

# Konstrukční návrh vstřikovací formy

Bc. Štěpán Hradil

---

Diplomová práce  
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Štěpán Hradil
Osobní číslo:	T21402
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh vstříkovací formy

## Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární studii na dané téma.
- Provedte konstrukci zadaného dílu.
- Navrhněte 3D sestavu vstříkovací formy pro výrobu zadaného dílu.
- Nakreslete 2D výkresy sestavy a příslušných řezů.
- Návrh ověřte pomocí analýz.

---

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

**Seznam doporučené literatury:**

KAZMER, David. *Injection mold design engineering*. 2nd edition. Munich: Hanser, [2016], xxiv, 529 s. ISBN 9781569905708

KENNEDY, Peter a Rong ZHENG. *Flow analysis of injection molds*. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Publishers, [2013], 1 online zdroj (xxviii, 349 p.). ISBN 9781569905227

BEAUMONT, John P. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, 2019, xx, 450 s. ISBN 978-1-56990-590-6

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Michal Staněk, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 27. února 2024

## 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 na 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

a)

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem vstřikovací formy pro součást mechanismu tiskárny. V teoretické části práce se nachází literární rešerše na téma související s konstrukcí vstřikovací formy. Konkrétně se jedná o principy vstřikovacího procesu, možné vady, jež se mohou na výrobku objevit a také ekonomická stránka konstrukce a výroby vstřikovací formy. Praktická část obsahuje uplatnění těchto znalostí na proces konstrukčního návrhu formy. Pro optimalizaci i následnou kontrolu funkčnosti byly provedeny tokové analýzy.

Klíčová slova: vstřikovací forma, vstřikování, toková simulace, POM

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on the design of an injection mold for a printer mechanism component. The theoretical part includes a literature review related to the construction of injection molds. Specifically, it discusses the principles of the injection molding process, potential defects that may appear on the product, and the economic aspects of the design and production of injection molds. The practical part applies this knowledge to the process of designing the mold. Flow analyses were conducted for optimization and subsequent functional verification.

Keywords: injection mold, injection molding, flow analysis, POM

Chtěl bych poděkovat všem lidem z univerzity, kteří mi vždy vyšli vstříc během celé doby mého studia. Především pak panu profesoru Staňkovi za jeho pomoc a ochotu nejen při vedení mé diplomové práce.

Hlavní poděkování si však zaslouží rodina, která mě vždy podporovala během studia.

Arrivederci FT!

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
1.1 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA .....	12
1.2 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA.....	13
1.3 VSTŘIKOVACÍ PROCES .....	13
1.3.1 Uzavření formy .....	15
1.3.2 Vstřikování .....	15
1.3.3 Dotlak.....	15
1.3.4 Chlazení.....	16
1.3.5 Plastikace.....	16
1.3.6 Otevření formy a odstranění výrobku z dutiny formy .....	16
<b>VSTŘIKOVACÍ FORMA</b> .....	<b>17</b>
1.4 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY .....	17
1.5 MATERIÁLY PRO KONSTRUKCI VSTŘIKOVACÍ FORMY .....	18
1.6 VTOKOVÝ SYSTÉM .....	18
1.7 STUDENÝ VTOKOVÝ SYSTÉM.....	19
1.7.1 Vtokové ústí .....	20
1.8 VYHŘÍVANÝ VTOKOVÝ SYSTÉM .....	22
1.8.1 Vtokové ústí .....	23
<b>2 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>25</b>
2.1 VLASTNOSTI VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ .....	25
2.2 DRUHY MATERIÁLŮ POUŽÍVANÉ PRO VSTŘIKOVÁNÍ .....	25
2.3 POLYOXYMETHYLEN – POM.....	26
2.4 TECHNOLOGICKÉ ZPRACOVÁNÍ POM .....	27
<b>3 ZÁVADY A OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU</b> .....	<b>28</b>
3.1 NASTAVENÍ VSTŘIKOVACÍHO PROCESU .....	28
3.1.1 Nastavení plastikační fáze .....	28
3.1.2 Nastavení vstřikovací fáze .....	29
3.1.3 Nastavení dotlakové fáze .....	30
3.1.4 Nastavení ochlazovací fáze .....	30
3.2 VADY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ .....	31
3.2.1 Nedotečený výrobek.....	31
3.2.2 Propadliny na výrobku .....	31
3.2.3 Studený spoj .....	32
3.2.4 Přetoky .....	33
3.2.5 Spálená místa .....	34
3.2.6 Stříbření.....	34
3.2.7 Tokové čáry.....	35

	3.2.8	Jetting .....	36
<b>4</b>		<b>EKONOMIKA VSTŘIKOVÁNÍ .....</b>	<b>37</b>
	4.1	NÁKLADY NA VSTŘIKOVACÍ FORMU .....	37
	4.1.1	Počáteční investice .....	37
	4.1.2	Materiály .....	37
	4.1.3	Výrobní procesy .....	38
	4.2	OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU .....	39
	4.3	POROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ VSTŘIKOVACÍCH FOREM .....	40
	4.3.1	Jednonásobná forma .....	40
	4.3.2	Vícenásobná forma .....	40
	4.3.3	Forma pro dvou stupňové vstřikování .....	41
		<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>		<b>STANOVENÍ CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>44</b>
<b>II</b>	<b>6</b>	<b>ZADANÝ VÝROBEK .....</b>	<b>45</b>
	<b>7</b>	<b>NASTAVENÍ SIMULACE TOKU MATERIÁLU .....</b>	<b>46</b>
	7.1	TVORBA SÍTĚ .....	46
	7.2	UMÍSTĚNÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ .....	47
	7.3	VOLBA VTOKOVÉHO SYSTÉMU .....	48
	7.4	VOLBA VTOKOVÉHO ÚSTÍ .....	49
	7.5	ČAS PLNĚNÍ .....	51
	7.6	UZAVÍRACÍ SÍLA .....	52
	7.7	VZDUCHOVÉ KAPSY .....	53
	7.8	TEPLOTA TAVENINY .....	54
	7.9	RYCHLOST SMYKOVÉ DEFORMACE .....	55
	7.10	TEMPERACE .....	56
<b>8</b>		<b>KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY .....</b>	<b>59</b>
	8.1	DĚLICÍ ROVINY .....	59
	8.2	TVAROVÉ ČÁSTI .....	59
	8.3	RÁM .....	62
	8.4	VTOKOVÝ SYSTÉM .....	64
	8.5	TEMPERACE FORMY .....	65
	8.6	VYHAZOVACÍ SYSTÉM .....	67
<b>9</b>		<b>VSTŘIKOVACÍ STROJ .....</b>	<b>69</b>
<b>10</b>		<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>70</b>
		<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
		<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>76</b>



<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>77</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>79</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>80</b>

## ÚVOD

Vstřikování plastů se řadí mezi nejrozšířenější procesy výroby plastových dílů. Je klíčovou technikou pro přeměnu plastového materiálu na různé produkty a účely, od automobilového průmyslu přes elektroniku, medicínu, sport a rekreaci až po stavebnictví a spotřební zboží. Rozsah použití této technologie je velmi široký, co se týká oblasti použití výrobků, i velikostí výrobků jež lze vyrobit. Mezi největší výhody této technologie patří její možnost vysoké automatizace výroby. Díky tomu, že proces je cyklický, není potřeba neustálého lidského dohledu a velkou část obsluhy stroje lze zastat pomocí robotů. [1]

Historie této technologie sahá do počátku třicátých let minulého století, kdy začaly vznikat první vstřikovací stroje. Pokusy s tvářením materiálů pomocí vstřikování se však objevily již daleko dříve. Roku 1872 si bratři Hyattovi nechali patentovat stroj na vstřikování celulózy do dutiny formy. [1] [2]

Vstřikování je definováno jako metoda výroby dílů z tepelně tavitelného plastového materiálu. Toho je dosaženo pomocí vstřikovacího stroje. Tvar vyráběného dílu je definován dutinou nástroje, jenž se nazývá vstřikovací forma. Vstřikovací stroj lze rozdělit na dvě hlavní části: vstřikovací jednotka a uzavírací jednotka. [1]



*Obr. 1 Vstřikovací stroj značky Arburg [3]*

**I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1.1 Vstřikovací jednotka

Primárním účelem vstřikovací jednotky je přeměna granulátu na taveninu. Tavenina je následně vstříknuta do formy vysokou rychlostí a tlakem. Historicky se vstřikovací jednotky spoléhaly na pístový mechanismus, avšak v současnosti převažují šnekové vstřikovací jednotky díky své výhodnější konstrukci pro plastifikaci polymerů. Při srovnání s pístovými jednotkami, kde není plastifikace materiálu rovnoměrná, šnekové jednotky umožňují efektivnější a homogennější plastifikaci. Existují také kombinované vstřikovací jednotky, kdy k plastifikaci materiálu zajišťuje šneková plastikační jednotka, a poté je materiál přesunut do pístové vstřikovací jednotky, která má již za úkol jen zajistit potřebný tlak vstřikování. Rotace šneku generuje pohyb granulí směrem dopředu, což spolu s třením o stěny válce přispívá k rychlejší, rovnoměrnější a ekonomicky efektivnější plastifikaci. [4]

Vstřikovací jednotka je také vyhřívána pomocí topných pásů obepínajících válec šneku z vnější strany. Topné pásy poskytují především výhodu v tom, že umožňují nastavit rozdílnou teplotu pro různé části plastikační jednotky. Pro zajištění správné funkce topných pásů je třeba zajistit dokonalý kontakt mezi pásem a vnějším povrchem válce. V opačném případě bude vzduch nacházející se v meziprostoru sloužit jako tepelný izolant. Důsledkem toho bude snížena efektivita topného pásu, čímž zbytečně roste množství použité energie. [1]

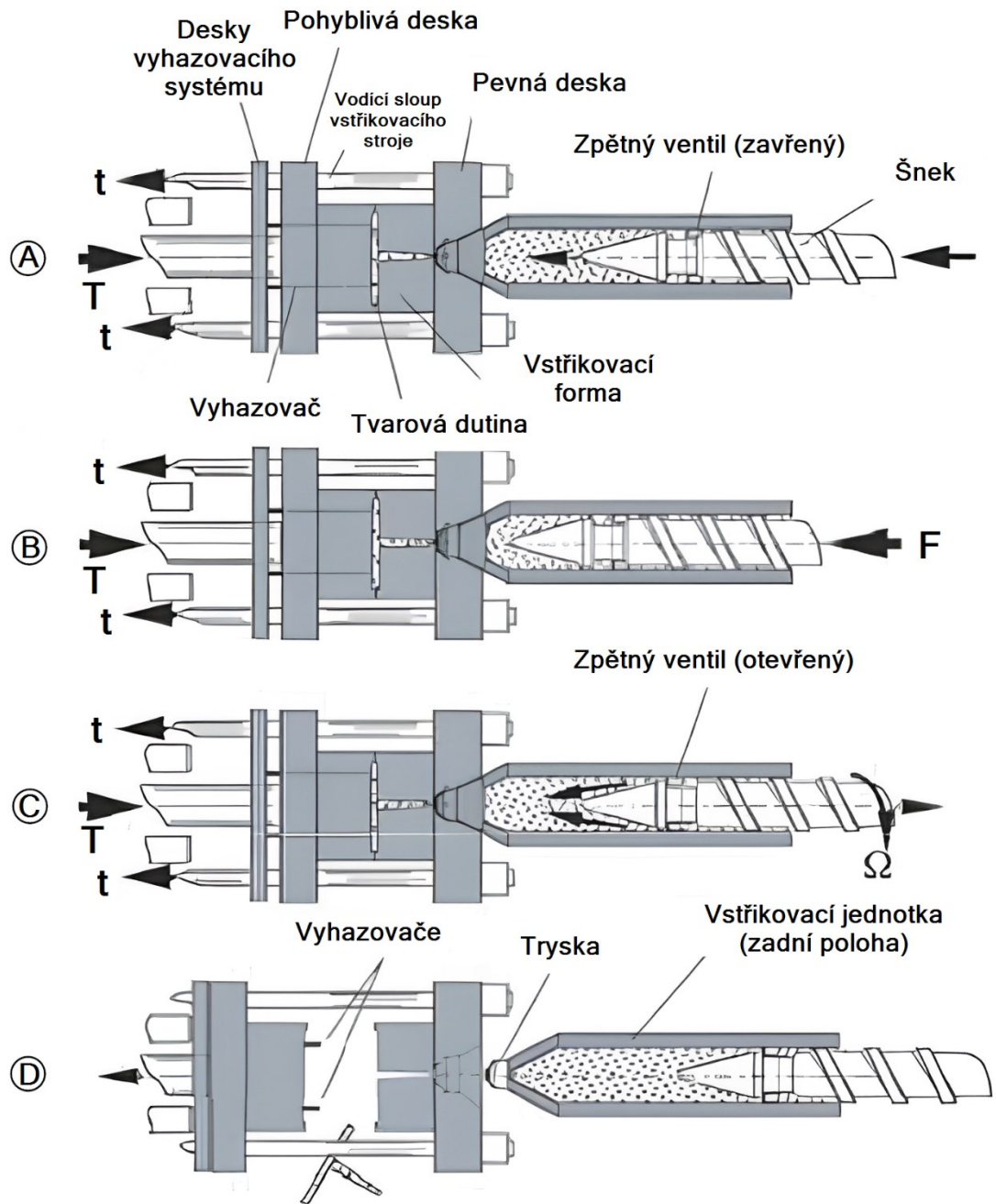
Šnek je hlavní částí vstřikovací jednotky a je rozdělen do tří částí – vstupní, kompresní a dávkovací. Ve vstupní části má šnek hluboký kanál k zajištění plynulé dopravy materiálu do kompresní části. Materiál se zde vyskytuje stále ve formě granulí, dochází však k jeho měknutí. Nastavení teploty je v této části nejnižší, aby se zamezilo předčasnému tavení granulátu a jeho degradaci v následujících částech vstřikovací jednotky. Kompresní část zvětšuje průměr jádra šneku ve směru ke trysce, což vede ke zmenšení prostoru mezi šnekem a válcem. Tím dochází ke zvýšení tření mezi granulátem a stěnou válce, a tedy i k intenzivnějšímu tavení materiálu vlivem přeměny mechanické energie na tepelnou energii, tzv. disipace. Na začátku kompresní části je materiál ve formě granulí, na konci je již pouze ve formě taveniny. Dávkovací část, nacházející se na konci šneku, zabraňuje zpětnému toku taveniny, což má klíčový význam pro zakončení procesu plastifikace. Vstřikovací tryska, umístěná na konci vstřikovací jednotky, pak zajišťuje transport taveniny do formy. [5] [4] [6]

## 1.2 Uzavírací jednotka

Klíčovým úkolem uzavírací jednotky vstřikovacího stroje je zajištění precizního uzavírání, otevírání a řízení pohybu vyhazovacího systému vstřikovací formy. Aby nedocházelo k nechtěnému otevření formy během vstřikovacího cyklu, je nezbytné formu uzavřít s odpovídající silou. Tato síla je nastavitelná a závisí na kombinaci vstřikovacího tlaku, ploše dutiny a rozměrech vtoků v dělicí rovině. Klíčovými komponenty uzavírací jednotky jsou pevná opěrná deska, upínací deska, vodící sloupky a uzavírací mechanismus. Uzavírací mechanismus může být řízen hydraulickou nebo elektromechanickou jednotkou. V případě hydraulické jednotky dochází k zamykání formy kontinuálním hydraulickým tlakem. Hydraulicko-mechanické uzavírací systémy, ačkoliv jsou ovládány hydraulikou, udržují formu uzamčenou prostřednictvím mechanického zajištění. Elektromechanické uzavírací systémy fungují na stejném principu, avšak řízení jejich pohybu je prováděno elektromotory namísto hydrauliky. [5] [4] [6]

## 1.3 Vstřikovací proces

Vstřikovací proces viz. *Obr. 2*, lze rozdělit jako sousled několika procesů. Některé z těchto procesů koná pouze plastikační jednotka, některé pouze uzavírací jednotka. Může tedy docházet k tomu, že se procesy překrývají. Jako začátek vstřikovacího procesu bývá většinou označen moment, kdy dojde k uzavření vstřikovací formy. Následuje zaplnění tvarové dutiny roztaveným materiálem. Po zaplnění dutiny je zahájena fáze dotlaku. Dotlaková fáze končí zamrznutím vtokového ústí, čímž začíná fáze chlazení. Během chlazení výrobku v dutině formy plastikační jednotka odjíždí od vstřikovací formy a zahajuje plastikaci dávky materiálu pro následující vstřikovací cyklus. Jakmile je výrobek ochlazen na požadovanou teplotu, dochází k vyjmutí výrobku z dutiny vstřikovací formy. To je realizováno otevřením vstřikovací jednotky a následujícím pohybem vyhazovacího systému, jenž pomocí vyhazovačů sejme výrobek ze stěny dutiny vstřikovací formy. Poté se forma opět uzavírá a vstřikovací jednotka s připraveným materiálem přijíždí k formě. Tím začíná další vstřikovací cyklus shodný s cyklem předchozím. [7] [8]



Obr. 2 Vizualní znázornění vstřikovacího procesu [2]



Obr. 3 Schéma vstříkovacího procesu

### 1.3.1 Uzavření formy

Tento proces je vykonán uzavírací jednotkou. Dojde při něm k uzavření vstříkovací formy a utěsnění dělicí roviny. Během uzavření formy je plastikační jednotka přisunuta ke vstříkovací formě. [9]

### 1.3.2 Vstříkování

Po uzavření formy následuje vstříknutí polymerní taveniny do dutiny vstříkovací formy. Homogenní tavenina je shromážděna v prostoru mezi čelem šneku a vstříkovací tryskou. Dopředným pohybem šneku pak dojde k vstříknutí taveniny do dutiny vstříkovací formy pod velkým tlakem. V tento moment tak šnek plní funkci pístu. [9]

### 1.3.3 Dotlak

Když je dutina formy naplněna, je potřeba ještě po určitou dobu působit tzv. dotlakem. Tím se rozumí zvýšení vstříkovacího tlaku proto, aby polymerní tavenina vyplnila všechny prostor dutiny formy a došlo k bezchybnému přenesení tvaru na finální výrobek. Fáze dotlaku má také vliv na hodnotu smrštění výrobku. Doba působení dotlaku se odvíjí od doby zamrznutí vtokového ústí. Jakmile vtokové ústí zamrzne, nemá zvýšení tlaku vstříkovací jednotkou jakýkoliv účinek. [10]

### 1.3.4 Chlazení

Chlazení je proces probíhající ve vstřikovací formě. V této fázi cyklu dochází ke zchlazení polymerní taveniny. Tím, jak polymerní tavenina zchladne, zůstane ve tvaru, v jakém byla v tomto okamžiku. Takto tedy dojde k získání požadovaného tvaru obtisknutím dutiny vstřikovací formy. Dutina vstřikovací formy má tedy vždy negativ tvaru, který je požadován po finálním výrobku. Fáze chlazení obvykle bývá nejdéle trvající fází celého vstřikovacího procesu, zejména u tlustostěnných výrobků. [11]

### 1.3.5 Plastikace

Během chladnutí polymerní taveniny v dutině formy, dochází ve vstřikovací jednotce k plastikaci materiálu pro následující vstřikovací cyklus. Během plastikace šnek ve válci pomalu odjíždí směrem od vstřikovací trysky, aby vytvořil prostor pro akumulaci nově plastikovaného materiálu před čelem šneku. Plastikace obvykle trvá kratší dobu než chladnutí taveniny v dutině formy. Po plastikaci tedy následuje prodleva. Prodleva však nesmí být moc dlouhá, aby nedocházelo k degradaci materiálu vlivem příliš dlouhé doby, po kterou je materiál vystaven vysoké teplotě. Pro optimální výsledek vstřikovacího procesu je tedy důležité neopomenout ani tento aspekt nastavení vstřikovacího stroje. [12]

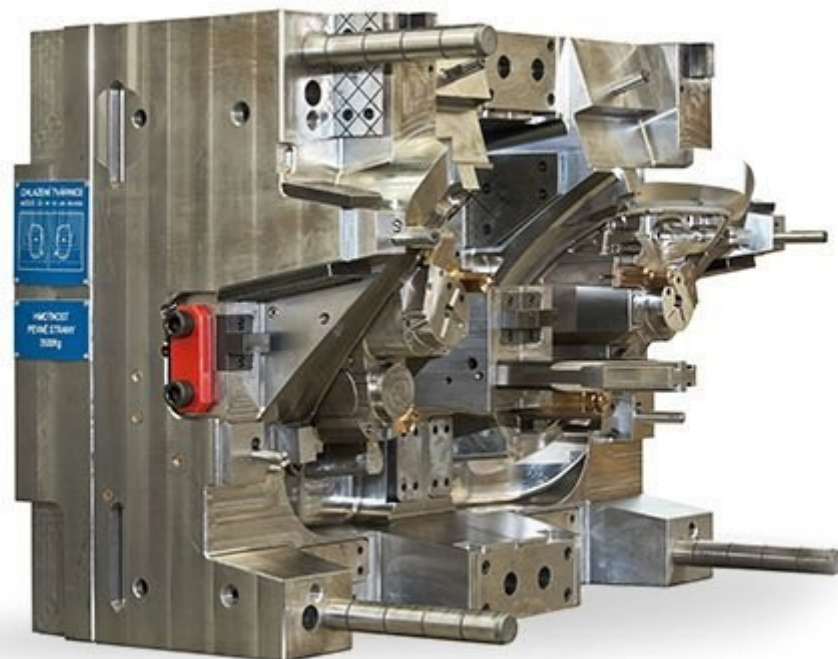
### 1.3.6 Otevření formy a odstranění výrobku z dutiny formy

Jakmile je výrobek ochlazen na požadovanou vyhazovací teplotu, vykoná uzavírací jednotka pohyb, jímž dojde k otevření vstřikovací formy. Během tohoto pohybu dochází také k pohybu čelistí k bočnímu odformování a k odformování závitů. Po otevření vstřikovací formy dojde k pohybu vyhazovacího paketu formy. Ten umožní cílené vyhození výrobků z dutiny formy. Jakmile skončí krok odstranění výrobku z dutiny formy, dochází opět k uzavření vstřikovací formy a celý vstřikovací proces se odehrává od znovu. [9] [12]



## VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je nástroj používaný pro sériovou produkci plastových dílů. Jedná se o komplexní nástroj skládající se z mnoha dílů. Hlavní částí vstřikovací formy je její dutina, která odpovídá tvaru budoucího výrobku. Do této dutiny je vstříknuta polymerní tavenina. Po ochlazení získá materiál tvar dutiny formy a po dosažení vyhazovací teploty lze díl z dutiny formy vyjmout. Vstřikovací formy se mohou lišit v závislosti na tom, co je potřebné pro výrobu konkrétního výrobku. Vstřikovací formou lze vyrobit i tvarově velmi komplexní díly. Složitost vstřikovací formy se odvíjí od požadované kvality výrobku, počtu dělicích rovin, skutečnosti, zda díl obsahuje závity, použitím materiálu a dalších parametrech. Vstřikovací formy hrají klíčovou roli v průmyslovém zpracování polymerních materiálů, jelikož umožňují relativně snadnou výrobu velkých sérií. [11] [8]



*Obr. 4 Pohled na tvarovou dutinu vstřikovací formy [13]*

### 1.4 Konstrukce vstřikovací formy

Vstřikovací formu lze rozdělit na tři hlavní části. Těmi jsou pevná část, pohyblivá část, a vyhazovací systém. Hranice mezi pevnou a pohyblivou částí vstřikovací formy se nazývá hlavní dělicí rovina. Jedná se o rovinu, která dělí dutinu vstřikovací formy tak, aby po otevření formy bylo možné výrobek vyjmout.

Pevná část je upevněna na nepohyblivé straně vstřikovacího stroje a má za úkol dopravu taveniny ze vstřikovací jednotky do dutiny formy, kterou také z poloviny tvoří. Druhá polovina dutiny je tvořena pohyblivou částí vstřikovací formy, která je upevněna na pohyblivé části vstřikovacího stroje. Její pohyb je ovládán uzavírací jednotkou vstřikovacího stroje. Otevřením dělicí roviny vstřikovací formy je umožněno vyjmutí výrobku z dutiny formy. Tento úkon je vykonán za pomoci vyhazovacího systému.

Jednotlivé desky každé části vstřikovací formy jsou spojeny šrouby. Správnou polohu jednotlivých desek vůči sobě zajišťují středící trubky. Hladký a přesný pohyb pohyblivé části vůči pevné části je zajištěn pomocí vodicích čepů a vodicích pouzder. Tato pouzdra a čepy také slouží k zajištění správného pohybu vyhazovacího systému.

Pro výraznou úsporu nákladů na výrobu formy, je možné použít desky z konstrukční oceli, a pouze části které přijdou do styku s taveninou budou vyrobeny z nástrojové oceli a kaleny. V tomto případě je nutné použití vložek, ze kterých je poté tvořena dutina formy a vtokových vložek.

