

Konstrukce formy pro vstřikování plastového dílu

Bc. Josef Klimeš

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Josef Klimeš
Osobní číslo: T22374
Studijní program: N0788A270008 Konstrukce nástrojů
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Konstrukce formy pro vstřikování plastového dílu

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

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

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

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo provést konstrukční návrh vstřikovací formy pro výrobu zadaného plastového dílu včetně provedení tokových analýz ověřující funkčnost formy.

Teoretická část diplomové práce obsahuje literární rešerši zabývající se polymerními materiály používaných při vstřikování, technologií vstřikování, konstrukcí vstřikovacích forem a postupem tvorby analýz.

Součástí práce je vytvoření 3D modelu zadaného dílu a následný konstrukční návrh vstřikovací formy. Byly provedeny tokové analýzy ověřující funkčnost navržené vstřikovací formy. Konstrukce vstřikovací formy je doplněna o výkres sestavy společně s kusovníkem a příslušnými pohledy.

Klíčová slova: konstrukce vstřikovací formy, analýza procesu vstřikování, vstřikování plastů

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to carry out a structural design of an injection mold for the production of a specified plastic part, including flow analyses verifying the functionality of the mold.

The theoretical part of the thesis includes a literature search dealing with polymeric materials used in injection molding, injection molding technology, mold design and the procedure of creating analyses.

The thesis includes the creation of a 3D model of the specified part and the subsequent design of the injection mold. Flow analyses were performed to verify the functionality of the injection mold. The design of the injection mold is complemented by an assembly drawing together with a bill of materials and relevant views

Keywords: injection mold design, injection molding process analysis, plastic injection molding

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Michalovi Staňkovi PhD. Za odborné vedení a rady při tvorbě diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	12
1.1 HISTORIE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.2 DĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.2.1 Plasty	14
1.2.2 Elastomery	16
1.3 VÝROBA GRANULÁTU	17
1.3.1 Sušení granulátu	18
1.3.2 Recyklace termoplastů	18
1.4 MÍCHÁNÍ A PŘÍSADY DO POLYMERŮ	18
2 VSTŘIKOVÁNÍ	20
2.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	21
2.2.1 Fáze plastikační	21
2.2.2 Fáze vstřikovací	22
2.2.3 Fáze dotlaku	23
2.2.4 Fáze chlazení	23
2.3 VADY VÝSTŘIKŮ Z TERMOPLASTŮ	23
2.3.1 Neúplný výstřik	24
2.3.2 Přetoky polymeru	24
2.3.3 Propadliny	24
2.3.4 Lunkry	25
2.3.5 Diesel efekt	25
2.3.6 Studené spoje	26
2.3.7 Jetting	26
2.4 PLNĚNÍ TVAROVÝCH DUTIN POLYMERNÍMI TAVENINAMI	27
3 VSTŘIKOVACÍ STROJ	28
3.1 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA	28
3.2 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA	29
3.3 OVLÁDÁNÍ VSTŘIKOVACÍHO STROJE	29
3.4 PERIFERIE	30
3.5 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE	31
4 VSTŘIKOVACÍ FORMA	32
4.1 VTOKOVÉ SYSTÉMY	34
4.1.1 Studený vtokový systém	34
4.1.2 Horký vtokový systém	37
4.2 TEMPERAČNÍ SYSTÉM	38

4.3	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	40
4.4	ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉM.....	41
4.5	MATERIÁLY FOREM.....	43
5	KONSTRUKCE VSTŘIKOVANÉHO DÍLU.....	44
5.1	PODMÍNKY KONSTRUKCE VSTŘIKOVANÉHO DÍLU	44
6	ANALÝZA TOKU POLYMERNÍ TAVENINY	47
6.1	PŘÍPRAVA A TYPY ANALÝZ.....	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	49
7	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	50
8	POUŽITÝ SOFTWARE	51
8.1	CATIA V5R19	51
8.2	DATABÁZE NORMÁLÍ MEUSBURGER	51
8.3	MOLDFLOW SYNERGY 2024.....	51
9	ZADANÝ DÍL.....	52
9.1	MATERIÁL ZADANÉHO DÍLU	53
10	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE	54
11	KONSTRUKCE FORMY	55
11.1	PODSESTAVY VSTŘIKOVACÍ FORMY	56
11.2	TVAROVÉ VLOŽKY	58
11.3	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	59
11.4	NÁVRH VTOKOVÉHO SYSTÉMU.....	60
11.5	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	63
11.6	TRANSPORTNÍ PRVKY	66
12	ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ.....	67
12.1	IMPORT 3D MODELU A TVORBA SÍTĚ	67
12.2	PROCESNÍ PODMÍNKY	68
13	VÝSLEDKY ANALÝZ.....	70
13.1	VÝSLEDKY ANALÝZY PLNĚNÍ A DOTLAKU	70
13.1.1	Analýza plnění (Fill time)	70
13.1.2	Teplota na čele taveniny (Temperature at flow front).....	72
13.1.3	Tlak v místě vtokového ústí (Pressure at injection location)	74
13.1.4	Rychlost smykové deformace (Shear rate)	75
13.1.5	Vzduchové kapsy (Air traps)	76
13.1.6	Studené spoje (Weld lines).....	77
13.2	VÝSLEDKY ANALÝZY TEMPERACE	79
13.2.1	Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)	80
13.2.2	Reynoldsovo číslo (Circuit Reynolds number).....	81

13.2.3	Tlak v temperačních kanálech (Circuit pressure).....	81
13.2.4	Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency).....	82
13.2.5	Čas pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	83
13.3	VÝSLEDKY ANALÝZY SMRŠTĚNÍ A DEFORMACE	84
13.3.1	Celková deformace (Deflection, all effects)	84
13.3.2	Deformace vlivem temperace.....	84
13.3.3	Deformace vlivem smrštění	85
13.4	DISKUZE VÝSLEDKŮ	86
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ	93
	SEZNAM TABULEK.....	96
	SEZNAM PŘÍLOH.....	97

ÚVOD

Lidé s plasty přichází do styku každý den. Je to díky jejich široké využitelnosti, velkém rozsahu vlastností a také ceně, na kterou se v dnešní době klade velký důraz. Polymerní materiály začaly přebírat místo konvenčním materiálům jako je například dřevo a sklo. Jeden z nejčastěji využívaných způsobů zpracování polymerních materiálů je jejich vstřikování do forem. Tato technologie lidem umožňuje vyrobit velkou řadu produktů z různých druhů polymerů o různě složitých tvarech. Výroba pomocí vstřikování je ekonomicky výhodná a díky ní lze zaručit výrobku požadované mechanické, chemické i fyzikální vlastnosti. Vstřikování polymerů se uplatňuje jak ve velkosériové a hromadné výrobě, tak ve výrobě menších sérií, kdy se vstřikovací forma vyrobí z levnějších a méně odolných materiálů. Vstřikovací formy pro vstřikování těchto menších sérií lze vyrobit jak konvenčně, tak i například 3D tiskem. 3D tisk se zde uplatňuje pro výrobu forem sloužící k prototypování výrobků a zkušebním tělískům.

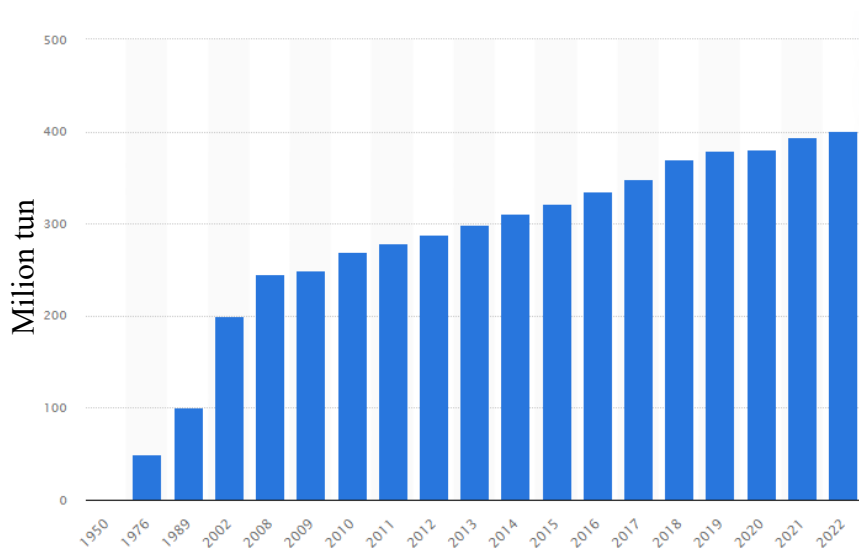
Při vstřikování polymerních materiálů je na konečný produkt kladen důraz na kvalitu a jeho vlastnosti, z toho důvodu musí být taktéž kladen důraz na samotný nástroj, což se ve výsledku odráží na konečnou cenu výrobku zároveň s cenou použitého materiálu. Konstrukce vstřikovací formy je poměrně složitým procesem, při němž se využívá řada 3D modelovacích softwarů a simulačních softwarů. Nástroje pro konstrukci vstřikovacích forem mají velkou pořizovací cenu, ale díky jejich použití se konstrukce stává efektivnější a při použití normalizovaných součástí výrobců se zaměřením na vstřikování se tento proces výrazně zkracuje.

I. TEORETICKÁ ČÁST

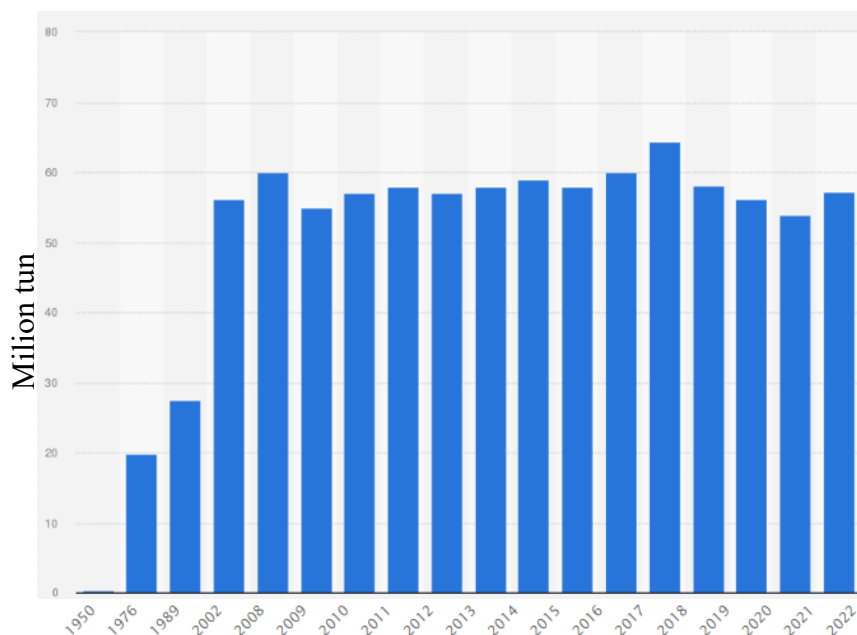
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymer je makromolekulární látka tvořena dlouhými řetězci, které jsou vzájemně spojeny ze základních jednotek. Základní jednotky řetězců polymerních materiálů se nazývají mery. Jedná se o převážně uhlovodíkové sloučeniny, které se vyrábí z ropy, uhlí, nebo také ze škrobu (materiál PLA, hojně využíván při 3D tisku). [2]

Díky vlastnostem polymerních materiálů a jejich využitelnosti častěji nahrazují konvenční materiály jako například dřevo, sklo, kov. Z tohoto důvodu světová produkce polymerních materiálů stoupá a společnost se začala kromě výroby taktéž zaměřovat na jejich recyklaci.



Obrázek 2. Světová produkce polymerních materiálů od roku 1950 do roku 2022 [1]



Obrázek 1. Evropská produkce polymerních materiálů od roku 1950 do roku 2022 [1]

1.1 Historie polymerních materiálů

První přírodní polymer se v Evropě začal využívat v osmnáctém století. Jedná se o přírodní kaučuk, který byl získáván z kaučukovníku brazilského a tvoří základní látku při výrobě pryže. Mezi první syntetické polymery patří Bakelit a Celuloid, konkrétně Celuloid byl v roce 1846 vyroben při pokusu nahradit slonovinu z roztoku nitrátu celulózy a kafru. Tento polymer se skládal z přírodní celulózy, a tak se nepovažuje za 100 % syntetický, tudíž první syntetický polymer je fenol-formaldehydová pryskyřice zvaná jako Bakelit, poprvé vyroben v roce 1907. Bakelit měl široké využití od elektrotechniky až po imitace dřeva v interiérech vozidel. Největší rozmach dodnes využívaných syntetických polymerních materiálů byl na konci dvacátého století. Materiály, jako polykarbonát (PC), Akrylonitrilbutadienstyren (ABS), se začaly na počátku osmdesátých let syntézou polymerních směsí využívat na nové materiály (ABS+PC) za pomoci látek umožňujících mísitelnost polymerů. Nové materiály pak poskytly požadované vylepšené vlastnosti. [2]

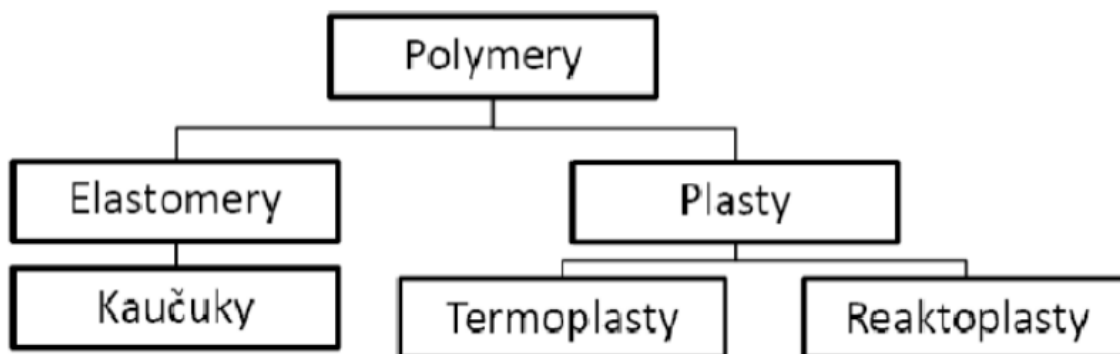
Současnost se věnuje vývoji struktury polymerního řetězce s cílem vytvořit takzvané hypervětvené polymery, které mají obrovské uplatnění v medicíně. Taktéž se klade velký důraz na recyklaci a vývoj biopolymerů. [2] [3]

1.2 Dělení polymerů

Polymerní materiály lze dělit dle několika kritérií. Lze je dělit dle chování při zátěži jak mechanické, tak tepelné, dále dle nadmolekulární struktury a dle jejich aplikace.

Vlastnosti polymerních materiálů souvisí s jejich molekulovou strukturou. Jde o tvar a délku makromolekul, velikosti sil působících mezi nimi a následně o uspořádání makromolekul vůči sobě. Při výrobě polymerních produktů se polymer nachází ve viskoelastickém stavu, který se následně chlazením mění na stav tuhý. Plasty lze v první řadě dělit na termoplasty a reaktoplasty dle toho, zda je lze opakovaným ohřevem přeměnit zpět do viskoelastického stavu následně do stavu tuhé látky. Další skupinou polymerních materiálů jsou elastomery. Elastomery lze při běžných podmínkách snadno deformovat bez jejich poškození a vzniklá deformace je do určité míry vratná. Existuje taktéž kombinace elastomeru a termoplastu, jedná se o termoplastické elastomery. Polymerní řetězce nejsou mezi sebou zesíťovány a

jejich soudržnost je pouze fyzikální a nikoliv chemická, tudíž se ohřevem dají přivést do viskoelastického stavu a následným ochlazením zaujmají stav tuhý. [2] [4]



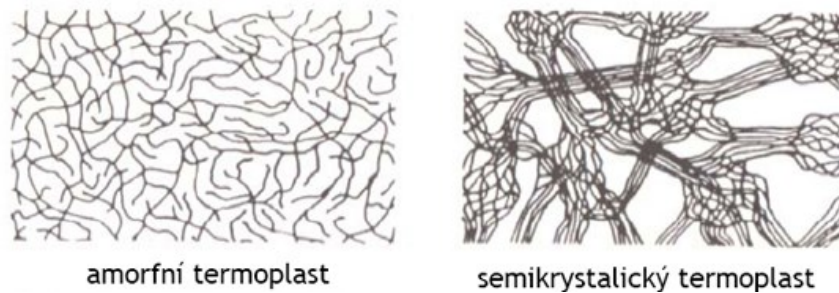
Obrázek 3. Rozdělení polymerů [A]

1.2.1 Plasty

Plasty se vyznačují především svou tvrdostí a tuhostí. Většinou vykazují trvalou deformaci při jejich mechanickém namáhání a při zvýšených teplotách pozvolna přecházejí do plastického stavu, kdy postupně měknou a nechávají se snadno tvarovat. [2] [3]

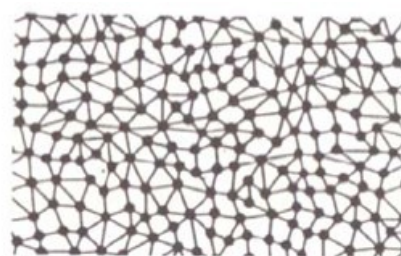
Termoplasty jsou nejvíce rozšířenou a zároveň nepoužívanější skupinou ze skupiny plastů. Definující vlastnost termoplastů je jejich schopnost opakovaně zaujmát plastický stav ohřevem s následným přechodem do stavu tuhého. Tento děj má pouze fyzikální povahu a nedochází zde k žádné chemické reakci mezi makromolekulárními řetězci polymeru. Termoplasty se následně dělí do dvou skupin. První jsou termoplasty amorfnní. Amorfnní termoplasty jsou definovány teplotou skelného přechodu T_g (glass) a teplotou, při které začíná plastický tok T_f (flow). Amorfnní termoplasty se pod teplotou skelného přechodu nachází v oblasti sklovitého stavu, kdy je materiál tvrdý a křehký. Při ohřevu nad teplotu skelného přechodu polymer zaujímá oblast kaučukovitého stavu. V tomto stavu lze polymer poměrně malou silou do značné míry deformovat, z tohoto důvodu už jej nelze považovat za tuhoun látku. Následným ohřevem nad teplotu plastického toku se materiál mění ve viskózní kapalinu. Dochází zde k přerušení vazeb mezi molekulami a je zde umožněn vzájemný volný pohyb makromolekul polymeru. Polymerní materiál ztrácí modul pružnosti. Při vstřikování se materiál nachází při teplotách nad teplotou plastického toku a vyhazování ze vstřikovací formy se uskutečňuje pod teplotou skelného přechodu. Produkty z amorfnních termoplastů se běžně doporučuje používat do teplot 10 až 20 °C pod teplotou skelného přechodu. [2] [3] [4]

Semikrystalické termoplasty jsou definovány taktéž teplotou skelného přechodu T_g , za kterou se nachází teplota tání T_m (melt). Teplota skelného přechodu zde taktéž odděluje oblasti sklovitého a kaučukovitého stavu jako u amorfních termoplastů. Při teplotách nad teplotou tání dochází k přeměně krystalické struktury na strukturu amorfní. Semikrystalické termoplasty vykazují větší míru smrštění při ochlazování než termoplasty amorfní. Děje se to vlivem rozdílů hustot krystalické a amorfní struktury při přechodu do tuhého stavu. Stupeň krystalinity tuhého stavu ovlivňují technologické podmínky při ochlazování, výsledná struktura je definována jako semikrystalická, protože není možné dosáhnout 100% krystalické struktury. Amorfní část struktury však zajišťuje materiálu houževnatost a ohebnost, krystalická struktura zase zajišťuje pevnost a tuhost. Při vstřikování se materiál nachází nad teplotou tání a vyhazování ze vstřikovací formy nemusí probíhat pod teplotou skelného přechodu, protože materiál dosahuje dostatečných vlastností pro vyhození už v kaučukovité oblasti. [2] [3] [4]



Obrázek 4. Nadmolekulární struktura termoplastů [5]

Reaktoplasty jsou polymerní materiály, které je možné přetvářet pouze určitý čas po ohřátí a tato změna nelze znovu opakovat. Při ohřívání se molekuly mezi sebou spojují v hustou prostorovou síť chemickými vazbami. Takto zesíťované molekuly jsou nerozpustné, netavitelné a nelze je tudíž převést zpět na taveninu. Reaktoplasty mají skvělou chemickou a tepelnou odolnost se zajištěnou tvrdostí a tuhostí. Zesíťovaný materiál poté nabývá amorfní struktury a doporučená oblast používání produktů je udávána pod teplotou degradace polymerních řetězců. [2] [3] [4]

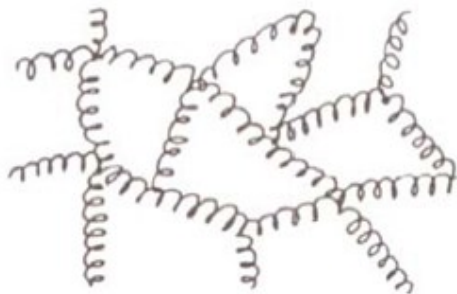


Obrázek 5. Nadmolekulární struktura reaktoplastů [5]

Termoplastické elastomery jsou velmi podobné pryžím. Termoplastické elastomery definuje jejich schopnost opakovaně přecházet ze stavu tuhého do stavu plastického jako u termoplastů. Ve struktuře termoplastických elastomerů se nachází tvrdé a měkké segmenty a tudíž se jedná o polymerní směsi. Měkké segmenty zastupují elastomery dodávající elastické vlastnosti a tvrdé segmenty zastupují termoplasty, dodávající schopnost opakované přeměny mezi tuhým a plastickým stavem. Klíčovým pro funkci termoplastických elastomerů je faktor vzájemné mísitelnosti polymerních látek tvořící segmenty. Výsledná struktura vazeb mezi řetězci obsahuje jak fyzikální, tak chemické vazby. Termoplastické elastomery se zpracovávají stejně jako termoplasty vstřikováním není výjimkou. [2] [6]

1.2.2 Elastomery

Elastomery jsou definovány vysokou pružností, nízkou tuhostí a lze je za běžných podmínek působením malých sil značně deformovat bez porušení. Tyto deformace jsou převážně vratné. Jsou tvořeny řídkou sítí chemických vazeb mezi molekulami řetězců a tudíž tvoří amorfní strukturu. Největším zástupcem této skupiny polymerů tvoří kaučuky, ze kterých se vyrábí pryže. [2] [3]



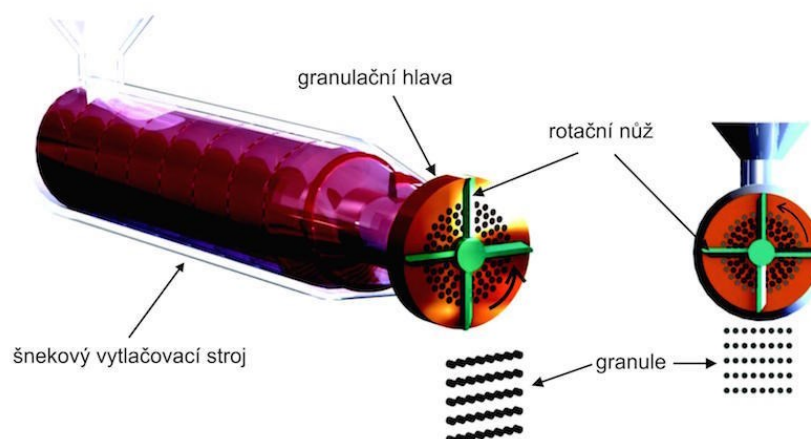
Obrázek 6. Nadmolekulární struktura elastomeru [5]

Kaučuky se vulkanizací přetváří na pryže. Vulkanizace kaučuků vytváří řídkou prostorovou síť mezi lineárními řetězci běžně za pomoci síry a výsledná pryž tím nabývá svých elastických vlastností a amorfní struktury s nízkou teplotou skelného přechodu. Průmyslově se ve velkém množství kromě pryží z přírodních kaučuků vyrábí také pryže ze syntetických kaučuků. Syntetické kaučuky nesou spoustu výhod a dovolují speciální využití. Kaučuky pro speciální použití se dělí na kaučuky teplovzdušné a olejivzdušné. Olejivzdušné kaučuky jsou charakterizovány svou polaritou, díky které odpuzují oleje. Teplovzdušné kaučuky jsou definovány možností použití jak při teplotách nízkých, tak vysokých. Obecně pryže své vlastnosti s teplotou mění málo a mají velký rozsah pracovních teplot. [2] [3]

1.3 Výroba granulátu

Polymerní materiál u technologie vstřikování se nejčastěji používá ve formě granulátu. Tvar granulí je v podobě válečků, čoček, krychliček nebo kuliček a tyto granule se dobře mísí s přídatným materiálem a granulát se snadno dávkuje. Do granulátu se přidávají i takzvané regeneráty, což je recyklát v podobě granulí získaný mletím či drcením. Proces výroby granulí se nazývá granulace a rozlišuje se na dvě základní metody. Granulace z pásu a granulace ze strun. Proces granulace ze strun může probíhat jak za tepla tak za studena a volba technologie výroby granulátu se odvíjí od vlastností zpracovávaného materiálu a jeho taveniny. Dalším kritériem při volbě technologie výroby je požadovaný výkon či ekonomika procesu. Granulace ze strun probíhá vytlačováním polymerní taveniny skrze vytlačovací hlavu, ve které se nachází několik otvorů o kruhovém průměru. Vytlačení materiálu získává tvar strun, které jsou následně sekány na jednotlivé granule buď za tepla nebo za studena. Granulace za tepla probíhá sekáním strun přímo za vytlačovací hlavou a pro tento proces nejsou vhodné materiály s nízkou viskozitou polymerní taveniny. Při granulaci za studena se vytlačované struny chladí kapalinou a jejich sekání probíhá po ochlazení na bezpečnou teplotu. Materiál je poté nutno sušit skrze jeho nasákavost. Sekání strun probíhá v sekacím ústrojí, které je možné umístit do chladicí lázně pro zajištění dostatečného chlazení nožů, které můžou některé polymerní materiály při sekání roztírat. [4] [6]

Granulace z pásu probíhá řezáním desek vytlačovaných z vytlačovacích hlav na tenké proužky, které se následně sekají do tvaru granulí stejně jako při granulaci ze strun. [6]



Obrázek 7. Ukázka granulace ze strun za tepla [8]

1.3.1 Sušení granulátu

Při sušení granulátu jde o odstranění podílu vlhkosti ze struktury termoplastu na hodnotu vhodnou pro vstřikování nabytého z vlhkosti okolního prostředí nebo chlazení. Materiál s vysokou vlhkostí při vstřikování vykazuje nežádoucí jevy, které se na produktu mohou podepsat jak vzhledově (bubliny) tak snížením mechanických vlastností. Materiál s příliš nízkým obsahem vody následně produktu zajišťuje taktéž snížené mechanické vlastnosti, především zvyšuje křehkost, proto je důležité materiál sušit na hodnoty určené výrobcem. Materiál, který je schopen přijímat vlhkost z plynné fáze se označuje jako navlhavý. Nasákový materiál je poté materiál, který má schopnost přijímat vlhkost z kapalného prostředí. Tato vlastnost polymerů poté zajišťuje vratnost procesu sušení. [6] [9]

1.3.2 Recyklace termoplastů

Dnešní vývoj zpracování polymerů se čím dál více zabývá i samotnou recyklací polymerních produktů. Velký nárůst nahrazování konvenčních materiálů polymery zvýšil poptávku po polymerních materiálech, jejich cenu a také velký nárůst odpadů. Výrobci jsou tudíž nuceni zabývat se i jejich recyklací pro snížení výrobních nákladů produktů a snížení celkových odpadů. Recyklovaný materiál se vyskytuje ve dvou formách, jedná se o regenerát a regranulát. Regenerát je materiál, který byl drcen či mlet a je možné jej přidávat ke granulátu zpracovávaného materiálu (vhodné pro teplotně citlivé materiály), nebo ho znovu přetvořit na granule, které se následně s granulátem zpracovávaného materiálu míchají. Proces výroby nových granulí z recyklátu je však ekonomicky náročný, naopak použití drceného regenerátu je ekonomicky příznivější, avšak se zde vyskytuje nevýhoda v podobě rozdílných velikostí částic. Recyklovaný materiál se míchá se zpracovávaným materiálem z důvodu výsledných vlastností. Výrobek z čistě recyklovaného materiálu totiž vykazuje horší kvalitu a vlastnosti oproti výrobku z nového, nezpracovaného materiálu. [4]

1.4 Míchání a přísady do polymerů

Mícháním dochází ke smíchání dvou složek pomocí míchacího zařízení tak, aby bylo dosaženo požadované rovnoměrnosti rozložení jednotlivých složek a výsledný produkt dosahoval určité homogenity. Míchání se dělí dle odporu, který kladou míchané částice proti míchací síle. První je míchání materiálů, které kladou nepatrný odpor a druhý je míchání materiálů s velkým odporem. Příklad pro míchání materiálů s velkým odporem je například míchání kaučuků s přísadami, kdy je hmota ve změkklém stavu a míchání probíhá

v takzvaných hnětičích. Příklad pro míchání s malým odporem je míchání práškových barev, které probíhá v míchačkách různého typu (bubnové, fluidní, sudové).

