

# **Optimalizace tvaru a designu plastového dílu za využití numerické simulace v programu Moldflow a konstrukce nástroje pro jeho výrobu**

Bc. Přemysl Vaculín

---

Diplomová práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Přemysl Vaculín
Osobní číslo:	T22991
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Optimalizace tvaru a designu plastového dílu za využití numerické simulace v programu Moldflow a konstrukce nástroje pro jeho výrobu.

## Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Provést 3D konstrukci modelu vstříkované součásti.
3. Vytvořit simulace procesu vstříkování v softwaru MoldFlow.
4. Navrhnout optimalizace vstříkování a vyhodnocení jednotlivých variant.
5. Navrhnout 3D konstrukci vstříkovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobiteľnosť.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2007, xvi, 308 s. ISBN 978-1-56990-421-3

KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, 2018, 491 s. ISBN 978-1-56990-645-3.

WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang HSU. Molding simulation: theory and practice. Cincinnati: Hanser Publications, 2018, 513 s. ISBN 978-1-56990-619-4.

YANG, Yi, Xi CHEN, Ningyun LU a Furong GAO. Injection molding process control, monitoring, and optimization. Munich: Hanser, 2016, 397 s. Progress in polymer processing series. ISBN 978-1-56990-592-0.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá optimalizací nástroje pro výrobu plastového dílu metodou vstřikování. V teoretické části se nachází informace o polymerních materiálech, procesu vstřikování, vstřikovacích formách a vadách vznikajících při vstřikování. Praktická část je věnována konstrukci 3D modelu daného výstřiku společně s konstrukcí optimalizované formy, která proběhla v programu Catia V5 2019. Optimalizace byla provedena v programu Moldflow Synergy 2023.

Výsledky všech analýz jsou zobrazené v diplomové práci a výkresovou dokumentaci vstřikovací formy lze najít v příloze.

Klíčová slova: vstřikování, vstřikovací forma, optimalizace, analýzy, Catia V5 2019, Moldflow Synergy 2023.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with optimization of a tool for the production of a plastic part by injection molding. Theoretical part contains information about polymer materials, injection molding process, injection molds and defects arising during injection molding process. Practical part is dedicated to the construction of the 3D model of the plastic part with the construction of an optimized mold. This construction was done in Catia V5 2019 and optimization in Moldflow Synergy 2023.

The results of all analyses are shown in the thesis and the drawing documentation of the injection mold can be found in the appendix.

Keywords: injection molding, injection mold, optimization, analysis, Catia V5 2019, Moldflow Synergy 2023.

Poděkování patří především mému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D., za jeho profesionální přístup při zpracovávání diplomové práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS .....	12
1.2 PLASTIKACE .....	13
1.3 PLNĚNÍ .....	13
1.4 CHLAZENÍ A DOTLAK.....	13
1.5 KONSTRUKCE VÝSTŘIKU .....	14
1.6 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	16
1.6.1 Vstřikovací jednotka .....	17
1.6.2 Vstřikovací tryska .....	18
1.6.3 Uzavírací jednotka .....	19
<b>2 POLYMERNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>20</b>
2.1 TERMOPLASTY .....	20
2.1.1 Amorfnní .....	21
2.1.2 Semikrystalické .....	21
2.2 REAKTOPLASTY.....	22
2.3 ELASTOMERY .....	23
<b>3 VSTŘIKOVACÍ FORMA</b> .....	<b>24</b>
3.1 VTOKOVÝ SYSTÉM .....	25
3.1.1 Studený vtokový systém .....	26
3.1.2 Horký vtokový systém .....	27
3.2 TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	29
3.3 VYHAZOVCÍ SYSTÉM.....	30
3.3.1 Mechanické vyhazování.....	31
3.3.2 Pneumatické vyhazování.....	31
3.3.3 Hydraulické vyhazování.....	31
3.4 ODVZDUŠNĚNÍ FORMY.....	31
<b>4 VADY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>33</b>
4.1 STUDENÉ SPOJE (WELD LINES) .....	33
4.2 DIESEL EFEKT .....	34
4.3 PŘETOKY (FLASHES) .....	34
4.4 NEDOTEČENÉ DÍLY (SHORT SHOT).....	35
4.5 TRYSKOVÝ TOK (JETTING) .....	35
4.6 VZDUCHOVÉ KAPSY (AIR TRAPS) .....	36

<b>5</b>	<b>ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ.....</b>	<b>37</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>VSTŘIKOVANÁ SOUČÁST .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>ANALÝZA PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ .....</b>	<b>41</b>
8.1	VOLBA MATERIÁLU .....	41
8.1.1	PA6 Generic Estimates .....	42
8.1.2	Lutrel PBT-GP1000-NP .....	43
8.2	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE .....	43
8.1	VOLBA VTOKOVÉHO SYSTÉMU .....	44
8.1.1	Čas plnění.....	45
8.1.2	Tlak při přepnutí na dotlak.....	45
8.1.3	Teplota na čele taveniny.....	46
8.1.4	Zvolený vtokový systém .....	47
8.2	VOLBA TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU .....	47
8.2.1	Efektivita temperačních okruhů .....	47
8.2.2	Teplota temperačního média .....	48
8.2.3	Tlak temperačního média .....	49
8.2.4	Zvolená varianta temperačního okruhu.....	49
8.3	VOLBA MATERIÁLU .....	50
8.3.1	Tlak při přepnutí na dotlak.....	50
8.3.2	Teplota čela taveniny .....	51
8.3.3	Tuhnutí .....	51
8.3.4	Deformace .....	52
8.3.5	Zvolený materiál výrobku .....	53
<b>9</b>	<b>OPTIMALIZOVANÉ PARAMETRY ANALÝZY .....</b>	<b>54</b>
9.1	ZVOLENÝ MATERIÁL .....	54
9.2	OPTIMÁLNÍ PROCESNÍ PARAMETRY .....	54
9.3	VÝSLEDKY ANALÝZY PRO ZVOLENÉ PROCESNÍ PARAMETRY .....	55
9.3.1	Čas plnění.....	56
9.3.2	Tlak při přepnutí na dotlak.....	56
9.3.3	Průběh tlaku u ústí vtoku.....	57
9.3.4	Průběh uzavírací síly .....	58
9.3.5	Smyková deformace.....	58
9.3.6	Temperace dílu.....	59
9.3.7	Deformace dílu.....	61
<b>10</b>	<b>KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY.....</b>	<b>62</b>
10.1	NÁSOBNOST FORMY .....	62
10.2	TVAROVÉ ČÁSTI .....	63
10.3	VTOKOVÝ SYSTÉM .....	64



10.4	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	66
10.5	VYHAZOVAČÍ SYSTÉM.....	68
10.6	TRANSPORTNÍ SYSTÉM .....	70
10.7	RÁM FORMY .....	71
	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>73</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>84</b>

## ÚVOD

Polymerní materiály se zpracovávají mnoha různými způsoby. Nejpoužívanější metodou zpracování polymerů je technologie vstřikování. Vstřikováním se vyrábí výrobky s vysokou pevností a dobrými povrchovými vlastnostmi v poměrně rychlém čase. Vstřikování je v oblasti zpracování polymerních materiálů vyhledáváno hlavně z důvodů vysoké efektivity a relativně nízké ceny vstřikovaných dílů.

Polymerní materiály lze nalézt v celé řadě průmyslových odvětví. Velké zastoupení nalezneme v automobilovém průmyslu, kde nahrazují kovové nebo skleněné materiály, a to hlavně z důvodu ceny a hmotnosti.

Během procesu vstřikování je využíváno značného množství techniky a nástrojů pro výrobu jednoho výstřiku, proto je nezbytné dbát na detaily a ve většině případů nejdříve daný výstřik analyzovat pomocí výpočetního programu, který určuje přibližné parametry. Tyto analýzy jsou prováděny z důvodu větší efektivity a eliminace materiálových vad, jako například nedotečených dílů apod.

Cílem diplomové práce je vytvořit návrh konstrukce formy pro výrobu vstřikovaného dílu, který je umístěn v mlhovém světle automobilu. Tato forma je optimalizována v programu Moldflow Synergy 2023 a následný návrh formy je vytvořen v 3D programu Catia V5 2019.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování je v porovnání s jinými výrobními postupy relativně nový proces. I přes tento fakt se vstřikování stalo jedním z nejvíce produktivních a nákladově nejefektivnějších způsobů velkosériové výroby plastových dílů na světě.

Jedná se o cyklický tvářecí proces, při němž dochází k rychlému plnění dutiny formy polymerní taveninou. Ve formě nastává vytvarování a chlazení dílu. Po dostatečném zchladnutí výstřiku následuje odformování. Nejčastěji se pro vstřikování používají polymery, ale existují i speciální technologie, kde lze vstřikovat i jiné typy materiálů. [1]

## 1.1 Vstřikovací cyklus

Schéma vstřikovacího cyklu je zobrazeno na *Obr. 1*. Při vstřikovacím procesu je materiál, většinou ve formě granulí, dopravován do plastikační jednotky. V plastikační jednotce dochází k jeho roztavení a rozmíchání. Po zhomogenizování taveniny následuje vstřiknutí do dutiny formy.

Začátek vstřikovacího cyklu započne po uzavření vstřikovací formy uzavírací jednotkou. Po uzavření se přisune vstřikovací jednotka, která zaplní dutinu formy zhomogenizovanou taveninou. Po naplnění formy následuje fáze dotlaku, která zabraňuje velkému smrštění dílu. Po ochlazení dojde k otevření vstřikovací formy a k vyhození výstřiku pomocí vyhazovacího systému z dutiny formy. [2]



*Obr. 1: Schéma vstřikovacího cyklu [2]*

## 1.2 Plastikace

K plastikaci dochází v plastikační jednotce. Rychlost toku je ovlivněná vlastnostmi materiálu ve fázi plastikace. Mezi tyto vlastnosti můžeme zařadit reologické chování materiálu, zpracovatelské teploty vstřikovací jednotky a smykové napětí mezi válcem a šnekem. Hlavním cílem plastikace je vznik homogenní taveniny. [3] [4]

## 1.3 Plnění

Během procesu plnění dochází k zaplnění dutiny formy stanoveným množstvím taveniny. Zásadní vliv na výslednou kvalitu výstřiku má právě tento proces, proto je zapotřebí redukovat parametry plnění. Pokud je rychlost plnění vysoká, může dojít k degradaci vstřikovaného materiálu a nebo k jevu zvanému „jetting“. V opačném případě může dojít k velkému nárůstu tlaku, který je zapříčiněn zatuhlými vrstvami taveniny. V tomto případě nemusí dojít k úplnému zaplnění dutiny formy. [3] [4]

## 1.4 Chlazení a dotlak

Po zaplnění dutiny formy následuje dotlak, chlazení a vyhození výstřiku z dutiny formy. Fáze dotlaku má za úkol dodat do formy co největší množství materiálu, tak aby se vyrovnalo smrštění, které vzniká z důvodu tuhnutí polymeru. V nejlepším případě by měla být fáze dotlaku a chlazení taková, aby vznikalo co nejmenší smrštění dílu a byly dodrženy požadované tolerance na výstřik. [3] [4]

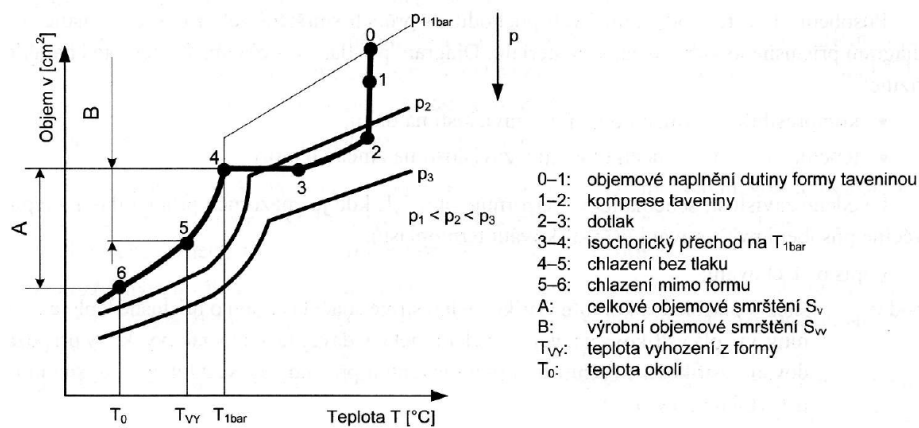
### 1.4.1 pvT diagram

Zobrazení závislosti specifického objemu na teplotě při různých tlacích se vyobrazuje pomocí pvT diagramu.

Popis pvT diagramu v několika bodech (*Obr. 2*) [3] [4]:

- Bod 0: Tavenina je tlačena pomocí šneku z plastikační jednotky do dutiny formy, je docíleno požadovaného vstřikovacího tlaku a teploty taveniny.
- Bod 0-1: Dutina formy je plněna taveninou, v bodě 1 nastává úplné naplnění dutiny.
- Bod 1-2: Dochází ke stlačení taveniny v dutině formy, při bodě 2 dosahuje vnitřní tlak maxima.
- Bod 2: Nastává přepnutí z plnicí fáze na dotlakovou fázi.

- Bod 2-3: Při dotlakové fázi probíhá chlazení taveniny, a zároveň se snižuje tlak. Nastává objemová kontrakce, která umožňuje doplnění taveniny z plastikační jednotky do dutiny formy.
- Bod 3: Dochází k zamrznutí vtokového ústí, taveninu není možné dopravit do dutiny vstřikovací formy, dotlaková fáze je neúčinná.
- Bod 3-4: Dochází k tlakovému poklesu a v bodě 4 se tlak v dutině formy dostal na hodnotu atmosférického tlaku (1 bar), nastává smrštění povrchu.
- Bod 4-5: Chlazení výstřiku za konstantního tlaku, v bodě 5 nastává vyhození výstřiku z dutiny formy.
- Bod 5-6: Nastává chlazení mimo formu, které může trvat od 16 do 48 hodin od vyhození z dutiny formy.

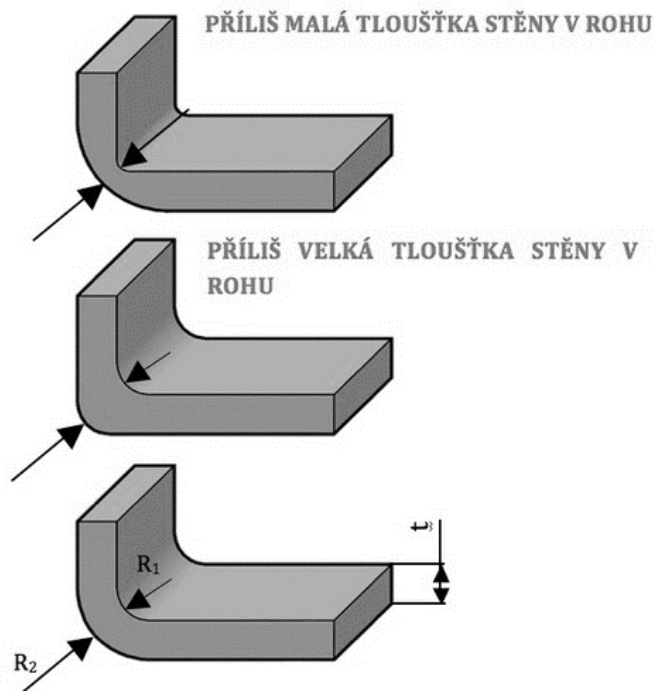
Obr. 2:  $pvT$  diagram [2]

## 1.5 Konstrukce výstřiku

Při konstrukci výrobků z termoplastů je důležité uvědomit si, že jsou jiné technologické a konstrukční zásady jako pro výrobky z kovů. Proto je nutná znalost vstřikovacích forem a odoformování výstřiku. Vstřikovací formy jsou velmi finančně nákladný nástroj. [4] [5]

### 1.5.1 Zaoblení hran

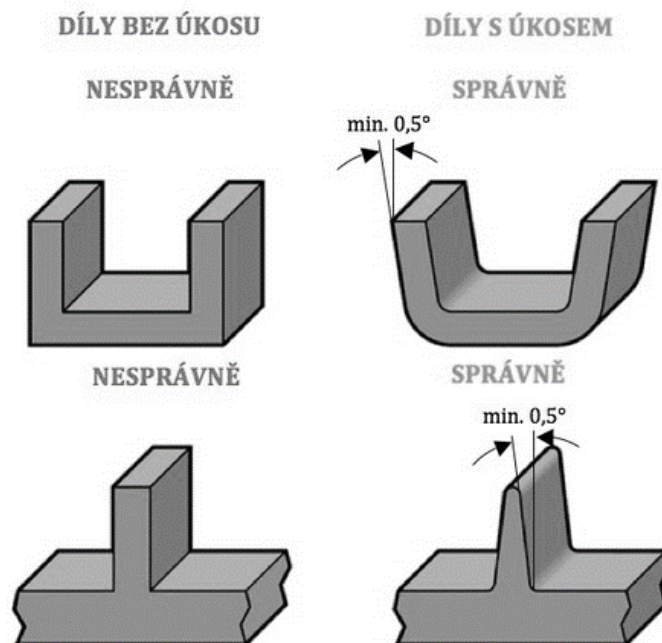
Zaoblení hran dílů (Obr. 3) se používá z důvodu snadnějšího a rovnoměrnějšího chlazení výstřiku. V rozích nedochází k rovnoměrnému chlazení z důvodu odlišných tloušťek, což často vede ke vzniku různých deformací. Dalším z důvodů zaoblení hran je snadnější výroba formy s rádiusy než bez rádiusů a není nutné použít elektrojiskrové obrábění. [6]



Obr. 3: Zaoblení hran [6]

### 1.5.2 Úkosy

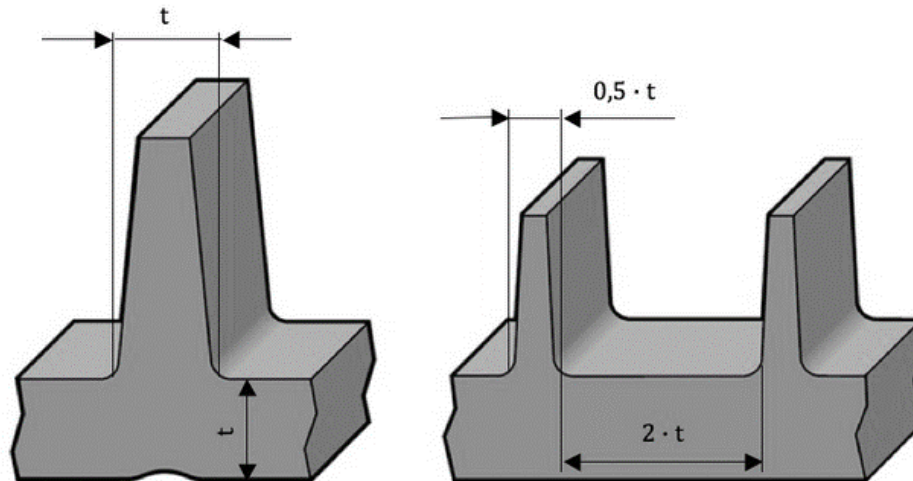
Úkosy (Obr. 4) jsou nezbytně důležité při návrhu vstřikovaných dílů z důvodu snadného vyhození. Úkosy se dělí na vnější a vnitřní. Větší úkos se používá pro díly, které mají velkou hloubku otvorů anebo žeber. [6]



Obr. 4: Volba úkosů [6]

### 1.5.3 Výztuž žebry

Díky žebřům (*Obr. 5*) lze ušetřit množství materiálu a docílit požadované tuhosti a pevnosti výrobku. Při použití žeber se většinou sníží fáze dotlaku a chlazení. [6] [7]



*Obr. 5: Volba žeber [6]*

### 1.5.4 Tloušťka stěn

Při vstřikování malé tloušťky stěny může dojít k problémům se špatným tokem taveniny nebo nárustem tlaku v dutině formy. Pokud je stěna naopak příliš tlustá, mohou se objevovat propadliny, deformace anebo lunkry. [6]

## 1.6 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj (*Obr. 6*) je primárně určen ke zpracování polymerních materiálů, které jsou nejčastěji dodávány ve formě granulí. Polymery lze zpracovávat také v jiné podobě, např. ve formě prášku či kapaliny.

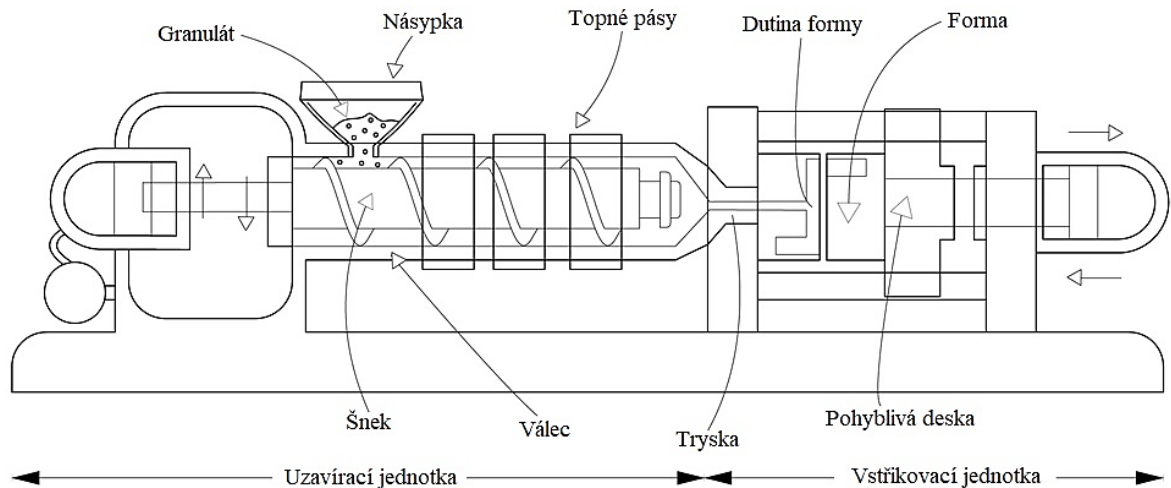
Vstřikovací stroje jsou plně automatické, z čehož vyplývá vysoká produktivita práce. Mezi nevýhody patří vysoká pořizovací cena strojního zařízení a vstřikovací formy, proto je technologie vstřikování vhodná spíše pro velkosériovou výrobu. [8] [9]

Vstřikovací stroje lze rozdělit podle následujících kritérií [8]:

- dle pohonu – hydraulické, elektrické, hybridní;
- dle směru posuvu pohyblivé desky – horizontální, vertikální, kombinované;
- dle počtu šneků – jednošnekové, vícešnekové;
- dle pracovního členu v tavicí komoře vstřikovací jednotky – šnekové, pístové;



- dle typu vstřikovaného polymeru – termoplastické, reaktoplastické, elastomerní.



Obr. 6: Schéma vstřikovacího stroje [10]

### 1.6.1 Vstřikovací jednotka

Úkolem vstřikovací jednotky je převod polymerního granulátu do plastického stavu a doprava taveniny do dutiny formy, za působení vysoké rychlosti a tlaku. Mezi hlavní části vstřikovací jednotky se řadí tavicí komora, šnek, tryska a topné pásy.

Důležitým parametrem vstřikovací jednotky je vstřikovací kapacita, udávaná v  $\text{cm}^3$ , která popisuje maximální objem polymerní taveniny, kterou je schopný vstřikovací stroj vstříknout do dutiny formy v jednom cyklu. Dalším důležitým kritériem je kapacita plastikační jednotky, která udává maximální hmotnost polymeru, kterou je jednotka schopná zplastikovat za jednotku času.

V dnešní době jsou nejpoužívanější šnekové vstřikovací jednotky, které již plně nahrazují dřívější pístové jednotky. Rozdíl mezi oběma typy je v konstrukci tavicí komory. Pohyb polymerního materiálu je zajišťován u pístových strojů pomocí pístu, u strojů šnekových pomocí šneku.