Pokud požadovaný díl nelze odformovat pomocí hlavní dělicí roviny, je nutno přidat další dělicí rovinu, případně více rovin. Tyto se poté nazývají vedlejší dělicí roviny. Je zapotřebí přidat posuvné tvarové elementy umožňující boční odformování, které budou spolu s tvárnicí a tvárníkem tvořit dutinu vstřikovací formy. Pohyb tvaru bočního odformování je realizován pomocí vedení a šikmého kolíku. Jakmile dojde k otevření formy, posune se i boční odformování. [12] [1] [2] [11]

## 1.5 Materiály pro konstrukci vstřikovací formy

Volba materiálu pro různé části vstřikovací formy závisí na nabídce dodavatele normálií. Použití normálií pro výrobu formy přináší mnoho výhod. Zejména po finanční stránce, jelikož při sériové výrobě jsou součásti daleko levnější, než kdyby se měly všechny prvky vyrábět zvlášť pro každou formu. Pro desky rámu formy se nejčastěji jedná o nástrojové oceli určené pro práci za tepla, oceli vhodné ke kalení, nebo slitinu hliníku a zinku. Všechny prvky, jenž slouží jako vodicí, musí být cementovány a kaleny pro dosažení požadované životnosti. Jedná se zejména o vodicí pouzdra, vodicí sloupky a středící trubky. [12]

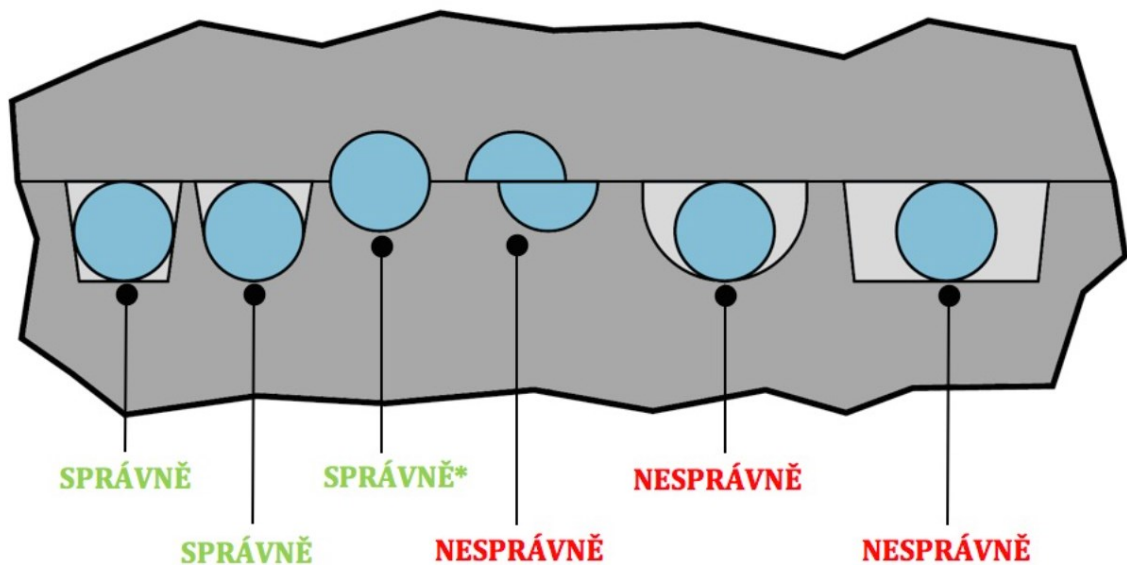
## 1.6 Vtokový systém

Funkcí vtokového systému je doprava taveniny ze vstřikovací jednotky do tvarové dutiny formy. Určení druhu použitého vtokového systému je rozhodnutí, které musí být učiněno

v prvních fázích návrhu vstřikovací formy. Druh použitého vtokového systému značně ovlivňuje konstrukci celé vstřikovací formy. Vtokové systémy jsou děleny dvě hlavní kategorie, a to studené vtokové systémy a vyhřívané vtokové systémy. Rozhodnutí, která varianta bude použita závisí na několika faktorech, zejména na vstřikovaném materiálu, finančními možnostmi a technickém zázemí provozu ve kterém bude vstřikovací forma fungovat. Formy s vyhřívaným vtokovým systémem mají obecně vyšší produktivitu a efektivitu výroby. Na druhou stranu však mají vyšší náklady na pořízení, na provoz, i na údržbu. Případná změna materiálu v průběhu výroby také může být komplikovaná. [12] [14]

### **1.7 Studený vtokový systém**

Studený vtokový systém je na rozdíl od vyhřívaného vyjmut z formy na konci vstřikovacího cyklu a poté odstraněn od výrobku. Rozvodné kanály bývají obrobena přímo do dělicí roviny vstřikovací formy, konkrétně vedou od středu formy směrem ke každé tvarové dutině. Navržení správné geometrie a rozměrů rozvodného kanálu je dalším z velmi důležitých kroků v návrhu vstřikovací formy. Rozvodný kanál o příliš malých rozměrech by měl za následek přílišné zvýšení vstřikovacího tlaku. Také by docházelo k rychlejšímu zatuhnutí než v dutině výrobku, což by negativně ovlivnilo působení dotlakové fáze. Naopak příliš velké rozměry rozvodného kanálu by způsobily dlouhou dobu chlazení a tím prodloužení celého vstřikovacího cyklu. Také by se zvýšilo množství materiálu potřebného na jeden vstřikovací cyklus. Je tedy důležité dojít k optimálnímu řešení pro konkrétní vstřikovací formu. Rozvodný kanál má doporučený průřez ve tvaru kruhu, polokruhu nebo lichoběžníku. [12]



Obr. 5 Ukázka různých průřezů rozvodného kanálu [12]

Nejvhodnější průřez rozvodného kanálu je průřez kruhový. Ten je však náročnější na výrobu kvůli faktu, že musí být obrobena do obou částí vstřikovací formy. Jak do pevné části, tak do pohyblivé části. Vyskytuje se zde tedy riziko, že dojde k nepřesnosti při procesu obrábění a tyto dvě poloviny rozvodného kanálu nebudou mít dokonalý tvar kruhu, ale budou lehce posunutě. Tím vznikne nepřesný průřez, který zvyšuje odpor toku taveniny. Kvůli tomuto problému se využívá průřezů, které mají horší vlastnosti než kruhový průřez, ale jsou snadnější na výrobu. Jedná se o polokruhový průřez a lichoběžníkový průřez rozvodného kanálu. Zejména lichoběžníkový průřez je velmi často používaný díky své snadné výrobě a dobrým vlastnostem. Lichoběžníkový rozvodný kanál je obráběn pouze do jedné strany dělicí roviny. Rozvodný kanál by měl být co nejkratší kvůli snížení tlakových ztrát. Rozvodný kanál by měl spolu s vtokovými ústí zajistit, aby všechny tvarové dutiny byly plněny ve stejný moment. Pro snadnější odformování by měl mít kanál úkos o hodnotě až  $5^\circ$  minimálně však  $1,5^\circ$ . [12] [14]

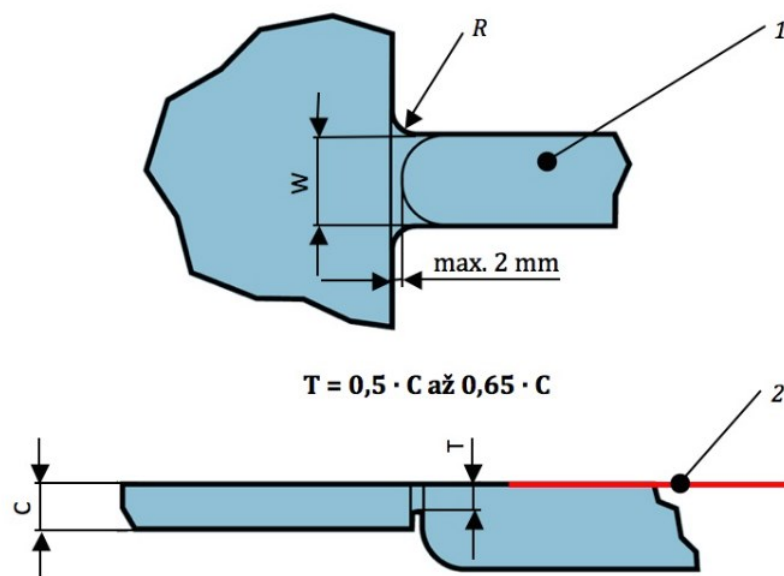
### 1.7.1 Vtokové ústí

Vtokové ústí slouží jako zakončení rozvodného kanálu do tvarové dutiny formy. Při vstřikování rozměrných dílů lze využít vtokové vložky jako ústí vtoku a ušetřit tak materiál. Oproti zbytku rozvodného kanálu je ústí zúžené, ve výjimečných případech se však lze setkat i s ústím bez zúžení. Vtokové ústí plní funkci zamrznutí materiálu v bodě, kde se dostává do výrobku. To umožňuje ukončit dotlak a tavenina se zároveň nedostane zpět do rozvodného

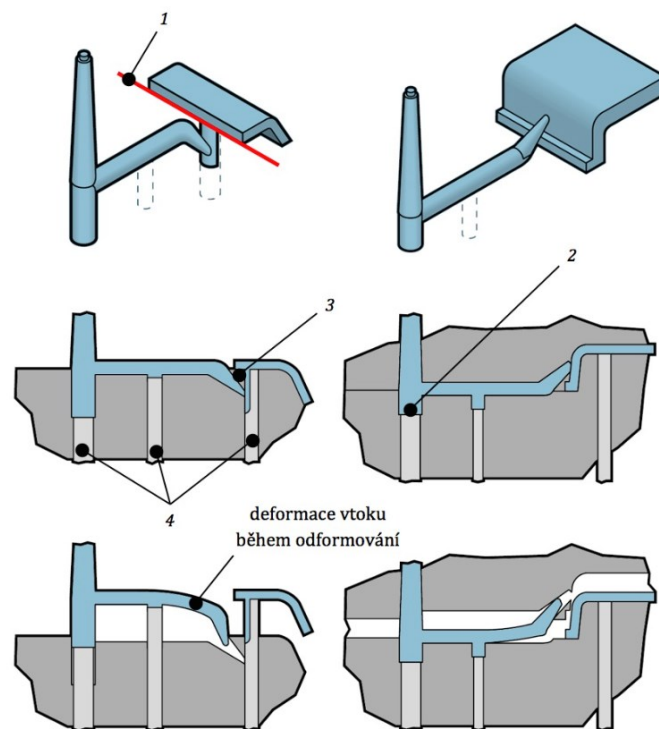
kanálu. Dřívější ukončení dotlaku je šetrnější k nástroji a také šetří energii. Velikost ústí by měla být dostatečně velká, aby bylo možno bez problému vstříkovat, ale zároveň dostatečně úzké kvůli následnému začištění stopy na finálním výrobku. Umístění vtokového ústí je doprovázeno několika pravidly.

- Umístění do nejtlustšího místa na výrobku.
- Umístění co nejbližší geometrickému středu výrobku.
- Umístění ústí tak, aby se dalo snadno odstranit a následná stopa nezpůsobovala závadu na funkci výrobku.

Používá se několik druhů vtokových ústí v závislosti na požadavcích potřebných pro zadaný díl. Pro materiály citlivé na degradaci se používá filmových vtoků. Průřez ústí je maximálně 0,8násobek tloušťky stěny vyráběného dílu. Filmový vtok je široký a materiál tak teče do dutiny formy za působení značně nižších smykových napětí než u jiných vtokových ústí. Velmi široce používané je i tunelové vtokové ústí, které umožňuje umístění až za dělicí rovinu. To je vhodné pro použití u výrobků s požadavkem na estetiku, jelikož stopa po odstranění vtokového ústí se bude nacházet na straně se stopami po vyhazovačích a je tedy snadné ji na výrobku schovat. Další výhodou tunelového vtokového ústí je jeho schopnost samo oddělení se od výrobku na konci vstřikovacího cyklu. Té je dosaženo pomocí rezné hrany nacházející se mezi vtokovým ústím a výrobkem. [1] [2] [15]



Obr. 6 Filmové vtokové ústí. 1 – rozváděcí kanál, 2 – dělicí rovina, R – rádius, T – tloušťka filmového ústí vtoku, C – tloušťka stěny vstřikovaného výrobku, W – šířka filmového ústí vtoku. [12]



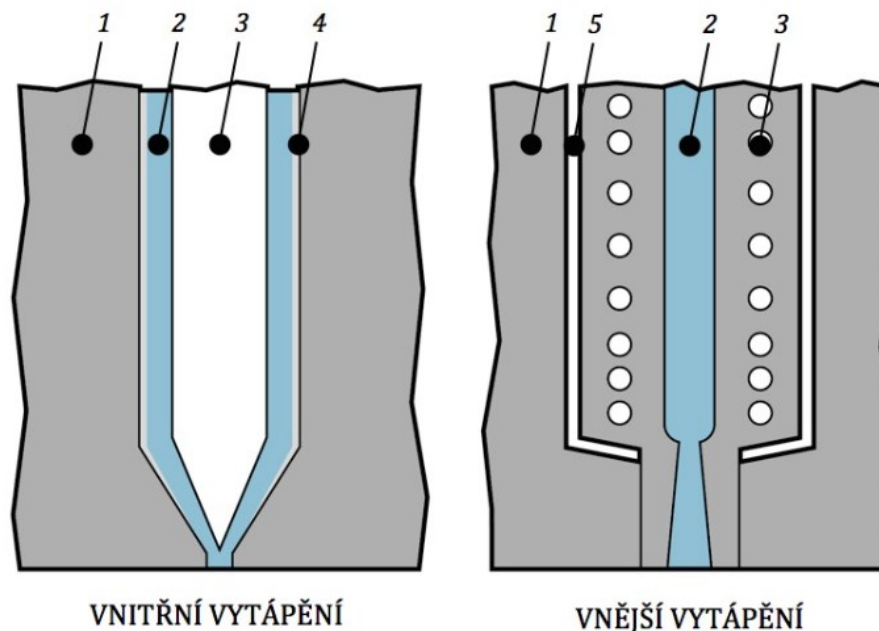
Obr. 7 Ukázka samo oddělení tunelového vtokového ústí od výrobku při pohybu vyhazovacího paketu (vlevo) a při otevření vstříkovací formy (vpravo). 1 – dělicí rovina, 2 – přidržovač vtoku, 3 – řezná hrana, 4 - vyhazovače [12]

## 1.8 Vyhřívaný vtokový systém

Pod pojmem vyhřívaný vtokový systém je myšlen vyhřívaný rozvodný kanál ve vstříkovací formě. Od rozvodného kanálu poté může být tavenina vstříknuta přímo vyhřívanou tryskou do povrchu výrobku, nebo může za tryskou následovat vtokové ústí, případně i studený rozvodný kanál. Tavenina uvnitř vyhřívaného vtokového kanálu nezatuhne, čímž se snižuje spotřeba materiálu použitého na jeden vstříkovací cyklus. Také je možno dosáhnout přesnějšího nastavení teplot taveniny. V současnosti se jedná o nejrozšířenější druh konstrukce vstříkovací formy i přes vyšší počáteční investice. Díky vyhřívání rozvodného kanálu má tavenina také nižší viskozitu a tím pádem i lepší zatékavost. Použití horkého rozvodného systému tak umožňuje vyrábět díly s menší tloušťkou stěny díky nižšímu potřebnému vstříkovacímu tlaku. Mezi hlavní výhody horkého vtokového systému patří lepší přenos tlaku, vyšší produktivita vstříkování a snížená spotřeba materiálu. Nevýhodami jsou pak vyšší pořizovací cena formy a prodloužená doba potřebná na změnu materiálu. [12]

Hlavními komponenty horkého rozvodu taveniny jsou vyhřívání vtoková vložka, vyhřívaný vtokový systém, vtokové ústí a kabelové vedení zajišťující vytápění celé soustavy. Horký rozvod je tepelně izolován od ostatních částí vstříkovací formy, aby se minimalizovaly

tepelné ztráty. Izolace se obvykle dosahuje pomocí vzduchových mezer a minimalizace kontaktních ploch horkého rozvodu s díly formy. Vtokový systém je veden v pevné části vstřikovací formy nad příslušnými dutinami. Vytápění horkých rozvodů se řeší buď vnitřně, nebo vnějšně. Vnější vytápění udržuje nastavenou teplotu pomocí topných těles umístěných vně kanálu pro proudění taveniny plastu. Vnitřní vytápění využívá tzv. torpédového topného tělesa umístěného uvnitř kanálu. Vnitřně vytápěné rozvody, ačkoliv kompaktnější, trpí neduhem tvorby zamrzlé vrstvy v oblasti kontaktu taveniny se studenou stěnou formy. Tato vrstva se časem může degradovat a znehodnocovat vstřikované díly. Z tohoto důvodu nejsou vhodné pro zpracování transparentních plastů, plastů citlivých na teplotu, nebo pro díly s vysokými požadavky na kvalitu povrchu. [12]



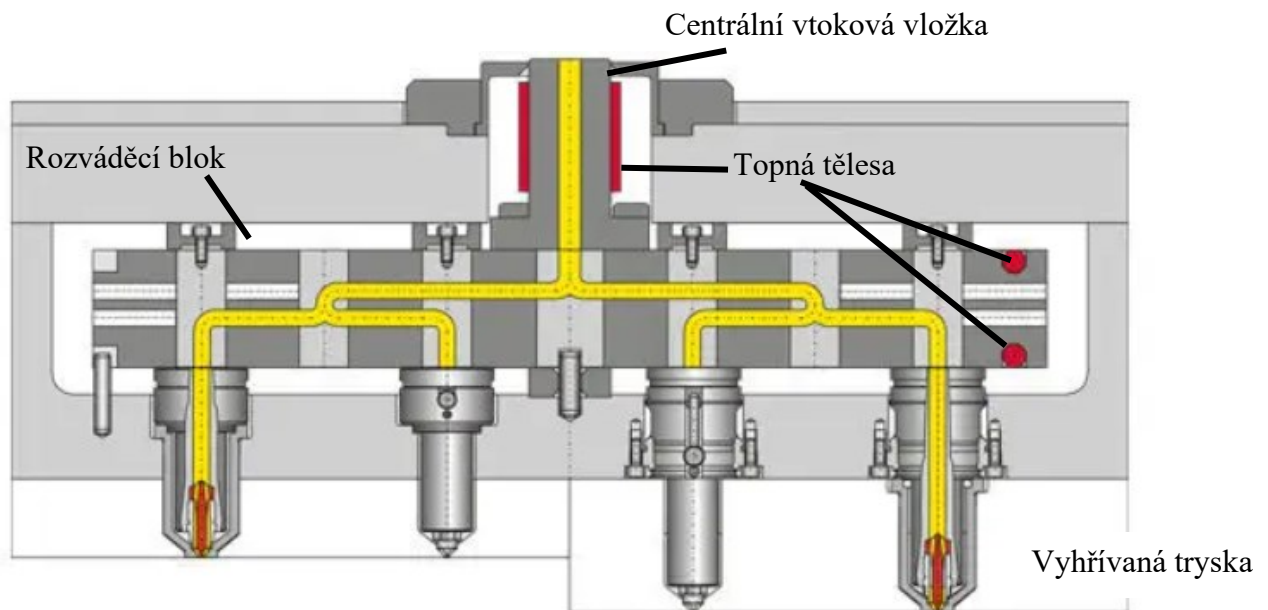
Obr. 8 Typy vytápění trysky horkého rozvodu

1 – materiál formy, 2 – kanál pro proudění taveniny, 3 – topné těleso, 4 – zamrzlá vrstva plastu, 5 – vzduchová mezera sloužící k izolaci [12]

### 1.8.1 Vtokové ústí

Tavenina v oblasti ústí musí po vstřiku do dutiny formy částečně zatuhnout, aby nedocházelo k samovolnému vytékání mezi cykly. Zároveň nesmí zatuhnout natolik, aby došlo k ucpání horkého rozvodu nebo strhávání zatuhlých částí do dutiny formy v dalším cyklu. To vyžaduje pečlivou kontrolu nad přenosem tepla v oblasti ústí. Vtoková ústí horkého vtoku mohou být otevřená či uzavíratelná. Otevřená horké rozvody, jako jsou mini kuželová ústí

vtoku, obvykle zanechávají na vstřikovaném dílu větší stopu, která může vyžadovat následné mechanické oddělení. Uzavřené horké rozvody s uzavíratelnými ústími vtoku umožňují minimalizaci stop po vtoku na dílu, jsou však složitější a dražší. Uzavíratelné trysky umožňují kaskádové plnění dutiny formy. Jde o sekvenční plnění dutiny z několika trysek, které se postupně zavírají. Toto řešení se používá pro rozměrově objemné výrobky, pro které by bylo vstřikování pouze z jednoho vtokového ústí nevhodné. [12]



Obr. 9 Schéma horkého vtokového systému. V levé straně lze vidět trysku se zadním uchycením, napravo se nachází tryska s předním uchycením. [16]



## 2 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VSTŘIKOVÁNÍ

### 2.1 Vlastnosti vstřikovaných výrobků

Vstřikování patří mezi cyklické tvářecí procesy, což znamená, že zpracovávaný materiál se v průběhu cyklu nikdy nedostane do úplně rovnovážného stavu z hlediska termodynamických podmínek. Teplota, doba procesu, napětí a rychlost deformace se v průběhu vstřikovacího cyklu mění, a to i v různých částech tvarové dutiny vstřikovací formy. Vlastnosti výrobku jsou funkcí této komplexní historie. Velká část polymerních řetězců může zůstat v různých konformacích i po vyjmutí výstřiku z formy, což způsobuje vnitřní napětí ve výrobku. Tyto řetězce se snaží dosáhnout rovnovážného stavu po vyjmutí výstřiku, a to i během dlouhodobého procesu relaxace. Při uvolňování vnitřního napětí mohou vznikat deformace a defekty ve výrobku. Distribuce řetězců s různým vnitřním napětím může být v objemu výrobku nerovnoměrná, což může vést k nehomogenním vlastnostem. Při vyztužených kompozitních materiálech může orientace makromolekul a vyztužujícího plniva být ovlivněna technologickými parametry, jako jsou teplota taveniny a rychlost vstřikování. Další komplikace nastává u částečně krystalických polymerů, kde krystalizační procesy a změny objemu během chlazení přispívají k významným výrobním a dodatečným smrštěním. Rozsah tohoto smrštění je ovlivněn prostředím, ve kterém se odehrává. Pro semikrystalické materiály je nejlepší, aby krystalizace proběhla ještě uvnitř vstřikovací formy, jinak může dojít k velkým odchylkám od původní geometrie výrobku.

Celková kvalita výstřiků z termoplastů je hodnocena jejich stavem po vyjmutí z formy a relaxaci po dobu minimálně 16 hodin. Výsledky jsou charakterizovány orientací makromolekul, vnitřním napětím, v případě plněných materiálů také orientací plnicích vláken. Pro semikrystalické polymery je vhodné posoudit také skin – core efekt. Tím se rozumí rozdílný obsah krystalické fáze na povrchu a v jádru výrobku. [11] [17] [18]

### 2.2 Druhy materiálů používané pro vstřikování

Nejčastěji se pro technologii vstřikování používají polymery řadící se do skupiny tzv. termoplastů. Tak je označena skupina materiálů, které při zvýšené teplotě měknou a poté při snížení teploty dosahují opět elastického stavu. Tato změna je vratná. Probíhá tak, že zvýšením množství energie obsažené v řetězcích materiálu, dochází ke zvýšení jejich pohyblivosti. A to až do bodu, kdy dojde k přerušení vazeb mezi řetězci, což má za následek sníženou viskozitu materiálu. Právě jejich vlastnost opakované, a především vratné změny

stavu z tuhého na plastický, je důležitým prvkem vstřikovacího procesu. Lze tímto způsobem relativně snadno zapracovat recyklát do používaného materiálu, což mírně snižuje celkový objem výroby plastových materiálů. Vstřikovat lze také reaktoplasty a elastomery. Tyto skupiny materiálů, však na rozdíl od termoplastů, jsou spojeny trvalými chemickými vazbami. Vzhledem ke skutečnosti, že potřebují sesít'ovat, je tak vstřikování těchto materiálů méně rozšířeno než vstřikování termoplastů. Kvůli vyšší teplotě potřebné k aktivaci procesu síťování je vstřikování reaktoplastů a elastomerů energeticky náročnější a také výrobní cyklus trvá déle. [2] [14]

### 2.3 Polyoxymethylen – POM

Polyoxymethylen se získává polymerací monomeru formaldehydu. Jedná se o houževnatý semikrystalický polymer s vysokým stupněm krystalizace. Řadí se mezi plastové materiály s nejvyšší tuhostí a pevností. Na rozdíl od většiny ostatních plastových materiálů, se v makromolekule polyoxymethylenu pravidelně střídají methylenové skupiny a atomy kyslíku. Materiál má vysokou odolnost vůči chemikáliím a také je teplotně stabilní. Materiál si houževnatost zachovává i za velmi nízkých teplot. Má také velmi dobré kluzné vlastnosti, pro něž je často také využíván. Díky těmto vlastnostem je ideální pro výrobu plastových ozubených kol. POM se vyrábí jako homopolymer i jako kopolymer. Homopolymer mívá vyšší teplotu tání a vyšší stupeň krystalinity díky jednoduché a jednotné struktuře. Díky vysoké krystalinitě má materiál vynikající mechanické vlastnosti. Kopolymer POM má na druhou stranu lepší dlouhodobou teplotní a chemickou odolnost i lepší mechanické vlastnosti za nízkých teplot. [18]

Teplota tání POM bývá v rozmezí 164 °C až 175 °C. Modul pružnosti se pohybuje v rozmezí od 1500 MPa až 3000 MPa, v případě že je materiál vyztužen vláknitým plnivem, lze dosáhnout modulu pružnosti až 9000 MPa. Dlouhodobá teplotní odolnost materiálu je do teplot až 100 °C, v případě kopolymerů je limitní teplota posunuta až o 20 °C výše. POM je odolný vůči chemickým látkám jako například benzínu, benzenu, alkoholům, metanolu i slabým kyselinám. Díky své vysoké krystalinitě nejsou výrobky z POM průhledné. Přirozená barva materiálu je bílá až nažloutlá.

## 2.4 Technologické zpracování POM

POM je nejčastěji zpracováván právě technologií vstřikování. Materiál má navlhavost okolo 0,2 až 0,5 %, tudíž není nutné jej před vstřikováním sušit. Výrobci materiálu však pro zajištění nejlepších výsledků doporučují před zpracováním granulát sušit za teploty 80 až 110 °C po dobu dvou až čtyř hodin. Konkrétní doporučené parametry se samozřejmě liší a je nutné používat hodnoty doporučené výrobcem materiálu. POM je vysoce náchylný na tepelnou degradaci v průběhu vstřikovacího procesu. Během vstřikovacího procesu se z materiálu uvolňují plyny, jež urychlují korozi nástroje. Pro zajištění životnosti formy je tedy vhodné ji zhotovit z materiálu který je vůči tomuto opotřebení odolnější než běžně používané materiály. Kvůli vysoké krystalinitě dochází k velkému smrštění výrobku. Hodnotu smrštění lze ovlivnit správným nastavením dotlaku, vstřikovacího tlaku a teploty.

[18]

### 3 ZÁVADY A OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU

Vstřikovací proces je velmi citlivý, co se týká nastavení. To může být provedeno pomocí mnoha různých parametrů. Mezi parametry vstřikovacího procesu se řadí zejména nastavení teplot a tlaků. Nejdůležitějšími teplotami, které lze nastavit jsou teplota polymerní taveniny a teplota povrchu formy. Dále lze nastavit především teploty pro různá pásma vstřikovací jednotky. Ty slouží hlavně k optimalizaci plastikace materiálu. Co se týká nastavení tlaků, nejdůležitější jsou nastavení dotlaku a vstřikovacího tlaku a doba trvání dotlaku. [8]

#### 3.1 Nastavení vstřikovacího procesu

Vstřikovací proces způsobuje značné změny reologických a termo-mechanických vlastností polymerních materiálů kvůli vysokým proměnným napětím a teplotám v různých fázích procesu. Je důležité zdůraznit, že vlastnosti konkrétních vstřikovaných materiálů hrají klíčovou roli při získávání čistého tvaru finálního výrobku. Materiál musí během vstřikování snášet velká smyková napětí. [19] [20]

##### 3.1.1 Nastavení plastikační fáze

Základní podmínkou pro dosažení optimálního naplnění dutiny formy polymerní taveninou je zajištění teplotní a viskozitní homogenity v dávce taveniny před čelem šneku. Tato homogenita je dosažena správným nastavením následujících parametrů:

- Teplotního profilu, nastaveného na jednotlivých topných pásmech plastikačního válce dle specifického materiálu a požadovaných vlastností. Topné pásy nesmí mít moc vysokou teplotu, aby nedocházelo k degradaci materiálu.
- Zpětného tlaku na šneku, ovlivňujícího viskozitu taveniny a umožňujícího regulaci toku materiálu.
- Profilace otáček šneku, respektive jeho obvodové rychlosti, v závislosti na dráze plastikace. Tato profilace umožňuje různý přístup k jednotlivým fázím procesu, jako je plastikace, homogenizace a dávkování.