Přísady do polymerů se používají za účelem změny vlastností materiálu jak při zpracování, tak výsledného produktu. Používají se plniva ve formě prášků či vláken, které mění především fyzikální a mechanické vlastnosti produktu. Plniva ve formě vláken produkt vyztužují a zvyšují jeho pevnost, na rozdíl od plniv ve formě prášků, které často tyto vlastnosti snižují. Barviva se přidávají pro získání požadovaného odstínu produktu daného zadavatelem. Dále pak změkčovadla, která snižují tvrdost produktu a zvyšují jeho ohebnost. Nadouvadla za účelem vytvoření lehčené struktury a stabilizátory, které zajišťují vyšší odolnost proti UV záření, stárnutí nebo teplotě při zpracování. [10]

2 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování spadá mezi nejrozšířenější plastikářské technologie a více než jedna třetina všech produktů z termoplastických polymerů je právě vyráběna technologií vstřikování. Proces je velmi výhodný pro hromadnou výrobu a to i tvarově složitých výrobků. Produkty vyrobeny vstřikováním termoplastů jsou charakteristické tvarovou a rozměrovou přesností a vysokou kvalitou povrchu bez nutnosti dalších úprav. V oblasti vstřikování se čím dál více setkáváme i se vstřikováním kaučuků a reaktoplastů. [11] [13]

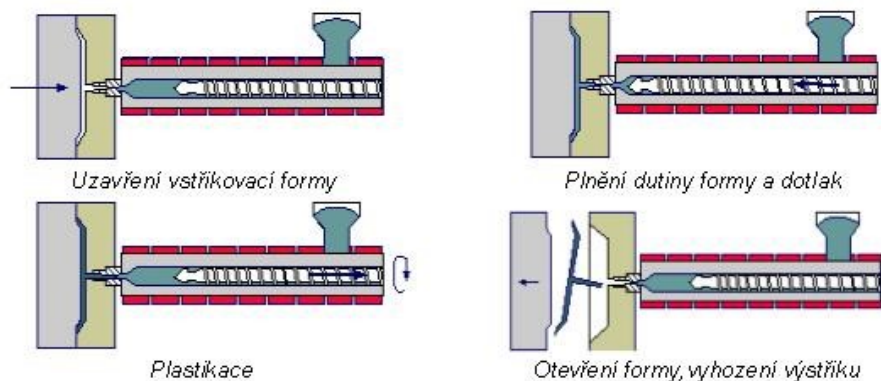
2.1 Princip technologie vstřikování

Vstřikování polymerních materiálů je cyklický proces, při kterém se granulát zpracovávaného polymeru plastikuje do stavu taveniny, která je následně vysokou rychlostí vstříknuta do temperované tvarové dutiny formy. Po vstříknutí je obsah dutiny ochlazován a dojde tak k zatuhnutí polymeru dle tvaru dutiny, odkud je následně při otevření formy vyhozen. Vstřikovací proces lze rozdělit na jednotlivé fáze ve vstřikovacím cyklu, ve kterém je časově nejnáročnější fáze ochlazování. Při vstřikování termoplastů platí několik pravidel. [9] [11] [13]

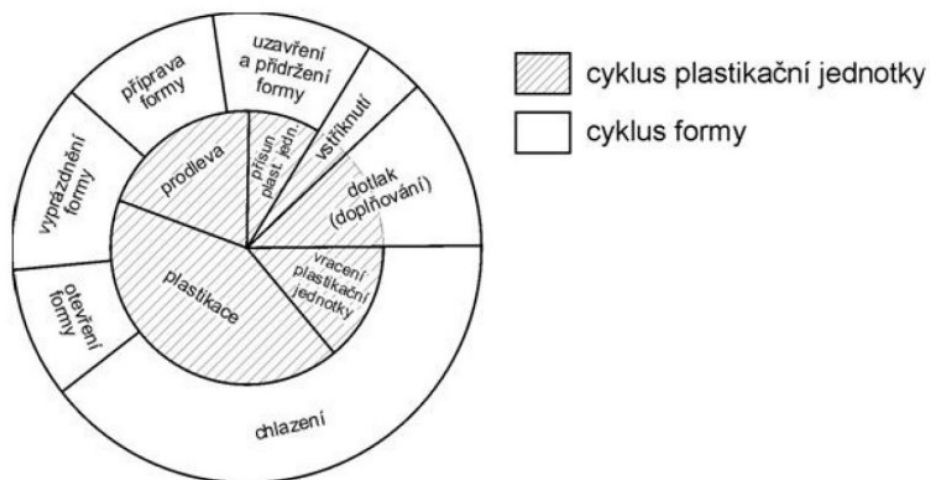
- Teplota taveniny je volena dle vstřikovaného materiálu a je třeba volit optimální hodnotu, protože při nízké teplotě taveniny by mohlo docházet ke špatnému zaplnění dutiny formy, naopak vysoká teplota může způsobovat degradaci materiálu.
- Velikost vstříknuté dávky je zvolena tak, aby byla tvarová dutina i s vtokovými rozvody kompletně zaplněna i s ohledem na smrštění vyvolané chlazením a dotlakem.
- Vstřikovací tlak musí být dostačující pro zaplnění formy s rozvodnými kanály.
- Vstřikovací rychlost souvisí se vstřikovacím tlakem a vstřikovacím časem, proto musí být rychlost vstřikování volena tak, aby nedošlo k zatuhnutí taveniny bez úplného zaplnění dutiny formy.
- Dotlak zaplňuje vytékání taveniny z dutiny formy a umožňuje doplnit dutinu formy taveninou o objemu rovnajícím se smrštěním vzniklým chlazením.
- Chlazení je časově nejnáročnější fáze vstřikovacího cyklu, která zaručuje teplotu pro bezpečné vyhození výstřiku z formy.

2.2 Vstřikovací cyklus

Proces začíná vstupem polymerního materiálu v pevném stavu, který je většinou ve formě granulátu, do násypky, která zásobuje vstřikovací stroj zaručuje kontinuitu dávkování. Granulát je z násypky dopravován nejčastěji šnekem do tavicí komory, kde vlivem disipace a ohřevu z topných pásů vstřikovacího stroje dochází k plastikaci. Polymerní tavenina je následně skrze vtokovou vložku vstřikována do tvarové dutiny formy. [9] [5]



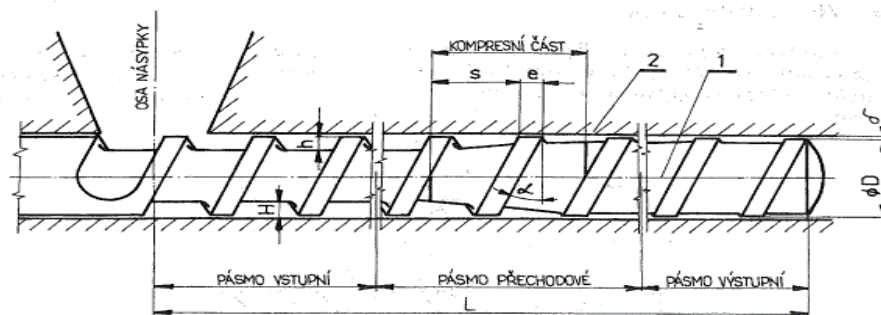
Obrázek 9. Průběh vstřikování [5]



Obrázek 8. Vstřikovací cyklus [13]

2.2.1 Fáze plastikační

Jedním z faktorů ovlivňující optimální plnění tvarové dutiny je zajištění teplotní homogenity taveniny v dávce, která bude vstřikována. Teplotní homogenitu lze zajistit správným nastavením vstřikovacího stroje, kdy se jedná o nastavení teploty jednotlivých topných pásů, nastavení otáček šneku. Teplotní nehomogenita je spojena s viskozitou taveniny, která se na výstřiku může projevit v podobě nekvalitního povrchu. Na takovém povrchu poté lze pozorovat tokové čáry, změny lesku, viditelnou orientaci plniv a další. [9]



1- šnek, 2- pracovní válec, D- průměr šneku, L- délka šneku, S- stoupání šneku, e- vodící plocha závitu, h- hloubka šnekového profilu, H- hloubka kanálu, δ - poloviční vřle, α - úhel stoupání

Obrázek 10. Příklad šneku pro znázornění jednotlivých zón [12]

Plastifikační fáze je nejčastěji zajišťována plastikační jednotkou s otáčejícím se šnekem, který se v axiálním směru zpětně, v případě hromadění vstřikovací dávky, a dopředně, v případě vstřikování dávky do dutiny formy. Šnek plastikační jednotky má nejčastěji tři funkční pásma a hloubka kanálu se po celé délce šneku mění. Standartní šnek začíná vstupním pásmem, které se nachází pod násypkou a jeho funkce je odběr materiálu a kontinuálně jej transportovat do přechodového pásma. Ve vstupním pásmu nesmí v žádném případě začít docházet k tavení materiálu. Následuje pásmo přechodové, ve kterém se mění hloubka kanálu a materiál je zde stlačován a taven v disipaci a přítlakem k vyhřívané stěně válce. Na konci šneku se nachází výstupní pásmo, které zajišťuje homogenizaci a míchání polymerní taveniny. Šnek charakterizuje jeho délka jednotlivých pásem a způsob zakončení šneku. Tyto charakteristiky se volí dle zpracovávaného materiálu. Plastikační jednotka obsahuje hydraulický systém, který umožňuje šneku pohyb vpřed a vzad pro umožnění přítlaku trysky vstřikovacího stroje k vtokové vložce vstřikovací formy. [9] [12]

2.2.2 Fáze vstřikovací

Vstřikovací doba je zásadní pro kompletní zaplnění tvarové dutiny polymerní taveninou a odvíjí se od rychlosti posuvu šneku k trysce. Vstřikovací čas se mění s velikostí a tvarem dutiny formy, s druhem vstřikovaného polymeru a s typem vtokových kanálů a procesních parametrů vstřikování. Rychlost vstřikování ovlivňuje viskozitu taveniny, tudíž s vyšší rychlostí vstřikování je materiál tekutější a makromolekuly polymeru mají vhodnější orientaci než při vstřikování za nižších rychlostí. Při překročení kritické rychlosti vstřikování může docházet k degradaci vlivem překročení dovolené rychlosti smykové deformace. Vstřikovací stroj může během vstřikování měnit tuto rychlost, například z důvodu odvodu vzduchu formy, ale běžně se volí neměnná rychlost vstřikování pro snížení šance tvorby zmetků. Objem vstřikovací dávky je zapotřebí zajistit tak, aby při každém cyklu byla tato

dávka stejná. To se zajišťuje různými uzávěry šneku, které slouží k uzavření taveninového kanálu a tím zabrání další průchod taveniny před čelo šneku. Po konci vstřikování proběhne přeprnutí vstřikovacího tlaku na dotlak, kdy tato změna musí probíhat plynule bez fluktuací, jelikož jakýkoliv výraznější propad se podepíše na výstřiku v podobě zvýšení vnitřního pnutí. [9] [11]

2.2.3 Fáze dotlaku

Tato fáze slouží k minimalizování smršťení a deformací vlivem chlazení, k odstranění propadlin, trhlin, bublin a zlepšení povrchových vlastností vlivem přitlačení polymeru na stěny tvarových dutin vstřikovací formy. Dotlak je charakterizován procentuální hodnotou vstřikovacího tlaku a jeho času působení. Tyto parametry je nutno volit tak, aby bylo dosaženo potřebných výhod, které fáze dotlaku přináší a zároveň tak, aby tato fáze zbytečně neprodlužovala čas vstřikovacího cyklu. Zejména se parametry dotlaku volí dle druhu vstřikovaného materiálu a tloušťek stěn výrobku. [9]

2.2.4 Fáze chlazení

Chlazení tvarové dutiny probíhá od doby, kdy se tvarová dutina formy zaplní polymerní taveninou až do doby, kdy proběhne vyhození výstřiku ze vstřikovací formy. Při chlazení jde o to, aby chlazení bylo co nejefektivnější a jeho doba byla co nejkratší. Chlazení však musí zajistit dostatečné ochlazení výstřiku na teplotu, kdy má dostatečné mechanické vlastnosti pro vyhození z dutiny formy bez žádného poškození v průběhu vyhazování. Rychlost ochlazování ale ovlivňuje krystalickou strukturu a smršťení. Z tohoto důvodu se pro výrobky s vysokou kvalitou povrchu chladí pomaleji, protože při vyšších teplotách formy polymer získává větší podíl krystalinity. Fáze chlazení je nejdelší fází ze vstřikovacího cyklu, která ovlivňuje kvalitativní faktory výstřiku a je nutné parametry jako teplotu chladicího média a dobu chlazení variovat pro nalezení střední cesty, která ekonomicky uspokojí jak odběratele, tak výrobce při dodržení všech vlastností produktu. [9] [11]

2.3 Vady výstřiků z termoplastů

Při procesu vstřikování vznikají v produktech různé vady, které je snaha při výrobě minimalizovat. Proces vstřikování je cyklický a není možné dosáhnout stejný průběh technologických a procesních parametrů každého cyklu. Vady výstřiku však nezpůsobuje pouze proces výroby, ale vady mohou vznikat i nesprávnou konstrukcí vstřikovaného dílu,

nedostatečným zpracováním vstřikovací formy nebo špatnou volbou vstřikovacího stroje. Vzniklé vady lze z produktu odstranit. Odstranění těchto vad si žádá znalosti o jakou vadu se jedná a jak tato vada vzniká. Některé vady je možno odstranit upravením technologických podmínek, což je nejjednodušší a nejlevnější cesta. Jiné vady změnou technologických podmínek změnit nelze a proto se řeší například úpravou vstřikovací formy, změnou vstřikovacího stroje či změnou vstřikovaného materiálu. [6] [9] [27]

2.3.1 Neúplný výstřik

Vada vzniká tehdy, když polymerní tavenina úplně nezaplňuje celý objem tvarové dutiny vstřikovací formy. Obvykle se s takovou vadou můžeme setkat v prostorech, které jsou nejdále od vtokového ústí, v místech s velmi malou tloušťkou stěny nebo v místech, kde se setkává více proudů polymerní taveniny. Příčinou většinou bývá špatné umístění vtokového ústí nebo jeho malý průřez, špatná konstrukce vstřikovaného produktu, nízká viskozita polymerní taveniny, která je úzce spojena s teplotou jak taveniny, tak formy, malý objem vstřikované dávky nebo malý vstřikovací tlak. [6] [9]

2.3.2 Přetoky polymeru

Zatečením polymerní taveniny do spár mezi jednotlivými částmi vstřikovací formy vznikají přetoky. Spáry se ve vstřikovací formě objevují v případě špatného slícování jednotlivých částí formy, opotřebením dělicích rovin nebo špatně navrhnutým odzdušením vstřikovací formy. Příčiny vady přetoků může být i malá uzavírací síla vstřikovacího stroje, příliš velká viskozita polymerní taveniny nebo vysoký vstřikovací tlak. [6] [9]

2.3.3 Propadliny

Propadliny se běžně tvoří v místech s příliš velkou koncentrací vstřikovaného materiálu a vznikají kvůli smrštění. Vrstvy, které jsou v nejbližším kontaktu s povrchem tvarové dutiny se ochladí jako první a zatuhnou. V jádru se však stále nachází materiál v tekutém stavu a rozdílná teplota mezi těmito vrstvami má za následek rozdílné smrštění. Tekutý materiál v jádru při chladnutí začne přitahovat zatuhlé vrstvy k sobě a na povrchu se objeví propadlina. Propadliny často můžeme na výstřicích pozorovat v místech pod žebry nebo v místech setkání více stěn výstřiku. Částečně lze snížit jejich velikost nastavením procesních parametrů vstřikování zvýšením dotlaku. [6] [9]

2.3.4 Lunkry

Jedná se o vzduchové dutiny, které tvoří skrytou vadu výstřiku a snižují tak jeho pevnost. U transparentních výstřiků taktéž zhoršují optické a vzhledové vlastnosti. Vznik lunkrů je spojován s vlhkým materiálem, špatnou konstrukcí vstřikovaného produktu, špatně navrhnutým odvzdušněním vstřikovací formy. Lunkry mohou také vznikat podobně jako propadliny, kdy vrstvy nacházející se nejbliž kontaktu s povrchem dutiny formy jsou dostatečně zatuhlé na to, aby je pomaleji tuhnoucí jádro přitáhlo. Při stažení jádra se tudíž horní zatuhlé vrstvy oddělí a vznikne mezi nimi prázdný objem. [6] [9]



Obrázek 11. Vzduchové bubliny ve výstřiku [14]

2.3.5 Diesel efekt

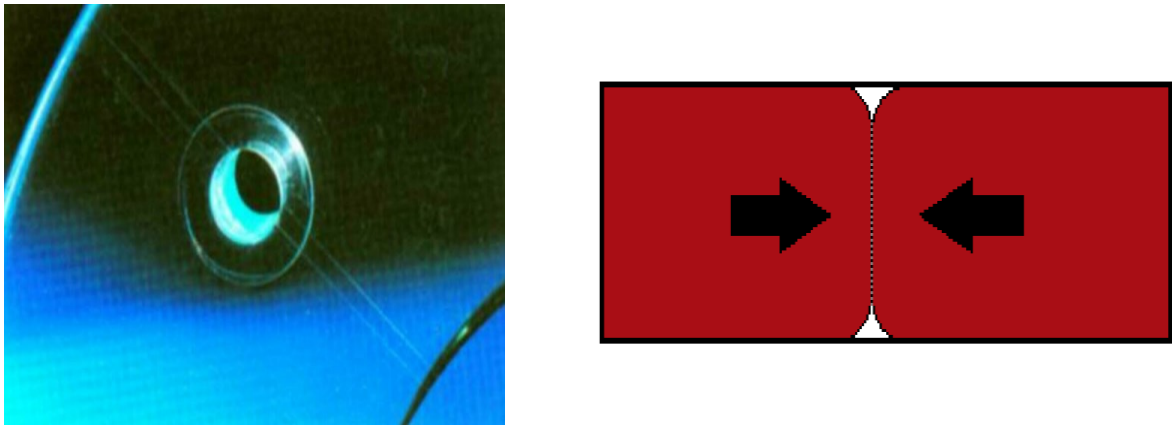
Diesel efekt je označením pro spálená místa s nepravidelným tvarem. V průběhu plnění tvarové dutiny formy se v určitém místě nahromadí vzduch, který nemá kudy uniknout a jeho kompresí se ohřívá, což způsobuje lokální degradaci polymerní taveniny vlivem vysoké teploty. Vada lze řešit zlepšením odvzdušňování. [6]



Obrázek 12. Spálené místo na výstřiku [15]

2.3.6 Studené spoje

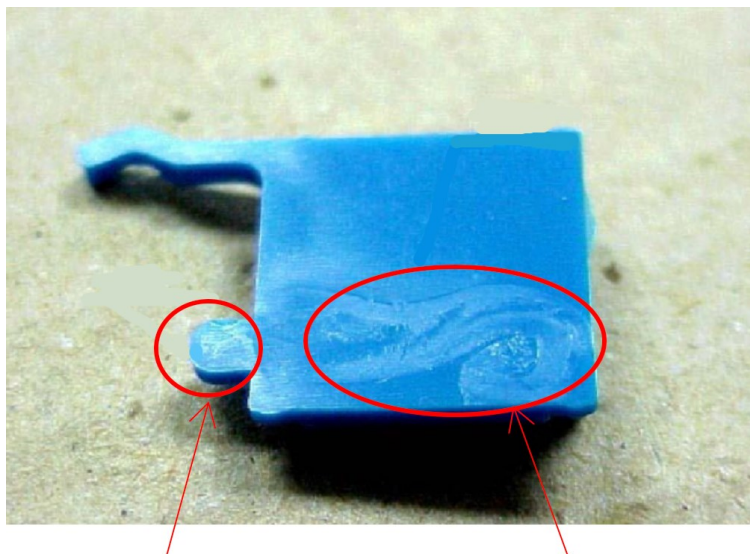
Studené spoje zapříčiňují především snížené mechanické vlastnosti výrobku v místech, kde dochází ke spojení dvou či více čel proudů polymerní taveniny. Lze je pozorovat i pouhým okem na povrchu výstřiku a nejčastěji se nachází v místech, kde dochází k rozdělení proudu, obtékáním okolo tvarového prvku a následným spojením čel polymerní taveniny. Pevnost studeného spoje definuje teplota čel polymerní taveniny v oblasti spojení. S vyšší teplotou vykazují studené spoje lepší mechanické vlastnosti. Eliminaci lze provést změnou vtokového systému, nebo lze použít takzvané kaskádové plnění, kdy horké trysky plní dutinu formy nezávisle na sobě a nedochází k rovnoměrnému plnění. [6] [9]



Obrázek 13. Studený spoj [16]

2.3.7 Jetting

Jetting, neboli volný proud taveniny je vada, kdy proud polymerní taveniny je vstřikován do volného prostoru dutiny vstřikovací formy a materiál jim volně postupuje. Vtoková ústí se běžně volí tak, aby docházelo k fontánovému zaplnění dutiny vstřikovací formy. Vada se na výstřiku projevuje jako mechanický a vzhledový nedostatek, který lze řešit změnou procesních podmínek vstřikování. V případě, že změna procesních podmínek nevyřešila problém jettingu, je nutné změnit umístění vtokového ústí. Vtokové ústí je možno umístit tak, aby polymerní tavenina při vstřiku polymerní tavenina narazila do protilehlé stěny dutiny a nedocházelo tak k vytlačování do volného prostoru. [6]



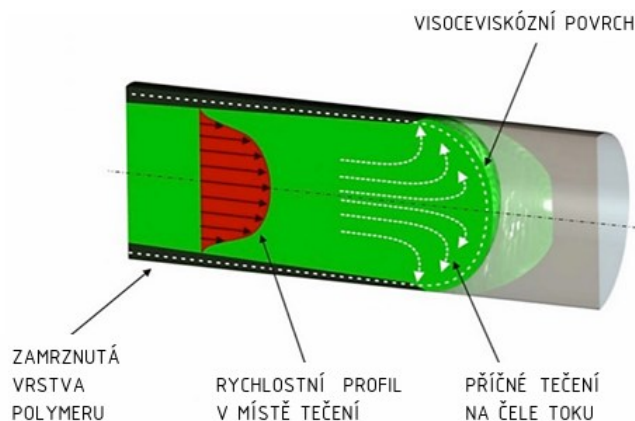
Vtokové ústí

Jetting

Obrázek 14. Ukázka jettingu [17]

