

# Konstrukce nástroje pro výrobu plastového dílu včetně simulace

Bc. Jakub Mastík

---

Diplomová práce  
2023

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Jakub Mastík</b>
Osobní číslo:	<b>T21410</b>
Studijní program:	<b>N3909 Procesní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Konstrukce technologických zařízení</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Téma práce:	<b>Konstrukce nástroje pro výrobu plastového dílu včetně simulace</b>

## Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Provést konstrukci modelu zadané součásti.
3. Navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobiteľnosť.
4. Ověřit funkčnost navrženého řešení pomocí simulace v software MoldFlow.
5. Nakreslit 2D řez vstřikovací formou s kusovníkem.

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

**Seznam doporučené literatury:**

- OSSWALD, Tim A., Lih-Sheng TURNG a Paul J. GRAMANN. Injection molding handbook. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Publishers, c2008, xvii, 764 s. ISBN 978-1-56990-420-6
- BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2007, xvi, 308 s. ISBN 978-1-56990-421-3
- WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang HSU. Molding simulation: theory and practice. Cincinnati: Hanser Publications, [2018], xviii, 513 s. ISBN 978-1-56990-619-4
- KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, 2018, 491 s. ISBN 978-1-56990-645-3.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

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

L.S.

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

## 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 totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta



## **ABSTRAKT**

Tématem této diplomové práce je navrhnout konstrukci vstřikovacího nástroje pro držák televize a následně tento návrh ověřit pomocí simulace. Práce je dělená na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část se zabývá popisem polymerních materiálů, které se používají při procesu vstřikování, reologií polymerů, vstřikováním a konstrukcí vstřikovacích forem. Dalšími popsánymi tématy jsou zásady pro konstrukci vstřikovaného výrobku a využití simulací při návrhu vstřikovací formy.

Praktická část pojednává o samotném návrhu vstřikovacího nástroje. Obsahuje 3D model dílce a vstřikovacího nástroje vytvořených v programu CATIA V5R19. Následný návrh je poté ověřen pomocí simulace v programu Autodesk MoldFlow 2023.

Klíčová slova: vstřikovací forma, technologie vstřikování, analýza vstřikovacího procesu, polymerní materiály

## **ABSTRACT**

The topic of this thesis is to design an injection moulding tool for a TV holder and then to verify this design by simulation. The thesis is divided into theoretical and practical part.

The theoretical part deals with the description of polymeric materials used in the injection moulding process, rheology of polymers, injection moulding and the design of injection moulds. Other topics described are principles for injection moulded product design and the use of simulations in injection mould design.

The practical part deals with the design of the injection moulding tool itself. It contains a 3D model of the part and the injection moulding tool created in CATIA V5R19. The subsequent design is then verified by simulation in Autodesk MoldFlow 2023.

Keywords: injection mould, injection moulding technology, injection moulding process analysis, polymer materials

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za vedení, věcné připomínky a v neposlední řadě také za skvělou a rychlou komunikaci při řešení různých problémů. Rád bych také poděkoval rodině a přátelům za pomoc a podporu během celého mého studia.

„Život je jako jízda na kole. Abyste udrželi balanc, musíte se neustále pohybovat dopředu.“

Albert Einstein

## OBSAH

ÚVOD .....	12
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>1 POLYMERY .....</b>	<b>14</b>
1.1 KAUČUKY .....	14
1.2 REAKTOPLASTY .....	14
1.3 TERMOPLASTY .....	14
1.4 ÚPRAVA POLYMERŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ.....	15
1.4.1 Stabilizátory .....	15
1.4.2 Plastifikátory .....	15
1.4.3 Antistatika a retardéry hoření .....	15
1.4.4 Barviva a pigmenty.....	15
1.4.5 Plniva – kompozitní materiály.....	15
1.5 VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	16
1.5.1 Mechanické vlastnosti polymerů .....	16
1.5.2 Tepelné vlastnosti polymerů .....	16
1.5.3 Zvětrávání polymerů .....	18
1.5.4 Oxidace polymerů.....	18
<b>2 REOLOGIE POLYMERŮ.....</b>	<b>19</b>
2.1 VISKOELASTICKÉ CHOVÁNÍ.....	19
2.2 TLAKEM ŘÍZENÝ TOK .....	20
2.3 UNÁŠIVÝ SMYKOVÝ TOK .....	20
2.4 ZÁKLADNÍ REOLOGICKÉ POJMY.....	21
2.5 NENEWTONSKÉ CHOVÁNÍ .....	21
2.6 VLIV TEPLoty NA VISKOZITU .....	23
2.7 VLIV TLAKU NA VISKOZITU .....	23
<b>3 VSTŘIKOVÁNÍ .....</b>	<b>24</b>
3.1 SUŠENÍ PLASTŮ PŘED VSTŘIKOVÁNÍM .....	24
3.1.1 Vliv vlhkosti na degradaci plastu.....	25
3.1.2 Vliv vlhkosti na ventilační systém formy .....	25
3.1.3 Vliv vlhkosti na vstříknutou dávku.....	25
3.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	25
3.2.1 Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T .....	26
3.3 TOK VE VSTŘIKOVACÍ FORMĚ.....	27

3.4	VADY VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ .....	28
3.4.1	Nedotečení.....	28
3.4.2	Propadliny.....	29
3.4.3	Delaminace .....	29
3.4.4	Studené spoje .....	29
3.4.5	Jetting .....	30
3.4.6	Dutiny .....	30
3.4.7	Deformace .....	30
3.4.8	Spálená místa .....	30
3.4.9	Diesel efekt .....	31
3.4.10	Bubliny .....	31
<b>4</b>	<b>VSTŘIKOVACÍ STROJ .....</b>	<b>32</b>
4.1	DĚLENÍ VSTŘIKOVACÍCH STROJŮ.....	32
4.1.1	Hydraulické vstřikovací stroje .....	32
4.1.2	Elektrické vstřikovací stroje .....	33
4.1.3	Hybridní vstřikovací stroje.....	33
4.2	TECHNICKÉ ÚDAJE STROJŮ .....	33
4.2.1	Uzavírací síla .....	33
4.2.2	Velikost vstřikované dávky.....	33
4.2.3	Průměr a poměr L/D šneku .....	33
4.2.4	Plastikační kapacita .....	34
4.3	KONTROLNÍ JEDNOTKA.....	34
<b>5</b>	<b>VSTŘIKOVACÍ FORMA .....</b>	<b>35</b>
5.1	V TOKOVÝ SYSTÉM.....	35
5.1.1	Horký vtokový systém.....	35
5.1.2	Studený vtokový systém .....	36
5.2	TYPY VTOKOVÉHO ÚSTÍ.....	37
5.2.1	Plný kuželový vtok .....	37
5.2.2	Bodové ústí.....	37
5.2.3	Boční vtok.....	38
5.2.4	Vějířové ústí .....	38
5.2.5	Filmové ústí.....	38
5.2.6	Tunelový vtok .....	38
5.2.7	Banánový vtok .....	38
5.3	TEMPERAČNÍ SYSTÉM FORMY .....	39
5.3.1	Reynoldsovo číslo temperačního systému .....	39
5.3.2	Vrtaná temperace .....	39

5.3.3	Konformní chlazení.....	40
5.3.4	Vysoce vodivé vložky .....	40
5.3.5	Komponenty temperačního systému.....	40
5.4	ODVZDUŠNĚNÍ FORMY.....	40
5.5	VYHAZOVACÍ SYSTÉM .....	41
5.5.1	Vyhazovací kolíky .....	41
5.5.2	Stírací deska .....	42
5.5.3	Dvoustupňové vyhazování.....	42
5.5.4	Vyhazování vzduchem .....	42
5.6	BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ .....	42
5.6.1	Boční odformování šikmým kolíkem .....	43
5.6.2	Boční odformování hydraulickým válcem .....	43
5.7	NÁSOBNOST FORMY.....	44
<b>6</b>	<b>KONSTRUKCE VÝROBKU .....</b>	<b>45</b>
6.1	ROVNOMĚRNÁ TLOUŠŤKA STĚNY.....	45
6.2	KONSTRUKCE ŽEBER.....	45
6.3	KONSTRUKCE OTVORŮ.....	46
6.4	ÚKOSY.....	46
6.5	DESIGN ROHŮ - ZAOBLENÍ A ZKOSENÍ .....	46
6.6	VLIV SMRŠTĚNÍ.....	47
<b>7</b>	<b>APLIKACE CAE PŘI NÁVRHU VSTŘIKOVACÍ FORMY .....</b>	<b>48</b>
7.1	METODA MIDPLANE .....	49
7.2	ANALÝZA DUAL DOMAIN.....	49
7.3	3D ANALÝZA .....	49
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>VSTŘIKOVANÁ SOUČÁST .....</b>	<b>53</b>
<b>10</b>	<b>VOLBA MATERIÁLU VSTŘIKOVANÉHO DÍLU.....</b>	<b>55</b>
<b>11</b>	<b>NÁVRH FORMY .....</b>	<b>57</b>
11.1	VÝSLEDKY FILMOVÉHO VTOKU JEDNO-NÁSOBNÉ FORMY.....	58
11.2	VÝSLEDKY HORKÉHO VTOKU JEDNO-NÁSOBNÉ FORMY .....	59
11.3	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ .....	61
<b>12</b>	<b>KONSTRUKCE FORMY .....</b>	<b>62</b>
12.1	ZAFORMOVÁNÍ DÍLU.....	62

12.2	TVAROVÉ ČÁSTI .....	62
12.3	BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ .....	67
12.3.1	Posuvná čelist 1 .....	67
12.3.2	Posuvná čelist 2 .....	68
12.4	VTOKOVÝ SYSTÉM .....	69
12.5	TEMPERAČNÍ SYSTÉM .....	71
12.6	VYHAZOVACÍ SYSTÉM .....	73
12.7	VODÍCÍ, STŘEDÍCÍ A MANIPULAČNÍ PRVKY.....	75
<b>13</b>	<b>VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE.....</b>	<b>81</b>
<b>14</b>	<b>NASTAVENÍ ANALÝZY MOLDFLOW .....</b>	<b>82</b>
14.1	TVORBA SÍTĚ .....	82
14.2	VTOKOVÝ SYSTÉM .....	83
14.3	TEMPERAČNÍ SYSTÉM .....	84
14.4	PROCESNÍ PODMÍNKY .....	86
<b>15</b>	<b>VÝSLEDKY ANALÝZY MOLDFLOW .....</b>	<b>89</b>
15.1	ANALÝZA FILL+PACK .....	89
15.1.1	Fill time (Čas plnění).....	89
15.1.2	Shear rate bulk(Rychlost smykové deformace).....	90
15.1.3	Clamp Force: XY plot (Uzavírací síla).....	91
15.1.4	Sink marks estimate (Propadliny).....	92
15.1.5	Weld lines (Studené spoje) .....	93
15.1.6	Air traps (Vzduchové kapsy) .....	94
15.1.7	Average fiber orientation (Orientace vláken) .....	95
15.1.8	Bulk temperature at end of the fill (Teplota na konci plnění).....	96
15.2	ANALÝZA COOL .....	97
15.2.1	Circuit coolant temperature (Teplota temperačního média) .....	97
15.2.2	Circuit Reynolds number (Reynoldsovo číslo).....	98
15.2.3	Time to reach ejection temperature, part (Čas pro dosažení vyha- zovací teploty, díl) .....	99
15.2.4	Average temperature, part (Průměrná teplota, díl) .....	100
15.3	ANALÝZA WARP.....	101
15.3.1	Deflection, all effects: Deflection (Celková deformace od všech vlivů) 101	
15.3.2	Deflection, differential cooling: Deflection (Deformace vlivem chla- zení) .....	102
15.3.3	Deflection, differential shrinkage: Deflection (Deformace vlivem smrš- tění) .....	103

16	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	104
	ZÁVĚR .....	106
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	107
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	111
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	112
	SEZNAM TABULEK .....	116

## ÚVOD

Zpracování a následné využití polymerních materiálů tvoří v dnešní době nedílnou součást našich životů. Plastikářský průmysl se začal vyvíjet v první polovině 20. století, tento růst byl převážně podpořen objevem nových materiálů mezi, které lze řadit PA-6, PS nebo PVC. Polymerní materiály jsou dnes běžně používány v lékařském, obalovém či automobilovém průmyslu. Nesmírnou výhodou těchto materiálů jsou poměrně dobré fyzikální vlastnosti při relativně nízké hmotnosti, výborná chemická odolnost či nízká cena. V důsledku těchto vlastností došlo a stále dochází k nahrazení dříve používaných tzv. tradičních materiálů plasty.

Polymerní materiály lze zpracovávat různými technologiemi. Zvolení nejvhodnější technologie je podmíněno mnoha faktory. Tyto faktory zahrnují tvar výrobku či technologické vlastnosti daného polymeru. V současné době lze právě o technologii vstřikování mluvit jako o jedné z nejrozšířenějších. Technologie je vhodná pro výrobu tvarově velmi složitých součástí. Tato metoda je velice složitá a finančně nákladná, proto je vhodná převážně pro velkosériovou výrobu. Nicméně díky velkému rozvoji 3D tisku v posledních letech lze docílit snížení výrobní ceny vstřikovaných součástí i při kusové výrobě.

Nedílnou součástí procesu vstřikování je vstřikovací forma. Jedná se o velmi komplexní nástroj, který se skládá z mnoha součástí, jenž tvoří jeden funkční celek. Základním úkolem každé vstřikovací formy je doprava taveniny do dutiny formy a její naplnění, efektivní vyhození výrobku a v neposlední řadě také efektivní odvod tepla, jenž je přivedené společně s taveninou. Každý výrobek potřebuje svou unikátní formu, což značně zvyšuje cenu této technologie. V současné době se na trhu vyskytuje řada firem, jenž dodávají tzv. normálie. Využití normálií umožňuje skládat formu stavebnicovým způsobem.

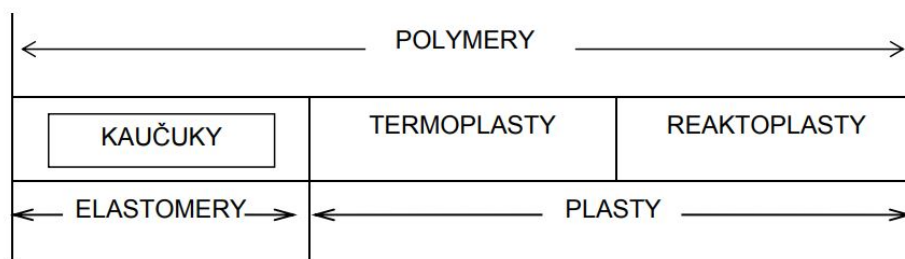
K provedení správné konstrukce formy je nutná znalost z mnoha vědeckých oblastí. Je nutné disponovat chemickými, fyzikálními a reologickými znalostmi z oblasti polymerů. Díky masivnímu rozšíření výpočetní techniky lze v dnešní době velice dobře provádět analýzu vstřikovacího procesu za použití simulací, což sebou nese řadu výhod. Využití těchto simulací vede k dokonalejšímu návrhu vstřikovací formy, než tomu bylo v dřívějších dobách.



# I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 POLYMERY

Pod pojmem polymer si lze představit chemickou látku, která ve svých dlouhých molekulách obsahuje většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často chloru, dusíku či jiných prvků. Polymer je chemická látka s neobvyklou šíří vlastností, které v podstatě kapalném stavu při zvýšeném tlaku a teplotě dovolují budoucímu výrobku udělit nejrůznější tvar. Polymery se dělí na plasty a elastomery, jak je patrné z Obr. 1.1 [1]



Obr. 1.1 Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]

### 1.1 Kaučuky

Kaučuky jsou polymery, které se vyznačují vysokou pružností a nízkou tuhostí. Za běžných podmínek lze kaučuky deformovat téměř bez porušení. Tato deformace je vratná. Po proběhnutí vulkanizace dochází k tvorbě příčných vazeb, po které dochází k potlačení plastického toku materiálu. Tímto se polymer stává vysoce elastický. [2]

### 1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou polymery, které své konečné vlastnosti získávají až po zesíťování. Proces zesíťování vzniká za působení síťovacích činidel (vytvrzovadel) nebo působením tepla. Výsledkem zesíťování jsou husté polymerní struktury, ve kterých jsou makromolekuly propojeny kovalentní vazbou. Při procesu vytvrzování se získává finální tvar výrobku a jedná se o nevratnou změnu. Tyto polymery jsou netavitelné, nerozpustné a není možné je znovu tvářet. [2]

### 1.3 Termoplasty

Pod pojmem termoplasty si lze představit polymerní materiály, které při vyšších teplotách přecházejí do formy vysoko viskózní kapaliny, kterou je možné tvarovat a následným ochlazením stabilizovat její tvar. Tento proces lze opakovat, tudíž je možno polymer znovu zahřát a následně tvarovat (recyklovat). [2]

## 1.4 Úprava polymerů pro vstřikování

Většinu polymerů nelze použít při procesu vstřikování. Proto je nutné polymer upravit vhodnými aditivami, aby byly získané požadované vlastnosti. Pro hladký průběh zpracovatelského procesu se nejčastěji přidávají aditiva:

- Tepelné nebo termooxidační stabilizátory – během prodlevy taveniny v plastikační jednotce zvyšují stabilitu polymeru.
- Vnitřní maziva – zlepšují tokové vlastnosti materiálu, zajišťují nelepivost taveniny, dobrou zatékavost asnadné vyjmutí výstřiku z formy.
- Nukleační činidla – jejich použití vede k dosažení rovnoměrné a jemné krystalické struktury (platí pro částečně krystalické polymery) [3]

### 1.4.1 Stabilizátory

Stabilizátory jsou buď termooxidační nebo UV. UV stabilizátory slouží ke zvýšení odolnosti vůči atmosférickému stárnutí, a tím prodloužení životnosti výstřiku. Termooxidační polymery zvyšují hranici teploty, při které je možné výstřik zpracovávat. [3]

### 1.4.2 Plastifikátory

Plastifikátory též změkčovadla slouží ke snížení tvrdosti a tuhosti. Dále zvyšují tažnost, ohebnost a houževnatost u zchlazeného polymereu. [3]

### 1.4.3 Antistatika a retardéry hoření

Antistatika snižují vznik elektricky nevodivého charakteru termoplastů, který vede ke vzniku elektrostatického náboje při tření. Retardéry hoření slouží ke snížení hořlavosti termoplastů. Účinnost retardéru hoření je však účinná při vyšších koncentracích, a proto ovlivňují i zpracovatelský průběh. [3]

### 1.4.4 Barviva a pigmenty

Barviva a pigmenty dávají danému polymeru barevný odstín a kryvost. Barviva je možné aplikovat již při výrobě materiálu na vstřikování nebo je lze přidávat ve formě koncentrátu do násypky vstřikovacího stroje společně s granulátem. [3]

### 1.4.5 Plniva – kompozitní materiály

Polymerní materiály, které obsahují plniva se nazývají materiály kompozitními. Kompozitní materiál je definován jako materiál, který vznikne spojením dvou nebo více materiálů, které mají odlišné vlastnosti s výsledným synergickým účinkem. [3]

Základem kompozitního materiálu je tedy matrice – pojivo (tj. polymer s aditivou) a plnivo – výztuž. Plniva částicová mezi které se řadí např. skleněné makrokuličky, talek, kaolin, vápenec, čedič či další minerály. Použití těchto plniv zvyšuje viskozitu taveniny (zhoršují její tekutost), zvyšují tvrdost, tepelnou odolnost a tuhost. [3]

Vyztužující plniva slouží ke zvýšení pevnosti, tuhosti a tvarové stálosti. Naopak použitím těchto plniv dochází ke snížení ohebnosti, smrštění a tažnosti. Nejčastěji se vyskytují ve formě vláknité struktury. Vyztužující efekt vláknitých plniv je zejména závislý na poměru  $l/d$ , tedy délky vlákna a průměru vlákna. [3]

Posledním používaným typem plniv jsou nanoplňiva. Velikost nanoplňiva je řádově bližší velikosti makromolekuly termoplastické matrice než je tomu u klasických plniv. To vede k velice blízkému spojení matrice a plniva. Další výhodou oproti klasickým plnivům je redukce hmotnosti výrobku při zachování podobných mechanických vlastností. [3]

## 1.5 Vlastnosti polymerů

### 1.5.1 Mechanické vlastnosti polymerů

Youngův modul (modul pružnosti v tahu) polymerů je přibližně o dva řády menší než Youngův modul kovů a keramiky, zatímco mez kluzu je menší přibližně o jeden řád. Proto mohou polymery vykazovat mnohem větší elastické deformace, aniž by se plasticky deformovaly. Tuto skutečnost je nutné brát v úvahu při navrhování součástí z polymerů. Pružné i plastické chování polymerů je závislé na čase i při pokojové teplotě. Polymery jsou tedy viskoelastické a viskoplastické. [4]

Mechanické vlastnosti polymerů závisí na typu polymeru, molekulové struktuře, molekulové hmotnosti, míře krystalinity, chemických přísadách, typu a množství barviva, typu plniva a výztuže. Mechanické vlastnosti jsou často nejdůležitějším faktorem při navrhování výrobků, protože téměř všechny aplikace vyžadují, aby díl odolával určitým mechanickým vlivům. [5]

### 1.5.2 Tepelné vlastnosti polymerů

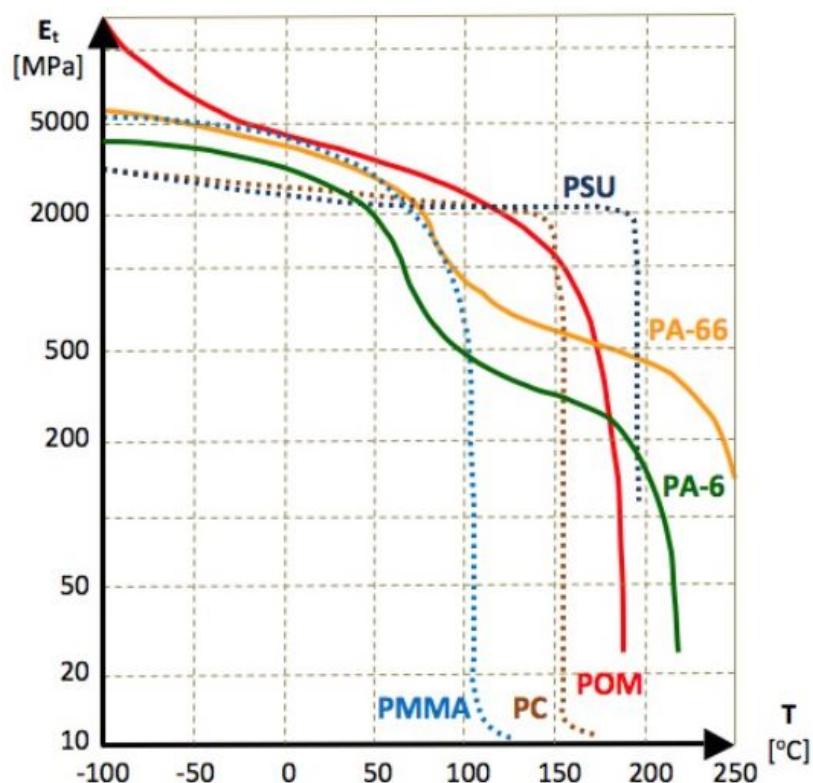
Tepelná stabilita polymerů je horší než u kovů a keramiky. V blízkosti teploty skelného přechodu lze u amorfních termoplastů pozorovat silný pokles tuhosti a pevnosti. V amorfních termoplastech je nad teplotou skelného přechodu viskózní tok dominantním deformačním mechanismem. Proto lze amorfní termoplasty používat pouze při provozních teplotách výrazně nižších, než je jejich teplota skelného přechodu. Při zvyšující se teplotě dochází k rapidnímu poklesu Youngova modulu. [4]

Naopak použití semikrystalických termoplastů je možné i nad teplotou skelného přechodu. Jejich pevnost je zde menší než pod  $T_g$ , ale dochází ke zvyšování tažnosti. Pro pochopení vlastností polymerů je nutné definovat přechodové teploty. Mezi tyto teploty se řadí teplota skelného přechodu  $T_g$ , teplota viskozního toku  $T_f$  a teplota tání  $T_m$ . [4]

Teplota skelného přechodu  $T_g$  je teplota amorfních polymerů, při níž zvýšená pohyblivost molekul vede k výrazným změnám tepelných vlastností. Teplota skelného přechodu je teplota, při níž zvýšená pohyblivost molekul vede k významným změnám tepelných vlastností amorfni pryskyřice. Nad teplotou skelného přechodu má polymer tendenci izotropně expandovat a při expanzi nebo rozměrových změnách po ochlazení, kdy bude materiál gumovitý a tvárný, se projeví hystereze. [5]

Teplota tání nebo bod tání  $T_m$  je teplota semikrystalických polymerů, při které dochází k přeměně ze stavu tuhého do stavu kapalného či taveniny. Čím vyšší je teplota tání, tím vyšší je tepelná odolnost semikrystalického termoplastického materiálu. [5]

Teplota viskozního toku  $T_f$  je charakteristickou teplotou amorfních polymerů. V oblasti této teploty dochází k prudkému poklesu Youngova modulu a dochází k přeměně polymeru na taveninu. [5]



Obr. 1.2 Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě pro semikrystalické (POM, PA-6, PP-66) a amorfni (PMMA, PC, PSU) polymery [6]

### 1.5.3 Zvětrávání polymerů

Zvětrávání polymerů je obecně způsobeno kombinovaným účinkem absorpce vody nebo vlhkosti a vystavením materiálu ultrafialovému záření. Absorpcí vody dochází k plastifikaci materiálu, a tím ke zvýšení jeho pružnosti, což však po ztrátě absorbované vody vede ke křehnutí materiálu. [7]

Naopak expozice materiálu na ultrafialové záření má za následek rozbití vazeb makromolekulárního řetězce, což vede degradaci fyzikálních vlastností materiálů. Stejně faktory mohou také způsobit ztrátu barvy a jasnosti plastu. Absorpce vody také snižuje rozměrovou stálost polymerů. [7]

### 1.5.4 Oxidace polymerů

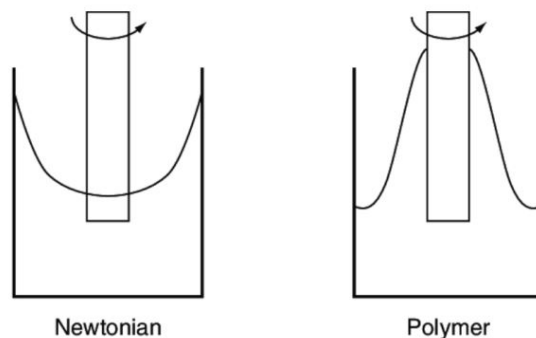
Oxidace je způsobena kontaktem plastu s oxidačními tělesy nebo působením volné atmosféry. Vede k degradaci mechanických vlastností (křehkost a případný lom). [7]

## 2 REOLOGIE POLYMERŮ

Reologie je věda, která se zabývá deformací a tokem látek. Polymery při zpracování vykazují viskoelastické chování, což znamená, že v kapalném stavu lze pozorovat nejen viskózní, ale i elastické chování. [8]

Reologie polymerních tavenin se zabývá studiem toku polymeru převážně v kapalném stavu, ale také deformační odezvu na aplikovanou sílu v tuhém stavu. Jedná se tedy o vědu, která zkoumá vztah mezi časem, deformací a napětím s cílem porozumět chování polymerního materiálu v průběhu jeho zpracování. [9]

Existuje mnoho způsobů, jak experimentálně prokázat, že polymerní kapaliny vykazují elastické vlastnosti. Jedním z velmi dobře známých experimentálních pozorování je chování stoupající kapaliny na rotující tyči v roztoku polymeru. Fenomén stoupání kapaliny po tyči je poměrně v rozporu s tím, co se očekává od působení odstředivé síly. Čím rychleji se tyč otáčí, tím více kapalina stoupá. Tento jev se nazývá Weissenbergův efekt. [8]



Obr. 2.1 Weissenbergův efekt [9]

### 2.1 Viskoelastické chování

Plasty i za normálních podmínek prostředí vykazují intenzivní viskoelastické vlastnosti, což znamená, že jejich chování představuje současně vlastnosti kapaliny a elastické pevné látky. Viskózní materiál vykazuje chování závislé na čase, když je na něj při konstantním zatížení aplikováno napětí a deformuje se konstantní rychlostí. V momentě, kdy zatížení přestane působit, tak materiál "zapomene" svou původní konfiguraci a zůstane v deformovaném stavu. [7]

Na proti tomu se elastický materiál při natažení okamžitě deformuje a "pamatuje si" svou původní konfiguraci a po odstranění napětí se okamžitě vrátí do původního stavu. [7]

Viskoelastické materiály mají prvky obou těchto vlastností a jako takové vykazují časově závislou deformaci vykazující „relaxační paměť“. Takové chování může být line-

ární (napětí a deformace jsou úměrné) nebo nelineární. Zatímco elasticita je obvykle výsledkem roztažení vazby podél krystalografických rovin v uspořádané pevné látce, viskoelasticita je výsledkem difúze atomů nebo molekul uvnitř amorfního materiálu. [7]

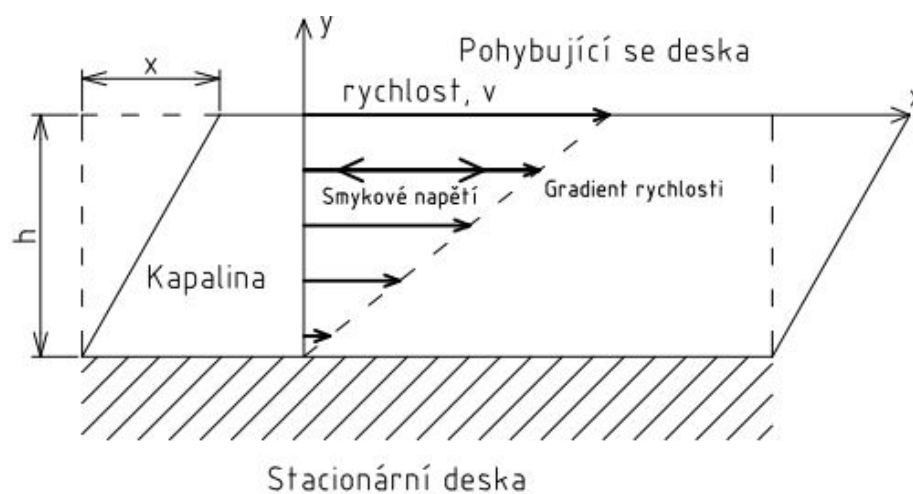
Polymery se vyznačují tím, že jejich chování při zatížení nebo deformaci je do značné míry závislé na čase, a to i při pokojové teplotě. Navíc jejich odezva na zatížení nebo deformaci závisí v některých případech na předchozí historii zatížení, deformaci nebo teplotě. [7]

## 2.2 Tlakem řízený tok

Tlakem řízený tok (Pressure Flow) je tok, který je způsoben přítomností tlakových gradientů nebo lokálním rozdílem tlaků v kapalině. Typickým příkladem tlakem řízeného toku je tok vody v potrubí, tok taveniny vytlačovací hubicí či tok taveniny při vstřikovávání procházející tokovými kanálky do dutiny formy. [9]

## 2.3 Unášivý smykový tok

Unášivý smykový tok (Drag Flow) je tok, který je způsoben relativním pohybem jedné nebo více hranic s respektem k ostatním hranicím, které tok obsahují. Mezi typický příklad unášivého smykové toku patří Couettovo proudění. Jedná se o laminární proudění uvnitř dvou rovnoběžných desek s viskózní kapalinou mezi těmito deskami. Jedna deska se pohybuje vzhledem k druhé, a proudění je poháněno viskózní odporovou silou působící na tekutinu. Nutno podotknout, že unášivý smykový tok a tlakem řízený tok se mohou vyskytovat zároveň. [9]



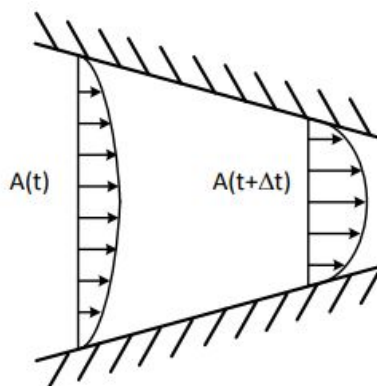
Obr. 2.2 Dvourozměrné Couetteho proudění mezi dvěma nekonečnými plochými deskami [9]



## 2.4 Základní reologické pojmy

V reologii se lze setkat s celou řadou odborných pojmů a fyzikálních veličin. Mezi nejdůležitější patří:

- Smyk (Shear) – ke smyku dochází, když se rychlost liší ve směru kolmém na tok (Obr. 2.2).
- Elongace (Elongation) – k elongaci dochází, při rozdílu rychlosti proudění (Obr. 2.3).
- Rychlost smykové deformace  $\dot{\gamma}$  (Shear Rate) – jedná se o rozdíl v rychlosti ve směru kolmém k průtoku. Hodnota rychlosti smykové deformace je jedním z nejdůležitějších parametrů při zpracování polymerů. Rychlost smykové deformace charakterizuje intenzitu smykového toku.
- Smykové napětí  $\tau$  (Shear Stress) – jedná se o napětí, které je potřebné k dosažení smykové deformace taveniny.
- Smyková viskozita  $\eta$  (Shear Viscosity) – je odpor vůči smykovému toku. Smyková viskozita je definována jako podíl smykového napětí a rychlosti smykové deformace. [9]



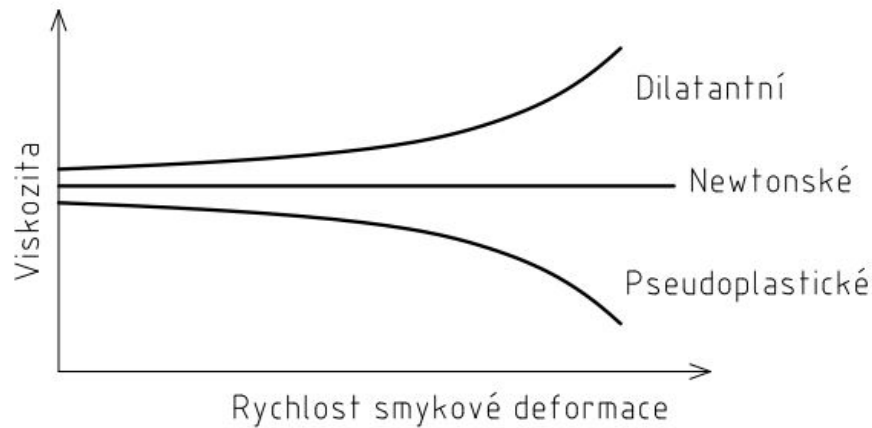
Obr. 2.3 Ilustrace elongace [9]

## 2.5 Nenewtonské chování

Polymerní taveniny, stejně jako mnoho dalších složitých tekutin se neřídí Newtonovým zákonem viskozity. Tyto tekutiny obecně vykazují viskozitu, která klesá s rostoucí rychlostí smykové deformace. [10]

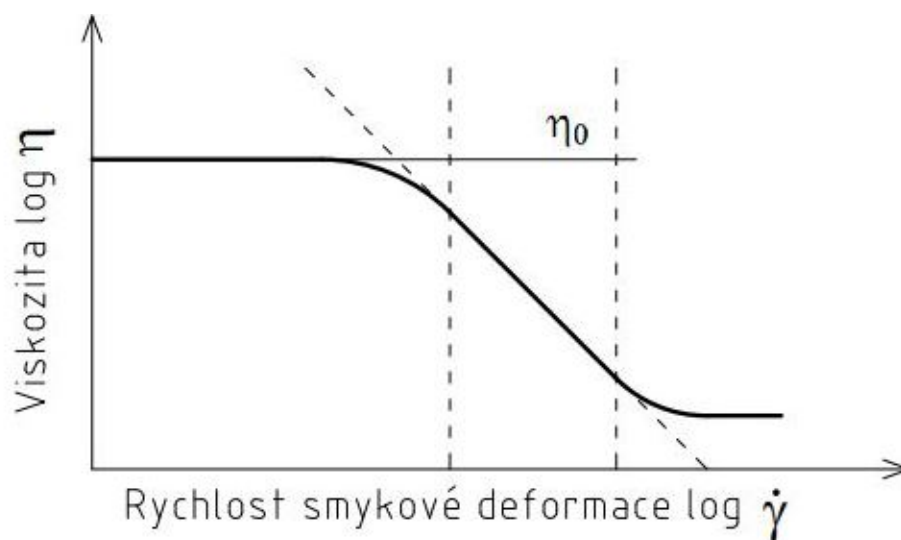
U newtonské kapaliny je viskozita ovlivněna pouze tlakem a teplotou, takže se změnou rychlosti smykové deformace nedochází ke změně viskozity (hodnota je viskozity je konstantní). Pro nenewtonské kapaliny je charakteristické, že se změnou rychlosti smykové deformace dochází i ke změně viskozity, ta může buď klesat nebo stoupat. [9]

Na Obr. 2.4 je zobrazena závislost viskozity na rychlosti smykové deformace. Je patrné, že neneutonské kapaliny lze rozdělit na dilatantní a pseudoplastické. Typickým příkladem dilatantní látky je tekutý písek, naopak polymery vykazují pseudoplastické chování. [9]



Obr. 2.4 Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace [9]

Skutečnost, že viskozita taveniny plastu se snižuje s rostoucí rychlostí smykové deformace má velký význam při zpracování plastů. Typický tvar závislosti viskozity na rychlosti smykové deformace je znázorněn na Obr. 2.5. [9]



Obr. 2.5 Závislost logaritmu viskozity na logaritmu rychlosti smykové deformace [9]