Vstřikovací šneková jednotka pracuje následovně: během plastikace šnek rotuje a z násypky odebírá polymer ve formě granulí. Granulát je stlačován a dopravován do tavicí komory, kde je převáděn v důsledku topných pásů a tření do taveniny, která se hromadí před čelem šneku. V důsledku rotace je šnek posouván dozadu a je před ním vytvářen prostor pro vznikající

taveninu. Po zplastikování potřebného množství taveniny se otáčivý pohyb šneku zastaví a posuvem vpřed je tavenina vstříknuta přes trysku do dutiny formy.

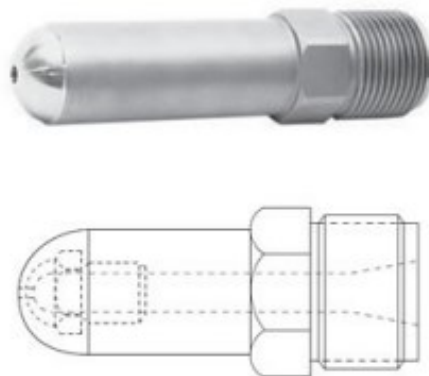
Mezi hlavní výhody šnekových vstřikovacích jednotek patří:

- dobrá plastikace a homogenizace taveniny polymeru,
- zamezení přehřívání taveniny v tavicí komoře,
- jednodušší čištění při výměně materiálu,
- přesné dávkování hmoty,
- nízké ztráty tlaku při pohybu taveniny.

Úkolem šneku je dávkování, doprava, plastikace, hnětení a vstříknutí do formy. Jeho konstrukce je tedy přizpůsobena těmto činnostem. Rozlišují se na něm tři funkční pásma – vstupní, přechodové (kompresní) a výstupní. [4] [8] [9]

### 1.6.2 Vstřikovací tryska

Vstřikovací tryska (*Obr. 7*) zajišťuje spojení mezi vstřikovací jednotkou a vstřikovací formou. Vstřikovací tryska obstarává přesné dosednutí vstřikovací jednotky na vtokovou vložku vstřikovací formy. Špička vstřikovací trysky musí mít menší rádius, než je rádius na dosedací ploše vtokové vložky. Na rozhraní mezi tryskou a vtokovou vložkou nedochází k úniku polymerní taveniny z důvodu přítlačné síly, která vzniká v důsledku posuvu vstřikovací jednotky. [8] [11]



*Obr. 7: Vstřikovací tryska [11]*

Požadavky na vstřikovací trysku [8]:

- zajištění plynulého toku taveniny bez velkých tlakových ztrát;

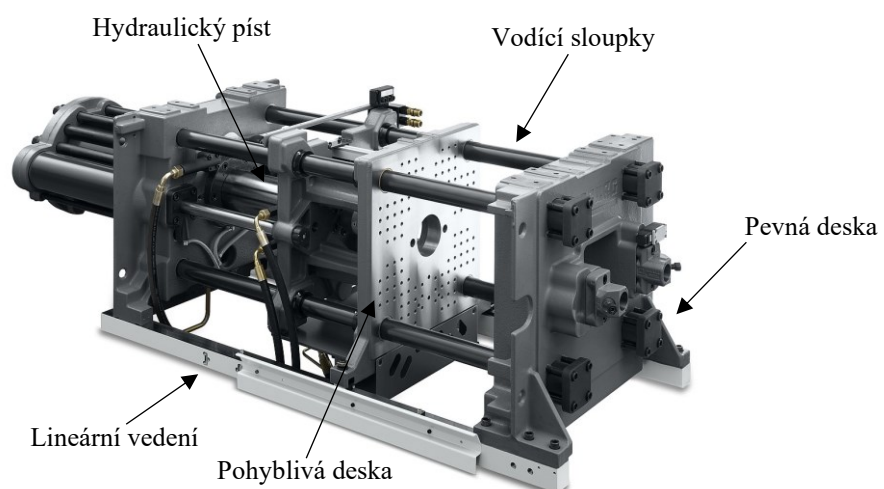
- minimální délka trysky s ohledem na její pevnost;
- zajištění kontroly a regulace teploty samostatnou topnou zónou (zamezení chladnutí taveniny);
- přítomnost filtru (zabránění průniku nečistot do vstřikovací formy).

Trysky lze rozdělit na otevřené a uzavřené. Otevřené trysky by měly být využívány vždy, kdy to proces povoluje, a to z důvodu jednodušší konstrukce. Uzavřené trysky jsou tvořeny uzavíratelnou konstrukcí, která zabraňuje vytékání taveniny.

### 1.6.3 Uzavírací jednotka

Úkolem uzavírací jednotky je zavírání a otevírání formy během procesu vstřikování. Je nezbytné, aby se forma při vstříknutí taveniny v důsledku velkého tlaku neotevřela. Důležitým parametrem uzavírací jednotky je maximální uzavírací síla, která se stará o udržení tlaku ve formě během vstřikování. Pokud je tato síla nedostatečná, mohou vznikat přetoky na vstřikovaném díle či může docházet k tlakové ztrátě, která má za následek nedotečení taveniny do všech částí dutiny formy. V případě příliš velké uzavírací síly může dojít k poškození formy nebo jejích součástí. [3] [9] [12]

Uzavírací jednotka (*Obr. 8*) se skládá z vodících sloupků, opěrné desky, která je stacionární, dále z pohyblivé desky, z lineárního vedení pro pohyblivou desku a z uzavíracího a přidržovacího mechanismu. Uzavírací jednotky se dle pohonu, který zajišťuje posuv pohyblivé desky, dělí na elektrické (zdroj pohybu je elektromotor) a hydraulické (zdroj pohybu je hydraulický píst). [8] [9] [13]



*Obr. 8: Uzavírací jednotka [13]*

## 2 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery jsou látky tvořené extrémně velkými molekulami – makromolekulami. Makromolekuly vznikají spojováním velkého počtu opakujících se částí, merů. Makromolekuly se dělí podle řetězce na lineární, rozvětvené a zesíťované. Vlastnosti polymerů jsou tvarem řetězců výrazně ovlivněny (Tab. 1). Délka řetězce se vyjadřuje pomocí molární hmotnosti. [14] [15]

Tab. 1: Vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru řetězce [16]

LINEÁRNÍ	ROZVĚTVENÉ	ZESÍŤOVANÉ
vyšší hustota materiálu	nižší hustota materiálu	S vyšší hustotou sítě se materiál vyznačuje:
vyšší pevnost	nižší pevnost	
vyšší modul pružnosti	nižší modul pružnosti	
nižší tažnost	vyšší tažnost	vysokou pevností
vyšší teplotní odolnost	nižší teplotní odolnost	vysokým modulem pružnosti
dobrá tekutost taveniny	nižší tekutost taveniny	vysokou teplotní odolností
snadná krystalizace	nižší schopnost krystalizace	velmi nízkou tažností

Polymery vznikají díky chemické reakci, která se nazývá polymerace. Jedná se o mnohonásobné spojení merů a vytvoření dlouhých řetězců.

Polymerační reakce se dělí podle reakčního mechanismu na:

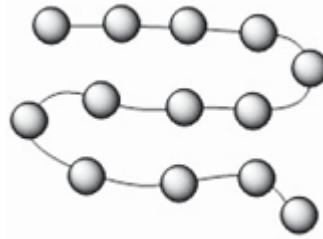
- stupňovité – reakce funkčních skupin (polykondenzace, polyadice),
- řetězové – šíření aktivního centra ve směru řetězce (radikálové, iontové).

Růst řetězce u stupňovité polymerační reakce lze kdykoliv přerušit a následně ho znova obnovit, u řetězové reakce nikoliv.

### 2.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymerní materiály tvořené lineárními či rozvětvenými řetězci (Obr. 9). Vlivem zvýšené teploty přecházejí do plastického stavu, ve kterém jsou snadno tvářitelné a lze je zpracovávat různými technologiemi. Do oblasti taveniny přechází při zahřátí nad teplotu tání, naopak do pevného stavu přechází ochlazením pod teplotu tání. Proces tání a tuhnutí lze neomezeně opakovat, protože během zahřívání a chlazení nedochází v materiálu k žádné chemické reakci a nemění se ani jeho chemická struktura. [9] [16] [17]

Termoplasty se dělí dle nadmolekulární struktury na amorfní a semikrystalické.

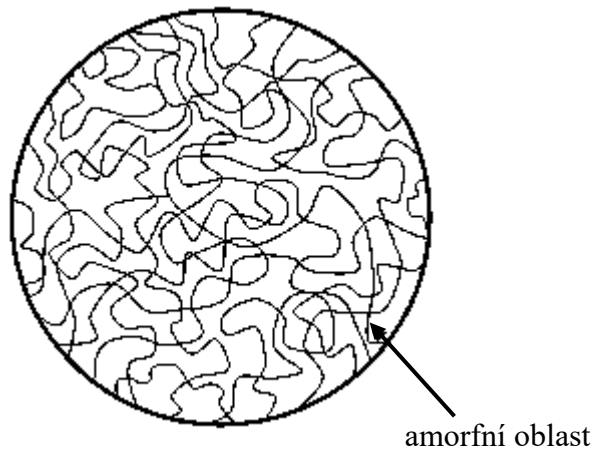


Obr. 9: Makromolekulární struktura termoplastů [18]

### 2.1.1 Amorfní

Amorfní struktura (Obr. 10) nevykazuje jakoukoliv uspořádanost. Makromolekuly zauímají naprosto nahodilou pozici. Základním morfologickým útvarem jsou klubíčka (globuly), která jsou náhodně propletena.

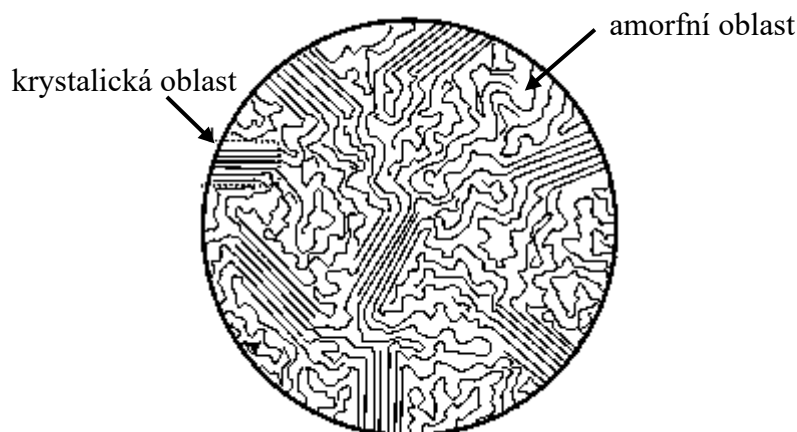
Amorfní polymery se vyznačují tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, vysokým modulem pružnosti a bývají čiré až průhledné v důsledku nízkého indexu lomu. Patří zde např. polystyren, polymethylmetakrylát nebo polykarbonát. [9] [16] [19]



Obr. 10: Nadmolekulární struktura – amorfní polymery [16]

### 2.1.2 Semikrystalické

Semikrystalické polymery vykazují částečně uspořádanou krystalickou strukturu. Uspořádané makromolekuly (krystality) jsou obklopeny makromolekulami v neuspořádaném amorfním stavu (Obr. 11). [16]



Obr. 11: Nadmolekulární struktura – semikrystalické polymery [16]

Proces, při kterém se makromolekuly skládají do uspořádaných útvarů, se nazývá krystalizace, a ta probíhá ve fázi chlazení taveniny. Při krystalizaci se makromolekuly seskupují do destičkových útvarů (lamel) a vytváří kulovité útvary (sférolity). Teplota krystalizace se nachází mezi teplotou tání a teplotou skelného přechodu daného polymeru. Relativní podíl uspořádaných oblastí mezi oblastmi amorfními (neuspořádanými) se označuje jako stupeň krystalinity. Krystalické (uspořádané) oblasti narůstají na zárodcích, které v materiálu vznikají buď samovolně během ochlazení pod teplotu tání (homogenní zárodky) nebo na částicích, které se do polymeru dostaly při zpracování, např. pigmenty nebo plniva (heterogenní zárodky).

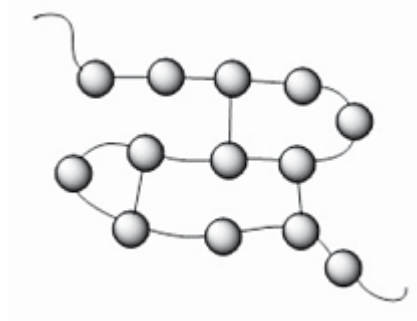
Proces krystalizace i výsledná krystalická struktura závisí jak na struktuře polymeru, tak na podmínkách krystalizace. Čím pravidelnější je struktura polymeru, tím vyšší je pravděpodobnost krystalizace.

Typickými semikrystalickými polymery jsou polyolefiny (polyetylen, polypropylen), polyamid, nebo polyoxymetylen. Semikrystalické polymery jsou mléčně zakalené a houževnaté. Pevnost a modul pružnosti se zvyšuje s rostoucím stupněm krystalinity. [4] [14] [16] [20]

## 2.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou amorfní polymerní materiály, které lze tvářet jen určitou dobu po zahřátí. Vlivem dalšího zahřívání nebo pomocí chemických látek (katalyzátorů) dochází k chemické přeměně a polymerní řetězce vytvářejí síť (Obr. 12). Takový proces se nazývá vytvrzování. Sesíťované makromolekuly se stávají netavitelnými a nerozpustnými, jedná se o nevratnou reakci. Při dalším zahřívání dochází k degradaci materiálu.

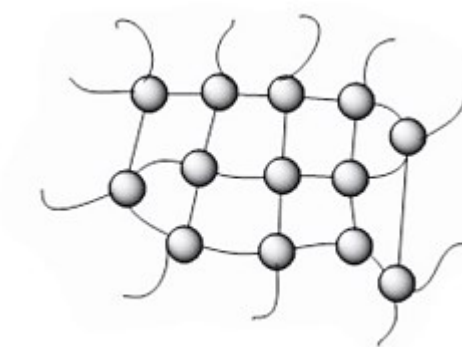
Reaktoplasty jsou charakteristické vysokou chemickou a tepelnou odolností, jsou tvrdé a tuhé. Tuhost výrobku je dána hustotou sítě. [16] [9] [18]



Obr. 12: Makromolekulární struktura reaktoplastů [18]

### 2.3 Elastomery

Elastomery jsou vysoce pružné materiály, které lze již malou silou značně deformovat bez sebemenší destrukce. Charakteristickým představitelem elastomerů je kaučuk, nezesíťovaný polymer, který chemickou reakcí přechází na materiál s vysokou elasticitou a značnou odolností vůči plastické deformaci. Chemická reakce se nazývá síťování nebo vulkanizace a probíhá nejčastěji při zvýšené teplotě a v přítomnosti vulkanizačních činidel (síra, peroxidy, oxidy kovů). Během vulkanizace dochází ke vzniku příčných vazeb mezi makromolekulami a vzniká prostorová síť (Obr. 13). Zesíťovaný kaučuk se nazývá pryž. [16] [18]



Obr. 13: Makromolekulární struktura elastomerů [18]

### 3 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je rozsáhlý systém, který se skládá z mnoha dílů (*Obr. 14*). Musí splňovat určité požadavky, které mají vliv na proces vstřikování.

Hlavními požadavky vstřikovací formy jsou:

- zajištění přívodu taveniny do dutiny formy a vytvarování vstřikovaného výrobku do potřebného tvaru;
- zajištění odvodu tepla, které je do formy přinášeno vstřikovaným polymerem;
- zajištění vyhození výstřiku efektivním a bezpečným způsobem.

Vstřikovací forma musí dále splňovat mimo jiné i další požadavky jako např. maximální tuhost a pevnost jednotlivých součástí, odolnost vůči vysokým tlakům, vysokou míru přesností a jakosti.

Při návrhu vstřikovací formy se vychází z několika kritérií – z tvaru výrobku, typu stroje, materiálu, násobnosti formy a celkového počtu vyrobených kusů.

Rozdělení vstřikovacích forem [12] [21] [22] [23]:

- podle násobnosti formy;
- podle konstrukce na etážové, deskové, vytáček, čelistové apod.;
- podle místa vstřikování na vstřikování kolmo na dělicí rovinu nebo vstřikování do dělicí roviny.

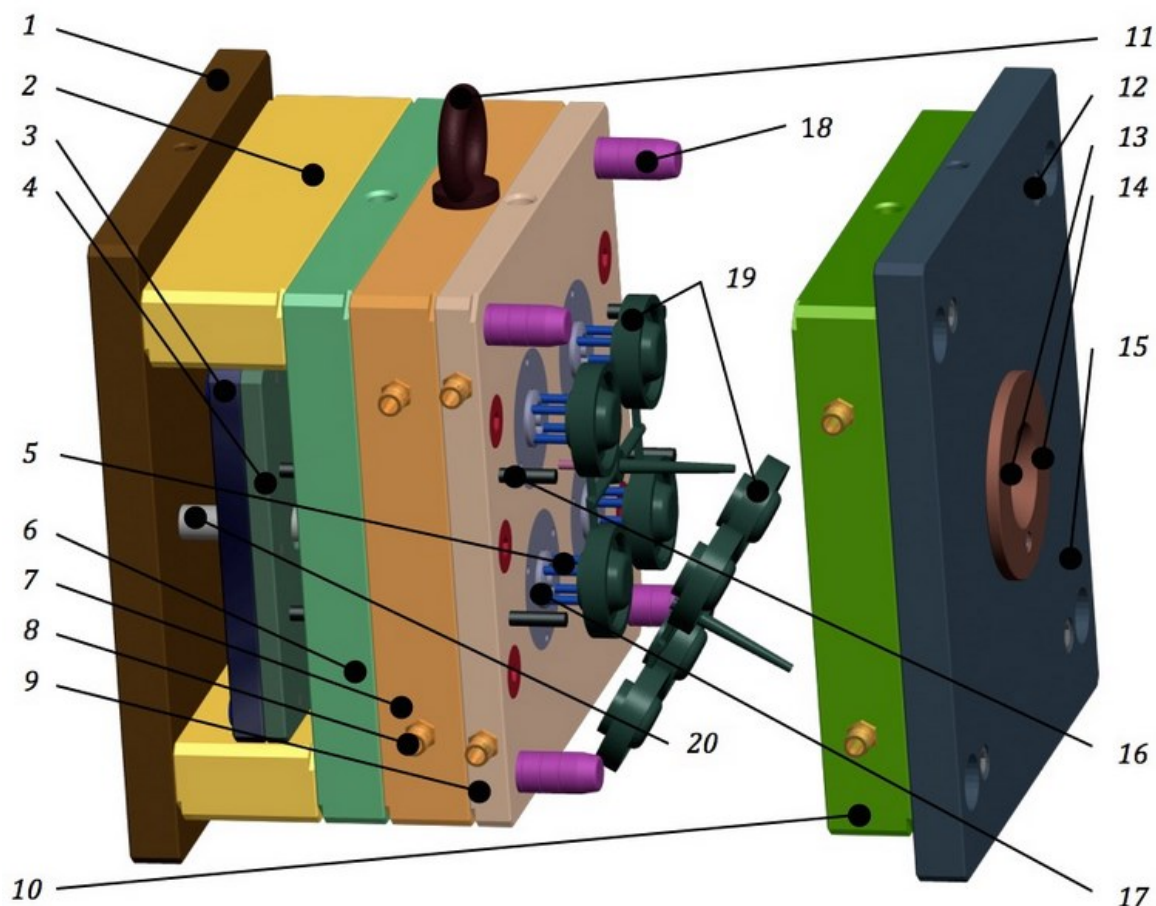
Forma je tvořena dvěma základními částmi, pohyblivou a pevnou. Mezi těmito částmi se nachází dělicí rovina. Pevná část formy je propojena se vstřikovacím strojem a při cyklu se nepohybuje. Hlavním úkolem nepohyblivé části je doprava taveniny do dělicí roviny vstřikovací formy. Pohyblivá část se pohybuje směrem ke stroji při každém cyklu a zajišťuje plynulé vyhození výstřiku.

Vstřikovací forma se skládá z velkého množství komponent. Kvůli úspoře peněz jsou tyto komponenty z velké části normálně od dodavatelů (Hasco, Meusburger a další). Nejčastěji dochází k nákupu desek, rámců, vyhazovačů, vodících prvků, vtokových vložek a součástek chlazení.

Nejčastěji se vyrábí tvarové vložky nebo jiné tvarové prvky, jako například vyhazovače, a čelisti.



Při výrobě formy se používají technologie konvekční i nekonvekční. Ve vstřikovací formě se vyrobí mnohdy až miliony kusů dílů, proto jsou její tvarové části kaleny na tvrdost 57 HRC. [6] [24]



Obr. 14: Schéma vstřikovací formy

1 – upínací deska pohyblivé části vstřikovací formy, 2 – rozpěra, 3 – hlavní vyhazovací deska, 4 – přídržovací vyhazovací deska, 5 – vyhazovač, 6 – podpěrná deska, 7 – „B“ deska, 8 – přípojka chlazení, 9 – „C“ deska, 10 – „A“ deska, 11 – manipulační oko, 12 – hlavní montážní šrouby, 13 – vtoková vložka, 14 – středící kroužek pevné části vstřikovací formy, 15 – upínací deska pevné části vstřikovací formy [6]

### 3.1 Vtokový systém

Vtokový systém propojuje trysku stroje s dutinou formy a slouží k dopravě taveniny. Vtokový systém musí splňovat tato kritéria:

- rovnovážné naplnění dutiny formy,
- snadné odformování od výstřiku,

- snadné vyhození vtokového zbytku.

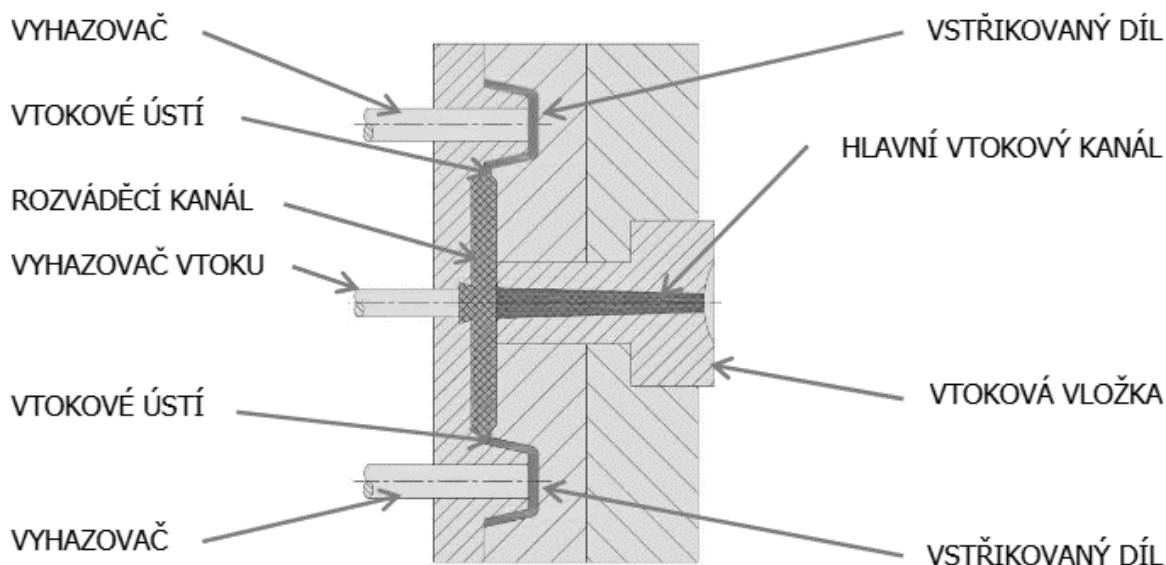
Při vstřikování má zásadní vliv na deformaci a tvar výstřiku umístění vtokového systému, popřípadě typ zvoleného vtoku, protože poloha vtoku určuje orientaci plniva a makromolekul a ovlivňuje výskyt studených spojů. Vtokové ústí vtokového systému se nejčastěji umisťuje do nejširších míst výstřiku.