2.4 Plnění tvarových dutin polymerními taveninami

Polymerní taveniny při toku vykazují neneutonské a pseudoplastické chování a jejich tok se značně liší od tečení nízkomolekulárních kapalin jako je například voda. Během tečení polymerní taveniny dochází k časově neustálenému toku, což znamená, že na chladné stěně tokového kanálu tavenina při kontaktu okamžitě tuhne a tvoří tenkou a nepohyblivou vrstvu materiálu, která se následně chová jako izolant, jenž brání materiálu nacházejícím se pod ním k chladnutí. Tavenina v tomto směru tuhne v rostoucí vrstvě a směrem ke středu tokového kanálu polymerní tavenina teče tak, že na povrchu této vrstvy je nenulová rychlost tečení. Tento typ tečení se nazývá fontánový tok a jeho vlastnostmi je nejvhodnější pro plnění tvarových dutin vstřikovacích forem polymerními taveninami. [9]

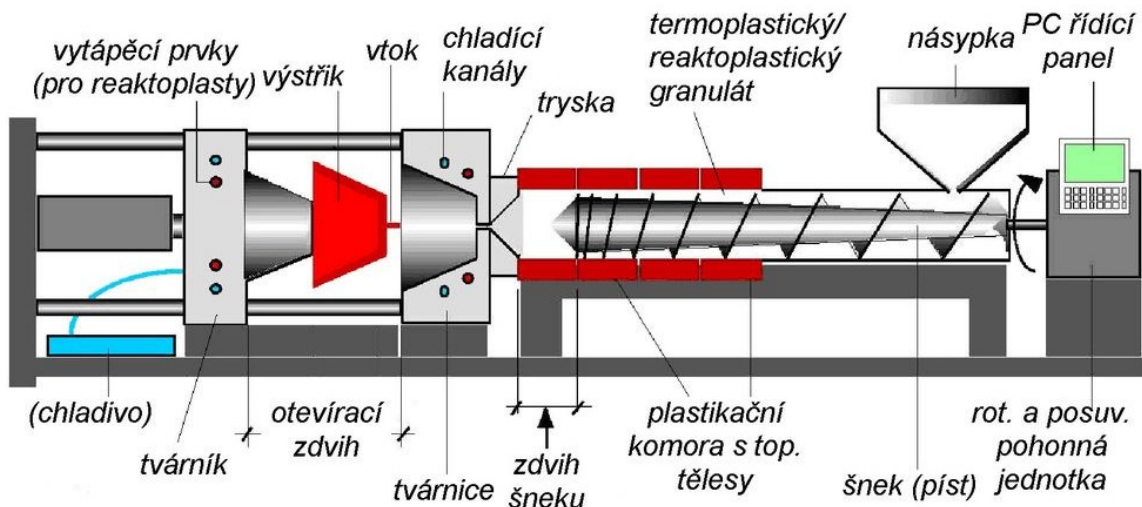


Obrázek 15. Fontánový tok taveniny [8]

3 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Základem technologie vstřikování jsou vstřikovací stroje a jejich periferie. Konstrukcí a výrobou vstřikovacích strojů se zabývá spousta světových firem, jako například Arburg, Battenfeld nebo Engel, které vstřikovací stroje rozdělují dle pohonu na hydraulické, což jsou nejstarší a zároveň stále nejpoužívanější, elektrické a hybridní. Rozdělení také probíhá podle orientace vstřikování na horizontální a vertikální a v neposlední řadě dělení dle typu vstřikovací jednotky na šnekové a pístové. [18]

Samotný vstřikovací stroj se skládá ze vstřikovací a uzavírací jednotky. Které obsahují prvky zajišťující správnou funkci stroje, ovládací prvky a samozřejmě prvky bezpečnostní. Tyto vstřikovací stroje jsou s ohledem na variabilitu technologie vstřikování konstruovány tak, aby byly co nejuniverzálnější a byla možnost je používat při vstřikování různých druhů materiálů do vstřikovacích forem o různých rozměrech a konstrukcích. Firmy dodávající vstřikovací stroje mají taktéž samozřejmě ve svém repertoáru i velmi specializované stroje na speciální aplikaci a zabývají se i zakázkovou výrobou. [6] [18]



Obrázek 16. Schéma vstřikovacího stroje [5]

3.1 Vstřikovací jednotka

Proces technologie vstřikování začíná ve vstřikovací jednotce stroje. Vstřikovací jednotka má za úkol přeměnit termoplastický materiál ve formě granulí na polymerní taveninu, kterou následně vstříkne vysokou rychlostí do tvarové dutiny vstřikovací formy. Nejčastěji používané vstřikovací jednotky jsou šnekové, které ve své první vstupní části obsahují násypku, do které je přiváděn granulát. Druhou částí je přechodové pásmo, obsahující topné pásy, za kterou se nachází třetí a také poslední výstupní část. Výstupní část je zakončena

vstříkovací tryskou, která těsně dosedá na vtokovou vložku vstříkovací formy. V obalu vstříkovací jednotky se skrze všechny pásma nachází šnek, který svou rotací odebírá granulát z násypky, následně ho v přechodovém pásmu přitlačuje na vyhřívanou stěnu válce, kde dochází k tavení materiálu ohřevem a vlivem disipace. V přechodovém pásmu se hloubka kanálu mezi šnekem a válcem zmenšuje za účelem komprese materiálu. Poslední výstupní část slouží kromě nahromadění vstříkované dávky polymerní taveniny také k homogenizaci taveniny. Ve výstupním pásmu je polymerní tavenina míchána a tak se jí zajišťuje dobré teplotní rozložení. Pracovní šnek vstříkovací jednotky kromě rotačního pohybu také koná pohyb horizontální. Tímto pohybem se připravuje vstříkovaná dávka polymerní taveniny, kdy při přípravě šnek odjíždí dozadu, přičemž se před jeho čelem hromadí tavenina. Ve fázi vstříkování šnek přeruší svůj rotační pohyb a pohybem vpřed dojde ke vstříknutí polymerní taveniny. Šnek v této fázi funguje jako píst, který při začátku dopředného pohybu nejprve uzavře zpětný ventil, aby byl zajištěn správný objem dávky taveniny ke vstříku. [18]

3.2 Uzavírací jednotka

Zajišťuje otevírání a zavírání vstříkovací formy v dělicích rovinách a vyvíjí na ní dostatečný tlak v průběhu vstříkování tak, aby se forma vlivem velkých tlaků vyvíjených při vstříku taveniny neotevřela. Uzavírací jednotka musí zajistit správné upnutí nástroje, tedy vstříkovací formy. Upnutí nástroje probíhá na dvě upínací desky stroje, které se rozlišují na pevnou a pohyblivou. Pevná upínací deska je součástí rámu stroje obsahující otvor, do kterého vjíždí vstříkovací tryska. Pohyblivá upínací deska se nachází naproti desky pevné a zajišťuje kromě otevření vstříkovací formy také vyhození výstříku z tvarové dutiny formy. Pohyb upínací desky zajišťuje uzavírací mechanismus, který je rozdělen do dvou fází. První fází je uzavření formy, kdy uzavírací mechanismus působí malými silami dostatečnými pro uzavření. Druhá fáze se nazývá fáze zamykací, kdy na vstříkovací formu působí síly, které zabrání otevření formy při vstříkování. Uzavírací mechanismus se rozlišuje dle způsobu vyvolání těchto sil a pohybu na elektromechanické a hydromechanické. Proces vyhození výstříku z dutiny formy pohyblivá deska zajišťuje pomocí jednoduchých dorazů, kdy při odjetí na určitou vzdálenost tento doraz vytáhne vyhazovací systém a následným pohybem zpět jej zatáhne. [13] [18]

3.3 Ovládání vstříkovacího stroje

Reprodukovatelnost technologických parametrů vstříkovacího stroje je zajištěna řídicími a regulačními prvky, o které se stará procesorová technika umožňující různá grafická rozhraní

pro přehlednost. Řídicí systém umožňuje kromě nastavení také kontrolu parametrů a jejich případné změny a úpravy. Kvalita těchto prvků jde ruku v ruce s kvalitou procesu a tím určuje kvalitu celého stroje. Běžně se u stroje může obsluha setkat s možností nastavení parametrů ovlivňující teplotu taveniny a její homogenizaci nebo s nastavením vstřikovacího tlaku, rychlosti vstřikování či chlazení. [18]

3.4 Periferie

Periferní zařízení slouží k zajištění správné funkce vstřikovacího stroje a tudíž celého cyklu, nebo k doplnění různých funkcí, například v případě automatizované výroby. Tyto periferie se jako primární zařízení zapojují přímo ke vstřikovacímu stroji. V případě periferií doplňující stroj o nové funkce se jedná o zařízení sekundární. Do periferií lze zařadit temperační jednotky, sušárny granulátu, roboty, dopravníky, manipulátory, kontrolní systémy a jiné. [18] [6]



Obrázek 17. Temperační jednotka od společnosti Super Sun [20]

3.5 Volba vstřikovacího stroje

Pro výběr vstřikovacího stroje platí několik pravidel. Vstřikovací stroj se především volí dle vyráběného dílu. Zde se zohledňuje jeho hmotnost a rozměry spojené s velikostí formy, násobnost formy a také požadavek na přesnost a kvalitu výstřiku.

Vstřikovaný objem taveniny by neměl překročit 90 % maximální kapacity stroje z důvodu nutné rezervy vstřikovacího stroje při dotlakové fázi. Vstřikovací stroj musí mít poté dostatečné rozměry co se týče upínání vstřikovací formy a následnou manipulací. Dále zde hraje roli i hmotnost vstřikovací formy a rozměry mezi upínacími deskami stroje při otevírání a uzavírání formy.

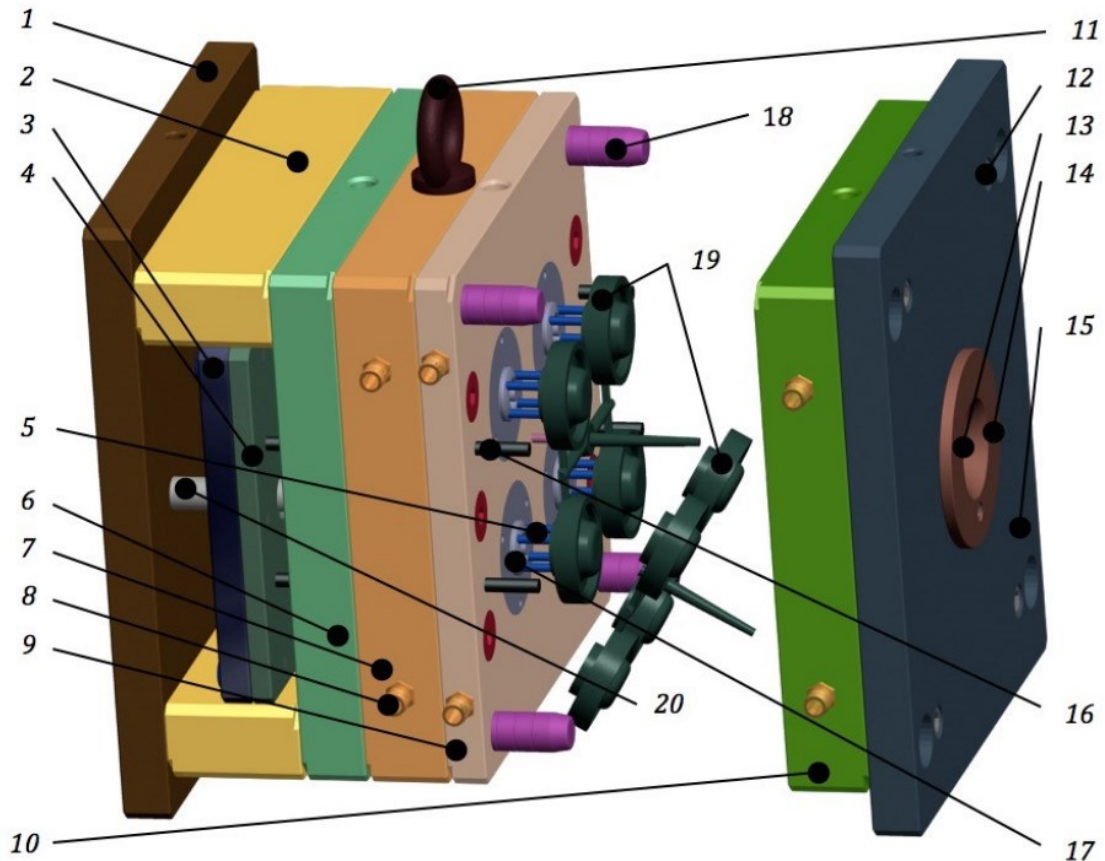
Všechny hodnoty by měly být voleny tak, aby případnými změnami procesních podmínek či manipulací byla zajištěna dostatečná rezerva.

4 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je nástroj, kterým se realizuje výroba vstřikovaných polymerních produktů, který se upíná na upínací desky vstřikovacího stroje. Vstřikovací forma musí splňovat funkce dopravu materiálu s následným zaplněním dutiny polymerní taveninou s následným odvodem přebytečného tepla polymerní taveniny a odformování výstřiku. Dutina vstřikovací formy je udává po ochlazení polymerní taveniny výsledný tvar a rozměry výstřiku zároveň s jeho povrchovými vlastnostmi. Kvalitu vstřikovací formy udávají technické požadavky, které zajišťují její správnou funkci a také zajišťují výrobu požadovaného množství výstřiků o dané kvalitě a přesnosti. Technické požadavky také zohledňují aspekty spojené s manipulací formy a jejím servisem. Kvalitu forem ale taktéž udávají požadavky ekonomické, které se soustředí na proces výroby formy, její produktivitu a spotřebou materiálu. Vstřikovací formu tvoří nosný rám zajišťující tuhost a přesnost lícování všech komponentů a bezpečným vedením pohybových částí formy. Rám vstřikovací formy tvoří jednotlivé desky společně s tvarovými, spojovacími, vodícími a středícími prvky. [6] [7]

Konstrukce vstřikovací formy se odvíjí od požadavků daných vstřikovaným výrobkem. Nejdůležitějším aspektem je tvar výrobku, který nese informace o tvarové a rozměrové přesnosti. Mezi další aspekty se řadí materiál výrobku, jakost povrchu, násobnost formy, způsob vyhození výrobku z dutiny a životnost vstřikovací formy. Vstřikovací formy jsou rozděleny podle funkce procesu vstřikování na vtokový systém, tvarové prvky, vyhazovací systém a systém temperační. Temperační systém řeší způsob a intenzitu ochlazování polymerní taveniny v dutině formy společně se způsobem připojení temperačního média. Při výrobě vstřikovacích forem se z ekonomického hlediska vyplatí použít co nejvíce normalizovaných dílů, rozumně volit veškerý použitý materiál a následné tepelné zpracování. Jednotlivé desky jsou ve formě spojeny šrouby, které jsou vzájemně vystředěny středícími prvky. Otevírání formy probíhá v dělicí rovině, kterých může být ve formě i několik. Hlavní dělicí rovina se nachází mezi tvárníkem a tvárnici a otevření je zaručeno pohybem upínacích desek vstřikovacího stroje, na které jsou nejčastěji upínkami upnuty upínací desky vstřikovací formy. Na upínací desky formy se často umísťují izolační desky, které brání přestupu tepla ze vstřikovací formy na vstřikovací stroj. Pro úsporu nákladů se tvarové dutiny umísťují do tvarových vložek, které jsou uloženy do kotevních desek formy. Veškeré prvky formy, které přichází do kontaktu s polymerní taveninou jsou vystavovány mechanickým a abrazivním namáháním a proto je možné použít levnější a méně odolné

materiály na kotevní desky, které nejsou vystavovány těmito namáháním. Nedílnou součástí každé vstřikovací formy jsou středící prvky. Pomocí středících kroužků se zabezpečuje poloha vstřikovací formy vůči vstřikovacímu stroji a na pravé straně systému sousost vtokové vložky s tryskou stroje. Na druhé straně slouží kroužek k vystředění táhla vyhazovačů. Kromě středících kroužků se ve formě nachází také středící trubky s vloženými vodicími čepky umožňující hladké otevření formy a odjezd vyhazovačů. [11] [6]



Obrázek 18. Uspořádání vstřikovací formy [22]

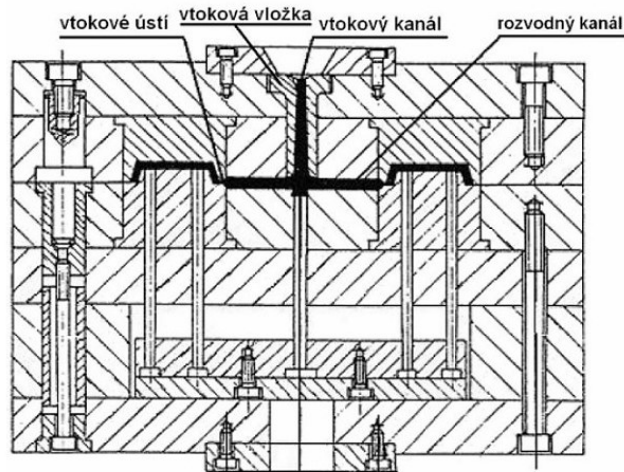
- 1- upínací deska pohyblivé části, 2- rozpěrná deska, 3- vyhazovací deska opěrná,
 4- vyhazovací deska kotevní, 5- válcový vyhazovač, 6- opěrná deska, 7- kotevní deska,
 8- přípojka chlazení, 9- tvarová deska, 10- kotevní deska, 11- manipulační oko,
 12- spojovací šrouby, 13- vtoková vložka, 14- středící kroužek, 15- upínací deska pevné
 části, 16- vratné kolíky, 17- tvarové jádro, 18- vodicí sloupky, 19- výstřík,
 20- táhlo vyhazovačů

4.1 Vtokové systémy

Vtokový systém zajišťuje dopravu vstříkované dávky z trysky vstřikovacího stroje do tvarové dutiny formy. Musí zaručit rovnoměrné naplnění dutiny formy polymerní taveninou s následným oddělením vtokových ústí od výstřiku s následným vyhozením z formy. Orientace a typ vtokového systému má značný vliv na průběh plnění dutiny formy a deformací výrobku, tudíž i jeho tvaru. Umístění vtokových ústí totiž udává orientaci makromolekul polymerní taveniny a případných plniv a ovlivňuje tvorbu studených spojů a společně s jeho tvarem definují spotřebu polymerního materiálu a energetickou náročnost formy. Běžně se ústí vtoku umísťuje do oblasti, ve které se nachází největší tloušťka stěny výrobku pro optimální využití dotlakové fáze. Existují dva typy vtokových systému, které se často kombinují. Jedná se o studený vtokový systém a horký vtokový systém. [6] [7] [26]

4.1.1 Studený vtokový systém

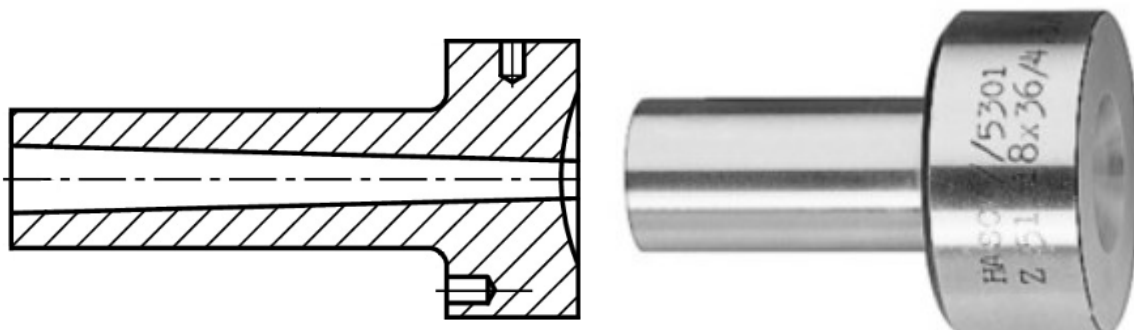
Při použití forem se studeným vtokovým systémem materiál v tokových cestách zcela zatuhne musí se od výstřiku mechanicky oddělit, čímž tvoří odpad. Tento odpad v některých případech nelze znovu recyklovat a může tvořit velkou procentuální část z celkové spotřeby materiálu. Formy se studeným vtokovým systémem mají nižší pořizovací náklady oproti forem s horkými vtokovými systémy. [11]



Obrázek 19. Studený vtokový systém vstřikovací formy [22]

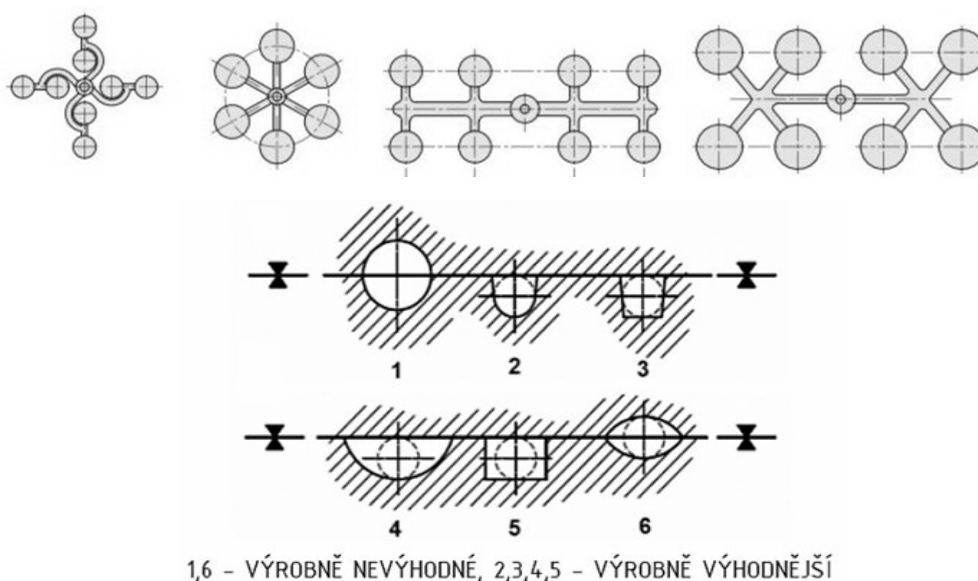
Vtokový kanál studeného vtokového systému je obsažen ve vtokové vložce, která je dostupná jako normálie. Vtoková vložka je velmi namáhána mechanicky i tepelně a proto se běžně vyrábí z nástrojových ocelí s tepelným zpracováním. Na straně výstupu z formy je zaoblená pro dostatečně těsné dosednutí vstřikovací trysky a její vtokový kanál má kuželovitý tvar běžně s uhlím $0,5^\circ$ až $1,5^\circ$. Tento úkos zajišťuje rovnoměrné tečení

polymerní taveniny a také snadné vyjmutí zatuhlého polymerního materiálu ve vtokovém kanálu. [11]



Obrázek 20. Ukázka a řez vtokové vložky [23]

Rozváděcí kanály jsou konstruovány tak, aby se snížily tepelné ztráty důsledkem ochlazování, toho lze použitím tvaru, který má co největší průřez s co nejmenším povrchem. Jedná se o kruhové a lichoběžníkové průřezy, které se umísťují do dělicí roviny. Kruhové průřezy však nejsou vhodné, protože zde může docházet k chybám spojené se špatným slícováním. Při konstrukci vícenásobných forem se lze setkat s odstupňovanými průřezy, díky kterým lze dosáhnout vyšší rychlosti proudění polymerní taveniny s rovnoměrnějším plněním tvarových dutin. Kanály sloužící pro rozvod taveniny se volí co nejkratší a nejlépe tak, aby byly všechny stejně dlouhé pro zaručení stejné rychlosti taveniny. V případě, kdy rozváděcí kanály nejsou stejně dlouhé musí dojít ke kompenzaci v podobě zúžení kanálu v určitém místě jeho délky. [11] [6]



1,6 - VÝROBNĚ NEVÝHODNÉ, 2,3,4,5 - VÝROBNĚ VÝHODNĚJŠÍ

Obrázek 21. Rozmístění a průřezy rozvodných kanálů [22]

Vtokovým ústím je polymerní tavenina přiváděna ze vtokového kanálu do dutiny formy. Používá se velký počet různých tvarů, kdy se vtokové ústí směrem k dutině formy zužuje a jeho délka a tvar se volí s ohledem na vstříkovaný díl. Vtoková ústí se běžně volí tak, aby byla co nejmenší a na výsledném výstříku zanechávala co nejmenší stopy a umísťuje se do místa s největší tloušťkou stěny výstříku nebo do středu dutiny pro rovnoměrné plnění, ve směru orientace žeber, mimo pohledové plochy výstříku a tak, aby se minimalizoval možný vznik studených spojů. [28]



Obrázek 22. Typy vtokových ústí [24]

Plný kuželový vtok přivádí taveninu do dutiny formy bez zúženého vtokového ústí a používá se většinou u jednonásobných forem, které mají symetrickou dutinu a výstříky mají tlustou stěnu. Mezi výhody se řadí jeho snadná výroba a velká účinnost působení dotlaku, protože tento vtok zpravidla tuhne jako poslední. Nese nevýhodu složitějšího odstranění a viditelné stopy po vstříku. [11]

Bodový vtok je jeden z nejrozšířenějších typů zúženého vtokového ústí, které má většinou kruhový průřez a je hojně využíván při vstříkovaní tenkostěnných výrobků. Vtokové ústí má velmi malý průměr a v případě umístění do třídeskové formy má velkou výhodu možnosti odtržení vtokového zbytku při otevírání vstříkové formy. [11] [28]

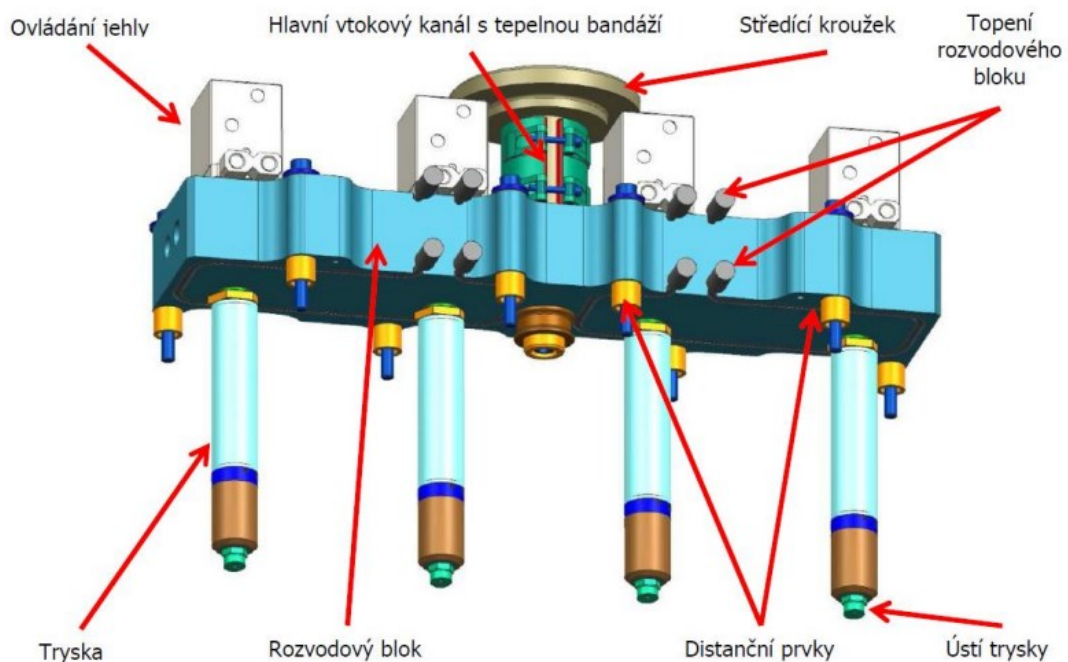
Tunelový vtok je zvláštní typ vtokového bodového, kdy vtokový zbytek leží ve stejné dělicí rovině jako výstřík, avšak umožňuje plnit dutinu formy mimo její dělicí rovinu. Orientace může být jak v pevné, tak i v pohyblivé části formy a proto není nutné formy s více dělicími rovinami. Zajištění správné funkce probíhá pomocí řezné hrany, která se stará o oddělení vtokového zbytku od výstříku. Oddělení vtokového zbytku může probíhat jak při otevírání formy, tak při vyhazování výstříku. V případě oddělení zbytku při vyhazování je nutné použití přidržovače vtokového, který zajistí polohu vtokového systému na pohyblivé straně formy. Na podobném principu funguje i vtok srpkovitý, avšak kvůli možnému poškození výstříku při oddělování zbytku nejsou tyto typy vtoků vhodné pro křehké materiály.

