.



Obr. 61.: Deformace vstříkovaného dílu



004 - KOMPLETNÍ ANALÝZA



KOMPLETNÍ ANALÝZA_POKUS

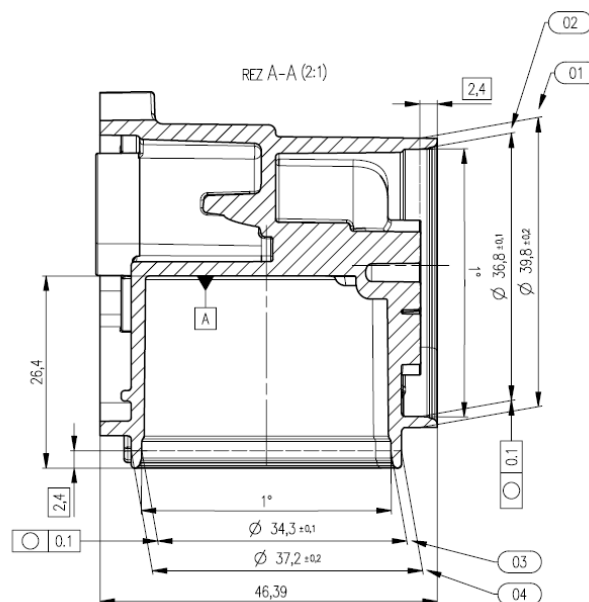
CADMOULD®
3D-F SIMULATION

Obr. 62.: Deformace vstříkovaného dílu - boční pohled

Dále mě zajímá změna průměru a kruhovitosti u rozměrů, které mají být tolerované. Na výkrese vylisku, který je součástí příloh jsou tyto tolerované rozměry, na které je kladen důraz označeny čísla 01 – 09.

Program Cadmould 3D-F poskytuje funkci měření kruhovitosti a to jak na modelu dílu nedeformovaném, tak i deformovaném.

Hlídané rozměry 02, 03, 05, 06, 07 a 09 jsou rozměry vnitřní, rozměry 01, 04 a 08 jsou rozměry vnější. Všechny tyto rozměry musí mít přídavek, aby bylo možné podle prvních naměřených rozměrů vylisku provést korekci. Postup volby přídávku ukážu u jednoho rozměru vnitřního (02) a jednoho vnějšího (01).



Obr. 63.: Výřez hlídaných rozměrů

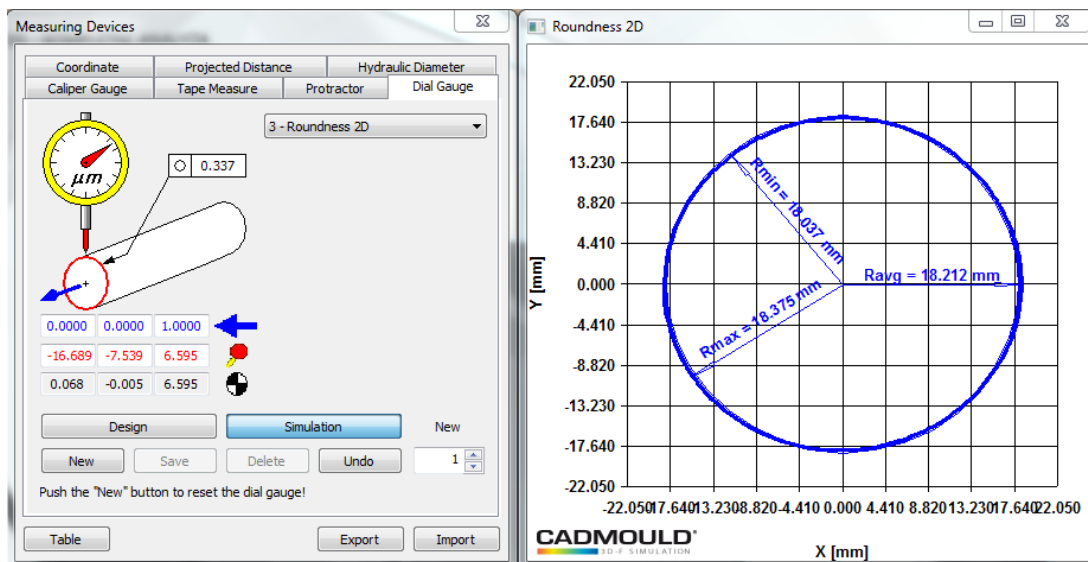
Vnitřní rozměr O2 má hodnotu průměru $D_{O2} = 36,8 \pm 0,1$ mm, měřenou 2,4 mm od čela. Hodnota průměru středního na deformovaném díle je $D_{STŘ,02} = 36,424$ mm a hodnota průměru minimálního $D_{MIN,02} = 36,074$ mm (obr.64).