Vtokové systémy lze rozdělit do dvou skupin, a to na studené a horké vtokové systémy. Často dochází ke kombinaci těchto dvou systémů, přičemž horká vtoková tryska vede do studeného vtokového kanálu. [12] [25]

### 3.1.1 Studený vtokový systém

U studeného vtokového systému se tavenina dostává do nevyhříváné vtokové vložky a rozváděcích kanálků, ve kterých dochází k okamžitému tuhnutí taveniny. Značnou nevýhodou studených vtokových systémů je zbytkový materiál, který vzniká při vstřikování. Během chlazení dochází k jeho zatuhnutí a po otevření formy je společně vyhozen s vyrobeným výstřikem. Tento zbytek lze za určitých podmínek rozdrtit a přimíchat do granulátu (recyklát). Výhodou studeného vtokového systému je nízká cena a lehká výroba oproti horkým vtokům. Studený vtokový systém se skládá z vtokového kužele, rozváděcího kanálku, vtokového ústí a přídržovače vtoku (*Obr. 15*).

Rozvodné kanály musí být správně naddimenzovány, což se týče velikosti průřezu kanálu. Ideální kanál má kruhový průřez, který se nachází mezi dělicí rovinou. Takový typ kanálu je velice těžce vyrobitelný, proto se nejvíce používají nekruhové kanály, které jsou zasazeny pouze do jedné dělicí roviny. [21] [23]



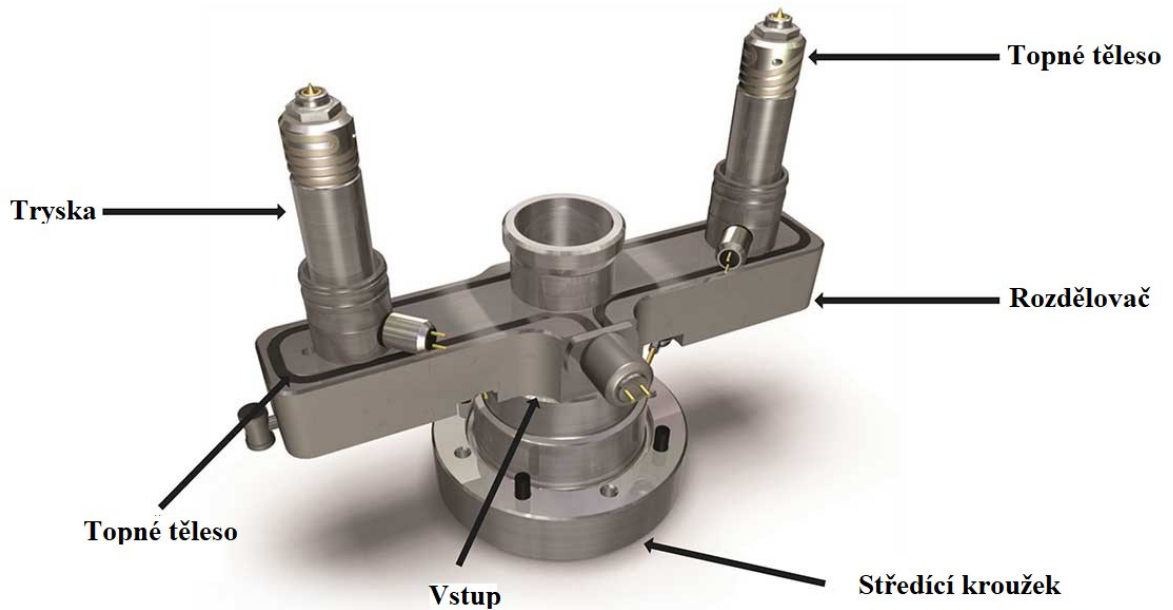
Obr. 15: Řez studeným vtokovým systémem [26]

Dále se studené vtokové systémy rozdělují na několik typů:

- tunelové,
- filmové,
- kuželové,
- banánové,
- talířové,
- deštníkové.

### 3.1.2 Horký vtokový systém

U horkého vtokového systému (Obr. 16) se tavenina dostává do vyhřívané vtokové trysky, což zaručuje lepší regulaci teploty taveniny. Při použití horkého vtokového systému je zabráněno vysokým přebytkům v podobě zbytkového materiálu. Mezi další výhody se řadí vyšší teplota celého vtokového systému, což má za následek pomalejší tuhnutí taveniny a zamezení vzniku nedotečených dílů. Mezi nevýhody toho systému patří vysoké náklady na nákup celého zařízení a délka vtokové dráhy společně s vysokou smykovou rychlostí. [2] [3] [27]



Obr. 16: Schéma horkého vtokového systému [28]

#### *Vyhřívání trysky*

Vyhřívání trysky, které jsou ohřívány pomocí elektrické kabeláže, se dělí na trysky s vnějším a vnitřním ohřevem. U trysek s vnějším ohřevem dochází k úbytku tlaku. U trysek s vnitřním ohřevem teče tavenina kolem zahřívacího tělesa. Do středové osy je vložena topná patrona, proto se lépe reguluje teplota taveniny. Horké vtokové systémy se obecně nedoporučují při vstřikování průhledných dílů s vysokými optickými nároky. Napětí, pomocí kterého se ohřívají vyhřívání trysky, je 5 V, 24 V a 230 V.

#### *Rozvodné bloky*

Tavenina ve více násobných formách je rozvedená prostřednictvím rozvodových bloků. Rozvržení a tvar bloků závisí na tvaru a velikosti vstřikovaného dílu. O vyhřívání rozvodných bloků se starají elektrické odporové vodiče, které jsou umístěné na povrchu bloku. Z důvodu tepelných ztrát se tepelné vodiče zakrývají plechy nebo kryty topení. Tyto kryty jsou vyrobeny z vodivých materiálů, jako například měď a mosaz.

Rozdělení typu provedení rozvodných bloků [29] [30]:

- přímé,
- kruhové,
- tvary typu H, T, X, Y a speciální tvary.

### 3.2 Temperační systém

Nedílnou součástí vstřikovací formy je temperační systém, který ovlivňuje kvalitu vyrobeného dílu, smrštění a deformaci.

Temperační systém má hned několik úkolů. Nejdůležitějším z nich je ochlazení formy v krátkém časovém intervalu. Aby došlo k samotnému procesu vstřikování, je zapotřebí dutinu formy dostat na vstřikovací teplotu. Dále je nutné zmínit, že temperační systém musí zajistit rovnoměrné teplotní pole v dutině formy. V *Tab. 2* jsou zobrazeny teploty jednotlivých typů polymerů během procesu vstřikování.

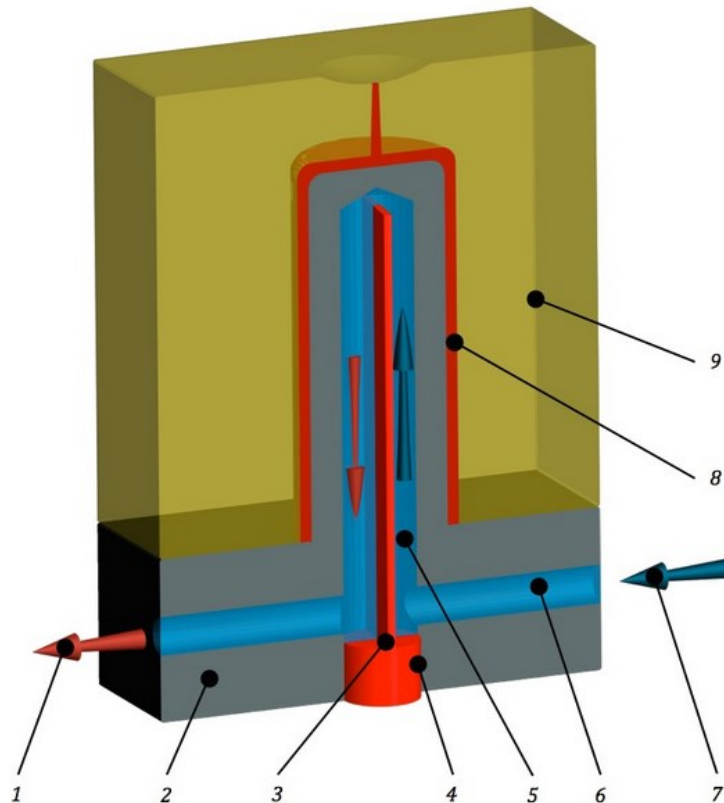
V kanálech proudí chladící médium, které zajišťuje odvod tepla ze vstřikovací formy. Ve většině případů se jedná o olej nebo vodu. Je pravidlem, že vyšší počet kanálů o menším průřezu je efektivnější než menší počet kanálů o větším průřezu. Průměr vrtaných kanálů závisí na druhu zpracovávaného polymeru, nejčastěji se však pohybuje mezi 6 a 20 mm. Jak již bylo zmíněno, je zapotřebí zajistit rovnoměrné teplotní pole, rozdíl teplot temperačního média na vstupu a výstupu by se měl pohybovat v rozmezí od 3 do 5 °C. K vymezení temperačního okruhu slouží záslepky, o-koužky a uzavírací šrouby. Pro připojení temperačního systému formy s temperační jednotkou slouží hadice, které jsou opatřené rychlospojkami. [12] [31]

*Tab. 2: Teploty jednotlivých typů polymeru během procesu vstřikování [12]*

Typ materiálu	Doporučená teplota formy [°C]	Teplota taveniny [°C]	Doporučená teplota dílu při odformování [°C]
PA	80-120	260-300	110-130
PC	80-120	280-320	140
ABS	60-80	220-260	80-100
SAN	50-80	230-260	80-95
PBT	80-100	250-270	140
PP	30-60	200-250	70-90
PE	30-60	180-230	60-90

Při výrobě tvarově složitých dílů lze použít k temperaci tvarových desek přepážky (*Obr. 17*), spirály anebo fontány. Tyto díly jsou většinou kupovány z normálí a umožňují vedení temperačního média kolmo k temperačním kanálům. Spojení s formou je ve většině případů zrealizováno skrz závit s vložkou.

Velkou výhodou je výroba kovových částí formy pomocí laserového sintrování. Pomocí této metody lze vyrobit jakýkoliv tvar chladicího systému bez použití přepážek nebo jiných normálií. [6] [31] [32]



Obr. 17: Schéma plochých přepážek

1 – výstup temperačního média, 2 – těleso pohyblivé části vstřikovací formy, 3 – plochá přepážka, 4 – úložná plocha přímé přepážky, 5 – vedlejší temperační kanál, 6 – hlavní temperační kanál, 7 – vstup temperačního média, 8 – vstříkovaný díl, 9 – těleso pevné části vstřikovací formy [6]

### 3.3 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém vstřikovací formy má za úkol odformovat vstříkovaný díl při otevření formy. Při použití studeného vtokového systému vyhazovací systém odformuje i vtokový zbytek. Existují ale i případy, kdy se o vyjmutí výstřiku stará operátor stroje nebo např. robot. Při vyhazování dochází ke dvěma pohybům, jeden pohyb je dopředný – ten zajišťuje vyhození výrobku a druhý je zpětný – při tomto pohybu se vrací vyhazovací systém zpět. Pro lepší vyhození dochází u stěn výrobků k úkosům ve směru vyhození a povrch dutiny formy je broušen a leštěn.

Vyhazování se dělí na tři typy: mechanické, pneumatické a hydraulické. Dále lze vyhazování rozdělit podle konstrukce, a to na vyhazování pomocí kolíku, stíracích desek a trubkových vyhazovačů. [2] [12]

### 3.3.1 Mechanické vyhazování

Mechanické vyhazování výstřiku je nejpoužívanější a řadí se do něj tyto vyhazovací prvky: vyhazovače, šikmé vyhazovače, trubkové vyhazovače a stírací desky. Vyhazování pomocí vyhazovačů je nelevnější varianta a často se používá. Aby nedocházelo k deformacím, nesmí se vyhazovače opírat o stěnu nebo o žebro výstřiku, a zároveň se vyhazovače umísťují na nepohledovou část výrobku. Nejčastější provedení vyhazovačů je ve válcovitém tvaru.

Pokud je nutné eliminovat stopy po vyhazování, lze provést vyhození pomocí stírací desky, která vyhazuje výstřík velkou styčnou plochou. Tento způsob vyhození je vhodný u tenkostěnných anebo rozměrných dílů. [2]

### 3.3.2 Pneumatické vyhazování

Při pneumatickém vyhazování dochází k přívodu stlačeného vzduchu mezi výstřík a líc formy. Dopravu vzduchu do formy zajišťuje talířový nebo jehlový ventil. Toto odformování výstřiku je rovnoměrné a nezanechává stopy po vyhazovačích, proto je vhodný pro tenkostěnné výrobky. [23]

### 3.3.3 Hydraulické vyhazování

U hydraulického vyhazování jde především o přenos hydraulické síly na mechanické vyhazovače. Hydraulický systém je vyráběn zvlášť a montuje se do předem připravených míst ve vstřikovací formě. Nejčastěji se tímto systémem ovládají posuvné čelisti a stírací desky. Výhodou hydraulického vyhazování je vysoká vyhazovací síla a plynulejší ovládání. [23] [27]

## 3.4 Odvzdušnění formy

Odvzdušení formy je obvykle vedlejším aspektem konstrukce formy a často se zanedbává. Primární funkcí odvzdušňovacího otvoru je uvolňovat vzduch z formy, který je vytlačován taveninou polymeru. Pokud není veškerý vzduch odstraněn z dutiny formy během fáze plnění, může dojít k několika vadám:

- Zachycený vzduch může v dutině formy vytvořit kapsu pod vysokým tlakem, přes kterou nemůže tavenina protékat.
- Vysoce stlačený plyn o vysoké teplotě může shořet v tavenině polymeru, což způsobí jev známý jako „diesel efekt“.

Prvním typem odvzdušnění je odvzdušnění na dělicí rovině. Při tomto typu odvzdušnění dochází k umístění odvzdušňovacích ploch do dělicí roviny. Odvzdušnění ovlivňuje několik faktorů:

- Pro polymer s nízkou viskozitou je potřeba menší šířka odvzdušňovacích kanálků.
- Účinnost odvzdušnění lze zvýšit rozšířením kanálků či jejich přidáním.
- Větší účinnosti odvzdušnění nelze dosáhnout zvětšením šířky odvzdušňovacích kanálků; každý typ polymeru má maximální hodnotu šířky odvzdušňovacího kanálku (Tab. 3).

Tab. 3: Doporučené šířky odvzdušňovacích kanálů dle typu použitého polymeru [6]

TYP POLYMERU	ŠÍŘKA ODVZDUŠŇOVACÍHO KANÁLU [mm]
PC, POM	max. 0,05
PS, ABS	max. 0,05
PA	0,02-0,03
PBT	max. 0,03
PA (se skelným vláknem)	0,05
strukturní pěny	max. 0,1

Další možností odvzdušnění je odvzdušnění pomocí vyhazovačů. Mezi vyhazovačem a otvorem je vůle, pomocí které může dojít k odvodu vzduchu. [6] [25]



## 4 VADY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ

Při vstřikování se mohou na vstřikovaných dílech objevovat různé vady, proto je nutné tyto vady najít, následně určit příčinu jejich vzniku a odstranit je. Vady při vstřikování mohou být zapříčiněné několika faktory:

- vstřikovaným materiálem,
- v konstrukci výrobku nebo nástroje,
- v nastavení technologických podmínek.

Vady, které mohou vzniknout při vstřikování, řadíme do dvou skupin:

- vady zjevné (např. propadliny, deformace, přetoky, stříbrné pruhy apod.),
- vady skryté (např. studené spoje, vakuové bubliny apod.) [2] [4] [27]

### 4.1 Studené spoje (Weld lines)

Ke studeným spojům (*Obr. 18*) dochází v místě spojení dvou anebo více proudů taveniny. K rozdělení proudu taveniny dochází většinou při obtékání překážky nebo při plnění formy více vtoky. Při změně daných parametrů lze studené spoje eliminovat, a to např. jiným umístěním vtoku, zvýšením teploty formy a taveniny nebo zvýšením vstřikovací rychlosti. Další aspektem studeného spoje může být špatná homogenita vstřikovaného materiálu. [27] [33]



*Obr. 18: Studené spoje [27]*

## 4.2 Diesel efekt

Diesel efekt, tzv. spálená místa, vzniká při stlačování plynu nebo vzduchu v dutině vstřikovací formy. Tento vzduch nebo plyn nemá kudy odejít, a v důsledku toho dojde k náhlému nárůstu teploty a tlaku a následně vznikne spálené místo na výstřiku. Diesel efekt lze zkontrolovat vizuální kontrolou, kdy v místě vznikne černá skvrna. Nejčastěji za tuto vadu může špatné odvzdušnění formy, ale vliv může mít i vysoká teplota taveniny a formy nebo vysoká vstřikovací rychlost. [27]



*Obr. 19: Diesel efekt [34]*

## 4.3 Přetoky (Flashes)

Přetoky (*Obr. 20*) vznikají přetečením taveniny do špatně slícovaných nebo utěsněných míst v dutině formy. K přetokům může docházet v místech, kde se nachází vyhazovače, čelisti anebo dělicí roviny. Přetoky vznikají v důsledku nedostatečné uzavírací síly stroje, znečištěním nebo opotřebáváním dělicích rovin, z důvodu velkého průměru odvzdušňovacích kanálů, kvůli vysokému vstřikovacímu tlaku, vysoké teplotě formy či vysoké tekutosti taveniny. [27]



*Obr. 20: Přetoky [27]*

#### **4.4 Nedotečené díly (Short shot)**

Nedotečený výstřik (*Obr. 21*) vzniká při neúplném zaplnění dutiny formy taveninou. Tento nezaplněný prostor se nachází nejčastěji na místech, které jsou nejvíce vzdálené od vtokového ústí nebo v místech, kde je malá tloušťka stěn. Příčinou vzniku této vady může být nízká tekutost taveniny, malá dávka taveniny, nízká teplota taveniny a formy, nízký dotlak, malá rychlost vstřikování, špatné odvzdušnění a špatně navrhnuté vtokové ústí. [27]

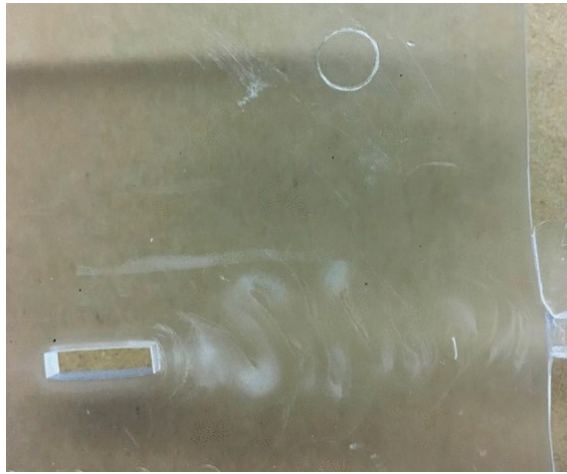


*Obr. 21: Nedotečený díl [27]*

#### **4.5 Tryskový tok (Jetting)**

Tryskový tok je způsoben nepatřičným umístěním polohy vtokového ústí. Čelo taveniny vstupuje do dutiny formy vysokou rychlostí. Nárazem do stěny dutiny formy se ochladí a začne se skládat – dochází ke vzniku několikanásobných studených spojů. Takto ochlazená tavenina se již není schopna spojit se zbytkem taveniny, která do dutiny přichází. Vznikají viditelné švy, které snižují kvalitu výstřiku. Vada je způsobena vysokou rychlostí

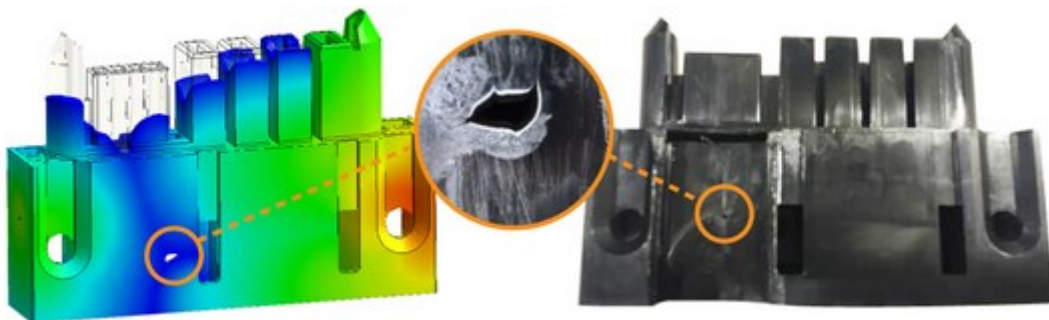
vstříkování, dlouhým vtokem, špatným umístěním vtoku, nízkou teplotu formy nebo taveniny. [27]



Obr. 22: Jetting [27]

#### 4.6 Vzduchové kapsy (Air traps)

Vzduchová kapsa vzniká během vstřikovacího procesu v důsledku setkání dvou nebo více proudů taveniny, které před sebou tlačí vzduch/plyn, který nemá kudy z dutiny formy odejít. Vzduch/plyn v dutině formy zchladne a vytvoří tzv. vzduchovou kapsu. Pokud je výrobek tvořen transparentním polymerem, tak jsou tyto kapsy i viditelné. Většinou jsou způsobeny malou dotlakovou fází, špatně vysušeným polymerem, vysokou teplotou taveniny nebo špatným odvzdušněním. [27]



Obr. 23: Vzduchové kapsy [35]

## 5 ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ

Analýza vstřikovacího procesu se provádí přes simulační softwary. Softwary se využívají pro detekci a opravu problémů ještě před samotnou výrobou. Pomáhají nastavit vhodné technologické podmínky pro vstřikovací proces. Celá simulace vstřikovacího procesu se provádí bez nutnosti zásahu do reálné výroby. Analýza vstřikování se provádí hlavně za účelem zlepšení užitkových a vzhledových vlastností. Simulace přináší zkrácení výrobního cyklu, což má za následek zvýšení kvality a produktivity výroby.

Jako simulační software byl v této diplomové práci použit program Moldflow Synergy, který vyhodnocuje a optimalizuje design plastových dílů a vstřikovacích forem. Software minimalizuje možné problémy vznikající během výroby pomocí simulace toku polymeru formou, optimalizuje vtok, zlepšuje návrh chlazení formy, simuluje smrštění a deformaci ve formě a zlepšuje simulaci vstřikování díky přesným údajům o materiálu.

Software je založen na generování a editaci sítě konečných prvků. Existují 3 typy sítí:

- střednicová (Midplane),
- 2,5D síť (Dualdomain),
- objemová 3D síť (Tetrahedral).

Správnost výpočtu analýzy závisí na typu a hustotě použité sítě. Čím vyšší je hustota sítě, tím přesnější je výsledek, ale samotná analýza je velice časově náročná.

Při použití softwaru Moldflow je nejprve nutné vytvořit 3D CAD model vstřikovaného výrobku. Tento model je následně naimportován do softwaru a je na něm vygenerována síť konečných prvků. Následuje výběr typu simulace, vstřikování, druh materiálu a umístění vtoku. Po analýze procesu je na řadě kontrola výsledných hodnot a následná optimalizace. Optimalizace se provádí podle výsledků analýzy. Uživatel upravuje tvar modelu nebo mění podmínky vstřikování, až do odstranění nebo minimalizování vad, které software odhalil.