Filmový vtok, nazývaný také štěrbinový, je nejpoužívanější vtok ze skupiny ústí k plnění z boku. Tento typ vtoku je velice vhodný pro vstřikování plněných plastů, plochých a tenkých výrobků. Vtokový zbytek se zde musí oddělit až po vyhození výrobku z formy, ale je díky němu možno použít menších vstřikovacích tlaků. [11] [23] [28]

Dále se používají vtoky, které jsou určeny především pro plnění rotačních a symetrických výrobků. Jedná se o vtoky deštníkové, talířové a prstencové. Vtokové zbytky se od výstřiků s těmito vtoky odstraňují poměrně obtížně a tento zbytek má velkou spotřebu materiálu. Největší výhodou těchto typů je rovnoměrné plnění dutiny formy. [11] [28]

4.1.2 Horký vtokový systém

Horký vtokový systém vznikl především za účelem odstranění vtokových zbytků a tím snížením spotřeby materiálu a minimalizací potřebných dodatečných operací. Horký vtokový systém má za úkol udržet konstantní teplotu polymerní taveniny vtokového systému tak, aby nedošlo k jejímu zatuhnutí, nebo naopak degradaci. Technologie vstřikování s horkým vtokovým systémem nese řadu výhod, jako výše zmíněné snížení spotřeby materiálu, minimalizaci dodatečných operací nebo také zkrácení vstřikovacího cyklu. Nevýhodou je velká pořizovací cena a provozní cena oproti studenému vtokovému systému. Horké vtokové systémy jsou však dodávány na zakázku od různých firem, které jsou schopny zajistit údržbu a dodávku náhradních dílů. Systém je jednoduše vložen do desky vstřikovací formy a je tepelně izolován pomocí vzduchové mezery. Nejčastěji se vyskytuje u vícenásobných forem, kdy jsou vyhřívané trysky horkého vtokového systému uloženy do tvaru písmen I, Y, H nebo X. Vyhřívání těchto trysek je pomocí topných hadů a patron, kdy probíhá buď uvnitř trysky, nebo vně. Horký vtokový systém nese navíc výhodu použití různých typů vyhřívaných trysek. Například trysky uzavíratelné, s hrotem, s více otvory nebo trysky se speciálním tvarem. Uzavíratelné trysky minimalizují vznik otisků vtoků a díky nim lze dosáhnout kvalitnějšího povrchu. Uzavírání je realizováno jehlami, které jsou ovládány pomocí pružin nebo pák. Jehly ovládané pomocí pružin se pohybují na základě přetlačení pružiny vstřikovacím tlakem a u jehel ovládaných pákami je nutno použít pneumatického, nebo hydraulického systému ovládaní. [11] [26] [28]



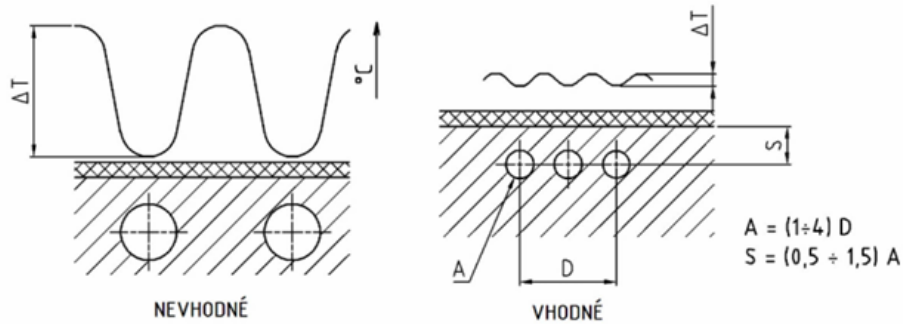
Obrázek 23. Horký vtokový systém [25]

4.2 Temperační systém

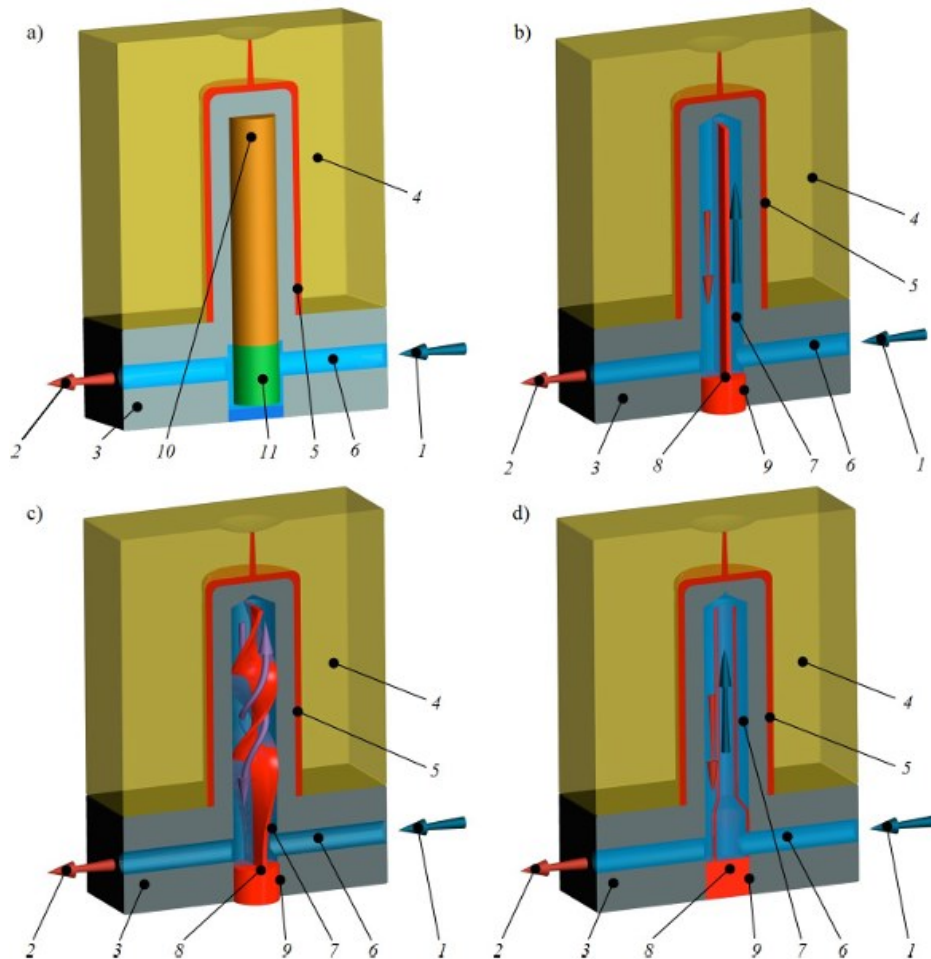
Temperační systém udržuje konstantní teplotu vstřikovací formy v průběhu vstřikování a má velký vliv na výslednou kvalitu výstřiku z hlediska smrštění, deformace a vzhledu. Polymerní tavenina proudící do dutiny formy se v dutině ochlazuje na vyhazovací teplotu a v průběhu tohoto ochlazení dojde k jejímu zatuhnutí. Na druhou stranu teplota vstřikovací roste a temperační systém má za úkol odvést vzniklé přebytečné teplo a zajistit konstantní teplotu vstřikovací na začátku každého vstřikovacího cyklu. [11] [6]

Chlazení probíhá pomocí temperačního média, proudícího ve většinou vrtaných kanálech temperačního okruhu. Temperační okruh může obsahovat různé přepážky, spirály a fontánky pro zvýšení efektivity chlazení. Temperační systém se volí s ohledem na pevnost a tuhost vstřikovací formy a rozmístění tvarových dutin. Kanály temperačního okruhu by měly být rozmístěny rovnoměrně s ohledem na tvar a tloušťku stěny tvarové dutiny a její částí a jejich průřez se volí dle zpracovávaného materiálu a potřebné intenzity odvodu tepla. Pro zajištění rovnoměrného chlazení je doporučeno volit větší počet kanálů o menším průměru, protože zvětšením průřezu se razantně snižuje tuhost formy. Výše zmíněné přepážky, spirály a fontánky jsou dodávány jako normálie a slouží ke chlazení tvárníků. Přepážky a spirály fungují na podobném principu, kdy rozdělí temperační kanál a chladící médium poté tyto prvky obtéká. Samotné kanály jsou vyvrtávány do desek rámu a osazují se ucpávkami a

přípojkami. Existují případy, kdy v určitém místě není možné vrtat temperační kanály tak, aby v nich proudilo temperační médium v kapalném stavu, v tom případě se využívají takzvané inserty. Inserty jsou často tyče nebo trny vyrobeny z teplovodivých materiálů. [11]



Obrázek 25. Volba průměrů a umístění temperačních kanálů [22]



1- vstup temperačního média, 2- výstup temperačního média, 3- tvárník, 4- tvárnice, 5- výstřik, 6- primární temperační kanál, 7- sekundární temperační kanál, 8- normálie, 9- dosedová závitová plocha, 10- výparná část trubice, 11- kondenzační část trubice

Obrázek 247. Ukázka temperačních insertů [11]:

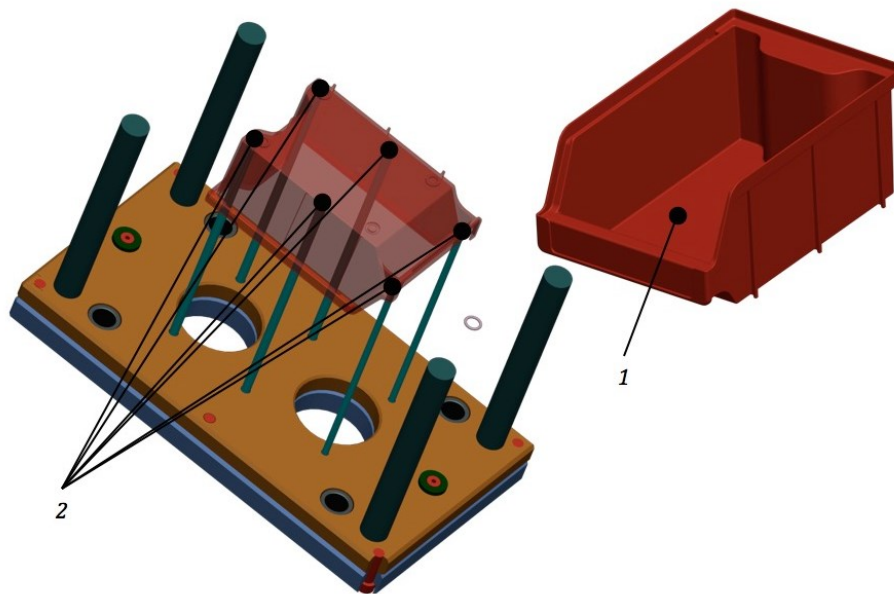
a) teplovodivá trubice, b) přepážka, c) spirálová přepážka, d) fontánka

Temperační médium představuje kapalina, která proudí v temperačním systému a odvádí přebytečné teplo vzniklé při vstřikování polymerní taveniny, která má větší teplotu než vstřikovací forma. Na efektivitu odvodu tepla má vliv zvolená kapalina, její objemový průtok, vzdálenost kanálů od dutiny formy a v neposlední řadě teplotní rozdíl povrchu dutiny a kapaliny. Často se jako temperační médium volí voda kvůli její nízké ceně, likvidaci a skladování. Vodu však lze použít maximálně do teplot nepřevyšujících 90 °C a tvoří v kanálech vodní kámen a korozi. To lze vyřešit smícháním vody s etylenglykolem a úpravou vody, kdy tato směs netvoří vodní kámen ani nedochází ke korozi. Dalším používaným médiem je olej, který má výhodu použití i nad 100 °C, jeho skladování a následná likvidace je složitější a pořizovací náklady jsou vyšší. [11] [23]

4.3 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém slouží pro automatické vyhození výstřiku z dutiny formy. Výstřik je vlivem ochlazování smrštěn a tak zůstává přichycen na tvárník vstřikovací formy při jejím otevření. Výstřik je tedy zapotřebí vyhodit takovou silou, která bude dostatečná pro překonání sil vyvíjených smrštěním polymeru a nepříliš velká pro poškození nebo vytlačení viditelných stop na výstřiku. Nejjednodušší vyhazovací systém obsahuje kotevní a opěrnou vyhazovací desku, mezi které jsou vloženy vyhazovací kolíky. Tyto desky jsou spojeny šrouby a obsahují vodící pouzdra s vodícími čepy. Pohyb mu je umožněn skrze táhlo vyhazovačů, které slouží jako doraz při odjetí pohyblivé části. Existují různé typy vyhazování, například mechanický systém na bázi vyhazovacích kolíků, pružných vyhazovačů nebo systém stíracích desek. Použití systému s vyhazovacími čepy je velmi oblíbený způsob pro vyhození výstřiku, protože výroba a montáž tohoto systému je jednoduchá a levná. Vyhazovací kolíky se umísťují na nepohledové stěny výrobku nebo jeho žebra a jejich počet a velikost se volí s ohledem na velikost a váhu vstřikovaného dílu a taktéž s ohledem na temperační systém. Čepy se dodávají jako normálie v různých provedeních, kdy válcový vyhazovací kolík uplatňuje univerzální využití. Další jsou vyhazovače trubkové, určené pro plochy mezikruží, vyhazovače prismatické, které se využívají právě pro vyhození v místě žeber. Vyhození výstřiku pomocí stírací desky probíhá působením síly na plochu výstřiku po jeho obvodu právě touto stírací deskou. Největší výhodou je velká kontaktní plocha, která minimalizuje různé stopy a vrypy po vyhazovačích a nejčastěji se používá u výstřiků s velkými rozměry nebo u výstřiků s tenkou stěnou, kde

hrozí riziko proražení vyhazovacími kolíky. Další mechanický způsob vyhození se provádí šikmými kolíky, které jsou uloženy pod různými úhly vůči dělicí rovině. [6] [11] [7]



Obrázek 26. Vyhazovací systém [22]

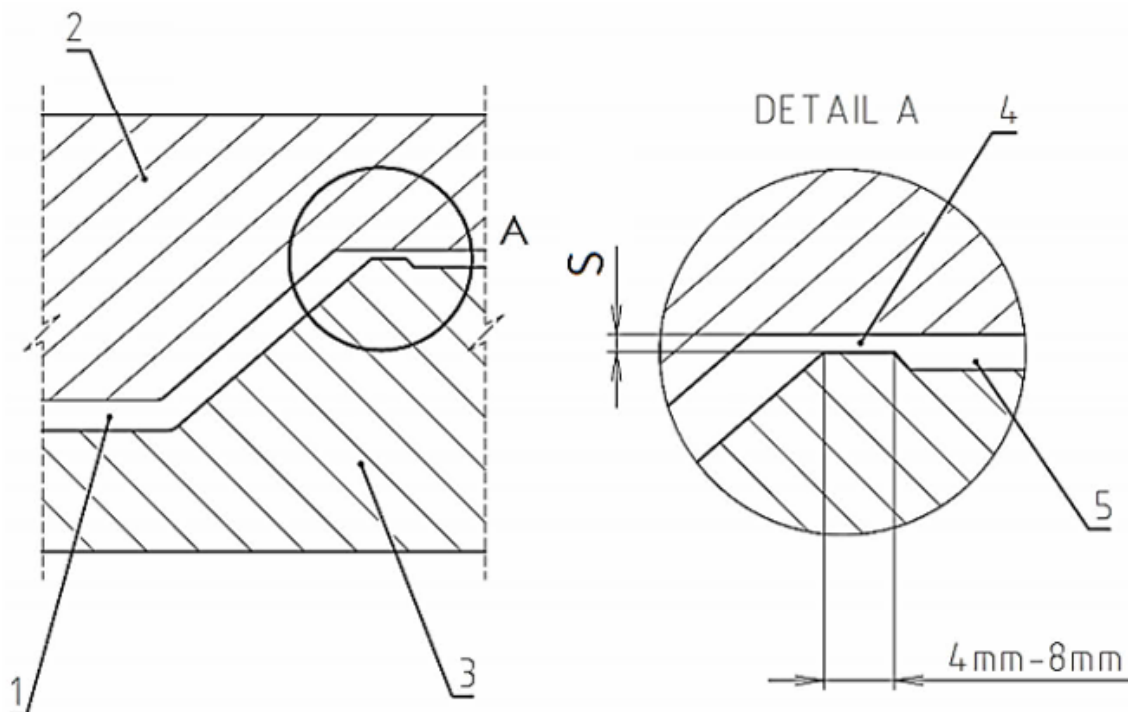
1) výstřík, 2) kontaktní plocha vyhazovačů

U vyhazovacích systémů se také používá pneumatický způsob vyhazování. Kdy se přivádí stlačený vzduch mezi výstřík a povrch dutiny formy. Tímto způsobem dojde k oddělení výstříku od dutiny a hojně se využívá u vstřikování rozměrných tenkostěnných a hlubokých produktů. Pro vyhození takových produktů by bylo zapotřebí velkého zdvihu jak vyhazovacích kolíků, tak stíracích desek, které by mohli výstřík deformovat. [11] [7]

4.4 Odvzdušňovací systém

V dutině uzavřené vstřikovací formy se nachází vzduch, který musí během plnění polymerní taveninou dutinu formy opustit pro její kompletní zaplnění. V případě kdy uzavřený vzduch v dutině formy nemá kudy uniknout dochází k jeho stlačení, což způsobuje bubliny nebo spálená místa výstříku. Pro únik uzavřeného vzduchu z dutiny formy slouží odvzdušňovací kanály, které se umísťují do míst s potenciaálně vysokou koncentrací stlačeného vzduchu. Tato místa je možno identifikovat dle tokových analýz plnění dutiny formy. Odvzdušňovací

kanály se dimenzují na základě vstřikovaného materiálu a jeho viskozity, nevhodný návrh kanálů může způsobit nedostatečné odvzdušnění či přetoky materiálu na výstřících. [23] [7]



Obrázek 27. Odvzdušňovací kanál [22]

Tabulka 1. Průřezy odvzdušňovacích kanálů polymerů [22]

Polymer	Průměr kanálu [mm]
POM	do 0,05
PC	do 0,05
ABS	do 0,05
PS	do 0,05
PE,PP	do 0,04
PA	0,02-0,03

4.5 Materiály forem

Materiály použité na výrobu vstřikovacích forem a jejich tepelné zpracování výrazně ovlivňují funkci a životnost formy. Materiál se vybírá s ohledem na vstřikovaný materiál, požadovanou životnost formy a jeho pořizovací náklady. Dále je zapotřebí zohlednit velikost tvarových částí a způsob jejich výroby, který souvisí s kvalitou povrchu výstřiku. Nejpoužívanějšími materiály, ze kterých se vstřikovací formy vyrábí jsou oceli, které mají vynikající mechanické vlastnosti. Na určité části forem však není vhodné použít ocel, vyrábí se proto z materiálů jako jsou například pryže nebo mosazi.

Nástrojové oceli se běžně používají pro výroby funkčních a tvarových částí forem pro vstřikování běžných materiálů, v případě vstřikování chemicky agresivních polymerů se využívá ocelí nerezových. Části rámu a prvků, které jsou méně namáhané, jsou vyráběné z uhlíkových ocelí kvůli jejich příznivým pořizovacím cenám. Mechanicky a tepelně zatěžované části se běžně povlakuji, čímž se zlepšují kluzné, otěruvzdorné a samomazné vlastnosti. [28] [29]

Tabulka 2. Oceli vhodné pro konstrukci forem [28]

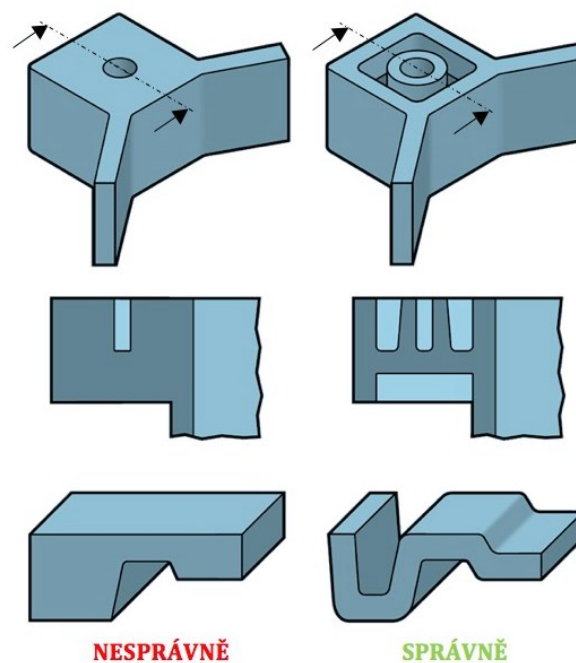
WNR	ČSN	Vlastnosti	Použití
1.0060	11 600	Konstrukční ocel s vyšším obsahem uhlíku	Desky forem
1.2343	19 552	Chrom molybdenová nástrojová ocel s vysokou pevností a prokalitelností	Tvarové části
1.2312	19 520	Legovaná nástrojová ocel s dobrou obrobitelností a prokalitelností	Tvarové části
1.2358	19 573	Legovaná nástrojová ocel s vysokou houževnatostí a odolností vůči opotřebení	Stříhadla, razníky

5 KONSTRUKCE VSTŘIKOVANÉHO DÍLU

Postup konstrukce vstřikovaného dílu se zcela liší od konstrukce kovového dílu. Konstruktor plastových výrobků musí být dobře obeznámen s plastikářskou technologií výroby a chováním materiálu během zpracování. Výsledná konstrukce dílu musí splňovat hlavní funkci dílu, zajistit jeho pevnostní podmínky a podmínky spojené s estetikou a bezpečností.