Když je rychlost smykové deformace  $\dot{\gamma}$  velmi nízká, tak je viskozita  $\eta$  konstantní a chování polymeru je podobné newtonské kapalině. Hodnota viskozity  $\eta_0$  při nízkých smykových rychlostech deformace bývá označována jako Newtonská viskozita. [9]

Podobný případ nastává i při velmi vysokých rychlostech smykové deformace. Viskozita je opět konstantní a tavenina připomíná chování newtonské kapaliny. Tato hodnota viskozity je velmi často označována jako Newtonova viskozita omezující smyk. Nicméně tuto hodnotu je velice složité experimentálně určit z důvodu vysokého zahřívání, které doprovází vysokou rychlost smykové deformace. [9]

Při zpracování většiny polymeru se lze setkat s rychlostí smykové deformace, jenž se pohybuje v rozmezí 1 až 10 000  $s^{-1}$ . Z Obr. 2.5 je patrné, že tuto oblast lze proložit přímkou. Toto platí pro většinu plastových materiálů a označuje se jako mocninový zákon. [9]

## 2.6 Vliv teploty na viskozitu

V pevném stavu mají molekuly velmi malou tepelnou energii, a proto jsou téměř nepohyblivé. V závislosti na okolní teplotě a teplotě skelného přechodu ( $T_g$ ) může být polymer buď křehký, nebo měkký a houževnatý. Obecně platí, že se zvyšující se teplotou se vlivem tepelné energie snižuje slabá mezimolekulární přitažlivost, která drží molekuly pohromadě, čímž se molekuly stávají pohyblivějšími. Zvýšení teploty zvyšuje pohyblivost molekul, čímž se snižuje viskozita polymeru. Teplota a viskozita jsou nepřímo úměrné. [11]

Nicméně vliv rychlosti smykové deformace na viskozitu je větší, než vliv teploty. Při vstřikování je běžnou praxí zvýšení teploty taveniny, aby plast lépe tekla do dutiny formy. [11]

## 2.7 Vliv tlaku na viskozitu

Vliv tlaku na viskozitu není zdaleka tak významný jako vliv teploty. Při většině praktických aplikací je zcela dostačující vliv tlaku na viskozitu jednoduše zanedbat. Tato skutečnost má za následek, že účinky tlaku jsou mnohem méně studovány, což znamená, že údaje o viskozitě při různých tlacích jsou mnohem vzácnější. [12]

### 3 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je jedna z hlavních technologií, která se používá ke zpracování polymerů. Princip technologie spočívá v přeměně plastů na výrobky různých tvarů a druhů. Vstřikování hraje důležitou roli v oblasti plastikářského průmyslu díky vysoké výrobní rychlosti, efektivnosti nákladů a schopnosti výroby velmi složitých tvarů s velkou přesností. Ačkoli se nejedná o nejvíce zastoupenou technologii v oblasti zpracování plastů, tak lze tvrdit, že to je technologie s největší přidanou hodnotou. [9]

Pokud by měla být diskutována nevýhoda vstřikování, předmětem diskuze by určitě byla náročnost procesu na vybavení (vstřikovací stroj a vstřikovací forma). Aby bylo vstřikování rentabilní, tak je nutné vyrábět velké dávky (více než 1000 dílů). Dalším problémem, který může nastat je smrštění, což může mít za následek nedodržení výrobních tolerancí. [13]

#### 3.1 Sušení plastů před vstřikováním

Většina plastů má při vystavení vlhkosti tendenci absorbovat vlhkost. To platí pro plasty v jakékoliv formě, ať už ve formě pelet či granulí před zpracováním, nebo v hotovém výrobku, jako je například vstřikovaný výrobek. Každý plast má svou přípustnou hranici maximální vlhkosti, při které nedojde při procesu zpracování taveniny k problémům. Této hranice je nutné se vyvarovat. [11]

Sušení plastů před zpracováním je kritickým krokem. Plasty, které jsou hydrofobické, musí být po určitou dobu vystaveny zvýšené teplotě sušení, aby došlo k účinnému odstranění přebytečné vlhkosti. Nicméně problémy může způsobit i nadměrné sušení nad rámec výrobcem doporučených časů a teplot. Až donedávna to byl přehlížený stav, i když nadměrné sušení může mít potenciálně velmi negativní dopad na mechanické vlastnosti a vzhled hotového výstřiku. Vystavení plastů nad doporučené teploty po nadměrně dlouhou dobu se označuje jako "přesušení". [11]

Pokud není proces sušení proveden správně, může dojít ke ztrátám ve výrobě v podobě zmetkových dílů, a také k prodloužení výrobního času, což má negativní ekonomický dopad. [11]

Sušení probíhá ve speciálních sušících strojích. Některé plasty se dodávají předem zabalené v sáčcích, které jsou vakuově uzavřeny. Takové plasty není třeba sušit, pokud dojde ke zpracování ihned po vyjmutí z obalu. Jakákoli otevřená a nepoužitá dávka plastu musí být před zpracováním vysušena, pokud bude později uložena v otevřeném prostředí. Existuje několik problému, které mohou vzniknout při zpracování taveniny z důvodu přítomné vlhkosti. [11]

### 3.1.1 Vliv vlhkosti na degradaci plastu

Pokud je přítomná vlhkost, tak může dojít k degradaci plastu v tavicí komoře vstřikovacího stroje. Při teplotách vstřikování může docházet k chemické reakci zvané hydrolytická degradace. Tato reakce napadá molekuly s dlouhým řetězcem. [11]

Samotná degradace může produkovat více vody a zvyšovat rychlost degradační reakce. Tento rozklad molekul způsobuje ztrátu vlastností konečného výrobku. Díly jenž jsou vyrobené s degradovaných materiálů mají obvykle tendenci křehnout a vykazují zhoršené mechanické vlastnosti. Může také dojít k poškození vzhledu součásti, lesklý povrch se stává matným. [11]

### 3.1.2 Vliv vlhkosti na ventilační systém formy

Nadměrná vlhkost nebo těkavé látky z degradovaného polymeru a jeho přísad mohou přetížit ventilační systém formy. Degradace vytváří vedlejší produkty, které se mohou usazovat ve větracích kanálcích formy. To vede k postupnému ucpávání a ke zhoršení kvality vyráběných dílů kvůli snížené ventilační kapacitě formy. [11]

Rozměry dílu totiž přímo souvisí s tlakem v dutině formy. Aby se dosáhlo konzistentní kvality, tak je nutné, aby při každém vstřikování byl v dutině stejný tlak. Pokud jsou však odvzdušňovací otvory ucpané, vzduch a plyny nemohou unikát a vnitřní tlak v dutině se zvýší, čímž vznikne díl s různými rozměry. [11]

### 3.1.3 Vliv vlhkosti na vstříknutou dávku

Přítomnost vlhkosti může zakrýt skutečný objem plastu během procesu vytváření vstříkované dávky, a tím způsobit snížení množství požadovaného plastu. Přestože vstřikovací jednotka vždy vytvoří požadovaný objem pro vstřikování, tak tento objem se nemusí rovnat objemu, který je nezbytný pro výrobu kvalitního dílu. Každá vstříknutá dávka bude mít jiný objem, což způsobí inkonzistenci v dávce, která plní dutiny formy. [11]

## 3.2 Vstřikovací cyklus

Vstřikování jako cyklický proces lze rozdělit na čtyři hlavní fáze. Mezi tyto fáze náleží plnění, komprese taveniny, dotlak a chlazení. [9]

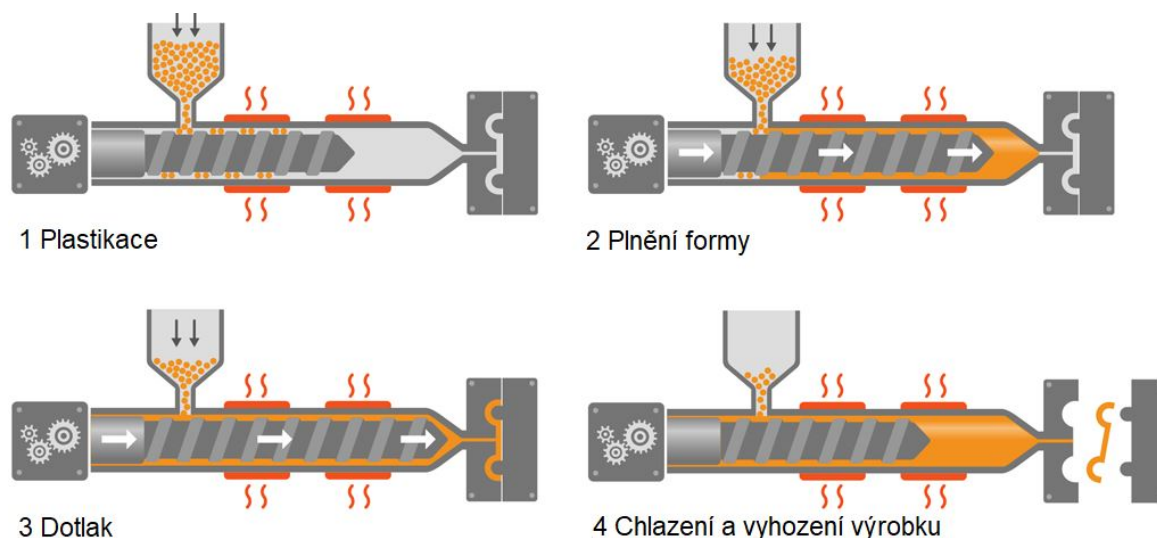
Vstřikovací cyklus začíná uzavřením formy. Tímto okamžikem dochází k vstříknutí roz-taveného materiálu tryskou do dutiny či dutin formy (plnění). Šnek se během této fáze neotáčí, ale koná pouze lineární pohyb, takže se šnek chová jako píst. V tomto okamžiku se upraví tlak a do formy se vstříkuje další materiál, aby se zohlednilo smrštění materiálu a zpětný tok. [13]

Proces se poté přepne do fáze dotlaku, při kterém je do dutiny dodáván další materiál. Dotlak je důležitá část vstřikovacího cyklu, protože kompenzuje smrštění, které je spojeno s chlazením a tuhnutím. Fáze dotlaku pokračuje, dokud není vtok ztuhlý. [9]

Poté následuje fáze chlazení. Výstřik je chlazen tak dlouho, dokud není dostatečně tuhý, aby mohl být vyhozen z formy. [9]

Souběžně s tuhnutím materiálu ve fázi chlazení probíhá plastikace (šnek se otáčí) v pracovním válci vstřikovacího stroje. Plastikace má za následek roztavení taveniny, která je poté pomocí šneku dopravena do vstřikovací trysky. Rychlost šneku musí být přizpůsobena viskozitě materiálu, aby se zabránilo příliš vysokému smykovému namáhání taveniny mezi závitů šneku a stěnou pracovního válce. Smyk vytváří teplo, a pokud by byl moc vysoký, tak by materiál mohl začít degradovat. [13]

Když je vstřikovaný díl dostatečně tuhý, tak dochází k otevření formy a následnému vyhození výrobku z formy. Poté je stroj připraven na další vstřikovací cyklus. [9]



Obr. 3.1 Schema vstřikovacího cyklu [14]

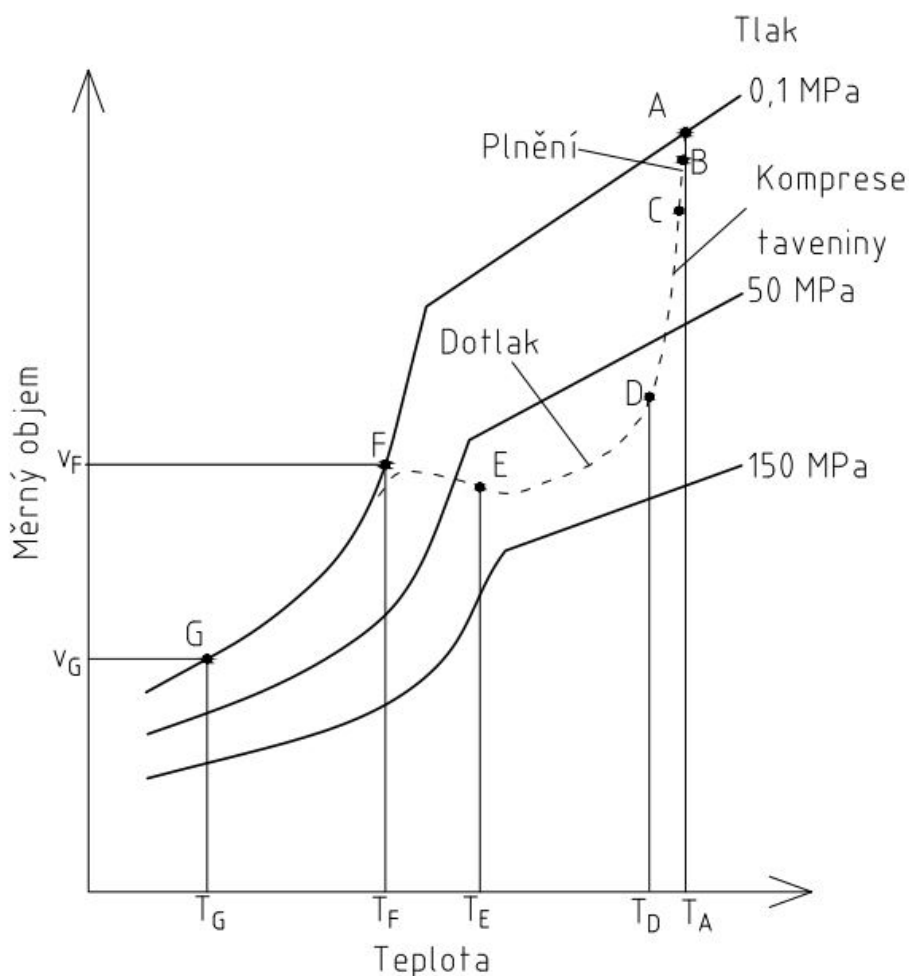
### 3.2.1 Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T

Diagram p-v-T popisuje specifický objem jako funkci tlaku a teploty. Specifický objem se zvyšuje se vzrůstající teplotou. Diagram slouží jako základní stupeň orientace pro určení zbytkových napětí a smrštění, což je cílem izochorického řízení procesu. [15]

Na Obr. 3.2 je znázorněn průběh vstřikovacího cyklu v p-v-T diagramu. Proces plnění začíná v bodě A. Signál tlaku v dutině začíná v bodě B – kdy se tavenina plastů poprvé dotkne tlakového senzoru – a poté se tlak plynule zvyšuje, jak pokračuje plnění. Plnicí fáze je dokončena v bodě C, kde je dutina pouze objemově vyplněna taveninou, aniž by byla stlačena. [15]

Poté následuje komprese taveniny, a tlak rychle stoupá na maximální hodnotou, které dosáhne v bodě D. V tomto bodě vstřikovací tlak přepne na přídržný tlak, a tím se aktivuje regulace přídržného tlaku. Tavenina je tedy udržována na určité hodnotě tlaku, dokud není dutina formy zcela zaplněna, tento proces končí v bodě E. [15]

Počínaje bodem E přechází cyklus na fázi konstantního objemu (izochorická fáze). Tato fáze je obzvláště důležitá pro rozměrovou přesnost výrobku. Dosažení bodu F za konstantního objemu je důležité i pro hmotnostní stálost výrobku. Poté již nelze tvarování ovlivnit. Výrobek se poté už jen smrští na základě okolní teploty. [15]



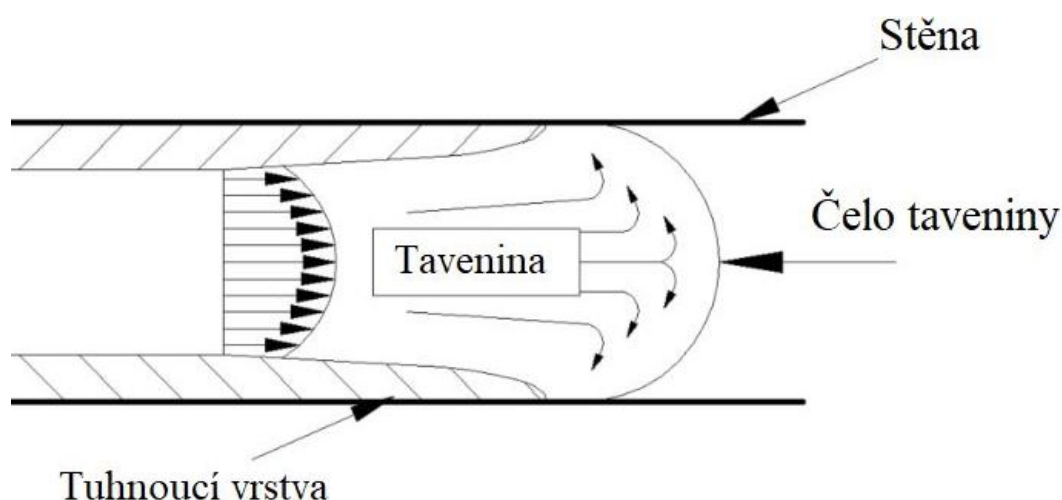
Obr. 3.2 p-v-T diagram vstřikovacího cyklu [15]

### 3.3 Tok ve vstřikovací formě

Proces toku taveniny ve vstřikovací formě je komplikován skutečností, že stěny kanálků formy a dutiny mají výrazně nižší teplotu než, je bod tuhnutí zpracovávaného plastu. V takovém případě se technická výzva soustředí spíše na schopnost adekvátně vyplnit dutinu formy než na sledování viskozity taveniny. Tato výzva jednoznačně závisí na tloušťce výstřiku, průtokových vzdálenostech a provozních parametrech jakými jsou teplota taveniny a formy. [16]

Jak již bylo napsáno, teplota formy je vždy nastavena nižší hodnotu, než je teplota taveniny, protože tavenina musí vychladnout alespoň na vyhazovací teplotu. Na dotek lidské ruky může být forma horká, ale forma je vždy považována za studenou. [11]

Proudění taveny je laminární. Když začne vstřikování a plast se poprvé dotkne studené formy, tak ztuhne na stěnách formy. Plast, který je vstřikován za touto zamrzlou taveninou, se protlačuje středem. Pohybuje se před ztuhlou vrstvou a končí na stěně formy, kde zamrzá. Výsledkem je tok zevnitř ven, kde čelo toku vypadá podobně jako vodní fontána, a proto se tomuto proudění říká fontánový tok. [11]



Obr. 3.3 Fontánový tok [17]

Pochopení fontánového toku může pomoci při řešení problémů s vadami u výstřiků. Pokud se vzhledová vada nachází vždy na stejném místě dílu, lze zpětně zjistit možné místo taveniny a přijít na zdroj problému. [11]

### 3.4 Vady vstřikovaných dílů

Zvládnutí procesu vstřikování vyžaduje vysokou míru technických znalostí. Jedná se o proces, který se skládá z mnoha proměnných. Vzhledem k tomuto vysokému počtu proměnných mohou malé, zdánlivě drobné chyby v počátečních fázích vývoje produktu vést k velkým problémům – a to k ovlivnění výsledného produktu. [18]

Vady mohou vést ke snížení efektivnosti celého procesu vývoje výrobku. Problémy a vady při vstřikování mohou být způsobeny řadou příčin, včetně špatného návrhu, chyb výrobního procesu, selhání kontroly kvality a dalších. [18]

#### 3.4.1 Nedotečení

Nenaplnění dutiny je důsledkem omezeného průtoku ve formě, který může být způsoben příliš úzkými nebo zablokovanými vtoky, zachycenými vzduchovými kapsami nebo nedostatečným vstřikovacím tlakem. [18]



Řešení spočívá ve zvýšení teploty formy, zvýšení teploty polymeru, zvýšení rychlosti vstřikování nebo zvýšení počtu odvodušňovacích kanálek. [13]

### 3.4.2 Propadliny

Propadliny se objevují v podobě prohlubní v tlustých částech součásti. Tlustší části se ochlazují déle, což může mít často neočekávaný vedlejší účinek, kdy se vnitřní části součásti smršťují, a to jinou rychlostí než vnější části. [18]

Propadliny lze odstranit změnou (zvětšení kanálek) vtokového systému, aby materiál rychleji zaplnil dutinu formy. Vliv na propadliny má i délka dotlaku či teplota taveniny (teplotu je nutné snížit). [13]



Obr. 3.4 Propadlina [19]

### 3.4.3 Delaminace

Delaminace je vada, kdy se od sebe oddělují vrstvy plastu. Toto rozvrstvení má vliv nejen na vzhledové vlastnosti dílce, ale i na mechanické vlastnosti. První věc, na kterou je při problému s delaminací hledět je materiál. Ve většině případu se ukáže, že byl pouze problém s kontaminací materiálu a ne v samotném nastavení vstřikovacího cyklu. [20]

Co se nastavení vstřikovacího cyklu týče, tak je nutné hledět na teplotu taveniny, rychlost plnění a dobu setrvání polymeru v pracovním válci vstřikovacího stroje. Delaminace může být způsobena i znečištěním dutiny formy, kdy může dojít ke kontaminaci uniklým olejem. [20]

### 3.4.4 Studené spoje

Studené spoje jsou defekty, ke kterým dochází, když dojde k setkání dvou a více čel taveniny v dutině formy. Jak je tavenina vstřikována do formy, protéká všemi částmi

formy. V místech, kde plast obtéká pevný kus formy, od jednoduchého kruhu po tvarování složitých tvarů, jako jsou prstence nebo čtverce, se dvě nebo více předních stran roztaveného plastu znovu spojí do jednoho kusu. Právě k tomuto spojení ne vždy dojde, a tím vznikne studený spoj. [21]

Stejně jako u mnoha jiných vad dílů existuje více příčin vzniku studených spojů. Dvěma hlavními faktory jsou teplota plastu a tlak. Bez dostatečného tlaku nemusí být oddělená čela dostatečně přitlačena k sobě, aby se spojila. Špatný tlak může být způsoben strojem nebo špatnou konstrukcí formy. Nesprávně navržený vtokový systém může mít za následek pokles tlaku, což přispívá ke vzniku studených spojů. [21]

### 3.4.5 Jetting

Jetting je vada, při níž vstupující plast do dutiny formy nevytváří souvislý tok, ale spíše proudí. Proud taveniny se pohybuje napříč dutinou, dokud nenarazí na stěnu dutiny či jinou překážku. Plast nepřiléhá ke stěnám formy, ale spíše nekontrolovaně stříká skrz formu. Jetting se obvykle týká spíše konstrukce samotné formy než vstřikovacího procesu. Nicméně rychlost plnění je proměnná, která má na Jetting vliv. [20]

### 3.4.6 Dutiny

Dutiny jsou vnitřní kapsy uvnitř vstřikované součásti, které se nejčastěji objevují u silnějších stěn. Dutiny jsou ve skutečnosti vakuum, které vzniklo smrštěním polymeru. Dutiny jsou často přehlíženy, protože nejsou vidět (pokud se nejedná o průhledný výrobek). Design dílu hraje majoritní roli při vzniku dutin. Je nutné dodržovat jmenovitou tloušťku stěn. [20]

### 3.4.7 Deformace

Jedná se o vadu, při níž odformovaný díl disponuje jiným tvarem než bylo původně zamýšleno. Deformace může být náročná na řešení. Při zahřívání a ochlazování termoplastu dochází ke smršťování a pnutí, které mohou vést k deformaci. Mezi nejčastější vznik deformace se řadí rozdílné smrštění v dílci. [20]

### 3.4.8 Spálená místa

Ke vzniku spálených míst dochází z důvodu degradace polymeru. Polymer může zdegradovat v pracovním válci či trysce vstřikovacího stroje nebo ve formě, která obsahuje horký vtokový systém. Řešením je snížení teploty taveniny či úprava procesu plastikace (otáčky šneku, teploty pásem). [13]

### 3.4.9 Diesel efekt

Diesel efekt je degradace polymeru v důsledku stlačeného vzduchu v dutině. Je způsoben nedostatečným odvodem vzduchu z formy. Problém lze řešit snížením rychlosti vstřikování či přidáním ventilačních kanálek. [13]



Obr. 3.5 Diesel efekt [22]

### 3.4.10 Bubliny

Bubliny jsou defekt, který se objevuje, když je ve vstřikované tavenině zachycen plyn. Při odstraňování tohoto defektu je nejdříve nutné určit zda se jedná o bublinu nebo dutinu. Základní rozdíl spočívá v tom, že bublina je tvořena plynem kdežto dutina je pouze vakuum. [20]

Přebytek plynu může být způsoben vysokou teplotou taveniny či vysokou dekompresí. Při přehřátí plastu často dochází k uvolnění plynu v rámci degradace. Vysoká dekomprese může způsobit vtáhnutí vzduchu do taveniny plastu. [20]

## 4 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Konvenční vstřikovací stroj je znázorněn na Obr. 4.1. Plast je formě pelet nebo granulí přiváděn do pracovního válce vstřikovacího stroje, kde se generuje smykové teplo vlivem tření mezi plastem a pláštěm pracovního válce a pláštěm rotujícího šneku. Další teplo je dodávané elektrickými ohřivači, které jsou umístěny vně pracovního válce. [11]



Obr. 4.1 Vstřikovací stroj [23]

Toto teplo postupně natavuje plast, až je připraven na vstříknutí do dutiny formy. Jak se šnek otáčí, tak dochází k vytlačování požadovaného množství plastu do přední části pracovního válce. Tento plast se pak vstříkuje do formy lineárním pohybem šneku vpřed. [11]

### 4.1 Dělení vstřikovacích strojů

Vstřikovací stroje lze klasifikovat mnoha způsoby. Podle způsobu upnutí formy do stroje se rozdělují na horizontální a vertikální. Horizontální vstřikovací stroje jsou vhodné pro většinu aplikací, kdy vyhozené dílce padají na dopravník či krabice vlivem gravitace. Horizontální stroje jsou nejuniverzálnější a nejvíce používané [11]

Vstřikovací stroje lze také dělit podle druhu pohonu. Pohon vstřikovacích strojů může být hydraulický, elektrický či hybridní. [24]

#### 4.1.1 Hydraulické vstřikovací stroje

Jak již název napovídá, tak hydraulické vstřikovací stroje pracují na principu hydrauliky. I když se jedná o velmi účinný druh pohonu, tak za nevýhodu lze považovat nezbytnost nepřetržitého provozu, aby se udržela konstantní teplota roztaveného plastu. [24]

Spouštění a vypínání stroje vyžaduje čas a zvláštní pozornost, aby nedošlo k poškození

stroje. Během spouštění je nutné plast, který nedosáhl správné teploty, zlikvidovat k recyklaci. Během vypínání se doporučuje odstranění nežádoucího plastu ze šneku. [24]

#### 4.1.2 Elektrické vstřikovací stroje

Ve srovnání s hydraulickými vstřikovacími stroji je cena plně elektrických vstřikovacích strojů vyšší. Nicméně elektrické vstřikovací stroje nemusí pracovat nepřetržitě. Vstřikování je relativně stabilní, a může být efektivnější než u hydraulických strojů. Plně elektrické vstřikovací stroje nemají žádný hydraulický systém, takže nehrozí únik kapaliny do stroje. [24]

#### 4.1.3 Hybridní vstřikovací stroje

Hybridní vstřikovací stroje jsou vysoce efektivní a ekonomické. Spojují výhody hydraulických a plně elektrických strojů. V současné době se jedná o velmi používaný typ u mnoha společností. Tyto stroje mají přiměřené náklady a jsou poměrně energeticky účinné. [24]

Hybridní vstřikovací stroje používají servomotor k pohonu hydraulického čerpadla, které zajišťuje hydraulický tlak pro napájení součástí stroje. Upínací mechanismy jsou jednodušší, přesnější a odolnější, což výrazně snižuje náklady na údržbu. Hybridní vstřikovací stroj může dodat vyšší vstřikovací tlak než plně elektrické typy. [24]

### 4.2 Technické údaje strojů

#### 4.2.1 Uzavírací síla

Tavenina plastu se do formy vstřikuje pod vysokým tlakem. Tento tlak působí na dělicí rovinu formy, což může vést k otevření formy během vstřikování. Aby k takovému otevření nedošlo je nutné na formu působit protisílou. Maximální síla, kterou je stroj schopný vyvinout se nazývá uzavírací síla. Obvykle se udává v tunách. [11]

#### 4.2.2 Velikost vstřikované dávky

Velikost vstřikované dávky je dalším důležitým parametrem, který je nutné sledovat při výběru vstřikovacího stroje. Tento parametr se udává v gramech a udává maximální vstříknutou dávku na jeden zdvih šneku. [11]

#### 4.2.3 Průměr a poměr L/D šneku

Průměr šneku se udává v mm a bývá jen o něco málo menší než průměr pracovního válce. V průběhu času může dojít k opotřebení šneku, což způsobuje nekonzistence v

jednotlivých vstřikovaných dávkách. Hodnota  $L/D$  je poměr mezi délkou a průměrem šneku. Čím vyšší je poměr  $L/D$ , tím lepší je homogenita taveniny. [11]

#### 4.2.4 Plastikační kapacita

Plastifikační kapacita je maximální hmotnost plastu, kterou lze zahřát na tvarovací teplotu a umístit ji před šnek, aby mohla být vstříknuta do formy. Obvykle se vyjadřuje v kilogramech za hodinu. [11]

### 4.3 Kontrolní jednotka

Podmínky vstřikování se zadávají do stroje prostřednictvím řídicí jednotky, která slouží k definici všech činností stroje. Mezi tyto činnosti patří čas pro zavření/otevření formy, nastavení uzavírací síly či rychlost vstřikování. [25]

## 5 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je komplexní systém, který musí splňovat mnoho požadavků kladených procesem vstřikování. Primární funkcí je pojmoutí polymerní taveniny takovým způsobem, aby došlo k dokonalému zaplnění dutiny formy, která kopíruje tvar výrobku. Druhou velmi důležitou funkcí je přenos tepla mezi taveninou, která se nachází ve formě a chladivem, jenž protéká temperačními okruhy. Posledním úkolem je účinné vyhození hotové součásti ven z formy, aniž by došlo k jejímu poškození. [26]

Směr, ve kterém se vstřikovací forma otevírá a zavírá se nazývá hlavní směr odformování. Všechny pohyby, které ve vstřikovací formě koná probíhají v tomto axiálním směru. Nicméně v závislosti na vyráběné součásti se lze setkat i s dalšími směry odformování. [27]

Pevná strana formy se skládá z upínací desky a desky tvárnice. Tyto desky jsou spojeny šrouby, aby došlo k pevnému spojení těchto desek. Pohyblivá strana je poněkud složitější. Kromě upínací desky a desky tvárnice obsahuje také velmi často desku opěrnou. K pohyblivé straně formy také patří vyhazovací systém formy. [27]

### 5.1 Vtokový systém

Účelem vtokového systému je doprava taveniny z trysky vstřikovacího stroje do dutiny formy. Konstrukce vtokového systému se pohybuje od jednoduchých případů až po velmi složité. Zvýšená investice do vtokového systému bude mít za následek zkrácení doby vstřikovacího cyklu a snížení množství nevyužitého materiálu při použití formy. Za základní dělení vtokových systémů se považuje rozdělení na vtokový systém horký a studený. [26]

#### 5.1.1 Horký vtokový systém

Významné procento dnes vyráběných forem využívá horké vtoky. I když mají horké vtoky oproti studeným vtokům řadu výhod, tak jejich použití sebou nese mnoho výzev a nejsou nejvhodnější volnou pro mnoho aplikací. [28]

Na rozdíl od studených vtoků je většina horkých vtoků kvůli jejich složitosti nakuována od firem, které se specializují na jejich konstrukci a výrobu. Výrobci forem obvykle nakupují horký vtok jako integrovaný systém, nebo v podobě jednotlivých komponentů, které poté sestavují do funkčního celku. [28]

Jednou z největších výhod horkých vtoků je eliminace potřeby vypořádat se zbytkem studeného vtoků. [28]

V následujícím seznamu jsou uvedeny některé výhody horkých vtokových systémů:

- Kratší doba vstřikovacího cyklu – žádná doba chlazení studeného vtokového kanálu, žádná doba vstřikování pro naplnění vtokového kanálu.
- Snížená energie (plastikace) – i když se vezme v úvahu přidaná energie na ohřev horkého vtoku, je obvykle očekáváno, že celková spotřeba energie bude nižší.
- Stálá teplota taveniny přímo do dutiny formy – ie většině případů to není pravda. Jediná tepelná odchylka, která vzniká ve studeném vtoku, je způsobená smykem. Teplota okolní formy a její vliv na taveninu je zanedbatelná, jestliže má forma přiměřené chlazení.
- Vylepšená automatizace – horký vtok eliminuje potřebu navrzení dalšího automatizačního zařízení, které by bylo nutné pro manipulaci se studeným vtokovým kanálkem. [28]

Nevýhodou horkých vtoků je jejich požadavek na vysokou odbornost obsluhujícího personálu (operátoři výroby, procesní inženýři, údržbáři). Za zmínku stojí také vysoké pořizovací náklady, které kromě samotných vtoků zahrnují elektrické regulátory či hydraulické nebo pneumatické systémy, které jsou nutné k ovládní ventilů. [28]



Obr. 5.1 Horký vtokový systém [29]

### 5.1.2 Studený vtokový systém

Studený vtokový systém je systém, ve kterém dochází ke chlazení vtokové dráhy, k jejímu tuhnutí a následnému vyhození spolu s vstřikovaným dílem. Přibližně 70 % dnes vyráběných forem obsahuje studený vtokový systém. [28]

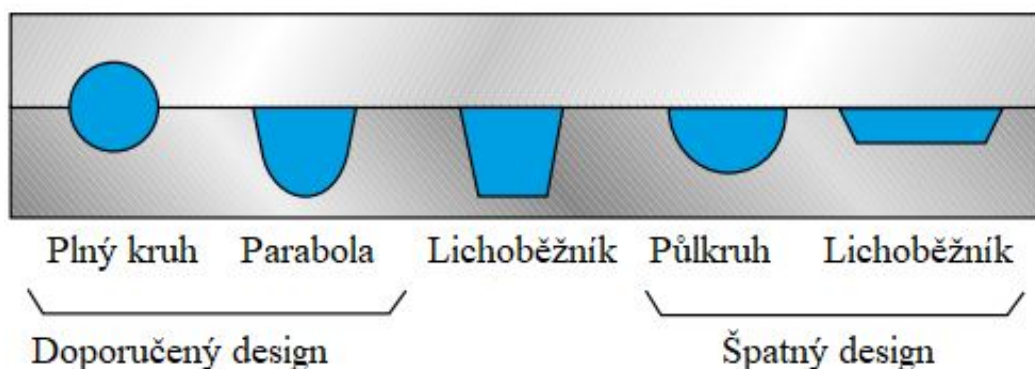
Studený vtokový systém běžně obsahuje hlavní vtokový kanál, rozváděcí kanálky a vtokové ústí. K napájení studeného vtoku se občas využívá horký vtok, ale i tak forma se stále označuje jako forma se studeným vtokem. [28]

Formy se studeným vtokem jsou zdaleka nejzákladnějším a nejběžnějším typem formy. V porovnání s formami, jenž obsahují horký vtok jsou tyto formy levnější, jednodušší na konstrukci, obsluhu a údržbu. [28]



Hlavní vtokový kanál slouží k přívodu taveniny z trysky vstřikovacího stroje buď do rozvodných kanálků, nebo přímo do dutiny formy, jedná-li se o jednonásobnou formu. Rozvodné kanálky by měly být zkontrolovány z hlediska možných problémů s vyhazováním. Pokud jsou k vyhození vtoku použity válcové kolíky, tak je nutné zajistit, aby nezasahovaly do průtočného kanálku. Vyhazovače by měly být buď v jedné rovině se dnem nebo zapuštěné. Mírně zapuštěný vyhazovač nezpůsobí žádné problémy s plněním formy. Samotná konstrukce studeného vtoku je závislá na faktu, zda vtok bude umístěn v třídeskové nebo klasické (dvoudeskové) formě. [28]

U studených vtokových systémů se používá celá škála tvarů pro rozvodné kanálky. Těmito tvary jsou kruh, parabola, lichoběžník, obdélník nebo jejich nepatrná modifikace. Nicméně rozvodný kanálek by téměř vždy měl mít kruhový nebo parabolický průřez. [28]



Obr. 5.2 Průřezy rozvodných kanálků používaných ve vstřikovacích formách [28]

## 5.2 Typy vtokového ústí

### 5.2.1 Plný kuželový vtok

Jedná se o zvláštní případ, kdy se vtokový systém skládá pouze z hlavního rozvodného kanálu. Lze se s ním setkat u jednonásobných forem. Tento vtok zajišťuje, aby tavenina byla dopravena do středu dutiny. Kuželový vtok je ideální pro mnoho válcových či symetrických dílů jakými jsou kbelíky, vany, poháry atd. [28]

### 5.2.2 Bodové ústí

Jedná se o běžný typ ústí, který se používá k připojení vtokového kanálu k dutině formy prostřednictvím malého válcového otvoru. K jeho častému používání dochází z důvodu snadného oddělení od výrobku. Kvůli své velikosti také zanechává minimální stopy na výrobku. [26]

### 5.2.3 Boční vtok

Boční vtoky jsou nejzákladnějším typem ústí. Obvykle mají obdélníkový průřez a připevňují se k dílu podél jeho obvodu na dělicí rovině formy. Používají se, když je automatické oddělování nepraktické nebo nežádoucí. [28]

### 5.2.4 Vějířové ústí

Vějířové ústí je podobné bočnímu vtoku v tom smyslu, že jsou k dílu připevněny v dělicí rovině a vyžadují ruční oddělení. Rozdíl spočívá v tom, že ústí se směrem od rozvodného kanálku rozšiřuje a připomíná svým tvarem vějíř. Vějířové ústí se používá k vytvoření rovnoměrného proudění taveniny do širokých částí dílce, kde hrozí deformace a porušení rozměrové stability. [28]