Nedostatečná teplotní a viskozitní homogenita taveniny má negativní dopad na kvalitu povrchu výrobku a jeho estetické i užitné vlastnosti. Mezi nežádoucí projevy patří vznik tokových linií, nerovnoměrný lesk, tvorba studených spojů, nehomogenní rozložení orientace makromolekul a plniva, vnitřní pnutí. U částečně krystalických materiálů hrozí také nepravidelná tvorba nadmolekulární struktury. Teplota taveniny hraje klíčovou roli

v orientaci makromolekul ve výstřiku. S rostoucí teplotou klesá stupeň orientace a výstřik se z hlediska vlastností stává více izotropní. Zároveň se ve směru toku taveniny snižují některé mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, houževnatost), zatímco se zvyšuje pevnost studených spojů a snižuje se vnitřní pnutí. Výrobky ze semi-krystalických materiálů vstříkované do formy s temperovanými stěnami dle doporučení výrobce granulátů vykazují ve srovnání s výrobky vyrobenými ve formě s teplotou stěny nižší, než udává výrobce zvýšené výrobní smrštění ale sníženou hodnotu dosmrštění. [19]

Při plastikaci polymerního materiálu, zvláště u aditivovaných a vysoce kvalitních materiálů, je nezbytné dbát na dobu výdrže taveniny na zpracovatelské teplotě. Po překročení doporučené doby hrozí tepelný rozklad materiálu s nežádoucími důsledky na vlastnosti výstřiku. Optimalizace procesu plastikace polymerní taveniny umožňuje dosahovat kvalitních výsledků s požadovanými vlastnostmi a snížit výskyt vad. [11]

### 3.1.2 Nastavení vstřikovací fáze

Vstřikovací fáze, navazující na plastikační fázi, má za úkol naplnit tvarovou dutiny formy homogenní taveninou. Cílem je dosáhnout konstantní rychlosti čela proudu taveniny v každém místě průřezu tokové dráhy. U jednoduchých výstřiků s konstantní tloušťkou stěny je to snadněji dosažitelné než u složitějších tvarů s proměnlivou tloušťkou stěny, kde je optimalizace problematická i s využitím simulací vstřikování. Rychlost, kterou je polymerní tavenina vstříknuta ovlivňuje povrchové defekty výstřiku, jako například tokové čáry, vrásnění, pomerančová kůra, stopy po studených spojích atd. V kombinaci s teplotou taveniny a formy je nutné optimalizovat tak, aby se na povrchu výstřiku minimalizovala smyková napětí. U materiálů obsahující částicové plnivo se osvědčuje kombinace vyšší teploty taveniny a nižší vstřikovací rychlosti. Pro vstřikování materiálů s vláknitým plnivem je naopak vhodnější vyšší rychlost vstřikování i vyšší teplota taveniny.

Velmi nízká vstřikovací rychlost vede k rychlému ochlazení taveniny a růstu orientace makromolekul, čímž se zvyšuje anizotropie vlastností výstřiku. S klesající rychlostí plnění se sice zvyšuje pevnost a houževnatost ve směru toku taveniny, ale klesá povrchový lesk a pevnost studených spojů. Součástí vstřikovací fáze je i změna regulace z průtokové na tlakovou, čili bod přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak. Toto přepnutí musí být provedeno plynule, aby se minimalizovaly tlakové špičky a propady na tlakové křivce. Důsledkem plynulého přepnutí je dosažení co největší izotropie vlastností a minimalizace vnitřního pnutí. Předčasné přepnutí na dotlak může vést k plnění dutiny formy dotlakem a

zhoršení povrchu výstřiku. Naopak pozdní přepnutí má za následek zvýšení anizotropie a vnitřního pnutí. V extrémních případech může vést k přetokům v dělicích rovinách formy. V některých případech však může předčasné přepnutí na dotlak paradoxně vést ke kvalitnějšímu povrchu výrobku. [11] [8] [14]

### 3.1.3 Nastavení dotlakové fáze

Dotlaková fáze hraje klíčovou roli v dosažení požadovaných vlastností výstřiku. Její parametry, jako je hodnota tlaku, doba trvání a tlakový profil, je nutné optimalizovat s ohledem na požadovaný tvar, rozměry a hmotnost výrobku. Působení dotlaku nad optimální úroveň má za následek zvýšení vnitřního pnutí ve výstřiku a zvýšení rizika přetoků v dělicích rovinách vstřikovací formy. Tlaková odezva na dotlak není ve tvarové dutině formy homogenní. Klesá se vzdáleností od ústí vtoku. Průřez ústí vtoku musí být navržen tak, aby zajistil dostatečný dotlak i v nejvzdálenějších oblastech výstřiku a zároveň zabránil předčasnému zamrznutí vtoku.

Dotlaková fáze se dále využívá ke korekci smrštění, deformací a povrchových vad výstřiku. Reprodukovatelnost vstřikovacího procesu a konstantní kvalitu výstřiků lze kontrolovat pomocí tzv. polštáře. Tím je myšleno množství taveniny, které se během dotlaku nachází před čelem šneku ve vstřikovací jednotce. [11]

### 3.1.4 Nastavení ochlazovací fáze

Tato fáze začíná již při plnění tvarové dutiny polymerní taveninou a pokračuje až do vyhození výstřiku z formy. Parametry této fáze, zejména teplota formy a doba ochlazování, mají zásadní vliv na finální vlastnosti výrobku. Rychlost ochlazování a gradient teploty ovlivňují relaxační jevy, orientaci, tepelné napětí a krystalickou strukturu polymerů. Nižší teploty výstřiku při vyhození vedou k vyššímu obsahu krystalického podílu. Zvyšování teploty formy pozitivně ovlivňuje povrchový lesk a celkovou kvalitu povrchu výstřiku. Optimalizace doby ochlazování má velký dopad na ekonomiku výroby, neboť nejčastěji tvoří nejdelší část vstřikovacího cyklu. Kromě toho je nutné zohlednit vliv studeného vtokového rozvodu na správné vyhození výstřiku. Přímá úměra mezi dobou ochlazování a tloušťkou výstřiku není lineární, ale exponenciální, což má významný dopad na celkovou dobu výrobního cyklu. Rozhodující je najít optimální rovnováhu mezi kvalitativními požadavky na výstřik a ekonomickými požadavky na výrobu. [11]

## 3.2 Vady při vstřikování

### 3.2.1 Nedotečený výrobek

Při vzniku nedotečených výrobků bývá na vině nejčastěji nedostatečné množství materiálu vstříknutého do dutiny formy. Může se však také jednat o zhoršení toku ve formě. Například příliš úzkým vtokovým ústím, výskytem vzduchových kapes, příliš nízkým vstřikovacím tlakem, nebo příliš vysokou viskozitou vstřikované taveniny. Nejčastěji se pro odstranění vady používá zvýšení teploty, nebo vylepšení odvzdušnění, díky čemuž se značně omezí výskyt vzduchových kapes.



Obr. 10 Nedotečený výrobek (vpravo) [21]

### 3.2.2 Propadliny na výrobku

Během vstřikovacího procesu se mohou vyskytnout také vady které jsou označovány jako propadliny. Jedná se o mírně propadlý povrch výrobku který nemá žádný vliv na pevnost a jiné mechanické vlastnosti výrobku. Díky rozdílnému odrazu světla oproti rovným okolním plochám jsou však považovány za kosmetickou vadu. Propadliny vznikají při výskytu rozdílné rychlosti tuhnutí taveniny vstřikovaného materiálu. Rozdílná rychlost tuhnutí je způsobena rozdílnou tloušťkou výrobku. Propadliny se tak zpravidla vyskytují tam, kde dochází k těmto změnám v tloušťce stěny výrobku, jako například výztužná žebra. Jejich výskyt lze omezit pomocí správného nastavení hodnoty a doby působení dotlaku, ale ne úplně eliminovat. [22]

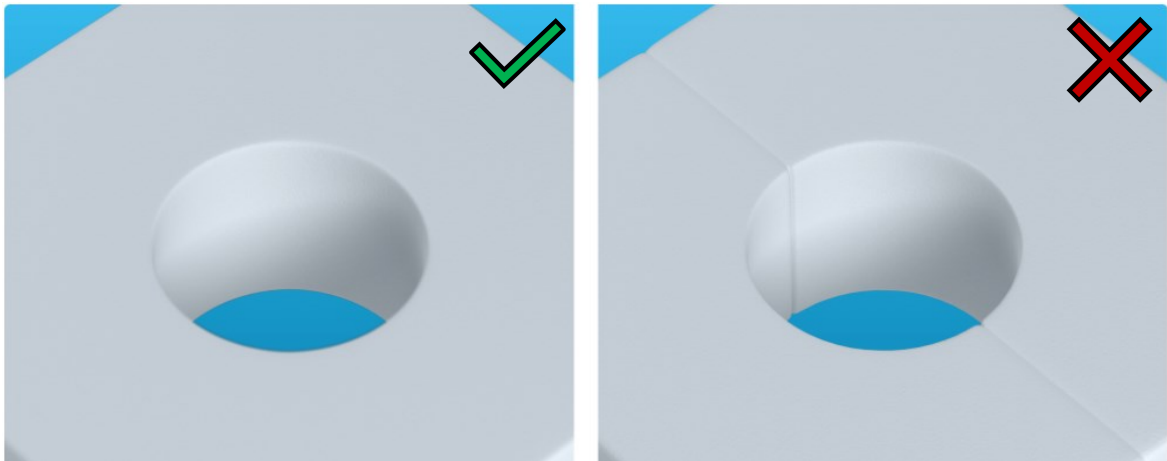


*Obr. 11 Propadliny na vstříkovaném výrobku [23]*

### **3.2.3 Studený spoj**

Studený spoj je vada vznikající setkáním alespoň dvou různých čel taveniny. Po jejich dotyku se čela zploští a spojí. Ovšem kvůli nižší teplotě taveniny na jejím čele, není toto spojení stejně pevné jako na zbytku výrobku. Studený spoj je vada jak z hlediska funkce, tak z hlediska vzhledu. V místě výskytu studeného spoje je riziko selhání výrobku. Studené spoje lze odstranit zvýšením teploty taveniny v místě setkání proudů. Nejlepší je však myslet na tento problém již při návrhu výrobku a umístit problematická místa tak, aby byly minimalizovány škody vzniklé sníženou pevností studeného spoje. Lze také ovlivnit vhodným umístěním vtokového ústí. [24]

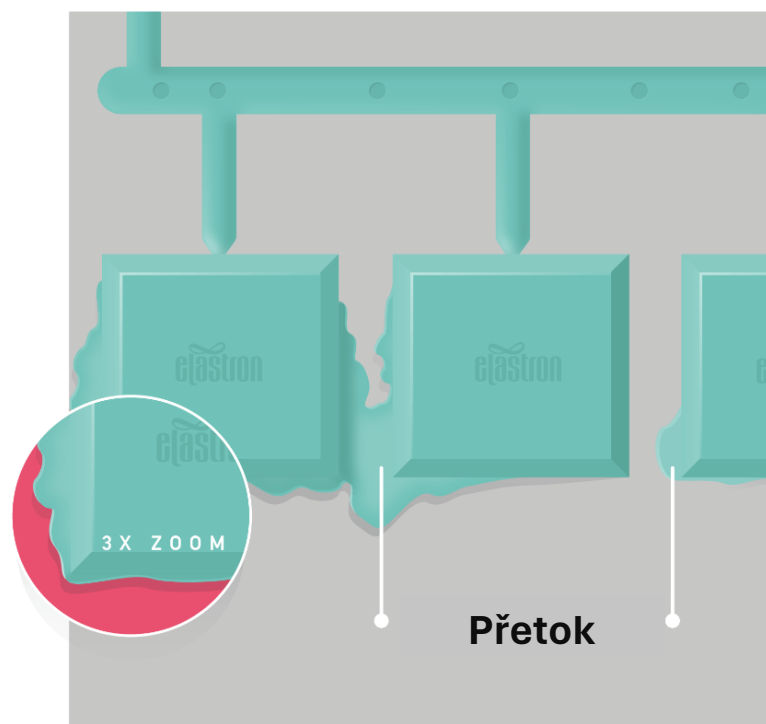




Obr. 12 Studený spoj [21]

### 3.2.4 Přetoky

Touto vadou se rozumí vytečení materiálu mimo dutiny vstřikovací formy. Přetoky jsou zapříčiněny buď vadou na vstřikovací formě nebo špatným nastavením podmínek vstřikovacího procesu. Vadou na formě způsobující přetoky může být vůle v dělicí rovině, nesprávně zarovnaná dělicí rovina, nebo nevhodné odvzdušnění formy. Co se týká nastavení vstřikovacího procesu, tam může být chyba v příliš nízké viskozitě taveniny, příliš velkém vstřikovacím tlaku, nebo nízké uzavírací síle uzavírací jednotky. Na vině také může být příliš velké množství vstřikovaného materiálu. [24]



Obr. 13 Přetoky vzniklé při vstřikování [23]

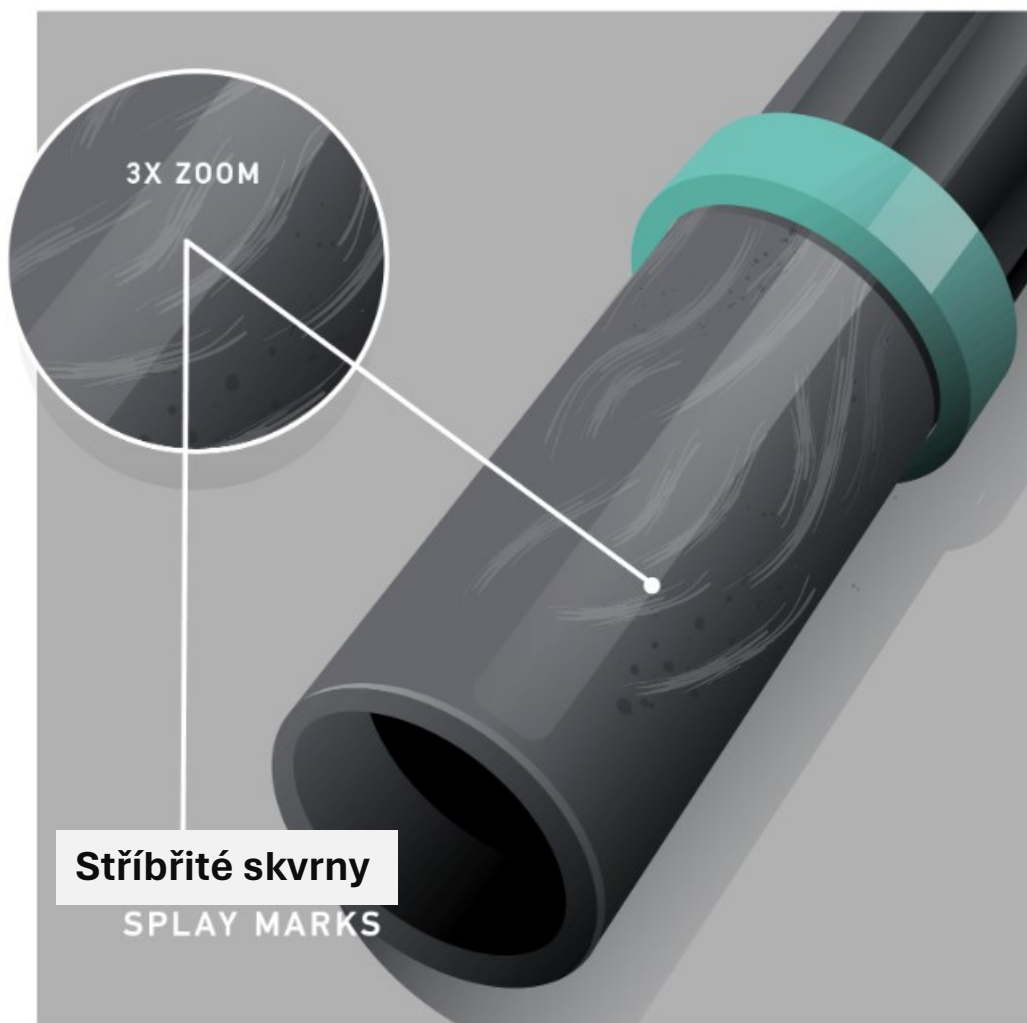
### 3.2.5 Spálená místa

Projevem této vady jsou černá místa na výrobku. Může se jednat buď o degradovaný materiál vlivem špatně nastavené plastikační fáze, nebo vstřikovací fáze. Příčinou může také být špatné odvzdušnění vstřikovací formy. Při špatně provedeném odvzdušnění je vzduch uzavřen v jednom místě dutiny formy a je rychle stlačen do velmi malého objemu. Stlačením vzduchu dojde ke zvýšení jeho teploty. Vysoká teplota vzduchu poté může zapříčinit degradaci materiálu na povrchu výrobku. [24] [14]

### 3.2.6 Stříbření

Stříbření jsou označeny vady na výrobcích, které mají bílé nebo matně stříbrné zbarvení. Vada vzniká uzavřením vzduchu a jeho následnému vmísení se do taveniny. Díky rozdílnému odrazu světla poté takové místo vypadá bíle zbarvené. Příčinou vzniku vzduchových bublin v dutině formy může být několik, jako například příliš vysoká teplota

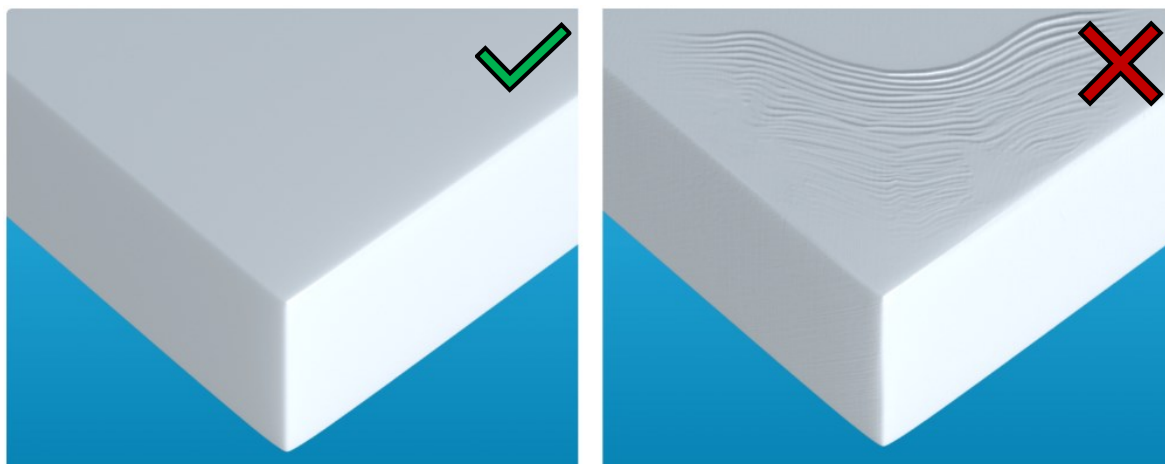
taveniny, nedostatečné odvzdušnění formy, nebo nedostatečně vysušený materiál. Pokud je teplota příliš vysoká, může být stříbření doprovázeno vznikem spálených míst. [25]



Obr. 14 Ukázka stříbření [23]

### 3.2.7 Tokové čáry

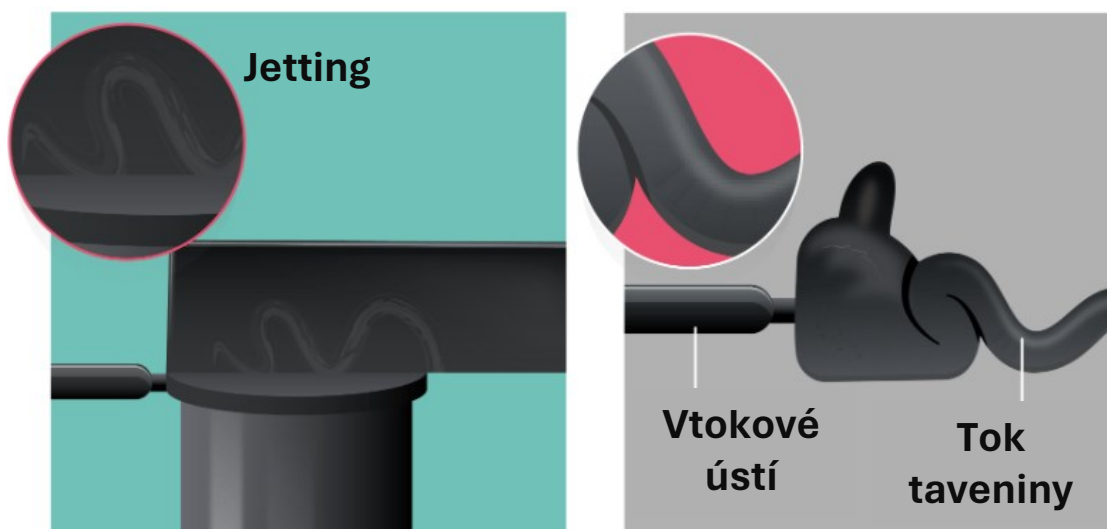
Tokové čáry jsou vada, projevující se jako bezbarvé čáry na povrchu výrobku. Vada je způsobena rozdílnou rychlostí tuhnutí taveniny. V jednom místě tavenina už tavenina tuhne, zatímco v druhém je ještě pořád tekutá. Pohybem spodní tekuté vrstvy dojde k deformaci tuhajícího povrchu. Deformace nejčastěji vypadá jako vlny. Tokové čáry jsou způsobeny nízkou vstřikovací rychlostí, nízkým vstřikovacím tlakem, nebo mohou souviset i s nízkou teplotou povrchu formy či taveniny zpracovávaného materiálu. Materiály s obsahem plniva jsou náchylnější ke tvorbě tokových čar, kvůli jejich zvýšené viskozitě. [24]



Obr. 15 Ukázka tokových čar na výrobku [21]

### 3.2.8 Jetting

Vada vzniká při průchodu taveniny úzkým vtokovým ústím a když se nezastaví o blízkou stěnu dutiny. Vzniká tak paprskovitý tok taveniny, který okamžitě na svém povrchu chladne. Díky tomu že povrch je ochlazen, následné spojení s další vrstvou není dostatečně kvalitní. Jetting je vada jak kosmetického charakteru, tak mechanického, jelikož vrstvy jsou spojeny s nižší pevností, než jaká je pevnost materiálu. Stopy této vady mohou být viditelné, ale také skryté pod povrchem. Tím dojde ke snížení pevnosti výrobku bez šance vizuálně tuto vadu odhalit. Vadě lze zabránit zejména vhodným umístěním vtokového ústí. Tím se rozumí jeho umístění tak, aby čelo toku taveniny po krátké dráze narazilo na protější stěnu a zabránilo se tak paprskovitému toku. Dalším řešením může být úprava rozměrů nebo typu vtokového ústí. Z hlediska úpravy nastavení vstřikovacího cyklu lze vadu odstranit snížením rychlosti s jakou je tavenina vstříknuta do dutiny formy. [24] [14]



Obr. 16 Jetting [23]

## 4 EKONOMIKA VSTŘIKOVÁNÍ

Ekonomika vstřikovacího procesu je klíčovým faktorem pro úspěšnou výrobu touto technologií. Vstřikovací forma je velmi drahý nástroj. Aby se vyplatila jeho výroba, je nutné vyrábět díly ve velkém množství. Zároveň je nutné provádět na nástroji údržbu, aby se co nejvíce prodloužila jeho životnost. Tato kapitola se zabývá faktory, které ovlivňují ekonomiku vstřikovacího procesu, a to včetně nákladů na zhotovení vstřikovací formy. [26]

### 4.1 Náklady na vstřikovací formu

Náklady na vstřikovací formu tvoří významnou část nákladů na výrobu vstřikovaných dílů. Náklady lze rozdělit do dvou kategorií, a to počáteční investice a provozní náklady. Počáteční investice je nutné zaplatit ještě před dodáním formy. Jako provozní náklady jsou označovány takové náklady, jež jsou potřeba na používání formy. Jedná se tedy jak o energetickou náročnost provozu formy, tak i náklady vynaložené na její údržbu. [26]

#### 4.1.1 Počáteční investice

Do této kategorie se řadí náklady na vypracování návrhu vstřikovací formy, samotnou výrobu formy, náklady na zajištění materiálu pro výrobu, a náklady na vybavení a nástroje. Náklady na návrh formy se odvíjí na základě toho, od kterého výrobce je rozhodnuto návrh nástroje vypracovat. Vypracování návrhu vstřikovací formy je komplexní proces zahrnující vytvoření 3D modelu sestavy vstřikovací formy a vytvoření technické dokumentace. Pro správný návrh 3D modelu formy je vhodné využít simulaci toku materiálu, provést pevnostní analýzu napětí a deformaci. Na základě výsledků těchto analýz a simulací je nutno provést optimalizaci geometrie vstřikovací formy tak, aby bylo dosaženo vlastností, jež jsou po výrobku požadovány. Náklady na tuto část se odvíjí od doby, za jakou je návrh vytvořen. Čím rychleji je návrh vytvořen, tím levnější bude (s výjimkou expresní výroby forem). Krátká doba strávená návrhem vstřikovací formy však s sebou nese rizika spojená s uspěchaným vývojem. Náklady na samotnou výrobu formy se odvíjí od použitých materiálů, technologií výroby a komplexnosti konstrukce formy. [27]

#### 4.1.2 Materiály

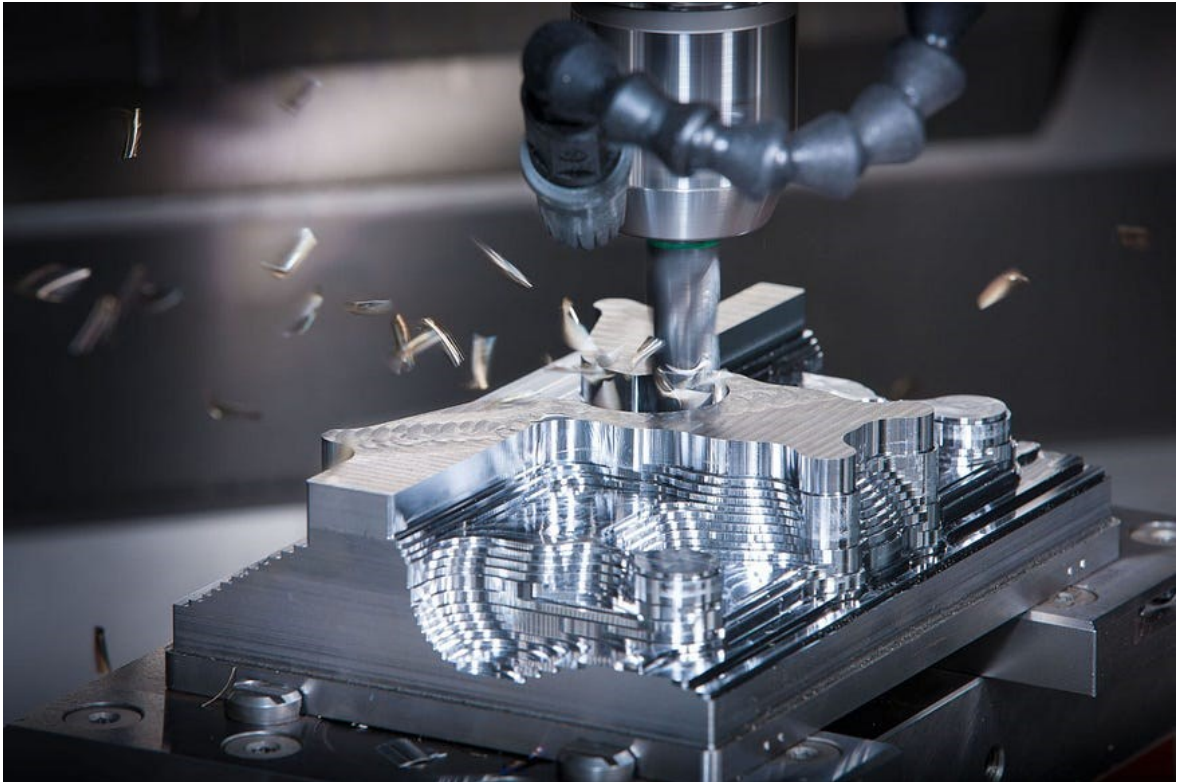
Volba materiálu, z něhož je vstřikovací forma vyrobena má velký vliv na celkovou pořizovací cenu. Volba materiálu ovlivňuje životnost vstřikovací formy i procesní podmínky výroby. Výběr závisí na několika parametrech, jako například pevnost, koeficient tepelné

vodivosti, tvrdost a obrábělnost. Z hlediska pevnosti je pro materiál důležité, aby obstál z pohledu únavového napětí. Toto je napětí vyskytující se opakovaně v desítkách tisíc až milionech cyklů. Únavové napětí odpovídá asi třetině až polovině napětí na mezi kluzu. Materiál formy také ovlivňuje rychlost odvodu tepla z výrobku. Ideální materiál by měl být dostatečně pevný a s vysokým koeficientem tepelné vodivosti. Bohužel však materiály s vysokým koeficientem tepelné vodivosti nemají vysokou pevnost a materiály s vysokou pevností nemají vysoké hodnoty koeficientu tepelné vodivosti. Je tedy třeba udělat kompromis a vybrat materiál který bude vyhovující. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu vstřikovacích forem je ocel. Používají se však také slitiny hliníku, nebo vysoce tepelně vodivé slitiny obsahující měď. [12] [27]