[36] [37] [38]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

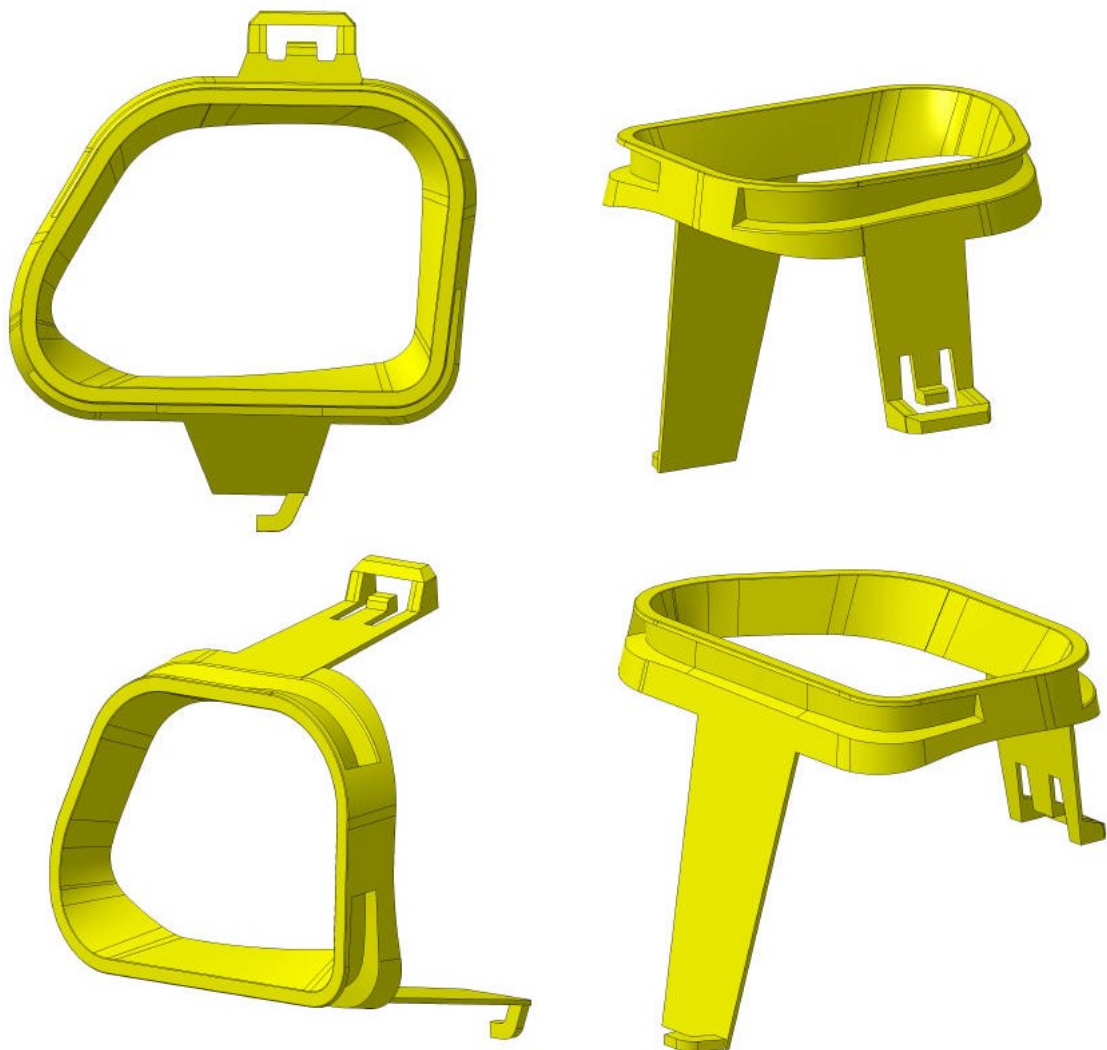
Hlavními cíli diplomové práce je sepsání literární studie pro danou problematiku, vytvoření 3D konstrukce modelu vstřikované součásti a vstřikovací formy pro daný díl, návržení vhodných podmínek vstřikování a provedení analýzy, a nakonec vytvoření výkresové dokumentace v řezu vstřikovací formy společně s kusovníkem.

Teoretická část diplomové práce se zabývá základními poznatky týkající se polymerních materiálů, procesu vstřikování, vstřikovacího stroje, vstřikovací formy, jejich konstrukcí a simulací vstřikovacího procesu.

Praktická část diplomové práce se věnuje konstrukci 3D modelu vybraného plastového dílu, kterým je součástka z mlhového světla automobilu. 3D model vstřikovací formy je navržen na základě vytvořeného 3D modelu součástky a zvoleného typu materiálu. Konstrukce formy a 2D výkresová dokumentace je vytvořena v programu Catia V5 2019. Vstřikovací proces je simulován v programu Moldflow 2023, a to pro dva typy materiálů s variací dvou vtokových systémů. Z výstupu výsledků byla vybrána vhodnější varianta, ze které byl vytvořen 3D model vstřikovací formy.

## 7 VSTŘIKOVANÁ SOUČÁST

Vstříkovaným dílem je součástka z mlhového světla automobilu (*Obr. 24*). Součást má jednu pohledovou stranu, a proto na ni byly kladeny vysoké nároky. Tento díl se nachází na levé i pravé straně automobilu, proto se budou vstříkovat dvě součásti najednou, které budou zrcadlově otočeny. Součást byla tvořena v programu Catia V5 2019 a její základní rozměry jsou (78x83x89) mm a objem je 0,012 m<sup>3</sup>.



*Obr. 24: Vstříkovaný díl*



## 8 ANALÝZA PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

Pro zjištění optimálního nastavení výrobního procesu byly provedeny analýzy volby vtokového systému, temperačních okruhů a materiálu. Analýzy se provádí pro dva držáky mlhové čočky současně. Oba kusy jsou stejné, pouze zrcadlově otočené. Pro zobrazení některých výsledků je použit pouze jeden z nich.

Na simulovaném dílu byla vytvořena síť dual domain o velikosti elementu 1,4 (Obr. 25). S touto sítí se počítá ve veškerých provedených analýzách. Pro zpřesnění výsledků byla síť zjemněna u ústí vtoku.



Obr. 25: Vysítovaný díl

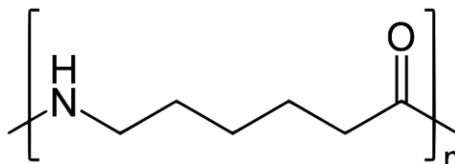
### 8.1 Volba materiálu

Pro daný výrobek byly vybrány dva materiály s vhodnými vlastnostmi. Jedním z nich je polymer ze skupiny polyamidů – polyamid 6 (PA6) s obchodním názvem PA6 Generic Estimates a druhým je polymer ze skupiny polyesterů – polybutylentereftalát (PBT) s názvem Lutrel PBT-GP1000-NP.

Na základě tokové analýzy, ve které byly testovány a porovnávány oba zvolené materiály, byl nakonec vybrán ten s vhodnějšími vlastnostmi pro daný výrobek, a to PBT.

### 8.1.1 PA6 Generic Estimates

PA6 je lineární polymer, který obsahuje v hlavním řetězci amidovou skupinu (*Obr. 26*). Výroba probíhá většinou polykondenzační reakcí kyseliny 6-aminokrapronové nebo  $\epsilon$ -kaprolaktamu za odštěpení vedlejšího produktu.



*Obr. 26: Chemická struktura polyamidu 6*

Samotný PA6 je alifatický polymer vyráběný dvoustupňovou polykondenzační reakcí. V prvním stupni dochází k hydrolytickému otevření kruhu laktamu (pomocí vody) a ve druhém kroku nastává polykondenzace kaprolaktamu a odštěpení vody, která následně slouží k otevření dalšího kruhu.

PA6 je semikrystalický termoplastický polymer vykazující dobré mechanické vlastnosti (pevnost, tuhost). Před samotným zpracováním se musí sušit kvůli navlhavosti.

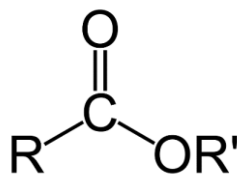
Materiál byl vybrán od výrobce CMOLD Generic Estimates a jeho základní vlastnosti jsou uvedené v *Tab. 4*.

*Tab. 4: Vybrané vlastnosti materiálu PA6 Generic Estimates*

Teplota tání	255 °C
Index toku taveniny MFR	110 g/10min
Hustota taveniny	999,9 kg/m <sup>3</sup>
Hustota pevné fáze	1172,9 kg/m <sup>3</sup>
Smrštění	1,2 %
Modul pružnosti v tahu	1050 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2910 MPa

### 8.1.2 Lutrel PBT-GP1000-NP

Polybutylentereftalát je polymer patřící mezi polyestery, které se vyznačují přítomností esterové vazby v hlavním řetězci (*Obr. 27*).



*Obr. 27: Esterová vazba*

Monomerem pro výrobu PBT je 1,4-butandiol, kyselina tereftalová a dimethylester kyseliny tereftalové. Výroba je založena na dvoustupňové polykondenzaci.

PBT je lineární, semikrystalický polymer, který má vysokou tepelnou odolnost, dobrou mechanickou pevnost a houževnatost. Nevýhodou je vysoká hořlavost.

Materiál pro daný vstřík byl vybrán od výrobce LG Chemical a jeho vlastnosti jsou zobrazené v *Tab. 5*.

*Tab. 5: Vybrané vlastnosti materiálu Lutrel PBT-GP1000-NP*

Teplota tání	240 °C
Index toku taveniny MFR	45 g/10min
Hustota taveniny	1122,1 kg/m <sup>3</sup>
Hustota pevné fáze	1367,1 kg/m <sup>3</sup>
Smrštění	1,6 %
Modul pružnosti v tahu	897 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2886 MPa

## 8.2 Volba vstřikovacího stroje

Pro danou formu byl zvolen vstřikovací stroj od firmy Arburg s označením 520S 1300 kN 290 (*Obr. 28*). Tento hydraulický vstřikovací stroj dokáže vyvinout maximální uzavírací sílu 1300 kN a je vybaven šnekem o průměru 30 mm. Volba stroje se odvíjí hned od několika parametrů, jako např. vzdálenost mezi vodícími sloupky, velikost uzavírací síly a kapacita plastikační jednotky. Všechny tyto parametry zvolený stroj splňuje. Další důležité parametry jsou uvedeny v *Tab. 6*.

Tab. 6: Jednotlivé parametry

Parametry stroje	Maximální hodnota stroje	Požadovaná hodnota
Uzavírací síla [kN]	1300	352
Maximální vstřikovací tlak [MPa]	250	50
Vzdálenost mezi sloupky [mm]	520x520	min. 496x464
Rozsah šířky formy [mm]	250-825	min. 420
Plastikační jednotka [cm <sup>3</sup> ]	290	62
Průměr šneku [mm]	30	-
Vstřikovaný objem [g]	106	62



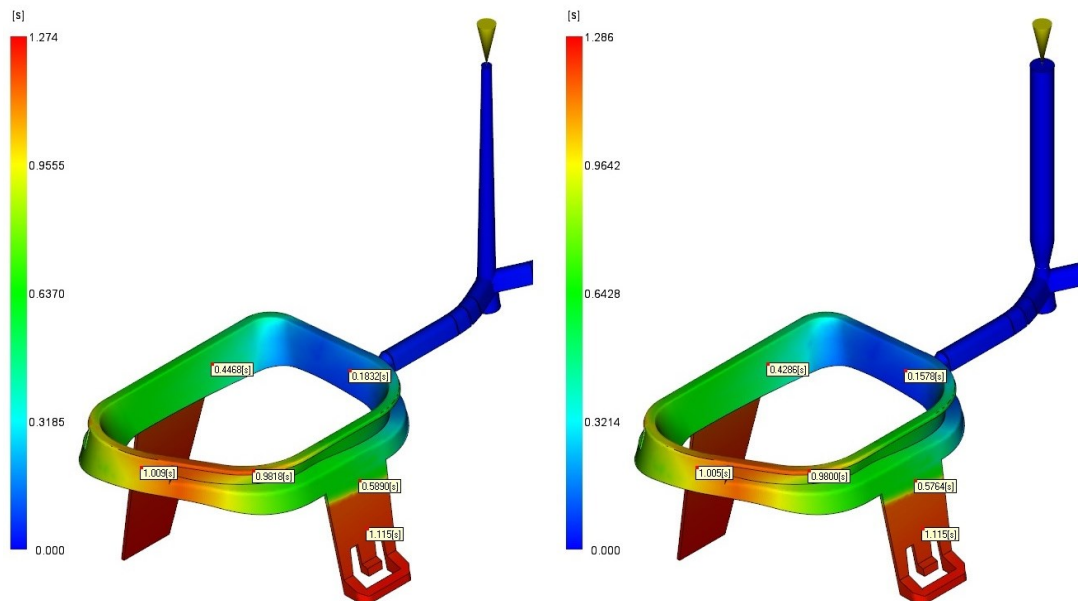
Obr. 28: Vstřikovací stroj Arburg allrounder 520A

## 8.1 Volba vtokového systému

Jako první byly provedeny analýzy pro porovnání studeného a kombinovaného (horká tryska + studený rozvodný kanál) vtokového systému. Obě simulace měly nastavené stejné procesní parametry.

### 8.1.1 Čas plnění

Výsledky času plnění ukazují, že obě varianty se zaplní přibližně ve stejný čas. Rozdíl je zde v desetinách sekundy, což je pro tento výsledek zanedbatelné. Z výsledků je také patrné, kde se výrobek zaplní nejpozději, což ukazuje červená oblast na *Obr. 29*.

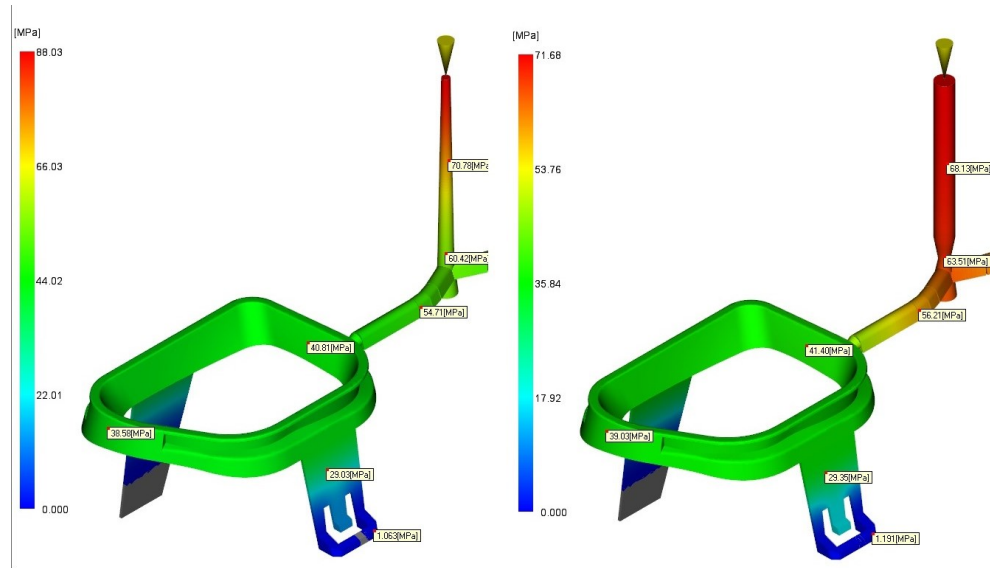


*Obr. 29: Čas plnění u volby vtokového ústí*

*Vlevo je studený vtokový systém a vpravo je kombinace horkého a studeného vtokového systému*

### 8.1.2 Tlak při přepnutí na dotlak

Tlak při přepnutí na dotlak bývá zpravidla nejvyšší z celého procesu vstřikování. Z výsledků analýzy uvedené na *Obr. 30* lze vyčíst, že tlak je u varianty se studeným vtokovým systémem vyšší přibližně o 6 MPa. Je to způsobeno delší dráhou toku polymeru bez jeho vnějšího ohřevu.

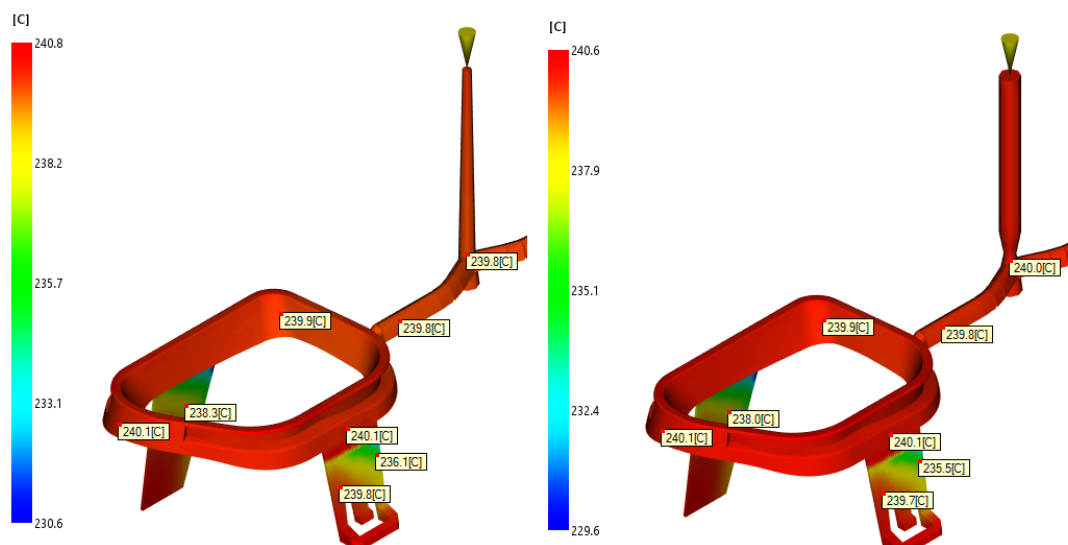


Obr. 30: Tlak při přepnutí na dotlak u volby vtokového ústí

Vlevo je studený vtokový systém a vpravo je kombinace horkého a studeného vtokového systému

### 8.1.3 Teplota na čele taveniny

Z výsledků analýz bylo zjištěno, že rozdílnost vtokových ústí nemá vliv na teplotu čela plnění, i když u varianty se studeným vtokovým ústím je tok polymeru bez ohřevu delší (Obr. 31). To, že nedochází k žádným rozdílům, může být také zapříčiněno malou vstříkovanou dávkou nebo krátkým vtokovým systémem.

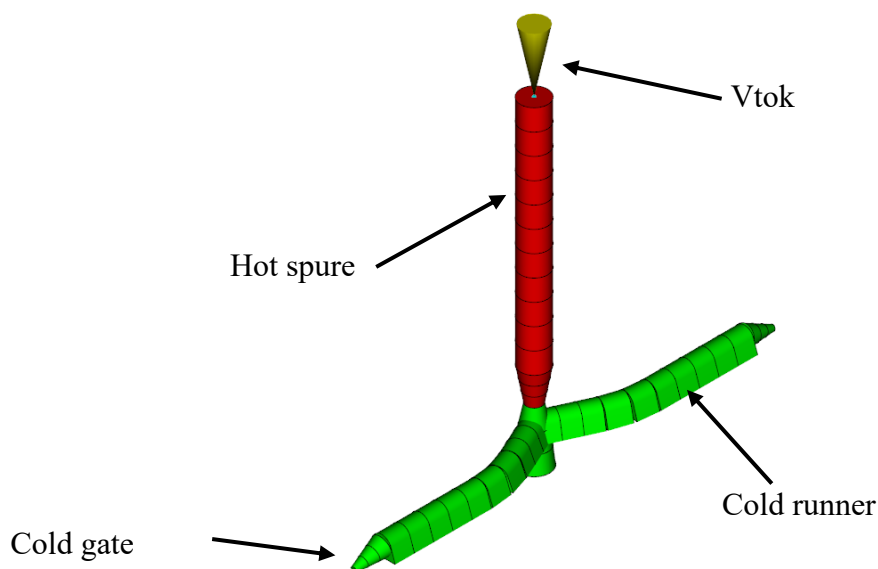


Obr. 31: Teplota na čele taveniny u volby vtokového ústí

Vlevo je studený vtokový systém a vpravo je kombinace horkého a studeného vtokového systému

### 8.1.4 Zvolený vtokový systém

Z výsledných analýz vyplývá, že nedochází k výrazným rozdílům u vstřikovacího času a teplot mezi studeným a kombinovaným vtokovým systémem. Výsledek vstřikovacího tlaku je rozdílný o 6 MPa ve prospěch kombinovaného systému. U této varianty je také výhodou, že dochází k menšímu odpadu při výrobě, tudíž je tento způsob efektivnější a ekonomicky výhodnější. Z těchto důvodů byla zvolena varianta s kombinovaným vtokovým systémem, který se bude skládat z horké trysky a dvou studených kanálů. Popis jednotlivých částí zvoleného vtokového systému je uveden na *Obr. 32*.



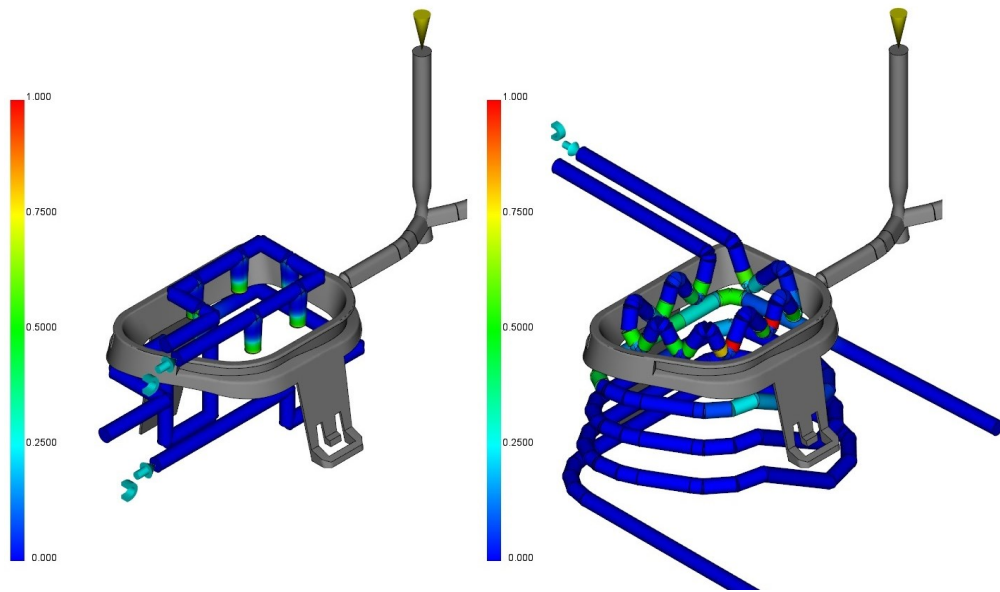
*Obr. 32: Vtokový systém*

## 8.2 Volba temperačního systému

Pro výpočet analýz temperačního systému byl již použit kombinovaný vtokový systém zvolený z předchozí simulace. Byly navrženy dvě varianty okruhů. První je tvořena vrtanými kanály a šesti přepážkami. Druhá pomocí konformního chlazení, které lépe kopíruje tvar dílu a je vyrobeno pomocí 3D tisku. Každá z variant má dva temperační okruhy, jeden ve tvárníku a jeden ve tvárnici. Pro analýzy byly použity stejné parametry průtoku (2 l/min) a teploty temperačního média (78 °C). Taktéž průřez kanálů je totožný, a to o průměru 6 mm.

### 8.2.1 Efektivita temperačních okruhů

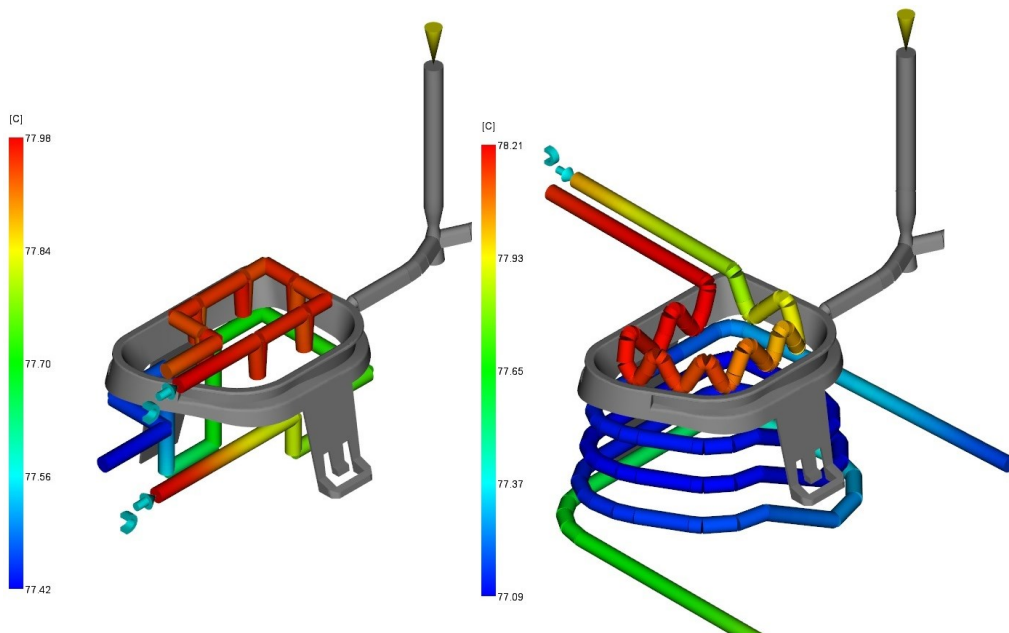
Výsledky efektivity temperačních okruhů ukazují, kde je chlazení součásti nejintenzivnější. U varianty s konformním chlazením je efektivita mírně vyšší než u vrtaných kanálů, převážně v oblastech blízkosti dělicí roviny viz. *Obr. 33*.