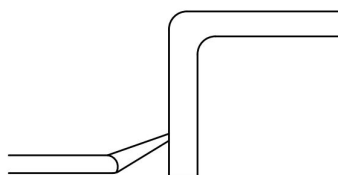
Obr. 5.3 Vějířové ústí [28]

### 5.2.5 Filmové ústí

Filmové ústí poskytuje výhody vějířového ústí za použití méně prostoru a materiálu. V tomto provedení se rozvodný kanálek připojuje k rozdělovači, který rozvádí taveninu podél širokého tenkého vtoku připevněného přímo k dílu. [28]

### 5.2.6 Tunelový vtok

Tunelový vtok má obvykle tvar kužele, kdy nejmenší část kužele bývá připevňována k výrobku. Během vyhazování bývá vtok oddělen od výrobku, takže hlavní výhodou je automatizace procesu. [28]



Obr. 5.4 Tunelový vtok[30]

### 5.2.7 Banánový vtok

Banánový vtok je vlastně variantou tunelové vtoku. Oproti tunelovému vtoku poskytují možnost ústí v oblastech dílu, kam není možné umístit standardní tunelový vtok. [28]

### 5.3 Temperační systém formy

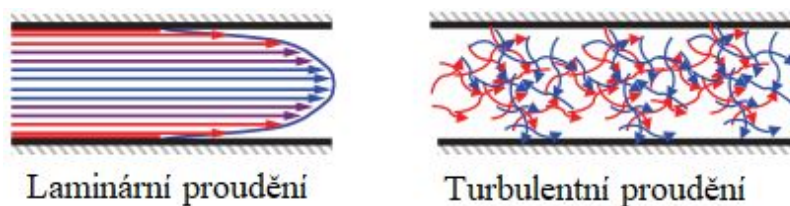
Základním úkolem temperačního systému je udržovat konstantní teplotní pole vstřikovací formy po celou dobu výroby. Z tohoto důvodu je nutné při konstrukci formy věnovat temperačnímu systému značnou pozornost. Přenos tepla mezi taveninou v dutině a vstřikovací formu má rozhodující vliv na kvalitu plastového dílu a ekonomickou efektivitu cyklu. [27]

K udržení stálé teploty formy se obvykle používá voda a olej. Voda je levná, snadno se s ní pracuje, lehce dosahuje turbulentního proudění, a proto je nejpoužívanější. Nevýhoda vody je, že ji lze použít pouze do teplot kolem 95 °C. K vodě se velmi často přidává aditivum v podobě etylenglykolu, což má vliv na vlastnosti, co se přenosu tepla týče. [11]

Při vyšších teplotách je nutné použít olej. Hlavní nevýhodou oleje je, že zřídka dosahuje turbulentního proudění, což snižuje přenos tepla. Při temperaci olejem je také nutné dbát více na bezpečnost. V některých případech je temperační systém tvořen elektrickými ohříváči, nicméně se nejedná o moc používanou variantu. [11]

#### 5.3.1 Reynoldsovo číslo temperačního systému

Reynoldsovo číslo poskytuje informaci o tom, zda je proudění laminární, přechodné či turbulentní. Pro maximální přenos tepla je nutné zajistit, aby proudění bylo turbulentní. Pokud je  $Re > 4000$ , tak se jedná o turbulentní proudění. [11]



Obr. 5.5 Laminární a turbulentní proudění[11]

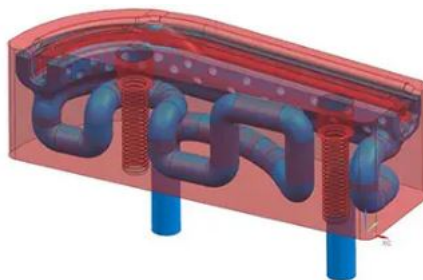
#### 5.3.2 Vrtaná temperace

Nejjednodušším typem chlazení je temperace vrtaná. Taková temperace se skládá z vrtaných kanálků s obvyklým průměrem 8, 10 a 12 mm. Velikost kanálků závisí na velikosti formy a dostupném místě ve formě. Menší otvory jak 6 mm se nedoporučují používat, díky usazování a ucpávání kanálků. [27]

Jednotlivé díry se vrtají konvenčním způsobem, navzájem se křížují, a proto je nutné slepé větve okruhu utěsnit záslepkou. Otvory by měly být vždy jednosměrné, protože chladicí médium se vždy ubírá cestou nejmenšího odporu. [27]

### 5.3.3 Konformní chlazení

Vzhledem k tomu, že neustále dochází k vývoji a zdokonalování technologií 3D tisku (stereolitografie, FDM, SLS, DMLS), tak pomocí těchto technologií lze vyrobit libovolnou dráhu temperačního systému. Chladicí kanálky mohou tedy mít libovolný design, který lépe kopíruje dutinu formy, což zlepšuje přenos tepla. Nevýhodou ovšem je snížená pevnost a vyšší poréznost povrchu tištěných vložek. [26]



Obr. 5.6 Příklad konformního chlazení [31]

### 5.3.4 Vysoce vodivé vložky

Dalším způsobem, jak snížit teplotní gradient je použití vložek z materiálů, jenž dobře vedou teplo. Měď a hliník mají mnohem lepší tepelnou vodivost než ocel. V praxi se tyto vložky vkládají do "horkých míst", kde snižují teplotu formy. [26]

### 5.3.5 Komponenty temperačního systému

K zajištění teploty mnoha oblastí ve vstřikovací formě nestačí pouze vrtané kanálky. Obvykle se jedná o oblasti, které jsou v průběhu procesu špatně chlazeny a mají negativní vliv na celkovou kvalitu výstřiku. Z tohoto důvodu je nutné mít pomocné součástky, které teplotu zabezpečí. Většina pomocných komponentů je založena na přepracování jednoduché díry do podoby okruhu. Mezi nejčastěji používané patří rovná či spirálová přepážka, spirálové jádro a přípojka s prodloužením. [27]

## 5.4 Odvzdušnění formy

Vzduch uvnitř dutiny formy musí být odváděn, aby se zajistilo bezproblémové zaplnění dutiny plastem. Vzduch, který není z dutiny odveden, je stlačen a dochází ke zvýšení tlaku, což vede k Diesel efektu. V průběhu času může také dojít k poškození povrchu formy, které je způsobeno nadměrným tlakem vzduchu v lokálních oblastech dutiny. [11]

Základní odvzdušnění je zajištěno vulemi v dělicích rovinách, ale toto není vždy dostačující. Dalším způsobem, se kterým se lze setkat v praxi je použití vůlí kolem vy-

hazovacích kolíků. Kolík totiž mívá vůli, aby bylo zajištěno kluzné uložení. Nicméně k ventilaci dochází pouze při aktivaci vyhazovacího systému. [26]

Pokud se předchozí možnosti ventilace ukáží jako nedostatečné, tak je nutné do formy začlenit od vzdušňovací kanálky. Kanálky spojují dutinu formy z jejím zevnějškem. Viskozita taveniny musí být dostatečně vysoká, aby se zabránilo jejímu vytékání z dutiny formy. Při návrhu od vzdušňovací otvoru je tedy nutné brát v potaz zpracovávaný materiál. Z tohoto důvodu neexistují žádné předem definované rozměry od vzdušňovací otvoru. [11]

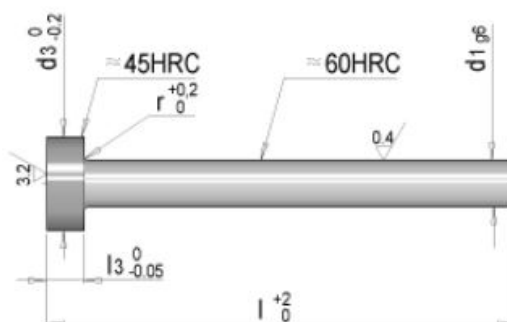
### 5.5 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém slouží k vyjmutí vstříkovaného dílu z formy po jejím otevření. Prvním krokem k bezchybnému vyhození výstřiku z formy je otevření formy v jedné či více dělicích rovinách. Druhým krokem je aplikace vyhazovacích sil, aby došlo k vyjmutí dílce z povrchu tvarové dutiny. Vyhazovací síla může být vyvolána různými komponenty. Tyto komponenty musí být navrženy a umístěny takovým způsobem, aby docházelo k rovnoměrnému přenosu vyhazovací síly na vstříkovanou součást. [26]

Fáze vyhazování spotřebovává drahocenné sekundy vstříkovacího cyklu, aniž by měla značný vliv na vyráběnou součást. Vyhazovací systém by proto měl být navržen tak, aby výstřiky byly co nejrychleji a nejspolehlivěji vyjmuty, aby bylo možné formu uzavřít a zahájit nový vstříkovací cyklus. [26]

#### 5.5.1 Vyhazovací kolíky

Nejvíce rozšířeným typem je kruhový vyhazovač. Instaluje se jako standardní nebo dokoupený díl ve vstříkovací formě. Průměr kolíku se pohybuje od 0,5 do 25 mm. Ve speciálních případech se lze setkat i s menšími průměry. V takovém případě hovoříme o osazeném vyhazovači, osazení slouží k zajištění větší tuhosti. [27]



Obr. 5.7 Příklad vyhazovacího kolíku [32]

Dalším typem vyhazovacích kolíků jsou ploché vyhazovače. Tyto vyhazovače jsou vhodné k vyhazování žeber či tenkých stěn. Jsou odsazené a odsazená část má v řezu tvar obdélníku. Další standardní součásti, jež se používají k vyhození dílce z formy jsou trubkové a pružné vyhazovače. [27]

### 5.5.2 Stírací deska

Vyhazování stírací deskou je vhodné pro miskovité díly, které mají stabilní a rovnou obvodovou hranu. Pro tento typ vyhazování je nutné navrhnout odlišnou koncepci vstřikovací formy. Vedení formy je obrácené, vodící čepy jsou v pohyblivé části formy a pouzdra v pevné části. Další vodící pouzdra jsou zabudována přímo do stírací desky. Vodící pouzdra jsou zajištěna proti posunutí pojistnými kroužky. [27]

### 5.5.3 Dvoustupňové vyhazování

V některých situacích je nutné vyhazování výrobku provádět ve dvou krocích. Tyto kroky ve většině případů souvisí se studeným vtokovým systémem. Občas je nutné nejdříve vyhodit ztuhlý vtokový systém a teprve poté lze přejít k vyhození součástí. Nejdříve dochází k vysunutí vtoku, vtok je oddělen manipulačním zařízením od výrobku, výrobek je poté vyhozen na dopravní pás. [27]

### 5.5.4 Vyhazování vzduchem

K vyhazování vstřikovaných výrobků vzduchem se používají vzduchové píсты. Jedná se o velmi spolehlivou formu vyhazovacího systému, protože není závislá na mnoha pohyblivých částech. Vzduch jednoduše vyvíjí tlak, který je dostatečně velký, aby vytlačil výstřik ven z formy. Tento systém je ideální pro tenkostěnné díly a je hojně využíván při výrobě vstřikovacích forem, které vyrábějí velké díly. V porovnání s jinými systémy je míra poškození u tohoto systému minimální, protože nezanechává stopy na výrobku. [33]

## 5.6 Boční odformování

Někdy je nutné odformovat díry či různé tvary, jež se nachází mimo hlavní směr otevírání formy. K tomuto účelů slouží boční tvarové posuvné kostky. Samotná kostka se během otevírání nebo po otevření formy pohybuje směrem od plastového dílu mimo hlavní dělicí rovinu. Požadovaná délka posunu se vypočítá a definuje předem. Tato cesta musí být dostatečně dlouhá, aby mohl být výrobek bezproblémově vyhozen z formy. [27]

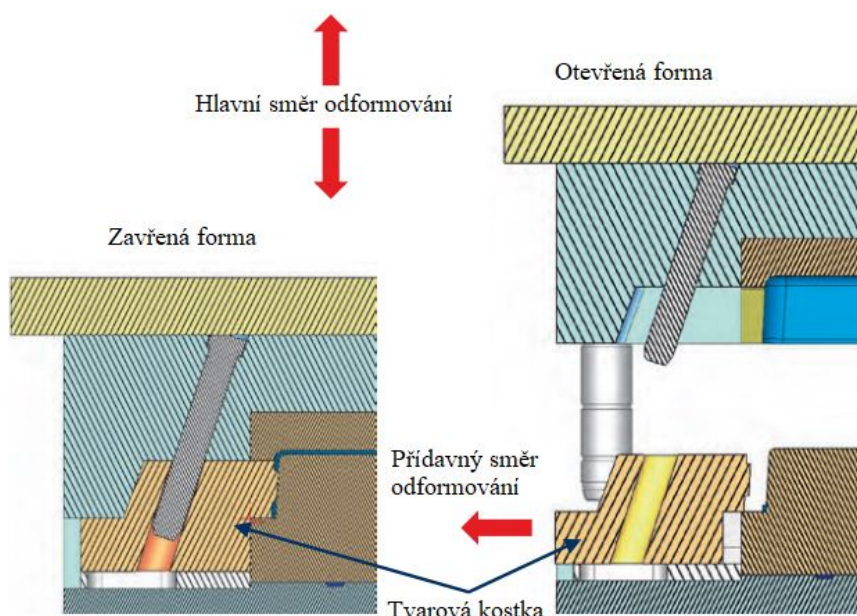
### 5.6.1 Boční odformování šikmým kolíkem

Odformování přes šikmý kolík je nejčastěji používanou variantou. Celým principem tohoto typu odformování je šikmý kolík, který je v určitém úhlu k hlavnímu směru otevírání formy. Přední část šikmého čepu se ponoří do pohyblivé tvarové kostky, a v momentě, kdy se forma začne otevírat v hlavním směru, tak šikmý kolík posune tvarovou kostku v dalším směru odformování. [27]

Mezi výhody se řadí:

- Levná výroba a možnost zakoupení již hotových komponentů, které jsou nutné pro správnou funkci.
- K ovládání není nutné žádné další vybavení a zdroj energie. Pohonem je nakloněná rovina.
- Zařízení je kompletně nezávislé na vybavení vstřikovacího stroje. Vše co je potřeba k odformování, je zajištěno zavíráním a otevíráním formy. [27]

Nevýhodou je omezení v podobě úhlu sklonění kolíku, maximální doporučený úhel činí  $30^\circ$ , protože při větších úhlech by docházelo k nepříznivému rozložení sil. Je také důležité brát v potaz délku kolíku, čím delší kolík je, tím více bude nestabilní. Pro větší tvarové kostky se doporučuje odformování přes hydraulický válec. [27]



Obr. 5.8 Boční odformování přes šikmý kolík [27]

### 5.6.2 Boční odformování hydraulickým válcem

Odformování hydraulickým válcem je další způsob, jakým lze uvést boční tvarovou kostku při odformování do pohybu. Jako provozní médium pro hydraulický válec se používá olej. Hydraulický válec je pevně přišroubován na vstřikovací formu. Válec se

kupuje a instaluje jako standardní součást. Vzdálenost odformování lze předem jasně definovat. [27]

Válec má flexibilní použití a lze ho instalovat a používat v každé poloze. Válec je vždy umístěn na vnějšku vstřikovací formy, a proto jeho použití znamená vždy zvětšení rozměrů formy. Při použití na elektrickém vstřikovacím stroji je nutné zajistit přídatnou jednotku s olejem. [27]

### 5.7 Násobnost formy

Násobnost vstřikovací formy je určena počtem dutin, které obsahuje. Například 4násobná forma obsahuje čtyři samostatné dutiny, tzn., že na jeden vstřikovací cyklus dojde k výrobě čtyř dílců. Občas se lze setkat s formou s dutinou 1+1, v takové formě se vyrábí dva různé výrobky ze stejného plastu. [27]

Jedním z údajů, který určuje násobnost formy je celkové množství vyrobených dílců v rámci životnosti formy. Pokud je požadované velké množství dílců, počet dutiny se zvyšuje. Pro hromadně vyráběné dílce jakými jsou šroubovací víčka láhví je někdy počet dutin vyšší než 100. [27]

Čím složitější a komplexnější je požadovaný díl, tím nákladnější a složitější je vstřikovací forma. Tento faktor se často zvažuje společně s množstvím produkce. U velmi složitých plastových dílů se používají jednonásobné či dvojnásobné formy. [27]

Dalším faktorem, který je nutný při návrhu zohlednit je vstřikovací stroj. Je nutné, aby stroj disponoval dostatečnou kapacitou k naplnění vstřikovací formy. Další omezení spočívá v upnutí formy na stroj (velikost formy) či v maximální uzavírací síle, kterou je stroj schopný vyvinout. [27]



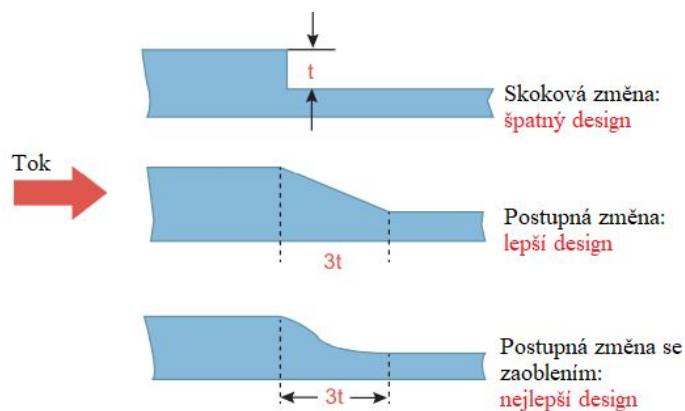
## 6 KONSTRUKCE VÝROBKU

Při navrhování dílu platí několik zásad, které se doporučuje dodržovat. Nejdůležitějším pravidlem, které je nutné brát v úvahu, je zajištění rovnoměrné tloušťky stěny. Dalšími pravidly, kterými by se měl konstruktér řídit, je správný design žeber, zaoblení či různých otvorů. [25]

### 6.1 Rovnoměrná tloušťka stěny

Je nutné se vyhnout dílům s různou tloušťkou stěny, a to převážně z důvodů, které souvisejí s náklady a kvalitou. Zásadní problém spočívá v tom, že tlusté a tenké stěny budou chladnout různou rychlostí – silnější úseky bude tuhnut déle než úseky tenké. Díly s různou tloušťkou stěny vykazují při vyhození vyšší teploty v blízkosti tlustých částí a nižší teploty v blízkosti tenkých částí. Tyto rozdílné teploty vyústí v odlišné smrštění a mají za následek výrazné geometrické ovlivnění tvaru. [26]

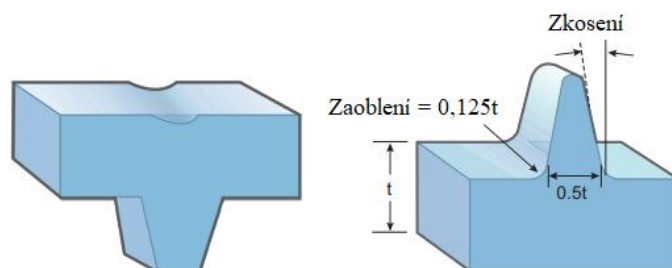
Pokud je však rozdíl v tloušťce nutný, tak se doporučuje design, který je znázorněn na Obr. 6.1. Pro optimální konstrukci je nutné zaoblit přechodovou oblast, aby nedocházelo ke kumulaci napětí v ostrých rozích. [25]



Obr. 6.1 Design přechodové oblasti tloušťky [25]

### 6.2 Konstrukce žeber

Nejčastějším problémem žeber je propadlina, která se objevuje na zadní straně žebra. K této vadě dochází proto, že odvod tepla u relativně tlustých žeber probíhá pomaleji než u tenkostěnných oblastí. Z tohoto důvodu je třeba žebra navrhnout takovým způsobem, aby se vada v podobě propadliny nevyskytovala. Obecně je doporučováno, aby tloušťka žebra byla menší než polovina tloušťky stěny dílu. Úhel zkosení žebra by měl mít hodnotu alespoň  $0,5^\circ$  a na spodní části žebra, by se mělo nacházet zaoblení, které má hodnotu alespoň 0,125 násobku tloušťky stěny vstříkovaného dílu. Co se tuhosti týče, tak je doporučeno použití většího množství žeber s nižší výškou. [25]



Obr. 6.2 Propadlina žebra (vlevo), správný design žebra (vpravo) [25]

### 6.3 Konstrukce otvorů

Další běžnou konstrukcí pro upevnění jiných dílů je zabudování otvorů pro samovrtané šrouby. Podobně jako u žebor, při nesprávné konstrukci dochází ke vzniku propadlin. Hlubka otvoru by neměla být větší než 30 % tloušťky stěny vyráběného dílce. Kromě toho by tloušťka stěny v horní části otvoru měla odpovídat průměru hlavy šroubu. Doporučuje se, aby vnější průměr v horní části byl 2 až 2,4 násobek průměru hlavy šroubu. [25]

Navržené otvory musí být schopné odolat kroutícímu momentu při vkládání samovrtaného šroubu. Současně by však neměly mít příliš velkou tloušťku, která by vyžadovala prodloužení doby vstřikovacího cyklu nebo způsobit vzhledovou vadu. [26]

### 6.4 Úkosy

Úkos by měl být na všech částech dílu, které jsou kolmé na dělicí rovinu. Úkosy jsou důležité, protože snižují tření při odformování. Čím větší úhel, tím menší odpor při odformování. Obecně platí, že úhel úkosu by měl mít minimální hodnotu alespoň  $0,5^\circ$ . [25]

### 6.5 Design rohů - zaoblení a zkosení

Ostré rohy jsou často specifikovány při návrhu výrobku pro maximalizaci vnitřního objemu součásti, pro usnadnění spojování mezi součástmi nebo pro zlepšení estetiky. Nicméně ostrým rohům je nutné se vyhnout z mnoha důvodů. Ostré rohy způsobují koncentraci napětí, které může zejména u křehkých materiálů způsobit lom. V souvislosti s výrobou forem může být velmi obtížné vyrobít ostré rohy, což vyžaduje použití elektroerozivního obrábění či jiné nekonvenční technologie. Proto je žádoucí při konstrukci dílce používat zaoblení (radiusy) či zkosení rohů. [26]

## 6.6 Vliv smrštění

Smrštění je fyzikální proces, ke kterému dochází během ochlazování vstřikovaného plastového dílu. Kvůli ochlazení plastu dochází ke změně objemu dílu, tudíž i ke změně velikosti. Tato změna se nazývá smrštění. [27]

Smrštění je závislé na použitém materiálu. Amorfny polymery se smršťují méně než polymery semikrystalické. Na smrštění má také vliv použití různých plniv, výztuh či modifikátorů. Dalším parametrem, jenž má vliv na smrštění materiálu je nastavení teploty formy a dalších parametrů vstřikovacího cyklu. [34]

Samotný plastový díl také ovlivňuje smrštění. Mezi nejdůležitější parametry patří velikost dílce, komplexnost tvaru a tloušťka jeho stěny. Celý proces smrštění se skládá z dvou fází. První fáze probíhá přímo ve formě a bezprostředně po vyhození. Druhá fáze se nazývá dodatečné smrštění, ale jeho hodnota už bývá minimální. [27]

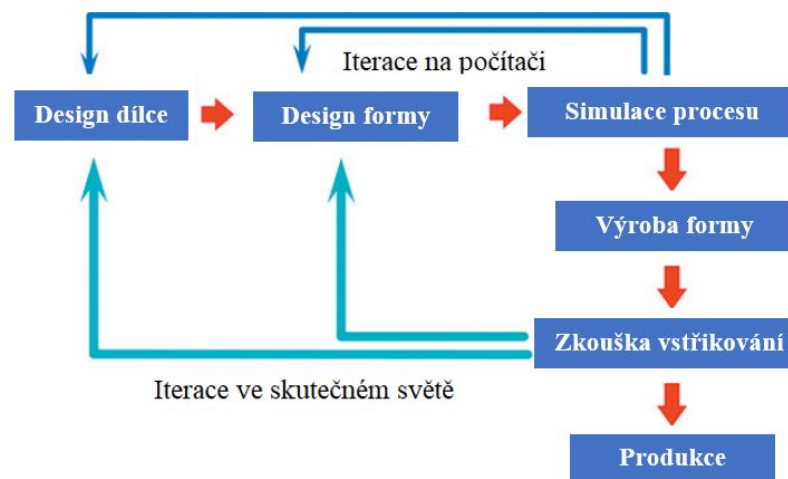
Pro stanovení správné hodnoty smrštění je potřeba mnoho zkušeností a znalostí. Existují plastové díly u nichž je vhodné zvolit odlišnou hodnotu smrštění ve směrech x, y, z. Jedním z kritérií může být, že díl je plochý, dlouhý a tenký. [27]

## 7 APLIKACE CAE PŘI NÁVRHU VSTŘIKOVACÍ FORMY

CAE je druh počítačem podporovaného inženýrského softwaru, který využívá počítačovou analýzu a simulaci. Software slouží k podpoře a diagnostice při vývoji složitých procesů, mezi které patří i vstřikování. CAE dokáže integrovat složité reologické, tepelné a mechanické vlastnosti materiálu a umožňuje konstruktérům a vývojářům provádět kvalitativní a kvantitativní analýzu a diagnostiku pro konstrukci forem. [25]

Z výsledků analýzy mohou vývojáři prozkoumat příčiny vyskytujících se problémů, a otestovat různé změny návrhu, aby zjistili nejvhodnější řešení, které nelze dosáhnout tradiční metodou pokus/omyl. [25]

Navíc pokud je vyžadována změna konstrukce výrobku či formy, tak náklady na čas, práci, stroj, materiál a energii při opakovaných zkouškách a úpravách forem nelze ani odhadnout. Proto je běžné implementovat CAE pro ověření návrhu během procesu vývoje. [25]



Obr. 7.1 Schéma vývoje vstřikovací formy [25]

Schopnost numericky simulovat vstřikování umožňuje dosáhnoutí následujících cílů:

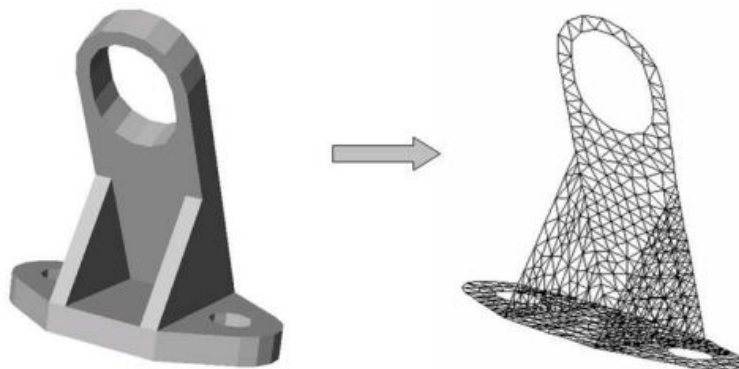
- Vizualizaci toku a předpovědění poslední vyplněné části dutiny. To je užitečné pro identifikaci defektů, které jsou spojené s posledně naplněnými částmi dutiny.
- Ekonomicky optimalizovat konstrukci formy. Je velmi užitečné simulovat různé návrhy vtoků, geometrické uspořádání či temperaci, aby se určil optimální návrh ještě před výrobou formy.
- Simulovat tepelné podmínky během plnění a chlazení. To je užitečné při odhadu doby vstřikovacího cyklu.
- Určení nejvlivnějších parametrů na výslednou kvalitu součásti.
- K identifikaci možných vad jakými jsou deformace, velikost smrštění či zbytková napětí. [35]

## 7.1 Metoda Midplane

Tato metoda bývá obvykle označovaná jako 2,5D přístup, protože tlak je řešen ve dvou rozměrech, jak je definováno středorovinným modelem ve smyslu  $x$  a  $y$ , zatímco teplota je určena ve třech rozměrech. Výhodou 2,5D přístupu je použití analýzy konečných prvků k určení tlaku, použití konečných rozdílů k určení teploty a zjednodušená hybnost a tekutost. [36]

V důsledku toho je použití konečných rozdílů pro teplotní pole ideální, protože jakmile je konečně prvková síť vygenerována pro střední rovinu (Midplane), uživatel může rozhodnout o úrovni detailů nastavením počtů uzlů pro teplotní řešení. Vhodný model střední roviny obecně poskytuje dobrý výsledek pro analýzu plnění, dotlaku a chlazení. [36]

Automatické generování střední roviny z 3D geometrie není triviální úkol. Úkolem je automaticky odvodit síť střední roviny s tloušťkou definovanou pro všechny prvky z 3D geometrie. [36]



Obr. 7.2 Generování střední roviny [36]

## 7.2 Analýza Dual Domain

Místo toho, aby střední rovina byla odhadována z 3D modelu, došlo k zavedení přístupu, který převádí 3D geometrii na ekvivalentní 2,5D geometrii. Tato metoda nese název Dual Domain. Výchozím bodem pro tento přístup je vnější síť na 3D geometrii. Koncept Dual Domain byl velmi rychle převzat uživateli v průmyslu. Tímto došlo k tlaku na poskytovatele softwaru, aby tuto metodu rozšířil i na analýzu deformací. [36]

## 7.3 3D analýza

Alternativní metodou k výše uvedeným metodám je provedení 3D analýzy. Tím dojde k odstranění problému 2,5D aproximace a v zásadě by to měla být konečná metoda simulace. Zejména 3D analýza odpovídá trendu 3D CAD modelování objektů ve 3D. [36]

Na rozdíl od metody Dual Domain, která využívá jak konečné rozdíly, tak konečné prvky, většina 3D analýz pracuje pouze s jednou numerickou metodou. Nejrozšířenější je metoda konečných prvků. K výpočtu 3D analýzy je nutné vytvořit tetraedrickou nebo hexaedrickou síť. Tetraedrální síťování je obecně výhodné, protože může být prováděno automaticky. Není překvapením, že výpočetní požadavky na 3D analýzu jsou vyšší než u jakékoli jiné metody. V každém uzlu sítě dochází k výpočtu tlaku, teploty a třech složek rychlosti ve směrech x,y,z. [36]

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

## 8 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Mezi cíle diplomové práce náleží:

- Vypracovat literární studii na dané téma.
- Provést konstrukci modelu zadané součásti.
- Navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na výrobitelnost.
- Ověřit funkčnost navrženého řešení pomocí simulace v software MoldFlow.
- Nakreslit 2D řez vstřikovací formou s kusovníkem.

V první části diplomové práce je provedená literární studie na téma vstřikování. Nejdříve jsou popsány základy polymerních materiálů. V další kapitole je věnována pozornost na reologii polymerních tavenin, jenž hraje významnou roli jak při procesu vstřikování, tak při návrhu samotné vstřikovací formy. V další části je rozebrán proces vstřikování a nejčastější vady na výrobcích, se kterými se lze setkat.

Další část obsahuje popis vstřikovacího stroje a jednotlivých částí vstřikovací formy. Poslední část je již věnovaná konstrukci samotného výrobku a v neposlední řadě stručným popisem využitím simulačních softwarů při návrhu vstřikovací formy.

Cílem praktické části je vytvoření 3D modelu vstřikovaného dílu a následné vytvoření konstrukčního návrhu vstřikovací formy pro daný díl. Celý 3D návrh byl realizován v prostředí modelovacího softwaru Catia V5R19 s využitím modulů "Part Design", "Generative Design", "Assembly Design" a "Mold Tooling Design". Pro vytvoření výkresové dokumentace byl použit modul "Drafting". Praktická část také obsahuje ověření konstrukčního návrhu v simulačním programu MoldFlow Synergy 2023. Při konstrukci vstřikovací formy byly využity normy z katalogu firmy Meusburger.

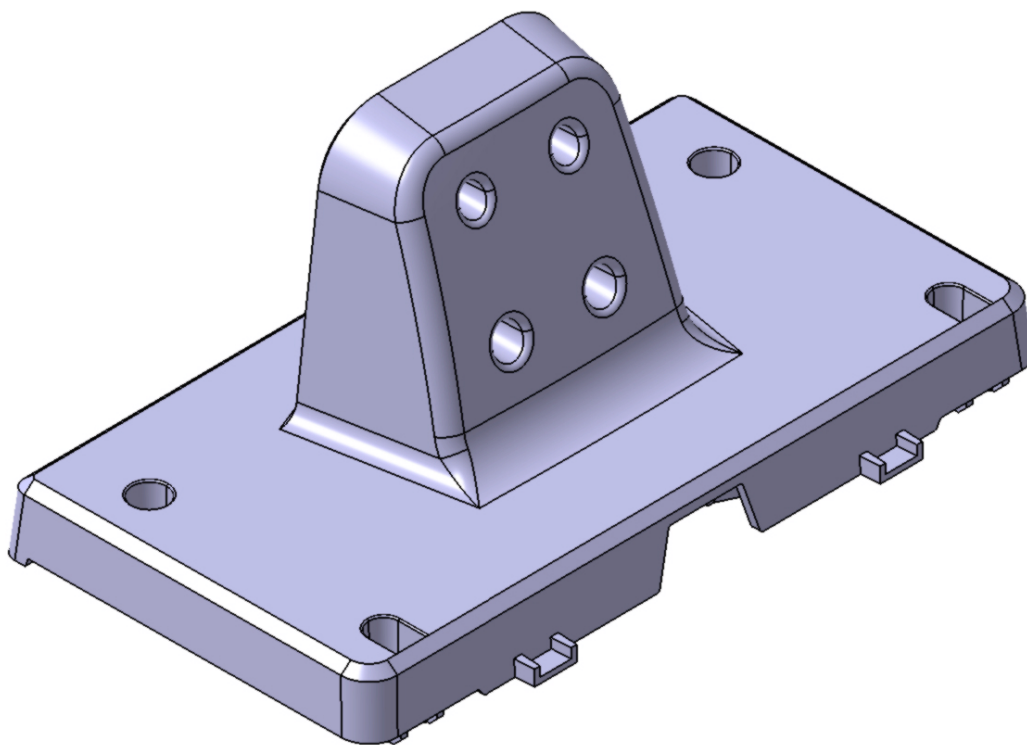


## 9 VSTŘIKOVANÁ SOUČÁST

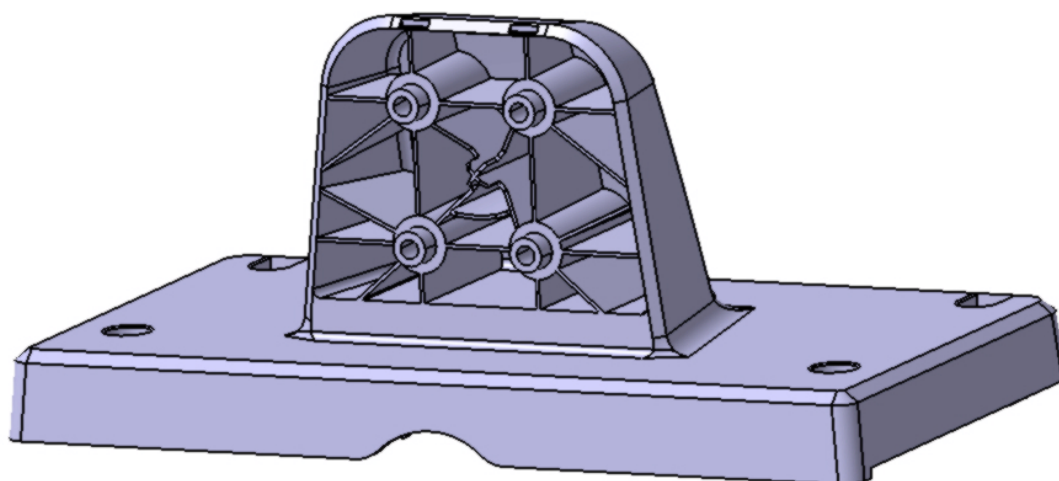
Vstříkovaným dílem je držák obrazovky televize. Účelem držáku je spojení mezi obrazovkou a stojánkem. Rozměry dílu činí 242 x 136,5x 108 mm. Jedná se o poměrně objemnou součást. Hmotnost součásti činí 336 g.

Daná součást je vytvořena celkem ve třech variantách. První varianta se co nejvíce podobá skutečnému dílu. Druhá varianta slouží k simulaci v softwaru MoldFlow Synergy 2023. Z tohoto důvodu je druhá varianta zvětšena o smrštění a zároveň jsou z dílu odstraněny všechny rádiusy, které mají rozměry menší než 2 mm. Odstranění rádiusů je nutné z důvodu zlepšení kvality sítě. Špatná síť by totiž měla negativní vliv na celkovou analýzu.

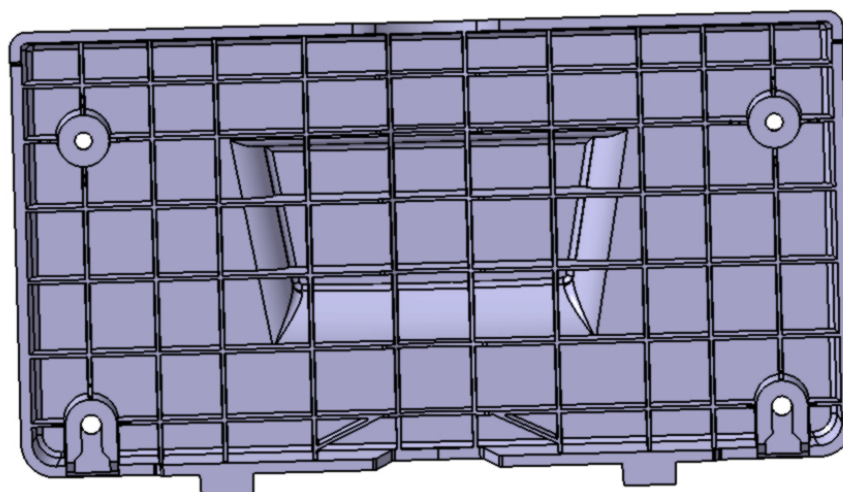
Poslední varianta slouží k vytvoření tvarových dutin vstřikovací formy. V podstatě se jedná o první model, který byl zvětšen o hodnotu smrštění. Na následujících obrázcích je znázorněn model dílu.