Velikost přídávku se určí:

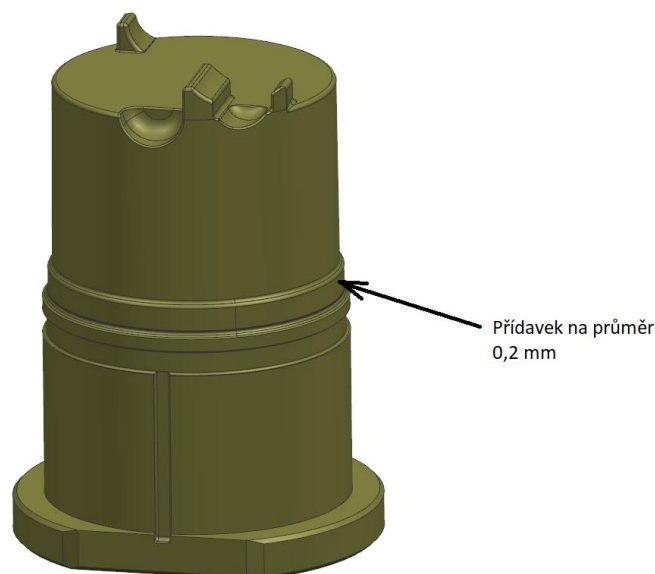
$$P = (D_{STŘ,02} - D_{MIN,02}) + (D_{O2} - D_{STŘ,02}) \quad (5)$$

$$P = (36,424 - 36,074) + (36,8 - 36,424) = 0,726 \text{ mm}$$

Vypočtený přírůstek je velmi velký, takovýto přírůstek není možné na tvarovém jádře 1 vymodelovat bez zásadních změn na tvaru. Z toho důvodu zvolíme přírůstek na průměr 0,2 mm (obr.65). Jelikož se jedná o materiál výlisku, který obsahuje jako plnivo skleněná vlákna, nemusí být simulace úplně přesná, protože velmi důležitá je orientace a poškození skleněných vláken v tavenině. Správným ukazatelem pro nás budou první naměřené hodnoty rozměrů výlisku, podle kterých se následně bude tvarová dutina formy korigovat.



Obr. 64.: Rozměry po deformaci O2



Obr. 65.: Jádro 1 - přírůstek

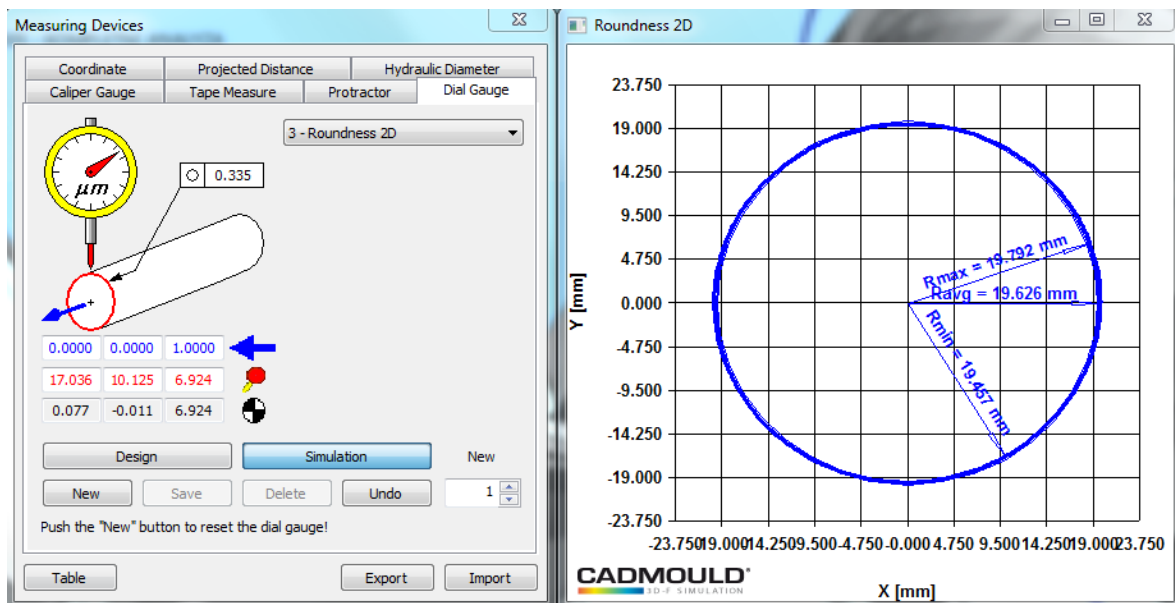
Stejným způsobem byly vypočteny hodnoty přídavek rozměrů 03, 05, 06, 07 a 09. Následně byly přídávky upraveny a domodelovány na příslušných jádrech. Vypočtené hodnoty přídavek na průměr a přídávky vymodelované na příslušných jádrech jsou uvedeny v tab.6.