Obr. 33: Efektivita temperačních okruhů u dvou variant temperací  
Vlevo je vrtaný a vpravo konformní temperační systém

### 8.2.2 Teplota temperačního média

Rozdíl teploty temperačního média na vstupu a na výstupu se u obou variant pohybuje okolo 1 °C. Rozdíl trajektorií toku nemá vliv na výslednou teplotu. Maximální dosažená teplota u obou analýz se pohybuje okolo 78 °C, viz. Obr. 34.

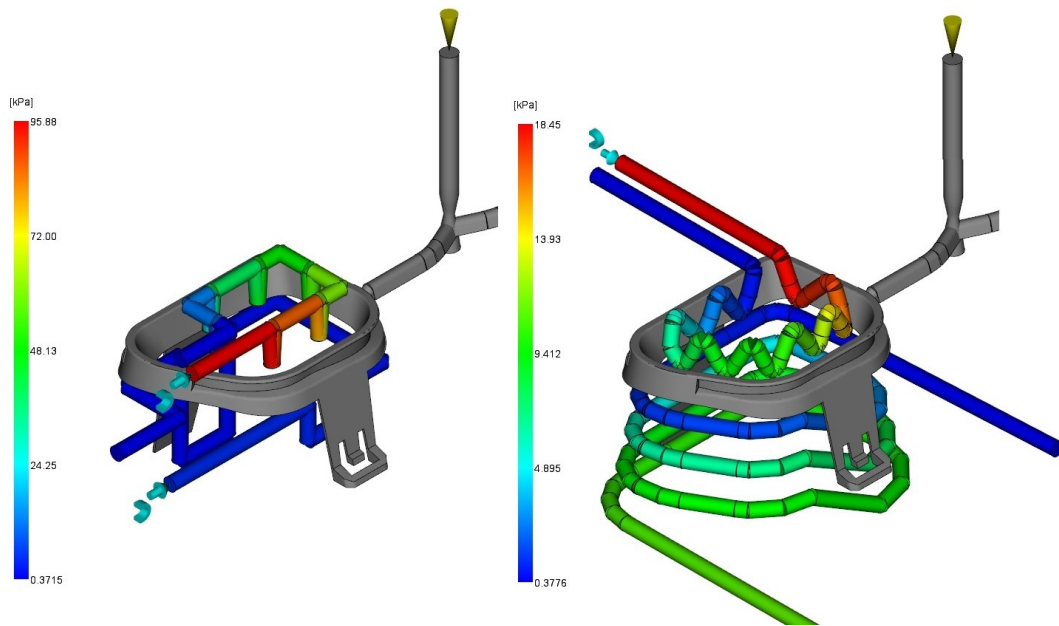


Obr. 34: Teplota temperačních okruhů u dvou variant temperací  
Vlevo je vrtaný a vpravo konformní temperační systém



### 8.2.3 Tlak temperačního média

Z Obr. 35 vyplývá, že temperace ve vrtaných okruzích dosahuje výrazně vyšších tlaků než u konformních. Rozdíl je okolo pětinasobku. To je způsobeno převážně menším průřezem kanálu a umístěním přepážek. U varianty s vrtanými kanály je dosaženo maximálního tlaku pouze v okruhu s přepážkami, bez nich je tlak podobný jako u konformních okruhů.



Obr. 35: Tlaky v temperačních okruzích u dvou variant temperací  
Vlevo je vrtaný a vpravo konformní temperační systém

### 8.2.4 Zvolená varianta temperačního okruhu

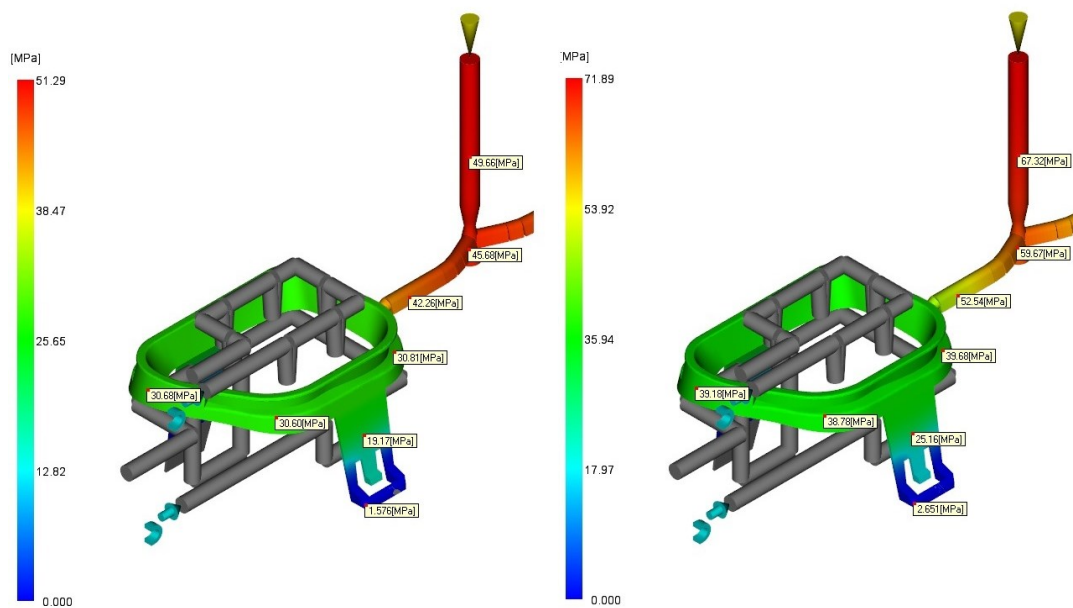
Z uvedených analýz vyplývá, že efektivita temperace je vyšší u konformního než u vrtaného chlazení, ale tento rozdíl není nijak výrazný. Teploty temperačních okruhů jsou téměř totožné. Tlaky v okruzích jsou značně rozdílné. U vrtané temperace je nejvyšší dosažený tak 95,88 kPa a u konformní 18,45 kPa. Jelikož temperační jednotky mohou běžně vyvinout tlaky okolo 400 kPa, není hodnota 95,88 limitující. Také se musí vzít v úvahu složitost a nákladnost na výrobu konformního chlazení. Vzhledem k tomu, že analýzy neukázaly významné rozdíly, kromě tlaku, je největším faktorem právě složitost a cena. Z toho důvodu byla zvolena temperace s vrtanými kanály.

### 8.3 Volba materiálu

Pro porovnání výrobku se použily dva materiály PBT a PA6. Oba materiály se běžně používají pro konstrukční plastové díly. Dle materiálového listu z Moldflow je možné zvolit stejné procesní parametry pro porovnání těchto materiálů, a přitom se vejít do jejich požadovaných rozmezí. Analýzy byly provedeny na již zvoleném vtokovém a temperačním systému.

#### 8.3.1 Tlak při přepnutí na dotlak

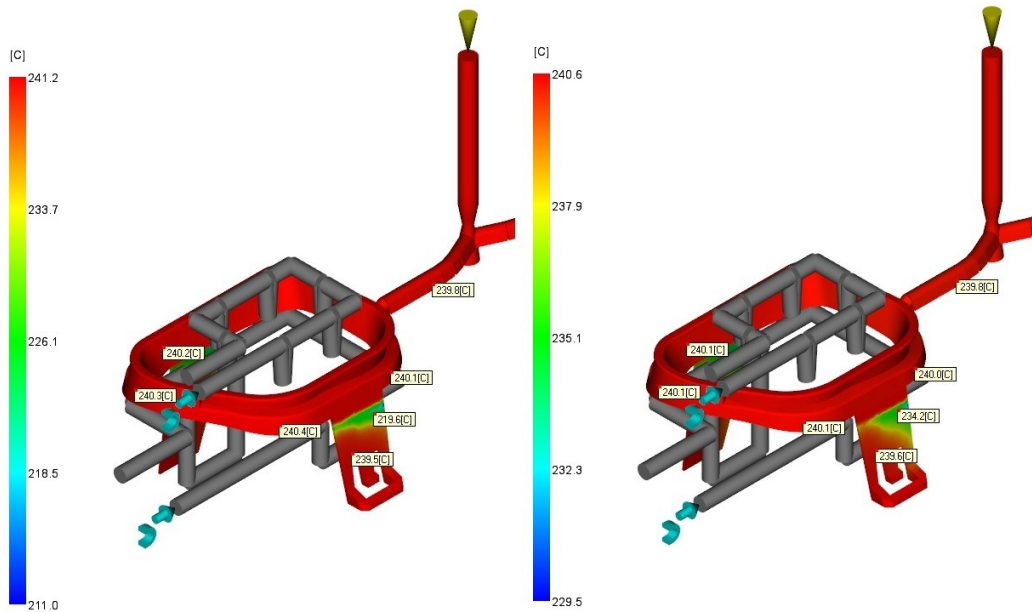
V tomto čase je tlak výsledných analýz nejvyšší, a proto jej lze nejlépe porovnat. Z výsledku na Obr. 36 vyplývá, že tlak je nižší u materiálu PBT, a to o téměř 20 MPa. Maximální dosažené hodnoty jsou u obou simulací ve vtokovém systému. Na díle se tlak pohybuje u PBT přibližně pod 40 MPa a u PA6 pod 48 MPa.



Obr. 36: Tlak při přepnutí na dotlak u porovnávaných materiálů  
Vlevo je analýza s materiálem PBT a vpravo s PA6

### 8.3.2 Teplota čela taveniny

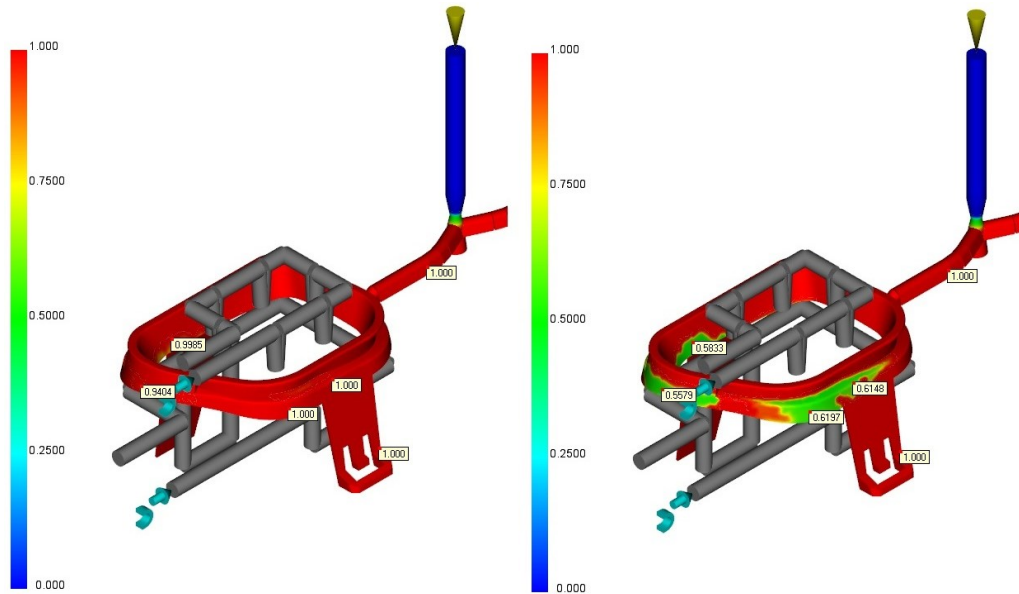
Vstupní teplota u obou porovnávaných simulací byla nastavena na 240 °C. Od této teploty se výrazně neodchýlí ani jeden z materiálů. Materiál PBT má maximální hodnotu vyšší o přibližně 1 °C, ale to je vzhledem k vysoké teplotě zanedbatelné. Výsledky teploty čela taveniny jsou u obou analýz obdobné (Obr. 37).



Obr. 37: Teplota čela taveniny u porovnávaných materiálů  
Vlevo je analýza s materiálem PBT a vpravo s PA6

### 8.3.3 Tuhnutí

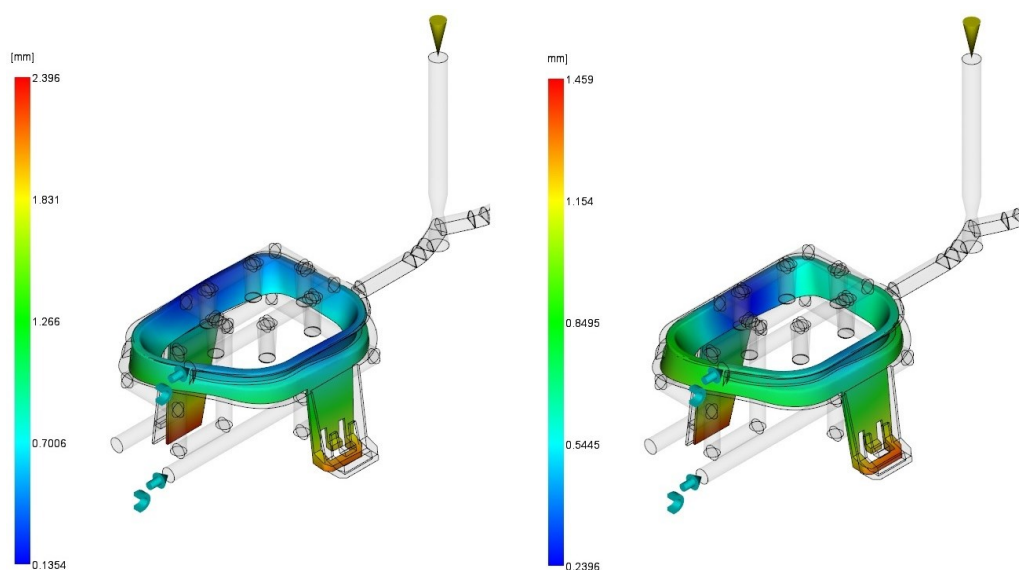
Čas vstřikování, dotlaku a chlazení byl pro obě varianty nastaven na 40 s. Z výsledku uvedeného na Obr. 38 je patrné, že materiál PBT je v celém objemu ztuhlý na rozdíl od PA6, který má výraznou část zatuhlou pouze okolo 60 %. PA6 potřebuje pro úplné ztuhnutí výrazně vyšší čas než PBT.



*Obr. 38: Čas tuhnutí u porovnávaných materiálů  
Vlevo je analýza s materiálem PBT a vpravo s PA6*

### 8.3.4 Deformace

Výsledky deformací se u porovnávaných materiálů výrazně liší (*Obr. 39*). U PBT nastává maximální deformace o hodnotě 2,39 mm a u PA6 je téměř o 1 mm menší, a to 1,45 mm. Tyto výsledky jsou zatím pouze orientační, jelikož pro zvolený materiál bude dutina formy zvětšena o smrštění, a tím dojde k zredukování deformací. Pro každý materiál je smrštění rozdílné, a tudíž hodnota deformace může klesnout o jinou hodnotu.



*Obr. 39: Deformace u porovnávaných materiálů  
Vlevo je analýza s materiálem PBT a vpravo s PA6*

### 8.3.5 Zvolený materiál výrobku

Z provedených analýz pro volbu materiálu vyplývá, že u PBT je dosaženo při vstřikování menších hodnot tlaku než u PA6, což napomáhá k menšímu namáhání formy. Teploty při vstřikování dosahují přibližně stejných hodnot, ale doba chlazení materiálů se výrazně liší. PBT má u daného výrobku výrazně rychlejší tuhnutí, díky tomu lze dosáhnout kratšího vstřikovacího cyklu a tím zlepšit efektivitu výroby. Jedinou nevýhodou materiálu PBT jsou jeho vyšší deformace oproti PA6, ale ty se mohou dále ovlivnit kompenzací smrštění materiálu. Z těchto uvedených důvodů byl pro daný výrobek zvolen materiál PBT.

## 9 OPTIMALIZOVANÉ PARAMETRY ANALÝZY

Pro výslednou optimalizaci byla provedena řada analýz, aby se docílilo co nejlepších vlastností vyráběného dílu. Výsledné procesní parametry se převážně řídily materiálovým listem. Pro výslednou simulaci byl použit zvolený vtokový systém, temperace a materiál.

### 9.1 Zvolený materiál

Materiál, který byl zvolen, nejlépe vyhovuje svými vlastnostmi pro daný výrobek. Jedná se o materiál polybutylentereftalát s názvem Lutrel PBT-GP1000-NP. Vlastnosti tohoto materiálu jsou popsány v kapitole 8.1 ve volbě materiálu. Hmotnost vyráběného dílu je 25,12 g. Vhodné procesní parametry a kritické hodnoty pro tento materiál se pohybují v rozmezích dle *Obr. 40*.

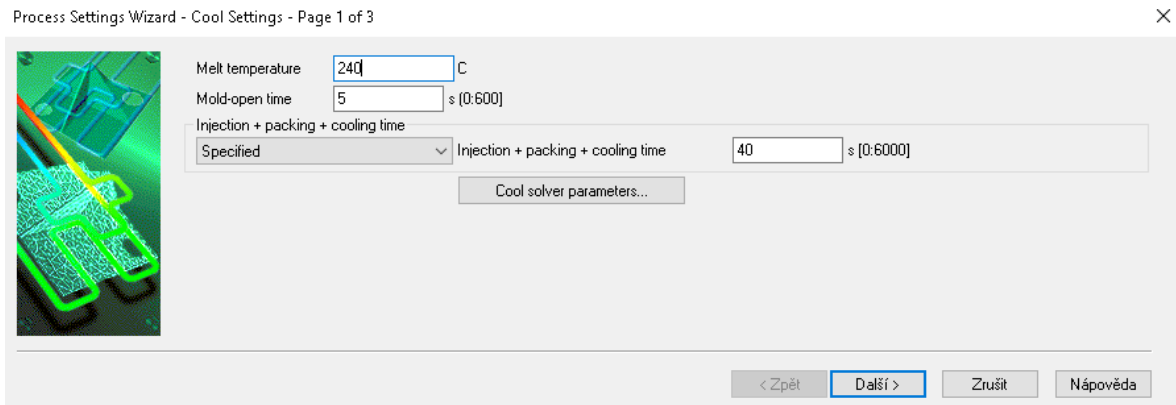
The screenshot shows a software window titled "Thermoplastics material" with a close button (X) in the top right corner. The window contains a table of recommended processing parameters. The table has columns for "Description" and "Recommended Processing". The parameters are as follows:

Description	Recommended Processing	Unit
Mold surface temperature	61	C
Melt temperature	240	C
Mold temperature range (recommended)		
Minimum	40	C
Maximum	82	C
Melt temperature range (recommended)		
Minimum	235	C
Maximum	245	C
Absolute maximum melt temperature	285	C
Ejection temperature	170	C
View test information for ejection temperature...		
Maximum shear stress	0.4	MPa
Maximum shear rate	50000	1/s

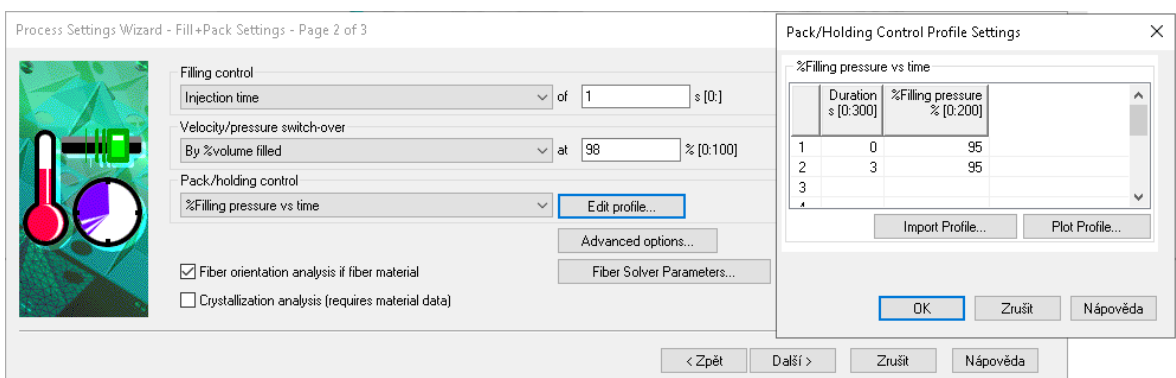
*Obr. 40: Přehled doporučených procesních parametrů*

### 9.2 Optimální procesní parametry

Z provedených simulací nejlépe vyhovovaly procesní parametry vyobrazené na *Obr. 41* a *42*. Hlavními volenými hodnotami byly: teplota taveniny, čas vstřikování, čas dotlaku, čas chlazení, procentuální hodnota zaplnění při přepnutí na dotlak a velikost dotlaku vůči vstřikovanému tlaku.



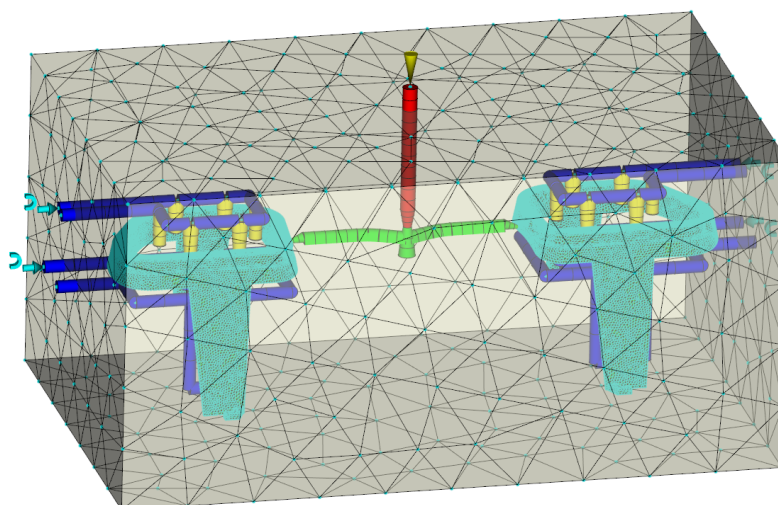
Obr. 41: Zvolené procesní parametry 1



Obr. 42: Zvolené procesní parametry 2

### 9.3 Výsledky analýzy pro zvolené procesní parametry

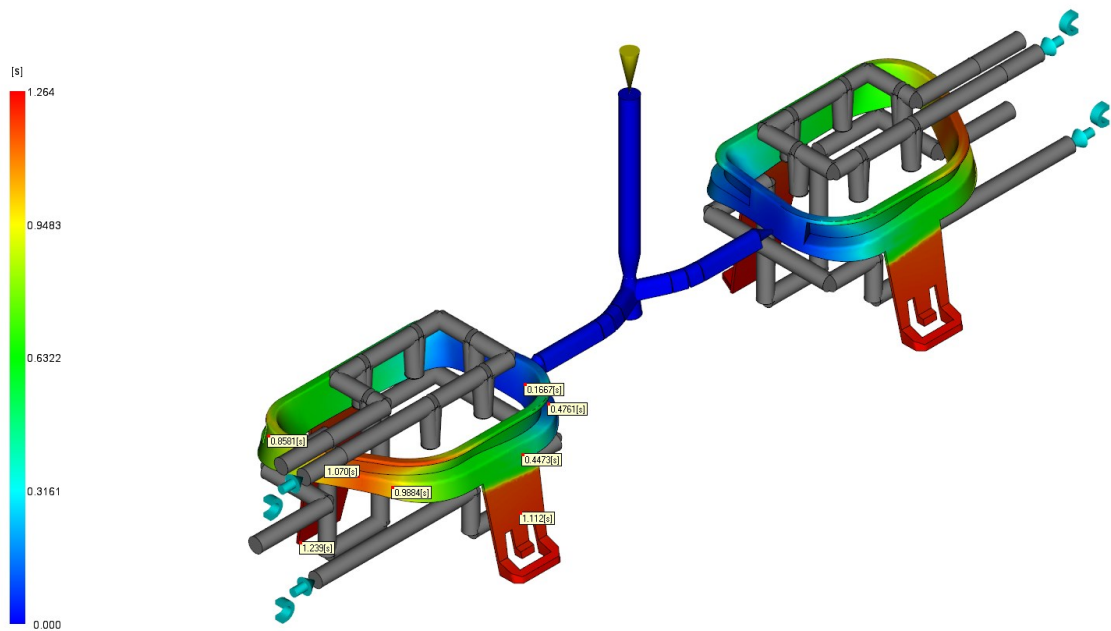
Do simulace byl vložen blok formy (Obr. 43), díky kterému lze dosáhnout přesnějších výsledků z hlediska teplotního působení mezi polymerní taveninou a formou.