Obr. 9.1 Model skutečného dílu - pohled 1



Obr. 9.2 Model skutečného dílu - pohled 2



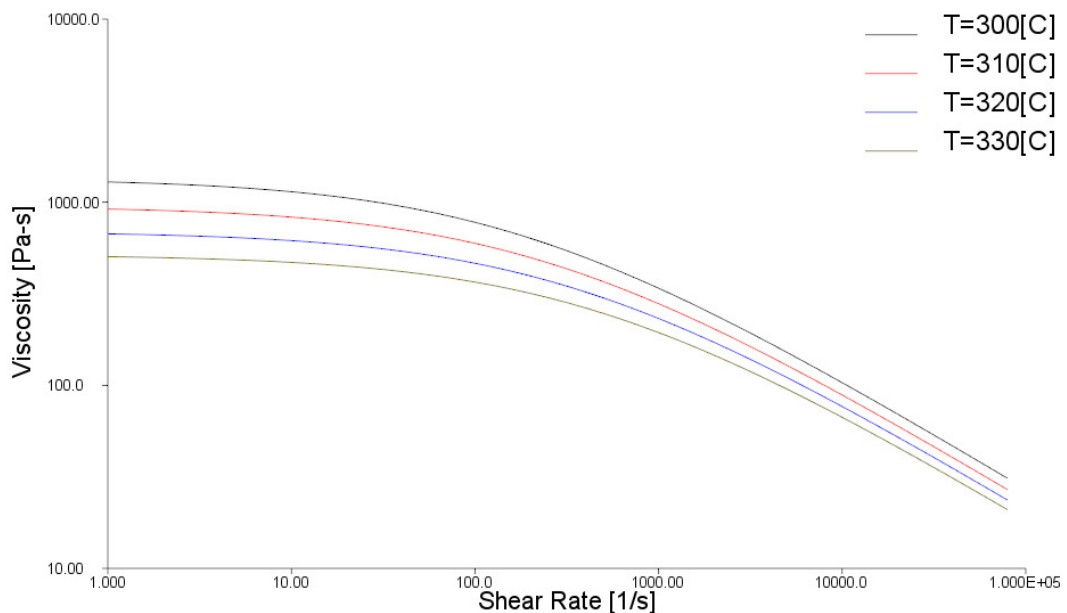
Obr. 9.3 Model skutečného dílu - pohled 3

## 10 VOLBA MATERIÁLU VSTŘIKOVANÉHO DÍLU

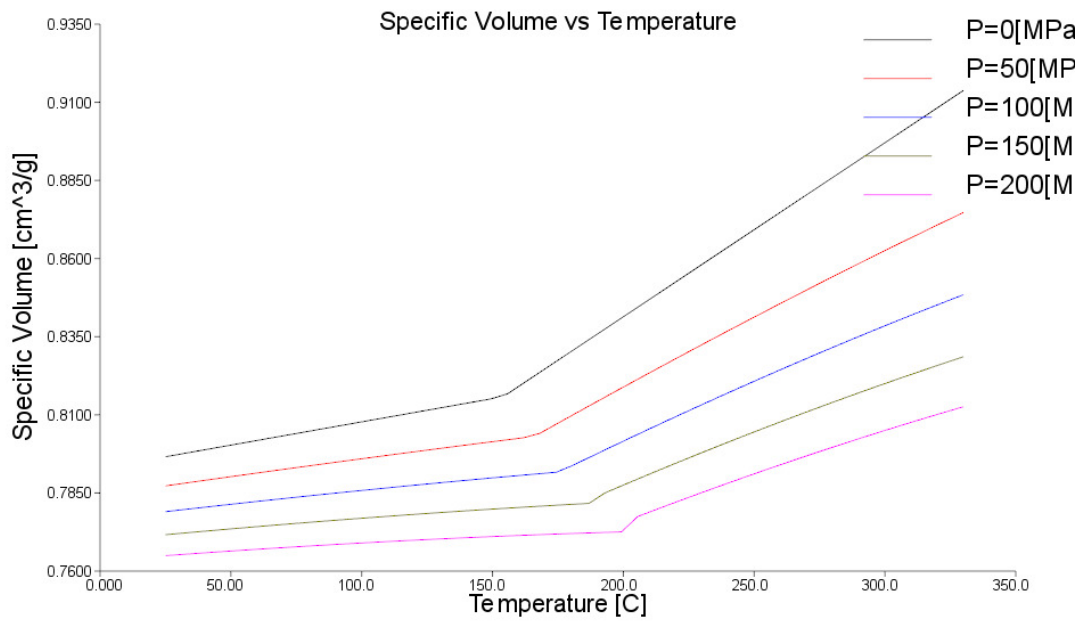
Jako materiál byl zvolen Makrolon 8315\* od firmy Covestro. Jedná se o polykarbonát, který obsahuje 10 % skelných vláken, které zajišťují lepší mechanické vlastnosti. Výhodou polykarbonátu je velmi dobrá houževnatost. Mezi další vlastnosti se řadí vysoká tuhost, tvrdost a pevnost. V Tab. 10.1 jsou uvedené některé údaje z materiálového listu. Dále jsou na znázorněny tokové křivky (Obr. 10.1) a pVT diagram (Obr. 10.2) daného materiálu.

Tab. 10.1 Vybrané hodnoty materiálu

Vlastnost	Hodnota
Doporučená teplota formy	100 °C
Doporučená teplota taveniny	310 °C
Maximální teplota taveniny	330 °C
Vyhazovací teplota	140 °C
Teplota tání	370 °C
Maximální rychlost smykové deformace	40000 s <sup>-1</sup>
Maximální smykové napětí na stěně	0,5 MPa



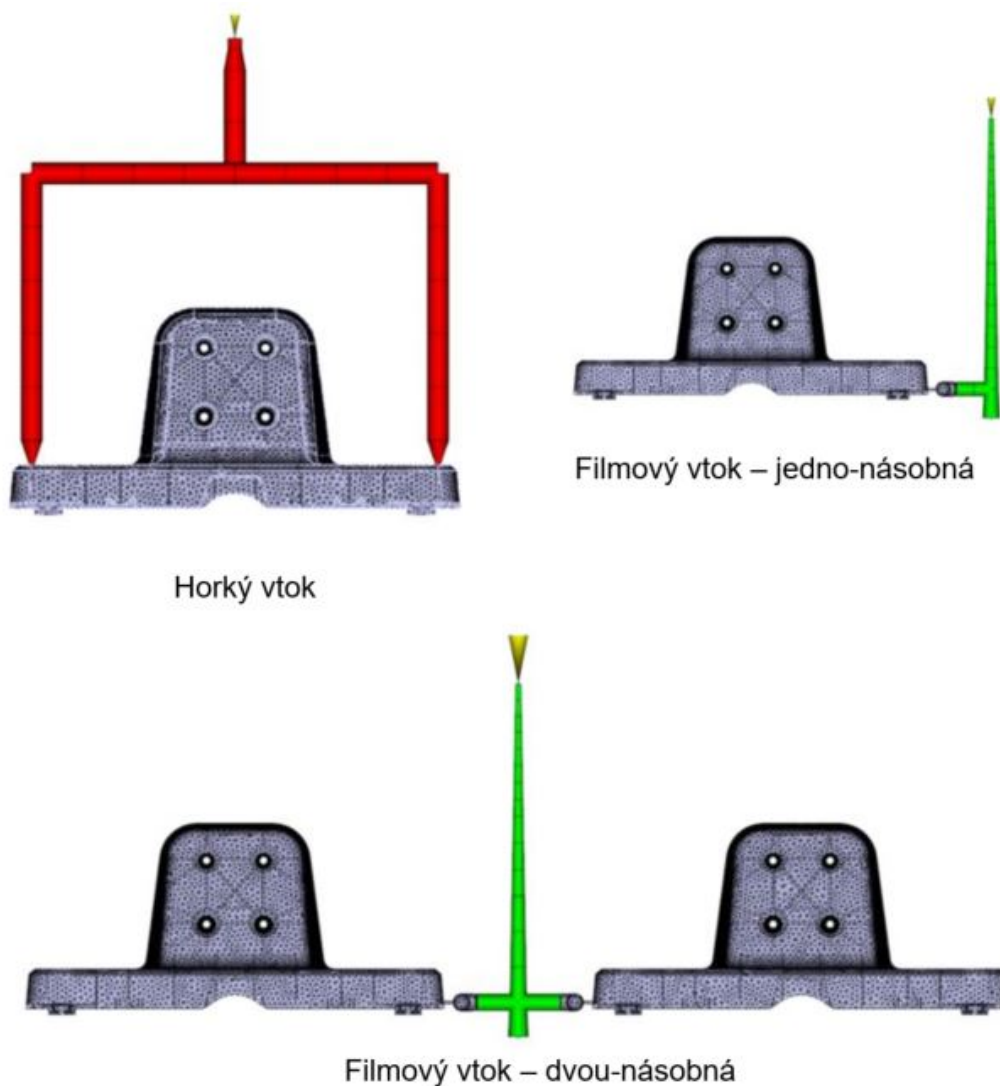
Obr. 10.1 Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace



Obr. 10.2 pvT diagram

## 11 NÁVRH FORMY

Před samotnou konstrukcí vstřikovací formy bylo nutné vyřešit násobnost formy a vtokový systém. Bylo provedeno několik simulací Fill+Pack+Warp v programu MoldFlow Synergy 2023 pro různé varianty. Tyto varianty zahrnovaly dvou-násobnou formu s filmovým vtokem, jedno-násobnou formu s filmovým vtokem a jedno-násobnou formu s horkým vtokem.



Obr. 11.1 Jednotlivé testované varianty

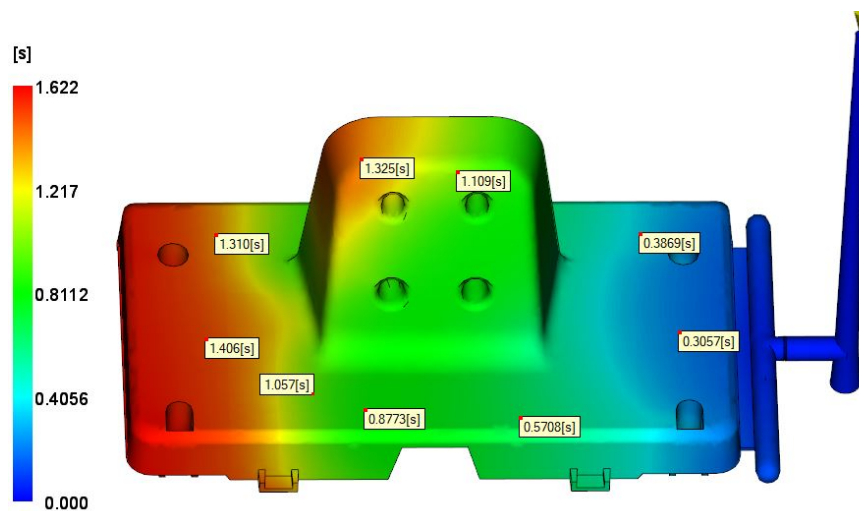
Na základě výsledků jednotlivých simulací bylo učiněno rozhodnutí formu koncipovat jako jedno-násobnou s horkým vtokem. Varianta s dvojnásobnou formou byla zavrhnuta z důvodu nedotečení materiálu. Aby došlo k naplnění dutin, tak by byla nutná příliš velká uzavírací síla vstřikovacího stroje. K realizaci jedno-násobné formy s filmovým vtokem nedošlo z důvodu, že vzhledem k zaformování by zůstala půlka formy nevyužita.

· **WARNING 98932 \*\* The clamp force required to fill/pack the part is greater than the maximum machine clamp force value in the clamping unit properties of the currently selected injection molding machine. The maximum machine clamp force will be maintained in the analysis.**

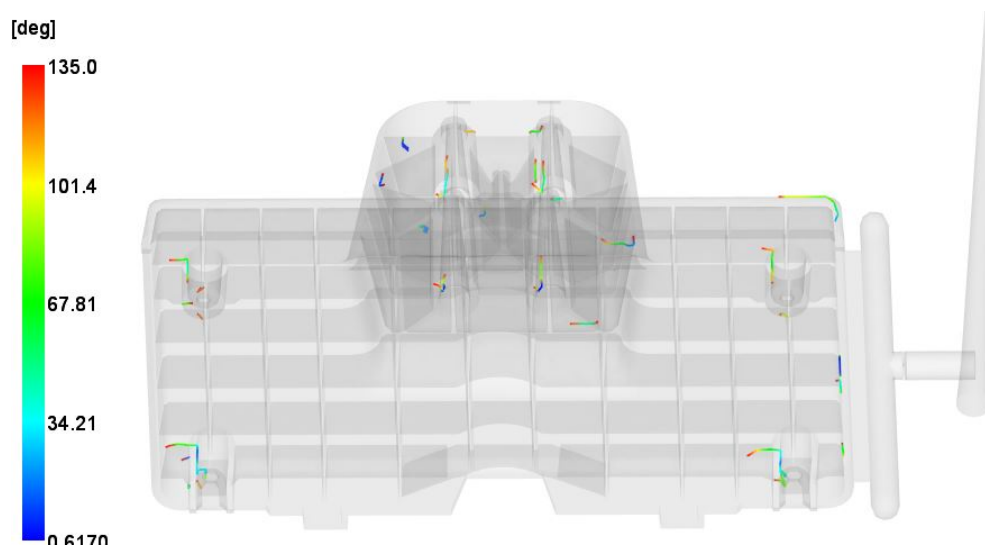
Obr. 11.2 Chybová hláška - překročení uzavírací síly stroje

### 11.1 Výsledky filmového vtoku jedno-násobné formy

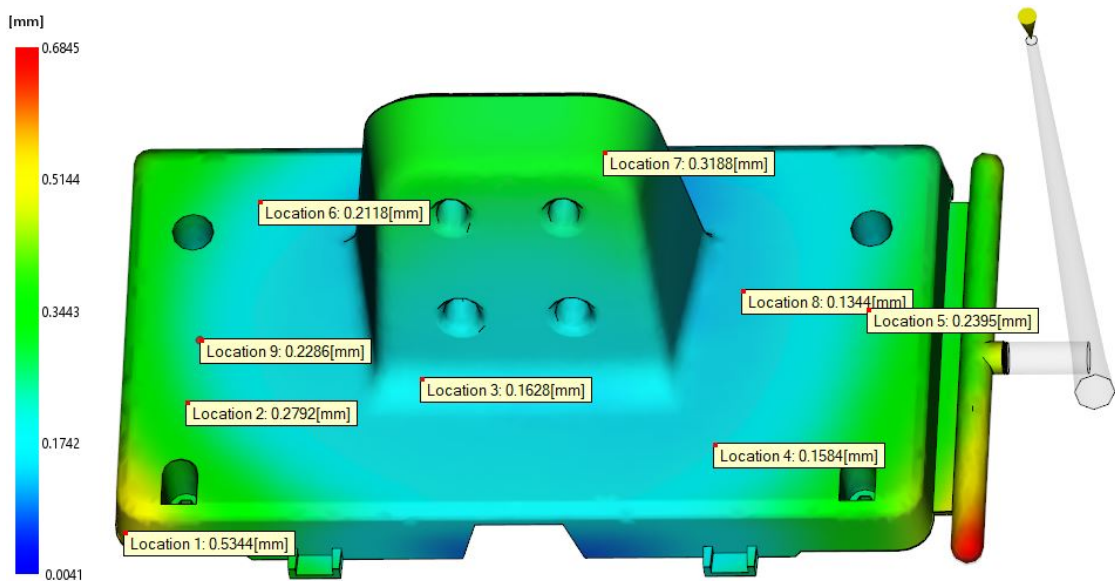
Na následujících obrázcích jsou graficky znázorněny výsledky pro čas plnění, studené spoje a celkové deformace pro testovanou variantu jednonásobné formy s filmovým vtokem.



Obr. 11.3 Fill time (čas plnění)



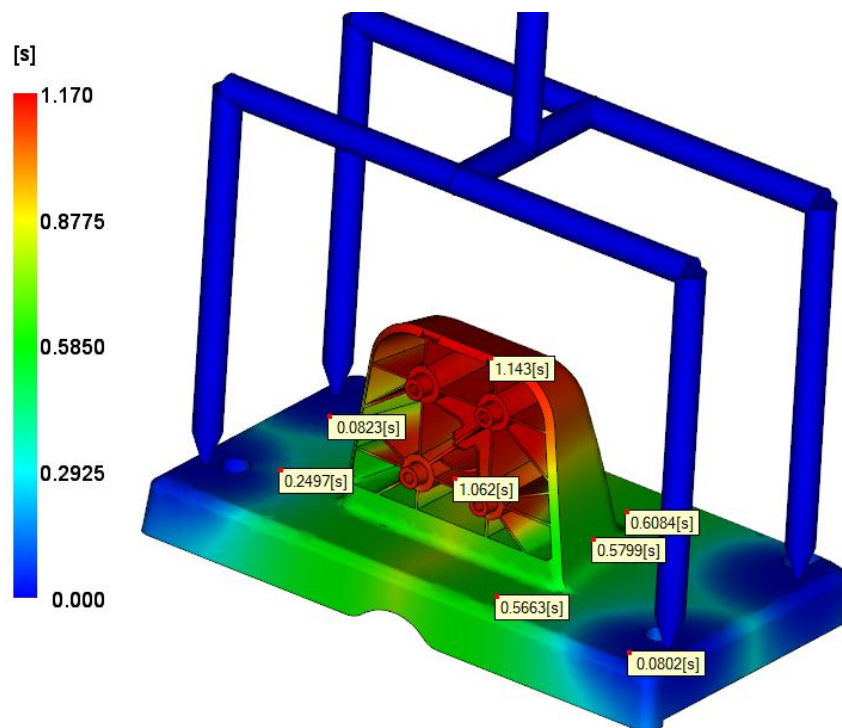
Obr. 11.4 Weld lines (Studené spoje)



Obr. 11.5 Deflection, all defects: Deflection (Deformace od všech vlivů)

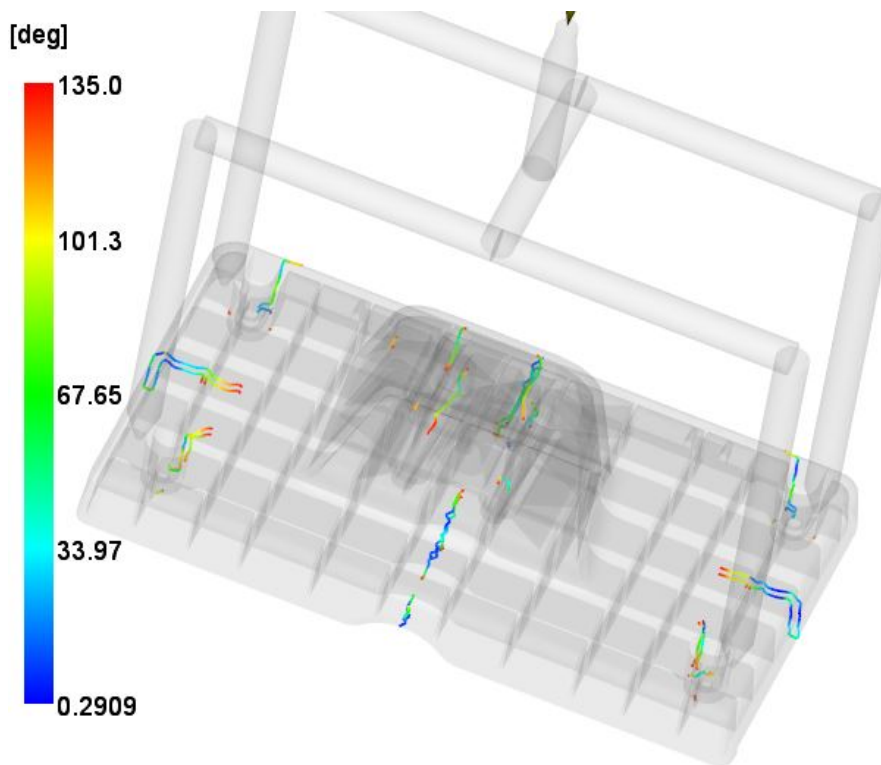
## 11.2 Výsledky horkého vtoku jedno-násobné formy

Na následujících obrázcích jsou graficky znázorněny výsledky pro čas plnění, studené spoje a celkové deformace pro testovanou variantu jednonásobné formy s horkým vtokem.

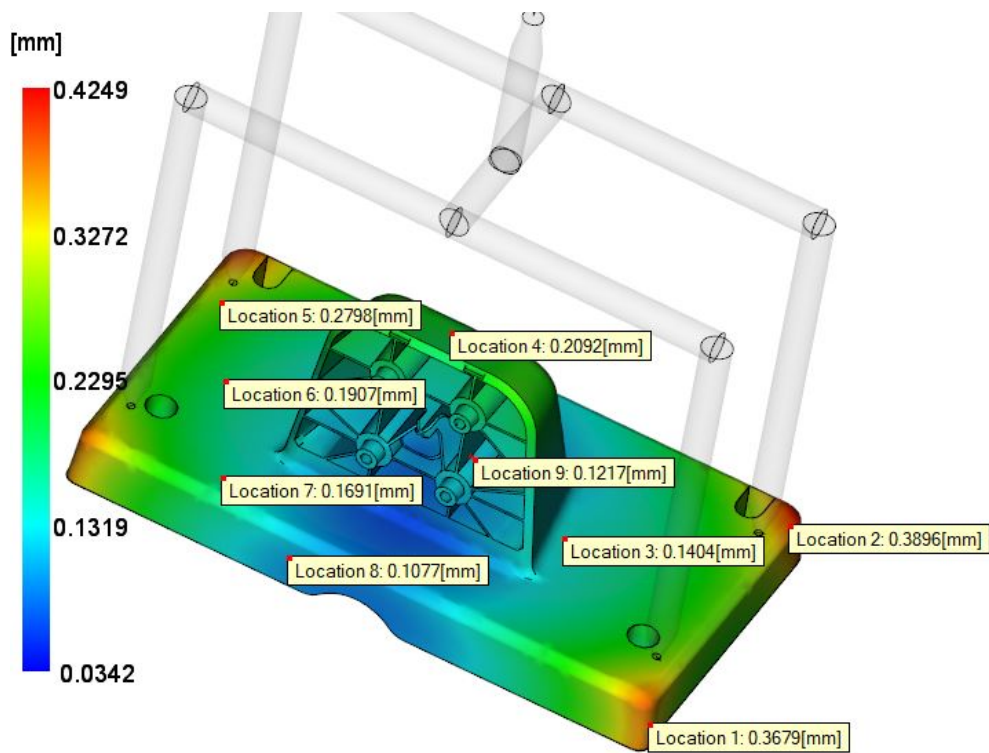


Obr. 11.6 Fill time (čas plnění)





Obr. 11.7 Weld lines (Studené spoje)



Obr. 11.8 Deflection, all defects: Deflection (Deformace od všech vlivů)



### 11.3 Shrnutí výsledků

V následující tabulce jsou shrnuty výsledky jednotlivých variant, které byly zkoumány. Mezi porovnávané výsledky se řadí čas plnění, studené spoje a celkové deformace. Z Tab 11.1 lze vidět, že varianta s horkým vtokem dosahuje lepších výsledků. Nevýhoda varianty s horkým vtokem je vyšší počet studených spojů což je způsobeno faktem, že vstříkovaná součást je při této variantě plněná ze čtyř míst. Nicméně na základě zaformování bylo rozhodnuto realizovat variantu s horkým vtokem. Tato varianta má rychlejší čas plnění a deformace na dílci dosahují menších hodnot.

Tab. 11.1 Shrnutí výsledků jednotlivých variant

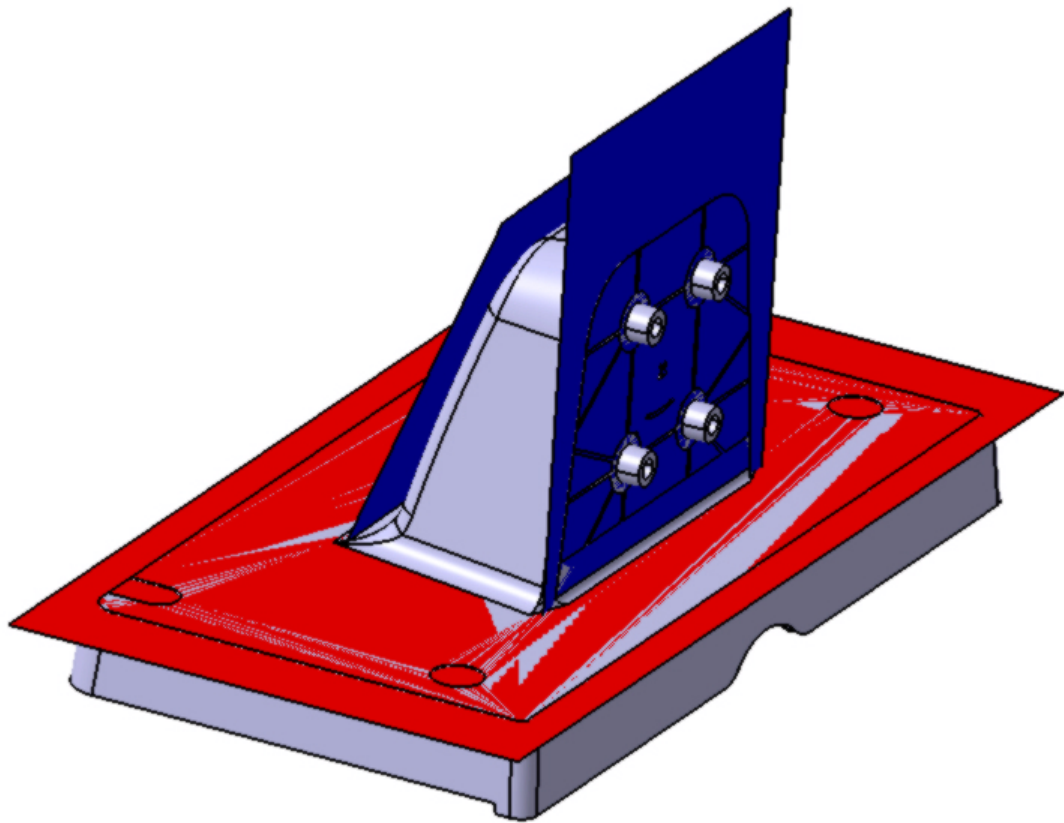
Výsledek	Filmový vtok	Horký vtok
Čas plnění	1,62 s	1,17 s
Studené spoje	nízký počet	vysoký počet
Celková deformace	0,51 mm	0,42 mm

## 12 KONSTRUKCE FORMY

Pro konstrukci formy je vhodné co nejvíce využívat normalizovaných součástí, což ve výsledku vede ke snížení nákladů na výrobu formy a k jednoduššímu a rychlejšímu návrhu její celkové koncepce. Součástky pro formu byly voleny z katalogu firmy Meusbarger. Forma byla řešena jako jedno-násobná s horkým vtokem.

### 12.1 Zaformování dílu

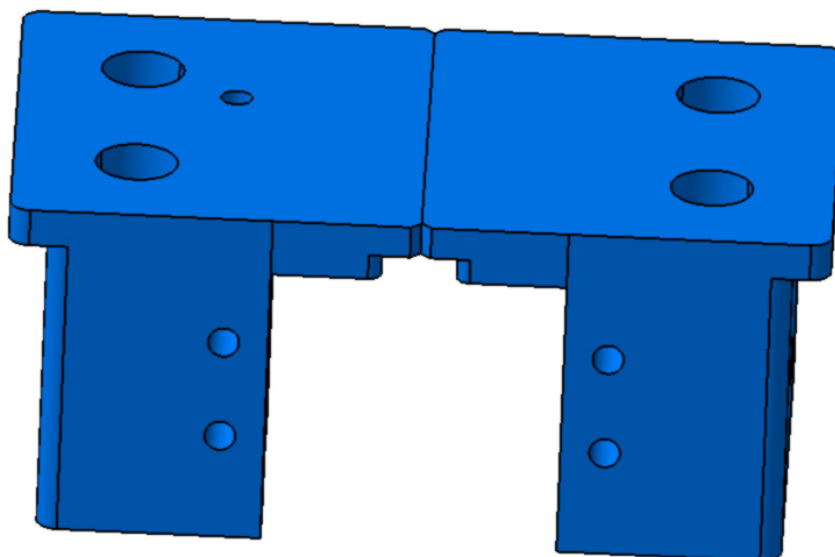
Ke správné funkci vstřikovací formy je potřeba správně zvolit dělicí roviny. Správné zvolení těchto rovin umožní bezproblémové odformování dílu a jeho následné vyhození. Na Obr. 12.1 lze vidět zvolené dělicí roviny. Hlavní dělicí rovina je označena červenou barvou a je kolmá na směr otevírání formy. Vedlejší dělicí roviny jsou znázorněny modrou barvou.



Obr. 12.1 Zaformování dílu - dělicí roviny

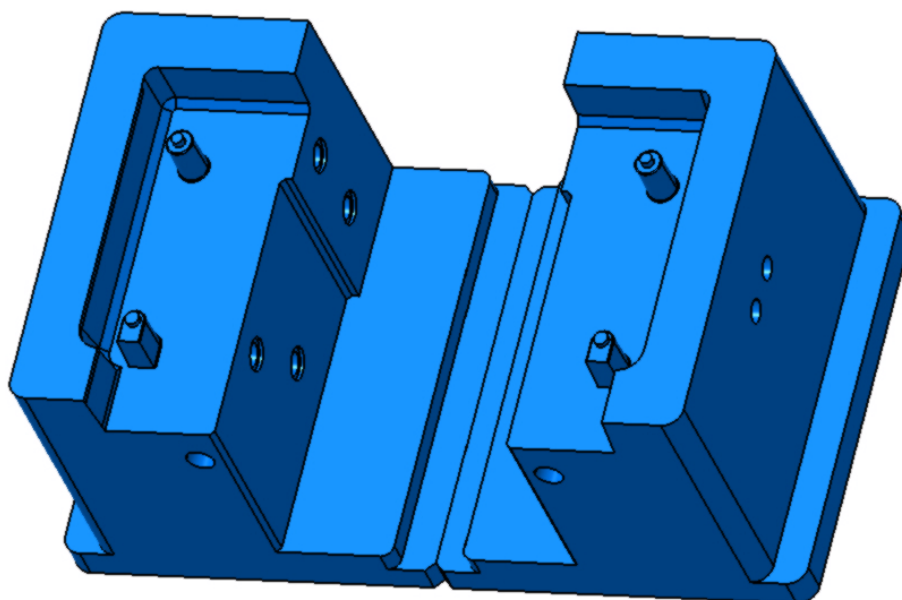
### 12.2 Tvarové části

Tvarová dutina je negativem vyráběného dílu. Je tvořena tvárnici, umístěnou v nepohyblivé části formy, tvárníkem v pohyblivé části a bočními tvarovými jádry, která jsou připojena na pohyblivou část formy. Tvarová dutina musí být zvětšena o hodnotu smrštění. Na Obr. 12.1 a 12.2 je znázorněna tvárnice.



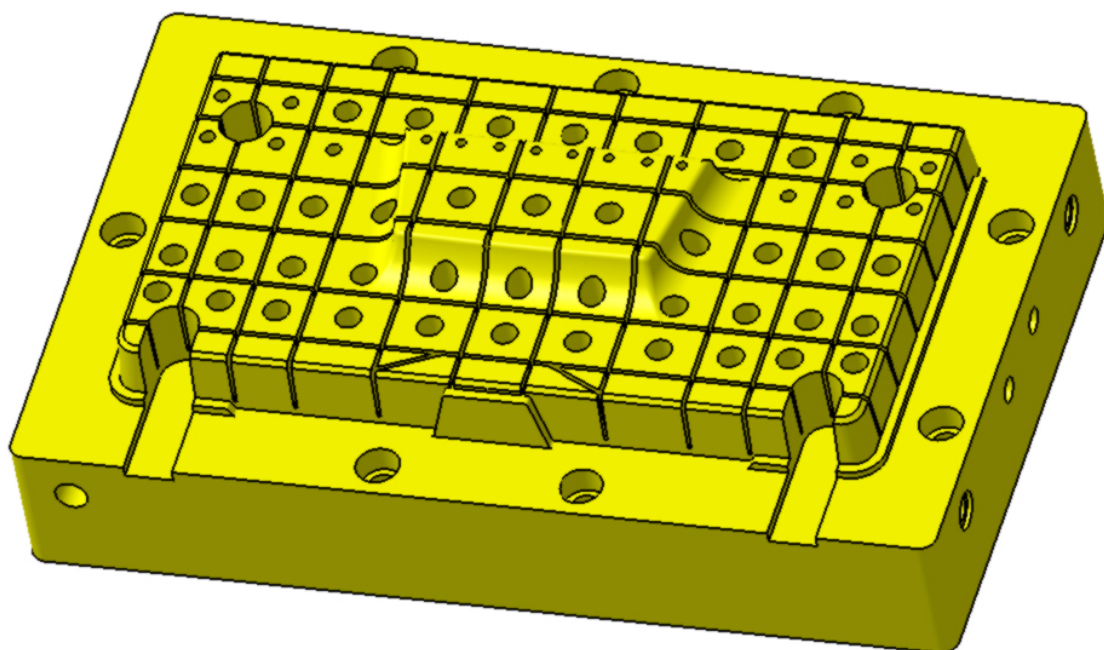
Obr. 12.2 Tvárnice - pohled 1

Tvárnice se skládá ze dvou jednotlivých kusů. Původně byla tvárnice koncipována jako jeden dílec, ale vzhledem k vyrobiteľnosti temperace konvenčním způsobem, byla rozdělena na pravou a levou část. Dále si lze všimnout, že tvárnice obsahuje otvory pro trysky vtokového systému a vrtané kanálky temperační kanálky.

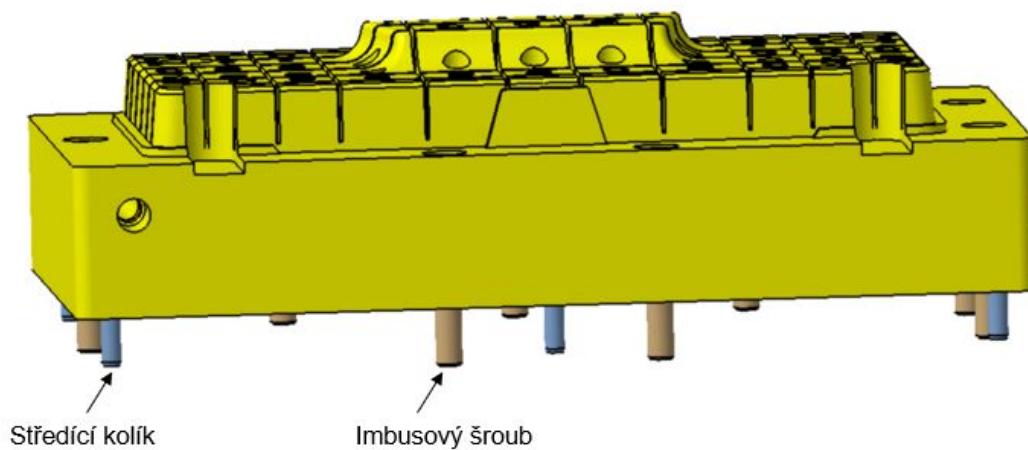


Obr. 12.3 Tvárnice - pohled 2

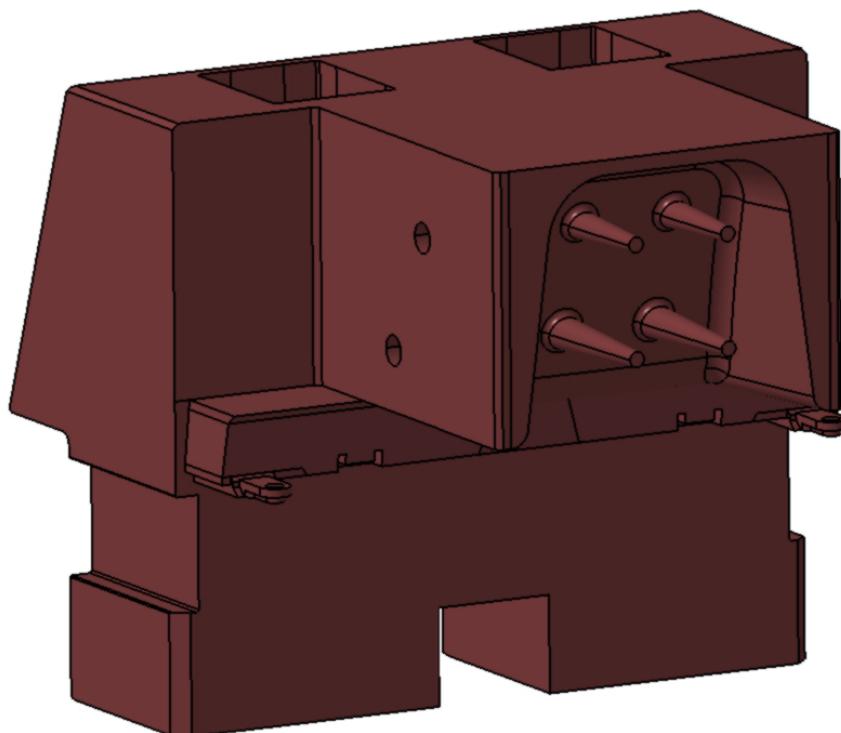
Dalšími tvarovými částmi jsou tvárník a dvě boční tvarová jádra. Tvárník obsahuje také temperační kanálky. Dalšími otvory jsou díry pro vyhazovače. Tvárník je připevněn ke kotevní desce levé strany pomocí imbusových šroubů. Správná poloha je zajištěna válcovými kolíky.