5.1 Podmínky konstrukce vstřikovaného dílu

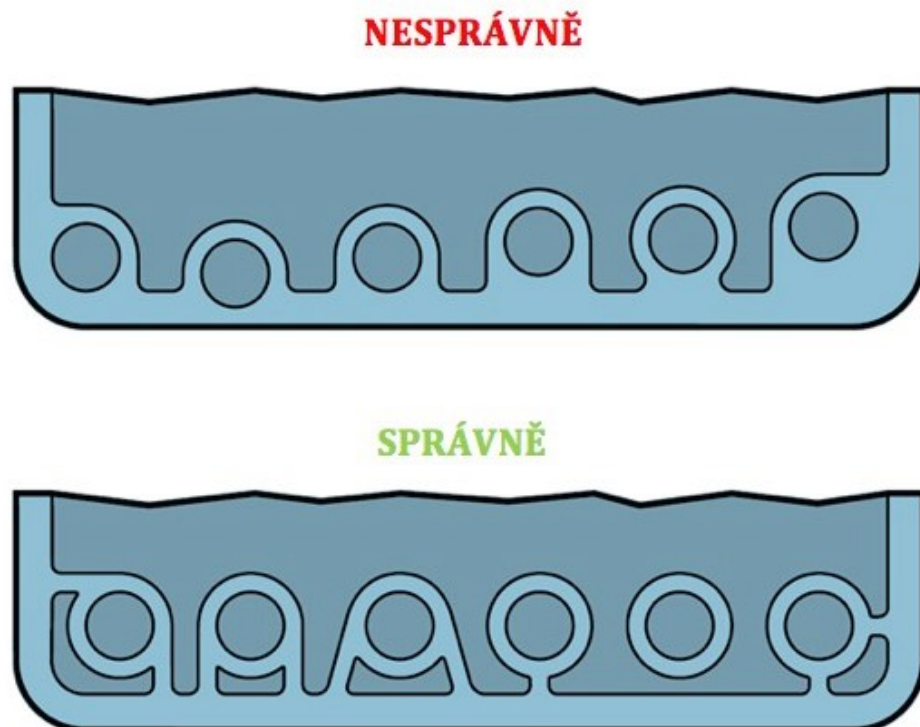
Pro konstrukci vstřikovaného dílu platí několik podmínek. Mezi tyto podmínky patří zajištění jednotné tloušťky stěn, zaoblení hran a úkos dílu pro zaručení bezproblémového vyhození z dutiny formy. Tloušťka stěn by měla být konstantní, jelikož polymerní tavenina v úzkých místech tvarových dutin rychle tuhne a v širších místech tuhnutí trvá déle. To může způsobit tvorbu vnitřních pnutí, propadlin a jiných vad, které se sjednocením tloušťky stěny snaží předejít. Zaoblení hran se provádí pro usnadnění toku polymerní taveniny a taktéž snižuje koncentraci napětí v těchto místech. Místa, která nejsou nijak zaoblena či zkosena jsou více opotřebována a vyžadují větší vstřikovací tlaky. Úkosy je nutné umístit kolmo k dělicí rovině pro zajištění bezproblémového vyhození výstřiku a jejich velikost se volí dle smrštění materiálu, povrchu stěny formy a dle způsobu vyhození. Velikost úkos se volí dle tabulek. [6] [32]



Obrázek 28. Konstrukční řešení tloušťky stěn [11]

Při konstrukci vstřikovaného dílu se konstruktér často nevyhne návrhu žeber. Žebra se dělí na technologická a technická. Kdy technická žebra zaručují pevnost a tuhost dílu a žebra technologická se modelují za účelem zlepšení plnění dutiny nebo pro minimalizování potenciálního vzniku vad. [6]

Vstřikované díly pro správnou funkci jsou osazeny různými otvory a nálitky. Umístění otvorů se doporučuje volit tak, aby následná výroba byla co nejjednodušší. Otvory nacházející ve směru dělicí roviny jsou výrobně nejvýhodnější. V případě, že je nutné díl vybavit otvorem nacházejícím se kolmo k dělicí rovině je nutné vstřikovací formu zkonstruovat s vhodným typem bočního odformování. Mechanismus bočního odformování se vyrábí jako normálie a představují je různé čelisti nebo výsuvná jádra. Nálitky jsou většinou válce obsahující díru, do které se později umístí závitová vložka, nebo jiný typ spojovacího materiálu pro přišroubování dalších komponent. Návrh nálitků je velice důležitý a je nutné brát v potaz, že při nesprávném návrhu můžou na dílu vzniknout vady. Proto se nálitky umísťují mezi stěny dílce, pro zajištění stejné tloušťky těchto stěn. Tuhost a pevnost nálitků se zajišťuje pomocí žeber. [11]



Obrázek 29. Konstrukční řešení nálitků [11]

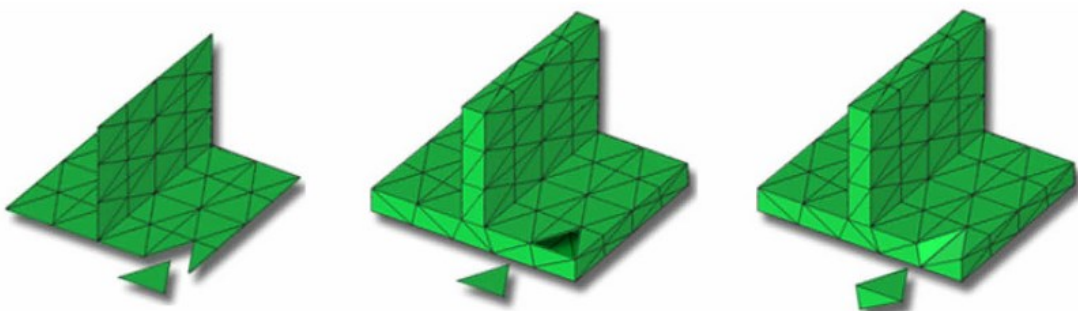
Estetický vzhled hraje při konstrukci vstřikovaného dílu velkou roli. Vhodnou úpravou povrchu lze vzhled vylepšit jak u barevných, tak transparentních dílů. Matné plochy jsou výrobně nejjednodušší a mohou zakrýt některé vady vzniklé při vstřikování tak, aby je nebylo možné pouhým okem odhalit. Zmatněné plochy jsou díky své jednoduché výrobě ekonomicky nejvýhodnější. Naopak plochy lesklé jsou nejnákladnější a je zde vyžadováno leštění kontaktních ploch dutin formy, čímž se docílí lesklého povrchu výstřiku. Lesklý povrch oproti matnému vady vzniklé v průběhu výroby může zvýraznit a proto zvyšuje nároky na celý proces. Polymerní díly jsou často vyráběny s povrchem dezénovým, který stejně jako matný povrch dokáže zamaskovat různé vady. Tento povrch se často používá pro snížení průhlednosti různých oblastí povrchu nebo pro jejich zvýraznění. [23] [28]

6 ANALÝZA TOKU POLYMERNÍ TAVENINY

Tokové analýzy se používají pro stanovení co nejvhodnějších procesních podmínek a pro optimální návrh vstřikovací formy. Pomocí analýz konstruktér schopen vhodně určit směr plnění tvarové dutiny formy, určit vhodnou polohu vtokového ústí, a tak optimalizovat průběh plnění. Kromě plnění lze díky analýze optimalizovat průběh chlazení a tak i snížit výrobní náklady výstřiku. Simulační program Moldflow synergy kromě analýz plnění a chlazení obsahuje i analýzu typu smrštění a deformace, která nám dokáže přiblížit výslednou tvarovou a rozměrovou přesnost. Tokové analýzy tedy značně šetří čas pro vývoj vstřikovací formy a také je díky nim možno předejít různým vadám. [29] [30]

6.1 Příprava a typy analýz

Příprava analýzy začíná importováním CAD modelu výrobku do používaného softwaru a vytvořením sítě, která je potřebná pro realizaci výpočtů analýzy. Vlastnosti a typ sítě se odvíjí od velikosti, složitosti a tvaru výrobku. Při simulování se nejčastěji lze setkat s 2D sítí, která je tvořena trojúhelníkovými elementy. 2D síť zanedbává tloušťky stěn výrobku a síť znázorňuje tvar povrchu výrobku. Tato síť se většinou používá pro tenkostěnné a jednoduché výrobky. Dalším typem je 2,5D síť, která je taktéž tvořena trojúhelníkovými elementy, avšak zde se bere ohled na tloušťku stěny. 2,5D síť pokryje celý povrch výrobku a prostor mezi stěnami je dutý. Poslední sítí je 3D síť, která je nejsložitější a tloušťky stěn jsou vyplněny prostorovými čtyřstěnnými elementy. Objem mezi stěnami je zcela vyplněn a tento typ sítě se používá pro tlustostěnné díly, kdy lze zkoumat i chování polymeru v řezu dutiny.



Obrázek 30. Typy sítí [28] : zleva 2D síť, 2,5D síť, 3D síť

Po vytvoření sítě je zapotřebí generovanou síť zkontrolovat a upravit tak, aby se zbytečně neprodlužoval výpočetní čas. Čím hustější síť je, tím déle trvá výpočet analýzy, proto je vhodné zvolit velikost sítě tak, aby výsledky byly dostatečně přesné a výpočet netrval věčně.

S vhodně zvolenými vlastnostmi a typem sítě je na čase určit násobnost vstřikovací formy, importovat dráhy temperačního a vtokového systému. Temperačnímu a vtokovému systému je zapotřebí zadat vstupy a výstupy temperačního média a polymerní taveniny a určit velikost kanálů a jejich tvar. Tyto systémy je zapotřebí taktéž zesíťovat a zkontrolovat. [29]

Poté následuje tvorba bloku formy s přidělením materiálu bloku a nastavení typu vstřikovaného materiálu společně procesními podmínkami. [29]

Běžně se začíná analýzou umístění vtoku, která na povrchu dílu graficky znázorní odpor vůči tečení taveniny a také oblast, která je nejvhodnější pro umístění vtokového ústí. Další analýza je analýza plnění a dotlaku, která poskytne informace tom, zda byla dutina formy kompletně zaplněna a jak dlouho plnění trvalo a jak se vyvíjela rychlost plnění. Taktéž dokáže graficky vykreslit oblasti, ve kterých může docházet ke vzniku studených spojů a vzduchových kapes. Tyto informace jsou zásadní při volbě vtokového systému a procesních podmínek. Následuje analýza temperace, která graficky vyobrazuje průběh teploty, tlaku temperačního média v temperačním okruhu, efektivitu odvodu tepla a taktéž zjišťuje dobu potřebnou pro dosažení vyhazovací teploty. Díky této analýze je možno optimalizovat procesní podmínky a snížit čas vstřikovacího cyklu. Poslední analýzou je analýza smrštění a deformace, graficky zobrazující deformace vlivem smrštění, chlazení a podobně. Jak bylo výše zmíněno, tato analýza nám umožňuje zjistit tvarovou a rozměrovou přesnost výrobku při daných procesních podmínkách. [29] [30]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V diplomové práci byly stanoveny následující cíle:

- Vypracovat literární studii pro dané téma.
- Provést konstrukci 3D modelu zadaného plastového dílu.
- Navrhnout 3D sestavu vstřikovací formy pro výrobu zadaného dílu.
- Nakreslit 2D výkres sestavy a příslušných řezů.
- Ověření návrhu pomocí analýz.

Literární studie v teoretické části práce obsahuje základní informace o polymerních materiálech a následně se věnuje problematikou technologie vstřikování termoplastů. Dále řeší konstrukci vstřikovacích forem a popisuje průběh analýz vstřikování.

V praktické části práce je za úkol vytvořit 3D model zadaného plastového dílu. Jednalo se o tiskový košík inkoustové tiskárny. Poté je cílem práce navrhnout konstrukci vstřikovací formy pro výrobu dílu a tento návrh ověřit pomocí analýz. Konstrukční návrh vstřikovací formy obsahuje 3D sestavu s kusovníkem a příslušnými výkresy a analýzou vstřikovacího procesu.

8 POUŽITÝ SOFTWARE

8.1 Catia V5R19

Při tvorbě 3D modelů, sestav a výkresů byl použit software Catia V5R19 francouzské společnosti Dassault Systemes. Konstrukce zadaného dílu byla provedena v rozhraní Part Design. 3D model dílu byl poté převeden do rozhraní Core and Cavity, díky kterému byly vytvořeny dělicí roviny a tvarové části sestavy vstřikovací formy. Jednotlivé komponenty vstřikovací formy byly následně spjaty dohromady do podoby sestavy v rozhraní Assembly Design.

8.2 Databáze normálií Meusburger

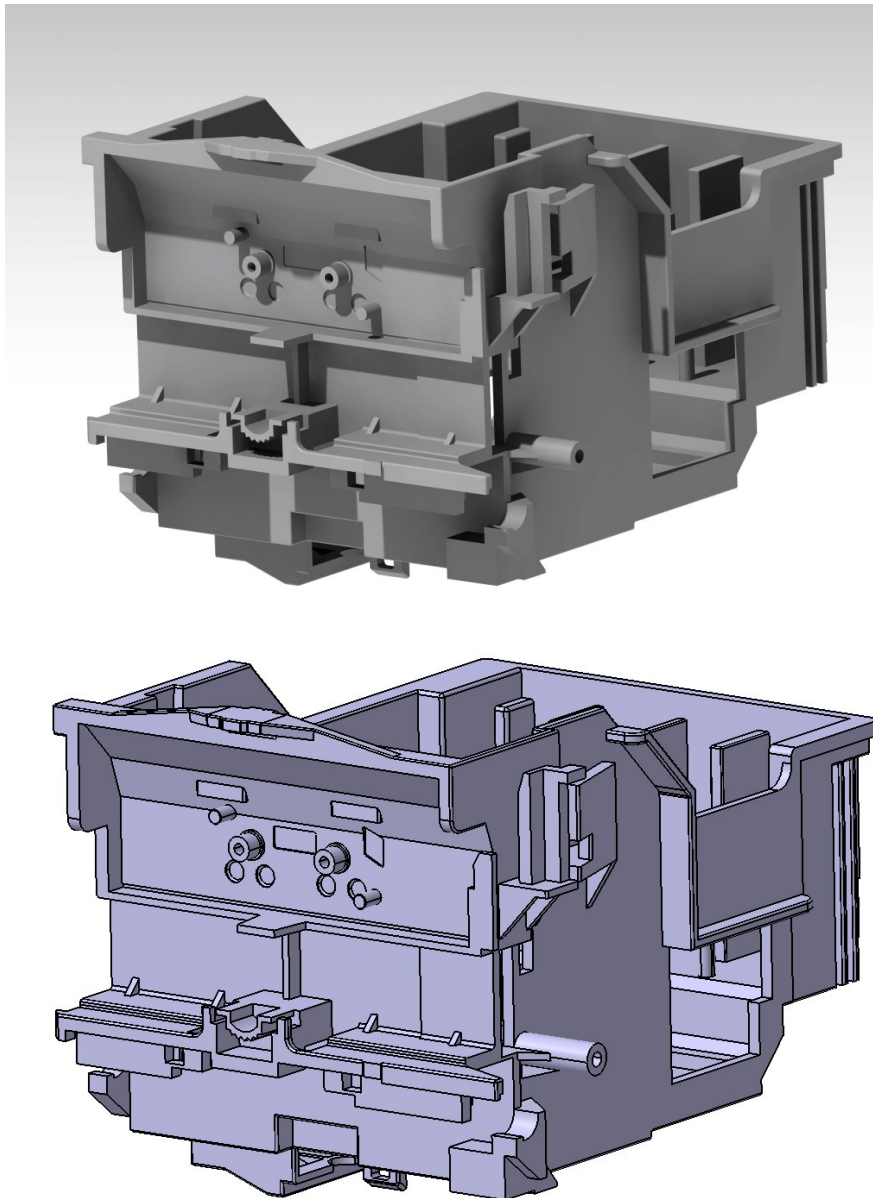
Online databáze normálií společnosti Meusburger je online katalog normalizovaných 3D modelů dílů používaných nejen při konstrukci vstřikovacích forem. Online databáze je rozřazena do několika kategorií dle funkce a použití obsažených dílů. Každý díl má ve své kategorii tabulku normalizovaných rozměrů a taktéž obsahuje informační list, ve kterém jsou udávány doplňující informace.

8.3 Moldflow Synergy 2023

Pro ověření návrhu pomocí analýz byl použit software společnosti Autodesk s názvem Moldflow Synergy 2023. Pomocí tohoto softwaru byly provedeny požadované simulace vstřikovacího procesu. Moldflow umožňuje provedení analýz spojených při vstřikování polymeru do dutiny formy jako například plnění dutiny formy, simulace teploty a působení dotlaku, ale také umožňuje provést simulace spjaté s deformacemi vstřikovaného dílu, díky kterým lze odhalit potenciální vznik různých vad. Potenciální vznik vad lze tak omezit díky možnosti optimalizování procesních podmínek různých fází procesu vstřikování. Moldflow Synergy obsahuje rozsáhlou databázi různých polymerních materiálů a vstřikovacích strojů, díky kterým se výsledky simulací přibližují reálným hodnotám.

9 ZADANÝ DÍL

Zadaný díl představuje tiskový košík inkoustové tiskárny. Tento díl slouží v tiskárně pro vložení inkoustové náplně do tiskového prostoru tiskárny, tudíž se jedná o nepohledový technický díl a jeho funkce je nadřazena jeho vzhledu. Základní rozměry jsou 71 x 76 x 98 mm (výška x šířka x délka) a jeho hmotnost je 54 g.



Obrázek 31. 3D model zadaného výrobku

9.1 Materiál zadaného dílu

Zadaný díl je vyroben z materiálu polyoxymetylen (POM). Při nastavování procesních podmínek analýz byl proto zvolen materiál POM společnosti SABIC pod obchodním názvem LNP LUBRICOMP KL004. Jedná se o semikrystalický termoplast vyráběný ve formě kopolymeru, který se často vyrábí s přidáním skelných vláken. LNP LUBRICOMP KL004 obsahuje 20 % polytetrafluoretylenu (PTFE), který dodává lepší odolnost vůči otěru. Polyoxymetylen ve formě kopolymeru má oproti homopolymeru vyšší chemickou odolnost a vyšší teplotní stabilitu při dlouhodobém zatížení. POM je používán při výrobě ozubených kol, rukojetí, tlačítek a různých mechanicky a chemicky namáhaných dílů.

Tabulka 3. Vybrané vlastnosti materiálu

Objemový index toku taveniny MVR	19,5	[cm ³ /10 min]
Hustota pevné fáze	1,5	[g/cm ³]
Modul pružnosti v tahu	2900	MPa
Modul pružnosti v ohybu	2900	MPa
Maximální smykové napětí	0,45	MPa
Maximální rychlost smykové deformace	40 000	s ⁻¹
Smrštění ve směru toku	1,55	%
Navlhavost	0,26	%

Tabulka 4. Doporučené procesní parametry vstřikování

Doporučený rozsah teploty formy	90-120	°C
Doporučený rozsah teploty taveniny	185-225	°C
Doporučená vyhazovací teplota	133	°C

10 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Podle technických parametrů vstřikovací formy a dle výsledků první provedené analýzy byl zvolen vstřikovací stroj. Parametry stroje jako například velikost uzavírací síly, objemu výstřiku či vstřikovací tlak jsou dostatečné a dosahují bezpečnostní rezervy. Volba stroje byla provedena tak, aby se vstřikovací forma vlezla mezi vodící sloupky a stroj nebyl příliš předimenzován.

Požadovaným rozměrům vstřikovací formy vyhovuje vstřikovací stroj společnosti Arburg s označením **Allrounder 570 C – 2000 – 800 (45)**.



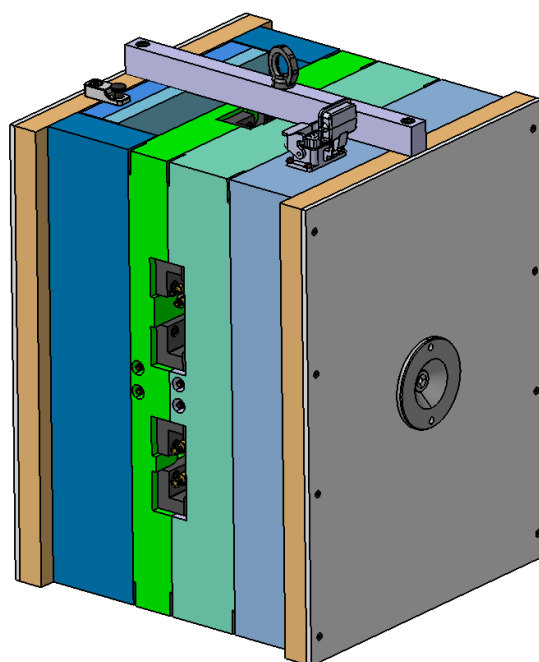
Tabulka 5. Parametry zvoleného vstřikovacího stroje

Obrázek 32. Vybraný vstřikovací stroj

Parametr:	Hodnoty stroje:	Požadované hodnoty:
Rozměr mezi vodícími sloupky	570 x 570 mm	496x656 mm
Velikost uzavírací síly	2000 kN	710 kN
Objem výstřiku	318 cm ³	78 cm ³
Vstřikovací tlak	2470 bar	780 bar
Maximální hmotnost pohyblivé strany formy	1500 Kg	480 Kg
Maximální výška formy	815 mm	500-700 mm
Průměr šneku	45 mm	-
Průměr středícího kroužku	125 mm	-

11 KONSTRUKCE FORMY

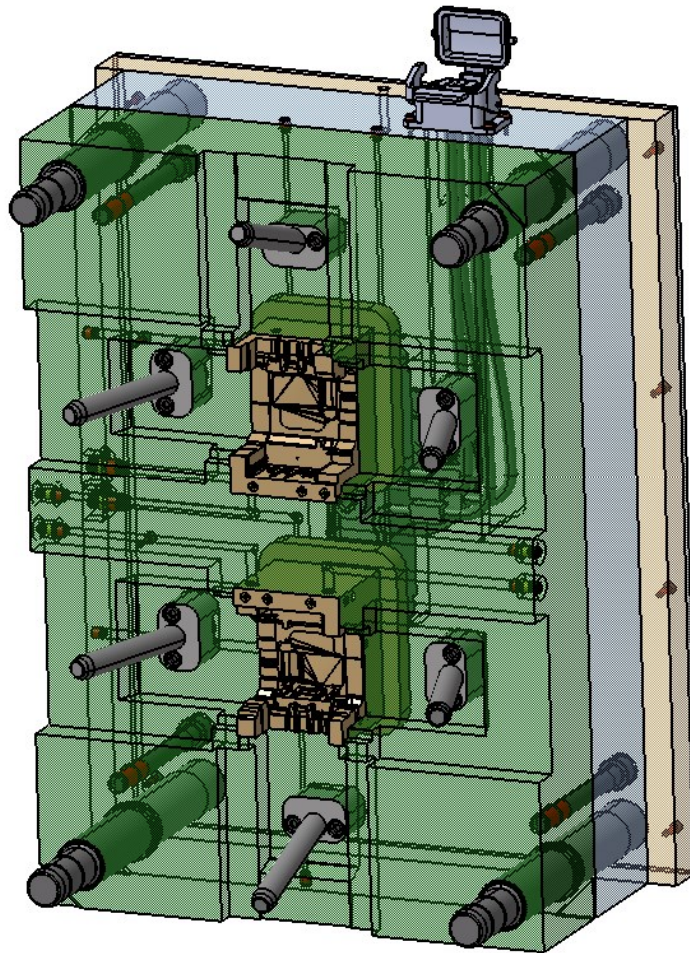
Konstrukce vstřikovací formy byla provedena s ohledem na tvarovou složitost zadaného dílu, od které se odvíjí počet dělicích rovin a způsob zaformování. Vstřikovací forma je dle zadání řešena jako dvojnásobná, kdy během jednoho pracovního cyklu dojde ke vstříknutí polymerního materiálu do dvou tvarových dutin formy a následným vyprázdněním zároveň. Při konstrukci vstřikovací formy bylo použito co nejvíce normalizovaných prvků pro urychlení a zlepšení efektivity konstrukce. Zaformování probíhá pomocí tvarových vložek a posuvných čelistí, které jsou vedeny šikmými čepy. Použit byl dle zadání horký vtokový systém obsahující dvě horké trysky, které dopravují taveninu přímo do tvarových dutin. Díky použití horkého vtokového systému není zapotřebí žádných rozvodných kanálů s přídržovači a vtokovými ústími. Temperace vstřikovací formy je řešena pomocí vrtaných kanálů obsaženy přepážkami a ucpávkami. Temperovány jsou všechny tvarové části formy a o vyhazování výstřiku z dutiny formy se stará vyhazovací systém, který tvoří válcové vyhazovací kolíky, které jsou ukotveny ve vyhazovacím paketu. Rám vstřikovací formy tvoří jednotlivé desky formy, které jsou mezi sebou spojeny šrouby do jednoho funkčního celku. Desky tvořící sestavu vstřikovací formy jsou vystředěny pomocí vodících čepů a pouzder. Sestava formy je taktéž opatřena transportním můstkem pro snadné ustavování do vstřikovacího stroje. Při manipulaci s formou je zapotřebí zajistit vyhazovací systém, který by mohl volným pohybem poškodit dutinu formy. Z tohoto důvodu sestava formy obsahuje zámek, který zamezí nežádanému pohybu vyhazovacího systému při manipulaci s formou.



Obrázek 33. Sestava vstřikovací formy

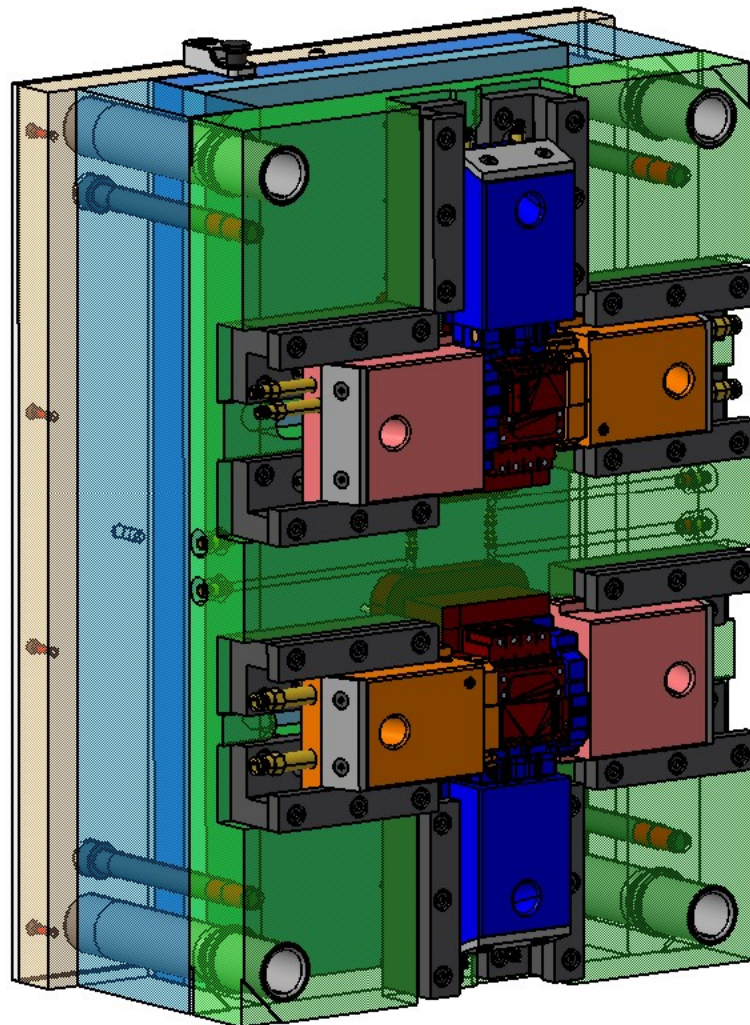
11.1 Podsestavy vstřikovací formy

Vstřikovací forma byla rozdělena do tří funkčních podsestav. Podsestavy byly vytvořeny podle funkce při procesu vstřikování a jedná se o pevnou pravou stranu, stranu pohyblivou levou a vyhazovací systém. Pravá pevná strana je tvořena čtyřmi deskami. První deska podsestavy je deska izolační, která je vyrobena z materiálu s nízkou tepelnou vodivostí a odděluje vstřikovací formu od vstřikovací jednotky a brání přestupu tepla. Druhá deska je upínací, pomocí které je vstřikovací forma upnuta k pevné části stroje. Vystředění upínací desky se vstřikovacím strojem je zajištěno pomocí středícího kroužku. Následuje deska s horkým systémem, ve které je taktéž uložena kabeláž a zásuvka. Poslední deskou pravé pevné strany je deska kotevní, ve které je ukotvena tvarová vložka a taktéž obsahuje vodící a šikmé čepy. V kotevní desce jsou vytvořeny tvarové vybrání, které slouží jako zavírací klíny posuvných čelistí.