Obr. 43: Vložený blok formy

### 9.3.1 Čas plnění

Tento výsledek ukazuje, v jakých časech budou jednotlivé části dutiny zaplněny. Čas plnění dosahuje maximální hodnoty 1,26 s. Nejdéle se plní místo v protilehlé části dutiny od vtoku a oba příčné zácvaky. Z analýzy vyplývá, že dochází k rovnoměrnému plnění, jelikož tavenina není nikde přeplňována a plynule teče od ústí vtoku až po nejvzdálenějšího místa dutiny (Obr. 44).

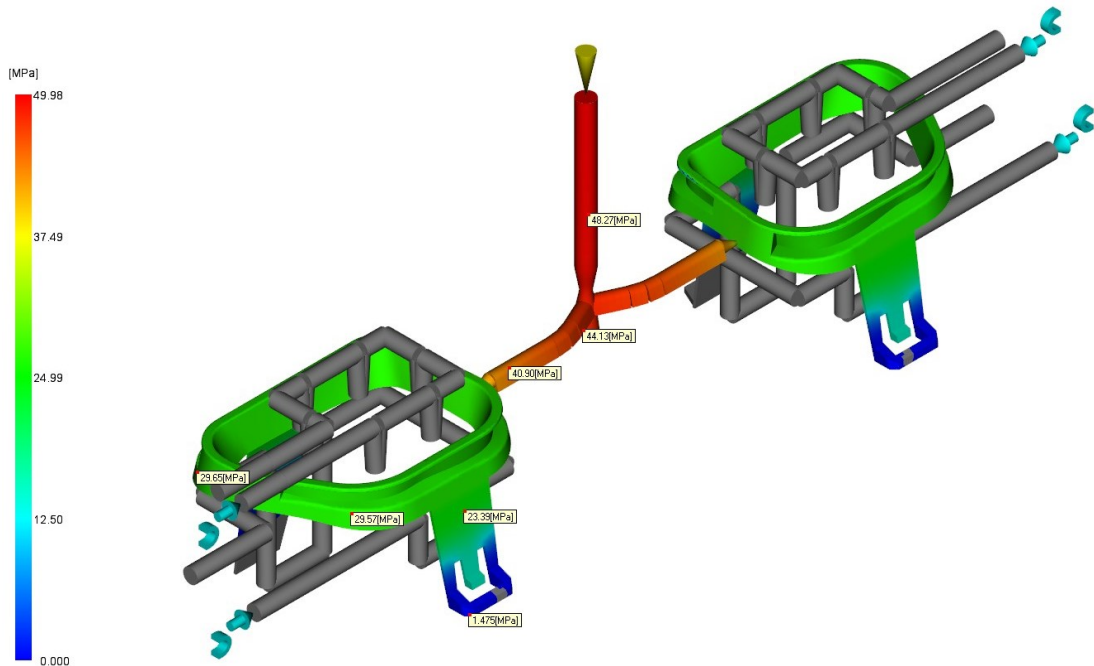


Obr. 44: Čas plnění

### 9.3.2 Tlak při přepnutí na dotlak

Tento výsledek ukazuje nejvyšší dosažený tlak při vstřikovacím cyklu. Z Obr. 45 vyplývá, že nejvyšší tlak je ve vtokovém systému a nabývá zde hodnot až téměř 50 MPa. Maximální tlak na díle se pohybuje do 35 MPa. Na Obr. 45 je tlak v čase bezprostředně před přepnutím na dotlak, který má hodnotu 95 % z maximálního tlaku a působí na výrobek až do zamrznutí vtokového ústí.

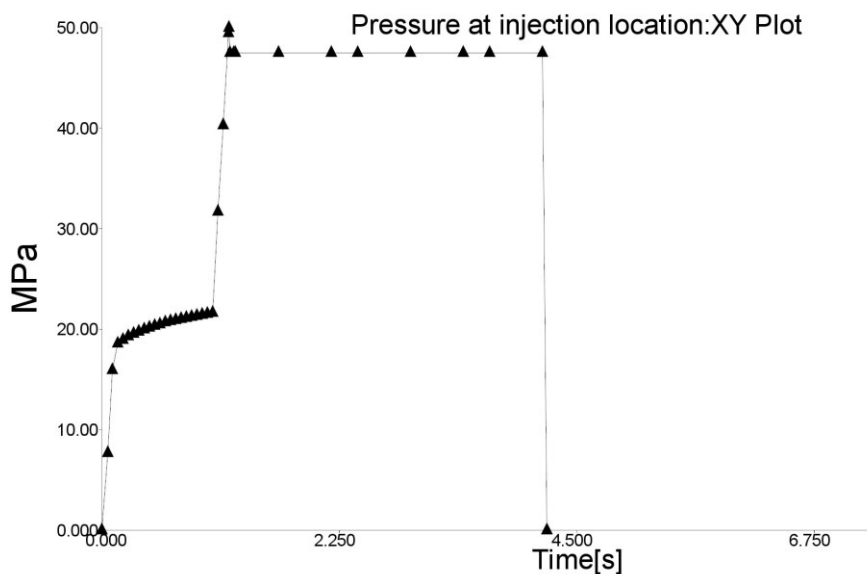




Obr. 45: Tlak při přepnutí na dotlak

### 9.3.3 Průběh tlaku u ústí vtoku

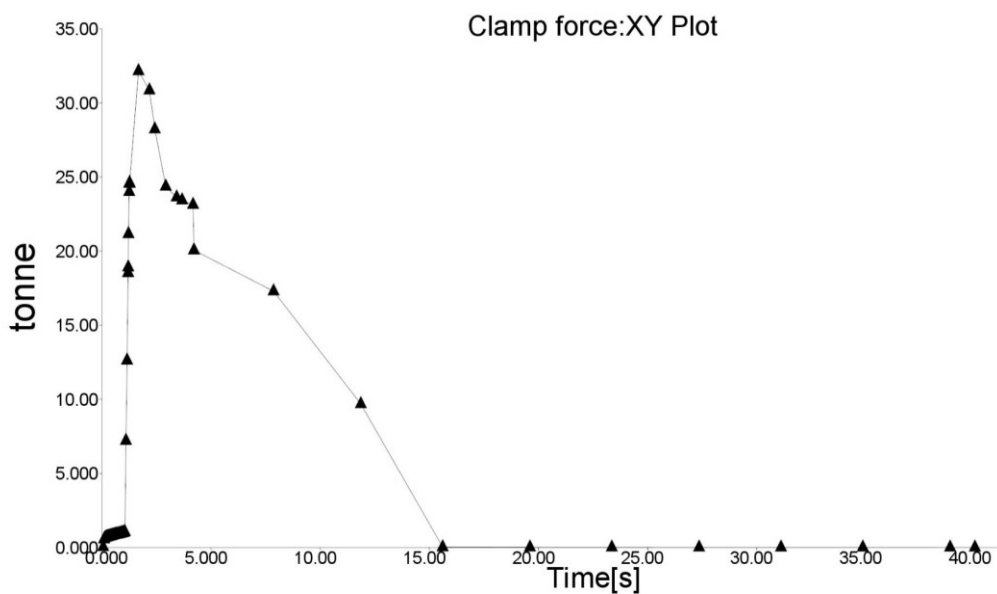
Graf na Obr. 46 ukazuje průběh tlaku během celého vstřikovacího cyklu. Tlak působí bezprostředně po zahájení vstřikování a roste až do času přepnutí na dotlak. Po skončení dotlaku klesne tlak na nulu a jeho hodnota vzroste až při započetí dalšího vstřikovacího cyklu.



Obr. 46: Průběh tlaku v místě ústí vtoku

### 9.3.4 Průběh uzavírací síly

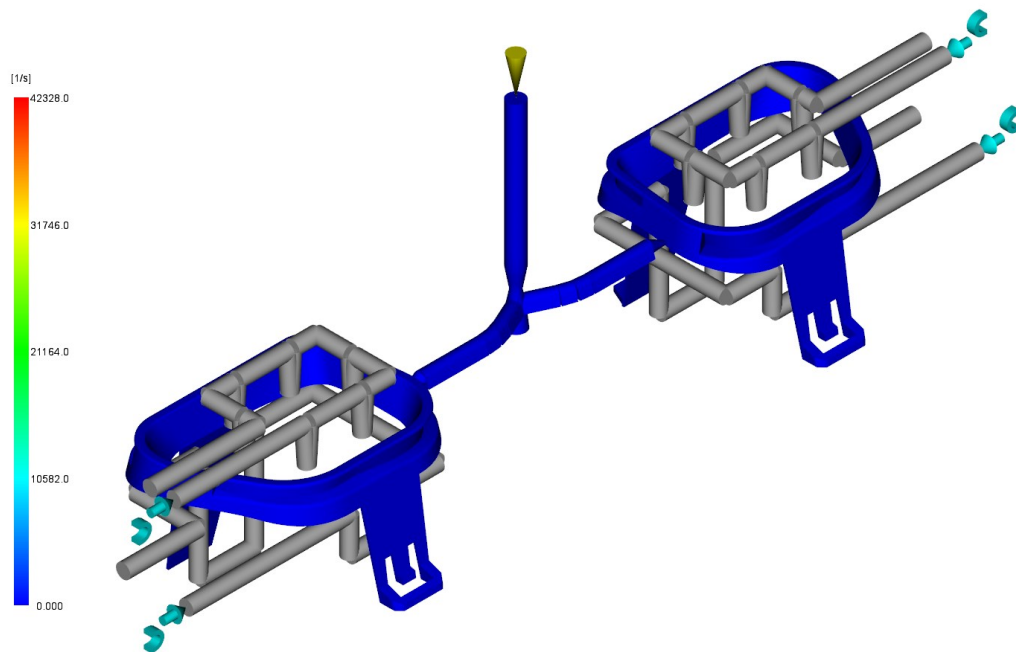
Tento výsledek udává potřebnou uzavírací sílu pro zabezpečení formy během vstřikovacího cyklu (*Obr. 47*). Díky tomuto parametru lze snadno zvolit vhodný vstřikovací stroj nebo ověřit, zda vybraný stroj splňuje požadavky na uzavírací sílu. V tomto případě bylo dosaženo maximální uzavírací síly 33 tun.



*Obr. 47: Průběh uzavírací síly*

### 9.3.5 Smyková deformace

Maximální smyková deformace by dle materiálového listu neměla překročit hodnotu 50 000 1/s. Z výsledků analýzy lze vidět, že maximální hodnota je zde 42 328 1/s, z toho důvodu lze konstatovat, že výsledek vyhovuje daným požadavkům (*Obr. 48*). V celkovém objemu je hodnota výrazně nižší a hodnoty nad 21 000 1/s jsou zastoupeny pouze na minimálních částech dutiny, převážně u ústí vtoku.



*Obr. 48: Smyková deformace*

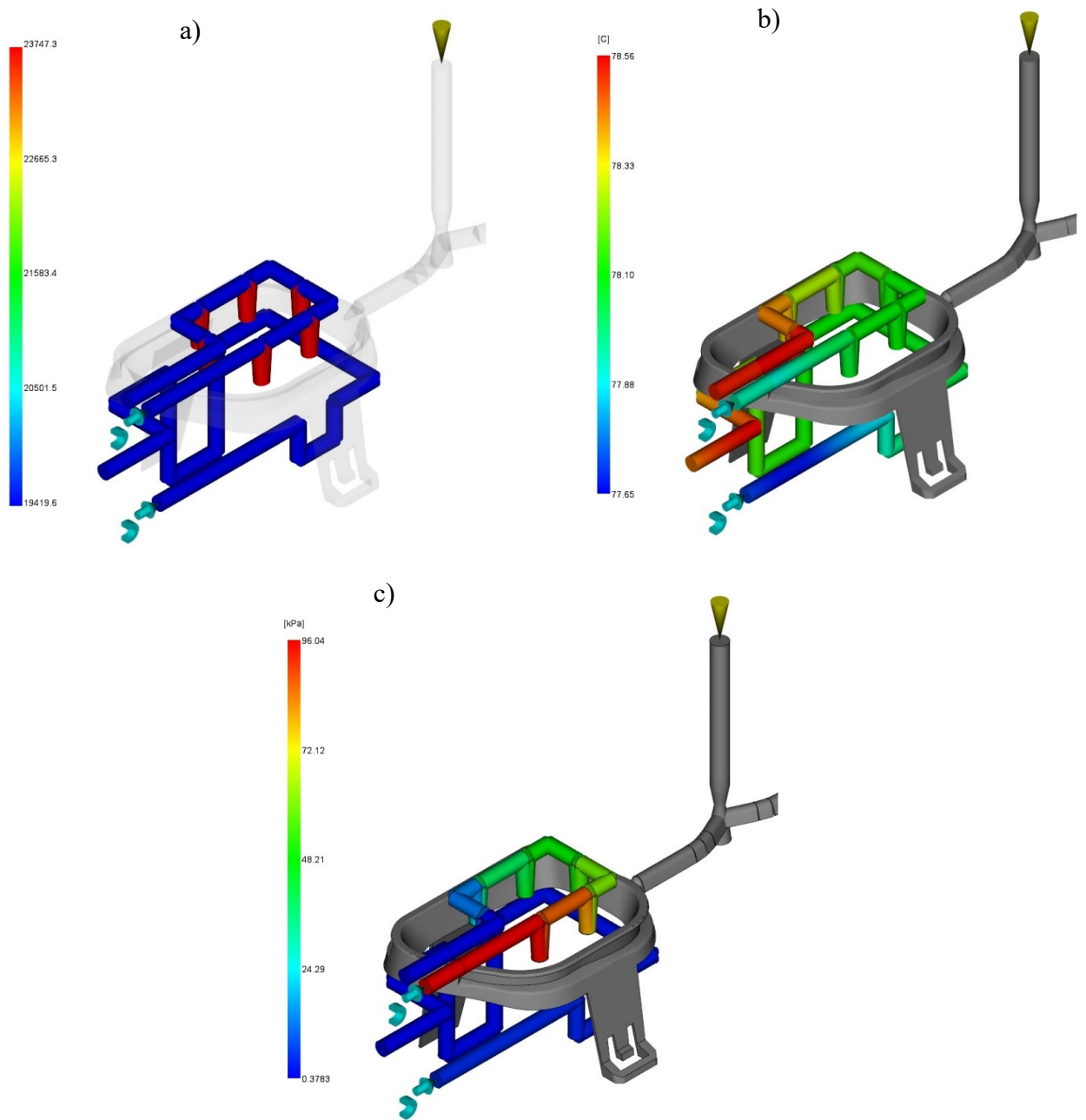
### 9.3.6 Temperace dílu

Výsledky vyobrazené na *Obr. 49* zobrazují hodnoty Reynoldsova čísla, teplotu temperačního média a tlak v okruzích.

Reynoldsovo číslo udává, k jakému proudění dochází u temperace během toku. V praxi se udává, že do hodnoty Reynoldsova čísla 10 000 nastává laminární proudění a nad tuto hodnotu turbulentní proudění. Pro lepší efektivitu temperačních okruhů je požadováno, aby byl tok turbulentní, čehož je u tohoto výsledku dosaženo. Konkrétně se v tomto případě Reynoldsovo číslo pohybuje od 19 419 do 23 747.

Výsledek teploty temperačního média je důležitý především ke zjištění teplot na vstupu a výstupu jednotlivých okruhů. Rozdíl těchto teplot by neměl překročit hodnotu 3 °C. Zadaná teplota pro oba temperační okruhy je 78 °C a průtok na 2 l/min. Výsledné hodnoty se pohybují přibližně od 77,6 °C až do 78,5 °C. Rozdíl je zde do 1 °C a hodnota 3 °C překročena nebyla.

Z výsledku tlaků v temperačních okruzích je patrné, že umístění přepážek výrazně tlak zvedá. U okruhu bez přepážek tlak nepřekročí hodnotu 11 kPa, kdežto s nimi je docíleno maximálního tlaku 96 kPa. Tento tlak je i tak v požadovaných hodnotách z hlediska používaných rozmezí temperačních jednotek.

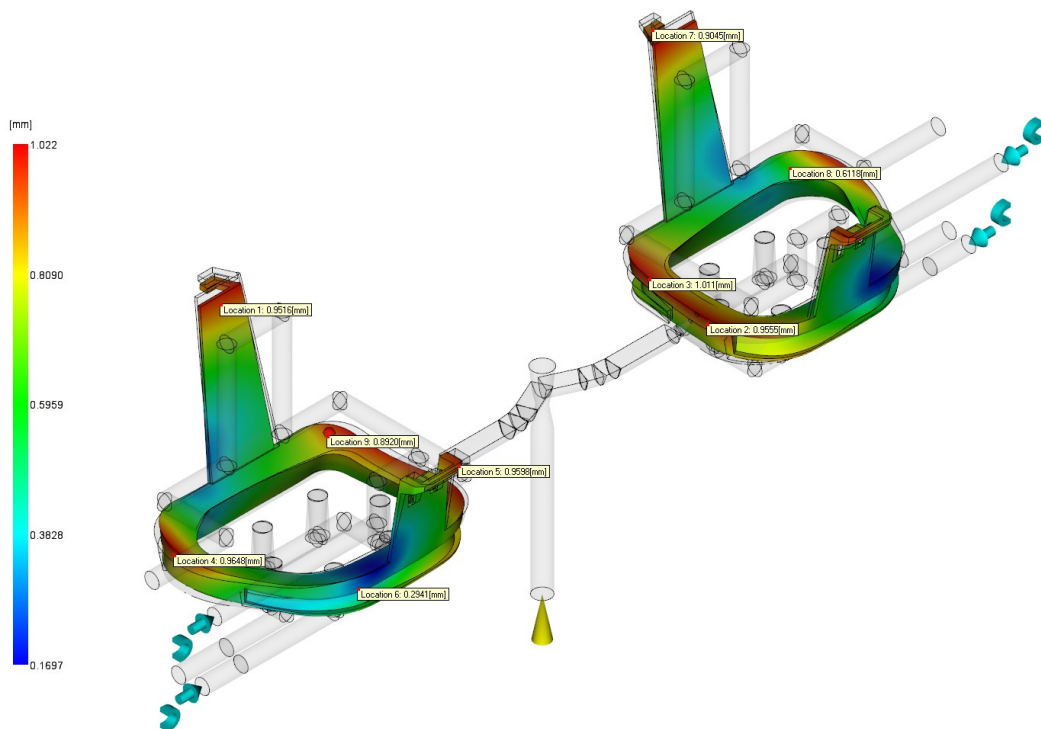


Obr. 49: Temperace dílu

a) Reynoldsovo číslo b) Teplota temperačního média c) Tlak v temperačních okruzích

### 9.3.7 Deformace dílu

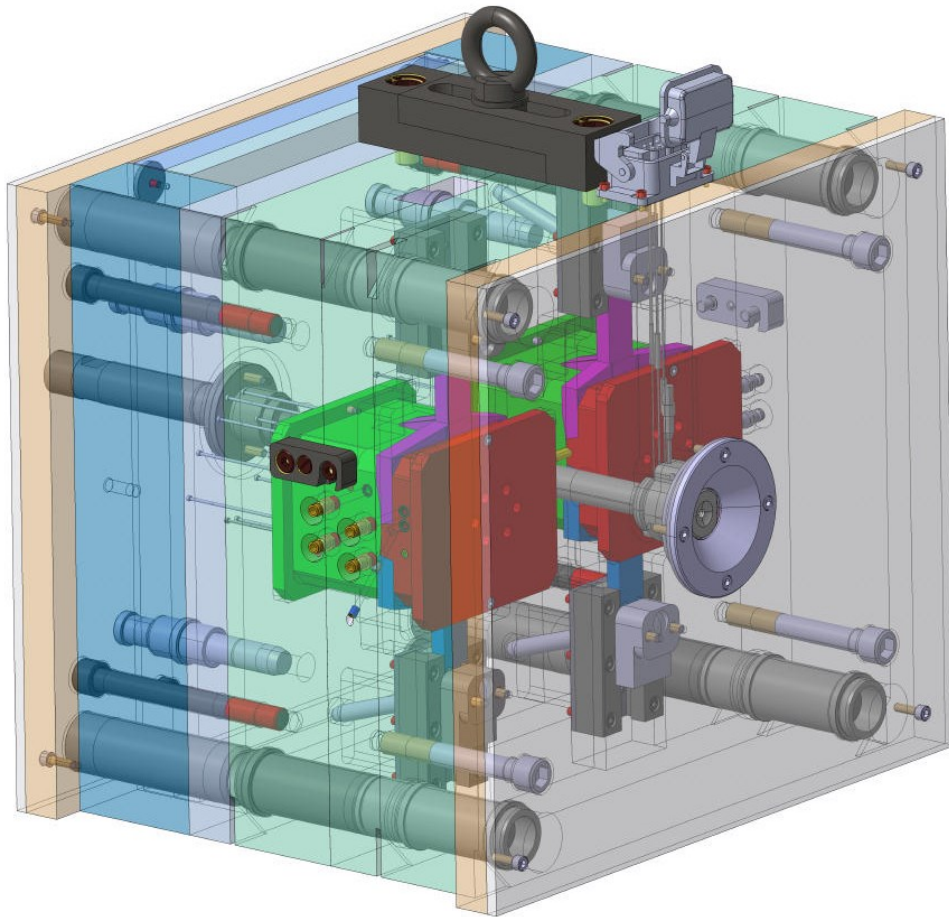
Maximální dosažená hodnota deformace se pohybuje okolo 1 mm, tyto hodnoty jsou uvedeny na *Obr. 50* červenou barvou. Pro zmenšení účinku deformace byla použita kompenzace smrštění v ose x, z 0,2 % a v ose y 3 %, o tyto hodnoty se také zvětšily dutiny výrobku ve formě. Díky tomu se deformace zmenšila téměř o 0,7 mm. Výsledek vyobrazený na *Obr. 50* zahrnuje kompenzaci smrštění a pro ukázkou byl účinek deformací 3 x zvětšen.



*Obr. 50: Deformace dílu (3 x zvětšeno)*

## 10 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovaná forma (*Obr. 51*) byla navržena jako dvounásobná se zrcadlově otočenými výstřiky. Forma a její komponenty byly převážně vygenerovány z katalogu normálií od společnosti Meusburger a Hasco. Díly nenormalizované byly navrženy a vymodelovány.