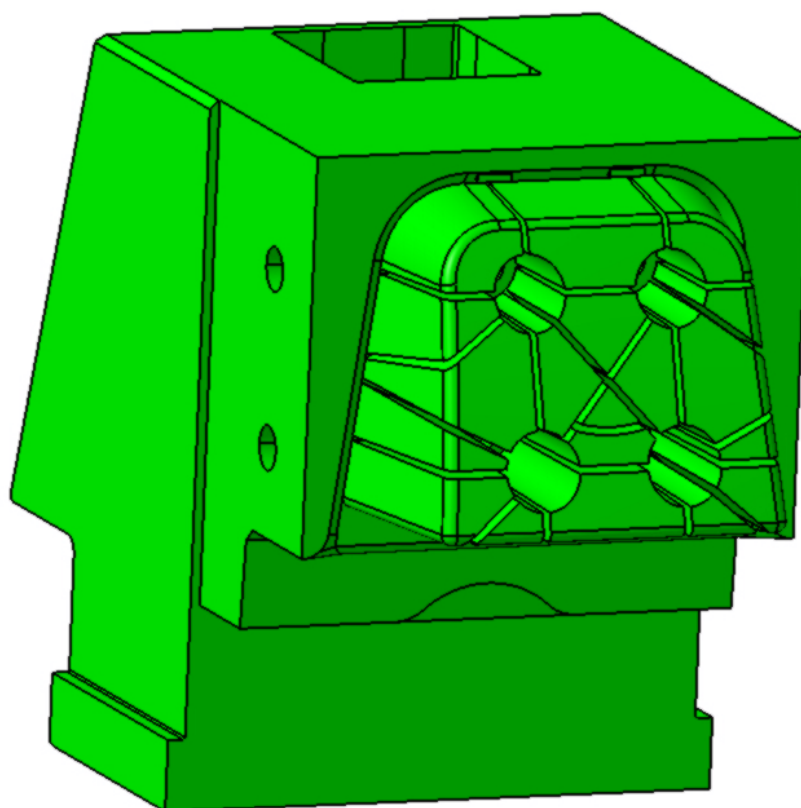
Obr. 12.4 Tvárník



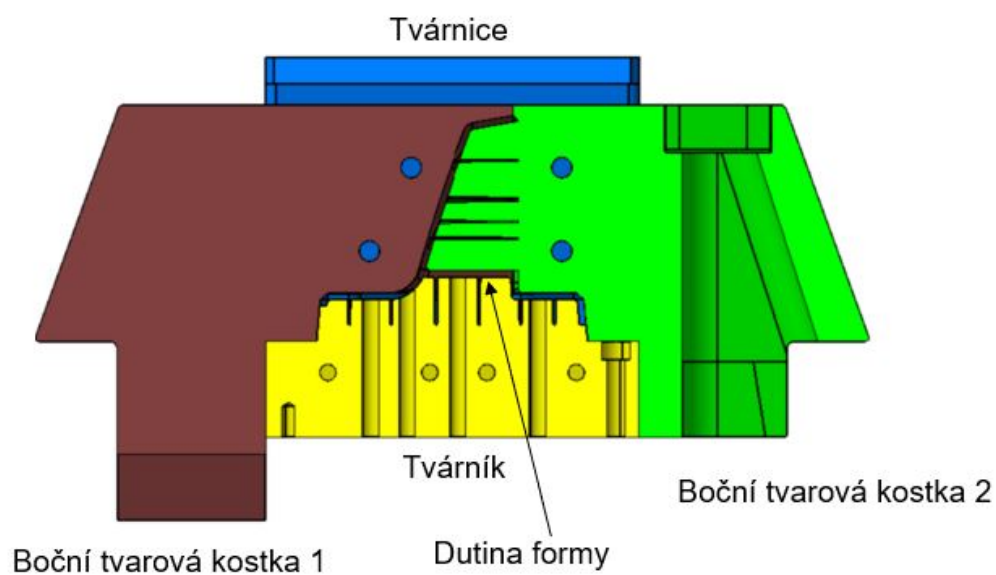
Obr. 12.5 Tvárník - šrouby a středící kolíky



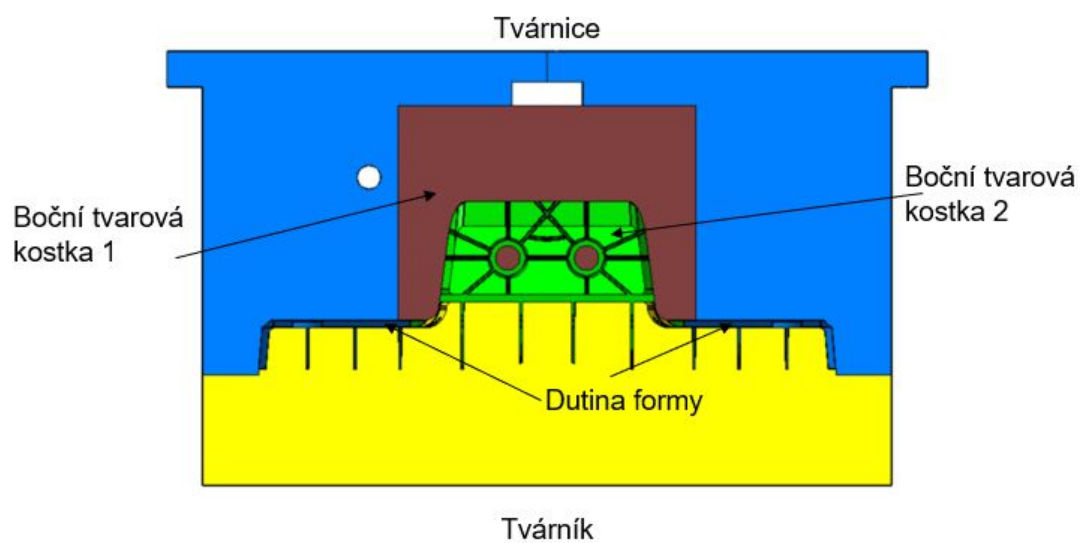
Obr. 12.6 Boční tvarová kostka 1



Obr. 12.7 Boční tvarová kostka 2



Obr. 12.8 Sestava tvarových částí - řez 1



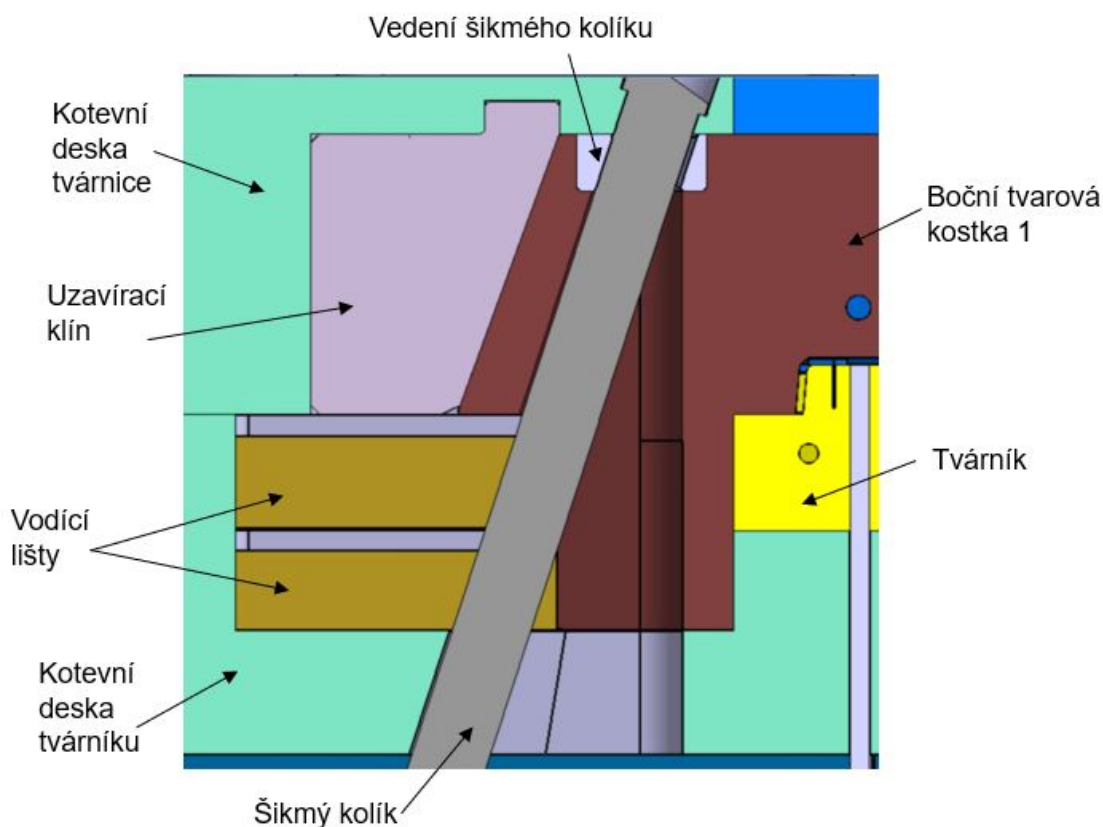
Obr. 12.9 Sestava tvarových částí - řez 2

### 12.3 Boční odformování

Odformování bočních tvarů je zajištěno pomocí posuvných čelistí. Ve formě se nachází celkem dvě posuvné čelisti. Tyto čelisti jsou si principiálně podobné. Posuvné čelisti jsou vloženy do vyfrézovaných a vyvrtaných míst v deskách formy a jejich jednotlivé části jsou k deskám formy připevněny pomocí šroubů.

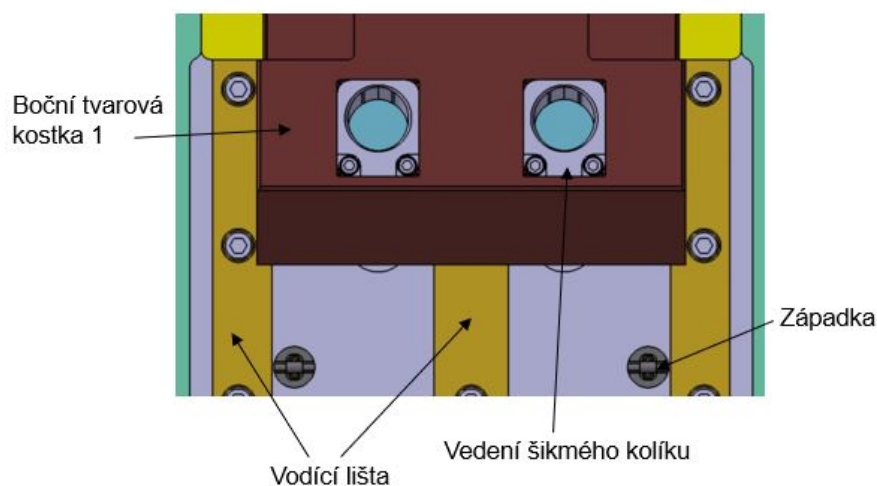
#### 12.3.1 Posuvná čelist 1

Čelist při otevírání formy začne vyjíždět po šikmém kolíku, a tím dochází k oddělení boční tvarové kostky od dutiny formy. Schéma boční posuvné čelisti je znázorněno na Obr. 12.8, kolík má průměr 30 mm, délku 400 mm a sklon 18°.



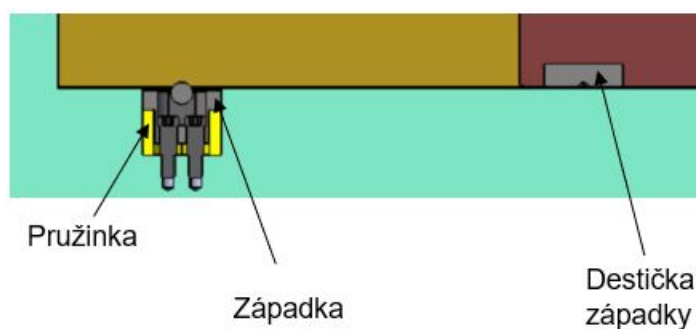
Obr. 12.10 Schéma boční posuvné čelisti 1 - řez

Uzavírací klín je ke kotevní desce tvárnice připevněn pomocí imbusových šroubů. Úkolem uzavíracího klínu je držet boční tvarovou kostku v přesné poloze, když je forma zavřená. Vedení čelisti zajišťují celkem 3 vodící lišty. Dvě jsou na krajích boční tvarové kostky a jedna uprostřed. Vzhledem k velikosti boční tvarové kostky 1 je odformování řešeno pomocí dvou kolíků, což zajišťuje dostatečnou pevnost a tuhost. Lišty jsou v přímém kontaktu s tvarovou kostkou. Jedná se o bezúdržbové lišty z katalogu firmy Meusburger se speciální úpravou povrchu.



Obr. 12.11 Schéma boční posuvné čelisti 1 - pohled z vrchu

Aby po odformování došlo k zajištění čelisti, tak byla použita sestava západky, pružinky a destičky západky. Součástky jsou znázorněny na Obr. 12.10.



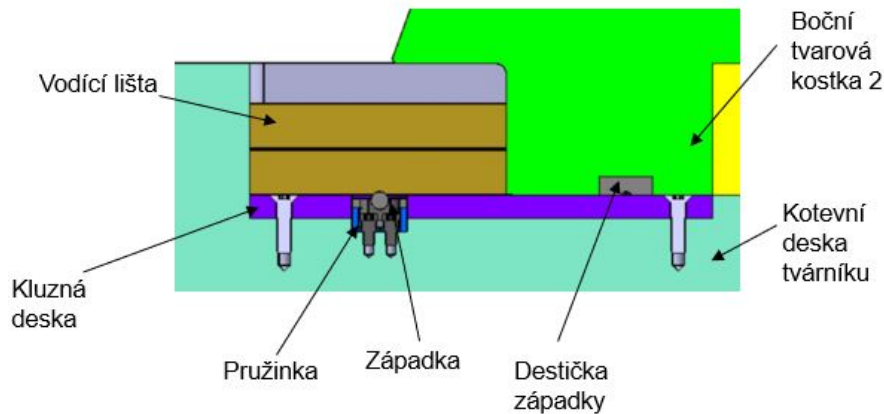
Obr. 12.12 Zamčení polohy čelisti

### 12.3.2 Posuvná čelist 2

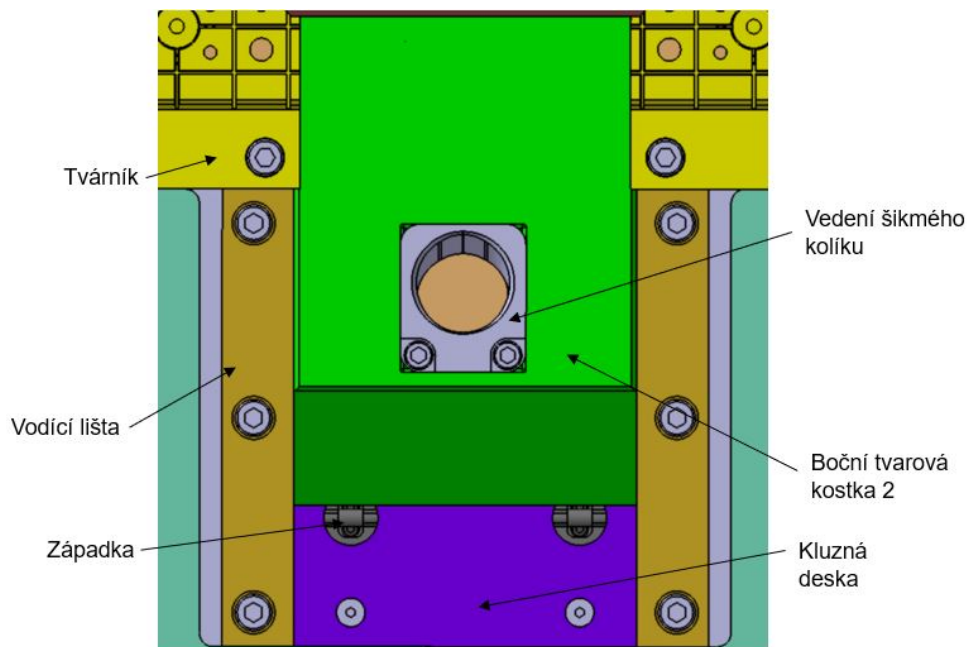
Druhá posuvná čelist funguje na stejném principu jako první posuvná čelist. Tato čelist má menší rozměry, a proto obsahuje pouze jeden kolík. Kolík má průměr 30 mm a délku 320 mm. Kratší kolík je použit z důvodu menší délky odformování.

Poloha čelisti v uzavřené formě je opět zajištěna uzavíracím klínem. K zajištění polohy čelisti po odformování byla použita sestava západky, pružinky a destičky západky. Součástky jsou znázorněny na Obr. 12.11. Vedení čelisti je zajištěno dvěma bezúdržbovými vodíci lištami. Samotná tvarová kostka se pohybuje po kluzné desce. Schéma je znázorněno na Obr. 12.12.





Obr. 12.13 Posuvná čelist 2 - schéma 1



Obr. 12.14 Posuvná čelist 2 - schéma 2

## 12.4 Vtokový systém

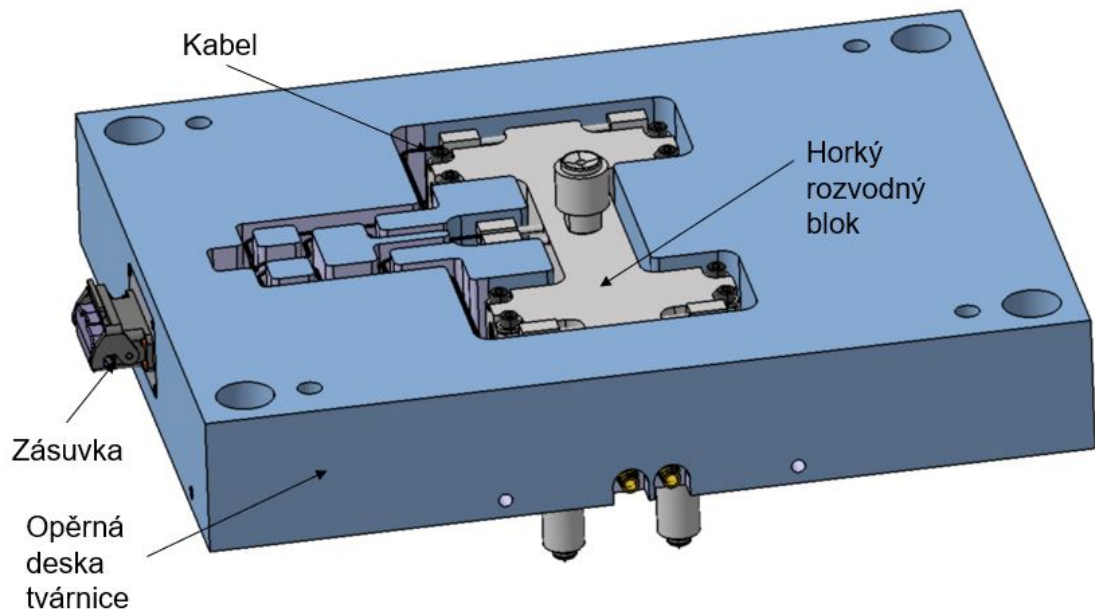
Na základě simulací byl zvolen horký vtokový systém. Formy s horkými vtoky jsou obvykle dražší na výrobu i údržbu, ale úspornější v tom, že snižují množství odpadu a zkracují dobu vstřikovacího cyklu. U dílce je předpokládána velkosériová výroba, a tudíž se investice do horkého vtokového systému vyplatí.

Horký vtokový systém je celý složen z normálí, které jsou dostupné z katalogu Meusburger. Systém obsahuje celkem čtyři trysky. Ke zvolení čtyř trysek došlo z důvodu omezení maximálního možného vstřikovaného množství materiálu na trysku, která pro PC činí 90 g.

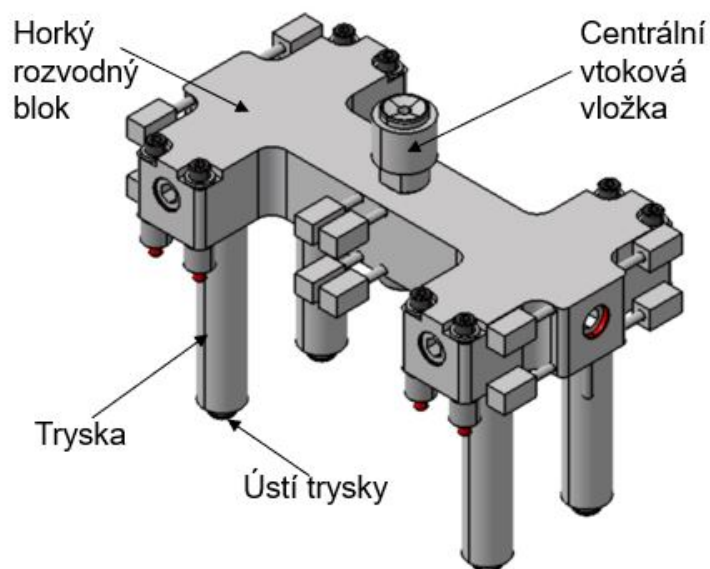
Blok je uložen ve vyfrézované kapse v opěrné desce tvárnice. V desce je připevněn šrouby. Centrální vtoková vložka pak prochází pravou upínací deskou, pravou izolační

deskou a pravým středícím kroužkem. Pro uložení horkých trysek a jejich vyústění do výrobku jsou v tvárnici vyfrézované otvory.

Rozvodný blok je poté připojen pomocí kabeláže k zásuvce, která je umístěna na boku formy. Po přijetí vstříkací jednotky dochází ke vstříknutí taveniny polymeru přes centrální vtokovou vložku do vyhřívaného rozvodného bloku. Tavenina je pak vedena systémem rozvodných kanálků k horkým tryskám.



Obr. 12.15 Horký vtokový systém - schéma 1



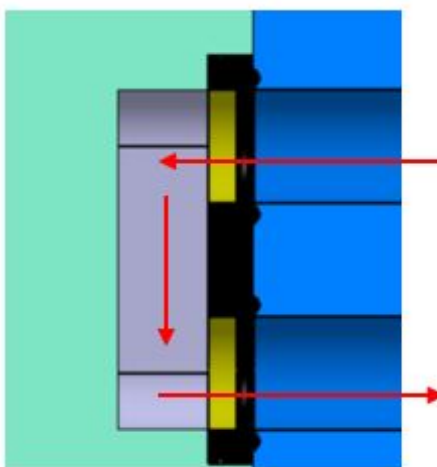
Obr. 12.16 Horký vtokový systém - schéma 2

## 12.5 Temperační systém

Temperační systém formy byl navržen s ohledem na vyrobiteľnosť, tvar výrobku a rozměry tvarových částí. Vhodně zvolený temperační systém zlepšuje výslednou kvalitu výstřiku a zkracuje potřebnou dobu na vyhození dílce z formy. Celá forma obsahuje tři samostatné temperační okruhy.

Pasivní temperace je tvořena izolačními deskami, které snižují přenos tepla mezi formou a vstřikovacím strojem. Temperace aktivní je tvořena kanálky o průměru 8 a 10 mm. Podrobné nastavení temperace je popsáno v kap. 14.3. Všechny temperační okruhy obsahují kuličkovou záslepku, která slouží jako překážka v úniku temperačního média.

Temperační okruhy prochází několika různými součástmi. Aby nedocházelo k úniku temperačního média při přechodu mezi těmito součástmi, tak jsou v místech přechodů vloženy O-kroužky. Dalšími použitými součástmi jsou překlenovací element a přípojka. Přípojka slouží k připojení temperační jednotky. Překlenovací element byl použit z důvodu nižšího množství vrtaných kanálků. Funkce překlenovacího elementu je znázorněna na Obr. 12.15.

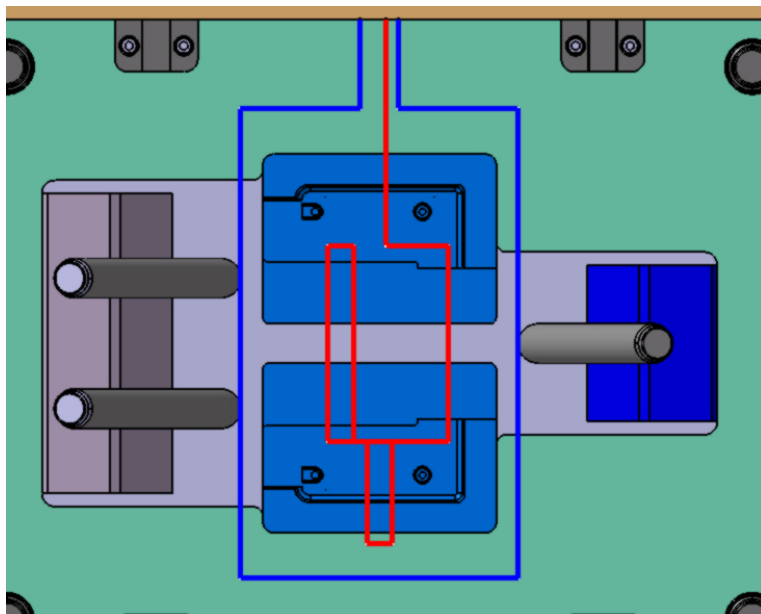


Obr. 12.17 Překlenovací element

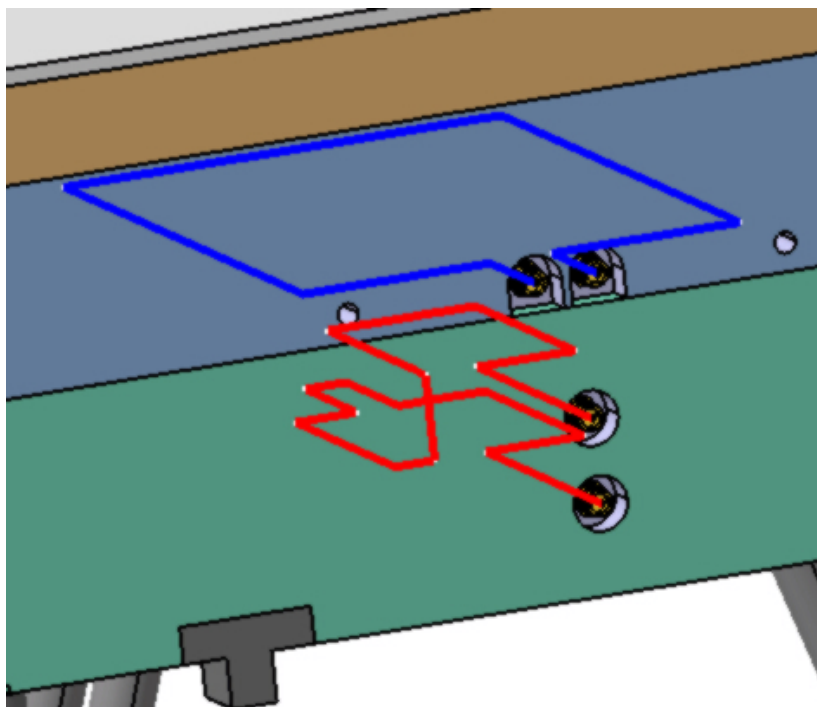


Obr. 12.18 Ostatní elementy temperačního systému

Pravá strana formy obsahuje temperační okruh horkého rozvodného vtoku a tvárnice. Na Obr. 12.17 a 12.18 jsou znázorněny jejich trajektorie. Červenou barvou je znázorněn temperační okruh tvárnice, modrou je označen okruh pro okruh horkého rozvodného vtoku. Okruh tvárnice je tvořen kanálky o průměru 10 mm. Temperační okruh tvárnice prochází i bočními tvarovými kostkami. Okruh horkého rozvodného vtoku je složen z kanálků o průměru 8 mm.

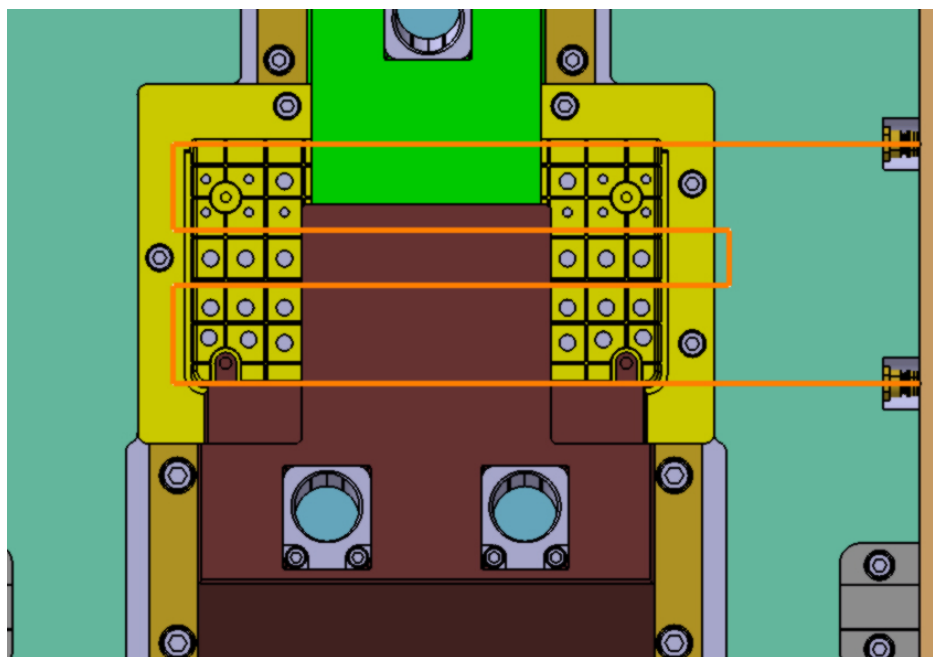


Obr. 12.19 Temperace pravá strana - pohled 1



Obr. 12.20 Temperace pravá strana - pohled 2

Trajektorie temperačního okruhu tvárníku je znázorněna na Obr. 12.19 oranžovou barvou. Tento okruh je tvořen kanálky o průměru 8 mm.



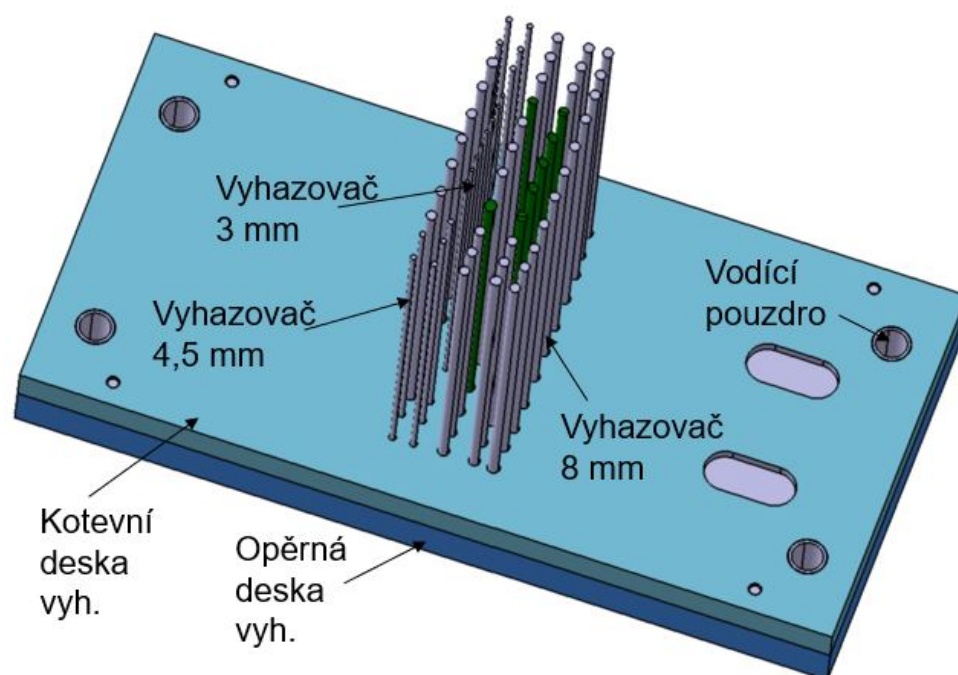
Obr. 12.21 Temperace levá strana

## 12.6 Vyhazovací systém

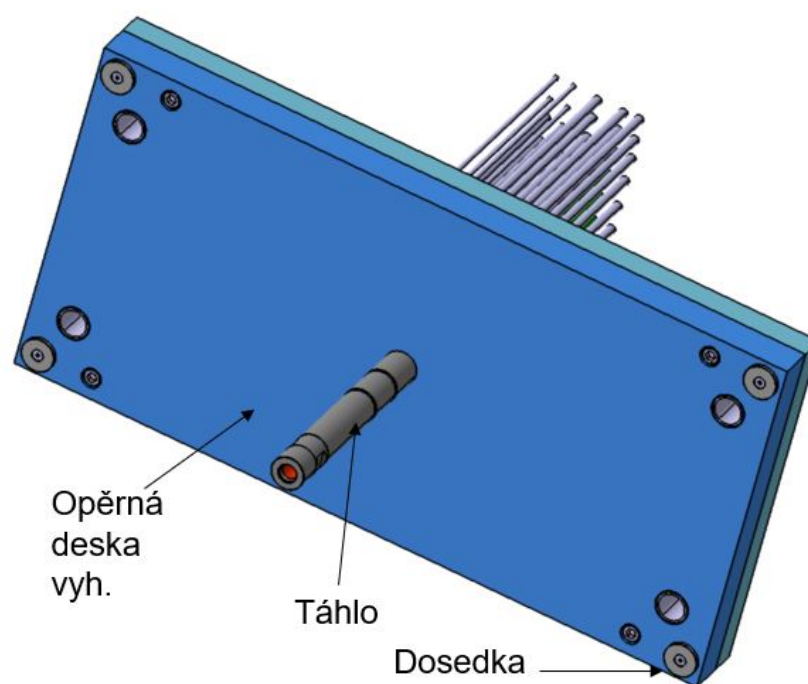
Úkolem vyhazovacího systému je zabezpečení rovnoměrného a efektivního vyhození výrobku z formy. Systém je umístěn na pohyblivé straně formy a jeho pohyb, který je rovnoběžný s pohybem otevírání a zavírání formy je ovládán vstřikovacím strojem přes táhlo vyhazovacího systému. Táhlo je připevněno závitovým čepem k opěrné desce vyhazovacího systému.

Rovnoměrné vyhození dílce je zajištěno 58 vyhazovači o průměru 8, 4,5 a 3 mm. Vyhazovače jsou upevněny v kotevní desce vyhazovacího systému a opírají se o opěrnou desku. Vyhazovače jsou rozloženy tak, aby byl výrobek rovnoměrně vyhozen z dutiny formy. Při tvorbě vyhazovacího systému byl brán zřetel, aby nedošlo ke kolizi s temperačním systémem.

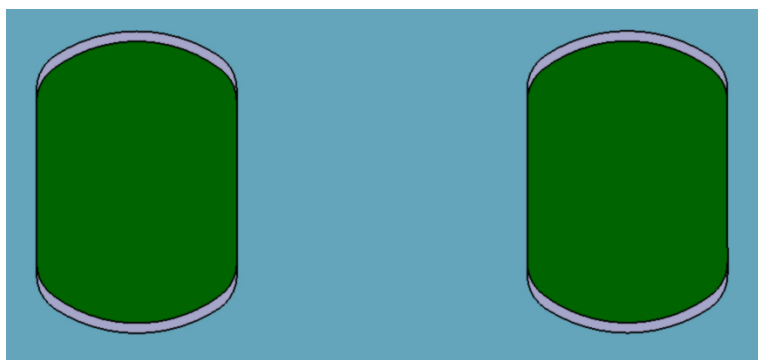
Na Obr. 12.20 je znázorněn vyhazovací systém. Některé vyhazovače bylo nutné zajistit proti pootočení, protože dopadají na tvarovou plochu. Tyto vyhazovače jsou označeny zelenou barvou. Další části systému jsou dosedky. Dosedky slouží k mírnění nárazu mezi opěrnou deskou vyhazovačů a levou upínací deskou formy. Přesný pohyb vyhazovacího systému je zabezpečen vodícími čepy, jenž se pohybují ve vodících pouzdrech.