Obrázek 34. Pohled na pravou pevnou stranu vstřikovací formy

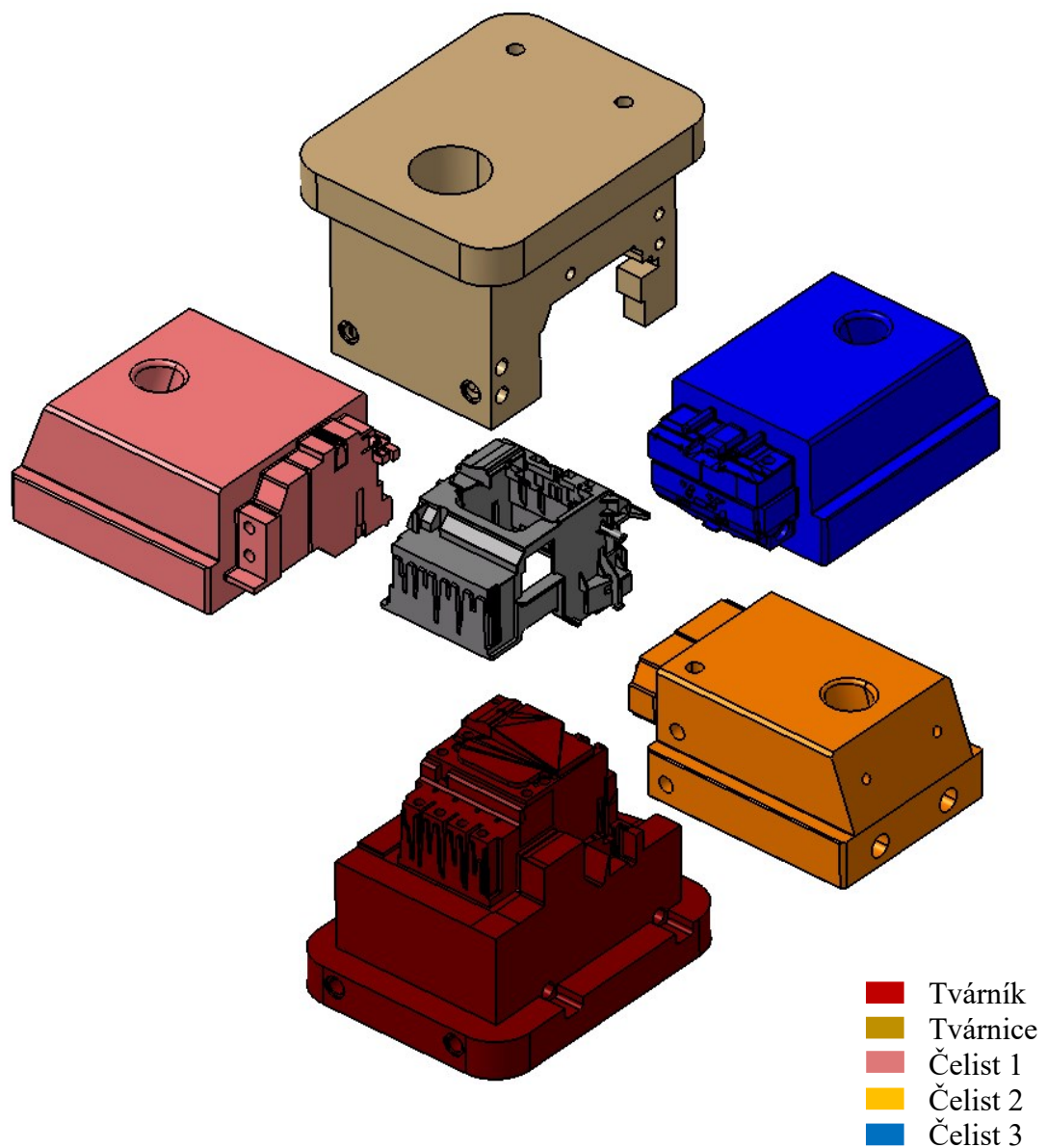
Levá pohyblivá strana formy obsahuje levou kotevní desku, ve které jsou uloženy ostatní tvarové části společně s posuvnými elementy. Posuvné elementy představují vodící lišty, které obsahují aretační pružinové zámky a jejich úkol je zajistit otevřenou polohu bočních posuvných čelistí. Levá kotevní deska stejně jako pravá kotevní deska dále obsahuje vodící pouzdra. Na tuto desku jsou ukotveny rozpěrné desky, které vymezují prostor pohybu vyhazovacího systému. Mezi těmito rozpěrnými deskami jsou uloženy vyhazovací desky, ve kterých jsou ukotveny válcové vyhazovací kolíky. Následuje levá upínací deska, umožňující upnutí pohyblivé části vstřikovací formy na pohyblivou část vstřikovacího stroje. Na levé upínací desce se nachází levý středící kroužek, ve kterém je uloženo táhlo vyhazovacího systému.



Obrázek 35. Pohled na levou pohyblivou stranu vstřikovací formy

11.2 Tvarové vložky

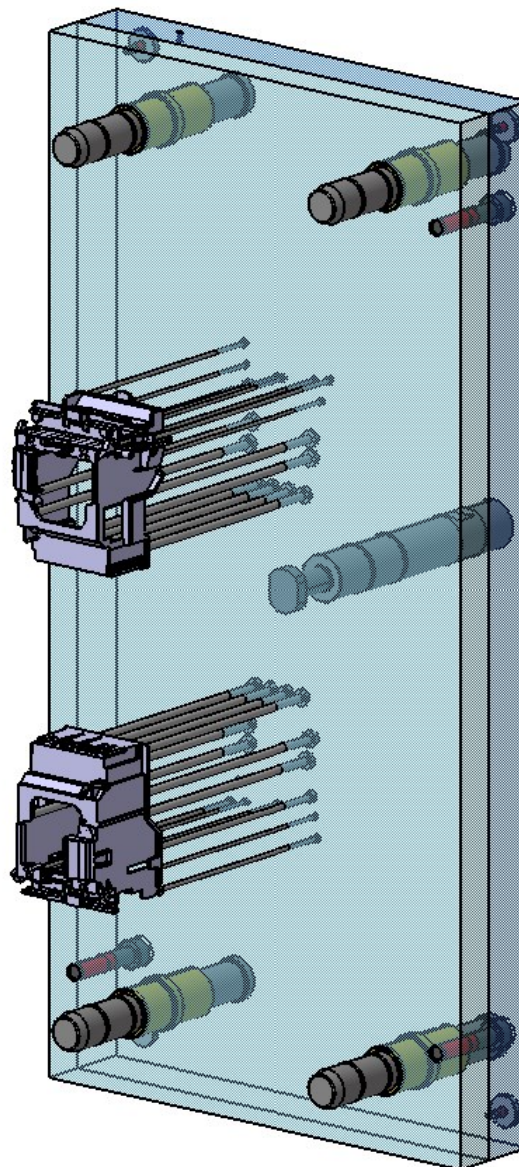
S ohledem na dělicí roviny byly vytvořené tvarové části, které tvoří negativ zadaného dílu. Velikost tvarové dutiny je zvětšena o průměrnou hodnotu smrštění (2,2 %) zpracovávaného materiálu dle materiálového listu. Tvarové části tvoří tvárník a tvárnice společně s třemi kusy posuvných čelistí, které umožňují vysunutí bočních ploch pro bezpečné vyhození výstřiku z dutiny formy. Tvárník společně s čelistmi jsou ukotveny v pohyblivé kotevní desce. Z důvodu styku tvarových částí s polymerní taveninou je třeba tyto části vyrobit z nástrojové oceli a zvolit adekvátní způsob tepelného zpracování.



Obrázek 36. Tvarové části vstřikovací formy

11.3 Vyhazovací systém

Vyhození výstřiku z dutiny formy je realizováno pomocí válcových vyhazovacích kolíků, které jsou ukotveny v kotevní desce vyhazovacího systému a o pohyb vyhazovacích desek se stará vyhazovací táhlo, které je spojeno s opěrnou deskou vyhazovacího systému pomocí závitového čepu. Vyhazovací kolíky jsou v dutině formy rozmístěny tak, aby vyvíjený tlak byl rovnoměrný a zamezilo se poškození výstřiku během vyhazování. Ve formě je rozmístěno deset vyhazovacích kolíků o průměru 2 mm, čtyři kolíky o průměru 2,5 mm, dva kolíky o průměru 3,5 mm a šestnáct kolíků o průměru 5 mm, které jsou zkráceny na požadovanou délku.

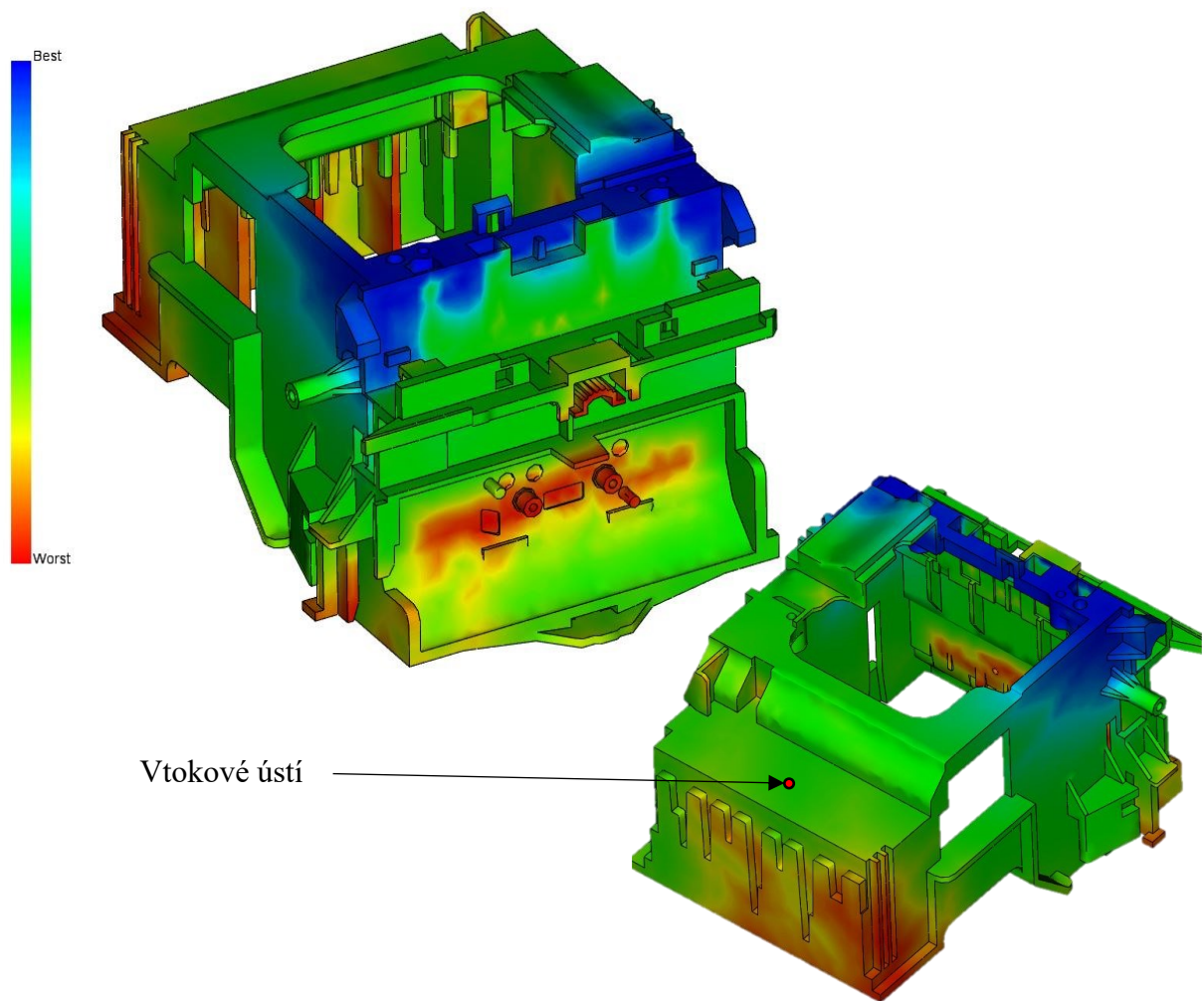


Obrázek 37. Vyhazovací systém

11.4 Návrh vtokového systému

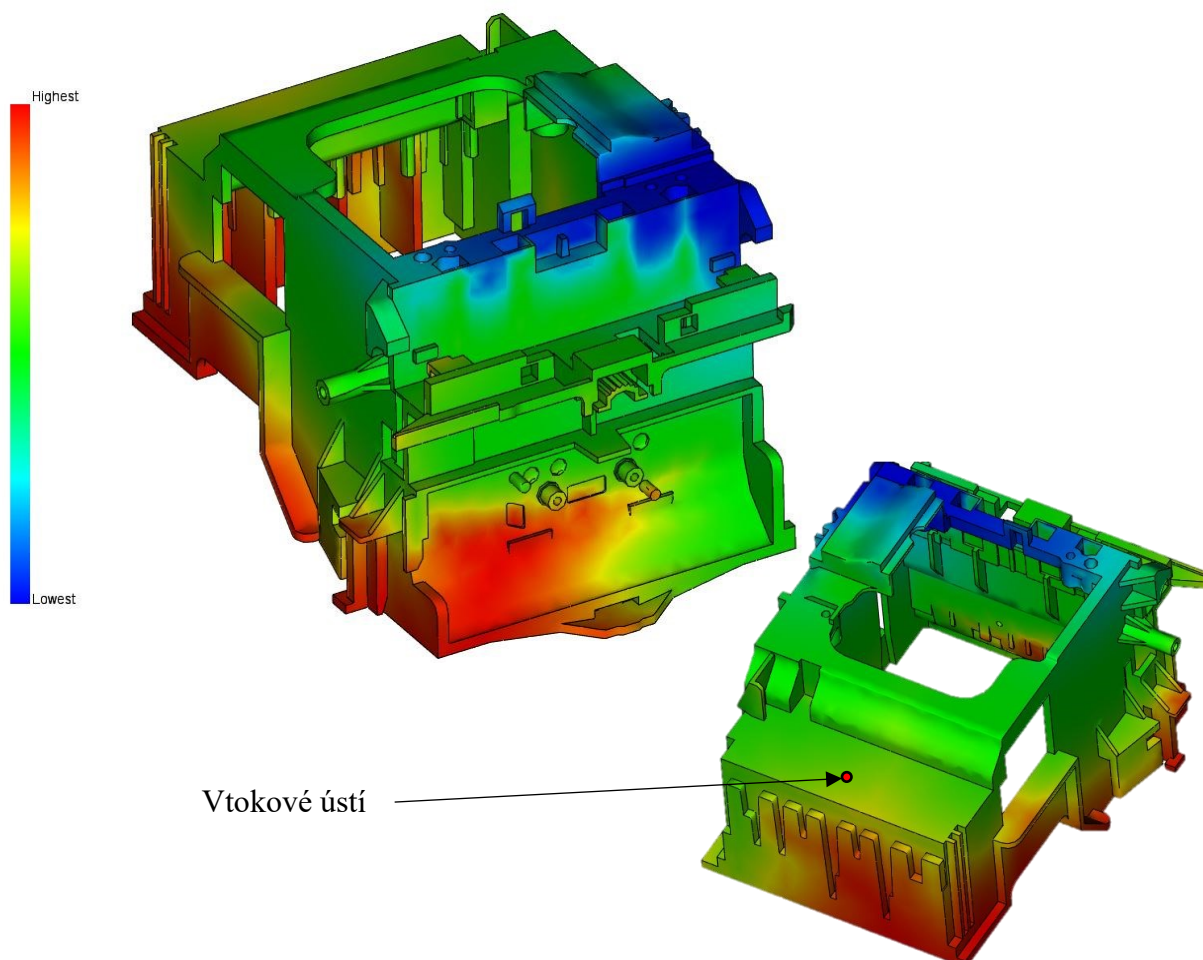
Vtokový systém dopravuje polymerní taveninu z trysky vstřikovacího stroje do tvarové dutiny formy. Při navrhování vtokového systému je důležité zvolit vhodné umístění vtokového ústí. Proto byla provedena analýza vhodnosti umístění vtokového ústí na dílci. Pro navrženou konstrukci vstřikovací formy byl zadán horký vtokový systém, protože vtokové ústí lze umístit téměř kamkoliv a z důvodu odformování výstřiku by zde studený ani kombinovaný vtokový systém nebyl vhodný. Další výhodou horkého vtokového systému je absence zbytku materiálu, který zůstává v tokových kanálech.

Na obrázku níže lze vidět výsledek analýzy vhodnosti umístění vtokového ústí. Barevná škála znázorňuje tuto vhodnost, kdy modrá představuje nejlepší možnost a naopak červená tu nejhorší.



Obrázek 38. Výsledek vhodnosti umístění vtokového ústí

Dalším výsledkem této analýzy je grafické znázornění odporu vůči toku taveniny. Barevná škála červenou barvou vyjadřuje oblasti, ve kterých se vyskytuje největší odpor vůči tečení a naopak modrá barva znázorňuje oblasti s nejmenším odporem.

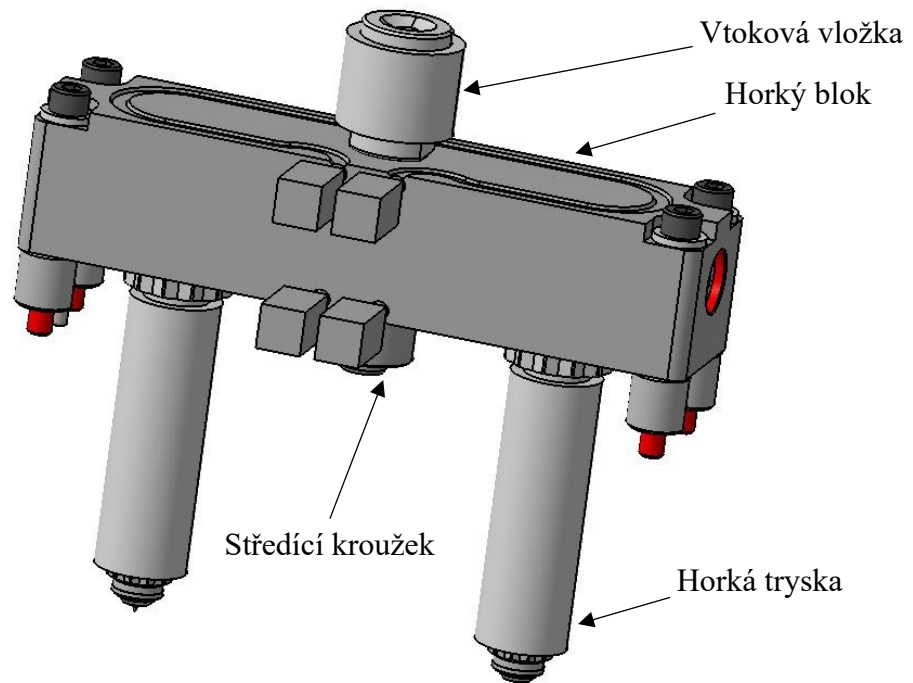


Obrázek 39. Výsledek odporu vůči tečení taveniny

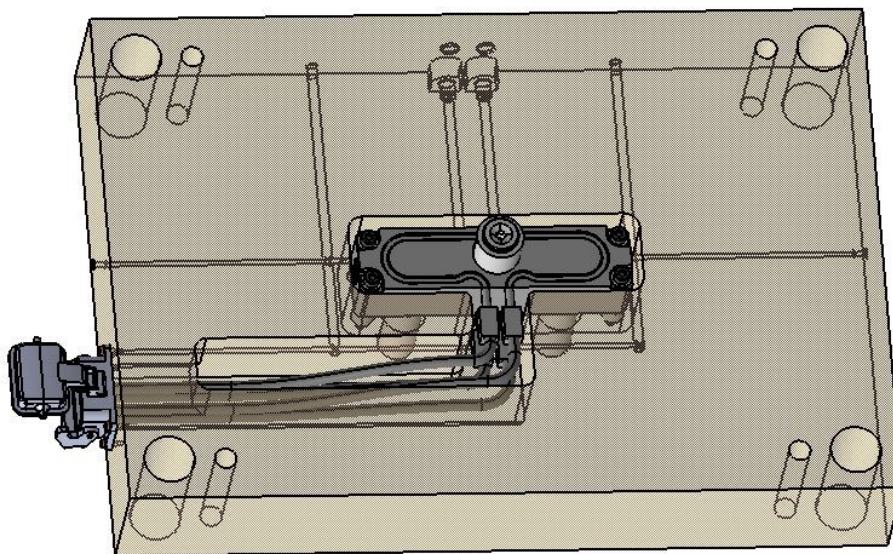
Vtokové ústí bylo umístěno do oblasti, která dle analýzy nevykazuje nejvhodnější umístění z důvodu odformování výstřiku. Zvolená oblast se dle barevné škály nachází v zelené oblasti a nabývá hodnot 0,42 (gating suitability) a 0,68 (flow resistance indicator), kdy číslo 1 představuje nejvhodnější oblast. Oblasti s největším odporem tečení u výsledků odporu vůči tečení nabývá hodnoty 1. V kapitole analýzy vstřikování jsou provedené i simulace kombinovaného a studeného vtokového systému a jejich výsledky jsou mezi sebou porovnány.

Horký vtokový systém byl zvolen a navrhnut dle online katalogu společnosti Meusburger. Online katalog disponuje konfigurátorem, díky kterému je možné zvolit horký vtokový systém dle vstřikovaného materiálu, vstřikované dávky a dle rozměrů vstřikovací formy. Normálie má v katalogu označení EH61001 IMT2 a tento rozvodný blok je vybaven

vtokovou vložkou EH6400 30x43, vyhřívanou tryskou EH4200_37_SMM. Více informací o sestavě horkého vtokového systému obsahuje 3D sestava vstříkovací formy. Kabeláž horkého vtokového systému je vedena drážkou v desce horkého bloku do zásuvky s víkem.



Obrázek 40. Horký vtokový systém

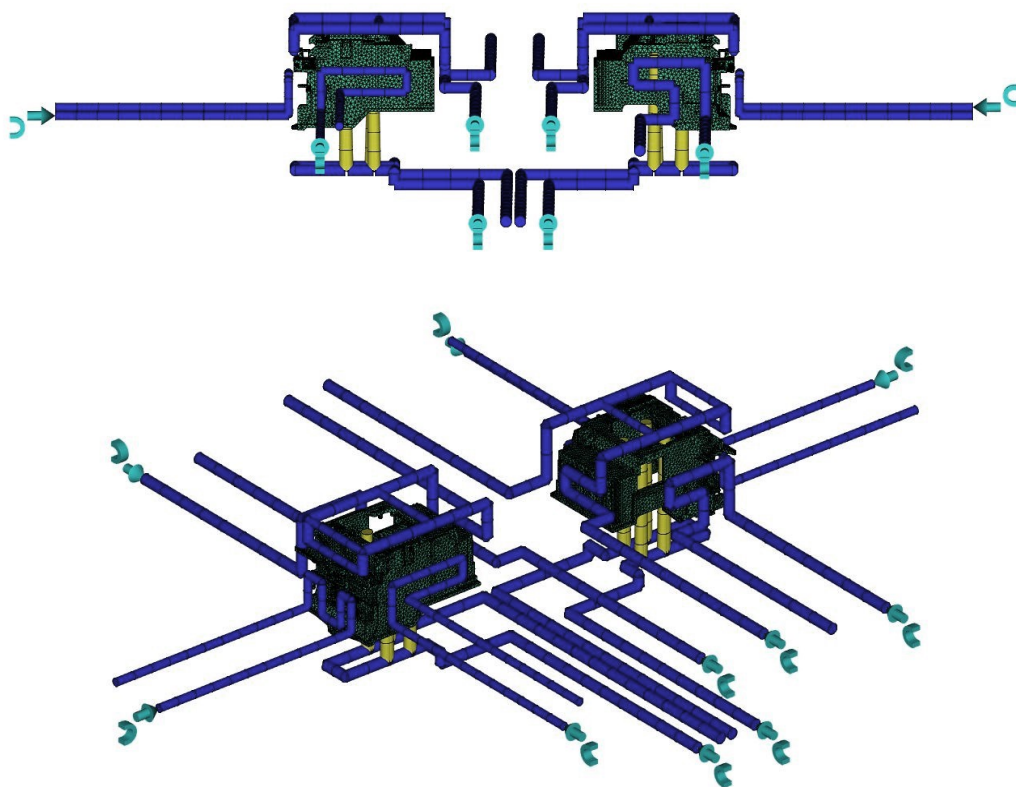


Obrázek 41. Usazený horký blok v desce

Na předešlém obrázku lze vidět desku horkého bloku, obsahující drážku pro osm kabelů a zásuvku s víkem. Tato deska je taktéž opatřena temperačními kanály, které navrhl konfigurační systém společnosti Meusburger. Temperace desky horkého vtoku není vždy nutná, ale při rozměrech desky 646 x 446 x 105,5 (výška x šířka x hloubka) Meusburger dodává pouze desky s temperací.