Tab. 6.: Hodnoty přídavek jader vnitřních průměrů

Hlídaný rozměr	Vypočtená hodnota přídavku na průměr [mm]	Vymodelovaná hodnota přídavku na průměr [mm]
02	0,726	0,20
03	0,622	0,40
05	0,272	0,28
06	0,502	0,50
07	0,052	0,05
09	0,202	0,20

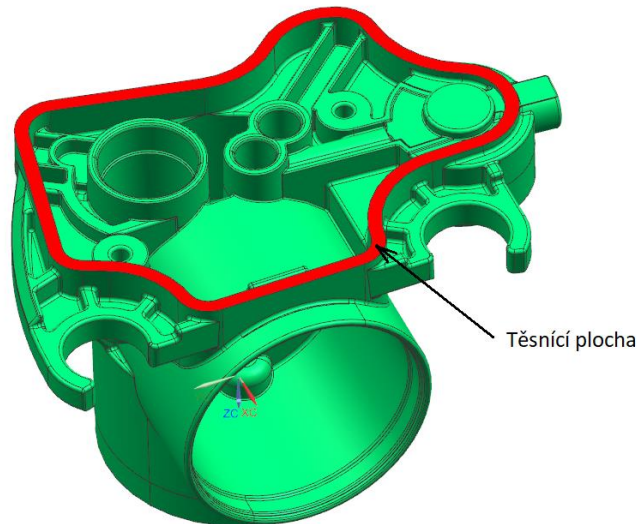
Vnější rozměr 01 má hodnotu průměru $D_{01} = 39,8 \pm 0,2$ mm, měřenou 2,4 mm od čela. Hodnota průměru středního na deformovaném díle je $D_{STR,01} = 39,252$ mm a hodnota průměru minimálního $D_{MAX,01} = 39,584$ mm (obr.66).

Velikost přídavku není třeba určovat, protože je vidět, že $D_{MAX,01} < D_{01}$, tudíž přídavek na tvarové vložce již je. Přesná korekce se provede až po naměření hodnot prvních vstřikovaných dílů. Stejně to vychází u vnějších rozměrů 04 a 08, tudíž se přídávky není třeba zabývat.



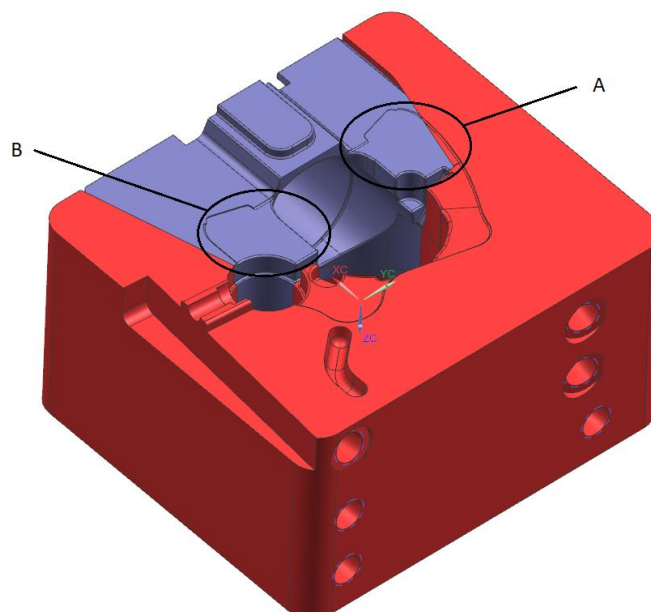
Obr. 66.: Rozměry po deformaci 01

Další plocha, na které je třeba domodelovat přídavek, je těsnící obvodová plocha výlisku (obr.67). Přídavek zde musí být z důvodu předepsané rovinnosti 0,1 mm. Zde jsem zvolil přídavek 0,2 mm, který by pro docílení rovinnosti měl být při následných korekcích dostačující.