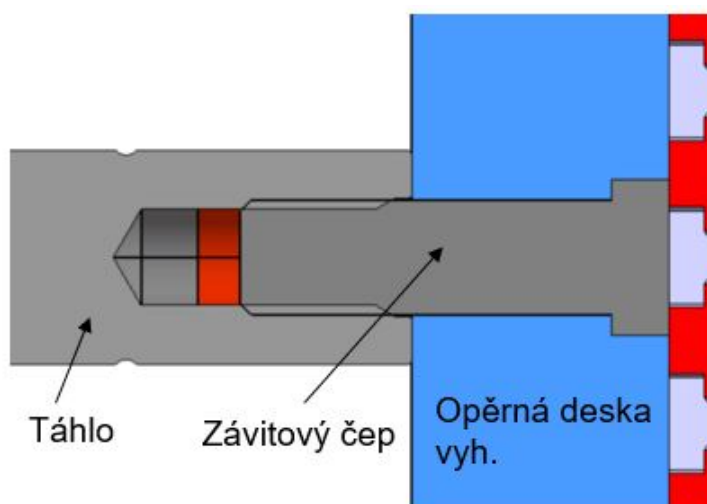
Obr. 12.22 Vyhazovací systém - pohled 1



Obr. 12.23 Vyhazovací systém - pohled 2



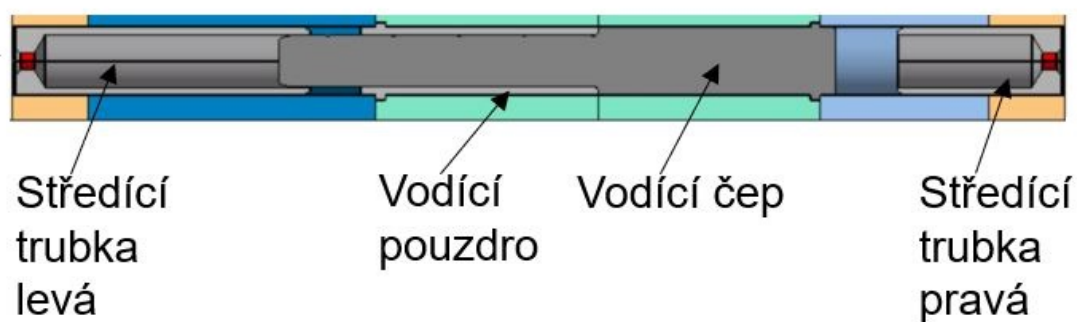
Obr. 12.24 Zajištění vyhazovačů proti pootočení



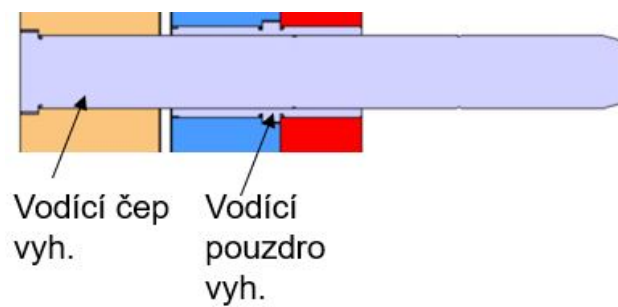
Obr. 12.25 Zobrazení závitového čepu

### 12.7 Vodící, středící a manipulační prvky

Vodícími prvky jsou vodící čepy a vodící pouzdra, které společně se středícími trubkami zajišťují vystředění pohyblivé a nepohyblivé části formy během jejího otevírání a zavírání. Všechny použité prvky jsou z katalogu firmy Meusburger.

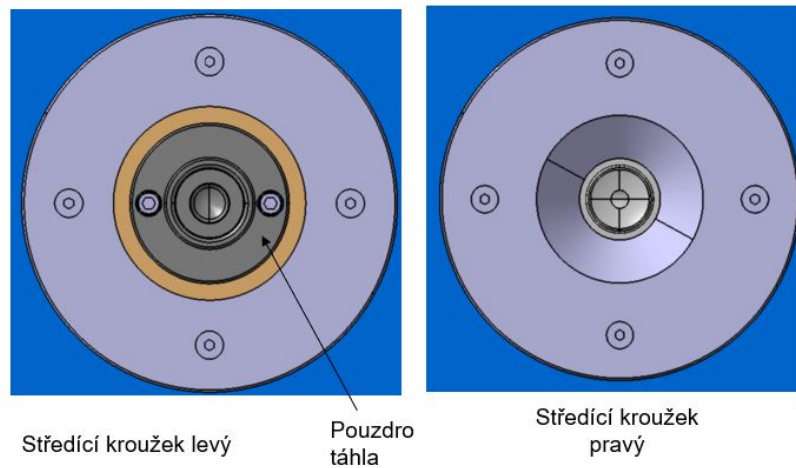


Obr. 12.26 Vodící prvky formy



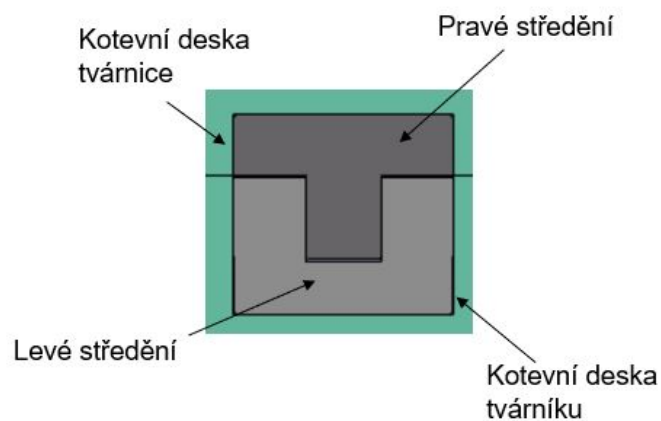
Obr. 12.27 Vodící prvky vyhazovacího systému

Středící kroužky slouží k ustavení formy ke vstřikovacímu stroji a k přesnému navedení trysky vstřikovacího stroje do vtokové vložky. Ke středění dochází pomocí vnějšího průměru středících kroužků. Pro pravou stranu formy je použit kroužek typu E1360, pro levou stranu E1365. Oba středící kroužky mají průměr 160 mm.



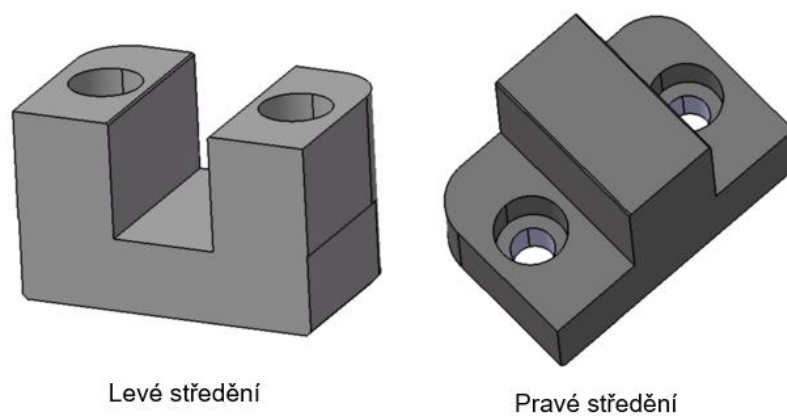
Obr. 12.28 Středící kroužky

Pro zlepšení vzájemné polohy pohyblivé a nepohyblivé strany formy je ve formě instalováno ploché koncové středění. Středění je znázorněno na Obr. 12.27. Forma obsahuje celkem čtyři středění.



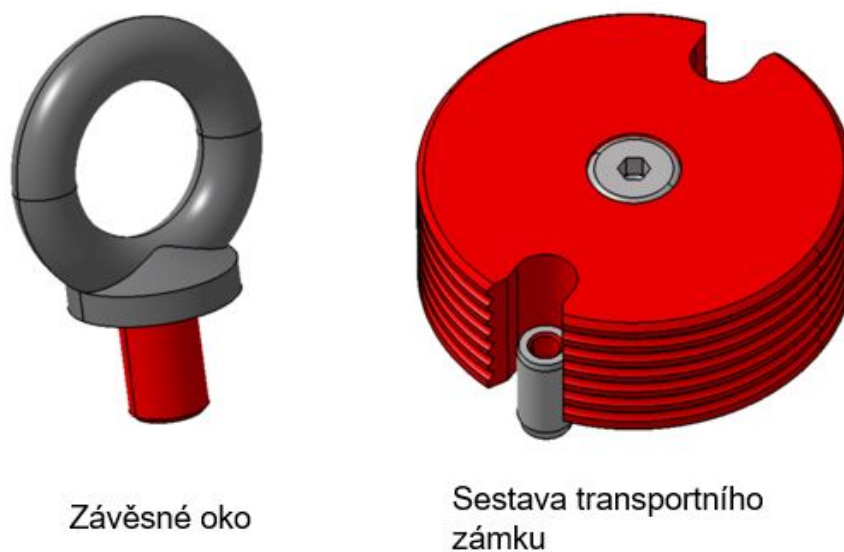
Obr. 12.29 Středění formy



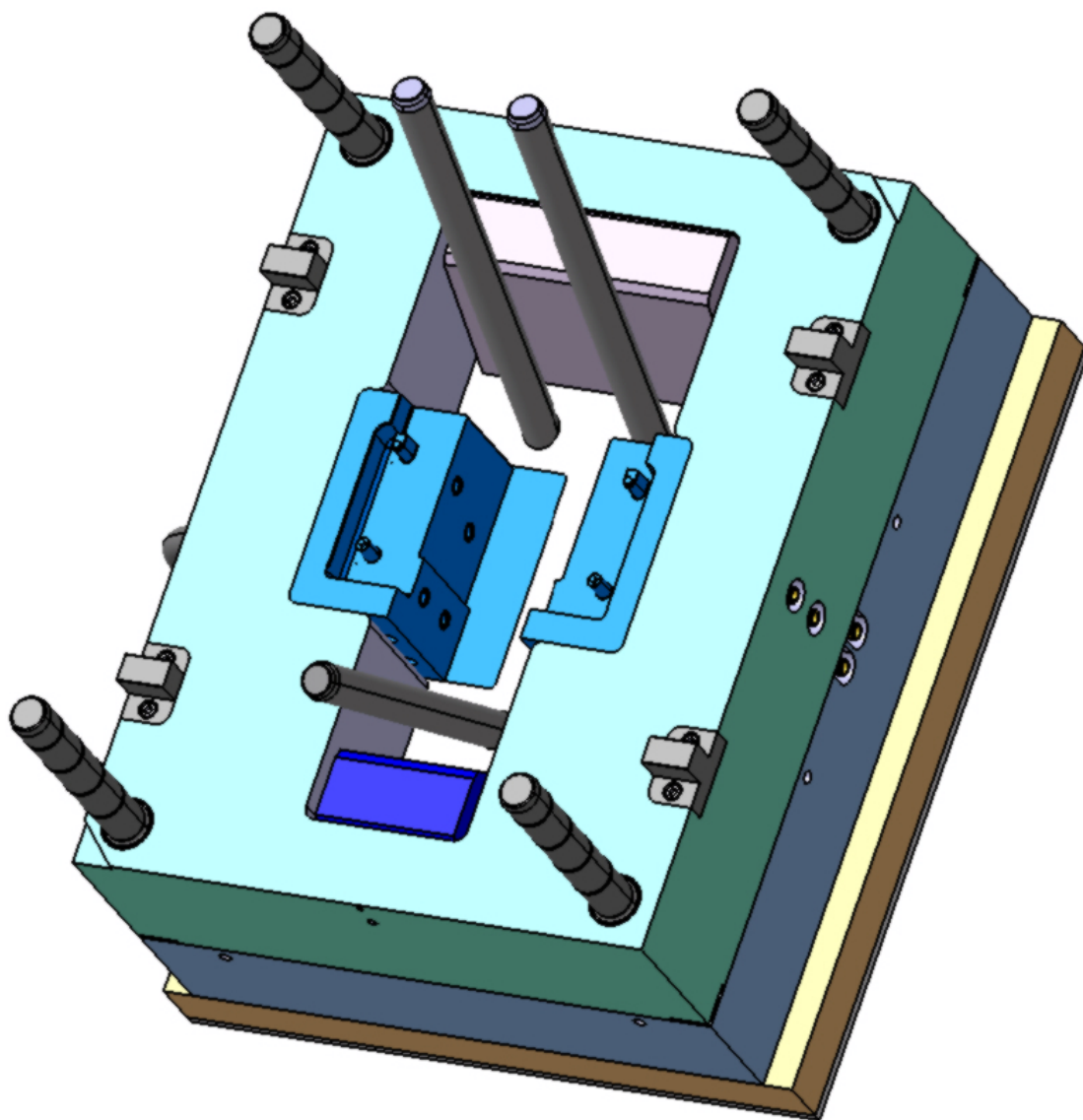


Obr. 12.30 Středění formy - jednotlivé části

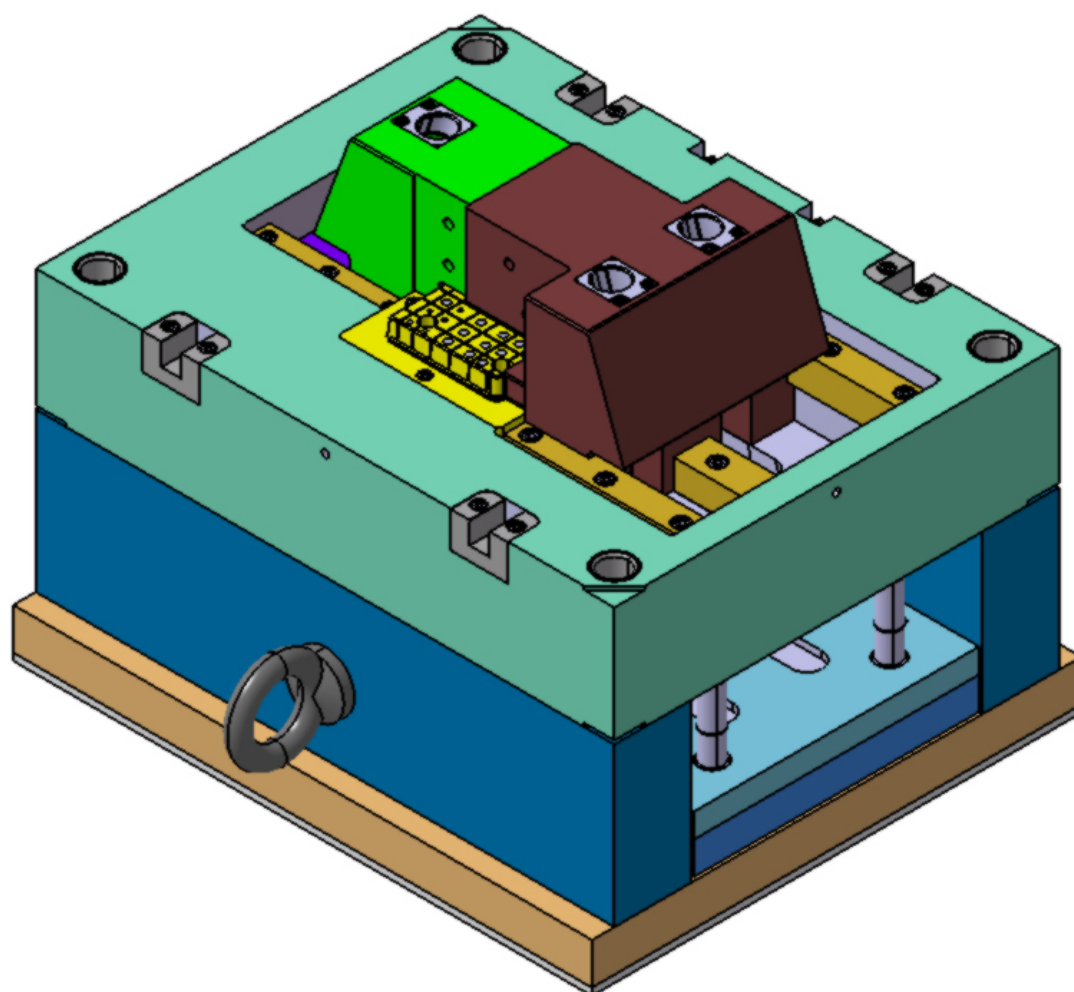
Jako manipulační prvky slouží závěsná oka. Na formě se nachází dvě závěsná oka. Aby při manipulaci s formou nedošlo k otevření formy, a tudíž k oddělení pevné a pohyblivé části, tak je forma opatřena transportními zámky. Zámky jsou na formě celkem tři.



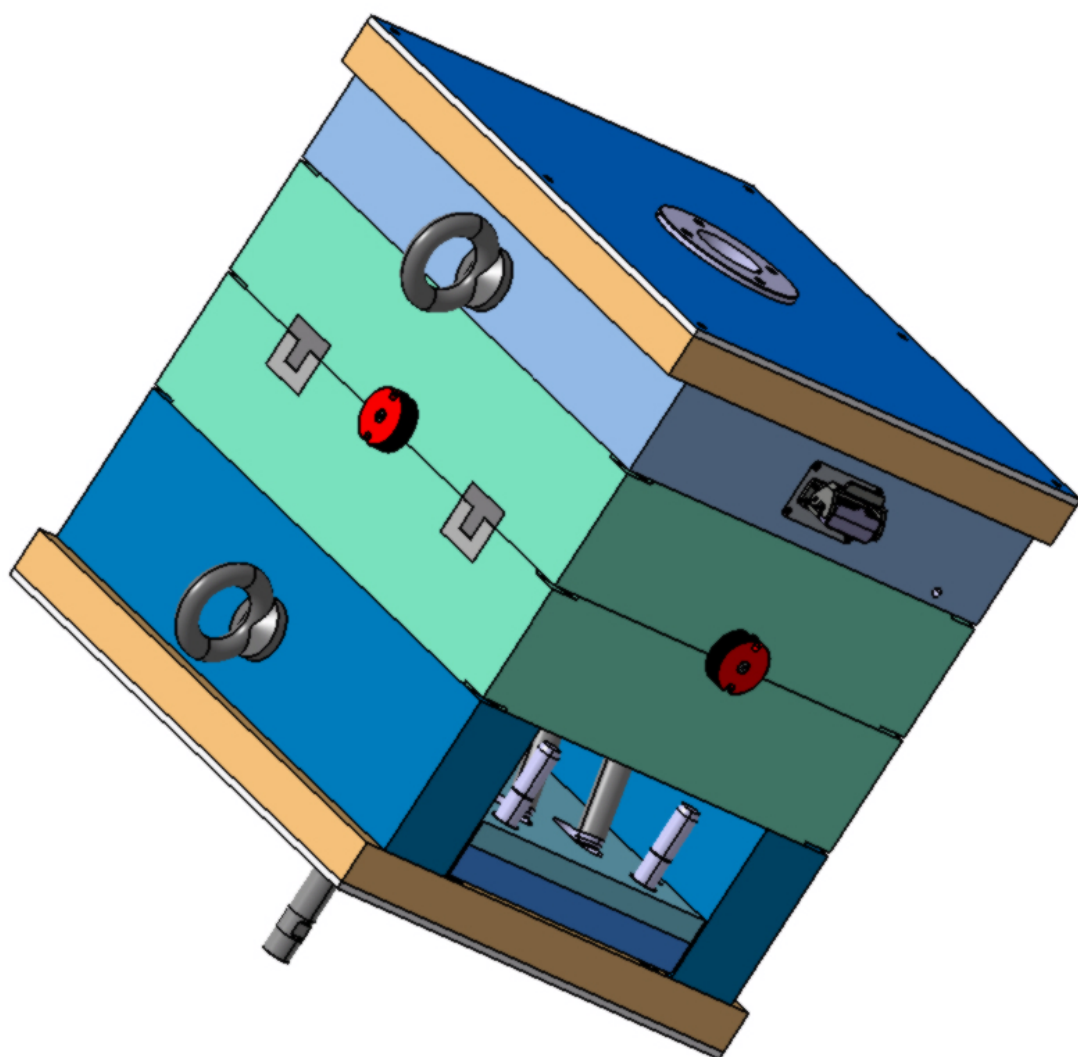
Obr. 12.31 Manipulační prvky formy



Obr. 12.32 Pevná strana formy



Obr. 12.33 Pohyblivá strana formy



Obr. 12.34 Forma

### 13 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Vstřikovací stroj byl volen s ohledem na několik parametrů. Mezi tyto parametry náleží:

- Rozměry formy 646 x 546 x 659,2 mm (délka x šířka x výška).
- Hmotnost vstřikované dávky materiálu: 1 x 336 g.
- Požadovaná uzavírací síla: 2120 kN

Těmto požadavkům vyhovuje vstřikovací stroj Arburg Allrounder Alldrive 720 A Clamp-Design-3200-800(50). V Tab 13.1 jsou uvedené některé parametry stroje. Další parametry lze najít v příloženém technickém listu, který je součástí práce.

Tab. 13.1 Vybrane parametry vstřikovacího stroje

Vlastnost	Hodnota
Maximální uzavírací síla	3200 kN
Minimální výška formy	300 mm
Maximální vyhazovací síla	85 kN
Objem dávky na jeden cyklus	392 $cm^3$
Maximální vstřikovací tlak	200 MPa



Obr. 13.1 Zvolený vstřikovací stroj [37]

## 14 NASTAVENÍ ANALÝZY MOLDFLOW

K analýze procesu vstřikování byl použit software Autodesk MoldFlow Synergy 2023. Nejprve došlo k vložení dílu ve formátu .step a tento díl byl následně vysítován.

### 14.1 Tvorba sítě

Pro potřeby analýzy byla vytvořena síť typu Dual Domain. Tato síť je tvořena rovnostrannými trojúhelníky o délce strany 3,50 mm.



Obr. 14.1 Vysítovaný výrobek

Area: (Mold blocks and cooling channels are not included)				Orientation details:		
Surface Area:		2435.76 cm <sup>2</sup>		Elements not oriented	0	
Volume by element types:				Intersection details:		
Triangle:		285.011 cm <sup>3</sup>		Element intersections	0	
Aspect Ratio:				Fully overlapping elements		0
Maximum	Average	Minimum		Match percentage:		
17.68	1.84	1.16		Match percentage	94.4%	
Edge details:				Reciprocal percentage		94.7%
Free edges		0				
Manifold edges		87027				
Non-manifold edges		0				

Obr. 14.2 Kvalita sítě

Na Obr. 14.2 je znázorněna kvalita sítě. Lze vidět, že síť splňuje všechny náležité parametry. Hodnota Aspect Ratio je menší než 20. Match a Reciprocal percentage jsou také na vysokých hodnotách.

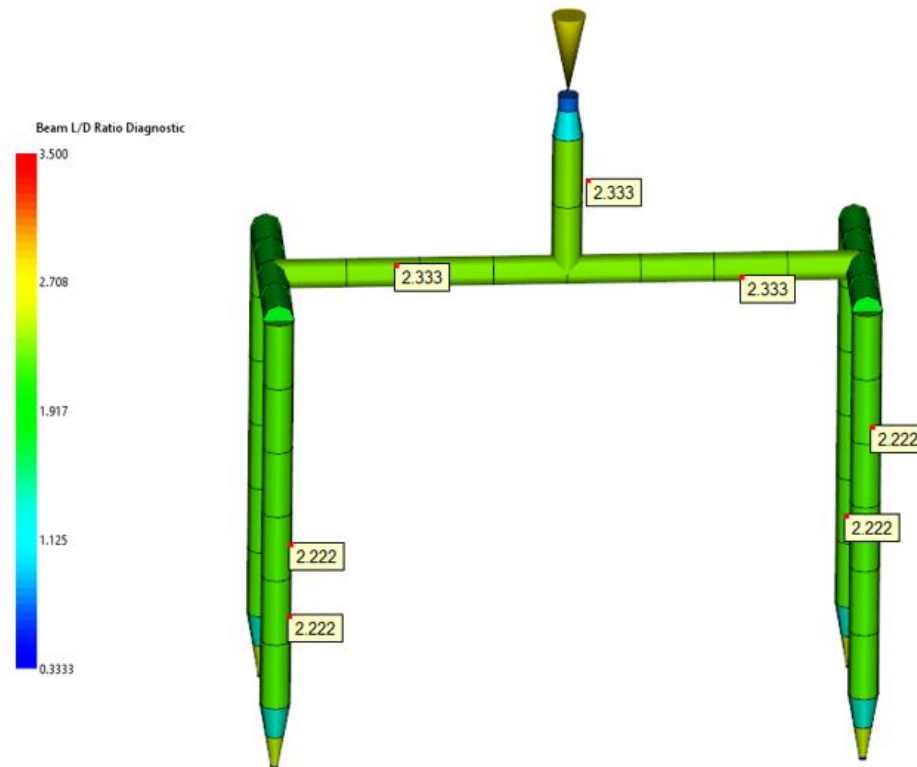


## 14.2 Vtokový systém

Vtokový systém je vytvořený tak, aby byl totožný se systémem, který se vyskytuje ve formě. K částečnému návržení došlo v prostředí Catia V5R19, kde byl tento návrh uložen ve formátu .iges. Tento soubor byl následně vložen do AutoDesk MoldFlow Synergy 2023, kde došlo k jeho vysítování. Vtokový systém je tvořen kanálky o průměru 12 mm. Vtokový systém po vysítování byl podroben kontrole pomocí funkce Beam L/D ratio. Cílem bylo dosáhnout intervalu hodnot, které se co nejvíce blíží hodnotě 2,5.



Obr. 14.3 Vtokový systém pro analýzu

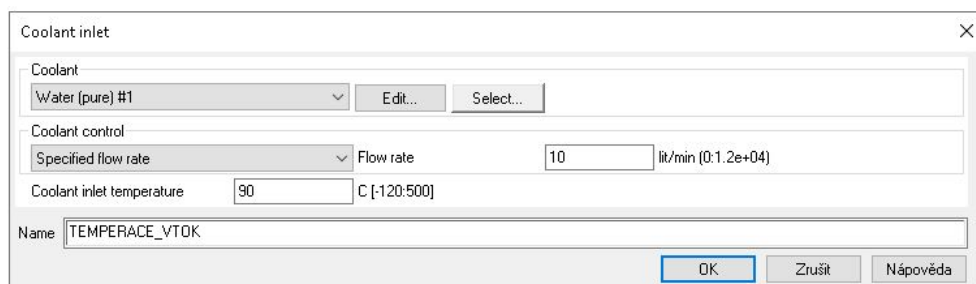


Obr. 14.4 Beam L/D ratio vtokového systému

### 14.3 Temperační systém

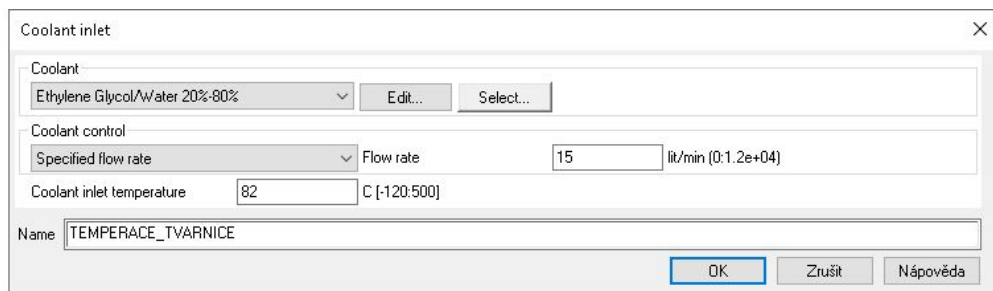
Temperační systém byl rozdělen do tří částí. Temperační systém byl navržen obdobným způsobem jako systém vtokový. V Catia V5R19 byly vytvořeny křivky, které byly uloženy ve formátu .iges a poté nahrány do AutoDesk MoldFlow Synergy 2023, kde došlo k jejich vysíťování.

Po vysíťování byla taktéž kontrolována hodnota Beam L/D ratio. Nastavení jednotlivých okruhů jsou znázorněna na Obr. 14.5 až 14.7.

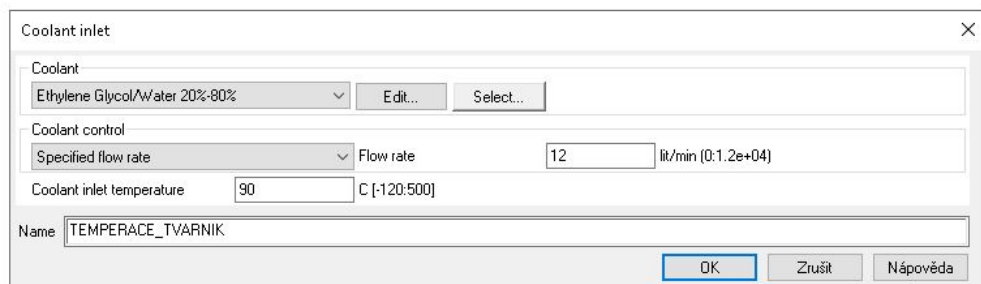


Obr. 14.5 Nastavení tepmerace vtoku

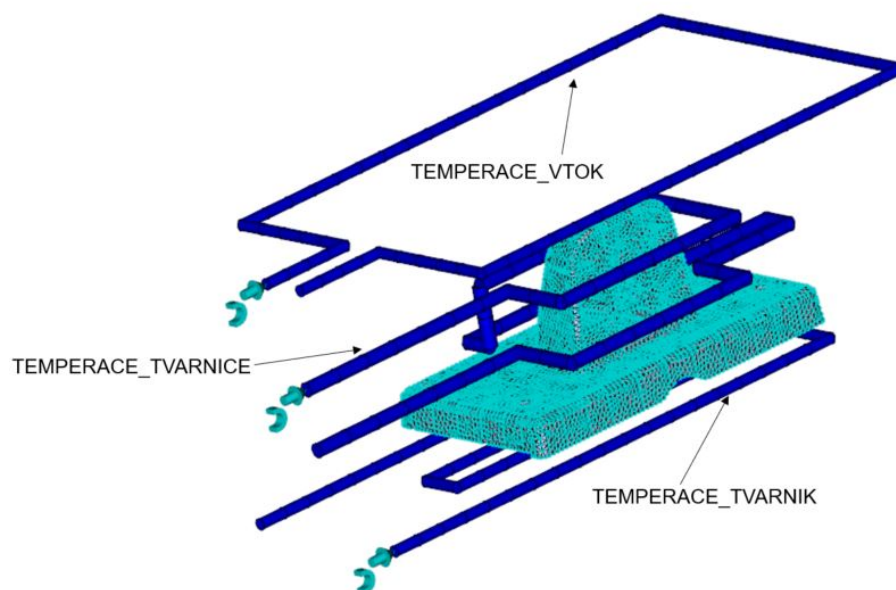




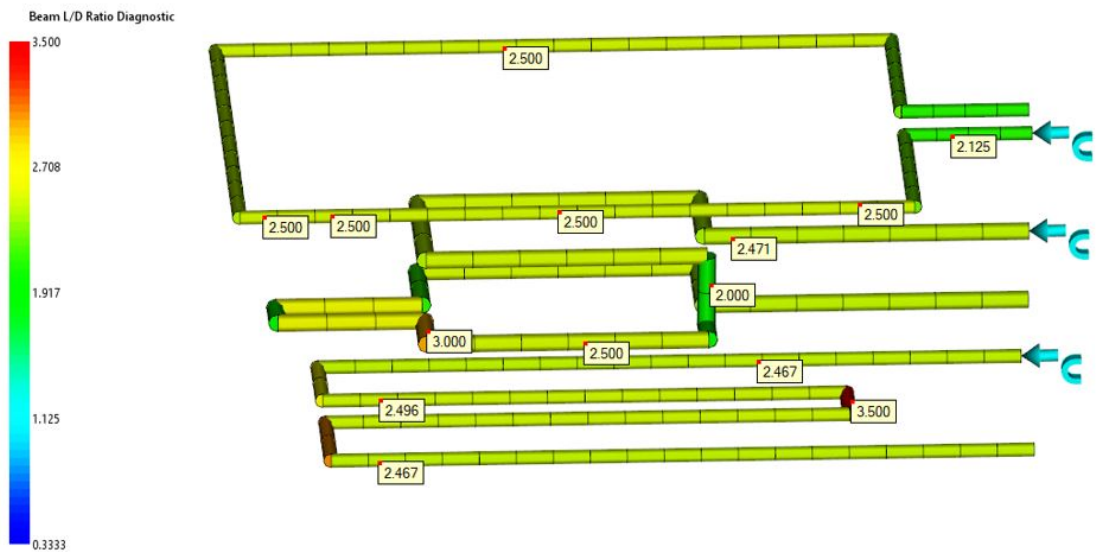
Obr. 14.6 Nastavení teploty tvárnice



Obr. 14.7 Nastavení teploty tvárníku



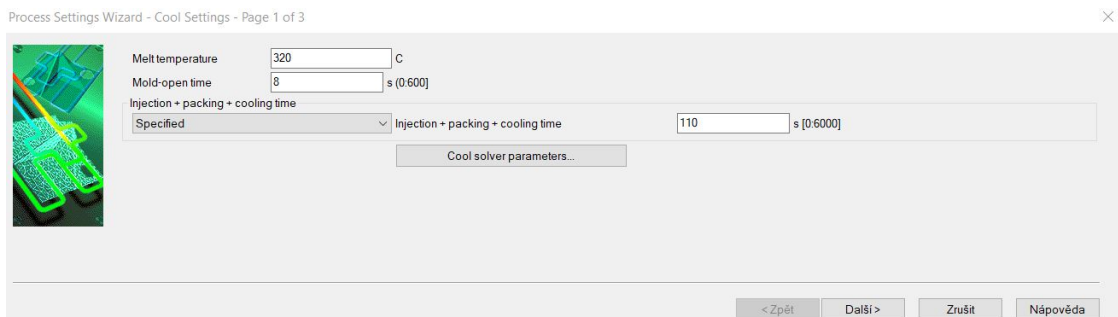
Obr. 14.8 Vysíťovaná teplota



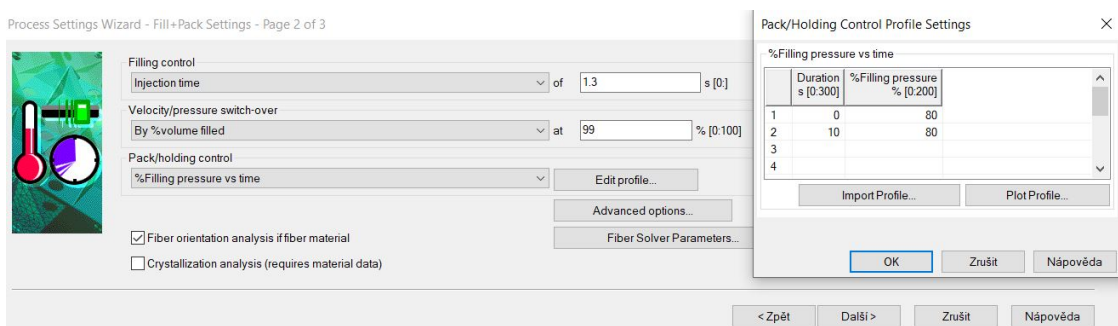
Obr. 14.9 Beam L/D ratio temperačního systému

### 14.4 Procesní podmínky

Pro kompletní analýzu Fill+Pack+Cool+Warp bylo nutné nastavit několik procesních parametrů. Teplota taveniny byla nastavena na 320 °C a čas otevírání formy na 8 sekund. Celkový čas plnění, dotlaku a chlazení byl nastaven na 110 vteřin.

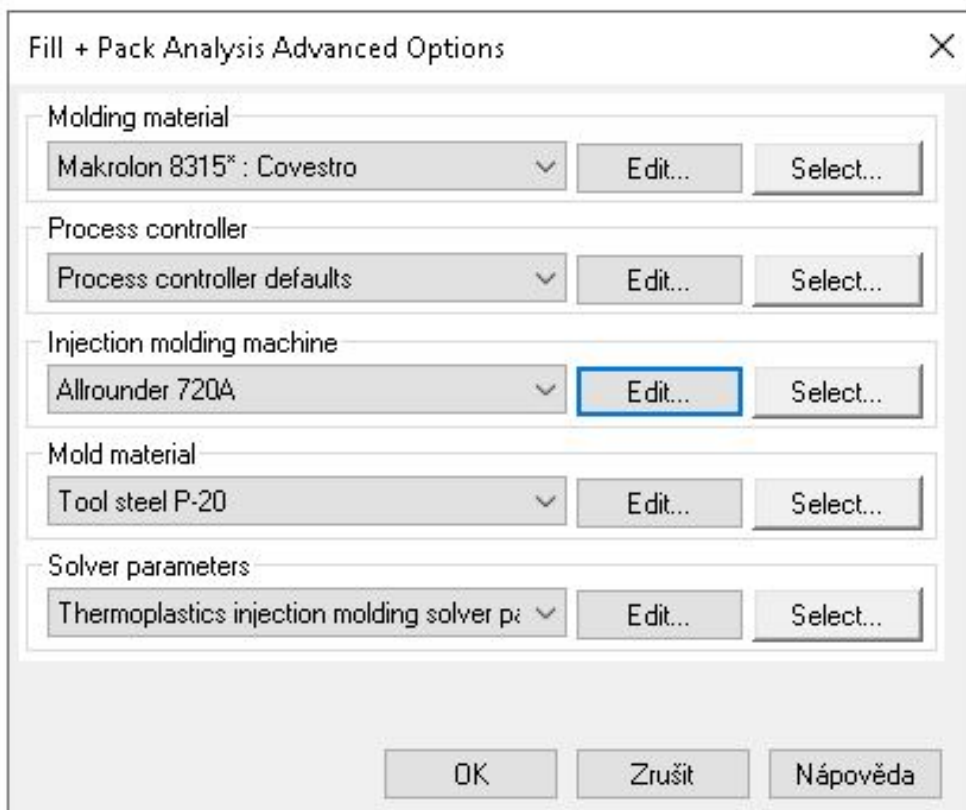


Obr. 14.10 Procesní podmínky - 1



Obr. 14.11 Procesní podmínky - 2

Čas plnění byl nastaven na hodnotu 1,3 sekundy. K přepnutí na dotlak dojde při zaplnění 99 % dutiny. Jelikož vstřikovaný materiál obsahuje skelná vlákna, tak je zaškrknuta možnost výsledku orientace vláken.



Obr. 14.12 Procesní podmínky - 3



Obr. 14.13 Procesní podmínky - 4

Vzhledem k tomu, že v databázi nebyl vstřikovací stroj, který byl zvolen, tak bylo nutné upravit nastavení "Default injection machine" takovým způsobem, aby daný stroj, co nejvíce odpovídal realitě. Do nastavení tedy byly přepsány hodnoty z technického listu vstřikovacího stroje.