### 4.1.3 Výrobní procesy

Prvním krokem v obrábění desek vstřikovací formy je tzv. zúhlování oceli. Tím se myslí příprava materiálu pro přesnou výrobu v podobě zarovnání ploch a vytvoření otvorů a upínacích držáků. Této části lze předejít nákupem desek pro vstřikovací formy přímo u dodavatele normálíí. Desky od dodavatele jsou v tomto stavu již dodány od výrobce. Dalším krokem ve výrobě desky vstřikovací formy je vyvrtání temperačních kanálů. To se provádí za pomoci vrtáků určených pro dlouhé temperační kanály. Lze použít i klasické šroubovitě vrtáky, ovšem ty umožňují pouze vrtání krátkých kanálů. [12]

Po zhotovení temperačních kanálů přichází na řadu vytvoření tvarových ploch. Nejprve probíhá hrubování s přídavkem 1,5 mm od finálního tvaru. Poté je nutné vytvořit finální přesný tvar. Používá se buďto klasických obráběcích metod jako je frézování, nebo také lze využít nekonvenčních obráběcích technologií za použití elektroerozivního obrábění. Pokud je zvoleno elektroerozivní obrábění, je nutné vyrobit tvarové elektrody. Ty jsou vyrobeny z mědi, bronzu, nebo grafitu. Ve prospěch grafitu hraje především možnost obrábět jemnější detaily než u dalších dvou materiálů. Tvorba tvarových ploch je následována tzv. 2,5D obráběním. Tím je myšleno obrábění všech ploch, jež netvoří vyráběný díl. Jedná se tedy o dosedací elementy, otvory pro šrouby, prostory vedení posuvných prvků atd. Pro výrobu tvarových částí vstřikovacích forem se používá pětiosých CNC center. [28] [27]



*Obr. 17 Hrubování tvarové vložky vstřikovací formy na pětiosém obráběcím centru. [29]*

Posledním krokem výroby desky vstřikovací formy je leštění tvarových ploch, případně tvorba dezénu, záleží na požadavcích. Leštění probíhá ručně. Další fází je kontrola správného dosednutí dosedacích ploch, hlavně dělicí roviny. Této kontrole se říká tuširování a spočívá v nanesení barvy na jednu stranu styčných ploch vstřikovací formy. Poté se obě části složí a v místě kde došlo ke styku dojde k barevnému otisku. Jakmile je otisk uspokojivý, je forma připravena k finální montáži všech periférií. [12]

## **4.2 Optimalizace vstřikovacího procesu**

Optimalizace procesu z ekonomického hlediska spočívá především v úpravě procesních podmínek tak, aby byl vstřikovací cyklus co nejrychlejší. To znamená že na výrobu jednoho kusu bude potřeba méně času a forma tedy bude nabízet vyšší výrobní kapacitu za daný čas. Vyšší výrobní kapacita pomůže vrátit rychleji investici vloženou do výroby vstřikovací formy, a také lze vydělat více peněz díky vyššímu množství výrobků. V některých případech však ani po takové optimalizaci není čas pro výrobu jednoho dílu dostatečně krátký. Tento problém lze napravit tak, že vstřikovací forma bude obsahovat více tvarových dutin. Na jeden výrobní cyklus tak forma vyrobí místo jednoho kusu více výrobků. Tím se teoreticky snižuje výrobní čas potřebný na výrobu jednoho kusu. Zvýšení počtu tvarových dutin není

možno provést u každé formy. Překážek v tomto kroku může být hned několik. Forma musí dodržet určité rozměry, aby ji bylo použít na strojích jež jsou momentálně k dispozici. V opačném případě je nutné pořídit takový stroj, aby s ním tato forma byla kompatibilní. Dalším faktorem je složitost vyráběného dílu a dutiny formy. Pokud bude díl příliš složitý s vyšším množstvím dělicích rovin, může to být překážka pro tvorbu vícenásobné formy, zejména z hlediska omezeného prostoru. [30]

Dalším způsobem, jak optimalizovat ekonomiku vstřikovacího procesu může být úprava vtokového systému. Na tvorbu studeného vtokového systému je nutné vynaložit určité množství materiálu, který je sice spotřebován, ale není součástí samotného výrobku. Je tedy nutno využít více materiálu, než je nutné. V tomto ohledu je výhodné použití vyhřívaného vtokového systému. Horký vtokový systém nelze vždy zanést až do dutiny formy. V tomto případě lze využít alespoň kombinace horkého a studeného vtokového systému. Tím dojde ke snížení objemu materiálu potřebného na jeden cyklus, ale stále ještě zbývá studený rozvodný kanál, který je třeba od finálního výrobku oddělit a následně recyklovat. [26]

### **4.3 Porovnání různých typů vstřikovacích forem**

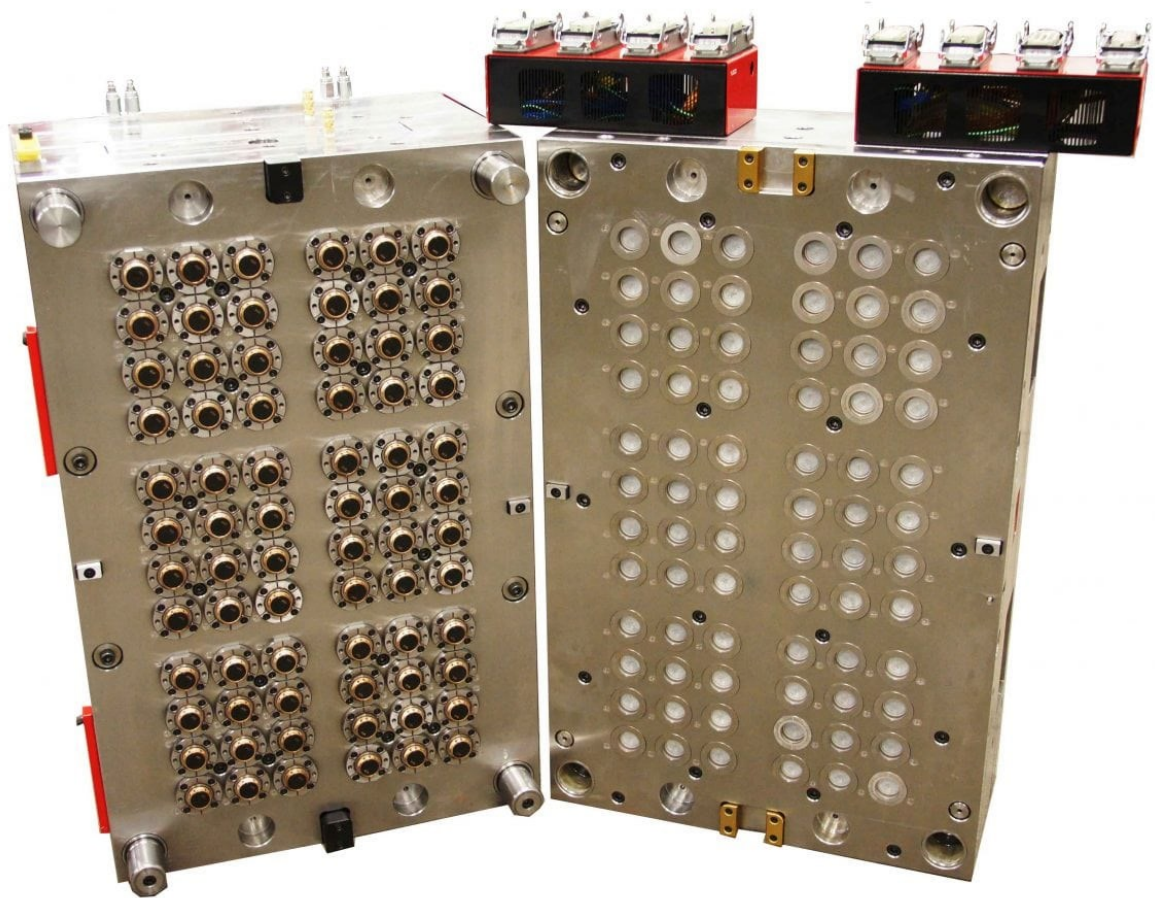
#### **4.3.1 Jednonásobná forma**

Jednonásobná vstřikovací forma je v kombinaci se studeným vtokovým systémem nejlevnější variantou. Taková forma bude disponovat malými rozměry a nižšími nároky na údržbu. Tento typ řešení je tedy vhodný pro menší firmy, případně pro projekty s nižším počtem vyrobených kusů. Vhodnost spočívá především v nižší ceně takového nástroje proti nástrojům se složitější konstrukcí. [11]

#### **4.3.2 Vícenásobná forma**

Vícenásobné vstřikovací formy jsou velmi rozšířené, jelikož nabízí výrazně vyšší výrobní kapacitu proti formám jednonásobným. Často se volí varianta se dvěma a čtyřmi tvarovými dutinami. Pro velké série výrobků s nižší složitostí se však lze setkat i s formami vyrábějícími na jeden výrobní cyklus více než 64 výrobků. Vícenásobná forma je dražší na výrobu díky vyšší složitosti konstrukce. Forma také může být větší rozměrově díky přidání více tvarových dutin. Forma je tedy obecně nákladnější než forma jednonásobná, díky vyšší výrobní kapacitě je však také výdělečnější. [9] [11]





*Obr. 18 Vstřikovací forma pro výrobu víček na PET lahve, obsahující 72 tvarových dutin.*  
[31]

#### **4.3.3 Forma pro dvou stupňové vstřikování**

Tyto formy jsou určeny pro tzv. overmoulding. Tím se rozumí výroba vstřikovaného výrobku na dvě vstřikovací fáze. Může se jednat o různě barevný materiál, stejný materiál či jiný materiál. Technologie overmouldingu se využívá i pro výrobu tlustostěnných výrobků. Ty by nemohly být vyrobeny na jeden cyklus, protože vlivem velké tloušťky by docházelo k tvorbě propadlin při chladnutí taveniny. Díky této technologii je však výroba umožněna, jelikož je nejprve vstříknuta pouze polovina finální tloušťky a poté je dostříknuta druhá polovina. Pomocí overmouldingu však lze také vyrábět například vícebarevné díly, či rukojeť na ruční nástroje na kterou je v druhé fázi vstříknut termoplastický elastomer. [2]  
[11]



*Obr. 19 Forma pro dvou komponentní vstřikování. V první fázi dojde ke vstřiknutí žluté části dílu. Poté dojde k rotaci formy o 180° podél osy vstřikování a následně je vstřiknut černý termoplastický elastomer sloužící pro lepší úchop. [32]*

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 STANOVENÍ CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

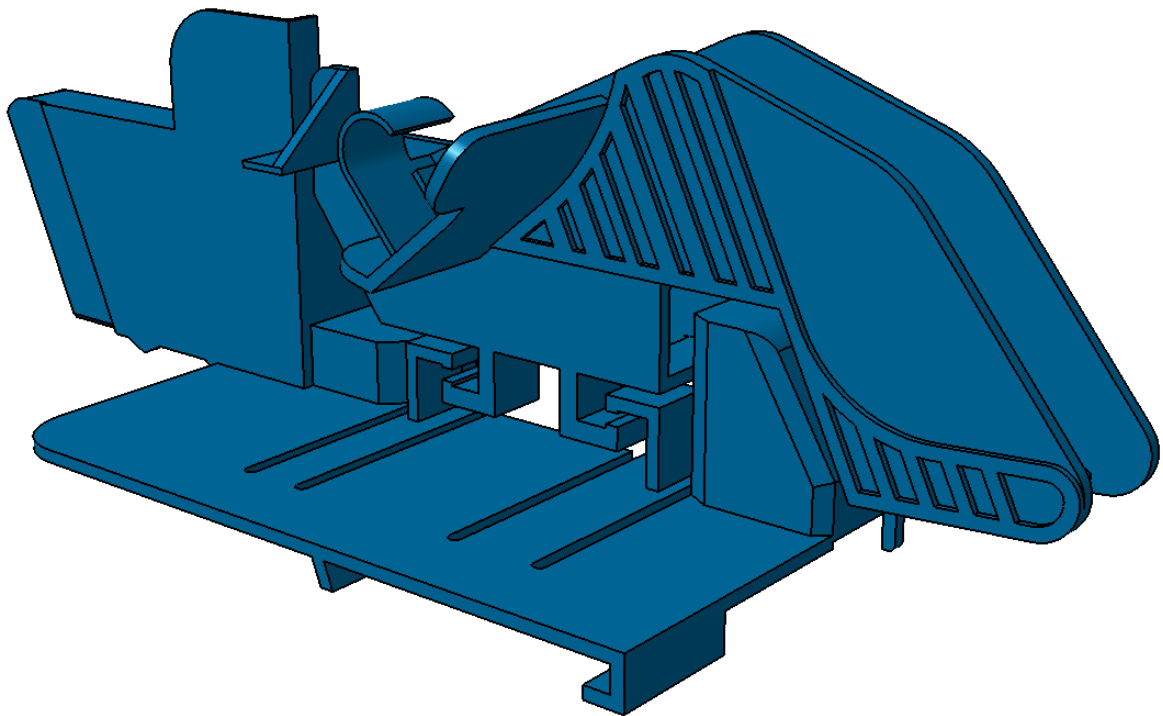
Cíle praktické části této diplomové práce jsou následující:

- Vytvoření 3D modelu zadaného výrobku.
- Zhotovení simulací toku taveniny a porovnání výsledků několika druhů konstrukce vstřikovací formy.
- Konstrukce 3D modelu kompletní vstřikovací formy.
- Ověření funkčnosti vstřikovací formy a optimalizace procesních podmínek.
- Zhotovení výkresové dokumentace.

Hlavním cílem praktické části je konstrukční návrh vstřikovací formy. Pro optimalizaci formy byl využit software Autodesk Moldflow, který slouží k tvorbě tokových analýz při vstřikovacím procesu. S jeho pomocí byl vybrán nejvhodnější druh vtokového systému a nastavení procesních podmínek. 3D model zadaného výrobku i vstřikovací formy byl zhotoven s pomocí softwaru CATIA V5 od společnosti Dassault Systèmes.

## 6 ZADANÝ VÝROBEK

Zadaným výrobkem je součást vnitřního mechanismu tiskárny. Rozměry výrobku jsou 90 x 34 x 33 mm (délka x šířka x výška) a jeho hmotnost je 9,1 g. Součást je vyrobena z materiálu POM viz. teoretická část, kapitola Polyoxymethylen – POM. Jako konkrétní materiál pro potřeby praktické části byl vybrán Celcon M450 od amerického výrobce Celanese. Jedná se materiál s velmi vysokým indexem toku taveniny a tím pádem vynikající zatékavostí. Díky tomu je vhodný pro tenkostěnné výrobky s dlouhou dráhou toku materiálu a pro výrobky s členitými tvary. [33]



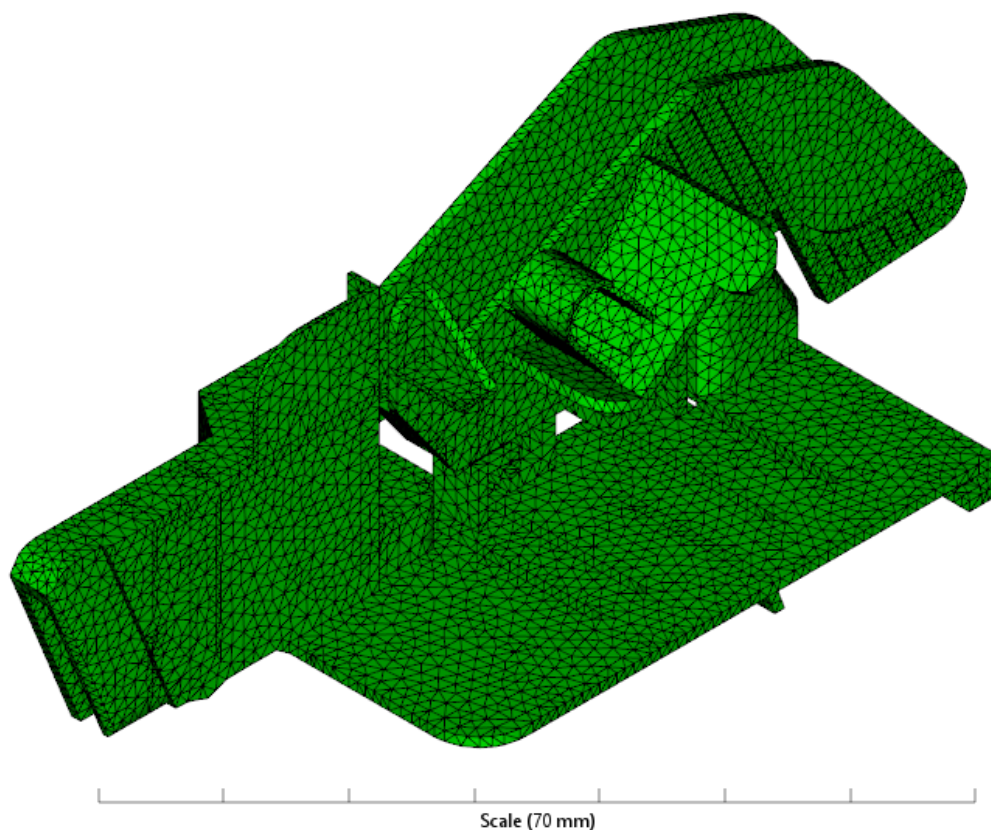
*Obr. 20 3D model zadaného výrobku*

## 7 NASTAVENÍ SIMULACE TOKU MATERIÁLU

Nastavení analýzy začíná importem geometrie. Je tedy nutné dopředu připravit 3D model výrobku a křivky pro vtokový systém a temperační okruhy. Jakmile je geometrie importována do programu, jsou nastaveny parametry, podle kterých program bude vědět, jak s jednotlivými prvky geometrie pracovat. Následuje vytvoření sítě. Ta v případě 3D modelu kopíruje jeho tvar, nebo v případě křivek převádí elementy ve formě čar na trojrozměrné prvky typu Beam. Před importem modelu do programu je potřeba odstranit zaoblení o poloměru menším než R2.

### 7.1 Tvorba sítě

Byl zvolen 2,5D typ sítě. Takto značíme síť, která není složená z 3D elementů, ale z několika vrstev 1D elementů. Tento typ nastavení umožňuje dostatečně přesné výsledky analýzy při zachování rozumně dlouhého času, po který se analýza počítá. Model výrobku byl vysíťován pomocí elementů o délce 1,3 mm.



Obr. 21 Vysíťovaný 3D model výrobku.

Následně proběhla kontrola parametrů sítě. Je důležité, aby síť co nejvíce odpovídala skutečné geometrii výrobku a zároveň neobsahovala vady v podobě děr, různé orientace, nebo překrývajících se elementů. Výsledek diagnostiky sítě byl uspokojivý a lze tedy konstatovat že síť je vyhovující pro potřeby analýzy.

```

Triangles
-----
Entity counts:
  Triangles          94594
  Connected nodes   47275
  Connectivity regions 5

  Invisible triangles          516

Area:
(Mold blocks and cooling channels are not
included)
  Surface Area:          613.492 cm^2

Volume by element types:
  Triangle:          29.061 cm^3

Aspect Ratio:
  Maximum   Average   Minimum
    9.19     1.71     1.16

Edge details:
  Free edges          0
  Manifold edges     141891
  Non-manifold edges 0

Orientation details:
  Elements not oriented 0

Intersection details:
  Element intersections 0
  Fully overlapping elements 0

Match percentage:
  Match percentage     93.9%
  Reciprocal percentage 95.0%

```

Obr. 22 Výsledek diagnostiky sítě výrobku.

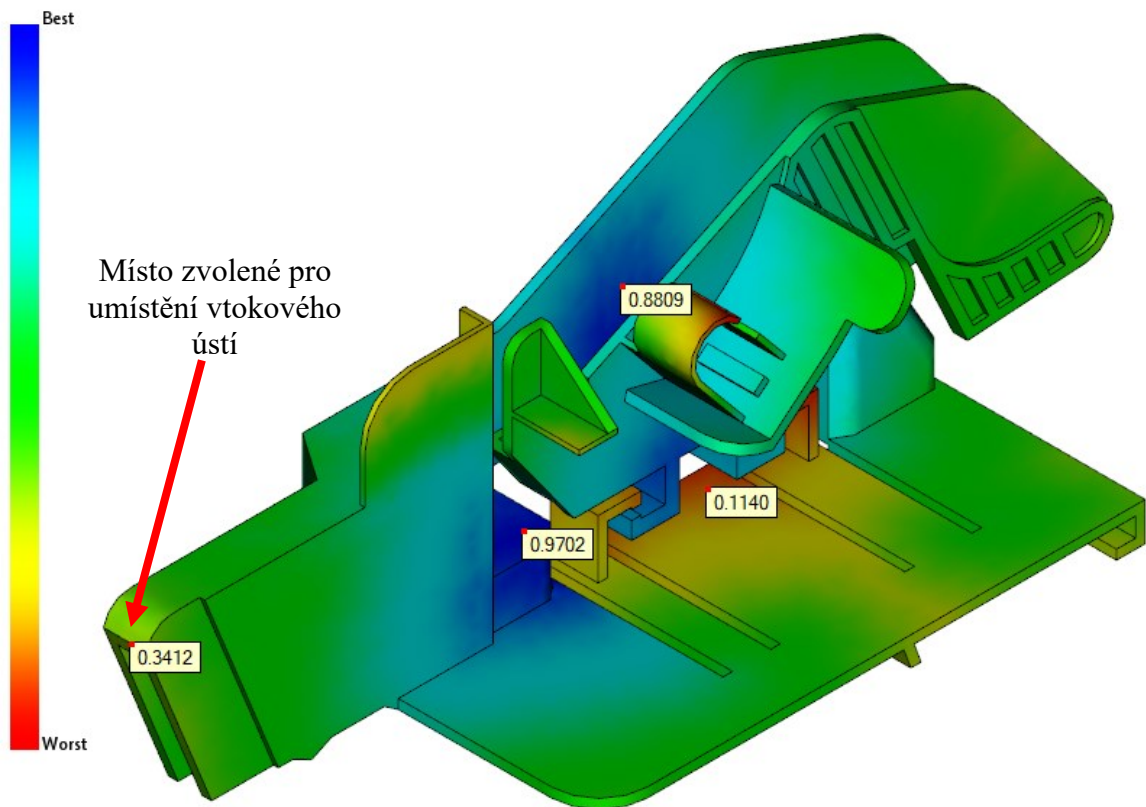
## 7.2 Umístění vtokového ústí

První provedenou analýzou byla vhodnost umístění vtokového ústí. Čím blíže je výsledná hodnota k číslu 1, tím optimálnější je umístit vtokové ústí právě do tohoto bodu. Analýza bere v potaz geometrii výrobku, nejlepší místo je takové, ze kterého je zaplněna dutina formy taveninou nejsnáze a s nejnižším odporem. Analýza slouží pouze jako doporučení, jelikož bere v potaz pouze vhodnost umístění z hlediska zaplnění dutiny. Ovšem pouze velmi zřídka lze opravdu do místa s nejvyšší hodnotou vtokové ústí umístit. Ve většině případů je nutno zvolit jiné místo.

Tato situace nastala i v tomto případě. Místo s nejvyšší hodnotou vhodnosti umístění je sice dobře přístupné, ale v těchto místech se musí nacházet boční odformování. Nelze zaměnit hlavní a vedlejší dělicí roviny, jelikož by boční odformování bylo příliš hluboké a zároveň mělo velkou styčnou plochu s dílem. To by mělo za následek velmi obtížné, ne-li nemožné



odformování výrobku. Vybráno bylo nakonec místo zvýrazněné na obrázku níže. I přes relativně nízkou hodnotu vhodnosti umístění vtokového ústí (0,34 tj. 34%) je místem s dostatečnou hodnotou, a zároveň místem kde je vtokové ústí umístitelné.

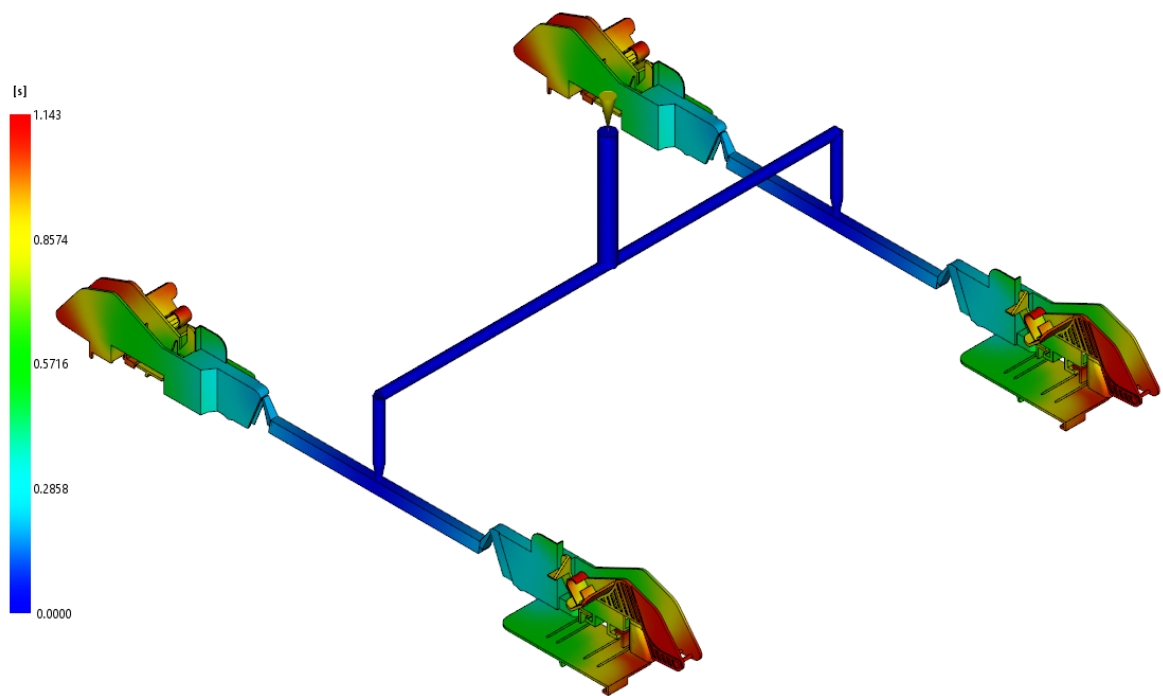


Obr. 23 Výsledek analýzy vhodnosti umístění vtokového ústí

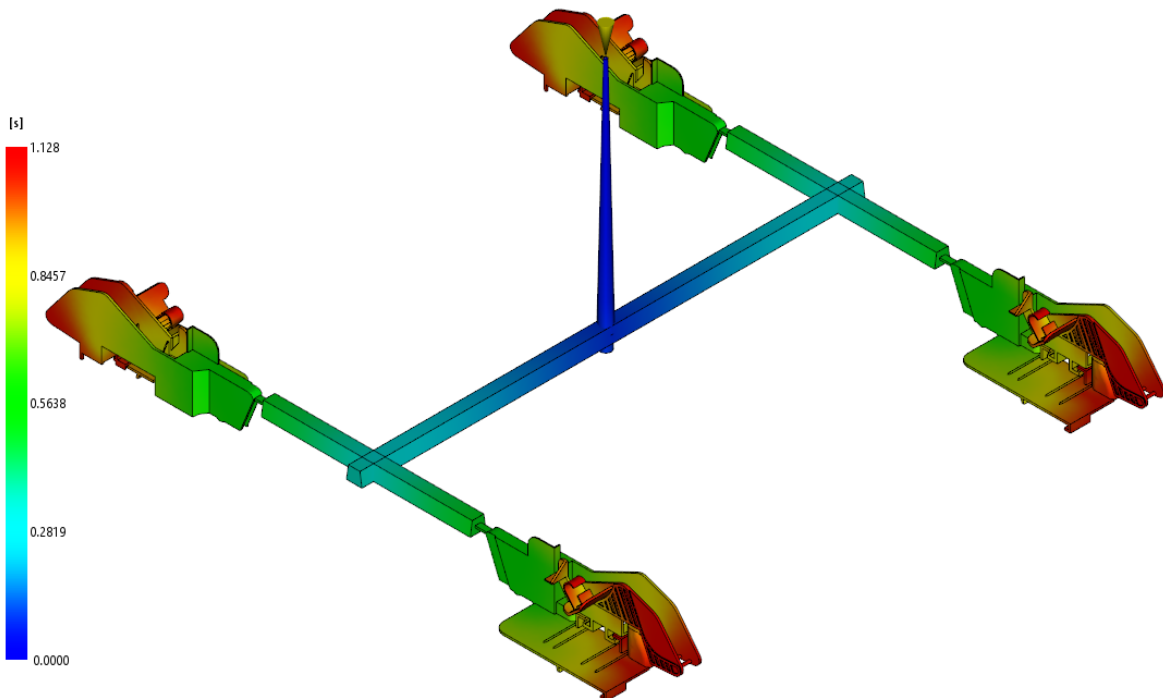
### 7.3 Volba vtokového systému

Při konstrukci vstřikovací formy je možné vybírat ze tří hlavních druhů vtokového systému – studený, vyhříváný a kombinovaný vtokový systém. Každé konstrukční řešení obsahuje určité výhody i nevýhody. V tomto případě nebylo možné použít kompletní vyhříváný vtokový systém kvůli nevyhovující geometrii výrobku. Byla provedena analýza zaplnění dutiny formy pro studený a kombinovaný vtokový systém. Kombinovaný vtokový systém zaplnil dutinu za 1,143 s, zatímco varianta s kompletně studeným vtokovým systémem ji zaplnila za 1,128 s. Rozdíl je tedy velmi malý. Výhodou kombinovaného vtokového systému obvykle je úspora materiálu na vtokový systém. V tomto případě však ani úspora materiálu není dostatečně velká na to, aby vykompenzovala výrazně vyšší pořizovací náklady. Bylo tedy rozhodnuto o použití studeného vtokového systému.