Obr. 67.: Výlisek - těsnící plocha s předepsanou rovinností

Poslední úprava tvarové dutiny formy je vytvoření předdeformace na místech, kde se vykrucují zobáčky (obr.62). Předdeformace je vymodelována, jako šikmé natočení plochy proti směru deformování zobáčků na tvarové vložce DS a tvarové vložce boční (obr.68). Předdeformace A má hodnotu v krajním místě natočení 0,5 mm a předdeformace B 0,3 mm. Na protější tvarové vložce AS se žádná úprava neprovede, vzniká tam vrstva materiálu, kterou je možné při dalších korekcích ubrat.

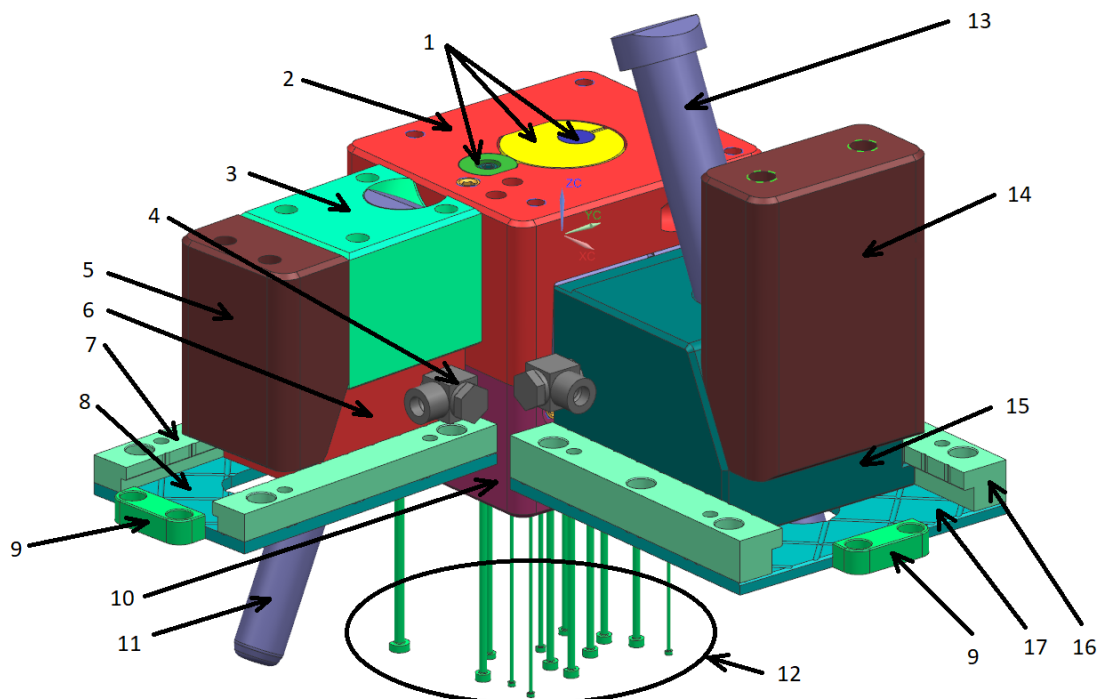


Obr. 68.: Předdeformace - tvarová vložka DS, tvarová vložka boční

Výše uvedené přídavky, případně předdeformace se volí na základě simulační analýzy a zkušenostech konstruktéra. Volbou přídavek však práce na tvarové dutině nekončí. Kompletní forma se zprovozní na příslušném vstřikovacím lise a vyrobí se první výlisky. Rozměry výlisků se následně naměří na 3D souřadnicovém měřicím stroji a na základě naměřených dat se provede korekce tvarových rozměrů. Korekce se může provádět i víckrát po sobě, dokud výlisek nesplňuje předepsané rozměry od zákazníka. Hlavním důvodem, proč vytváříme na tvarových dílech přídavky je vytvoření dostatečného množství materiálu, který můžeme při korekcích ubírat. V některých případech vznikne při korekcích problém, že například na tvarové vložce je potřeba materiál přidat. Pokud se jedná o tvarovou vložku malých rozměrů, na které není velké množství odpracovaných hodin, vyrobí se tvarová vložka nová. Pokud se jedná o velké a tvarově složité tvarové vložky, je možnost tvarovou vložku poslat do firmy, kde se specializují na navařování. Takto opravené plochy se následně obrobí na požadovaný tvar a rozměr. Pokud se jedná jak o první, tak o druhou možnost, vždy vznikají zbytečné výdaje a časové zpoždění ve výrobě.

3.13. Kompletní tvarová dutina vstřikovací formy

Na obr.69 je vidět kompletní tvarová dutina vstřikovací formy.