Description	Injection Unit	Hydraulic Unit	Clamping Unit
Maximum machine injection stroke	200	mm (0:5000)	
Maximum machine injection rate	392	cm <sup>3</sup> /s (0:1e+04)	
Machine screw diameter	50	mm (0:1000)	
Filling control			
<input checked="" type="checkbox"/> Stroke vs ram speed			
<input type="checkbox"/> Ram speed vs time			
<input type="checkbox"/> Stroke vs time			
Ram speed control steps			
Maximum number of ram speed control steps	10	[0:50]	
Constant or linear step	Linear		
Pressure control steps			
Maximum number of pressure control steps	10	[0:50]	
Constant or linear step	Linear		
Name: Allrounder 720A			
		OK	Zrušit
		Nápověda	

Obr. 14.14 Procesní podmínky - nastavení vstříkovačného stroje 1

Description	Injection Unit	Hydraulic Unit	Clamping Unit
Machine pressure limit			
Maximum machine injection pressure		at 200	MPa [0:500]
Intensification ratio	10	(0:30)	
Machine hydraulic response time	0.01	s (0:10)	

Obr. 14.15 Procesní podmínky - nastavení vstříkovačného stroje 2

Description	Injection Unit	Hydraulic Unit	Clamping Unit
Maximum machine clamp force	320	tonne (0:70002.2)	
<input checked="" type="checkbox"/> Do not exceed maximum clamp force			

Obr. 14.16 Procesní podmínky - nastavení vstříkovačného stroje 3

## 15 VÝSLEDKY ANALÝZY MOLDFLOW

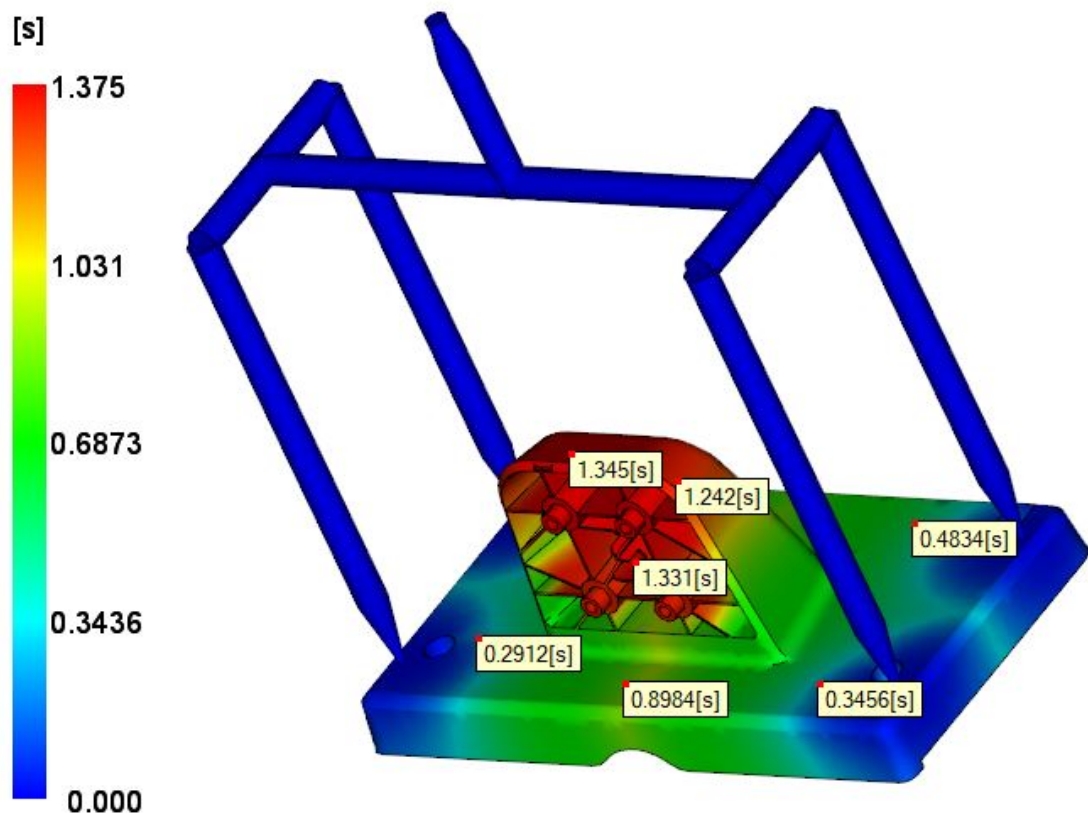
V této kapitole jsou popsány výsledky vstřikovací analýzy, která byla provedena v softwaru AutoDesk MoldFlow Synergy 2023. Jednotlivé výsledky jsou graficky znázorněny a je k nim přidán krátký popis.

### 15.1 Analýza Fill+Pack

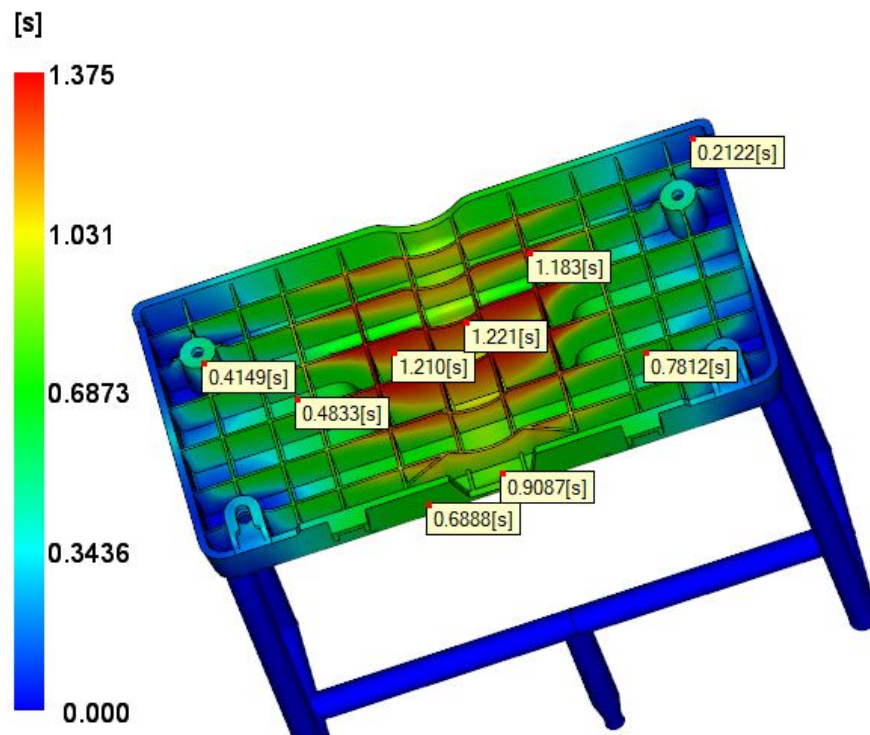
Tato podkapitola se zabývá výsledky plnění a dotlaku. V následujících částech jsou uvedeny výsledky pro čas plnění, rychlost smykové deformace, uzavírací sílu, propadliny, studené spoje, vzduchové kapsy, orientaci vláken a teplotu na konci plnění.

#### 15.1.1 Fill time (Čas plnění)

Tato analýza ukazuje průběh plnění dutiny formy v čase. Modrá místa značí nejkratší čas, místa červená naopak slouží k označení nejdelšího času. Čas potřebný k naplnění je 1,375 s, což víceméně souhlasí s hodnotou, která je nastavena v procesních parametrech (1,3 s). Pokud by nedošlo k zaplnění dutiny, tak by bylo nutné zvýšit vstřikovací tlak, zvýšit teplotu taveniny nebo zvolit materiál, který má lepší tokové vlastnosti.



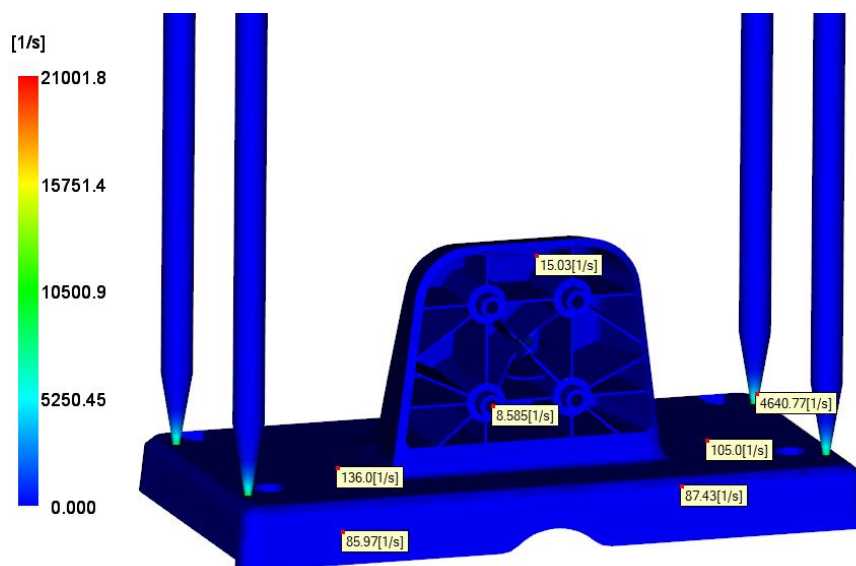
Obr. 15.1 Fill time (Čas plnění) - 1



Obr. 15.2 Fill time (Čas plnění) - 2

### 15.1.2 Shear rate bulk (Rychlost smykové deformace)

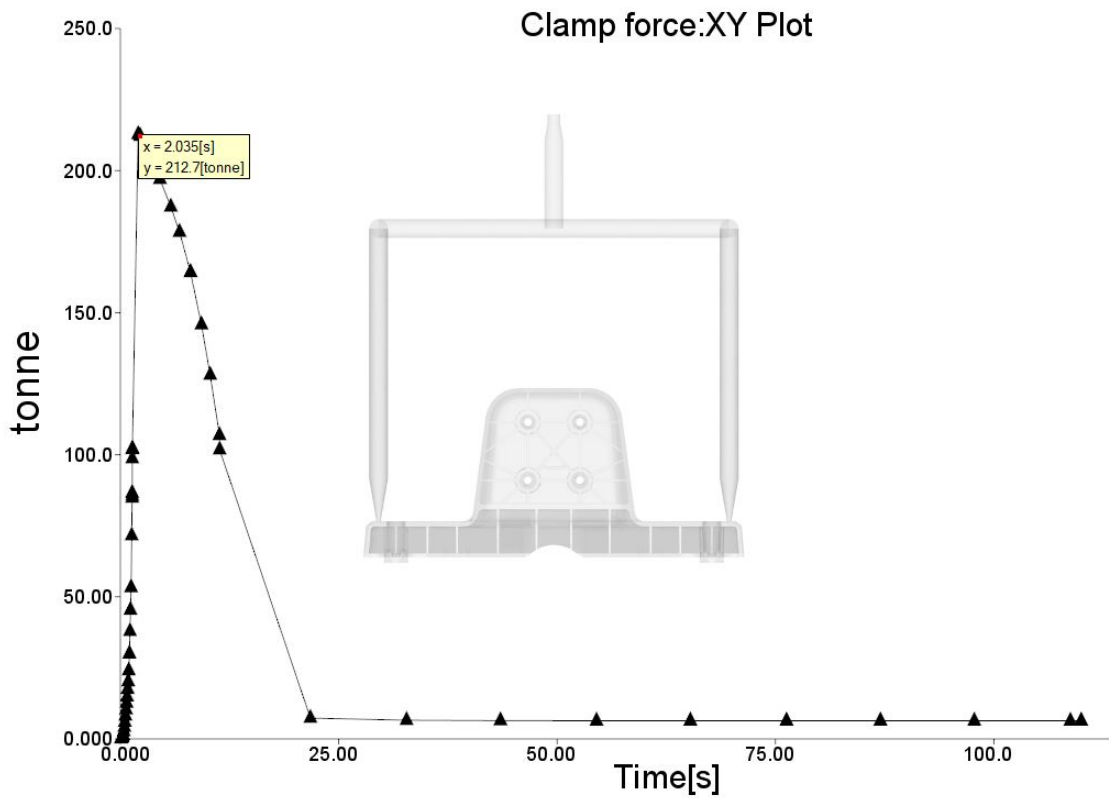
Tato analýza slouží k grafickému zobrazení rychlosti smykové deformace ve vstřikovaném dílu během plnění. Z výsledků je patrné, že nedochází k překročení maximální povolené hodnoty, která činí  $40000 \text{ s}^{-1}$ . Pokud by došlo k překročení hraniční hodnoty, tak by docházelo k degradaci taveniny, což by mělo negativní vliv na celkový výrobek.



Obr. 15.3 Shear rate (Rychlost smykové deformace)

### 15.1.3 Clamp Force: XY plot (Uzavírací síla)

Tento výsledek podává informaci o uzavírací síle, kterou musí vstříkovací stroj během procesu vyvinout, aby nedošlo k otevření formy. Z Obr. 15.4 je patrné, že maximální potřebná síle je přibližně 212,7 tun, což splňuje požadavky vstříkovacího stroje viz Tab 13.1.

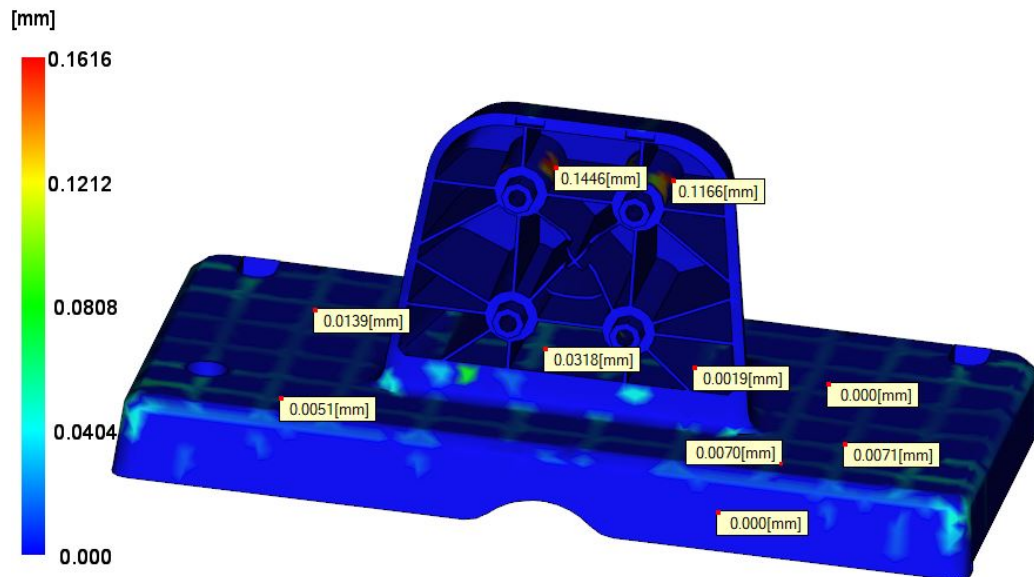


Obr. 15.4 Clamp Force: XY plot (Uzavírací síla)

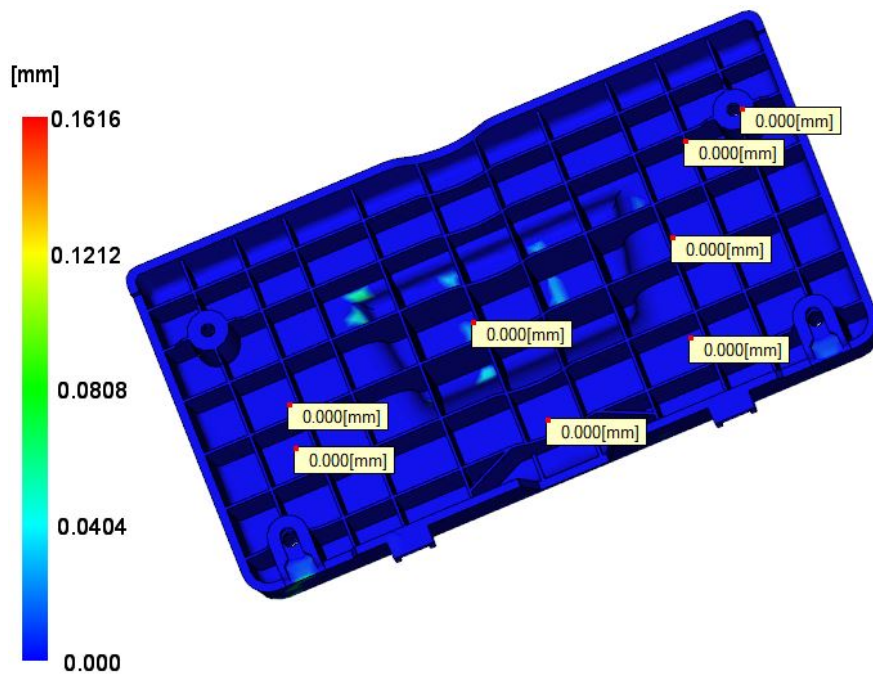


#### 15.1.4 Sink marks estimate (Propadliny)

Propadliny jsou pohledové vady na dílu, které negativně ovlivňují jeho vzhled a funkčnost. Z Obr. 15.5 lze vidět, že největší propadlina dosahuje hodnoty přibližně 0,16 mm.



Obr. 15.5 Sink marks estimate (Propadliny) - 1

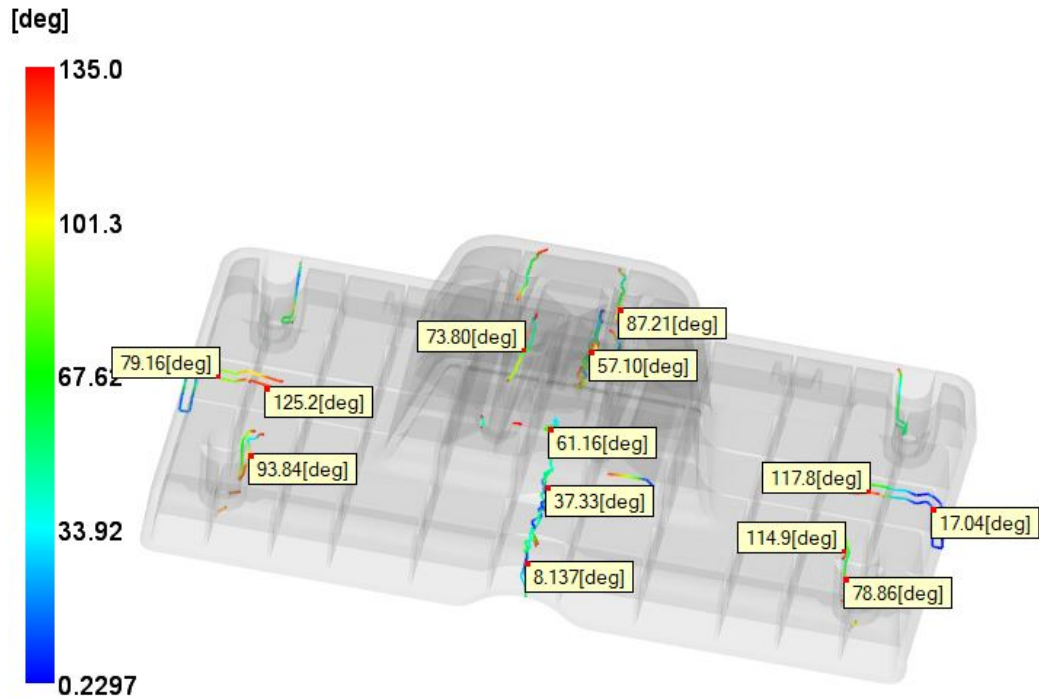


Obr. 15.6 Sink marks estimate (Propadliny) - 2



### 15.1.5 Weld lines (Studené spoje)

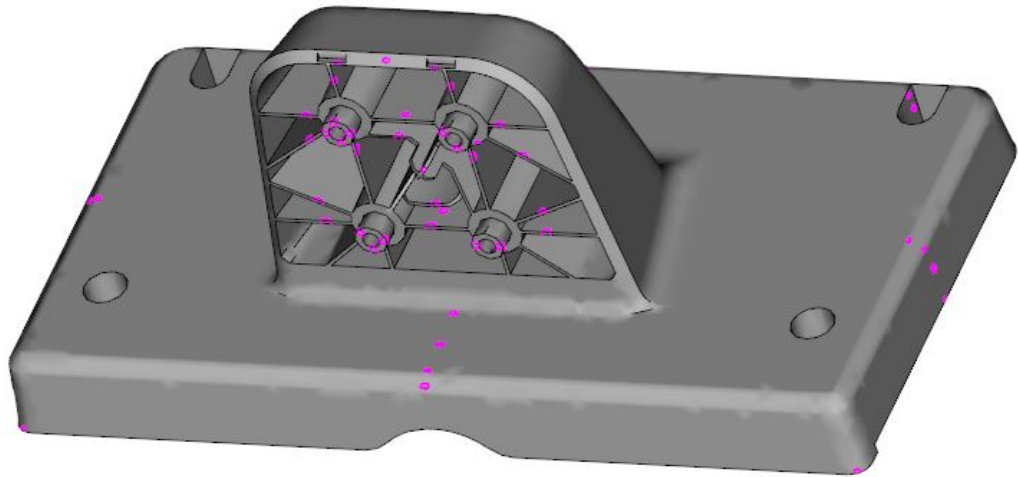
Studený spoj je nežádoucí efekt, který vznikne při spojení dvou čel tavenin. Ke vzniku studeného spoje dochází v místě, kde se tavenina rozděluje a znovu spojuje. Pokud studený spoj vznikne při teplotě o 20 °C a nižší než byla vstříkovací teplota, tak nemá negativní vliv na pevnost výrobku. V opačném případě bude výrobek v místě studeného spoje více náchylný k prasknutí.



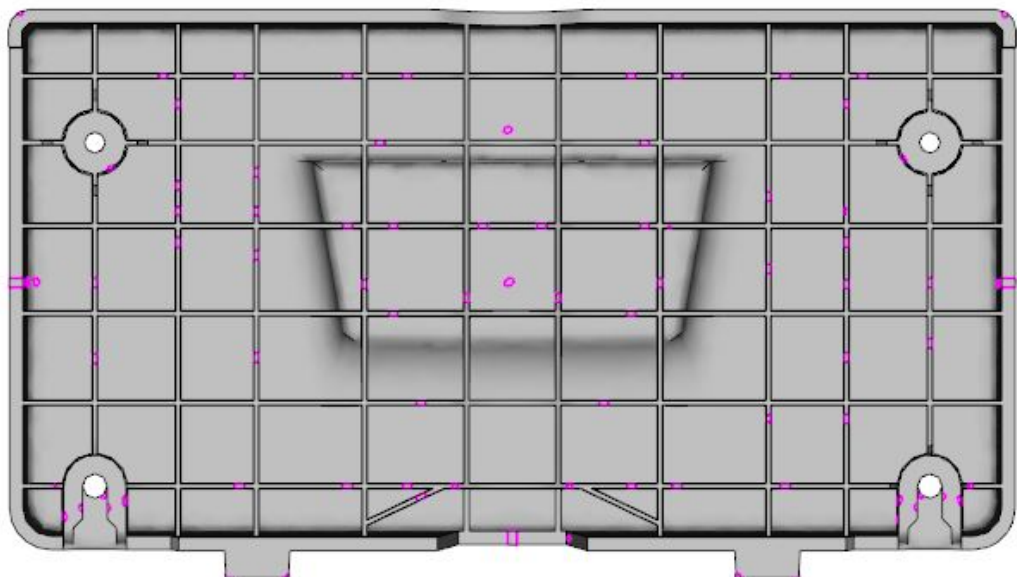
Obr. 15.7 Weld lines (Studené spoje)

### 15.1.6 Air traps (Vzduchové kapsy)

Tento výsledek znázorňuje vzduchové kapsy ve výrobku. Ke vzniku vzduchových kapes dochází, když nemá vzduch z dutiny kam uniknout. Tento vzduch poté zůstane ve výrobku, kde může způsobit Dieslův efekt nebo nedotečení. Odvod vzduchu je formě zajišťován vůlí v dělicí rovině, vůlí v bočních posuvných čelistech nebo vůlí v uložení vyhazovačů.



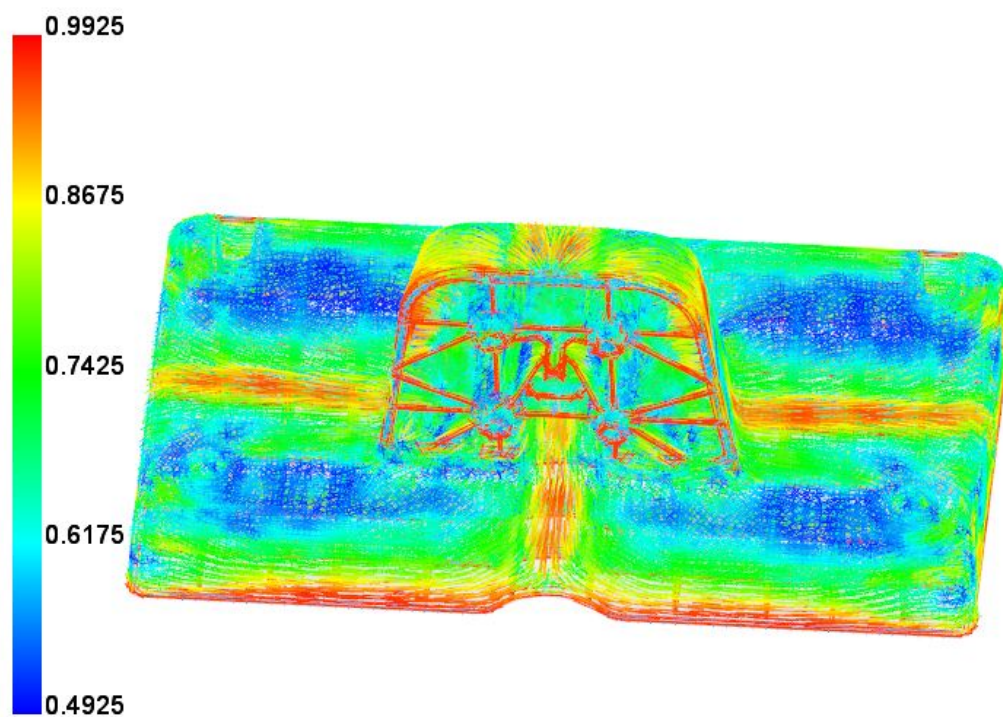
Obr. 15.8 Air traps (Vzduchové kapsy) - 1



Obr. 15.9 Air traps (Vzduchové kapsy) - 2

### 15.1.7 Average fiber orientation (Orientace vláken)

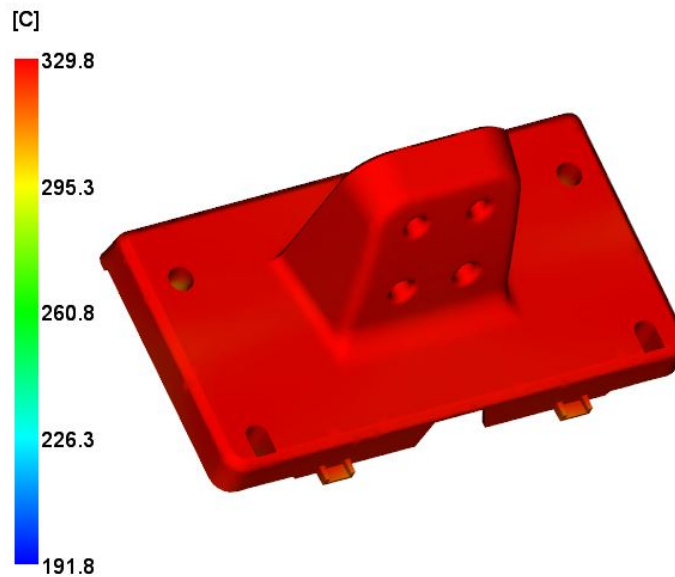
Výsledek této analýzy ukazuje orientaci vláken ve vstříkovaném dílci po ztuhnutí polymeru.



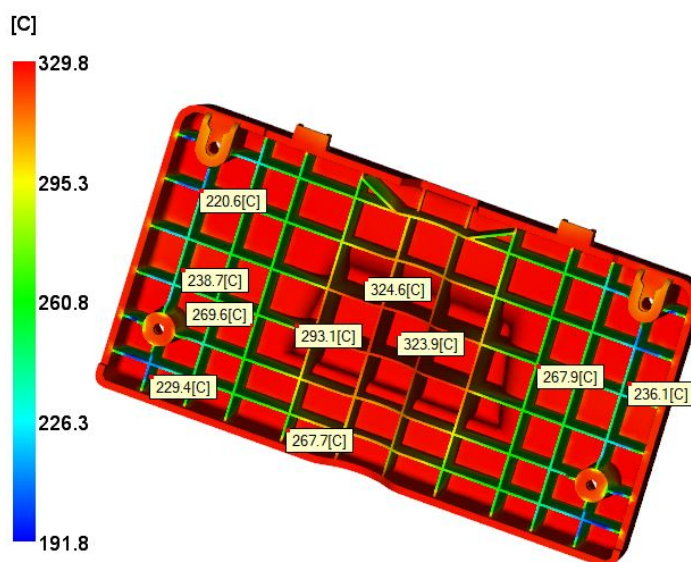
Obr. 15.10 Average fiber orientation (Orientace vláken)

### 15.1.8 Bulk temperature at end of the fill (Teplota na konci plnění)

Výsledkem analýzy je grafické znázornění teploty bezprostředně poté, co dojde k ukončení plnění dutiny. Výsledek ukazuje, ve kterých částech dílu dochází k nejrychlejšímu tuhnutí materiálu (modrá barva) a která místa budou chladnout nejdéle (červená barva). V případě nedotečení výstřiku by byl výsledek impulsem pro konstruktéra, které části dílu upravit.



Obr. 15.11 Bulk temperature at end of the fill (Teplota na konci plnění) - 1



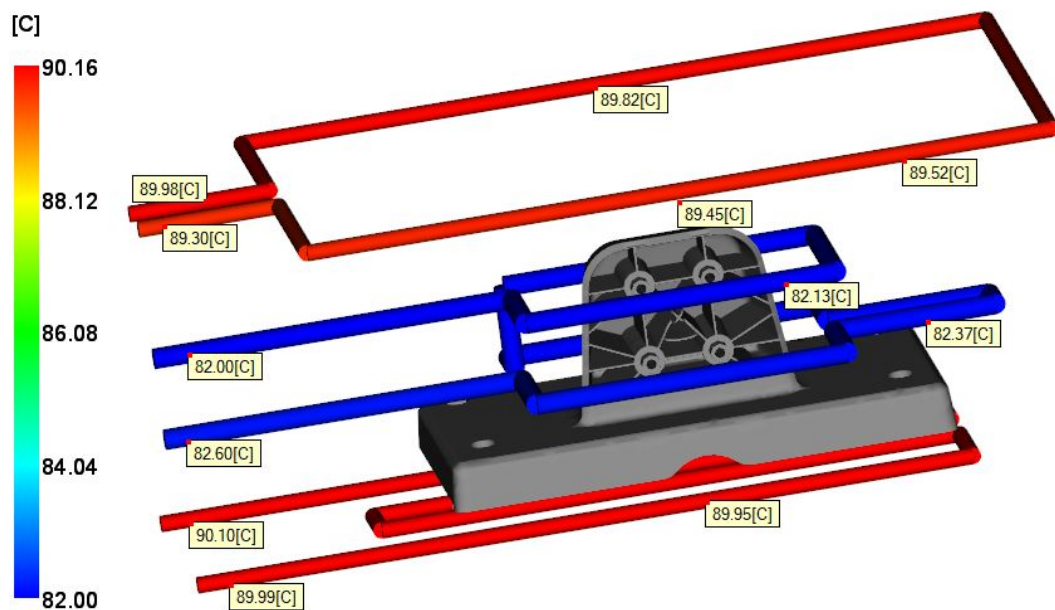
Obr. 15.12 Bulk temperature at end of the fill (Teplota na konci plnění) - 2

## 15.2 Analýza Cool

Analýza Cool (chlazení) se zabývá výsledky v jednotlivých temperačních okruzích. V následujících podkapitolách jsou uvedeny výsledky, které se týkají teploty temperačního média, Reynoldsova čísla, potřebného času k dosažení vyhazovací teploty a průměrné teploty dílu.

### 15.2.1 Circuit coolant temperature (Teplota temperačního média)

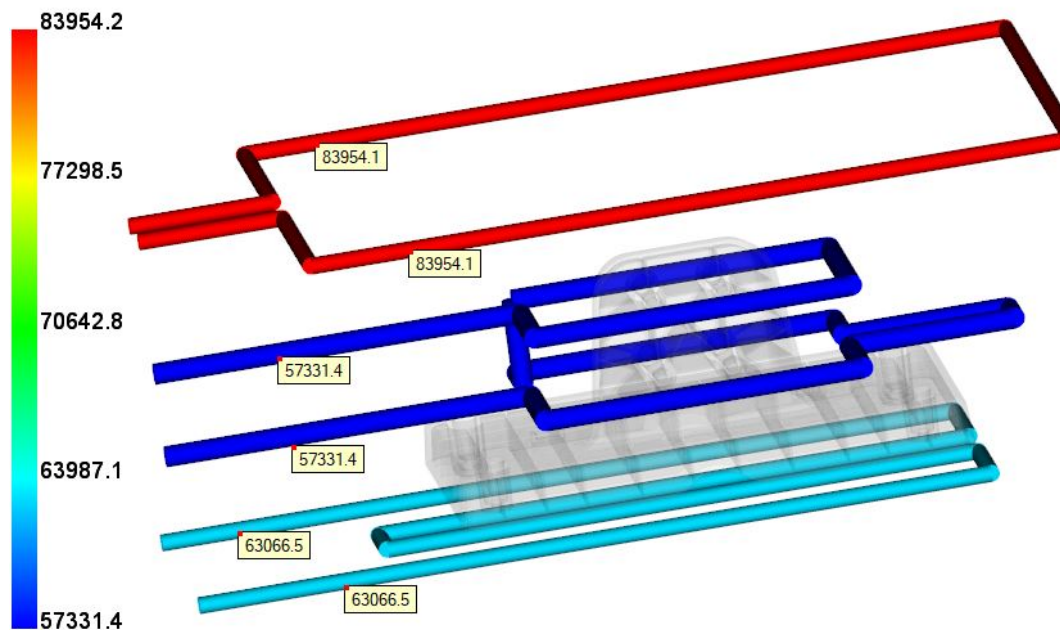
Výsledkem této analýzy je změna teploty temperačního média při průchodu temperačním okruhem. Literatura uvádí, že teplotní rozdíl na vstupu a výstupu by neměl být vyšší než 3 °C. Tato podmínka je splněna. Pro temperační okruh horkého vtoku činí rozdíl teplot na vstupu a výstupu 0,7 °C. Pro okruh tvárnice a tvárníku je rozdíl teplot 0,6 °C respektive 0,1 °C.



Obr. 15.13 Circuit coolant temperature (Teplota temperačního média)

### 15.2.2 Circuit Reynolds number (Reynoldsovo číslo)

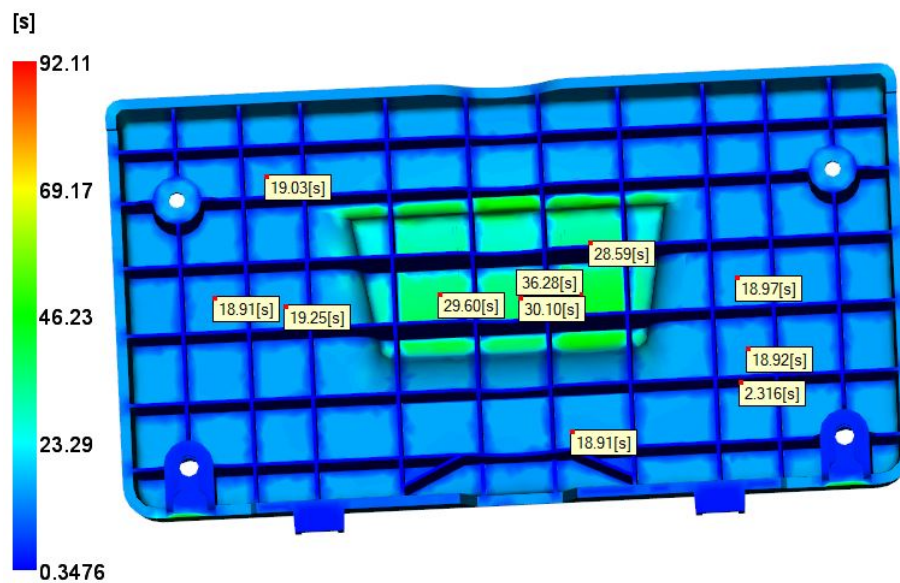
Výsledek udává hodnotu Reynoldsova čísla při proudění temperačního média v jednotlivých okruzích. Chlazení je efektivní, když je hodnota Reynoldsova čísla vyšší než 10 000, respektive, když dochází k turbulentnímu proudění. Tato podmínka je taktéž splněna.



Obr. 15.14 Circuit Reynolds number (Reynoldsovo číslo)

### 15.2.3 Time to reach ejection temperature, part (Čas pro dosažení vyhazovací teploty, díl)

Výsledek ukazuje nutný čas k dosažení vyhazovací teploty. Výsledek je převážně důležitý pro místa, kam dopadají vyhazovače. Jde tedy o místa, která musí být dostatečně ztuhlá, aby je pohyb vyhazovače nepoškodil. Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty bych volil 40 s. Tento čas je dostatečný k tomu, aby ztuhly všechny části vstříkovaného dílu, na které bude působit vyhazovací kolík.