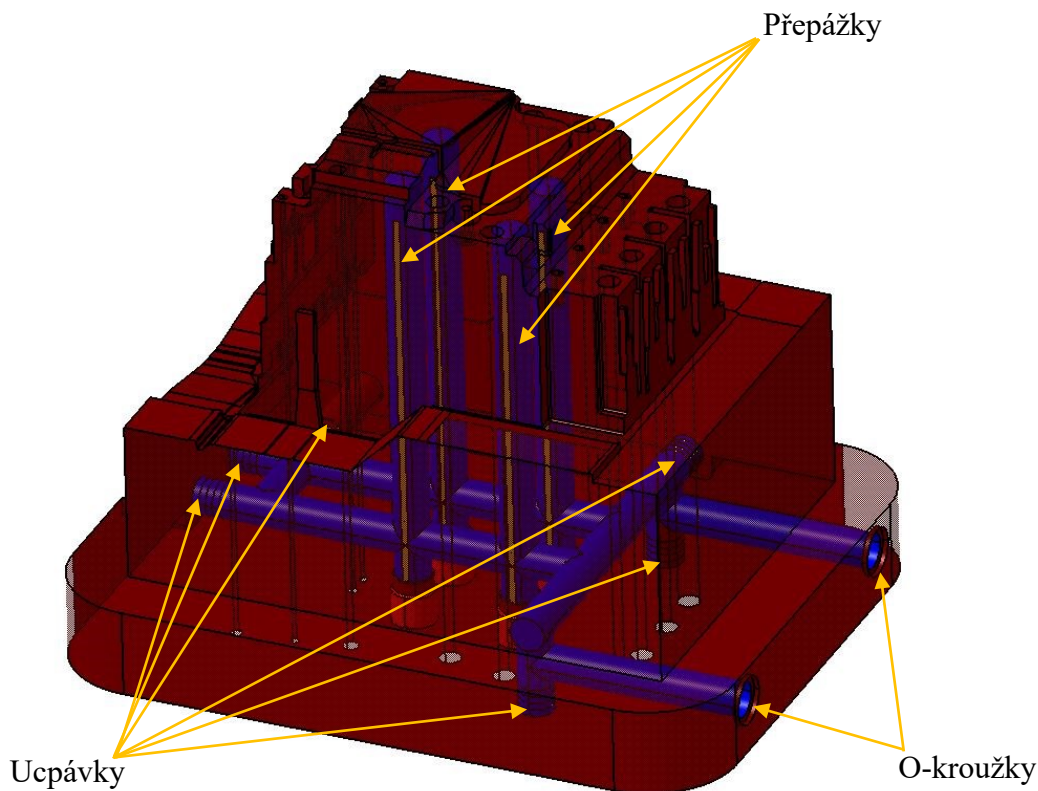
11.5 Temperační systém

Konstrukce temperačního systému je důležitá část procesu konstrukce vstřikovací formy. Při konstrukci je snaha dosáhnout co nejrovnoměrnějšího teplotního profilu na stěnách tvarové dutiny vstřikovací formy. Nejčastěji využívaným způsobem temperace je technologií vrtání temperačních kanálů. Z důvodu konstrukce tvarových vložek je nutné temperovat posuvné čelisti společně s tvárníkem a tvárnici a tak bylo navrženo celkem deset temperačních okruhů. Temperace je realizována vrtanými kanály o průměru 6 a 8 mm a dráha toku temperačního média je usměrněna pomocí ucpávek a přepážek. Temperační médium je z temperační jednotky přiváděno do rozvaděče temperačního média umístěného na vstřikovacím stroji, ze kterého jsou vyvedeny hadice do jednotlivých větví temperačního systému.



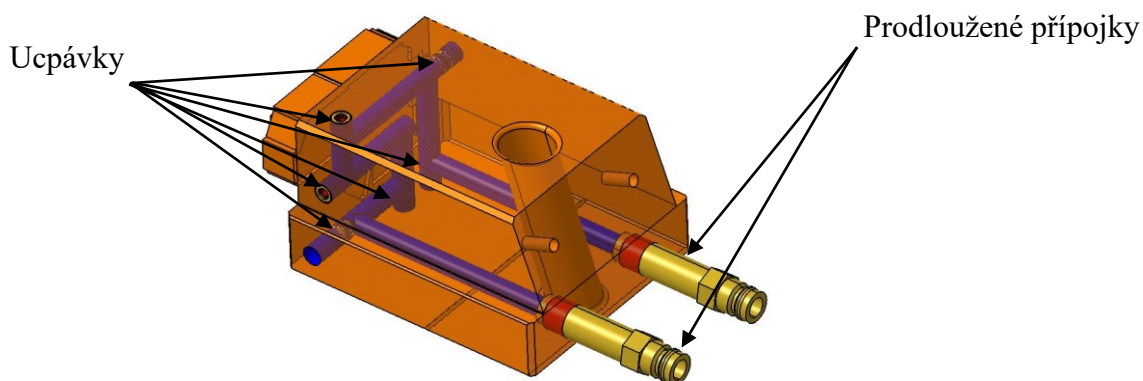
Obrázek 42. Trajektorie temperačního média v navrženém temperačním systému

Tvárníky vstříkovací formy jsou temperovány vrtanými kanály o průměru 8 mm s ucpávkami a přepážkami. Přívod a vývod temperačního média je realizován přes přípojky se závitem na levé pohyblivé kotevní desce. Temperační kanály tvárníku a kotevní desky jsou utěsněny za pomoci o-kroužků.



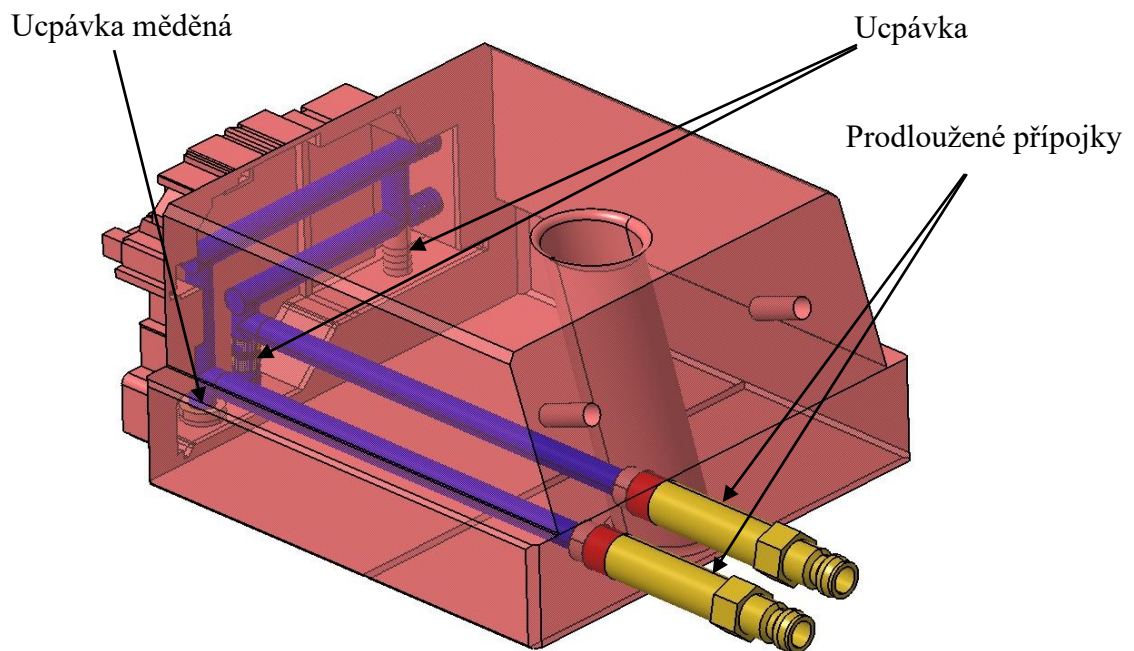
Obrázek 43. Temperační okruh tvárníku vstříkovací formy

Tvarové posuvné čelisti jsou temperovány stejně jako tvárníky vrtanými kanály s ucpávkami, kdy každý posuvná čelist má svůj vlastní přívod a vývod temperačního média. Přívod a odvod temperačního média je realizován za pomoci prodloužených přípojek se závity. Kanály tvarové čelisti 2 mají průměr 8 mm.

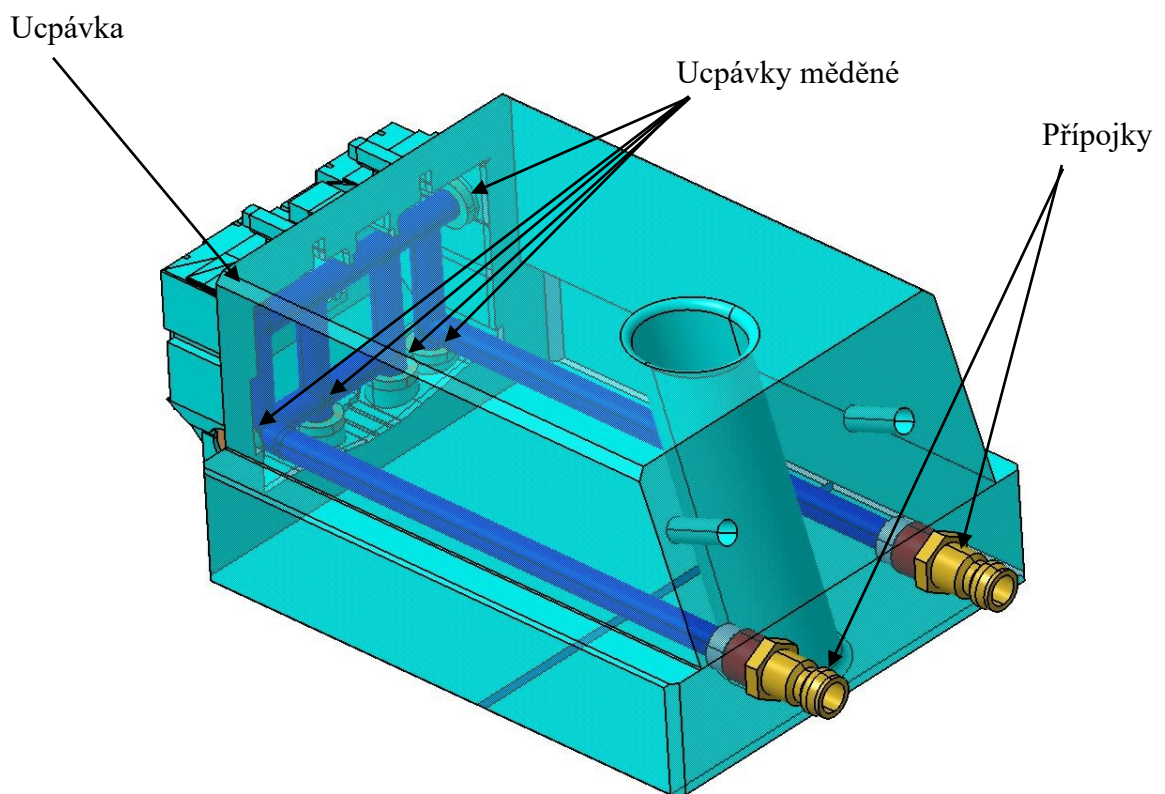


Obrázek 44. Temperační okruh tvarové čelisti 2

Kanály zbylých dvou tvarových posuvných čelistí jsou o průměru 6 mm. A z důvodu velikosti ucpávek zde musely být použity navíc i tenké měděné ucpávky.



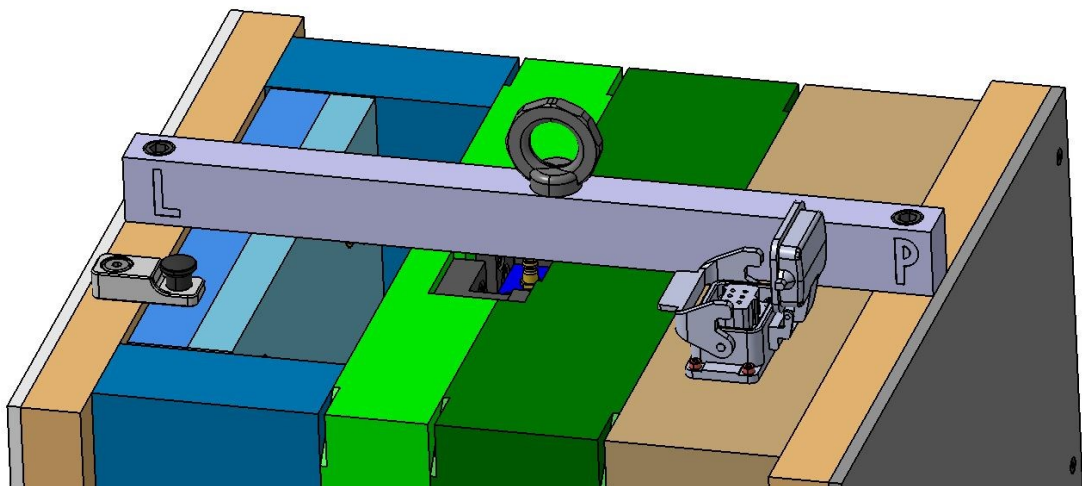
Obrázek 46. Temperační okruh tvarové čelisti 1



Obrázek 45. Temperační okruh tvarové čelisti 3

11.6 Transportní prvky

Pro manipulaci se vstříkovací formou je určena transportní lišta se závěsným okem, která je pomocí šroubů přišroubována k upínacím deskám vstříkovací formy. Zámek vyhadzovacího systému slouží k zamezení nežádoucího pohybu vyhadzovacího systému, který by se jinak mohl při transportu samovolně posunout a poškodit stěny tvárnice válcovými vyhadzovači. Zámek vyhadzovacího systému je přišroubován k levé upínací desce formy a přítlačné vyhadzovací desce.



Obrázek 47. Pohled na transportní prvky vstříkovací formy

12 ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ

Jedním z cílů diplomové práce je provedení tokových k čemuž byl použit software Moldflow Synergy 2023. Následující výsledky analýz obsahují i porovnání dalších variant s různým provedením vtokového systému.

12.1 Import 3D modelu a tvorba sítě

Při tvorbě analýzy je nejprve zapotřebí importovat 3D model vstřikovaného výrobku do prostředí softwaru Moldflow Synergy 2023. 3D model byl importován ve formátu .STP a následně byla zvolena síť, s pomocí které budou provedeny veškeré výpočty simulací. Zvolenou sítí byla 2,5D síť (Dual Domain mesh) tvořena trojúhelníkovými elementy se třemi uzly, kterou bylo následně zapotřebí patřičně upravit pro dosažení kvalitního výsledku analýzy.

Při tvorbě sítě obecně platí, že čím vyšší je hustota sítě, tím je výpočet analýzy přesnější, ale také její výpočty trvají déle. Díky nástroji zobrazující statistiky vytvořené sítě (Mesh statistics) lze odhalit a případně odstranit její nedostatky, které by později mohly negativně ovlivňovat výsledky nebo zbytečně prodlužovat výpočetní čas. Obecně platí, že poměr stran trojúhelníku (Aspect ratio) by neměl překračovat hodnotu 15 a hodnoty procenta shody (Match percentage) by měly být vyšší než 50 %. Pro zajištění kvalitního výpočtu se doporučuje hodnota vyšší než 80%. Počet volných hran (Free edges), hran nepropojených (Non-manifold edges), elementů bez orientace (Elements not oriented), elementů se protínajících (Element intersetions) a elementů překrývajících se (Fully overlapping elements) se musí rovnat nule, jinak výpočet simulace nemůže začít. Výsledky statistiky vytvořené 2,5D sítě jsou po úpravě sítě vyhovující a výsledná síť je kvalitní.

Aspect Ratio:

Maximum	Average	Minimum
18,86	2,30	1,15

Edge details:

Free edges	0
Non-manifold edges	0

Orientation details:

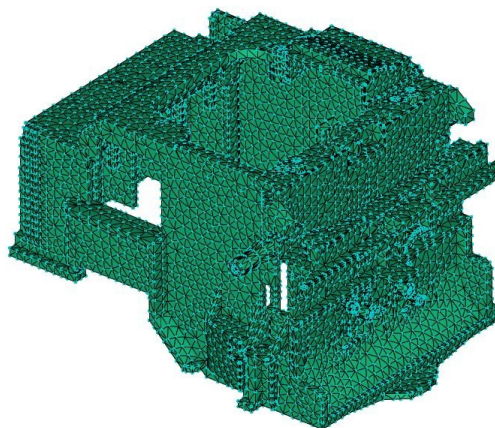
Elements not oriented	0
-----------------------	---

Intersection details:

Element intersections	0
Fully overlapping elements	0

Match percentage:

Match percentage	88,3%
Reciprocal percentage	90,50%

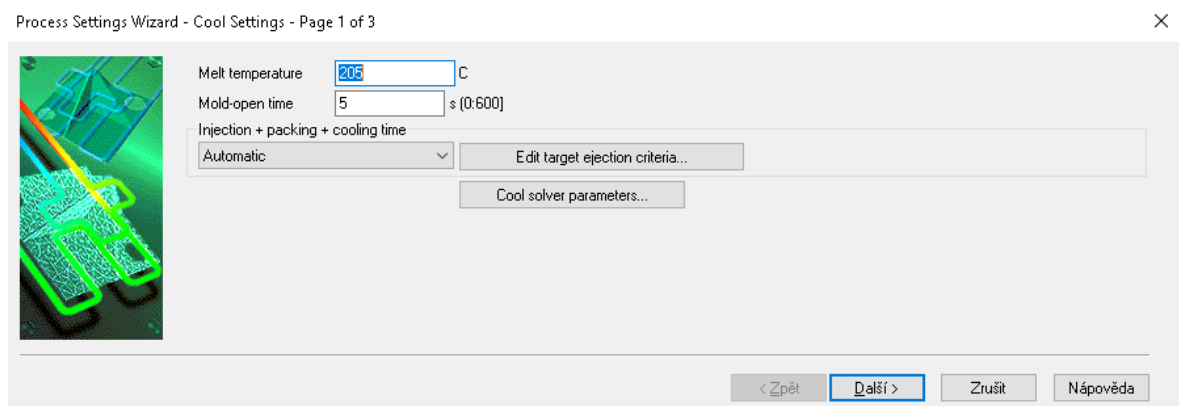


Obrázek 48. 2,5D síť modelu a její statistiky

12.2 Procesní podmínky

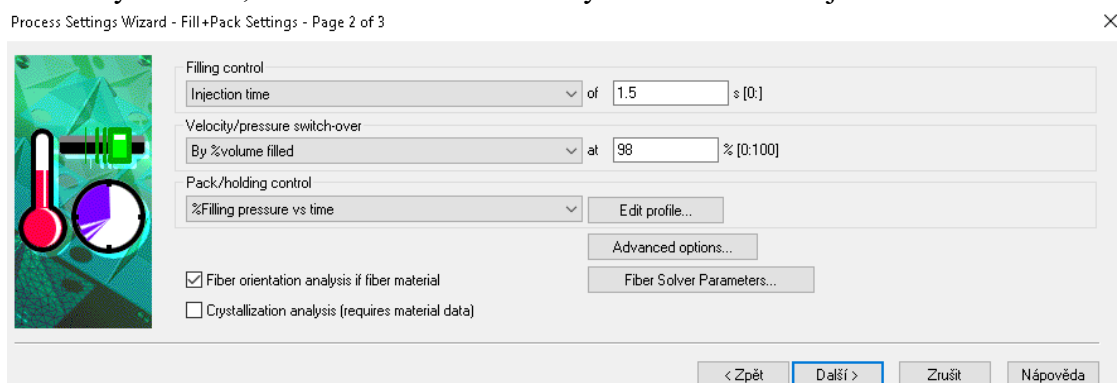
Po vytvoření a úpravě sítě je zapotřebí rozvrhnout tvarové dutiny a definovat trajektorie temperačního a vtokového systému na základě navržené vstřikovací formy. Trajektorie těchto systémů byly vytvořeny v softwaru Catia V5 a následně byly importovány ve formátu .igs do softwaru Moldflow Synergy, kde byly definovány jejich průřezy a jiné vlastnosti. Následovalo určit místa vstupů temperačního média a vstupu polymerní taveniny. Posledním krokem je tvorba bloku vstřikovací formy a nastavení procesních parametrů.

Podle doporučených hodnot z materiálového listu byla zvolena teplota taveniny 205 °C a doba otevření formy 5 s. Povrch formy je temperován na teplotu 90°C a teplota pro bezpečné vyhození výstřiku z dutiny formy je 133 °C. Minimální počet zatuhlých vrstev v objemu výstřiku při dosažení vyhazovací teploty je nastaven na hodnotu 98 %.

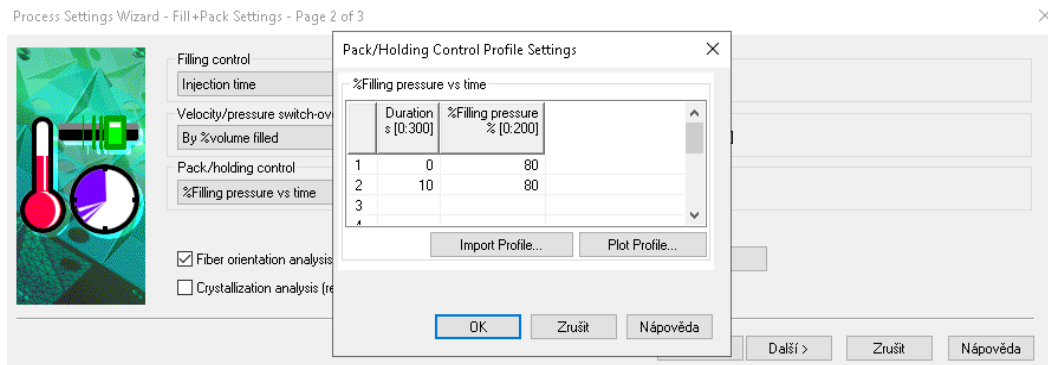


Obrázek 49. Nastavení procesních podmínek (1. krok)

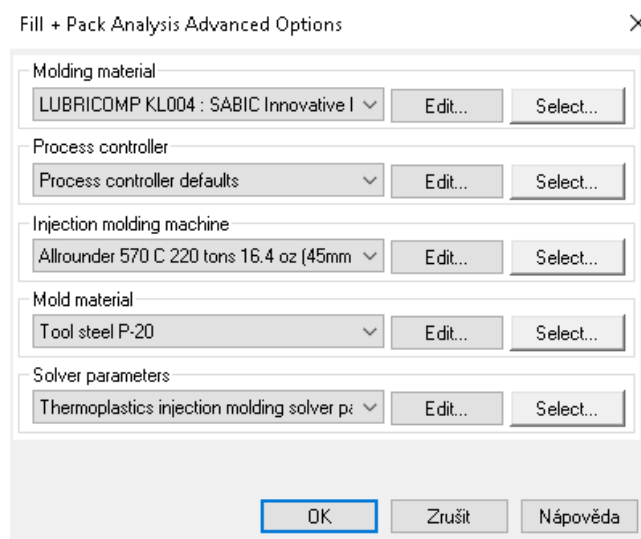
V dalším kroku byla nastavena hodnota kontroly plnění dle vstřikovacího tlaku na 1,5 s a bod přepnutí na dotlak byl nastaven na 98 % zaplnění dutiny polymerní taveninou. Dalším parametrem je nastavení hodnot dotlaku a jeho čas, po který bude působit. Nastaven byl konstantní dotlak 80 % vstřikovacího tlaku po dobu 10 s. V tomto kroku byl taktéž zvolen vstřikovaný materiál, materiál vstřikovací formy a vstřikovací stroj.



Obrázek 50. Nastavení procesních podmínek (2. krok)

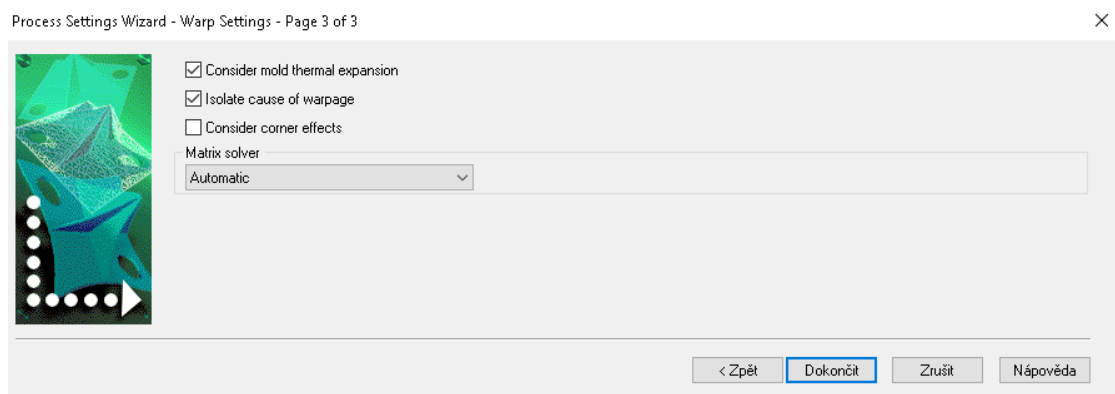


Obrázek 51. Nastavení působení dotlaku



Obrázek 53. Nastavení materiálu

Posledním krokem bylo nastavení zohlednění teplotní roztažnosti formy při simulaci a rozdělení vlivu deformace.



Obrázek 52. Nastavení procesních podmínek (3. krok)

Po posledním kroku nastavování procesních podmínek byly zpětně doplněny vlastnosti temperačního média. Teplota temperačního média byla nastavena na 85 °C a jeho objemový průtok systémem byl nastaven na 10 l/min.