Obr. 69.: Kompletní tvarová dutina vstřikovací formy

- 1 – tvarová jádra, 2 – tvarová vložka DS, 3 – kostka kolíku, 4 – přípojka, 5 – klín 2,
 6 – vozík boční, 7 – vedení 1, 8 – kluzná deska 1, 9 – doraz vozíku, 10 – tvarová vložka AS,
 11 – šikmý kolík boční, 12 – vyhazovače, 13 – šikmý kolík hlavní, 14 – klín 1,
 15 – vozík hlavní, 16 – vedení 2, 17 – kluzná deska 2

Tvarové vložky AS a DS jsou opatřeny montážními závity M8, pro upevnění ve středových deskách. Dále jsou opatřeny díry pro šrouby, případně kolíky ostatní součástky jako klíny, dorazy vozíků, vedení, kluzné desky a kostka kolíku.

Detailnější náhled na složení tvarové dutiny formy a rozdělení na pevnou a pohyblivou část formy je vidět na výkrese sestavy tvarové části formy, který je součástí příloh.

3.14. Výpočty

3.14.1. Výpočet vyhazovací síly

Efektivní smršťování $S_{F\text{ef}}$ vyvolává ve výstřiku tahové napětí σ_t , které dle Hookova zákona je:

$$\sigma_t = S_{F\text{ef}} \cdot E, \quad (6)$$

kde E je modul pružnosti při teplotě vyhazování T_v .

Teplota vyhazování $T_v = 255 \text{ °C}$, tomu odpovídá $E = 5\,760 \text{ MPa}$.

$$\sigma_t = S_{F\text{ef}} \cdot E = 0,014 \cdot 5\,760 = 80,64 \text{ MPa} \quad (7)$$

Napětí σ_t vyvolá mezi plastem a tvárníkem tlak:

$$p_T = \sigma_t \cdot \frac{s}{r_3} = 80,64 \cdot \frac{1,9}{39,7} = 3,86 \text{ MPa} \quad (8)$$

kde s je tloušťka stěny, která byla určena jako průměrná hodnota tloušťek stěn 1,9 mm a r_3 je střední poloměr, který byl napočítán z CAD modelu a má hodnotu 39,7 mm.

Vyhazovací síla se spočte:

$$F_{v\text{ef}} = f \cdot S_{TV} \cdot p_T = 0,21 \cdot 12\,645 \cdot 3,86 = 10\,250 \text{ N} \quad (9)$$

Kde f je tření mezi výliskem a kovem, S_{TV} je dosedací plocha výstřiku při vyhazování.

S_{TV} byla spočítána z CAD modelu a má hodnotu 12 645 mm².

Výsledná vyhazovací síla vyšla 10 250 N.

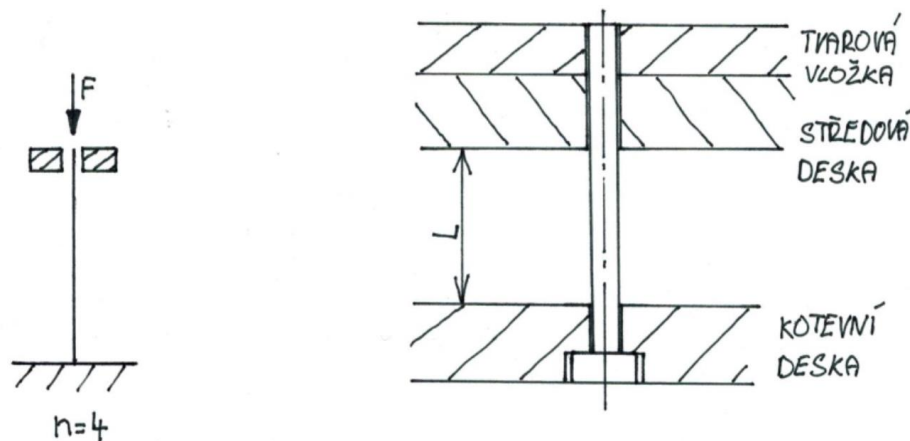
Vyhazovací síly závisí na mnoha faktorech, které jsou mnohdy obtížně zjistitelné. V praxi se obvykle vyhazovací síly nepočítají, neboť závisí na modulu pružnosti při teplotě vyhazování, smrštění při teplotě vyhazování, koeficientu tření, tvaru a ploše tvárníku, úkosech tvarů, teplotě vyhazování, tlaku v dutině, tloušťce stěny apod..