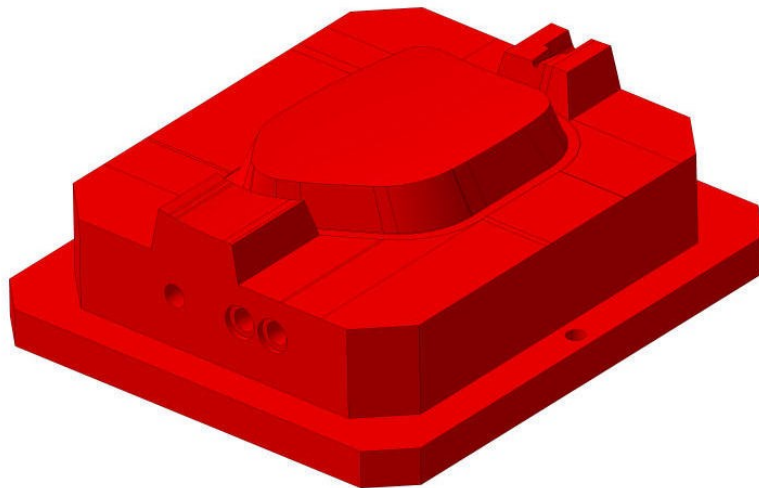
*Obr. 51: Forma*

### 10.1 Násobnost formy

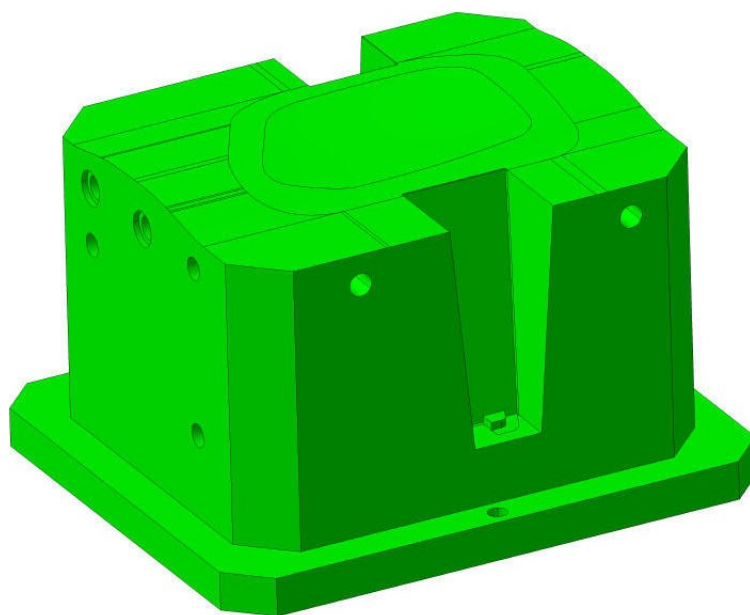
Forma byla navržena jako dvojnásobná a na jeden pracovní zdvih dokáže vyrobít dva symetricky otočené výstřiky – během jednoho cyklu jsou vyrobeny součástky pro obě strany automobilu.

## 10.2 Tvarové části

Forma je tvořena dvěma dutinami, z nichž každá obsahuje čtyři tvarové části, a to tvárnici s tvárníkem (Obr. 52 a 53) a dvě boční odformování. Výsledný tvar výrobku udávají tvarové části vstřikovací formy, které musí být zvětšeny o hodnotu smrštění vstřikovaného materiálu. Tvárník s tvárnicí jsou vloženy do kotevních desek.

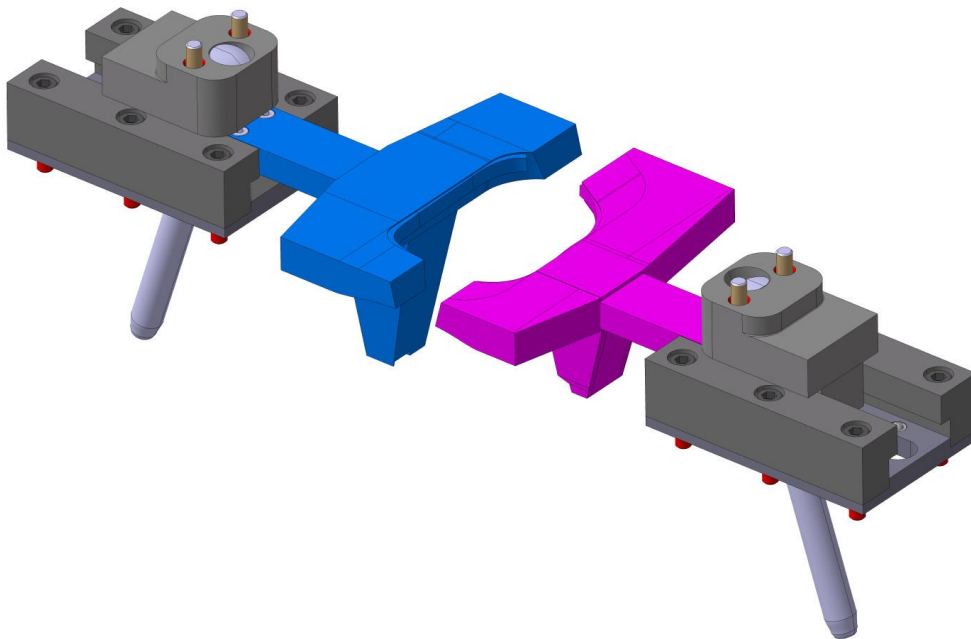


Obr. 52: Tvárnice



Obr. 53: Tvárník

V levé kotevní desce se nachází boční posuvné čelisti (Obr. 54), které jsou připevněné šrouby k posuvné jednotce. Pohyb zajišťuje šikmý kolík, který je upevněn v pravé kotevní desce. Tento kolík vychází z normálií Meusburger a je uložen v uzavíracím klínu pod úhlem  $18^\circ$ . Délka šikmého kolíku určuje délku dráhy potřebné pro odformování. Pro obě boční čelisti je tato dráha totožná.



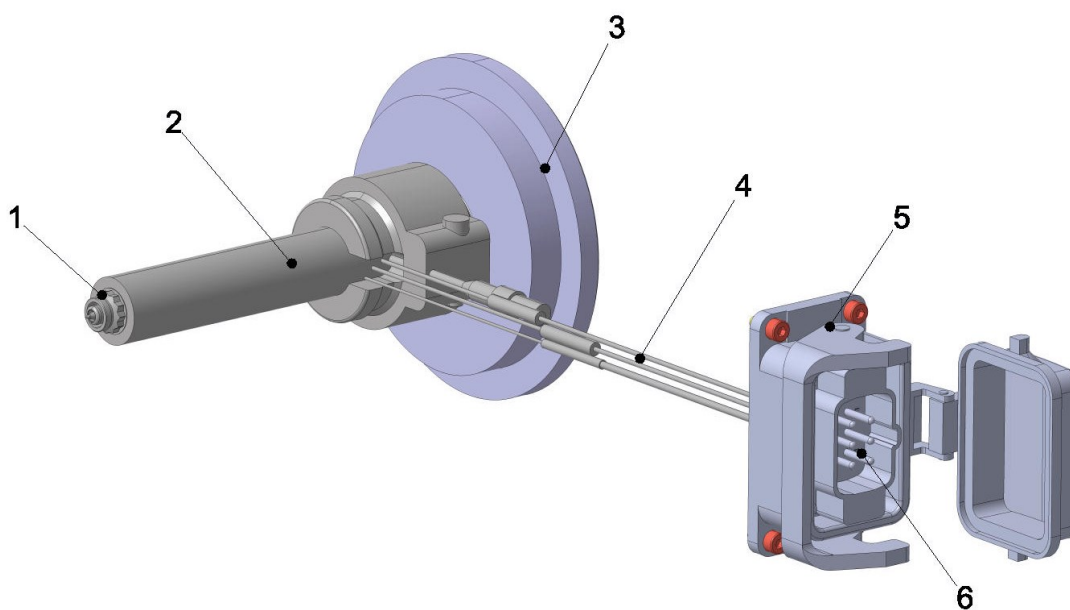
Obr. 54: Boční posuvné čelisti

### 10.3 Vtokový systém

Vtokový systém (Obr. 55 a 56) je kombinací studeného a horkého vtoku. Studený vtokový systém byl zvolen z vizuálního hlediska, aby vtok nebyl umístěn na pohledovou část výstřiku. Horký vtokový systém byl zvolen z důvodu úspory materiálu.

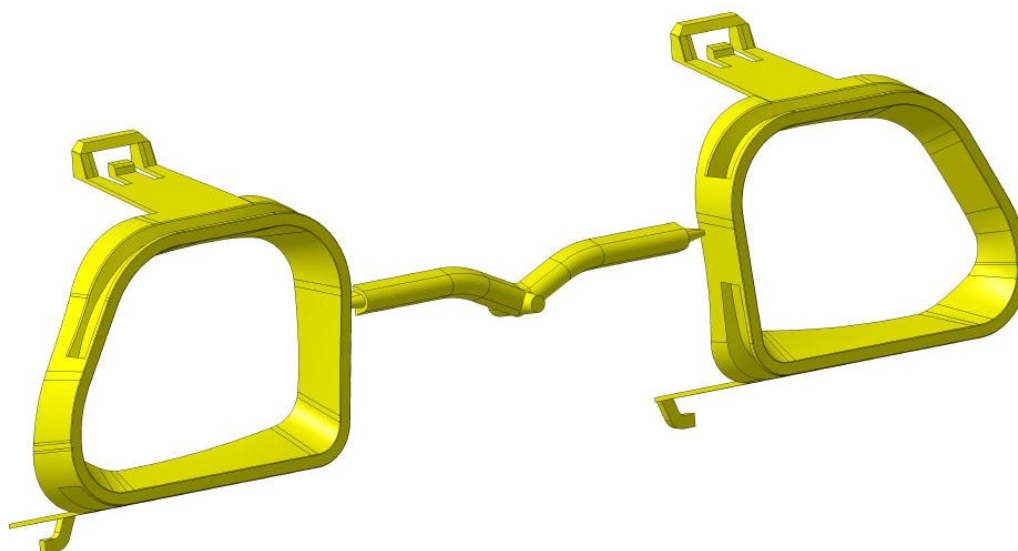
Horká tryska je vygenerována z katalogu normálií od firmy Meusburger. Vtoková tryska obsahuje torpédo, které zajišťuje lepší přívod tepla. Průměr horké trysky je 4 mm. Z trysky se tavenina dostává do rozvodného kanálu, který je již součástí studeného vtokového systému. Rozvodný kanál dopravuje taveninu do vtokového ústí.





*Obr. 55: Vtokový systém*

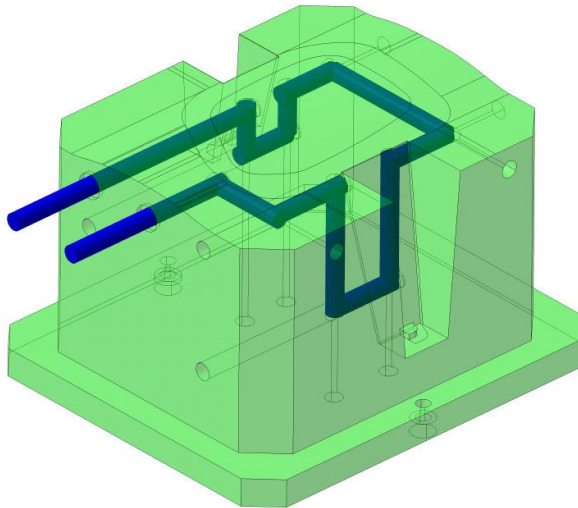
1 – horká tryska; 2 – rozvodný kanál, 3 – středící kroužek, 4 – kabeláž,  
5 – ochranný kryt zásuvky, 6 – zásuvka



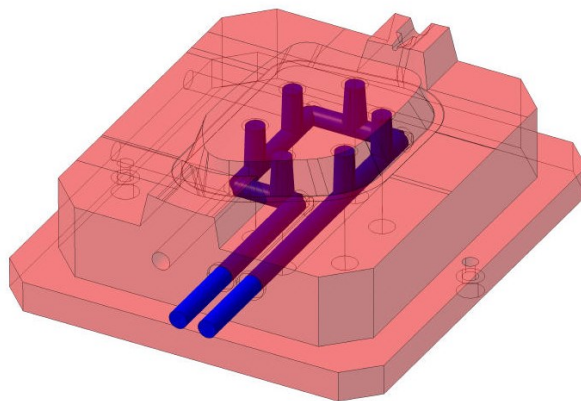
*Obr. 56: Vstřikovaný díl s vtokovým systémem*

## 10.4 Temperační systém

Temperační systém se nachází na levé i pravé části vstřikovací formy. Celkově je tvořen čtyřmi temperačními okruhy. Dva okruhy regulují teplotu tvárnice (Obr. 57) a zbylé dva teplotu tvárníku (Obr. 58). Temperační systém je tvořen temperačními kanály o průměru 6 mm a přepážkami. Poloha temperačního systému je přizpůsobena vyhazovacímu systému. Temperační okruh je vymezen dvěma druhy záslepek. Na začátku a na konci temperačního systému se nachází přípojky, pomocí kterých je forma připojena k temperační jednotce. Chladicím médiem pro daný výstřik je demineralizovaná voda z důvodu použití malých temperačních kanálů. Pokud by byla použita obyčejná voda, mohlo by dojít k zanesení kanálu vodním kamenem.

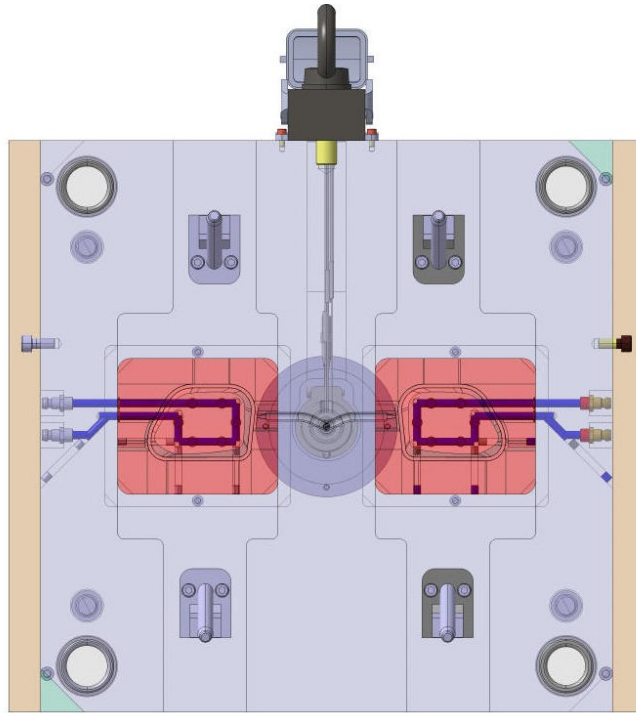


Obr. 57: Temperace tvárníku



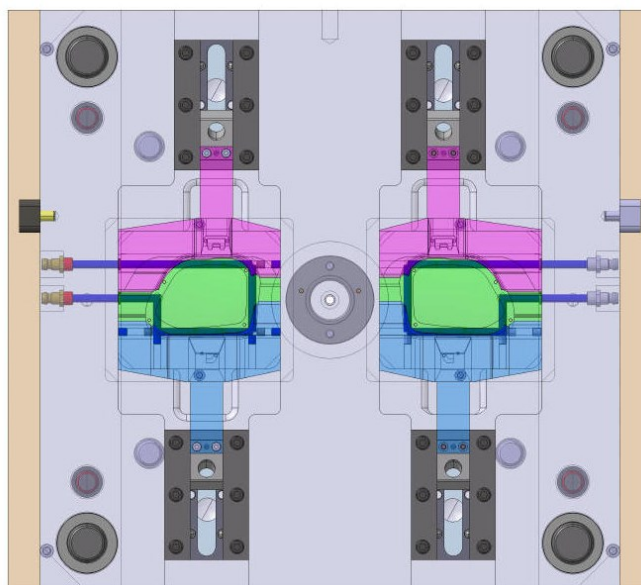
Obr. 58: Temperace tvárnice

Obr. 59 zobrazuje průtok temperačního média v pravé části formy, kde se nachází tvárnice. Médium je zobrazeno tmavě modrou barvou.



Obr. 59: Temperační systém – pravá strana formy

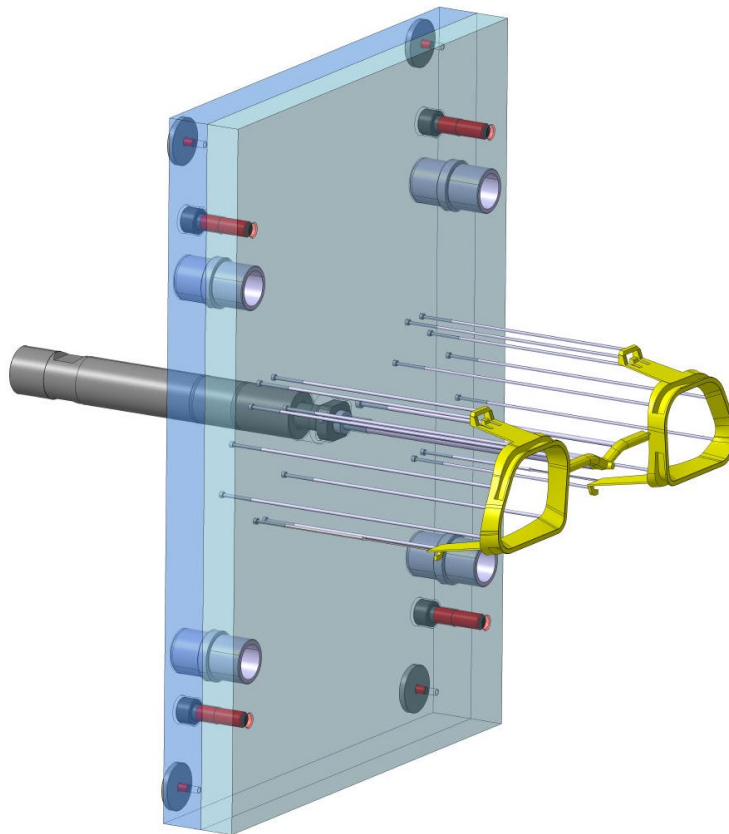
Na Obr. 60 je zobrazen průtok temperačního média v levé části formy, kde se naopak nachází tvárník.



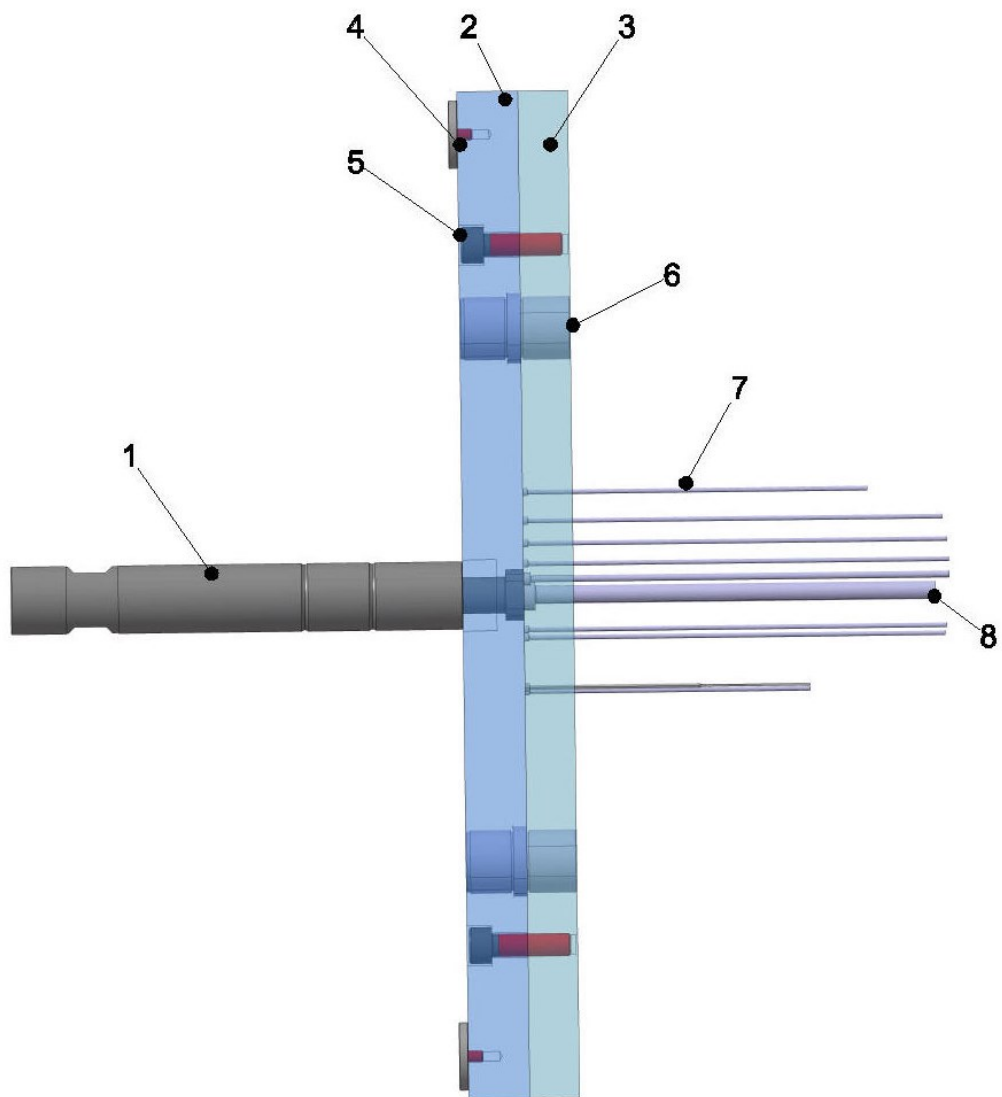
Obr. 60: Temperační systém – levá strana formy

## 10.5 Vyhazovací systém

Mezi hlavní aspekty, které mají vliv na správné vyhození výstřiku, patří zvolení dostatečného počtu vyhazovačů a použitý druh vyhazovačů. Pro daný výstřik bylo použito 16 kalených a 2 ploché vyhazovače. Pro vtokových zbytek byly použity 3 kalené vyhazovače, z nichž jeden slouží i jako přidržovač vtoku. Všechny vyhazovače jsou umístěné mezi dvě vyhazovací desky, které jsou k sobě připevněné. V těchto deskách se nachází vodící pouzdro, které slouží k vedení vyhazovacího systému. Na jedné z desek jsou připevněné dorazy sloužící k tlumení rázu při pohybu vyhazovacího systému. O pohyb vyhazovací kazety se stará táhlo připevněné k jedné z vyhazovacích desek. O připevnění se stará závitový šroub pro vyhazovací paket od firmy Meusburger. Vyhazovací systém je zobrazen na *Obr. 61 a 62*.



*Obr. 61: Vyhazovací systém*



Obr. 62: Vyhazovací systém – Schéma vyhazovacího systému

- 1 - táhlo, 2 - vyhazovací deska opěrná, 3 - vyhazovací deska kotevní, 4 - dorazy,  
5 - šrouby, 6 - vodící pouzdra, 7 - vyhazovače, 8 - přidržovač vtoku

## 10.6 Transportní systém

K manipulaci formy je zapotřebí formu vybavit manipulačními a transportními prvky. Pro transport formy byl zvolen upravený transportní můstek od firmy Hasco s označením Z70 s nosností do 800 kg. Tento můstek je umístěn na horní části formy, transportní oko lze přemístit do těžiště formy. Pro zajištění proti otevření formy je forma vybavena transportním zámkem od firmy Hasco s označením Z73. Transportní můstek s transportním zámkem je zobrazen na *Obr. 63*.