Obr. 24 Analýza zaplnění dutiny pro variantu s kombinovaným vtokovým systémem.

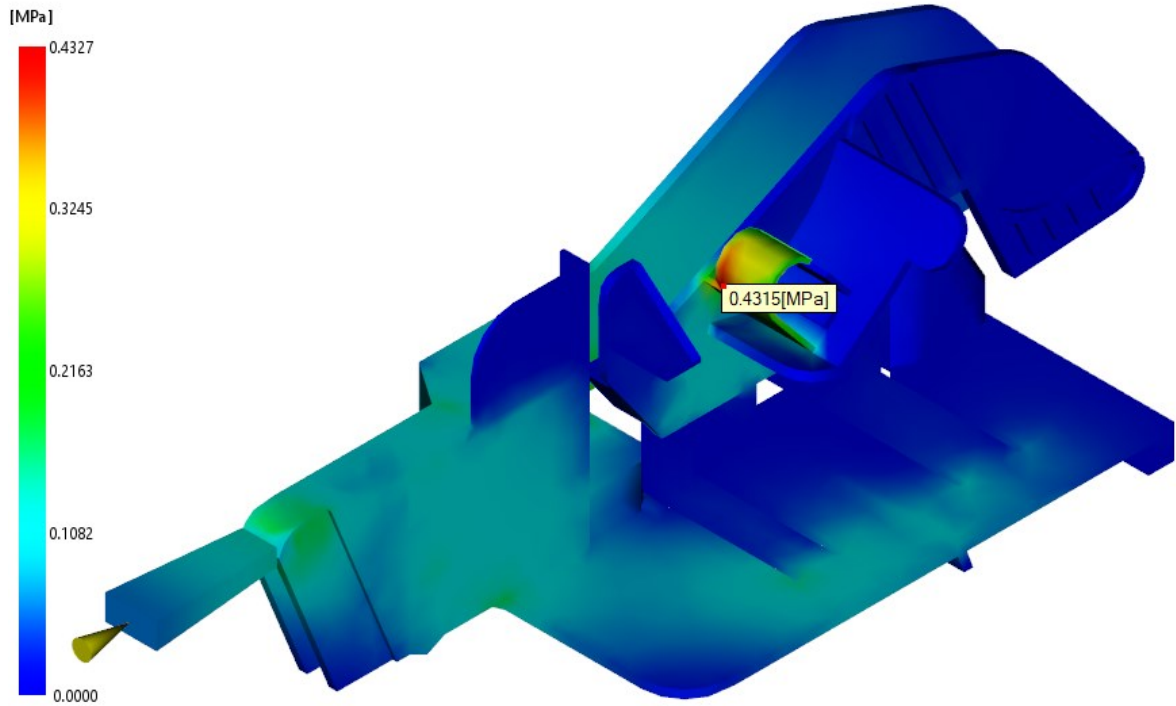


Obr. 25 Analýza zaplnění dutiny pro variantu se studeným vtokovým systémem.

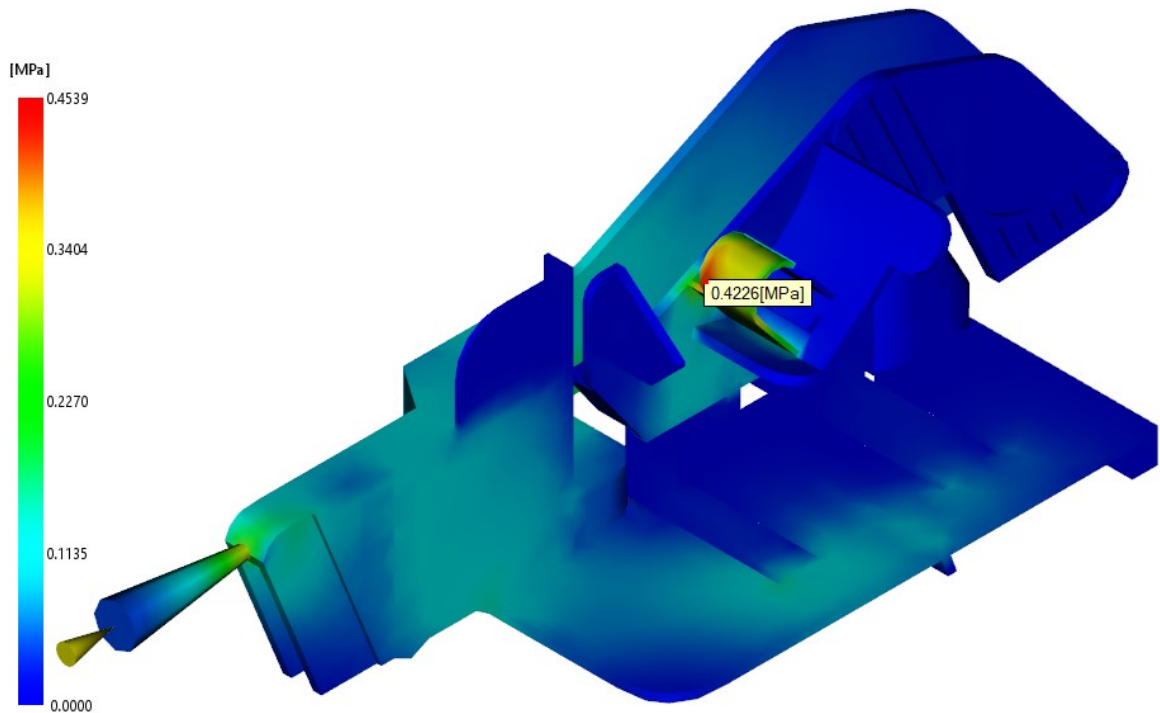
## 7.4 Volba vtokového ústí

Pomocí analýzy bylo otestováno několik druhů vtokových ústí. Na základě výsledků analýzy bylo vybráno zužující se vtokové ústí o obdélníkovém průřezu, kvůli nejnižší hodnotě

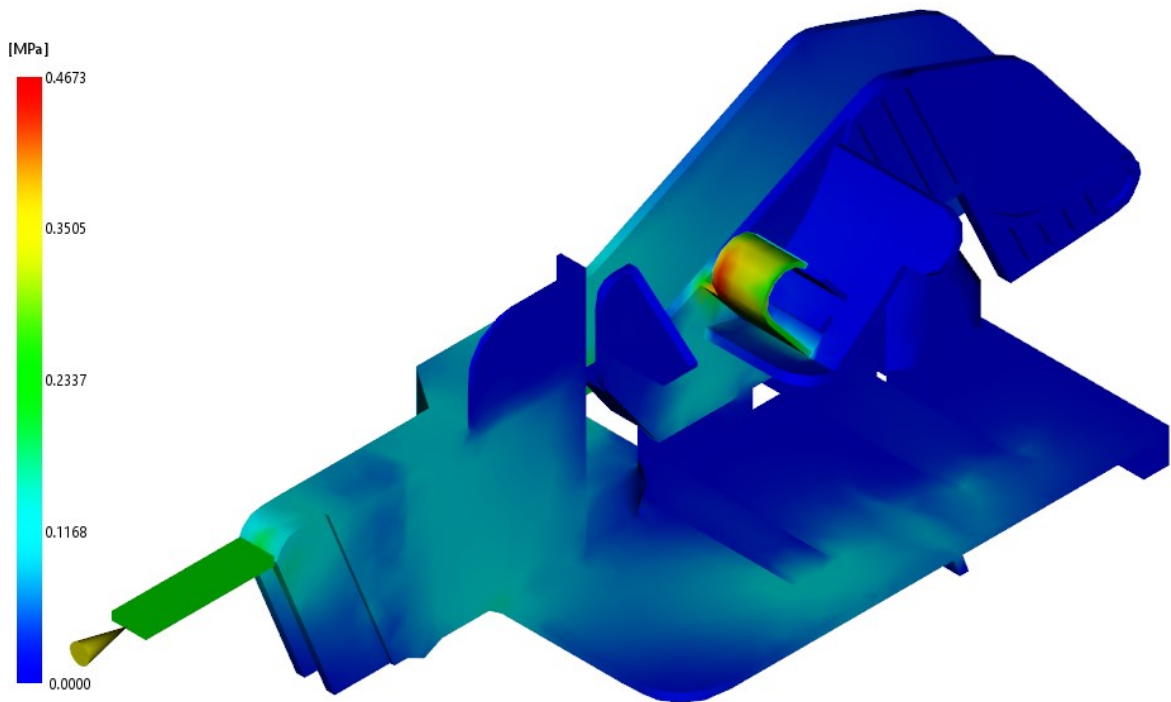
smykového napětí na stěně. Také umožňovalo největší možný průřez při zachování geometrie výrobku. Finální rozměry studeného vtokového systému jsou uvedeny v následující tabulce.



*Obr. 26 Smykové napětí na stěně při použití zužujícího se vtokového ústí o obdélníkovém průřezu.*



*Obr. 27 Smykové napětí na stěně při použití kuželového vtokového ústí.*



Obr. 28 Smykové napětí na stěně při použití se vtokového ústí o obdélníkovém průřezu.

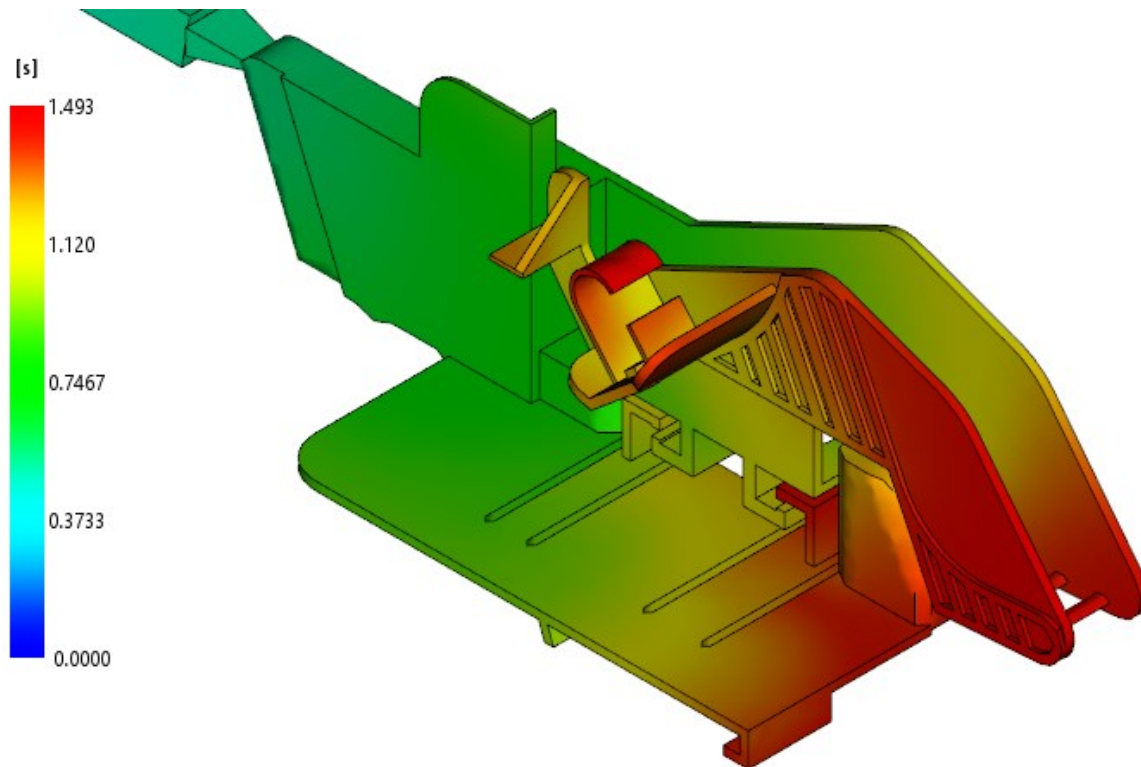
Tab. 1 Rozměry studeného vtokového systému

Část vtokového systému	Tvar průřezu	Rozměry
Vtoková vložka	zvětšující se kruhový průřez	průměr 2,8 až 7 mm
Rozvodný kanál	Lichoběžníkový průřez	$l_1 = 7$ mm, $l_2 = 5$ mm, $v = 5$ mm
Vtokové ústí	zmenšující se obdélníkový průřez	$s_1 = 6$ mm, $v_1 = 3$ mm; $š_2 = 4$ mm, $v_2 = 1$ mm

## 7.5 Čas plnění

Tento výsledek ilustruje postupné plnění dutiny formy polymerní taveninou. Slouží k posouzení, zda je dutina formy plněna úplně či pouze částečně. V případě větší násobnosti formy indikuje, zda je plnění všech dutin rovnoměrné. Pokud výsledek není uspokojivý, je nutné provést úpravy v geometrii výrobku, vtokovém systému nebo upravit procesní podmínky vstřikovacího procesu. Tímto způsobem lze efektivně reagovat na nedostatky a

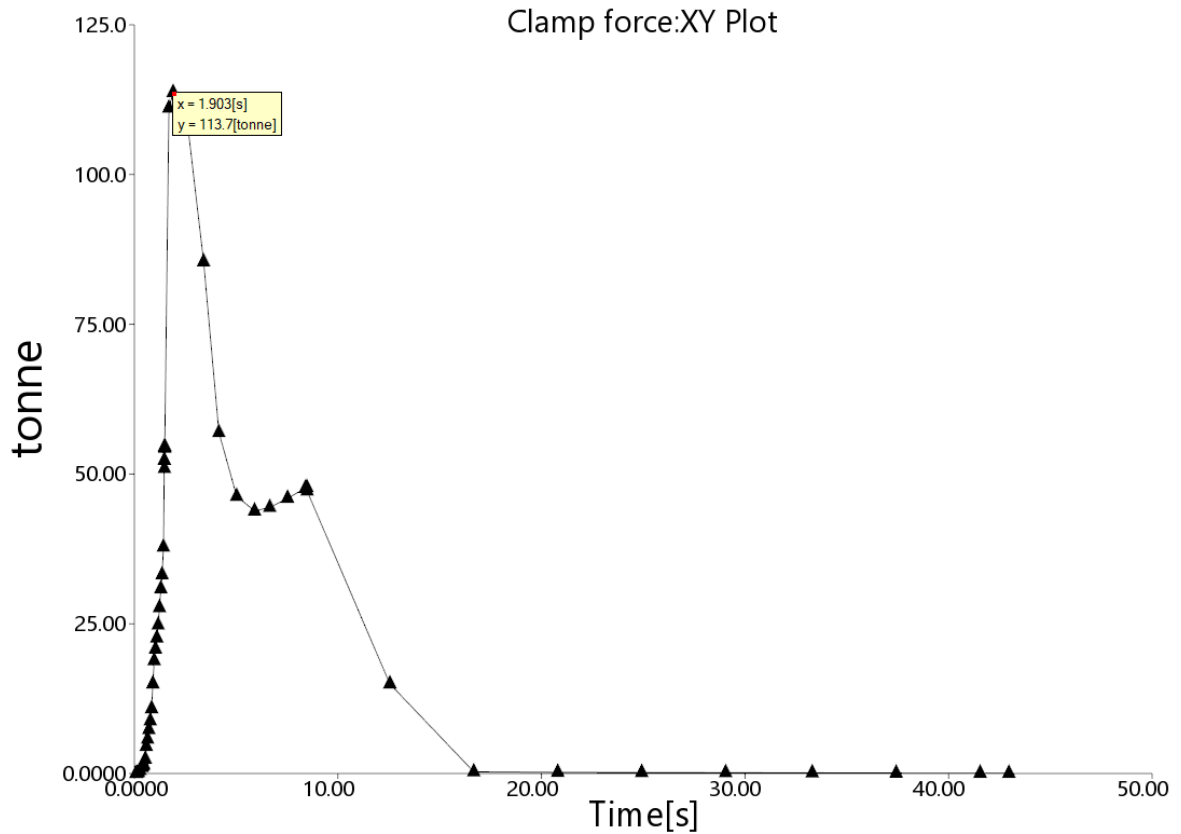
optimalizovat průběh vstřikování pro dosažení požadovaných výsledků. V tomto případě je dutina formy kompletně zaplněna za 1,493 s. Při prvních pokusech však docházelo k nekompletnímu zaplnění tvarové dutiny.



Obr. 29 Zobrazení času plnění dutiny formy

## 7.6 Uzavírací síla

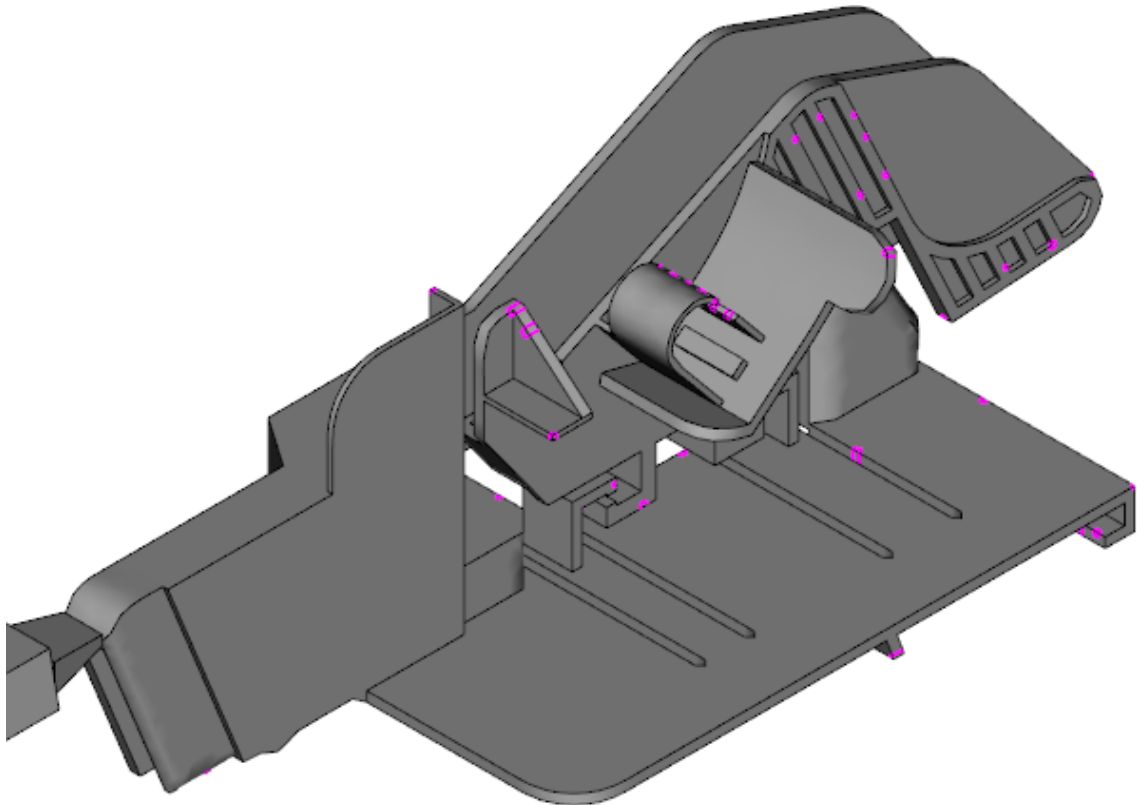
Výsledek ukazuje, jaká síla ve směru osy Z (osa vstříknutí taveniny) je vyžadována uzavírací jednotkou vstřikovacího stroje během vstřikování, aby se zabránilo nežádoucímu otevření formy. Výsledek této analýzy značí, jakou minimální uzavírací silou musí použitý vstřikovací stroj disponovat, aby nedošlo k otevření dělicí roviny formy již během fáze vstřikování. Je však vhodné aby uzavírací jednotka disponovala alespoň o 25% vyšší uzavírací silou než je výsledek této analýzy, aby byla rezerva pro případné nepřesnosti. Zjištěná maximální hodnota potřebné uzavírací síly činí 113,7 tun (tj. 1 137 kN).



Obr. 30 Graf znázorňující průběh síly potřebné pro uzavření vstřikovací formy

## 7.7 Vzduchové kapsy

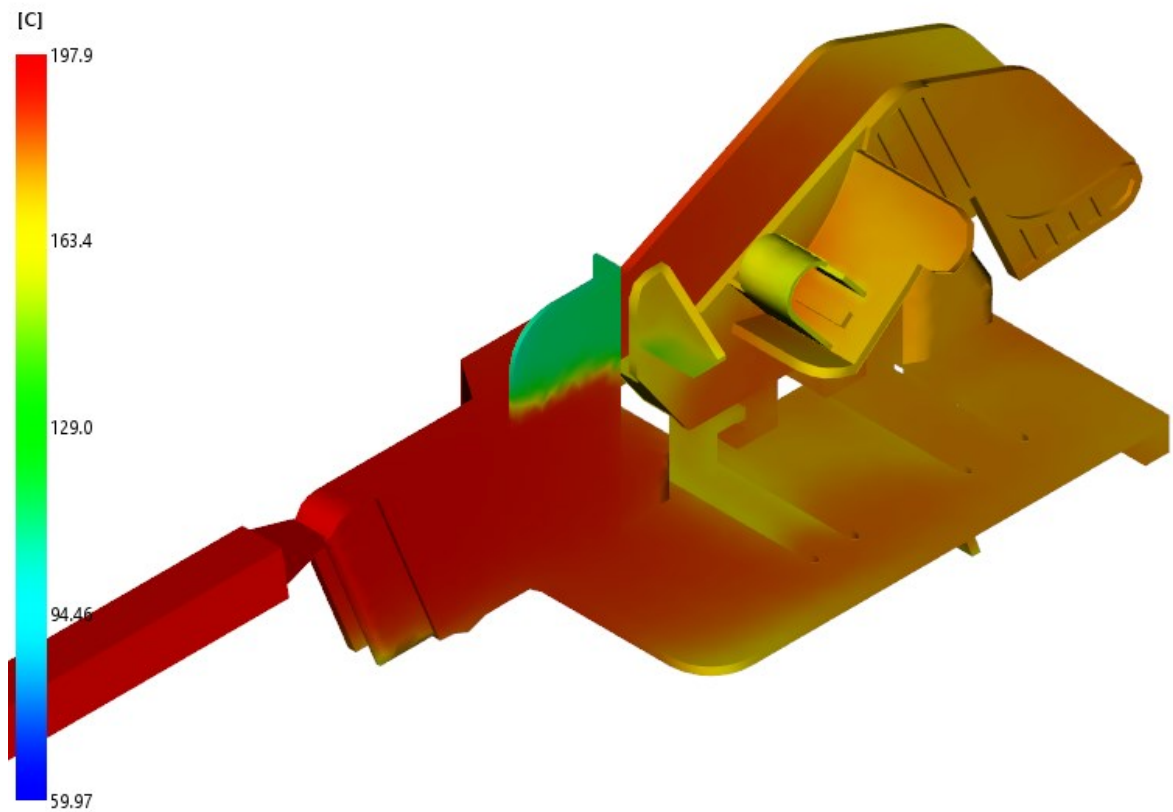
Tento výsledek znázorňuje místa, v nichž dochází k uzavření vzduchu. Ten může být vlivem tlaku taveniny za velmi krátkou dobu stlačen na minimální objem. Toto stlačení má za následek zvýšení jeho teploty až na takovou hodnotu, že může dojít k degradaci materiálu na povrchu součásti. Body, jež byly v analýze vyhodnoceny jako místa vzniku vzduchových kapes jsou velmi blízko dělicí rovině. Tato skutečnost však není ve výsledku analýzy zahrnuta. Díky blízkosti vzduchových kapes od dělicí roviny lze předpokládat únik vzduchu tímto směrem.



*Obr. 31 Místa vyobrazena jako potenciální tvorba vzduchových kapes*

## 7.8 Teplota taveniny

Tento výsledek udává maximální teplotu, kterou tavenina dosáhla během vstřikovacího procesu. Materiál POM, ze kterého je výrobek vytvořen je velmi citlivý právě na překročení maximální povolené teploty taveniny. Výrobce udává, že maximální doporučená teplota zpracování taveniny pro materiál Celcon M450 je 190 °C. Maximální teplota, kterou materiál může dosáhnout, než dojde k jeho degradaci je 210 °C. Výsledek analýzy je, že tavenina dosáhla maximální teploty 197,9 °C. Tato hodnota je sice vyšší než doporučená zpracovatelská teplota materiálu, ale stále se vyskytuje v bezpečných mezích od maximální vhodné teploty. Teplota taveniny materiálu během vstřikování je tedy vyhovující, jelikož zvýšená teplota trvá pouze velmi krátce a nedochází k degradaci materiálu. Naopak při snížení teploty taveniny by došlo k příliš nízké teplotě v místech vzdálených od vtokového ústí. To by mělo za následek zhoršení plnění tvarové dutiny, které by vedlo k výrobě nedotečených výrobků.