3.14.2. Kontrola vyhazovače na vzpěr

Forma má celkem 12 vyhazovačů, vyhazovací síla 10 250 N tedy bude rozvržena a každý vyhazovač bude působit na díl silou 854 N.

Kontrola je prováděna na vyhazovači o průměru $D = 2,5$ mm a celkové délce 141,65 mm, ale délka L na které hrozí vzpěr je 45 mm. Délka, na které hrozí vzpěr byla určena z délky vysouvání vyhazovačů. Vyhazovače se musí vysunout do vzdálenosti vrcholu nejdelšího tvarového jádra, které má délku 43,3 mm.

Mez úměrnosti $\sigma_u = 210$ MPa a mez kluzu $\sigma_k = 240$ MPa.



Obr. 70.: Uložení vyhazovače

Kvadratický průřez:

$$J_{MIN} = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = \frac{\pi \cdot 2,5^4}{64} = 1,9175 \text{ mm}^4 \quad (10)$$

Průřez:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,5^2}{4} = 4,9087 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

Štíhlost a λ mezní:

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{MIN}}{A}} = \sqrt{\frac{1,9175}{4,9087}} = 0,6250 \text{ mm} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{L}{i_{min}} = \frac{45}{0,6250} = 72 \quad (13)$$

$$\lambda_{mez} = \sqrt{n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{4 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000}{210}} = 199 \quad (14)$$

$\lambda < \lambda_{mez}$... výpočet podle Tetmajera

Výpočet kritické síly F_{KR} podle Tetmajera:

$$F_{KR} = \sigma_{KR}^T \cdot A = \left(\sigma_k - \frac{\sigma_k - \sigma_u}{\lambda_{mez}} \cdot \lambda \right) \cdot A \quad (15)$$

$$F_{KR} = \left(240 - \frac{240 - 210}{199} \cdot 72 \right) \cdot 4,9087 = 1\,124,8 \text{ N}$$

Kritická síla podle Tetmajera vyšla 1 124,8 N, vyhazovač je namáhán silou 854 N, tudíž vyhazovač vyhovuje.

3.14.3. Výpočet uzavírací síly formy

Síla, kterou musí lis na formu působit během vstřikovacího procesu. Vstřikovaný plast je vstřikován pod tlakem 400 barů, po započtení koeficientu bezpečnosti $k = 1,1$ je $p = 440$ barů.

Uzavírací síla:

$$F = p \cdot S_{PR} = 44 \cdot 3265 = 143\,660 \text{ N} \quad (16)$$

4. Závěr

Teoretická část mé diplomové práce byla zaměřena na základní rozdělení polymerních materiálů, úpravu polymerů pro zpracování a použití, parametrů ovlivňujících smrštění termoplastů a rozměrovou a tvarovou přesnost výstřiků z termoplastů.

Praktická část byla zaměřena na návrh tvarové dutiny formy pro díl zadaný zákazníkem, včetně provedení analýzy plnění a celkové analýzy vstřikování v programu Cadmould 3D-F. Na základě analýzy se dopočítaly, volily a modelovaly přídatky.

Tvarové části dutiny vstřikovací formy jsou otiskem 3D dílu se smrštěním dle materiálového listu 1,4%. Tvarová dutina vstřikovací formy je plněna studeným vtokovým kanálem s tunelovým vtokem. Poloha tunelového vtoku byla určena pomocí analýzy plnění v programu Cadmould 3D-F. Teplota tvarové dutiny formy je řešena pomocí tří teplotních okruhů, ve kterých je teplotním médiem tlaková voda. Čtyři použitá tvarová jádra jsou vyrobena z materiálu AMPCOLOY 940, který má velmi dobrou tepelnou vodivost.

Vyhazovací systém vstřikovaného dílu z tvarové dutiny formy je řešen pomocí vyhazovačů. Vyhazovače byly umístěny ve tvarové vložce AS po konzultaci se zákazníkem. Použité vyhazovače jsou normalizované díly od firmy MEUSBURGER, pouze délkově či tvarově upravené. Vypočtená velikost vyhazovací síly je 10 250 N.

Odvzdušnění tvarové dutiny formy bylo provedeno v místech předpokladu uzavírajícího se vzduchu na tvarových jádrech. Pokud by stávající odvzdušnění nebylo dostačující, provedla by se úprava odvzdušnění při korekcích.

Zvolené přídatky týkající se tolerovaných rozměrů jsou přibližné a budou upravovány po změření hodnot prvních vstřikovaných dílů. Jelikož se jedná o materiál vstřikovaného dílu PPA SCHULAMID GF33, který obsahuje skleněná vlákna nemusí být simulace analýzy vstřikování v programu Cadmould 3D-F dostatečně přesná. Záleží totiž na orientaci a poškození skleněných vláken v tavenině, což je pro matematický výpočet výpočtového programu špatně odhadnutelné.