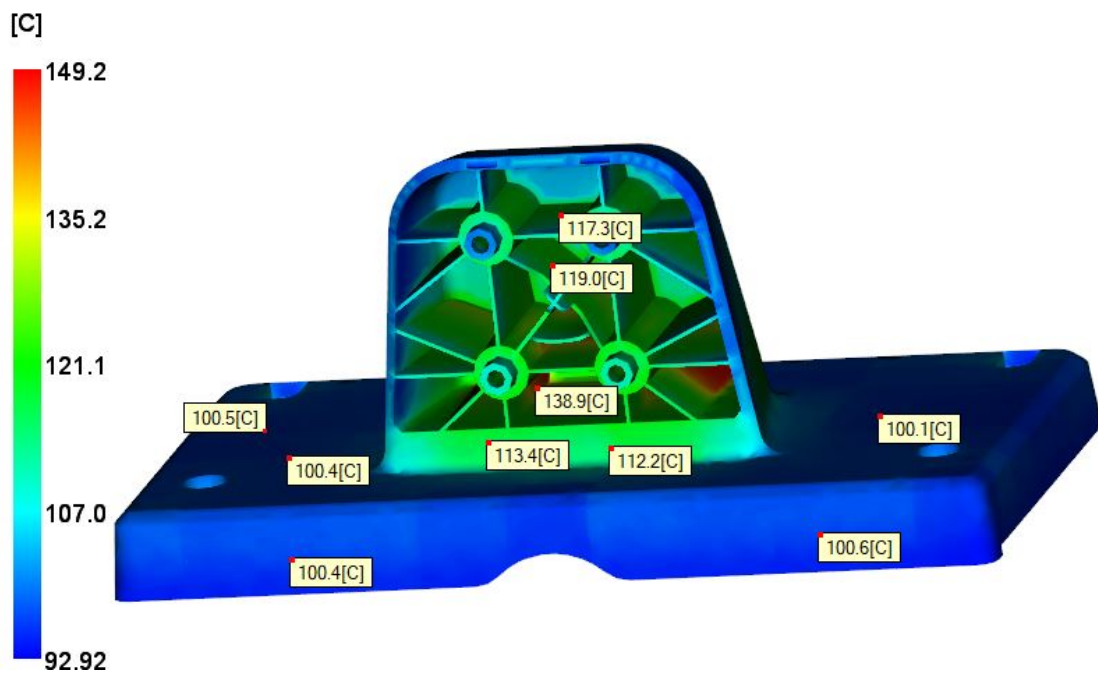


Obr. 15.15 Time to reach ejection temperature, part (Čas pro dosažení vyhazovací teploty, díl)



#### 15.2.4 Average temperature, part (Průměrná teplota, díl)

Tato analýza ukazuje průměrnou teplotu dílu při jeho vyhození z formy. Z Obr. 15.16 lze vidět, že teplota poměrně kolísá a pohybuje se v intervalu přibližně od 90 do 150 °C. To je způsobené členitostí součásti.



Obr. 15.16 Average temperature, part (Průměrná teplota, díl)

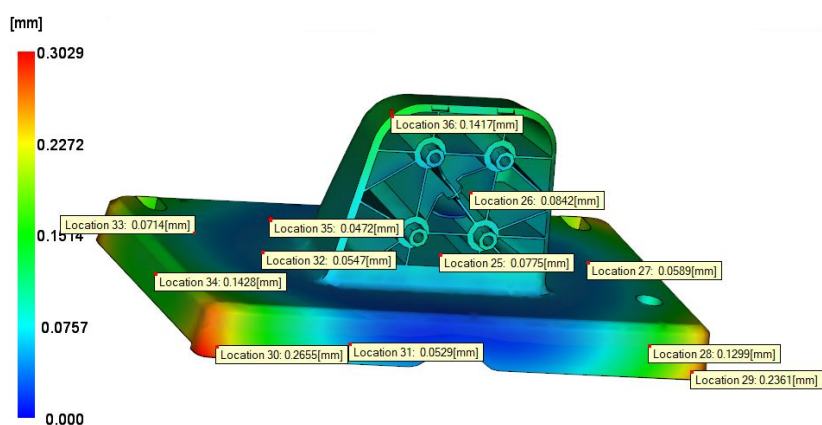


### 15.3 Analýza Warp

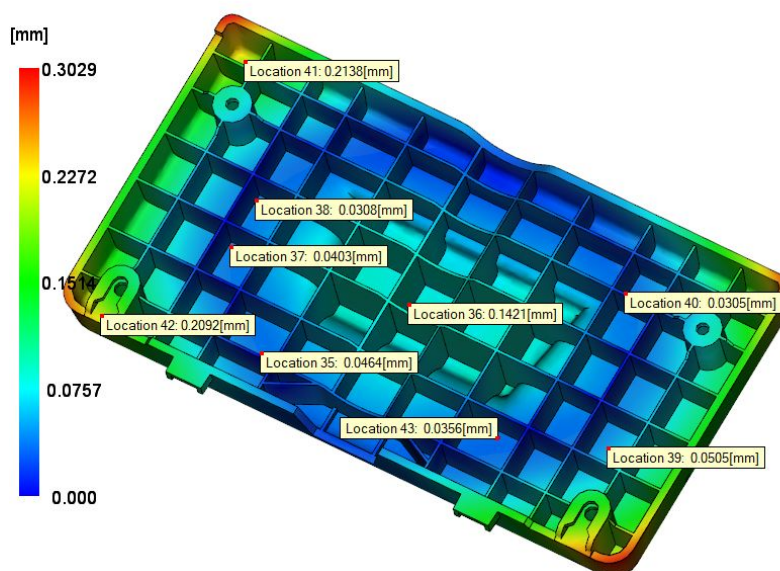
V této kapitole jsou uvedeny výsledky pro smrštění a deformaci. Jsou zde výsledky deformací od všech vlivů, deformací, které jsou způsobené chlazením a deformací, které jsou způsobené smrštěním.

#### 15.3.1 Deflection, all effects: Deflection (Celková deformace od všech vlivů)

Výsledek této analýzy podává informaci o vzniklé deformaci na výrobku, která je způsobená všemi vlivy (smrštění, chlazení a odchylky orientace). Červenou barvou jsou označena místa s největším smrštěním, modrou ta místa, kde je deformace nejnižší. Největší deformace činí přibližně 0,3 mm (Obr. 15.17) a nachází se na okrajích součásti. Důvodem vyšší deformace může být příliš vysoká teplota formy.



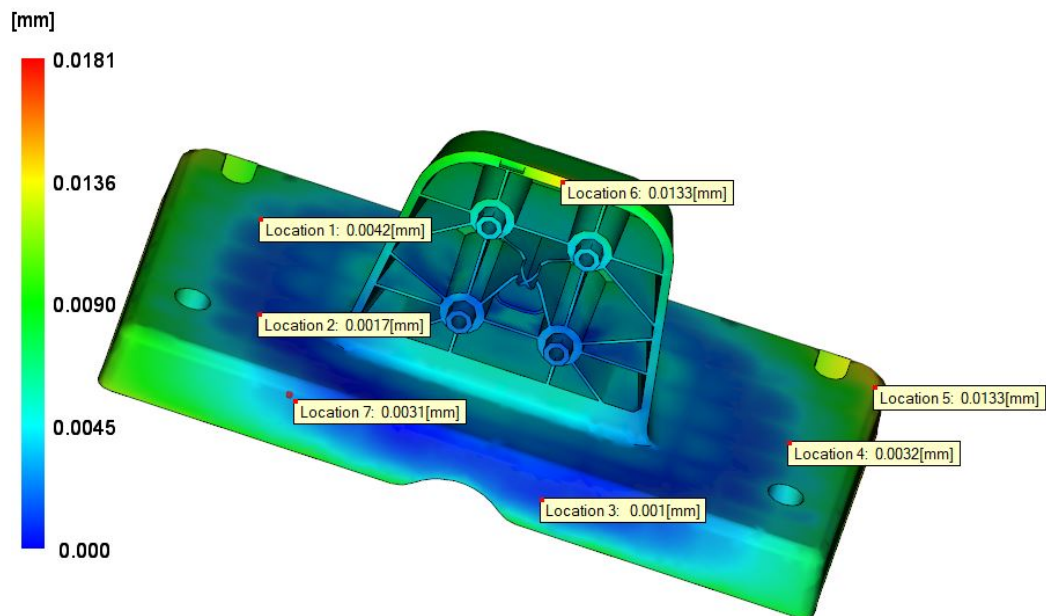
Obr. 15.17 Deflection, all effects: Deflection (Celková deformace od všech vlivů) - 1



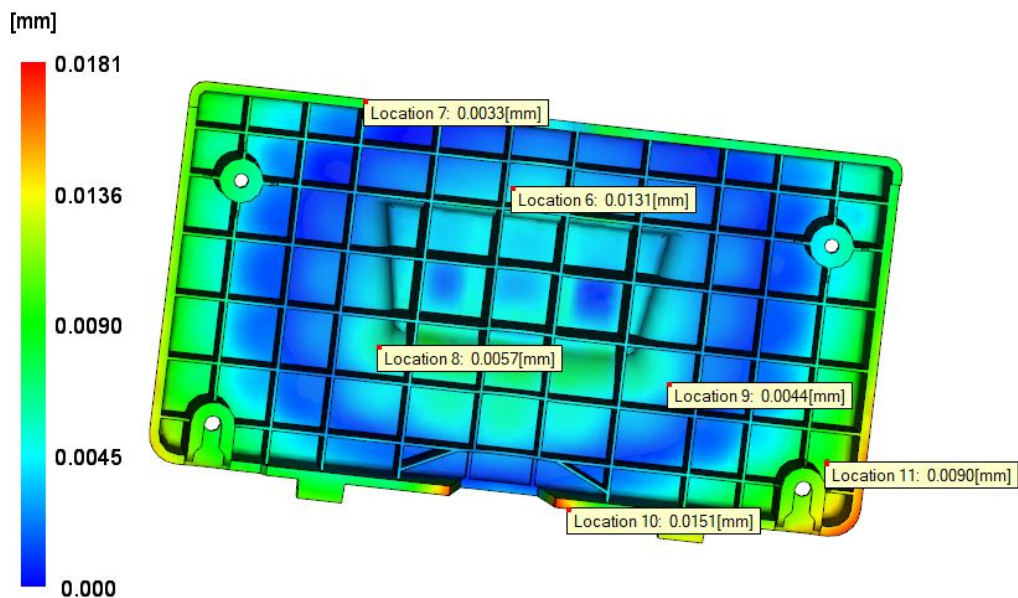
Obr. 15.18 Deflection, all effects: Deflection (Celková deformace od všech vlivů) - 2

### 15.3.2 Deflection, differential cooling: Deflection (Deformace vlivem chlazení)

Tato analýza ukazuje k jaké deformaci dojde při chlazení. Z Obr. 15.19 a 15.20 lze vidět, že nejvyšší hodnota deformace nedosahuje ani 0,02 mm. Lze konstatovat, že temperační systém byl navržen správně.



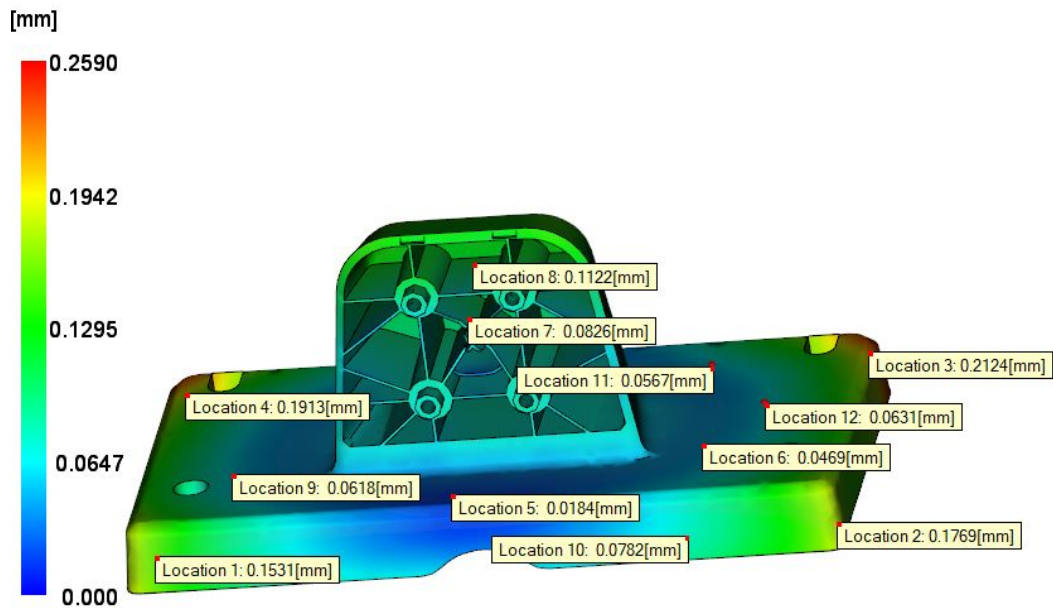
Obr. 15.19 Deflection, differential cooling: Deflection (Deformace vlivem chlazení) - 1



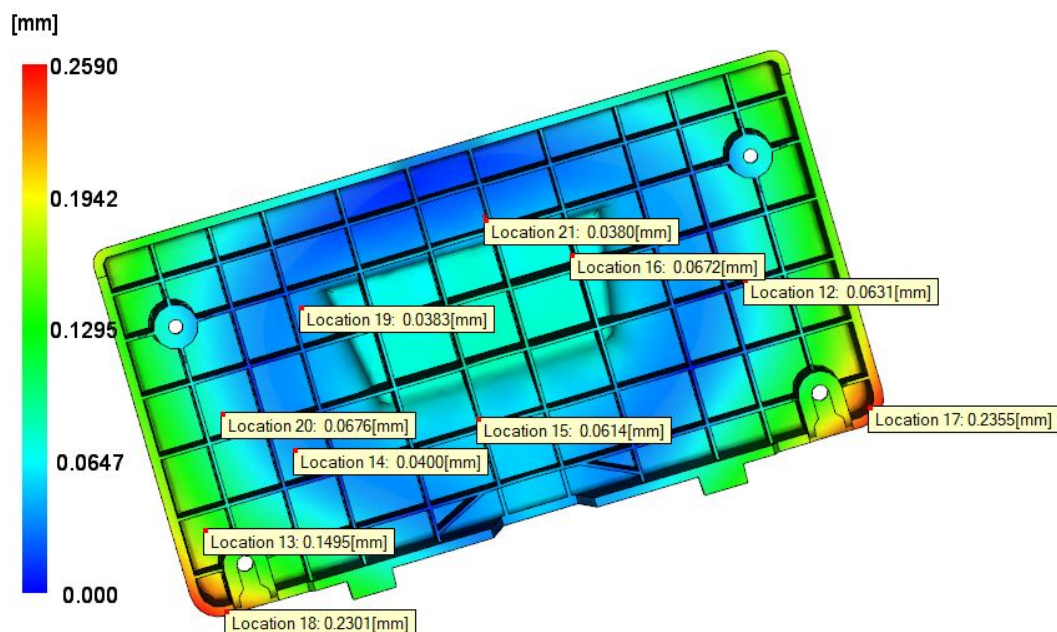
Obr. 15.20 Deflection, differential cooling: Deflection (Deformace vlivem chlazení) - 2

### 15.3.3 Deflection, differential shrinkage: Deflection (Deformace vlivem smrštění)

V tomto výsledku se jedná o deformaci, která vznikla vlivem smrštění materiálu. Z výsledku je zcela zřejmé, že deformace způsobená smrštěním tvoří převážnou část celkové deformace. Nejvyšší hodnota deformace je znázorněna červenou barvou, nejnižší hodnota barvou modrou. Deformaci vlivem smrštění lze snížit úpravou procesních podmínek nebo použitím jiného materiálu.



Obr. 15.21 Deflection, differential shrinkage: Deflection (Deformace vlivem smrštění) - 1



Obr. 15.22 Deflection, differential shrinkage: Deflection (Deformace vlivem smrštění) - 2

## 16 Diskuze výsledků

Mezi hlavní cíl diplomové práce patří navrhnutí vstřikovací formy pro držák televize. Tento díl slouží jako spojení mezi obrazovkou a stojánkem. Vstřikovaný díl obsahuje několik děr a otvorů, které slouží ke spojení těchto dvou výše zmíněných částí.

Nejdříve došlo k vytvoření 3D modelu dílu. Díl byl vytvořen v prostředí Catia V5R19. Byly vytvořeny celkem 3 varianty. Tyto varianty jsou víceméně totožné. Liší se jen ve velikosti smrštění či v menších detailech jakými jsou rádiusy menší než 2 mm. Poté došlo k vytvoření tvarových částí formy. Samotný díl a tvarové části byly konstruovány za použití modulů "Part Design" a "Generative Shape Design".

Před samotnou konstrukcí formy bylo nutné zjistit, jaký vtokový systém je pro danou součást ten nejvhodnější. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik analýz typu Fill+Pack+Warp v softwaru MoldFlow Synergy 2023 pro různé vtokové varianty a materiály. Nejlepšími výsledky disponovala varianta s horkým vtokem. V následující tabulce jsou shrnuté jednotlivé výsledky na základě, kterých byl volený vtokový systém. Sloupec pro variantu filmového vtoku pro dvou-násobnou formu je nevyplněn z důvodu překročení uzavírací síly stroje.

Tab. 16.1 Shrnutí výsledků jednotlivých variant

Výsledek	Filmový vtok 1x	Horký vtok	Filmový vtok 2x
Čas plnění	1,62 s	1,17 s	x
Studené spoje	nízký počet	vysoký počet	x
Celková deformace	0,51 mm	0,42 mm	x

Poté došlo ke konstrukci formy. Při konstrukci formy byl brán zřetel na co největší použití normálií. Všechny použité normálie byly voleny z katalogu firmy Meusburger. Forma byla zgenerována pomocí online konfigurátoru na stránkách Meusburgeru včetně vtokového systému. Tímto bylo zaručeno, že horký vtokový systém je vhodný pro zvolený materiál.

V následujícím kroku byly zkonstruovány boční posuvné čelisti. Ve formě se nachází dvě boční čelisti, jejichž posun je zajištěn přes šikmý kolík se sklonem 18°. Sestava formy byla opět vytvořena v prostředí Catia V5R19 za použití modulů "Assembly Design" a "Mold Tooling Design". Další částí bylo vytvoření temperace. Temperační systém je složen ze tří samostatných okruhů. Všechny temperační okruhy lze řadit mezi pře-pažkový systém, protože obsahují záslepky, které usměrňují tok temperačního média. Poslední částí bylo vytvoření vyhazovacího systému. Vyhazovací systém byl navržen s ohledem na teplotu, aby nedocházelo ke kolizi. Je tvořen celkem 58 vyhazovači o průměru 8, 4,5 a 3 mm. Vyhazovače, které dopadají na tvarovou plochu jsou zajištěny

proti pootočení. Celý vyhazovací packet je pomocí táhla připojený ke stroji. Nedílnou součástí návrhu jsou také vodící a manipulační prvky.

Byl zvolen vstřikovací stroj na základě několika požadavků. Dalším krokem bylo ověření celého konstrukčního návrhu pomocí analýzy vstřikování. Pro potřeby analýzy byly vytvořeny geometrie vtokového a temperačního systému ve formátu .iges. Tyto soubory byly následně nahrány do simulačního softwaru. Poté byla provedena analýza vstřikování. Návrh formy splnil požadované podmínky. Uzavírací síla stroje nebyla překročena a došlo k úspěšnému zaplnění dutiny formy. V poslední části diplomové práce došlo k vytvoření výkresové dokumentace sestavy včetně kusovníku.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vypracování literární studie na dané téma, provedení 3D konstrukce zadaného dílu a následně pro tuto součást navrhnout vstřikovací formu. Mezi další zadaná kritéria, které musela práce splňovat bylo ověření návrhu vstřikovací formy v simulačním softwaru a vytvoření výkresové dokumentace sestavy včetně kusovníku.

Diplomová práce je rozdělena na dvě hlavní části, a to část teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou stručně popsány polymerní materiály a jejich reologie. Další kapitoly jsou věnovány samotnému procesu vstřikování a konstrukcí forem. Pozornost je věnována i popisu vstřikovacího stroje, základním kritériím při konstruování vstřikované součásti a využití simulací pro zefektivnění celého procesu.

První úsek praktické části je věnován konstrukci součásti a vstřikovací formy. Pro vstřikovaný díl byl zvolen materiál Makrolon 8315\* od firmy Covestro. Jedná se o polykarbonát, který obsahuje 10 % skelných vláken. S přihlédnutím k velikosti součásti a výsledku dílčích analýz je forma navržena jako jednonásobná s horkým vtokem. Horký vtok je sice cenově náročnější, ale vede ke zvýšení stupně automatizace. S horkým vtokem také odpadá nutnost odstranění vtokového zbytku.

Byly vytvořeny tvarové vložky, ve formě se nachází celkem čtyři. Na pevné straně formy je umístěna tvárnice, na pohyblivé se nachází tvárník a dvě boční tvarové kostky. Posun bočních tvarových kostek je zajištěn šikmým kolíkem o sklonu 18°. Temperační systém je tvořen třemi okruhy, dva okruhy mají průměr kanálku 8 mm, jeden 10 mm. Jako temperační médium je použito Etylen Glykol/Voda 20 %-80 % respektive voda. V poslední části konstrukčního návrhu byl navržen vyhazovací systém. Ten se skládá z 59 vyhazovacích kolíků.

Jako vstřikovací stroj byl zvolen Arburg Allrounder 720 A Clamp-Design-3200-800(50). Nedílnou součástí diplomové práce je také ověření konstrukčního návrhu pomocí simulace. Získané výsledky byly náležitě okomentovány včetně grafického zobrazení. Mezi výsledky lze najít čas plnění dutiny, vzduchové kapsy či teplotu temperačního média při průchodu okruhem.

Konstrukce formy včetně výkresů byla vytvořena v prostředí Catia V5R19. K tokovým analýzám byl použit program AutoDesk MoldFlow Synergy 2023. Při konstrukci formy byl kladen maximální důraz na využití normalizovaných součástí z katalogu firmy Meusburger.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: Výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vydání. Praha, 2006. ISBN 80-7080-617
- [2] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Povol ALEXY, Ernest GONDÁR a Viera KHUNOVÁ *Polymerné konštrukčné materiály* Žilina, 2012. Odborná publikace. Žilinská univerzita v Žilině.
- [3] ZEMAN, Lubomír *Vstřikování plastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 80-7300-026-1.
- [4] ROESLER, Joachim, Harald HARDERS a Martin BAEKER. *Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites*. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-73446-8.
- [5] CAMPO, E. Alfredo. *Selection of Polymeric Materials: How to Select Design Properties from Different Standards (Plastics Design Library)*. William Andrew, 2008. ISBN 978-0-8155-1551-7.
- [6] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2014 [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [7] GUEDES, Rui Miranda. *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites*. 2. vydání. United Kingdom: Woodhead Publishing, 2019. ISBN 978-0-08-102601-4.
- [8] HAN, Chang Dae. *Rheology and Processing of Polymeric Materials: Polymer Rheology*. New York: Oxford University Press, 2007. ISBN 978-0-19-518782-3.
- [9] YANG, Yi, Xi CHEN, Ningyun LU a Furong GAO, HAMILTON, Cheryl, ed. *Injection Molding Process Control, Monitoring, and Optimization*. Munich: Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-592-0.
- [10] CARREAU, Pierre J., Daniel C. R. DE KEE a Raj P. CHHABRA, SMITH, Mark, ed. *Rheology of Polymeric Systems: Principles and Applications*. 2. vydání. Munich: Hanser Publications, 2021. ISBN 978-1-56990-722-1.
- [11] KULKARNI, Suhas, HAMILTON, Cheryl, ed. *Robust Process Development and Scientific Molding: Theory and Practice*. 2. vydání. Munich: Hanser Publications, 2017. ISBN 978-1-56990-586-9.
- [12] KUTZ, Myer. *Handbook of Measurement in Science and Engineering, Volume 2*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-118-38464-0.

- [13] BRUDER, Ulf, SMITH, Mark, ed. *User's Guide to Plastic: A Handbook for Everyone*. 2. vydání. Munich: Hanser Publications, 2019. ISBN 978-1-56990-734-4.
- [14] 3 Basic Steps Of The Injection Molding Process. *Injection Moulding World* [online]. 2018 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://injectionmouldingworld.com/3-basic-steps-of-the-injection-molding-process/>
- [15] WANG, Jian. *Some Critical Issues for Injection Molding*. London: IntechOpen, 2012. ISBN 978-953-51-0297-7.
- [16] GILBERT, Marianne. *Brydson's Plastics Materials*. 8.vydání. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. ISBN 978-0-323-35824-8.
- [17] OVSÍK, Martin, Michal STANĚK, Adam DOČKAL, Petr FLUXA a Vlastimil CHALUPA. *The Influence of Surface Quality on Flow Length and Micro-Mechanical Properties of Polycarbonate*. Materials. [online] 2021, 14(20), 1-16. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma14205910>
- [18] *7 common injection molding defects and how to avoid them* [online] 2022 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.fastradius.com/resources/injection-molding-defects/>
- [19] *Avoiding sink marks with solidworks plastic* [online] 2013 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z <https://hawkridgesys.com/blog/solidworks-plastics-sink-marks>
- [20] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide: The 4m Approach*. Munich: Hanser Publications, 2018. ISBN 978-1-56990-645-3.
- [21] *Weld line defects in plastic injection molding* [online] 2019 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.midstatemold.com/weld-line-defects-in-plastic-injection-molding/>
- [22] *4 Causes for Burns in Injection Molding* [online] 2019 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://nanomoldcoating.com/4-causes-for-burns-in-injection-molding/>
- [23] *ARBURG na mezinárodní výstavě a konferenci Plastiimagen 2019* [online] 2019 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/arb-urg-na-mezinarodni-vystave-a-konferenci-plastimagen-2019\\_46329.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/arb-urg-na-mezinarodni-vystave-a-konferenci-plastimagen-2019_46329.html)



- [24] *What is An Injection Molding Machine? What Types are There?* [online] 2022 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.market-prospects.com/articles/what-is-an-injection-molding-machine-1>
- [25] WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang (David) HSU. *Molding Simulation: Theory and Practice*. Munich: Hanser Publications, 2018. ISBN 978-1-56990-619-4.
- [26] KAZMER, David, HAMILTON, Cheryl, ed. *Injection Mold Design Engineering*. 2. vydání. Munich: Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-570-8.7
- [27] DANGEL, Rainer, SMITH, Mark, ed. *Injection Molds for Beginners*. 2. vydání. Munich: Hanser Publications, 2020. ISBN 978-1-56990-818-1.
- [28] BEAUMONT, John P., SMITH, Mark, ed. *Runner and Gating Design Handbook: Tools for Successful Injection Molding*. 3. vydání. Munich: Hanser Publications, 2019. ISBN 978-1-56990-590-6.
- [29] *Advantages and Disadvantages of hot runner in injectoin mold* [online] 2022 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.grefeemold.com/advantages-and-disadvantages-of-hot-runner-molds.html>
- [30] *Plastic Injection Molding Design Guide* [online] 2023 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://texasinjectionmolding.com/design-guide/>
- [31] HUDAK, Andrew J. *Injection molding optimization via conformally-cooled tool design*. [online] 2023 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.andrewhudak.me/work/conformal-cooling>
- [32] *E 1710: Vyhazovač kalený* [online] 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z <https://ecom.meusburger.com/e/index.asp?id=151&rnd=6581>
- [33] *Types of Ejection System in Injection Molding* [online] 2021 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.immould.com/types-of-ejection-system-in-injection-molding/>
- [34] GORDON, JR., M. Joseph. *Total Quality Process Control for Injection Molding*. 2. vydání. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-0-470-22963-7.
- [35] KOÇ, Muammer a Tuğrul ÖZEL. *Modern Manufacturing Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2019. ISBN 9781119120674.
- [36] KENNEDY, Peter. *Flow Analysis Of Injection Molds*. 2. vydání. Munich: Hanser Publications, 2013. ISBN 978-1-56990-512-8.

- [37] *Allrounder Alldrive* [online] 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/svet-vyroby/vstrikovaci-lisy/elektricke-stroje/allrounder-alldrive/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

UV	Ultrafialové
$T_g$	Teplota skelného přechodu
$T_m$	Teplota tání
$T_f$	Teplota viskozního toku
POM	Polyoxymethylen
PA-6	Polyamid 6
PA-66	Polyamid 66
PMMA	Polymethylmethakrylát
PC	Polykarbonát
PSU	Polysulfon
$\dot{\gamma}$	Rychlost smykové deformace
$\tau$	Smykové napětí
$\eta$	Smykova viskozita
$\eta_0$	Newtonská viskozita
mm	milimetr (jednotka délky)
FDM	Fused Deposition Modeling
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
°	Úhlový stupeň (jednotka velikosti úhlu)
°C	Stupeň Celsia (jednotka teploty)
$s^{-1}$	Jednotka rychlosti smykové deformace
tzn.	To znamená
CAE	Computer-aided engineering
atd.	A tak dále
$Re$	Reynoldsovo číslo
g	gram (jednotka hmotnosti)
kN	kiloNewton (jednotka síly)
$cm^3$	Centimetr krychlový (jednotka objemu)
MPa	MegaPascal (jednotka tlaku)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1] . . . . .	14
1.2	Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě pro semikrystalické (POM, PA-6, PP-66) a amorfní (PMMA, PC, PSU) polymery [6] . . .	17
2.1	Weissenbergův efekt [9] . . . . .	19
2.2	Dvourozměrné Couetteho proudění mezi dvěma nekonečnými plochými deskami [9] . . . . .	20
2.3	Ilustrace elongace [9] . . . . .	21
2.4	Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace [9] . . . . .	22
2.5	Závislost logaritmu viskozity na logaritmu rychlosti smykové deformace [9] . . . . .	22
3.1	Schema vstřikovacího cyklu [14] . . . . .	26
3.2	p-v-T diagram vstřikovacího cyklu [15] . . . . .	27
3.3	Fontánový tok [17] . . . . .	28
3.4	Propadlina [19] . . . . .	29
3.5	Diesel efekt [22] . . . . .	31
4.1	Vstřikovací stroj [23] . . . . .	32
5.1	Horký vtokový systém [29] . . . . .	36
5.2	Průřezy rozvodných kanálků používaných ve vstřikovacích formách [28]	37
5.3	Vějířové ústí [28] . . . . .	38
5.4	Tunelový vtok[30] . . . . .	38
5.5	Laminární a turbulentní proudění[11] . . . . .	39
5.6	Příklad konformního chlazení [31] . . . . .	40
5.7	Příklad vyhazovacího kolíku [32] . . . . .	41
5.8	Boční odformování přes šikmý kolík [27] . . . . .	43
6.1	Design přechodové oblasti tloušťky [25] . . . . .	45
6.2	Propadlina žebra (vlevo), správný design žebra (vpravo) [25] . . . . .	46
7.1	Schéma vývoje vstřikovací formy [25] . . . . .	48
7.2	Generování střední roviny [36] . . . . .	49
9.1	Model skutečného dílu - pohled 1 . . . . .	53
9.2	Model skutečného dílu - pohled 2 . . . . .	54
9.3	Model skutečného dílu - pohled 3 . . . . .	54
10.1	Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace . . . . .	55
10.2	pvT diagram . . . . .	56
11.1	Jednotlivé testované varianty . . . . .	57
11.2	Chybová hláška - překročení uzavírací síly stroje . . . . .	58

11.3	Fill time (čas plnění) . . . . .	58
11.4	Weld lines (Studené spoje . . . . .	58
11.5	Deflection, all defects: Deflection (Deformace od všech vlivů) . . . . .	59
11.6	Fill time (čas plnění) . . . . .	59
11.7	Weld lines (Studené spoje . . . . .	60
11.8	Deflection, all defects: Deflection (Deformace od všech vlivů) . . . . .	60
12.1	Zaformování dílu - dělicí roviny . . . . .	62
12.2	Tvárnice - pohled 1 . . . . .	63
12.3	Tvárnice - pohled 2 . . . . .	63
12.4	Tvárník . . . . .	64
12.5	Tvárník - šrouby a středící kolíky . . . . .	64
12.6	Boční tvarová kostka 1 . . . . .	65
12.7	Boční tvarová kostka 2 . . . . .	65
12.8	Sestava tvarových částí - řez 1 . . . . .	66
12.9	Sestava tvarových částí - řez 2 . . . . .	66
12.10	Schéma boční posuvné čelisti 1 - řez . . . . .	67
12.11	Schéma boční posuvné čelisti 1 - pohled z vrchu . . . . .	68
12.12	Zamčení polohy čelisti . . . . .	68
12.13	Posuvná čelist 2 - schéma 1 . . . . .	69
12.14	Posuvná čelist 2 - schéma 2 . . . . .	69
12.15	Horký vtokový systém - schéma 1 . . . . .	70
12.16	Horký vtokový systém - schéma 2 . . . . .	70
12.17	Překlenovací element . . . . .	71
12.18	Ostatní elementy temperačního systému . . . . .	71
12.19	Temperace pravá strana - pohled 1 . . . . .	72
12.20	Temperace pravá strana - pohled 2 . . . . .	72
12.21	Temperace levá strana . . . . .	73
12.22	Vyhazovací systém - pohled 1 . . . . .	74
12.23	Vyhazovací systém - pohled 2 . . . . .	74
12.24	Zajištění vyhazovačů proti pootočení . . . . .	75
12.25	Zobrazení závitového čepu . . . . .	75
12.26	Vodící prvky formy . . . . .	75
12.27	Vodící prvky vyhazovacího systému . . . . .	76
12.28	Středící kroužky . . . . .	76
12.29	Středění formy . . . . .	76
12.30	Středění formy - jednotlivé části . . . . .	77
12.31	Manipulační prvky formy . . . . .	77
12.32	Pevná strana formy . . . . .	78

12.33	Pohyblivá strana formy . . . . .	79
12.34	Forma . . . . .	80
13.1	Zvolený vstřikovací stroj [37] . . . . .	81
14.1	Vysíťovaný výrobek . . . . .	82
14.2	Kvalita sítě . . . . .	82
14.3	Vtokový systém pro analýzu . . . . .	83
14.4	Beam L/D ratio vtokového systému . . . . .	84
14.5	Nastavení teploty vtoku . . . . .	84
14.6	Nastavení teploty tvárnice . . . . .	85
14.7	Nastavení teploty tvárníku . . . . .	85
14.8	Vysíťovaná teplota . . . . .	85
14.9	Beam L/D ratio temperačního systému . . . . .	86
14.10	Procesní podmínky - 1 . . . . .	86
14.11	Procesní podmínky - 2 . . . . .	86
14.12	Procesní podmínky - 3 . . . . .	87
14.13	Procesní podmínky - 4 . . . . .	87
14.14	Procesní podmínky - nastavení vstřikovacího stroje 1 . . . . .	88
14.15	Procesní podmínky - nastavení vstřikovacího stroje 2 . . . . .	88
14.16	Procesní podmínky - nastavení vstřikovacího stroje 3 . . . . .	88
15.1	Fill time (Čas plnění) - 1 . . . . .	89
15.2	Fill time (Čas plnění) - 2 . . . . .	90
15.3	Shear rate (Rychlost smykové deformace) . . . . .	90
15.4	Clamp Force: XY plot (Uzavírací síla) . . . . .	91
15.5	Sink marks estimate (Propadliny) - 1 . . . . .	92
15.6	Sink marks estimate (Propadliny) - 2 . . . . .	92
15.7	Weld lines (Studené spoje) . . . . .	93
15.8	Air traps (Vzduchové kapsy) - 1 . . . . .	94
15.9	Air traps (Vzduchové kapsy) - 2 . . . . .	94
15.10	Average fiber orientation (Orientace vláken) . . . . .	95
15.11	Bulk temperature at end of the fill (Teplota na konci plnění) - 1 . . . . .	96
15.12	Bulk temperature at end of the fill (Teplota na konci plnění) - 2 . . . . .	96
15.13	Circuit coolant temperature (Teplota temperačního média) . . . . .	97
15.14	Circuit Reynolds number (Reynoldsovo číslo) . . . . .	98
15.15	Time to reach ejection temperature, part (Čas pro dosažení vyhazovací teploty, díl) . . . . .	99
15.16	Average temperature, part (Průměrná teplota, díl) . . . . .	100
15.17	Deflection, all effects: Deflection (Celková deformace od všech vlivů) - 1 . . . . .	101

---

15.18	Deflection, all effects: Deflection (Celková deformace od všech vlivů) - 2 . . . . .	101
15.19	Deflection, differential cooling: Deflection (Deformace vlivem chlazení) - 1 . . . . .	102
15.20	Deflection, differential cooling: Deflection (Deformace vlivem chlazení) - 2 . . . . .	102
15.21	Deflection, differential shrinkage: Deflection (Deformace vlivem smrštění) - 1 . . . . .	103
15.22	Deflection, differential shrinkage: Deflection (Deformace vlivem smrštění) - 2 . . . . .	103

**SEZNAM TABULEK**

10.1	Vybrané hodnoty materiálu . . . . .	55
11.1	Shrnutí výsledků jednotlivých variant . . . . .	61
13.1	Vybrane parametry vstřikovacího stroje . . . . .	81
16.1	Shrnutí výsledků jednotlivých variant . . . . .	104



**SEZNAM PŘÍLOH**

- P I. POHLED LEVÝ
- P II. POHLED PRAVÝ
- P III. ŘEZ A-A
- P IV. ŘEZ B-B
- P V. ŘEZ C-C
- P VI. ŘEZ D-D
- P VII. ŘEZ E-E
- P VIII. ŘEZ F-F
- P IX. KUSOVNÍK
- P X. TECHNICKÝ LIST VSTŘIKOVACÍHO STROJE