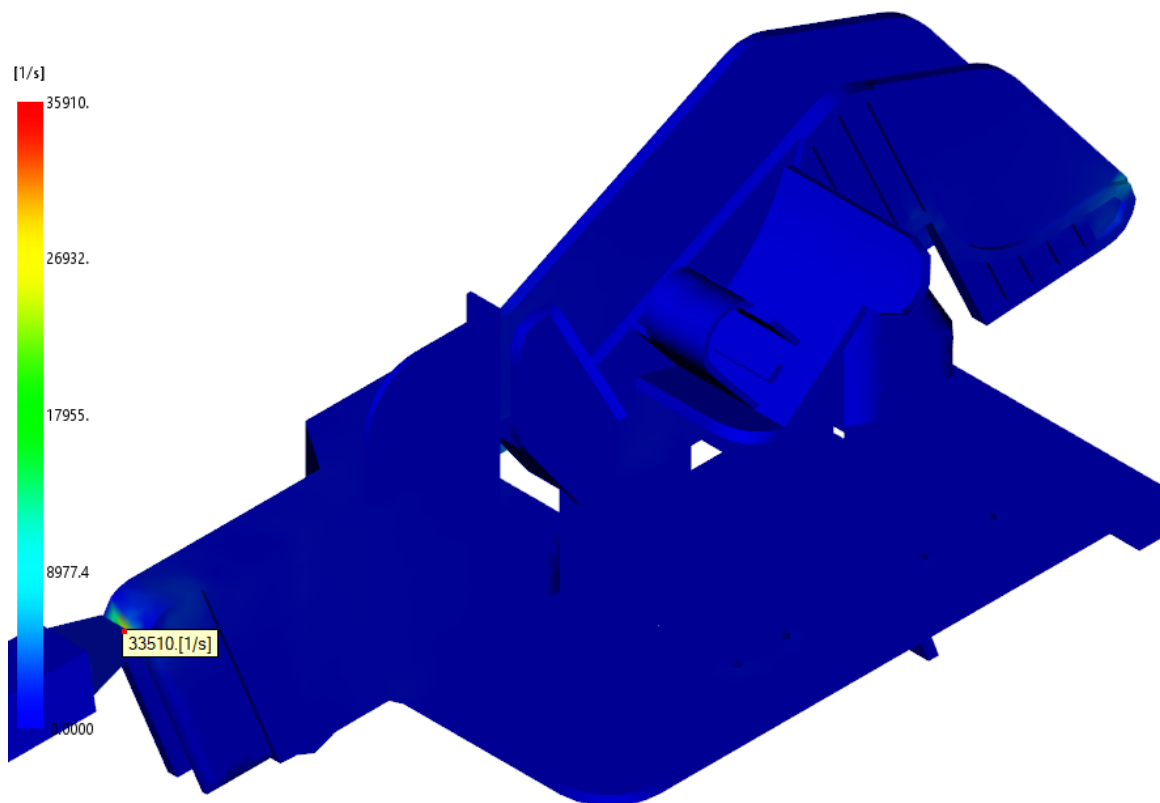
Obr. 32 Maximální teplota taveniny v průběhu vstřikovacího procesu.

## 7.9 Rychlost smykové deformace

Nepřekročení maximální rychlosti smykové deformace je stejně důležité jako nepřekročení maximální povolené teploty taveniny. Výrobce materiálu udává jako maximální přípustnou rychlost smykové deformace jako  $39\,000\text{ s}^{-1}$ . Při překročení této hodnoty dochází k nevratné degradaci materiálu. Simulace odhalila maximální rychlost smykové deformace jako  $81\,613\text{ s}^{-1}$ . Nelze však najít žádný bod kde by se taková rychlost smykové deformace, byť jen přibližovala této hodnotě. Jde tedy s největší pravděpodobností o chybu programu, kdy se tento výsledek objevuje pouze v pár elementech a to izolovaně. Nejvyšší uvěřitelná hodnota rychlosti smykové deformace se vyskytuje v oblasti vtokového ústí a dosahuje hodnoty



$35\,910\text{ s}^{-1}$ . Byť se již přibližuje kritické hodnotě, vyhovuje hodnotě stanovené výrobcem materiálu.



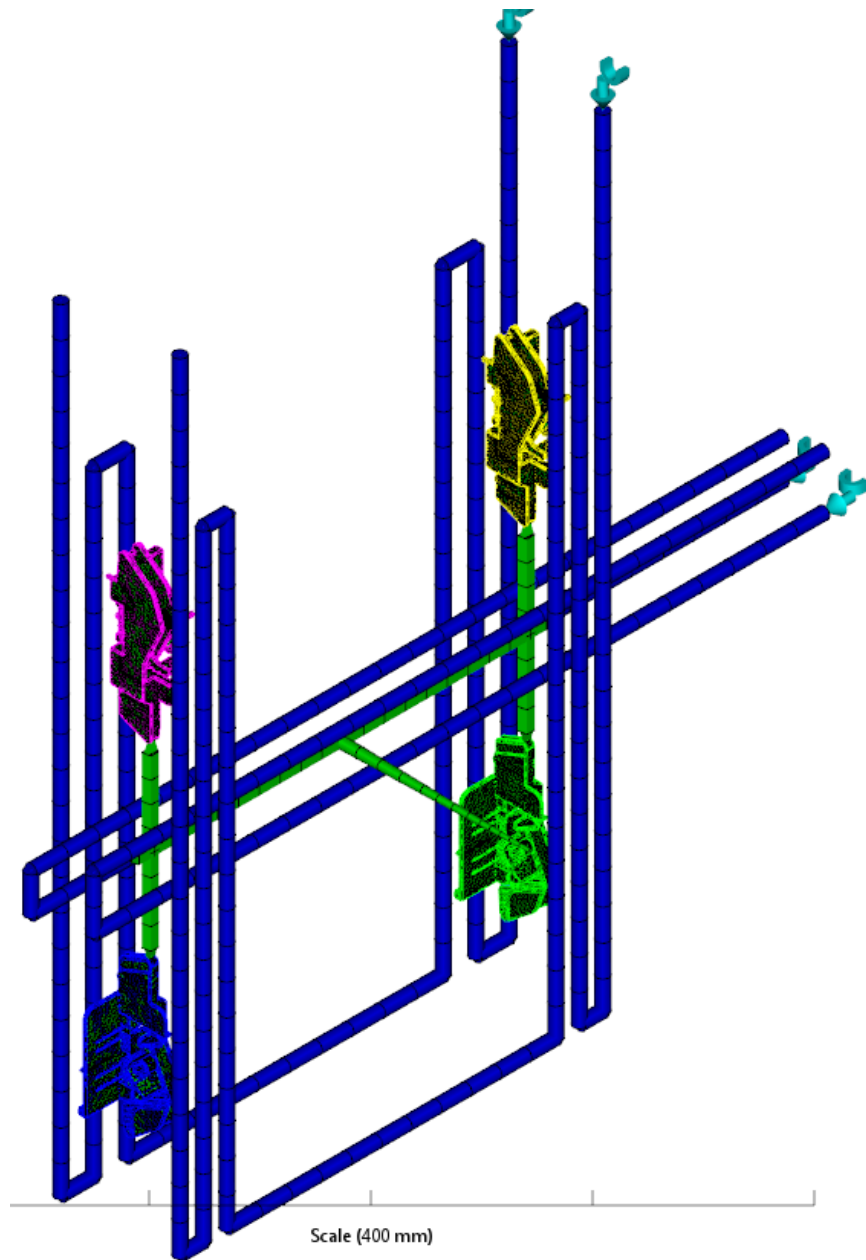
*Obr. 33 Rychlost smykové deformace*

## 7.10 Temperace

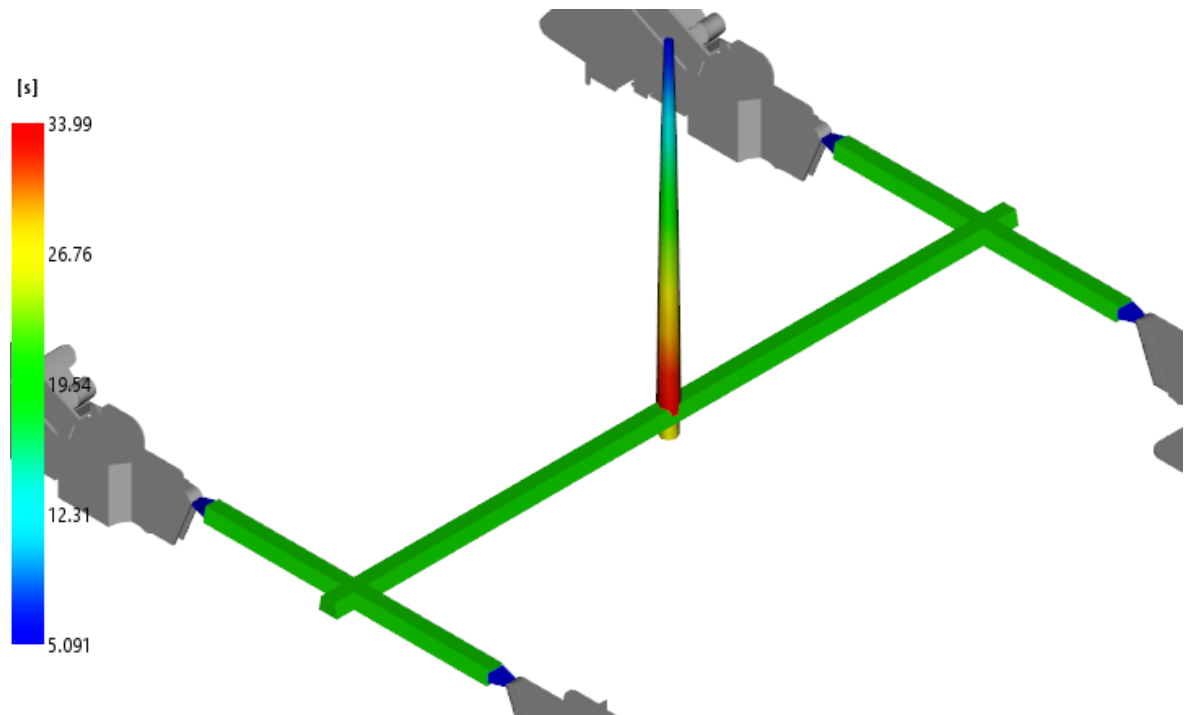
Trajektorie temperačních kanálů byla navržena v programu CATIA V5 a následně importována ve formě čar. Těmto čarám byl následně přidělen typ geometrie channel, který odpovídá temperačním kanálům. Průměr průřezu všech temperačních kanálů je 8 mm. Po vytvoření sítě temperace bylo potřeba upravit rozměry jednotlivých elementů tak, aby byl poměr délky a průměru co nejbližší hodnotě 2,5. Následně byly zvoleny body vstupu temperačního média a nastaveny parametry toku. Temperačním médiem byla zvolena směs etylenglykolu a vody v poměru 20/80. Je důležité zajistit, aby médium proudilo v temperačních kanálech turbulentním prouděním. Částečné turbulentní proudění se vyskytuje při hodnotách nad 4 000, zatímco 100 % turbulentní proudění je dosaženo při hodnotách nad 10 000. Při nastavení průtoku média na hodnotu 4 l/min dosahovala hodnota Reynoldsova čísla hodnoty 15 212, což znamená že dochází k turbulentnímu proudění. Teplota temperačního média byla nastavena na  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Výrobek je možno naprosto bezpečně



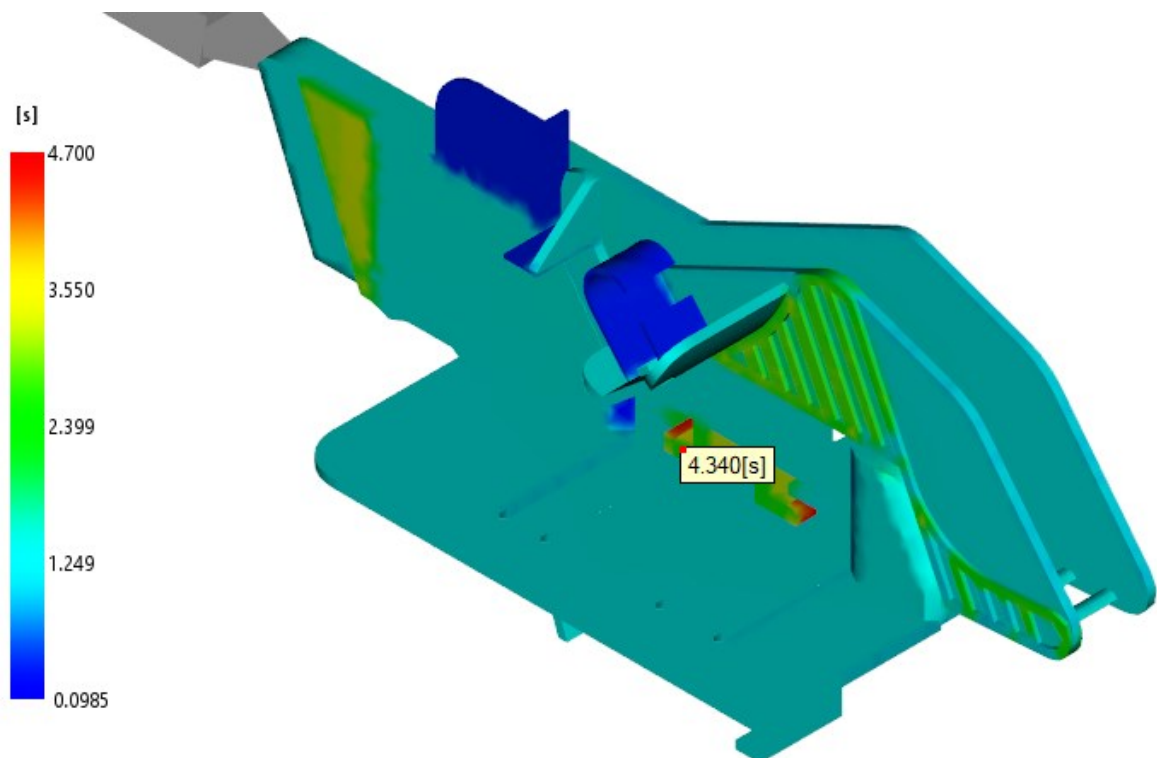
vyjmout z formy po 34 s, kdy dojde k dosažení vyhazovací teploty ve 100 % objemu vstříkované dávky.



*Obr. 34 Vysíťované temperační okruhy.*



Obr. 35 Výsledný čas potřebný pro zchlazení vtokového systému na vyhazovací teplotu.



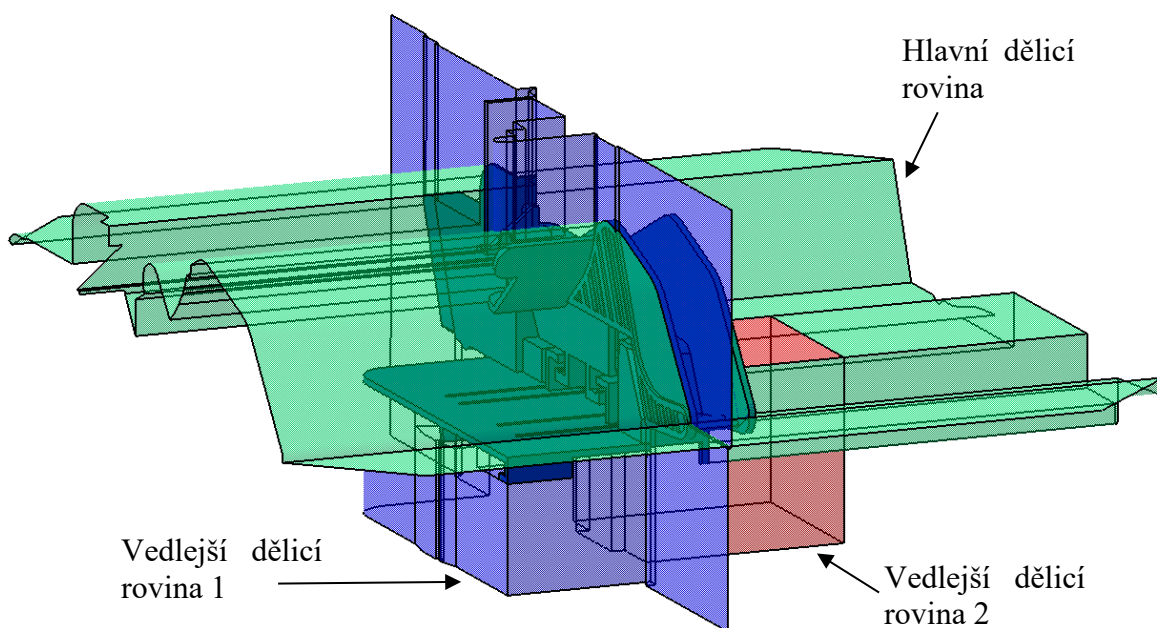
Obr. 36 Čas potřebný pro zchlazení výrobku na vyhazovací teplotu.

## 8 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

Pro konstrukci 3D modelu vstřikovací formy bylo využito programových prostředí Core & Cavity Design, Mold Tooling Design, Generative Shape Design a Part Design v programu CATIA V5. Všechny normalizované prvky byly vybrány z katalogu firmy Meusburger pro zajištění co nejvyšší míry kompatibility.

### 8.1 Dělicí roviny

Prvním krokem při návrhu konstrukce vstřikovací formy je vytvoření tvarových prvků. K tomu je nejprve potřeba vytvořit dělicí roviny. V tomto případě bylo zapotřebí použít 3 dělicí roviny. Jednu hlavní a dvě vedlejší, které byly použity pro tvorbu bočních odformování. Hlavní dělicí rovina je kolmá ke směru otevírání formy. Vedlejší dělicí roviny jsou se směrem otevírání formy rovnoběžné a slouží k tvorbě tvarů které by nebylo možné odformovat pomocí hlavní dělicí roviny.



Obr. 37 Zobrazení dělicích rovin.

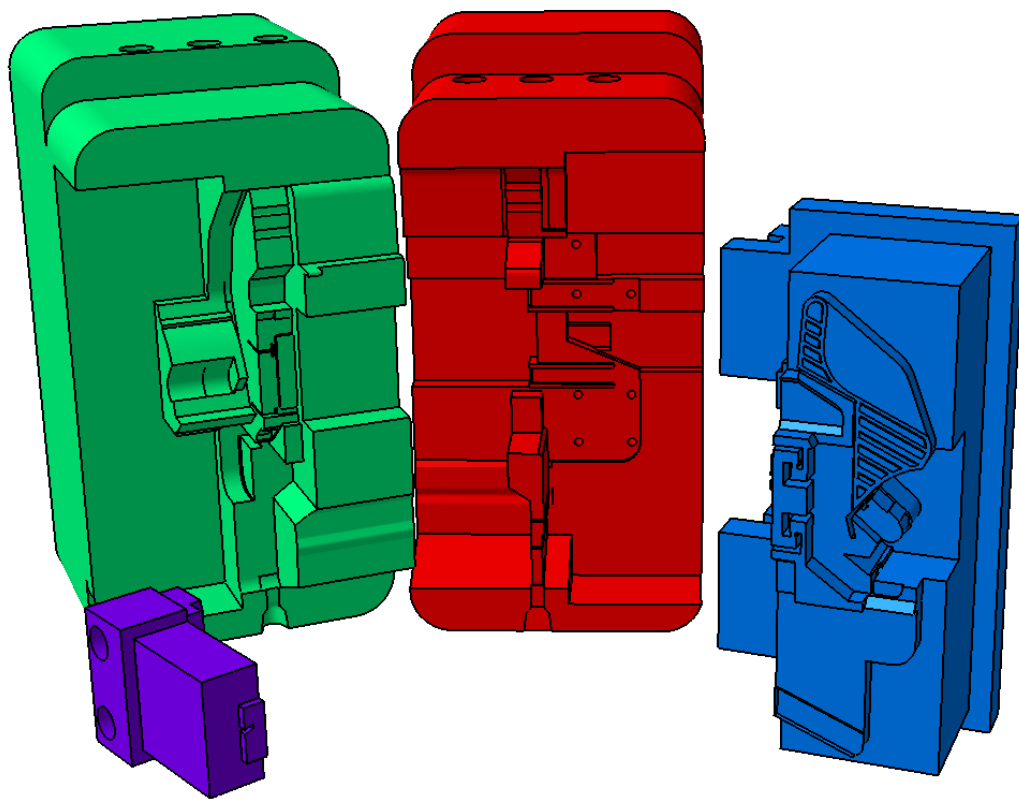
*Zelená – hlavní dělicí rovina, modrá a červená – vedlejší dělicí roviny*

### 8.2 Tvarové části

Jakmile byly zhotoveny dělicí roviny, byly využity k tvorbě tvarových ploch vstřikovací formy. Pro lepší eliminaci případného poškození a úspory nákladů bylo rozhodnuto, že

tvarové části budou vyměnitelné, tudíž se bude jednat o tzv. tvarové vložky. Ty se poté zasadí do otvoru předem nachystaného v desce vstříkovací formy. Při jejich vytvoření je třeba brát v potaz smrštění vstříkovaného materiálu. Všechny tvarové prvky jsou tedy zvětšeny proti finálnímu výrobku o hodnotu smrštění materiálu. To je udáváno výrobcem jako 2,3 %.

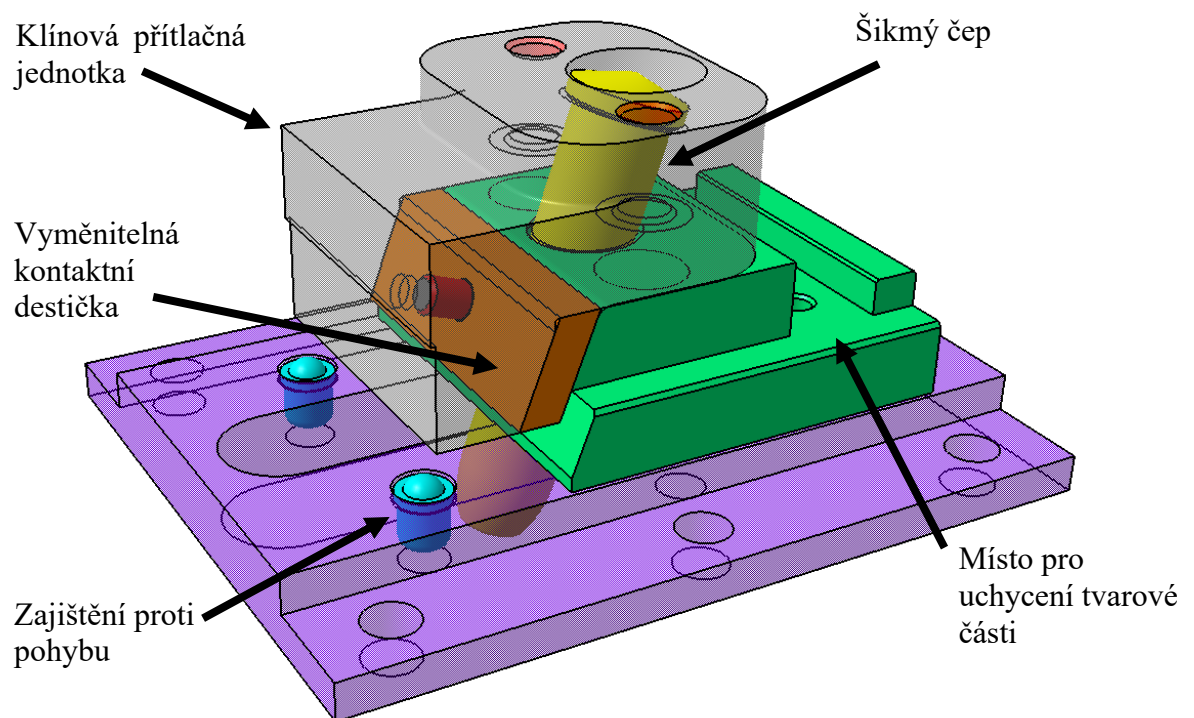
Kvůli vedlejším dělicím rovinám bylo nutné vytvořit i tvarové prvky bočního odformování. Ty na rozdíl od tvárníku a tvárnice nejsou usazeny do desky vstříkovací formy, ale na posuvných jednotkách umožňujících jejich pohyb.



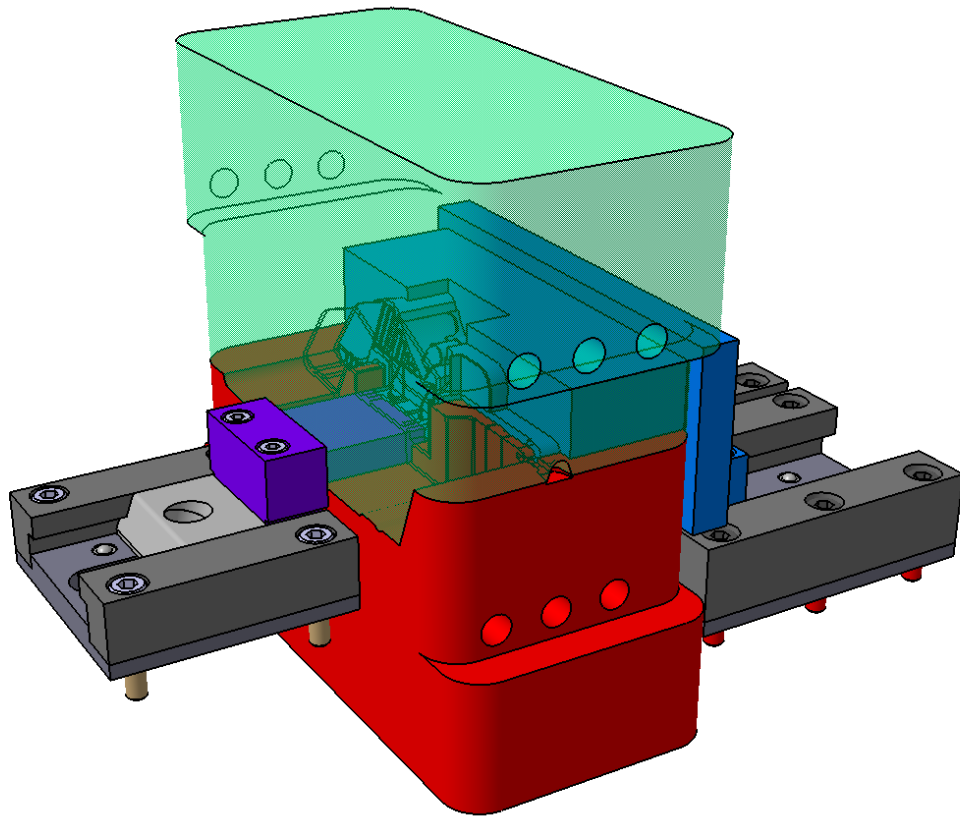
*Obr. 38 Všechny tvarové prvky  
zelená – tvárnice, červená – tvárník, modrá a fialová – prvky bočního odformování*

Pohyb prvků bočního odformování je zajištěn šikmými čepy o sklonu  $18^\circ$ . Aby došlo k požadovanému bočnímu posunu 26,5 mm, je nutné použít čepy o délce alespoň 85,76 mm. S ohledem na částečné zapuštění šikmých čepů byly zvoleny čepy o délce 120 mm. Ty mají účinnou délku 92,9 mm a nabízí tak rezervu vhodnou pro bezpečné vyhození výrobku. Pro odformování druhé dělicí roviny byla zapotřebí kratší délka posunu, takže byly použity šikmé čepy o délce 50 mm. Na šikmé čepy jsou nasunuty protikusy, na kterých je upevněno boční odformování. Otevřením vstříkovací formy tak dochází k pohybu protikusu po

šikmém čepu, což posouvá boční tvarové prvky ve směru kolmém na směr otevírání formy. Při dosažení požadované pozice je boční odformování zajištěno proti samovolnému pohybu pomocí kuličky s pružinou. Zajištění proti pohybu napomáhá ochraně tvarových částí před poškozením. Mezi šikmým čepem a posuvnou jednotkou je vůle. Při uzavření formy jsou tedy boční tvary přitlačeny pomocí klínové přitlačné jednotky. Tím je zajištěno že nedojde k pootevření vedlejších dělicích roviny vlivem vstřikovacího tlaku.