Součástí 3D modelu tvarové dutiny jsou mechanismy umožňující pohyb tvarové vložky boční a tvarových jader. Tento pohyb je řešen mechanicky, pomocí šikmých kolíků a vozíků uložených posuvně mezi vedeními.

Hmotnost vstřikovaného dílu je 47,6 g a velikost síly uzavírání formy je 143 660 N.

Posledním úkolem diplomové práce bylo vytvořit výkres sestavy tvarové části formy včetně pozic s kusovníkem, výrobní výkres tvarové vložky DS, výrobní výkres tvarového jádra 1 a výkres výlisku. Tato dokumentace je součástí příloh, které navíc obsahují materiálové listy materiálu 1.2367, AMPCOLOY 940 a PPA SCHULAMID GF33.

Kompletní návrh tvarové dutiny formy byl vytvořen v programu NX 11,0 a simulace analýzy v programu Cadmould 3D-F.

Seznam použité literatury

- [1] Technologie II: Zpracování plastů [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec [cit. 2020-05-18]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [2] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů. Praha: Nakladatelství BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [3] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. Svitavy: Code Creator, 2016 [cit. 2019-11-06]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [4] BOBČÍK, L. a kol. Formy pro zpracování plastů I. díl - Vstřikování termoplastů. 2. upr. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999.
- [5] Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti [online]. Liberec [cit. 2019-11-06]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [6] Online skriptum Kompozitní materiály ČVUT Praha. [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné na:
http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitnimaterialy.pdf
- [7] Pravda a mýty o termické depolymerace plástových polymerů (pyrolýza) [online]. Praha: ENRESS, 2017 [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <http://www.enress.eu/pravda-a-myty-o-termicke-depolymerace-plastovych-polymeru/>
- [8] ZEMAN, Lubomír. Rozměrové a tvarové tolerance, jakost povrchu při vstřikování termoplastů [online]. 23.7.2015 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z:
<https://www.plasticportal.cz/>
- [9] Vady výstřiků – 1. díl: Příčiny vzniku vad a studené spoje [online]. 3.3.2010, , 58 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-1-dil-priciny-vzniku-vad-a-studene-spoje.html>
- [10] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe [online]. Praha: Grada, 2018 [cit. 2020-04-16]. ISBN 978-80-247-2818-6. Dostupné z: <https://books.google.cz>
- [11] MEUSBURGER [online]. Austria: Meusburger Georg GmbH & Co [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://ecom.meusburger.com/index/index.asp?kat=form>
- [12] KISTLER: measure, analyze, innovate [online]. Praha: Kistler Group [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/>
- [13] Ampcometal [online]. Copyright © AMPCO METAL, 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z:
<https://www.ampcometal.com/>
- [14] SCHMOLZ+BICKENBACH s.r.o.: GS metal [online]. Slovensko: SCHMOLZ+BICKENBACH, 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.gsmetal.cz/>
- [15] Lyondell Basell [online]. © LyondellBasell Industries Holdings BV, 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.lyondellbasell.com/>