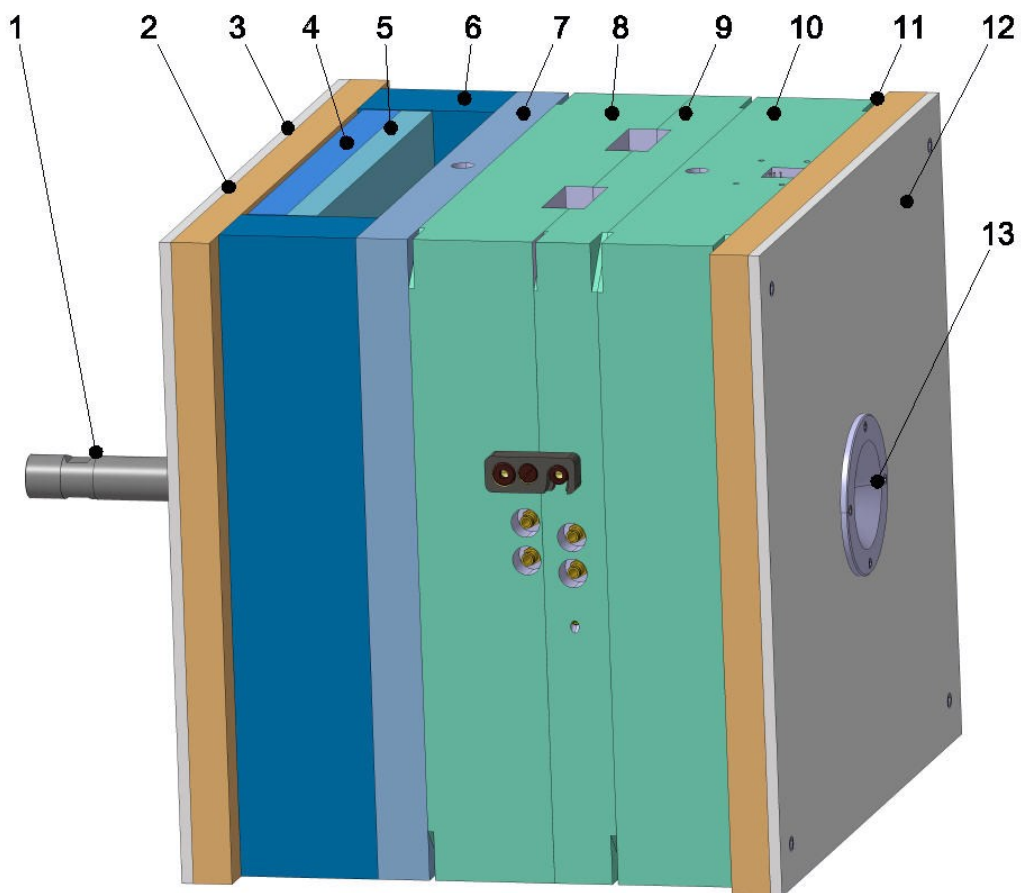


*Obr. 63: Transportní můstek s transportním zámkem*

## 10.7 Rám formy

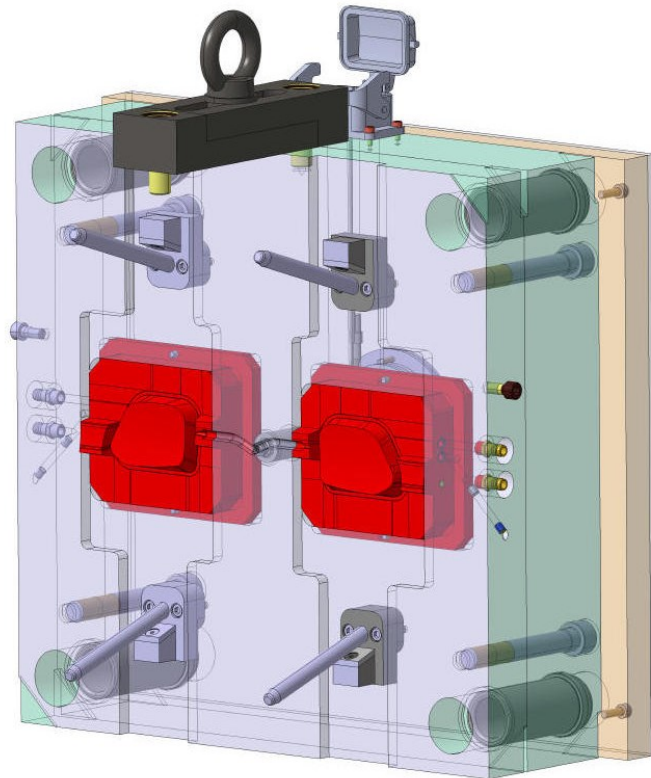
Základní částí rámu formy (Obr. 64) jsou upínací desky o rozměrech 496x446 mm. Mezi upínacími deskami jsou umístěné ostatní desky s rozměry 446x446 mm. Rám formy je dále tvořen spojovacími, vodícími a středícími prvky. Uvnitř rámu formy se nachází tvarové části formy, vtokový, temperační a vyhazovací systém. Rám má dvě části, pevnou a pohyblivou. Na stranách rámu formy jsou uloženy izolační desky ze sklotextitu sloužící k izolaci tepla.

Na obrázku (Obr. 65 a 66.) je zobrazena levá a pravá část vstříkovací formy.

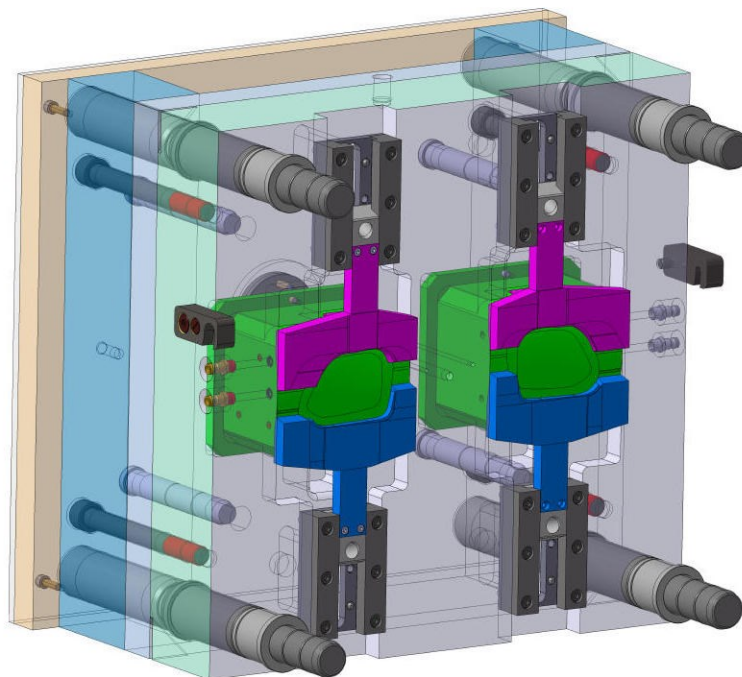


Obr. 64: Rám formy

- 1 - táhlo; 2, 12 - izolační desky; 3, 11 - upínací desky; 4 - vyhazovací deska opěrná;  
 5 - vyhazovací deska kotevní; 6 – rozpěrky; 7 - opěrná deska; 8, 9 - kotevní desky;  
 10 - deska pro rozvodný systém; 13 - středící kroužek



*Obr. 65: Pravá strana formy*



*Obr. 66: Levá strana formy*



## DISKUZE VÝSLEDKŮ

Diplomová práce vycházela z oficiálního zadání. Náplní diplomové práce byla optimalizace procesu vstřikování a vytvoření návrhu vstřikovací formy pro výrobu plastového dílu, který je součástí mlhového světla automobilu. Tento díl slouží pro uchycení čočky do rámu světla. Optimalizace procesu proběhla v programu Autodesk Moldflow 2023 Synergy a následná konstrukce proběhla v programu Catia V5 2019.

Před optimalizací vstřikovací formy byl nejprve vytvořen 3D model dílu za pomoci programu Catia V5. Po vytvoření modelu byl díl vložen do programu Moldflow, kde byly vytvořeny analýzy pro dva typy vtoku, dva typy materiálu – PA 6 a PBT, zároveň se dvěma typy temperačních systémů. Výsledky vybraných parametrů jsou zobrazeny v následujících tabulkách (*Tab. 7-9*).

První analýza poskytla informace o výběru vtokového systému. V *Tab. 7* je zobrazen čas plnění, tlak při přepnutí na dotlak a teplota na čele taveniny jak pro studený, tak pro kombinaci studeného a horkého vtokového systému. Použití kombinace studeného a horkého vtokového systému se jeví jako lepší varianta, a to hlavně z důvodu hodnoty tlaku při přepnutí na dotlak, kdy při použití kombinovaného vtokového systému tlak dosáhne o zhruba 16 MPa nižší hodnoty než při použití studeného vtokového systému. Tato hodnota je důležitá hlavně pro vstřikovací formu, která bude v důsledku nižšího tlaku méně namáhána než při použití studeného vtokového systému. Rozdíly hodnot času plnění a teploty na čele taveniny jsou zanedbatelné, výběr vtokového systému na ně nemá vliv.

*Tab. 7: Analýzy vtokového systému*

	<b>Studený vtokový systém</b>	<b>Kombinace vtokového systému</b>
Čas plnění [s]	1,27	1,29
Tlak při přepnutí na dotlak [MPa]	88,03	71,68
Teplota na čele taveniny [°C]	240,80	240,60

Další výsledky analýzy byly věnovány konvekční a vrtané temperaci. V *Tab. 8* je zobrazena teplota a tlak temperačního média pro oba typy temperace. Tato analýza byla provedena hlavně z důvodu zjištění tlaku temperačního média, který může nabývat hodnoty maximálně 400 kPa. V případě vrtaného temperačního systému dosahuje hodnoty tlaku 96 kPa a v případě konvekčního systému 19 kPa. Obě hodnoty jsou nižší než maximální povolený

tlak, tudíž rozhodnutí o tom, jaká bude lepší temperace bylo provedeno na základě ceny. Z ekonomického hlediska byl tedy zvolen vrtaný temperační systém s šesti přepážkami.

*Tab. 8: Analýzy temperace*

	<b>Vrtaný temperační systém</b>	<b>Konvekční temperační systém</b>
Teplota temperačního média [°C]	77,98	78,21
Tlak temperačního média [kPa]	95,88	18,45

Poslední výsledky analýzy poskytly informace o použití vhodného materiálu. Rozhodovalo se mezi dvěma typy – PA6 a PBT. Z *Tab. 9* lze vyčíst několik porovnávacích kritériích, a to tlak při přepnutí na dotlak, teplotu na čele taveniny a hodnotu deformace. Pro toto porovnání byla zvolena kombinace vtokového systému s vrtanou temperací z předchozích analýz. Hlavně z důvodu nižší hodnoty tlaku při přepnutí na dotlak (o cca 21 MPa) byl zvolen materiál PBT, a to i na úkor větší hodnoty deformace. Dalším z důvodů byl kratší čas tuhnutí materiálu. Teplota na čele taveniny byla téměř shodná pro oba materiály.

*Tab. 9: Analýzy materiálu*

	<b>PBT</b>	<b>PA6</b>
Tlak při přepnutí na dotlak [MPa]	51,29	71,89
Teplota čela taveniny [°C]	241,2	240,6
Deformace	2,396	1,459

## ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo optimalizovat nástroj pro vstřikování plastového dílu části mlhového světlometu pro osobní automobil.

Na úvod praktické části byl vytvořen 3D model vstřikovaného dílu. Pro tento model bylo vytvořeno celkem 6 analýz, které určily vhodný materiál a typ vtokového a temperačního systému.

Po vyhodnocení všech analýz se jako nejlepší jevila analýza s použitím materiálu PBT (Lutrel PBT-GP1000-NP) od výrobce LG Chemical v kombinaci se studeným a vyhřívaným vtokovým systémem společně s vrtaným temperačním systémem.

Nakonec byla zhotovena konstrukce vstřikovací formy. Forma byla zvolena jako dvounásobná. Odformování dílu je zajištěno mechanicky posuvnou jednotkou. Temperaci formy zajišťují vrtané kanály, které jsou vymezené do nejefektivnějšího temperačního okruhu. Vyhození výstřiku se děje pomocí několika druhů vyhazovačů s celkovým počtem 21 kusů.

Při konstrukci vstřikovací formy byla většina dílů odebírána z online katalogu normalizovaných dílů od firmy Meusburger a Hasco. Konstrukce dílu a vstřikovací formy probíhala v programu Catia V5 2019, v tomto programu byla zároveň vytvořena i výkresová dokumentace. Tokové analýzy byly provedeny v programu Moldflow Synergy 2023 od firmy Autodesk.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CATOEN, Bruce a Herbert REES. *Injection Mold Design Handbook*. Munich: Hanser Publishers, 2021. ISBN 978-1-5231-4500-3.
- [2] RAGAN, Emil, Juraj RUŽBARSKÝ a Miroslav MAŇAS. *Vstrekovanie a spracovanie plastických hmôt*. 1. vyd. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity, 2008. ISBN 9788055301020.
- [3] GOODSHIP, Vannessa. *Practical Guide to Injection Moulding*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire,: Rapra Technology, 2004. ISBN 1-85957-444-0.
- [4] ZEMAN, Lubomír. *Vstříkování plastů: teorie a praxe*. Praha: BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [5] GORDON, M. Joseph. *Total Quality Process Control for Injection Molding*. 2. vyd. New York: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-0-470-58448-4.
- [6] BOBEK, Jiří. *Vstříkovací formy pro zpracování termoplastů*. 1. vyd. Brno: Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-65-6.
- [7] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů-Polymery*. 1. vyd. Praha: CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-833-5.
- [8] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. Pardubice: Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-71-7.
- [9] LENFELD, Petr. *Technologie II*. 3. vyd. Liberec: echnická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-305-8.
- [10] Injection Molding Explained. In: *Manufacturing Solutions Group* [online]. Washington: MCI Technologies, 2017 [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://manufacturingsolutionsgroup.com/injection-molding-explained/>
- [11] BRYCE, M. *Plastic injection molding: manufacturing startup and management*. Michigan: SME, 1999. ISBN 0-87263-503-1.
- [12] LENFELD, Petr. *Technologie vstříkování*. 1. vyd. Brno: Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-72-4.
- [13] *Arburg* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/spektrum-sluzeb/vstrikovani/vstrikovaci-stroje/hydraulicke-stroje/>
- [14] STOKLASA, Karel. *Makromolekulární chemie I*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005.
- [15] OSSWALD, Tim A. a Georg MENGES. *Material science of polymers for engineers*. 3. vyd. Cincinnati: Hanser Publishers, 2012. ISBN 978-1-56990-524-1.
- [16] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. 1. vyd. Brno: Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [17] SELKE, Susan E.M a John CULTER. *Plastics Packaging - Properties, Processing, Applications, and Regulations*. 3. vyd. Munich: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-5231-0586-1.
- [18] VASCHUK, A., A.M. FAINLEIB, O. STAROSTENKO a D. GRANDE. *Application of ionic liquids in thermosetting polymers: Epoxy and cyanate ester resins*. Institute of Macromolecular Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, 2018. Dostupné z: doi:10.3144/expresspolymlett.2018.77

- [19] BENEŠ, Libor. *Plasty* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/polymvsauto/PLASTY\\_presentace\\_uvodni%20seznameni.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/polymvsauto/PLASTY_presentace_uvodni%20seznameni.pdf)
- [20] CAMPO, E. Alfredo. *Complete Part Design Handbook- For Injection Molding of Thermoplastics*. 1. vyd. Munich: Hanser Publishers, 2006. ISBN 978-1-56990-375-9.
- [21] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. Dotisk 1. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2015. ISBN 978-80-7080-367-7.
- [22] KAZMER, David. *Injection mold design engineering*. 1. vyd. Munich: Hanser Publishers, 2007. ISBN 978-3-446-41266-8.
- [23] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů 2. díl, Vstřikování termoplastů*. 1. vyd. Brno: Uniplast, 1999.
- [24] VALERO, Lerma. *Plastics Injection Molding: Scientific Molding, Recommendation, and Best Practices*. Munich: Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-689-7.
- [25] KAZMER, David. *Injection mold design engineering*. 2. vyd. Munich: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-570-8.
- [26] HYNEK, Martin. *Studené a živé vtokové systémy* [online]. In: . Západočeská univerzita v Plzni, 2013 [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: [https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publicace/KA05\\_Studene\\_a\\_zive\\_vtokove\\_systemy.pdf](https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Studene_a_zive_vtokove_systemy.pdf)
- [27] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide*. 2. vyd. Munich: Hanser Publishers, 2021. ISBN 978-1-56990-834-1.
- [28] *Mold Master* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://www.moldmasters.com/blog/what-is-a-hot-runner>
- [29] HYNEK, Martin. *Horké vtoky* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 013 [cit. 2023-01-11].
- [30] WANG, Mam-Ling, Rong- Yeu CHANG a Chia-Hsiang HSU. *Molding Simulation: Theory and Practice*. Munich: Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-619-4.
- [31] HYNEK, Martin. *Temperace vstřikovacích forem* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: [https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publicace/KA05\\_Temperace\\_vstrikovacich\\_forem.pdf](https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf)
- [32] ROMERO, Josep. *The definitive guide to plastics injection molding*. Independently published, 2020. ISBN 979-8675257898.
- [33] MALLOY, Robert A. *Plastic Part Design for Injection Molding- An Introduction*. 2. vyd. Munich: Hanser Publisher, 2010. ISBN 978-1-56990-436-7.
- [34] *Burn marks troubleshooting* [online]. Wen Ming South Road, China: Plasticmold, 2012 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.plasticmold.net/burn-marks-troubleshooting/>
- [35] *Moldex3d* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: [https://www.moldex3d.com/on\\_demand\\_webinar/solving-weld-line-and-air-traps-through-simulation/](https://www.moldex3d.com/on_demand_webinar/solving-weld-line-and-air-traps-through-simulation/)
- [36] *Autodesk Moldflow* [online]. 2016 [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/dl/Autodesk-Simulation-Moldflow.pdf>
- [37] *Smartplast* [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <http://www.smartplast.cz/snizovani-vyrobnich-nakladu-pomoci-simulacni-analyzy/K>

- [38] *Autodesk Moldflow* [online]. Praha: Arkance systems, 2023 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.arkance-systems.cz/produkty/cad-cam-pro-strojirenstvi/autodesk-moldflow>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

V	Objem
T	Teplota
p	Tlak
PA	Polyamid
PC	Polycarbonát
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
SAN	Styren-akrylonitril
PP	Polypropylen
PE	Polyethylen
POM	Polyoxymetylén
CAD	Computer aided design
PA6	Polyamid 6
PBT	Polybutylen- tereftalát
%	Procento
2D	Dvojměrný prostor
3D	Trojměrný prostor
mm	Milimetr
cm <sup>3</sup>	Centimetr krychlový
kN	Kilonewton
°C	Stupeň Celsia
MPa	Megapascal

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1: Schéma vstříkovacího cyklu [2]</i> .....	12
<i>Obr. 2: pvT diagram [2]</i> .....	14
<i>Obr. 3: Zaoblení hran [6]</i> .....	15
<i>Obr. 4: Volba úkosů [6]</i> .....	15
<i>Obr. 5: Volba žeber [6]</i> .....	16
<i>Obr. 6: Schéma vstříkovacího stroje [6]</i> .....	17
<i>Obr. 7: Vstříkovací tryska [11]</i> .....	18
<i>Obr. 8: Uzavírací jednotka [13]</i> .....	19
<i>Obr. 9: Makromolekulární struktura termoplastů [18]</i> .....	21
<i>Obr. 10: Nadmolekulární struktura – amorfní polymery [16]</i> .....	21
<i>Obr. 11: Nadmolekulární struktura – semikrystalické polymery [16]</i> .....	22
<i>Obr. 12: Makromolekulární struktura reaktoplastů [18]</i> .....	23
<i>Obr. 13: Makromolekulární struktura elastomerů [18]</i> .....	23
<i>Obr. 14: Schéma vstříkovací formy [6]</i> .....	25
<i>Obr. 15: Řez studeným vtokovým systémem [26]</i> .....	27
<i>Obr. 16: Schéma horkého vtokového systému [28]</i> .....	28
<i>Obr. 17: Schéma plochých přepážek [6]</i> .....	30
<i>Obr. 18: Studené spoje [27]</i> .....	33
<i>Obr. 19: Diesel efekt [34]</i> .....	34
<i>Obr. 20: Přetoky [27]</i> .....	35
<i>Obr. 21: Nedotečený díl [27]</i> .....	35
<i>Obr. 22: Jetting [27]</i> .....	36
<i>Obr. 23: Vzduchové kapsy [35]</i> .....	36
<i>Obr. 24: Vstříkovaný díl</i> .....	40



---

<i>Obr. 25: Vysíťovaný díl</i> .....	41
<i>Obr. 26: Chemická struktura polyamidu 6</i> .....	42
<i>Obr. 27: Esterová vazba</i> .....	43
<i>Obr. 28: Vstřikovací stroj Arburg allrounder 520A</i> .....	44
<i>Obr. 29: Čas plnění u volby vtokového ústí</i> .....	45
<i>Obr. 30: Tlak při přepnutí na dotlak u volby vtokového ústí</i> .....	46
<i>Obr. 31: Teplota na čele taveniny u volby vtokového ústí</i> .....	46
<i>Obr. 32: Vtokový systém</i> .....	47
<i>Obr. 33: Efektivita temperačních okruhů u dvou variant temperací</i> .....	48
<i>Obr. 34: Teplota temperačních okruhů u dvou variant temperací</i> .....	48
<i>Obr. 35: Tlaky v temperačních okruzích u dvou variant temperací</i> .....	49
<i>Obr. 36: Tlak při přepnutí na dotlak u porovnávaných materiálů</i> .....	50
<i>Obr. 37: Teplota čela taveniny u porovnávaných materiálů</i> .....	51
<i>Obr. 38: Čas tuhnutí u porovnávaných materiálů</i> .....	52
<i>Obr. 39: Deformace u porovnávaných materiálů</i> .....	52
<i>Obr. 40: Přehled doporučených procesních parametrů</i> .....	54
<i>Obr. 41: Zvolené procesní parametry 1</i> .....	55
<i>Obr. 42: Zvolené procesní parametry 2</i> .....	55
<i>Obr. 43: Vložený blok formy</i> .....	55
<i>Obr. 44: Čas plnění</i> .....	56
<i>Obr. 45: Tlak při přepnutí na dotlak</i> .....	57
<i>Obr. 46: Průběh tlaku v místě ústí vtoku</i> .....	57
<i>Obr. 47: Průběh uzavírací síly</i> .....	58
<i>Obr. 48: Smyková deformace</i> .....	59

---

<i>Obr. 49: Temperace dílu</i> .....	60
<i>Obr. 50: Deformace dílu (3 x zvětšeno)</i> .....	61
<i>Obr. 51: Forma</i> .....	62
<i>Obr. 52: Tvárnice</i> .....	63
<i>Obr. 53: Tvárník</i> .....	63
<i>Obr. 54: Boční posuvné čelisti</i> .....	64
<i>Obr. 55: Vtokový systém</i> .....	65
<i>Obr. 56: Vstříkovaný díl s vtokovým systémem</i> .....	65
<i>Obr. 57: Temperace tvárníku</i> .....	66
<i>Obr. 58: Temperace tvárnice</i> .....	66
<i>Obr. 59: Temperační systém – pravá strana formy</i> .....	67
<i>Obr. 60: Temperační systém – levá strana formy</i> .....	67
<i>Obr. 61: Vyhazovací systém</i> .....	68
<i>Obr. 62: Vyhazovací systém – Schéma vyhazovacího systému</i> .....	69
<i>Obr. 63: Transportní můstek s transportním zámkem</i> .....	70
<i>Obr. 64: Rám formy</i> .....	71
<i>Obr. 65: Pravá strana formy</i> .....	72
<i>Obr. 66: Levá strana formy</i> .....	72

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1: Vlastnosti polymerů v závislosti na tvaru řetězce [16].....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2: Teploty jednotlivých typů polymeru během procesu vstřikování [12].....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 3: Doporučené šířky odvzdušňovacích kanálů dle typu použitého polymeru [6].....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4: Vybrané vlastnosti materiálu PA6 Generic Estimates .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5: Vybrané vlastnosti materiálu Lutrel PBT-GP1000-NP .....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6: Jednotlivé parametry .....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 7: Analýzy vtokového systému .....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 8: Analýzy temperace .....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 9: Analýzy materiálu .....</i>	<i>74</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

PI: POHLED DO LEVÉ DUTINY FORMY

PII: POHLED DO PRAVÉ DUTINY FORMY

PIII: SESTAVA FORMY

PIV: KUSOVNÍK SESTAVY

PV: TECHNICKÉ DATA K ARBURG ALLROUNDER 520S

PVI: SESTAVA

PVII: ANALÝZY