Obr. 39 Funkce šikmého čepu a posuvné jednotky.

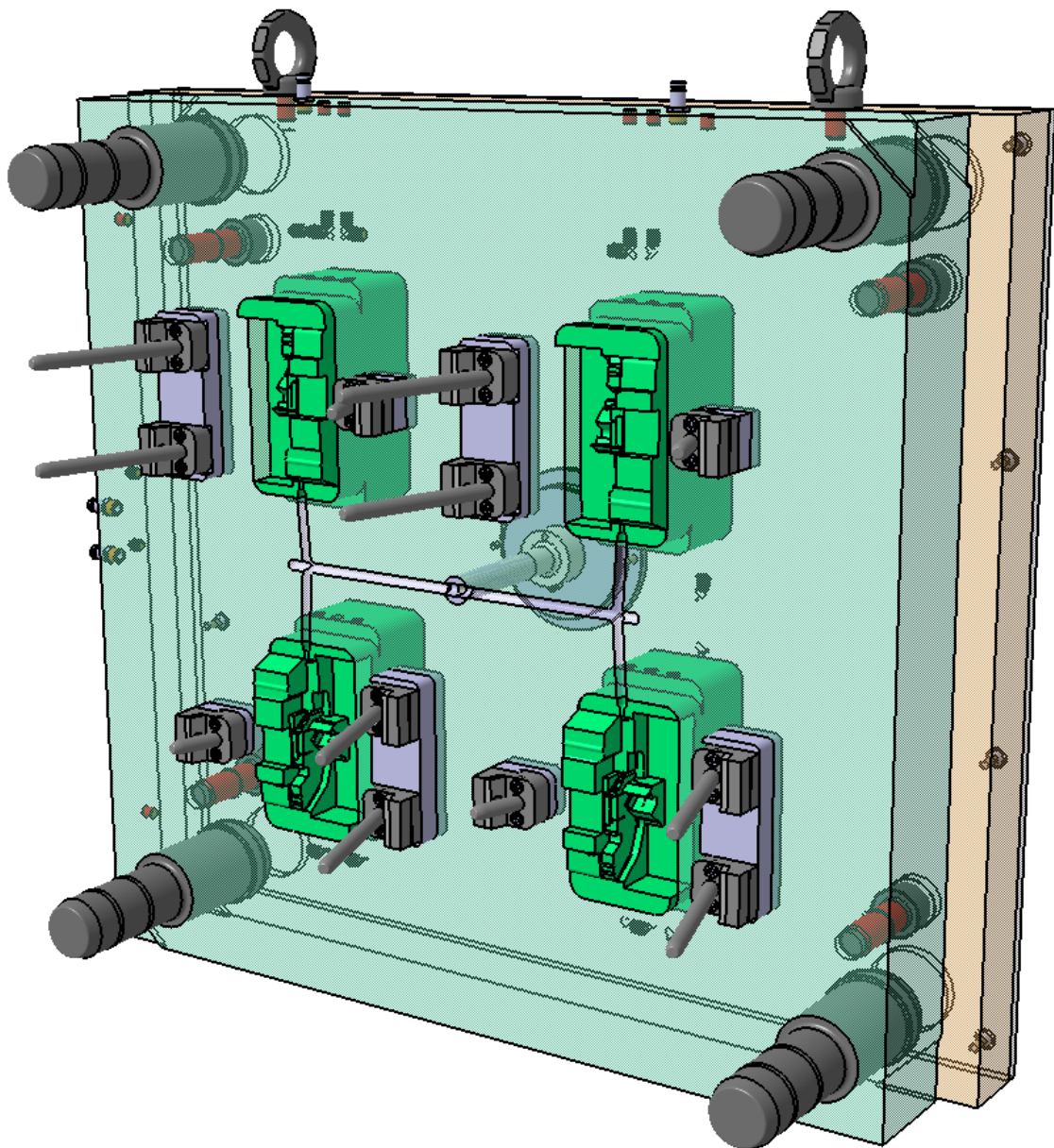


*Obr. 40 Ukázka složené tvarové sestavy včetně posuvného systému (pro přehlednost bez šikmých čepů a přítlačných jednotek).*

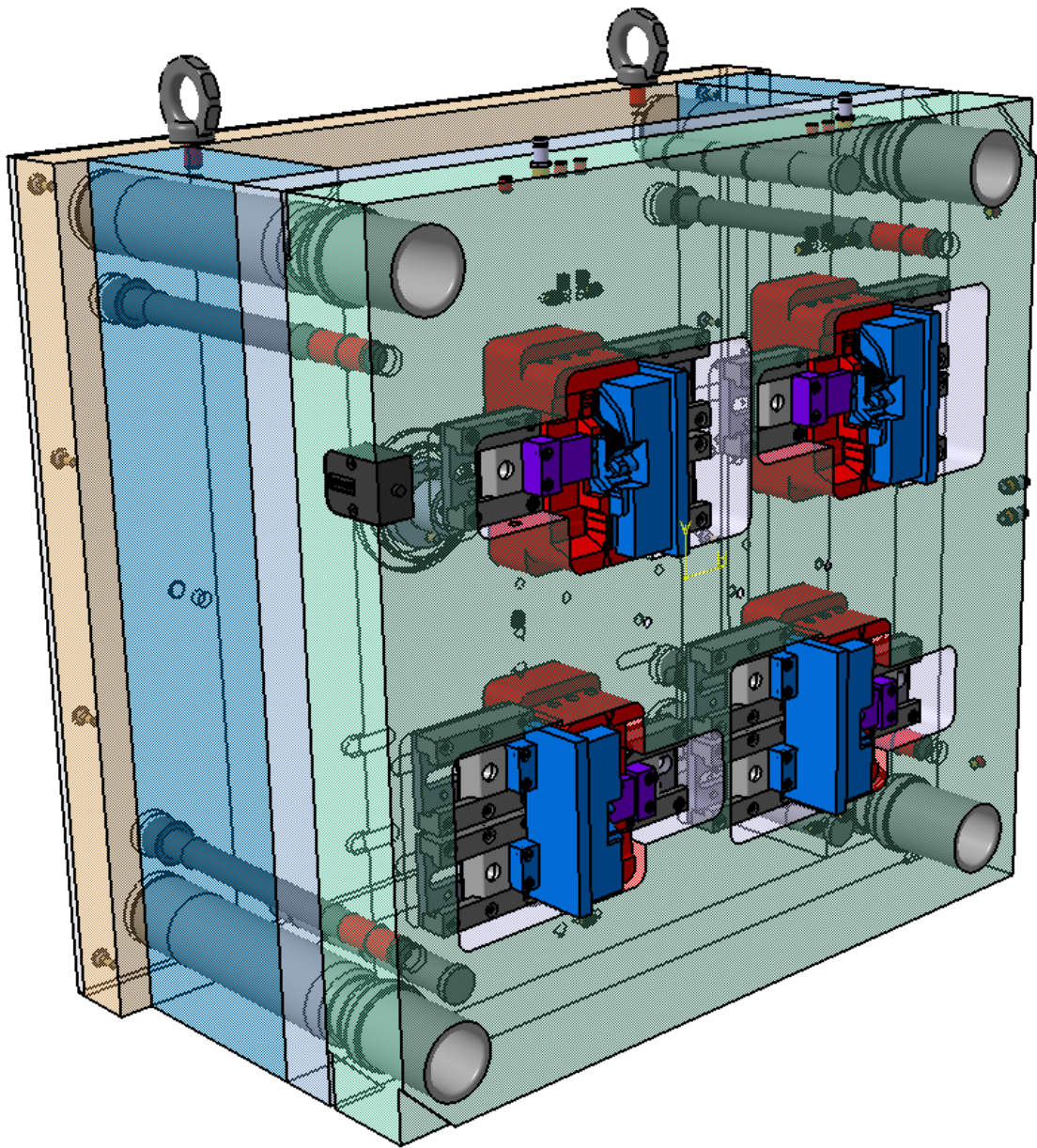
### 8.3 Rám

Rám vstříkovací formy byl vybrán takový, aby byl dostatečně velký, ale zároveň co nejmenší možný. Rám lze rozdělit na dvě části které jsou označovány jako pevná část (při vstříkovacím procesu se nijak nepohybuje) a pohyblivá část (při vstříkovacím procesu odjíždí dozadu čímž se otevírá dělicí rovina a může dojít k vyhození výrobku. Pevná část rámu se skládá ze dvou desek – jedna slouží k upnutí formy na vstříkovací stroj, druhá k ukotvení tvarových částí a zajištění temperace. Pohyblivá část obsahuje celkem pět desek. Jedná se opět o desku upínací a desku kotevní, dále desku opěrnou a dvě desky rozpěrné které tvoří prostor pro vyhazovací systém.





*Obr. 41 Pevná část rámu formy*



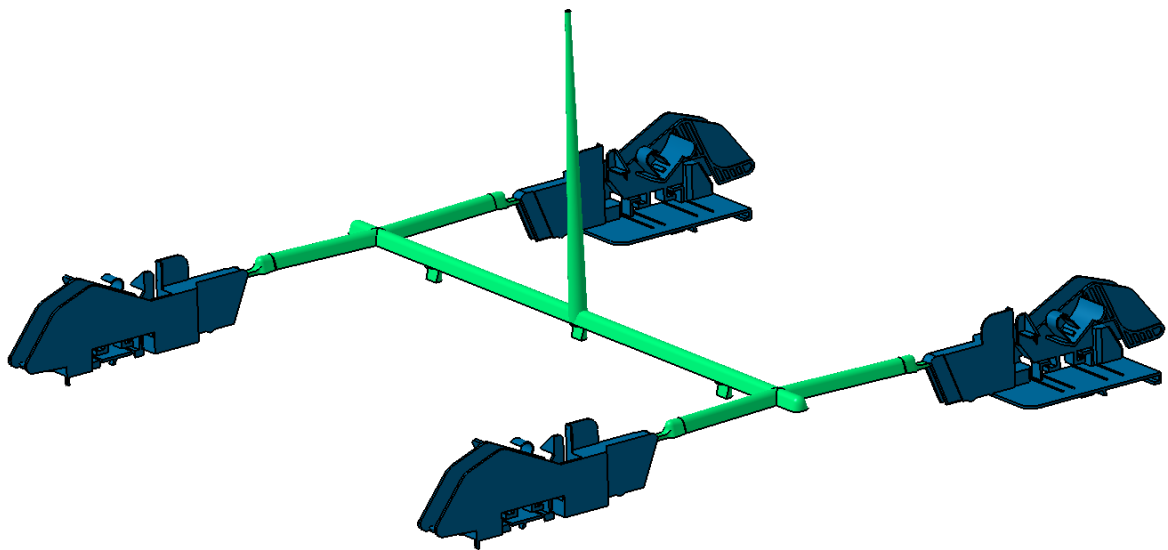
*Obr. 42 Pohyblivá strana rámu formy*

#### **8.4 Vtokový systém**

Vstřikovací forma je čtyřnásobná. Kvůli komplexnímu tvaru výrobku není možné použít vyhřívaný vtokový systém. V úvahu tedy připadal buď vtokový systém studený, nebo kombinovaný. S ohledem na nízkou předpokládanou produkci byl však zvolen studený vtokový systém. Rozvodná část vtokového systému má lichoběžníkový průřez o rozměrech 7 x 5 x 5 mm (šířka spodní části x šířka horní části x výška). Tyto rozměry jsou v porovnání s velikostí výrobku relativně velké. Vzhledem k dlouhé dráze, kterou musí tavenina urazit,



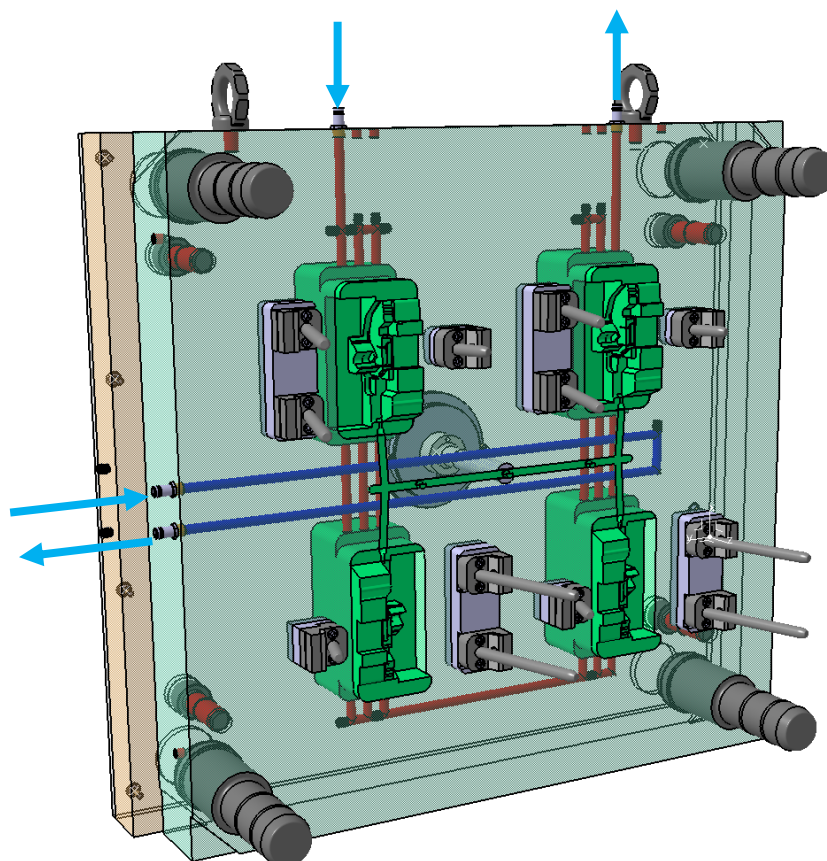
než je dopravena do dutiny formy však nebylo možné zvolit menší průřez rozvodné části vtokového systému. Lichoběžníkový průřez vtokového systému byl zvolen proto, aby nebylo zapotřebí frézovat do kotevní desky pohyblivé části rámu formy. Mohlo by dojít k nepřesnostem při výrobě což by mělo za následek výrazné zhoršení toku polymerní taveniny. Součástí vtokového systému jsou také tři výběžky sloužící jako přídržovače vtoku, aby nedošlo k uváznutí vtoku v nepohyblivé části formy. Vtokové ústí má průřez ve tvaru obdélníku o rozměrech 3 x 1 mm (šířka x výška).



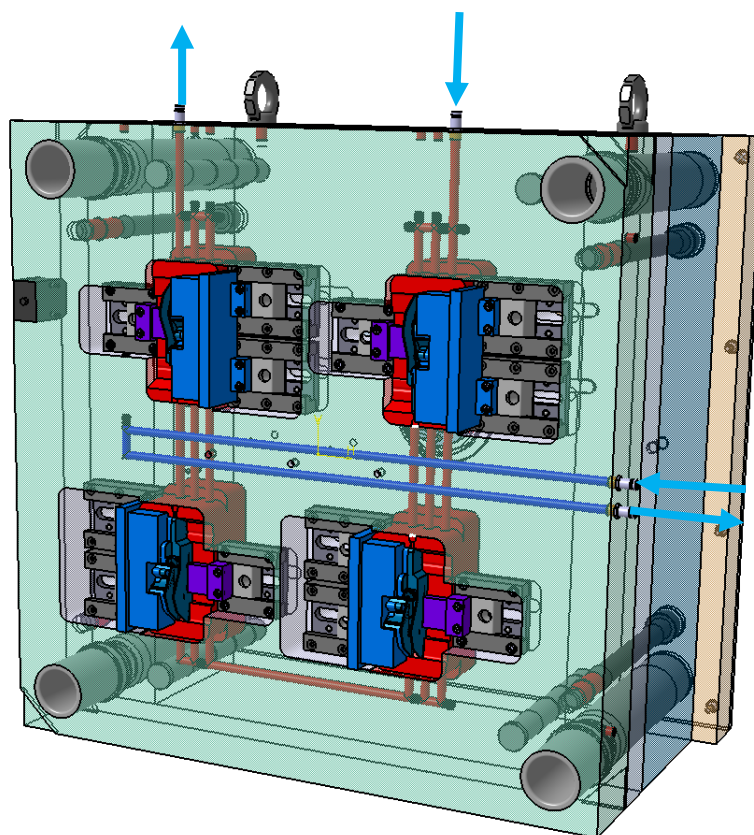
*Obr. 43 Studený vtokový systém*

## 8.5 Temperace formy

Temperační systém byl navržen na základě výsledků tokové simulace. Z výsledků bylo patrné, že samotný výrobek temperaci pro urychlení cyklu nepotřebuje, jelikož díky velmi tenkým stěnám rychle chladne. Bylo však zapotřebí chladit vtokový systém. Jak již bylo zmíněno, vtokový systém má relativně velký průřez, což znamená také delší dobu potřebnou pro zchladnutí materiálu na teplotu, při které jej bude možné bezpečně vyjmout z dutiny formy. Etylenglykol je použit pro své teplotně vodivé vlastnosti, a také snižuje riziko tvorby usazenin a vodního kamene v temperačních kanálech. Temperační kanály jsou vrtané. Součástí temperačních okruhů jsou i normalizované díly v podobě nátrubků a ucpávek.



Obr. 44 Trajektorie temperačních okruhů (červeně a modře) v pevné části formy.

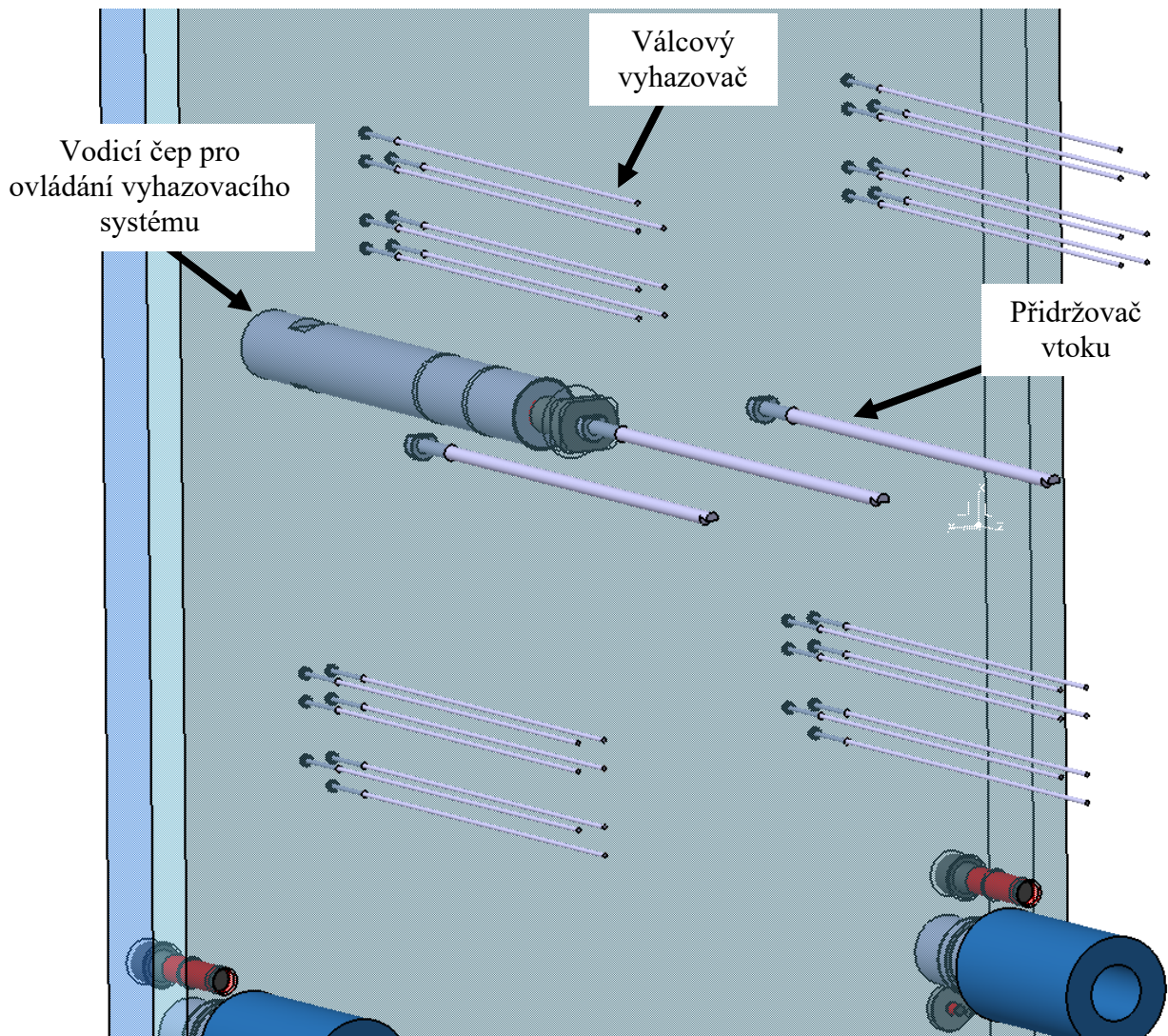


Obr. 45 Trajektorie temperačních okruhů (červeně a modře) v pohyblivé části formy.



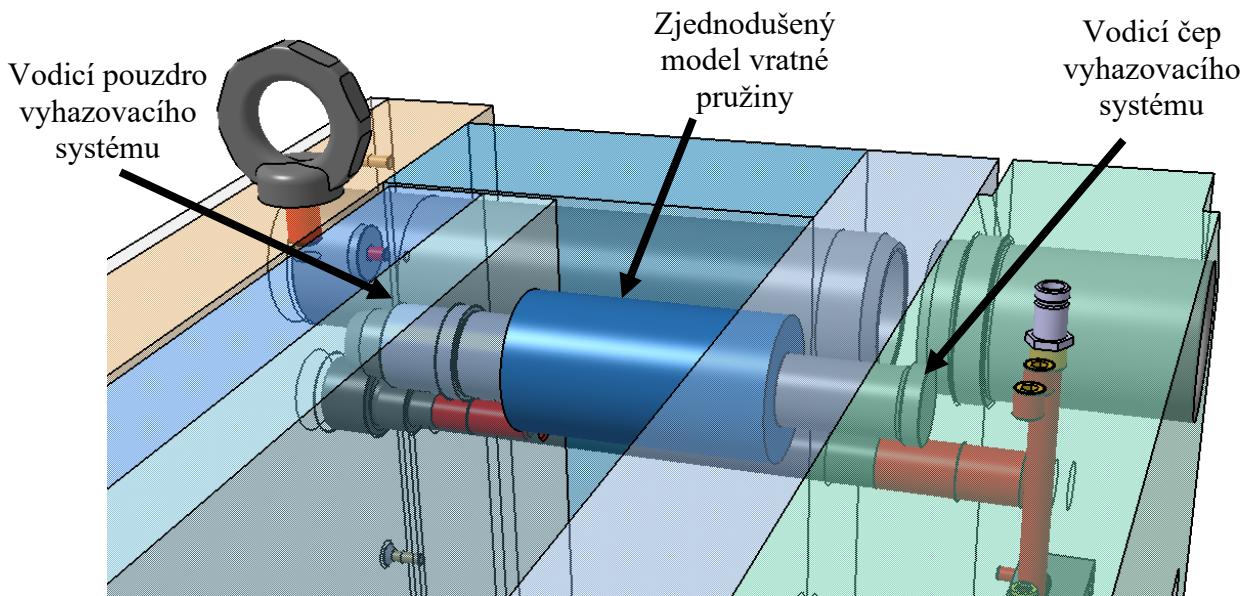
## 8.6 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém zodpovídá za bezpečné a spolehlivé vyjmutí výrobku z tvarové dutiny formy. Vyhazovací paket se skládá ze dvou desek (kotevní a opěrná) v nichž jsou umístěny vyhazovače. Vyhazovací systém byl navržen s ohledem na tvar výrobku a také tak aby neprotínal okruhy temperace. Každý výrobek je vyjmut pomocí sedmi válcových vyhazovačů o průměru 2 mm. Další tři vyhazovače slouží jako přídržovače vtoku. Jedná se o válcové vyhazovače o průměru 6 mm které jsou tvarově upraveny tak, aby vznikl podkos, za který je vtokový systém vyjmut z pevné části formy. Tyto vyhazovače jsou tvarově upraveny proti pootočení. Celkem tedy vyhazovací paket obsahuje 31 válcových vyhazovačů. Pohyb vyhazovacího systému je ovládán pomocí trnu, který je upnut do vstřikovacího stroje.



Obr. 46 Vyhazovací systém formy

Plynulý pohyb vyhazovacího systému je zajištěn pomocí vodících čepů které jsou ukotveny v rámu formy, konkrétně mezi kotevní a opěrnou deskou. Mezi deskami vyhazovacího systému se nachází protikus v podobě mosazného vodícího pouzdra. Mezi deskami vyhazovacího systému a opěrnou deskou rámu formy se nachází pružiny zodpovědné za vrácení vyhazovacího systému. Tím je odstraněno riziko že vyhazovače zůstanou vysunuty při zavření formy, což by vyústilo v poškození tvarových ploch. Použitím pružin je také vyhazovací systém zajištěn proti samovolnému pohybu při transportu. I tato situace by vyústila v poškození tvarových ploch.



Obr. 47 Vodící prvky vyhazovacího systému s vratnou pružinou.

## 9 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Posledním krokem je určení stroje, na kterém by mohla probíhat výroba. Volba stroje je závislá na několika parametrech. Konkrétně se jedná o rozměry vstřikovací formy, potřebná uzavírací síla a dostatečná kapacita vstřikovací jednotky.

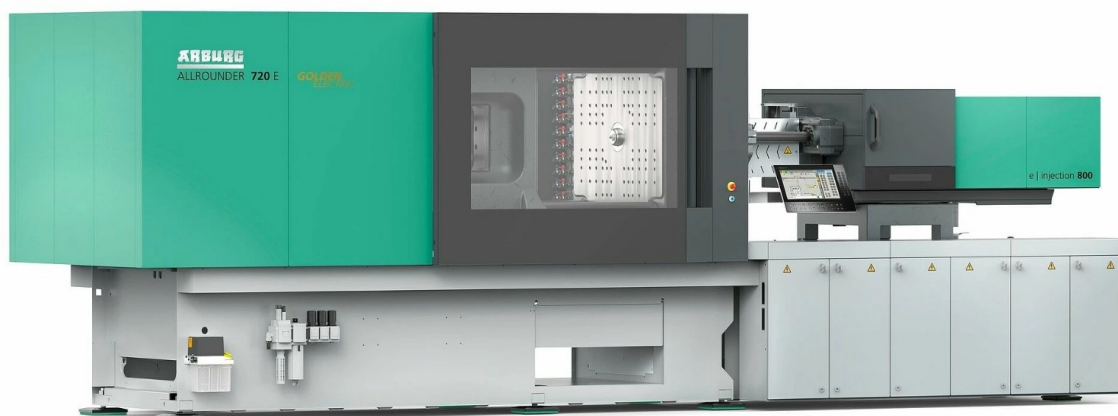
*Tab. 2 Parametry vstřikovací formy*

Nejširší místo vstřikovací formy	646 mm
Potřebná uzavírací síla	113,7 tun / 1 137 kN
Potřebný objem taveniny na dávku	57,08 cm <sup>3</sup>

Byl vybrán nejmenší možný stroj, který splňoval všechny parametry. Největší překážkou byla maximální šířka formy. Šířka by šla zredukovat prostřednictvím změny upínacích desek tak, aby měly stejnou šířku jako zbytek vstřikovací formy.