Seznam obrázků

Obr. 1.: Molekulární struktura polymerů [3]	5
Obr. 2.: Rozdělení polymerních materiálů [2]	5
Obr. 3.: Struktura reaktoplastů [5]	6
Obr. 4.: Struktura temoplastu [5]	7
Obr. 5.: Oblast využití amorfních a částečně krystalických plastů [4]	7
Obr. 6.: Příklad použití termoplastů	8
Obr. 7.: Struktura termoplastického elastomeru [3]	8
Obr. 8.: Příklad použití termoplastických elastomerů [3]	9
Obr. 9.: Deformace elastomeru [3]	9
Obr. 10.: Struktura elastomeru [5]	10
Obr. 11.: Užívané typy částicových plniv [6]	14
Obr. 12.: Schématické znázornění změny tlaku p , objemu v a teploty T	19
Obr. 13.: Tlaková historie v různých místech výstřiku a její vliv na p v T chování [2]	21
Obr. 14.: Průběh smrštění v chladnoucí plastové desce [2]	22
Obr. 15.: Změna rozměru výstřiku v závislosti na čase v důsledku smrštění [2]	22
Obr. 16.: Vliv vybraných procesních parametrů na průběh smrštění [2]	23
<i>Obr. 17.: Rozdílné působení dotlaku v závislosti na vzdálenosti od ústí vtoku [2]</i>	<i>25</i>
Obr. 18.: Výlisek	32
Obr. 19.: Stopy po volném proudu taveniny [9]	33
Obr. 20.: Rozmístění poloh vtoků	34
Obr. 21.: Analýza plnění vtok 1 - horní pohled	35
Obr. 22.: Analýza plnění vtok 1 - spodní pohled	35
Obr. 23.: Analýza plnění vtok 2 - horní pohled	36
Obr. 24.: Analýza plnění vtok 2 - deformace	36
Obr. 25.: Analýza plnění vtok 3 - horní pohled	37
Obr. 26.: Analýza plnění vtok 3 - deformace	37
Obr. 27.: Vtok 2	38
Obr. 28.: Zaformování - tvarová vložka AS	39
Obr. 29.: Zaformování - tvarová vložka DS	40
Obr. 30.: Zaformování - tvarová vložka DS + tvarová vložka boční	40
Obr. 31.: Provedení rozváděcích kanálů [3]	41
Obr. 32.: Tvarová vložka AS - rozváděcí kanál	42
Obr. 33.: Průřez rozváděcího kanálu	42
Obr. 34.: Řez ústí vtoku	43
Obr. 35.: Princip samooddělení tunelového ústí vtoku [3]	44
Obr. 36.: Přidržovač vtoku	44
Obr. 37.: Tvarové vložky s jádry	45
Obr. 38.: Tvarová jádra	45
Obr. 39.: Rozmístění vyhazovačů	47
Obr. 40.: Temperační okruh 1 – vložka AS	49
Obr. 41.: Temperační okruh 1, jádro 4	49
Obr. 42.: Tvarová jádra 5, 7, 8 a 9	50
Obr. 43.: Temperační okruh 2 - vložka DS	51
Obr. 44.: Temperační okruh 2	51
Obr. 45.: Temperační okruh 3	52
Obr. 46.: Temperační kanály 3	52
Obr. 47.: Odvzdušňovací jádra	54
Obr. 48.: Odvzdušnění tvarového jádra 12	54
Obr. 49.: Pohyb boční vložky a pohyblivých jader	55
Obr. 50.: Vozík hlavní v poloze vstřikování	56
Obr. 51.: Vozík hlavní v poloze odformování	56



Obr. 52.: Použité datumovky	57
Obr. 53.: Umístění datumovek ve tvarové vložce AS [11]	58
Obr. 54.: Tlakové čidlo 6159AE Kistler [12]	59
Obr. 55.: Výpočtová síť	60
Obr. 56.: Segmenty vtokového kanálu	61
Obr. 57.: Vtokový kanál s tunelovým vtokem.....	61
Obr. 58.: Temperační okruhy.....	62
Obr. 59.: Připravený simulační model	63
Obr. 60.: Dokončení simulační analýzy.....	64
Obr. 61.: Deformace vstřikovaného dílu	64
Obr. 62.: Deformace vstřikovaného dílu - boční pohled.....	65
Obr. 63.: Výřez hlídaných rozměrů	65
Obr. 64.: Rozměry po deformaci 02	66
Obr. 65.: Jádru 1 - přídavek	66
Obr. 66.: Rozměry po deformaci 01	67
Obr. 67.: Výlisek - těsnicí plocha s předepsanou rovinností.....	68
Obr. 68.: Předdeformace - tvarová vložka DS, tvarová vložka boční.....	68
Obr. 69.: Kompletní tvarová dutina vstřikovací formy	69
Obr. 70.: Uložení vyhazovače	71

Seznam tabulek

Tab. 1.: Významy symbolů plniv [7]	16
Tab. 2.: Vliv tvaru plniva na vlastnosti termoplastů [2]	17
Tab. 3.: Vliv teploty stěny formy na smrštění PA 6 [2]	25
Tab. 4.: Všeobecné tolerance délkových rozměrů [8]	28
Tab. 5.: Přípustné protažení pro vybrané termoplasty [8]	31
Tab. 6.: Hodnoty přídavků jader vnitřních průměrů.....	67



Seznam příloh

Výkres sestavy tvarové části formy.....	Příloha 1
Výrobní výkres tvarové vložky DS.....	Příloha 2
Výrobní výkres jádra 1.....	Příloha 3
Výrobní výkres vylisku.....	Příloha 4
Materiálový list AMPCOLOY 940 [13].....	Příloha 5
Materiálový list 1.2367 [14].....	Příloha 6
Materiálový list PPA SCHULAMID GF33 [15].....	Příloha 7