*Tab. 3 Parametry zvoleného vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 720E Golden Electric [34]*

Vzdálenost mezi vodicími sloupky	720 mm
Maximální uzavírací síla	280 tun / 2 800 kN
Objem vstřikované dávky	318 cm <sup>3</sup>



*Obr. 48 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 720E Golden Electric [3]*



## 10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V praktické části diplomové práce byl vytvořen konstrukční návrh vstříkovací formy pro výrobu součásti mechanismu tiskárny. Výsledný návrh formy má rozměry 596 x 596 x 446 mm (šířka x výška x délka). Forma je tedy relativně velká vzhledem k velikosti výrobku (30x30x34 mm). Přesto se však jedná o nejmenší možnou velikost rámu formy dodávanou výrobcem normalizovaných dílů. Velikost je důsledkem násobnosti formy a také nutnosti bočního odformování. Právě prvky bočního odformování zapříčinily velkou vzdálenost mezi jednotlivými tvarovými dutinami. Rám vstříkovací formy se skládá celkem ze sedmi desek a je rozdělený na dvě části. Kotevní desky pevné i pohyblivé části formy jsou zhotoveny z oceli s označením 1.2312, což je nástrojová ocel se zvýšenou pevností za tepla. Ostatní desky rámu formy jsou vyrobeny z oceli 1.1730. Takto je označena konstrukční nelegovaná ocel. Dutina formy se skládá ze čtveřice tvarových dutin a dutiny pro studený vtokový systém. Ten má lichoběžníkový průřez o rozměrech 7 x 5 x 5 mm (spodní základna x horní základna x výška) a v horní části je průřez zaoblen poloměrem R5. Vtokový systém má také dvě jímky na zachycení čela taveniny a tři výběžky jež slouží jako přidržovače vtoku. Vtokové ústí má obdélníkový průřez o rozměrech 4 x 1 mm (šířka x výška). Samotná tvarová část dutiny formy se skládá z tvárníku, tvárnice, a dvou bočních odformování, přičemž jedno má podstatně větší rozměry. Tvarové části jsou z nástrojové oceli 1.2738. Jedná se o vysoce legovanou ocel vhodnou pro použití za zvýšených teplot s dobrou prokalitelností. Všechny tvarové prvky jsou kaleny na 60 HRC. Ovládání posunu bočního odformování je zajištěno mechanicky pomocí šikmých čepů o sklonu 18°. Tyto čepy ovládají pohyb, který je realizován pomocí posuvných jednotek. Vyjmutí výrobku z dutiny formy je realizováno pomocí sedmi válcových vyhazovačů na každou tvarovou dutinu. Vyhazovače mají průměr 2 mm a stejně jako tvarové části jsou kaleny na 60 HRC. Celkem tedy forma obsahuje 28 válcových vyhazovačů a tři přidržovače vtoku. Odvzdušnění formy nebylo realizováno, předpokládá se únik vzduchu přes vůli mezi tvarovými prvky a vyhazovači, případně skrze dělicí roviny. Pro případ transportu formy je forma zabezpečena proti otevření otočnými zámky. Vyhazovací systém je zajištěn proti samovolnému pohybu pomocí čtyř vratných pružin.

Temperace je řešena pomocí čtyř vrtaných okruhů o průměru 8 mm. Těmi proudí temperační médium ve formě směsi etylenglykolu a vody v poměru 20/80. Teplota média je 65 °C a průtok 4 l/min.

Byla vytvořena toková analýza vstřikovacího procesu. Ta posloužila k optimalizaci konstrukce formy a k odhalení chyb. Použití FEM simulace toku materiálu tak lze předejít výrobním vadám již ve fázi návrhu formy, nikoliv až po jejím reálném sestavení. Pomocí analýzy byl nalezen optimální bod pro umístění vtokového ústí. Při provedení základní analýzy toku bylo zjištěno nedotečení výrobku. Došlo tedy k úpravě procesních podmínek, konkrétně byl urychlen čas zaplnění dutiny a zvýšena teplota taveniny. Po optimalizaci parametrů již došlo ke kompletnímu zaplnění dutiny. Velmi přínosná byla vzápětí také analýza rychlosti smykové deformace a maximální teploty taveniny při vstřikovacím procesu. Díky ní bylo zjištěno překročení povolených hodnot v oblasti kdy tavenina vstupuje ze vstřikovací jednotky do vtokové vložky. Bylo tedy nutné zaměnit vtokovou vložku za jinou, s větším průměrem. Po této úpravě již nedošlo k překročení maximální výrobcem stanovené rychlosti smykové deformace. Zvětšení průměru vtokové vložky negativně ovlivnilo čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty na vtokovém systému. Jelikož by bez této úpravy docházelo ke tvorbě degradovaných, nebo nedotečených výrobků, bylo potřeba tuto skutečnost přijmout.

Další provedenou analýzou bylo zjištění požadované uzavírací síly. Ta dosáhla hodnoty 1 137 kN. Výsledek byl použit jako jedno z hlavních kritérií při volbě vstřikovacího stroje. Tím byl zvolen stroj Arburg Allrounder 720 E Golden Electric. Jedná se o moderní, plně elektrický vstřikovací stroj s elektromechanickou uzavírací jednotkou.

## ZÁVĚR

V teoretické části se nachází literární rešerše zabývající se tématy, jež byly uplatněny v praktické části, jako principy vstřikovacího procesu a vad vyskytujících se na výrobcích.

Cílem praktické části diplomové práce bylo vypracování konstrukčního návrhu čtyřnásobné vstřikovací formy pro výrobu zadaného dílu, kterým byla součást vnitřního mechanismu tiskárny. Prvním krokem tohoto procesu bylo vytvoření 3D modelu výrobku. Díl byl vyroben z materiálu POM, konkrétně byl zvolen materiál s obchodním označením Celcon M450 od výrobce Celanese. Následně byl vytvořen 3D model kompletní sestavy vstřikovací formy pro tento výrobek. Již během konstrukce formy proběhla řada analýz, jejichž výsledky byly využity pro optimalizaci konstrukčního návrhu. Vstřikovací forma byla navržena s ohledem na výsledky tokových simulací. V nich později také proběhlo ověření správné funkčnosti formy. Poslední částí bylo vytvoření výkresové dokumentace: výkres sestavy, výkresy s pohledy do pravé i levé strany formy, i řezy vedené skrze formu. K výkresové dokumentaci byl také dodán kusovník.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Handbook of plastic processes*. 1. Hoboken: Wiley, 2006. ISBN 9780471662556.
- [2] OSWALD, Tim A. *International plastics handbook the resource for plastics engineers*. 1. Munich: Hanser, 2006. ISBN 978-1-56990-399-5.
- [3] ARBURG Electric : Golden Electric Series. online. In: *Newivex*. 2024. Dostupné z: <https://newivex.com/product/arburg-electric-golden-electric-series/>. [cit. 2024-02-21].
- [4] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování*. online. In: *Technologie vstřikování*. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>. [cit. 2020-12-24].
- [5] LENFELD, Petr. *Technologie II*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN ISBN978-80-7372-467-2.
- [6] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů*. II. díl, Vstřikování termoplastů. 1. vydání. Brno: Uniplast Brno, 1999.
- [7] NARANJO, Alberto; NORIEGA, Ma.; SIERRA, Juan a SANZ, Juan. *Injection molding processing data*. 2nd ed. Cincinnati: Hanser, 2019. ISBN 978- 1-56990-666-8.
- [8] KAZMER, David. *Injection mold design engineering*. 2nd edition. Munich: Hanser, 2016. ISBN 978-1-56990-570-8.
- [9] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. 1. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [10] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování*. 1. publi.cz, 2015. ISBN 978-80-88058-74-8.
- [11] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. 1. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4.
- [12] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. 1. publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-65-6.
- [13] *Konstrukce a výroba forem*. online. In: *Linaset*. 2024. Dostupné z: <https://www.linaset.cz/konstrukce-a-vyroba-forem>. [cit. 2024-03-21].
- [14] KENNEDY, Peter a ZHENG, Rong. *Flow analysis of injection molds*. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Publishers, 2013. ISBN 9781569905227.
- [15] OSWALD, Tim. *Understanding Polymer Processing: Processes and Governing Equations*. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2017. ISBN 978-1-56990-647-7.
- [16] *Hot runner manifold HPS III-T*. online. In: *Direct industry*. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/ewikon-heisskanalsysteme-gmbh/product-20468-186709.html>. [cit. 2023-12-09].
- [17] JACHOWICZ, Tomasz; GAJDOŠ, Ivan; CECH, Vlastimil a KRASINSKYI, Volodymyr. The use of numerical analysis of the injection process to select the material for the injection molding. online. *Open Engineering*. 2020, roč. 11, č. 1, s. 963-976. ISSN 2391-5439. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0094>. [cit. 2024-02-25].
- [18] SOVA, Miloš a KREBS, Josef. *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashöfer, 1999-2001. ISBN 80-862-2915-7.

- [19] KASHYAP, Satadru a DATTA, Dilip. Process parameter optimization of plastic injection molding: a review. online. *International Journal of Plastics Technology*. 2015, roč. 19, č. 1, s. 1-18. ISSN 0972-656X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12588-015-9115-2>. [cit. 2024-02-27].
- [20] SZUCS, A. a BELINA, K. Rheological and thermal analysis of the filling stage of injection moulding. online. *Express Polymer Letters*. 2012, roč. 6, č. 8, s. 672-679. ISSN 1788618X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.71>. [cit. 2024-02-27].
- [21] *7 Common Injection Molding Defects and How to Avoid Them*. online. In: Sybridge. 2024. Dostupné z: <https://sybridge.com/injection-molding-defects/>. [cit. 2024-03-20].
- [22] CHEN, Yen-Chih; HSU, Chih-Chung a HSU, Chia-Hsiang. Numerical simulation for predicting sink marks on injection molding and injection compression molding process. online. *AIP Conference Proceedings*. 2020, roč. 2020, č. 2205, s. 020014-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5142929>. [cit. 2024-02-08].
- [23] *11 Injection Molding Defects and Troubleshooting*. online. In: Elastron. 2024. Dostupné z: <https://www.elastron.com/en/blog/11-injection-molding-defects-and-troubleshooting>. [cit. 2024-03-21].
- [24] KERKSTRA, Randy a BRAMMER, Steve. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. Munich: Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-645-.
- [25] BÍLIK, Jozef; NÁPLAVA, Antonín; KUSÝ, Martin; KOŠÍK, Miroslav a LIKAVČAN, Lukáš. Silver Streaks on Surface of Injected Thermoplastic Parts. online. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*. 2014, roč. 22, č. 34, s. 21-27. ISSN 1338-0532. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/rput-2014-0023>. [cit. 2024-03-05].
- [26] JANOSTIK, Vaclav; STANEK, Michal; MANAS, David; MANAS, Miroslav; SENKERIK, Vojtech et al. The Influence of runner system on production of injection molds. online. *MATEC Web of Conferences*. 2016, roč. 76. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167602022>. [cit. 2024-04-04].
- [27] ACOSTA-PRADO, Julio a PRADA OSPINA, Ricardo. The Molds in Injection Process for the Achievement of Business Objectives. online. *Dimensión Empresarial*. 2016, roč. 15, č. 1. ISSN 2322-956X. Dostupné z: <https://doi.org/10.15665/rde.v15i1.1002>. [cit. 2024-03-24].
- [28] SATEESH, N.; DEVAKAR REDDY, S.; PRAVEEN KUMAR, G. a SUBBIAH, Ram. Optimization of Injection Moulding Process in Manufacturing the Top Cap of Water Meter. online. *Materials Today: Proceedings*. 2019, roč. 18, s. 4556-4565. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.430>. [cit. 2024-03-17].
- [29] *CNC MACHINING IN PLASTIC INJECTION MOLD MAKING*. online. In: Medium. 2018. Dostupné z: [https://medium.com/@tonypeng\\_28580/cnc-machining-in-plastic-injection-mold-making-115c8596c21a](https://medium.com/@tonypeng_28580/cnc-machining-in-plastic-injection-mold-making-115c8596c21a). [cit. 2024-03-21].
- [30] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce vylisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-833-5.
- [31] *Beverage caps*. online. In: StackTeck. 2023. Dostupné z: <https://stackteck.com/application-expertise/beverage-caps/>. [cit. 2024-03-21].
- [32] *Everything you need to know about overmolding*. online. In: Aria. 2024. Dostupné z: <https://www.madearia.com/blog/everything-you-need-to-know-about-overmolding/>. [cit. 2024-03-21].

- [33] *Celanese Celcon® M450 POM, Unfilled*. online. In: MatWeb. 2024. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=09d34c20df414dab8e1a4d9b633cbe8c>. [cit. 2024-02-19].
- [34] *ALLROUNDER 720 E*. online. In: Arburg. 2024. Dostupné z: [https://www.arburg.com/media/daten/publications/technical\\_data/electric\\_machines/ARBURG\\_ALLROUNDER\\_720E\\_GOLDEN\\_ELECTRIC\\_TD\\_682593\\_en\\_GB.pdf](https://www.arburg.com/media/daten/publications/technical_data/electric_machines/ARBURG_ALLROUNDER_720E_GOLDEN_ELECTRIC_TD_682593_en_GB.pdf). [cit. 2024-04-09].
- [35] WANG, H.; RUAN, X.-Y. a ZHOU, X.H. Research on Injection Mould Intelligent Cost Estimation System and Key Technologies. online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002, roč. 21, č. 3, s. 215-222. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s001700300024>. [cit. 2024-03-27].
- [36] MAEDA, Keisuke; YAMADA, Koji; YAMADA, Kazushi; KOTAKI, Masaya a NISHIMURA, Hiroyuki. Structure and fracture toughness of thin-wall polypropylene moulded at different injection speeds. online. *Thin-Walled Structures*. 2018, roč. 125, s. 12-20. ISSN 02638231. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.017>. [cit. 2024-04-09].

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

POM Polyoxymethylen

PET Polyethylentereftalát

CNC Computer Numerical Control – numerické řízení

FEM Finite Element Method – metoda konečných prvků

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Vstřikovací stroj značky Arburg [3]</i> .....	10
<i>Obr. 2 Vizualní znázornění vstřikovacího procesu [2]</i> .....	14
<i>Obr. 3 Schéma vstřikovacího procesu</i> .....	15
<i>Obr. 4 Pohled na tvarovou dutinu vstřikovací formy [13]</i> .....	17
<i>Obr. 5 Ukázka různých průřezů rozvodného kanálu [12]</i> .....	20
<i>Obr. 6 Filmové vtokové ústí. 1 – rozváděcí kanál, 2 – dělicí rovina, R – rádius, T – tloušťka filmového ústí vtoku, C – tloušťka stěny vstřikovaného výrobku, W – šířka filmového ústí vtoku. [12]</i> .....	21
<i>Obr. 7 Ukázka samo oddělení tunelového vtokového ústí od výrobku při pohybu vyhazovacího paketu (vlevo) a při otevření vstřikovací formy (vpravo). 1 – dělicí rovina, 2 – přidržovač vtoku, 3 – řezná hrana, 4 - vyhazovače [12]</i> .....	22
<i>Obr. 8 Typy vytápění trysky horkého rozvodu</i> .....	23
<i>Obr. 9 Schéma horkého vtokového systému. V levé straně lze vidět trysku se zadním uchycením, napravo se nachází tryska s předním uchycením. [16]</i> .....	24
<i>Obr. 10 Nedotečený výrobek (vpravo) [21]</i> .....	31
<i>Obr. 11 Propadliny na vstřikovaném výrobku [23]</i> .....	32
<i>Obr. 12 Studený spoj [21]</i> .....	33
<i>Obr. 13 Přetoky vzniklé při vstřikování [23]</i> .....	33
<i>Obr. 14 Ukázka stříbření [23]</i> .....	35
<i>Obr. 15 Ukázka tokových čar na výrobku [21]</i> .....	36
<i>Obr. 16 Jetting [23]</i> .....	36
<i>Obr. 17 Hrubování tvarové vložky vstřikovací formy na pětiosém obráběcím centru. [29]</i>	39
<i>Obr. 18 Vstřikovací forma pro výrobu víček na PET lahve, obsahující 72 tvarových dutin. [31]</i> .....	41
<i>Obr. 19 Forma pro dvou komponentní vstřikování. V první fázi dojde ke vstřiknutí žluté části dílu. Poté dojde k rotaci formy o 180° podél osy vstřikování a následně je vstříknut černý termoplastický elastomer sloužící pro lepší úchop. [32]</i> .....	42
<i>Obr. 20 3D model zadaného výrobku</i> .....	45
<i>Obr. 21 Vysíťovaný 3D model výrobku</i> .....	46
<i>Obr. 22 Výsledek diagnostiky sítě výrobku</i> .....	47
<i>Obr. 23 Výsledek analýzy vhodnosti umístění vtokového ústí</i> .....	48
<i>Obr. 24 Analýza zaplnění dutiny pro variantu s kombinovaným vtokovým systémem. ....</i>	49
<i>Obr. 25 Analýza zaplnění dutiny pro variantu se studeným vtokovým systémem</i> .....	49
<i>Obr. 26 Smykové napětí na stěně při použití zužujícího se vtokového ústí o obdélníkovém průřezu</i> .....	50
<i>Obr. 27 Smykové napětí na stěně při použití kuželového vtokového ústí</i> .....	50

<i>Obr. 28 Smykové napětí na stěně při použití se vtokového ústí o obdélníkovém průřezu. ..</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 29 Zobrazení času plnění dutiny formy .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 30 Graf znázorňující průběh síly potřebné pro uzavření vstřikovací formy .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 31 Místa vyobrazena jako potenciální tvorba vzduchových kapes.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 32 Maximální teplota taveniny v průběhu vstřikovacího procesu.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 33 Rychlost smykové deformace .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 34 Vysířované temperační okruhy. ....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 35 Výsledný čas potřebný pro zchladnutí vtokového systému na vyhazovací teplotu. ....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 36 Čas potřebný pro zchladnutí výrobku na vyhazovací teplotu.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 37 Zobrazení dělicích rovin.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 38 Všechny tvarové prvky zelená – tvárnice, červená – tvárník, modrá a fialová – prvky bočního odformování .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 39 Funkce šikmého čepu a posuvné jednotky. ....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 40 Ukázka složené tvarové sestavy včetně posuvného systému (pro přehlednost bez šikmých čepů a přítlačných jednotek). ....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 41 Pevná část rámu formy.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 42 Pohyblivá strana rámu formy.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 43 Studený vtokový systém .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 44 Trajektorie temperačních okruhů (červeně a modře) v pevné části formy.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 45 Trajektorie temperačních okruhů (červeně a modře) v pohyblivé části formy. ....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 46 Vyhazovací systém formy.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 47 Vodicí prvky vyhazovacího systému s vratnou pružinou. ....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 48 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 720E Golden Electric [3].....</i>	<i>69</i>

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Rozměry studeného vtokového systému .....	51
Tab. 2 Parametry vstřikovací formy .....	69
Tab. 3 Parametry zvoleného vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 720E Golden Electric [25].....	69

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výňatek materiálového listu CELCON M450

Příloha P II: Výňatek technického listu Arburg Allrounder 720 E Golden Electric

Příloha P III: Výkresová dokumentace: Sestava, řezy, kusovník

Příloha P IV: CD obsahující:

- Elektronickou verzi diplomové práce
- 3D model vstříkovací formy
- Soubory vtokových analýz
- Výkresovou dokumentaci



# PŘÍLOHA P I: VÝŇATEK MATERIÁLOVÉHO LISTU CELCON M450



## CELCON<sup>®</sup> M450

### CELCON<sup>®</sup>

Celcon<sup>®</sup> acetal copolymer grade M450 is an extremely low viscosity grade for optimal cycle performance in very thin walls or long, narrow flow paths in injection molding.

Chemical abbreviation according to ISO 1043-1: POM

#### Product information

Resin Identification	POM	ISO 1043
Part Marking Code	>POM<	ISO 11469

#### Rheological properties

Melt volume-flow rate	39 cm <sup>3</sup> /10min	ISO 1133
Temperature	190 °C	
Load	2.16 kg	
Moulding shrinkage range, parallel	2.2 %	ISO 294-4, 2577
Moulding shrinkage range, normal	2 %	ISO 294-4, 2577

#### Typical mechanical properties

Tensile modulus	2900 MPa	ISO 527-1/-2
Tensile stress at yield, 50mm/min	66 MPa	ISO 527-1/-2
Tensile strain at yield, 50mm/min	7.5 %	ISO 527-1/-2
Flexural modulus	2800 MPa	ISO 178
Flexural modulus	2590 MPa	ASTM D 790
Flexural strength	90 MPa	ASTM D 790
Compressive stress at 1% strain	31 MPa	ISO 604
Shear Strength	53.1 MPa	ASTM D 732
Charpy notched impact strength, 23 °C	4.4 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Izod notched impact strength, 23 °C	4.7 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Poisson's ratio	0.37 <sup>[C]</sup>	

[C]: Calculated

#### Thermal properties

Melting temperature, 10 °C/min	166 °C	ISO 11357-1/-3
Temperature of deflection under load, 1.8 MPa	103 °C	ISO 75-1/-2
Temperature of deflection under load, 0.45 MPa	156 °C	ISO 75-1/-2

#### Flammability

Oxygen index	14.9 %	ISO 4589-1/-2
FMVSS Class	B	ISO 3795 (FMVSS 302)
Burning rate, Thickness 1 mm	50.3 mm/min	ISO 3795 (FMVSS 302)

#### Electrical properties

Surface resistivity	1.3E16 Ohm	IEC 62631-3-2
Arc Resistance	240 s	UL 746B

# CELCON® M450

## CELCON®

### Physical/Other properties

Humidity absorption, 2mm	0.2 %	Sim. to ISO 62
Water absorption, 2mm	0.75 %	Sim. to ISO 62
Density	1410 kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183

### Injection

Drying Recommended	no
Drying Temperature	100 °C
Drying Time, Dehumidified Dryer	3 - 4 h
Processing Moisture Content	≤0.2 %
Melt Temperature Optimum	190 °C
Min. melt temperature	180 °C
Max. melt temperature	200 °C
Screw tangential speed	≥0.3 m/s
Mold Temperature Optimum	100 °C
Min. mould temperature	80 °C
Max. mould temperature	120 °C
Hold pressure range	60 - 120 MPa
Back pressure	4 MPa
Ejection temperature	130 °C

### Additional information

Injection molding

### Preprocessing

Drying is generally not required because Celcon® and Hostaform® acetal copolymers are not hygroscopic nor are they degraded by moisture during processing. Excessive moisture can lead to splay (silver streaking) in molded parts. For better uniformity in molding especially when using regrind or material that has been stored in containers open to the atmosphere, recommended drying conditions are 80 C (180 F) for 3hours. Desiccant hopper dryers are not required. Maximum water content = 0.35%

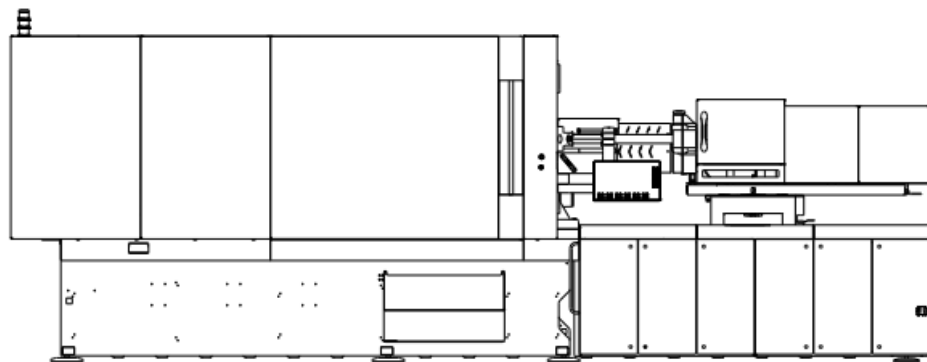
### Processing

Standard reciprocating screw injection molding machines with a high compression screw (minimum 3:1 and preferably 4:1) and low back pressure (0.35 Mpa/50 PSI) are favored. Using a low compression screw (I.E. general purpose 2:1 compression ratio) can result in unmelted particles and poor melt homogeneity. Using a high back pressure to make up for a low compression ratio may lead to excessive shear heating and deterioration of the material.

Melt Temperature: Preferred range 182-199 C (360-390 F). Melt temperature should never exceed 230 C (450 F).

Mold Surface Temperature: Preferred range 82-93 C (180-200 F) especially with wall thickness less than 1.5 mm (0.060 in.). May require mold temperature as high as 120 C (250 F) to reproduce mold surface or to assure minimal molded in stress. Wall thickness greater than 3mm (1/8 in.) may use a cooler (65 C/150 F) mold surface temperature and wall thickness over 6mm (1/4 in.) may use a cold

**PŘÍLOHA P II: VÝŇATEK TECHNICKÉHO LISTU ARBURG  
ALLROUNDER 720 E GOLDEN ELECTRIC**



**ALLROUNDER 720 E  
GOLDEN ELECTRIC**

Distance between tie bars: 720 x 720 mm  
Clamping force: 2800 kN  
Injection unit (acc. to EUROMAP): 800

**ARBURG**

## TECHNICAL DATA | 720 E GOLDEN ELECTRIC

Clamping unit		720 E GOLDEN ELECTRIC	
with clamping force	max. kN	2800	
Opening force   stroke	max. kN   mm	---   550	
Mould height, fixed   variable	min.-max. mm	---   250-800	
Platen daylight fixed   variable	max. mm	---   800-1350	
Distance between tie bars (w x h)	mm	720 x 720	
Mould mounting platens (w x h)	max. mm	1040 x 1040	
Weight of movable mould half	max. kg	2500	
Ejector force   stroke	max. kN   mm	86   250	
Dry cycle time EUROMAP <sup>2</sup>	min. s - mm	2,9 - 504	

Injection unit		800		
with screw diameter	mm	45	50	55
Effective screw length	L/D	22	20	18
Screw stroke	max. mm	200		
Calculated stroke volume	max. cm <sup>3</sup>	318	392	474
Shot weight	max. g PS	291	359	434
Material throughput	max. kg/h PS	46	53	59
	max. kg/h PA6.6	23	27	30
Injection pressure	max. bar	2470	2000	1650
Holding pressure time	max. s - bar	300-1970	300-1600	300-1320
Injection flow <sup>2</sup>	max. cm <sup>3</sup> /s	175	216	261
	max. cm <sup>3</sup> /s	[223]	[275]	[333]
Injection speed	max. mm/s	110		
	max. mm/s	[140]		
Screw circumferential speed	max. m/min	28	31	34
Screw torque	max. Nm	900	1000	1100
Nozzle contact force   retraction stroke	max. kN   mm	70   400		
Heating capacity   zones	kW	19,9   8		
Feed hopper	l	---		

Drive and connection		800		
with injection unit				
Net weight of machine	kg	14350		
Sound press. level   Insecurity <sup>4</sup>	dB(A)	---		
Electrical connection <sup>3</sup>	kW	50		
	Total	A		
	Machine	A		
	Heating	A		
Cooling water connection	max. °C	30		
	min. Δp bar	1,5   DN 25		

Machine type	
with EUROMAP size designation <sup>1</sup>	720 E GOLDEN ELECTRIC 2000   800

**Upon request: other machine types and mould installation heights, screws, drive powers etc.**  
 All specifications relate to the basic machine version. Deviations are possible depending on variants, process settings and material type. Depending on the drive, certain combinations, e.g. max. injection pressure and max. injection flow may be mutually exclusive.

- 1) Clamping force (kN) - size of injection unit = max. stroke volume (cm<sup>3</sup>) x max. injection pressure (kbar)
  - 2) Specification of maximum injection flow at maximum injection pressure.
  - 3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.
  - 4) Detailed info in the operating instr.
- [ ] Specifications apply to alternative equipment.