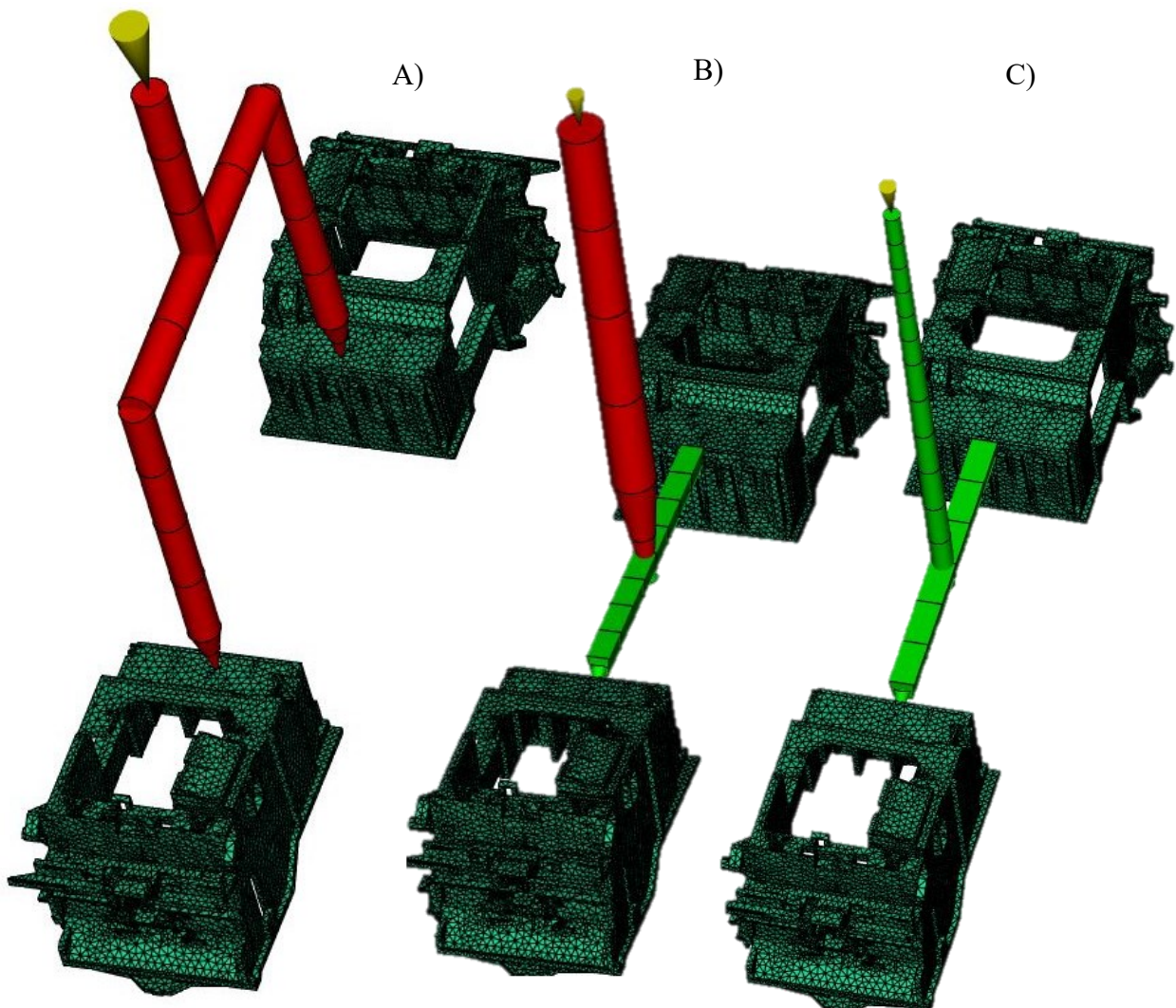
13 VÝSLEDKY ANALÝZ

Kapitola výsledků analýz je rozdělena do tří základních podkapitol s ohledem na výsledky ze softwaru Moldflow Synergy. Z každé analýzy je vybráno několik výsledků, které jsou popsány. Následující podkapitola analýzy plnění a dotlaku obsahuje taktéž různé provedení vtokového systému, které jsou mezi sebou porovnávány.

13.1 Výsledky analýzy plnění a dotlaku

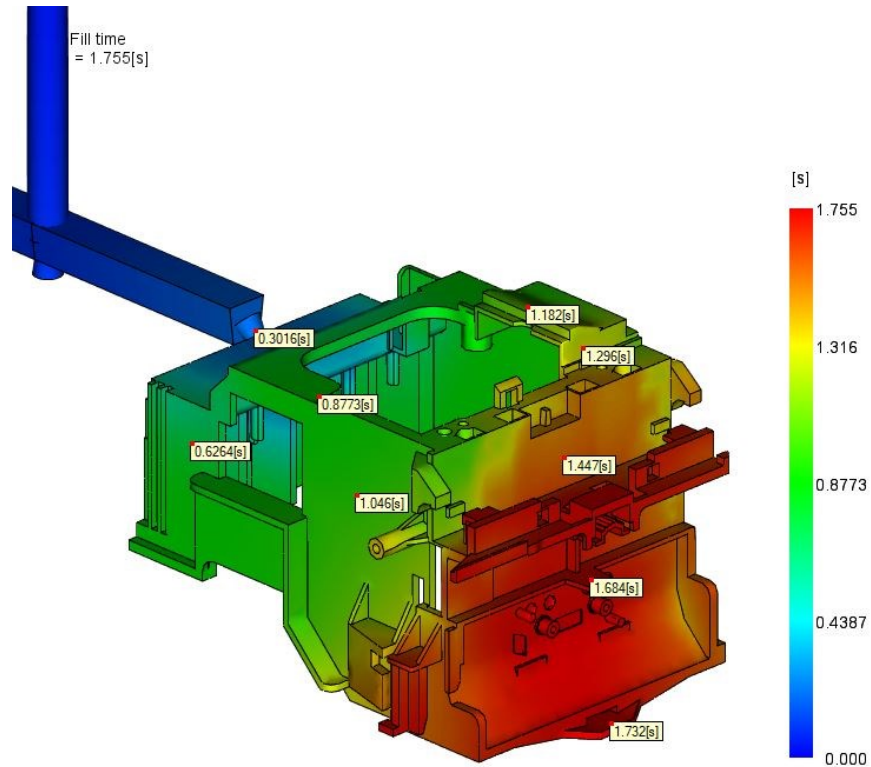
13.1.1 Analýza plnění (Fill time)

V analýze plnění a dotlaku jsou uvedeny výsledky vyjadřující průběh plnění tvarové dutiny a průběh dotlakové fáze. V návrhu konstrukci vstřikovací formy byl použit horký vtokový systém, ale kromě simulace navržené vstřikovací formy byly vytvořeny analýzy i pro studený a kombinovaný vtokový systém.

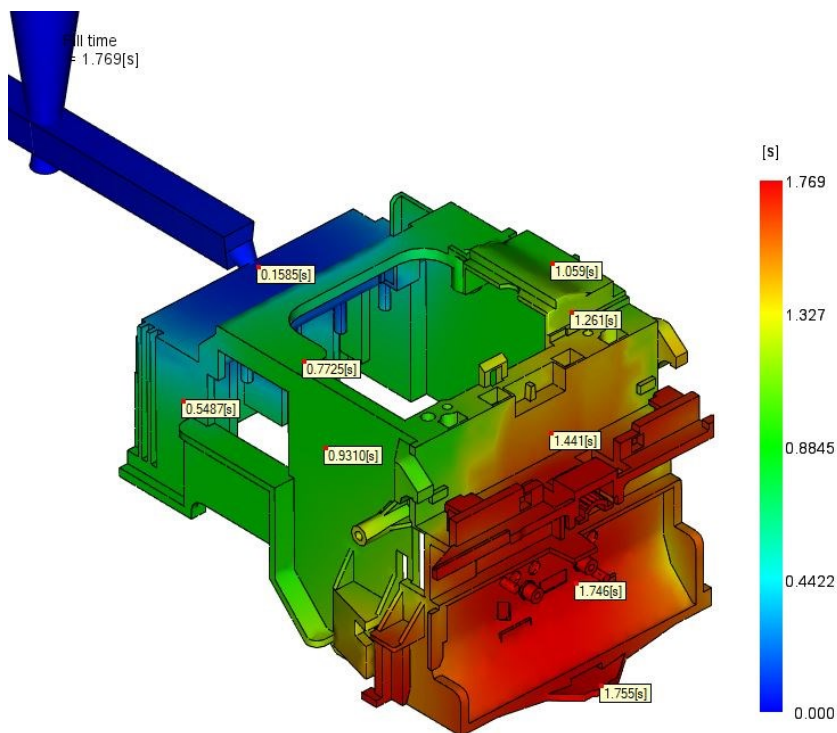


Obrázek 54. Varianty vtokového systému (A- horký, B- kombinovaný, C- studený)

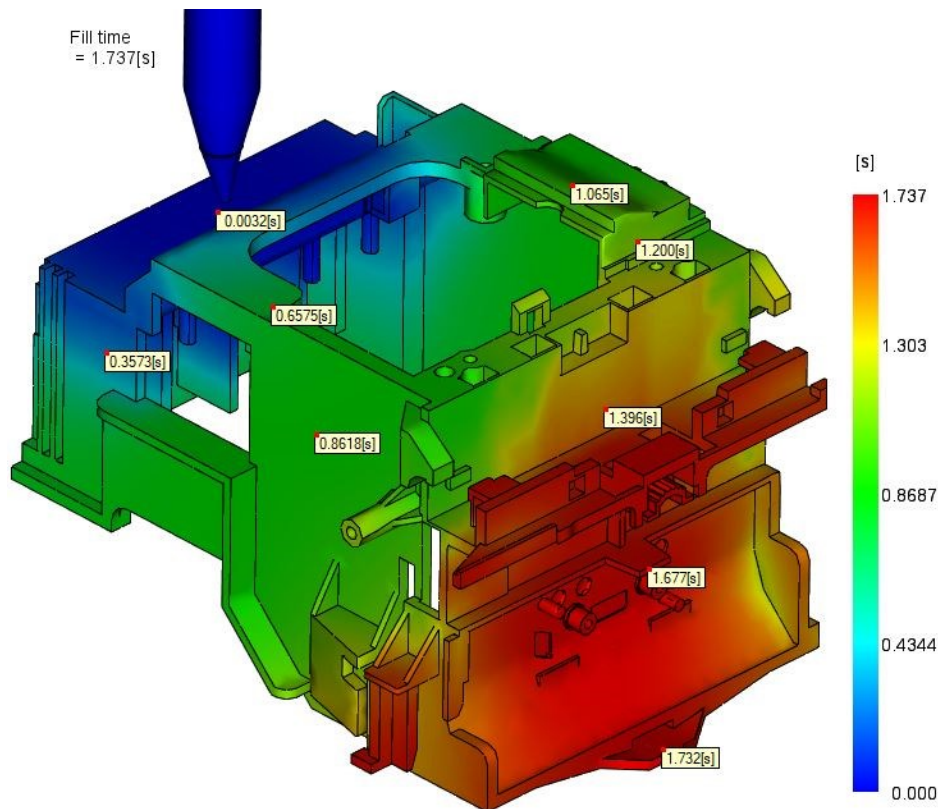
Výstupem analýzy plnění je grafické vyhodnocení času potřebného pro zaplnění tvarové dutiny formy polymerní taveninou. Modrou barvou jsou označeny oblasti, která jsou zaplněna nejdříve a červenou barvou jsou označeny oblasti zaplněné nejpozději.



Obrázek 55. Výsledek analýzy času plnění studeného vtoku



Obrázek 56. Výsledek analýzy času plnění kombinovaného vtoku

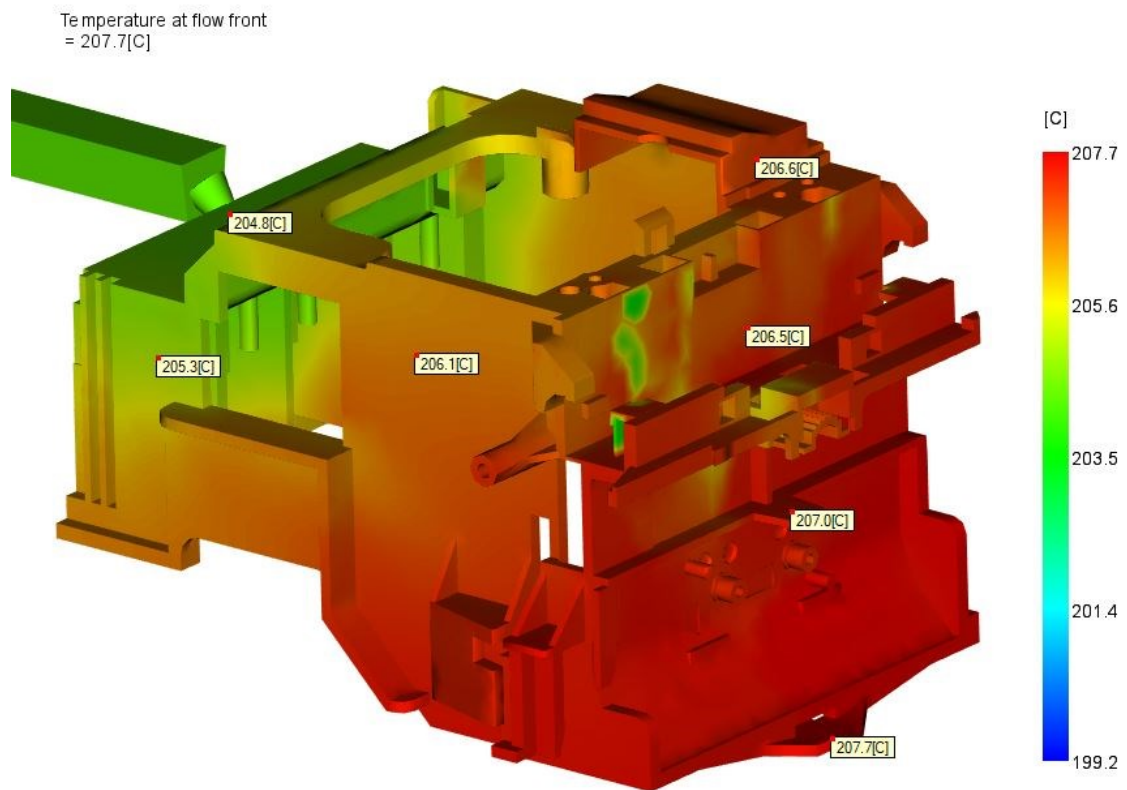


Obrázek 57. Výsledek analýzy času plnění horkého vtoku

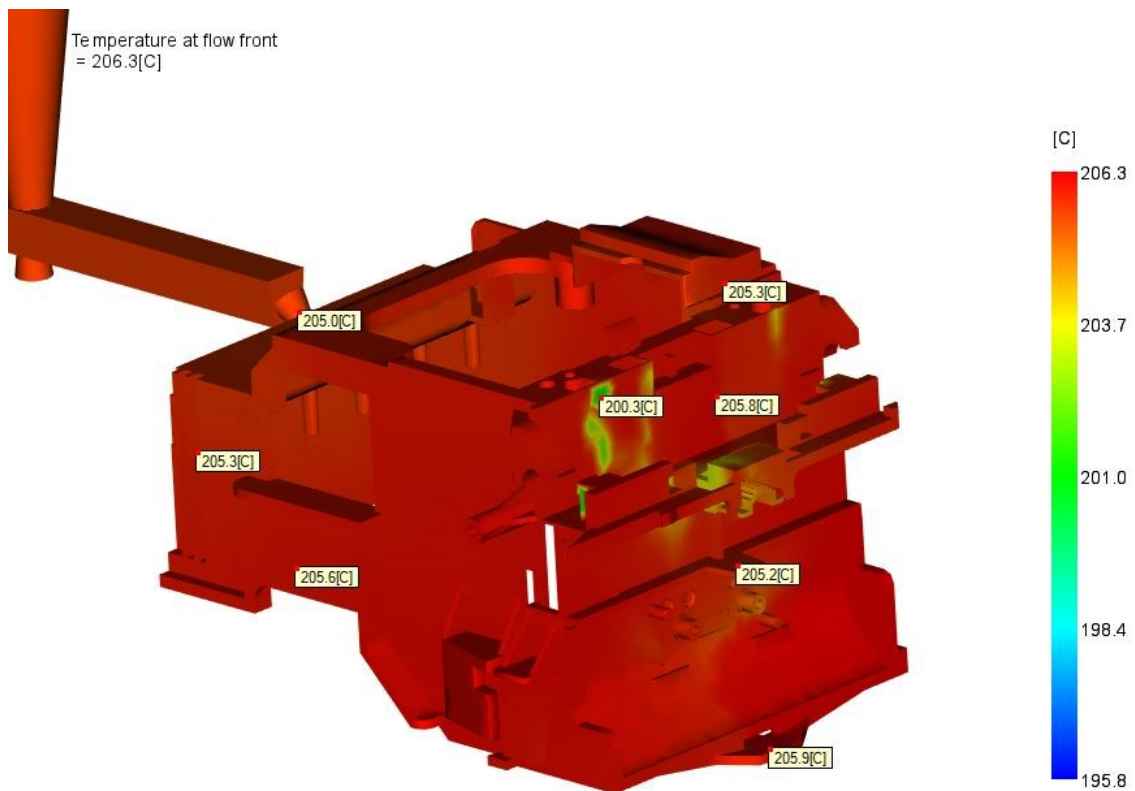
Z výsledku výše analýzy plnění je zřejmé, že u všech variant dojde ke kompletnímu zaplnění tvarové dutiny formy v čase 1.7 s. Všechny varianty nabývají obdobných časů, ale u varianty s horkým vtokovým systémem dochází k odlišnému průběhu plnění z důvodu odlišného umístění vtokového ústí.

13.1.2 Teplota na čele taveniny (Temperature at flow front)

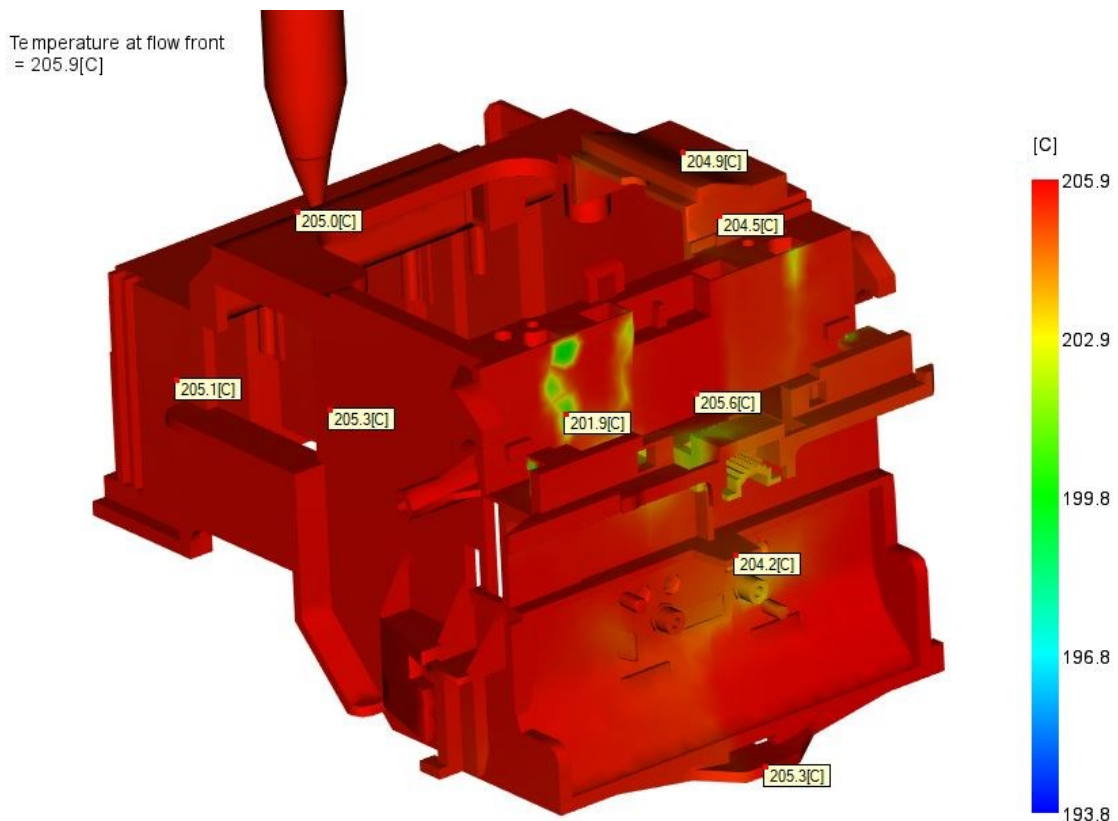
Výsledek teploty na čele taveniny znázorňuje teplotu polymerní taveniny v průběhu tečení v dané oblasti tvarové dutiny. V procesních podmínkách byla dle materiálového listu nastavena teplota 205 °C. Doporučený rozsah teploty taveniny se pohybuje v rozmezí 185 až 225 °C. Ve všech variantách teplota nabývala doporučených hodnot a nehrozí tedy vzniku vad způsobených degradací polymeru. Nejrovnoměrnější teploty čela taveniny dosahoval systém studeného vtoku, kde se rozdíl teplot nabýval hodnoty 8,5 °C.



Obrázek 59. Výsledek analýzy teploty na čele taveniny studeného vtokového systému



Obrázek 58. Výsledek analýzy teploty na čele taveniny kombinovaného vtokového systému



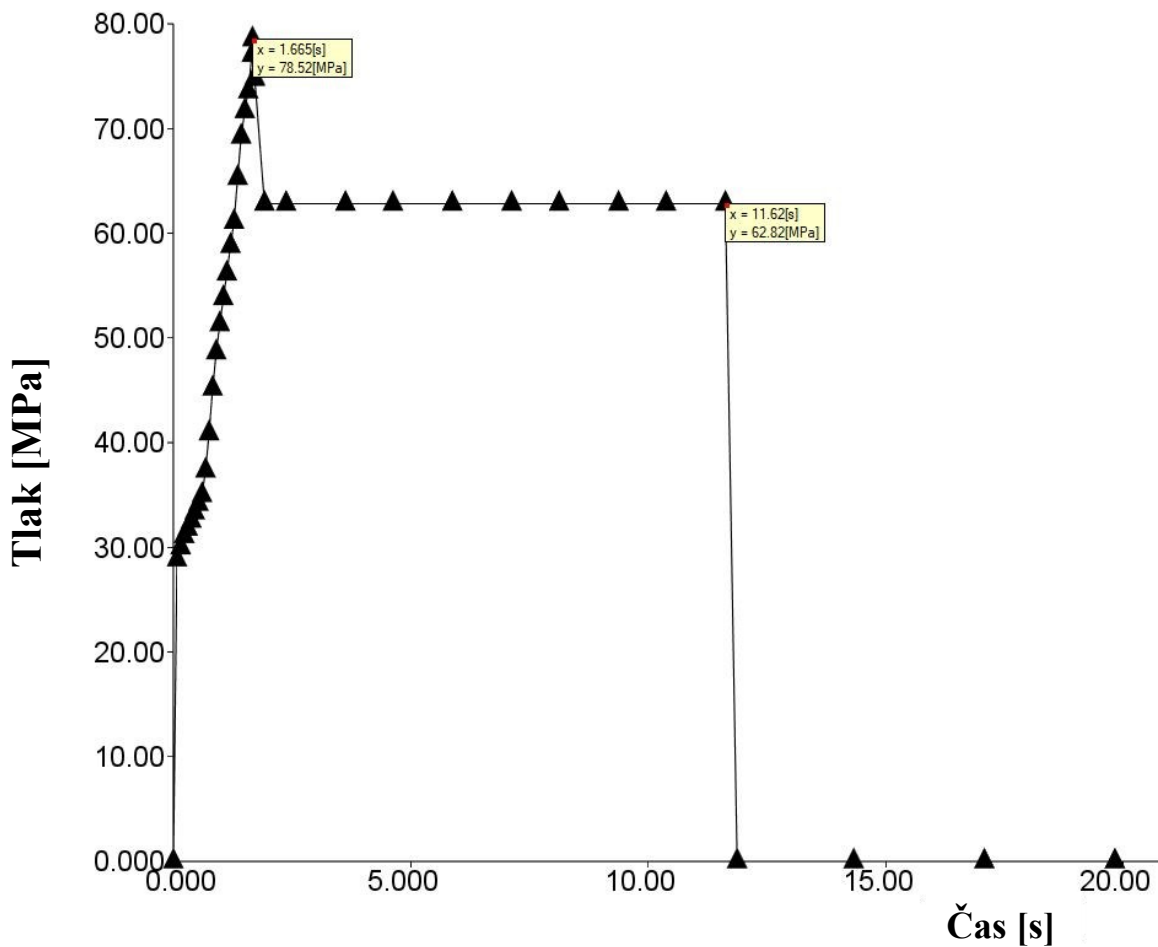
Obrázek 60. Výsledek analýzy teploty na čele taveniny horkého vtokového systému

13.1.3 Tlak v místě vtokového ústí (Pressure at injection location)

Výsledkem analýzy je graf závislosti vstřikovacího tlaku na čase v místě vtokového ústí. V procesních podmínkách byla nastavena hodnota zaplnění dutiny formy 98 %, v tento čas dojde na přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak. V čase 1,665 s dojde k přepnutí a v tomto bodě dosahuje hodnota maximálního tlaku 78,52 MPa. Dotlaková fáze končí v čase 11,62 s a hodnota maximálního tlaku je 62,82 MPa. Poté následuje pokles napětí na nulovou hodnotu. V následující tabulce jsou zaznamenány hodnoty tlaků a časů získaných z analýz.

Tabulka 6. Výsledky analýz tlaků v místech vtokového ústí daných variant

Vtokový systém:	Horký	Kombinovaný	Studený
Maximální tlak [MPa]	78,52	78,44	112,5
Tlak při působení dotlaku [MPa]	62,82	62,752	90
Přepnutí na dotlak [s]	1,665	1,704	1,689



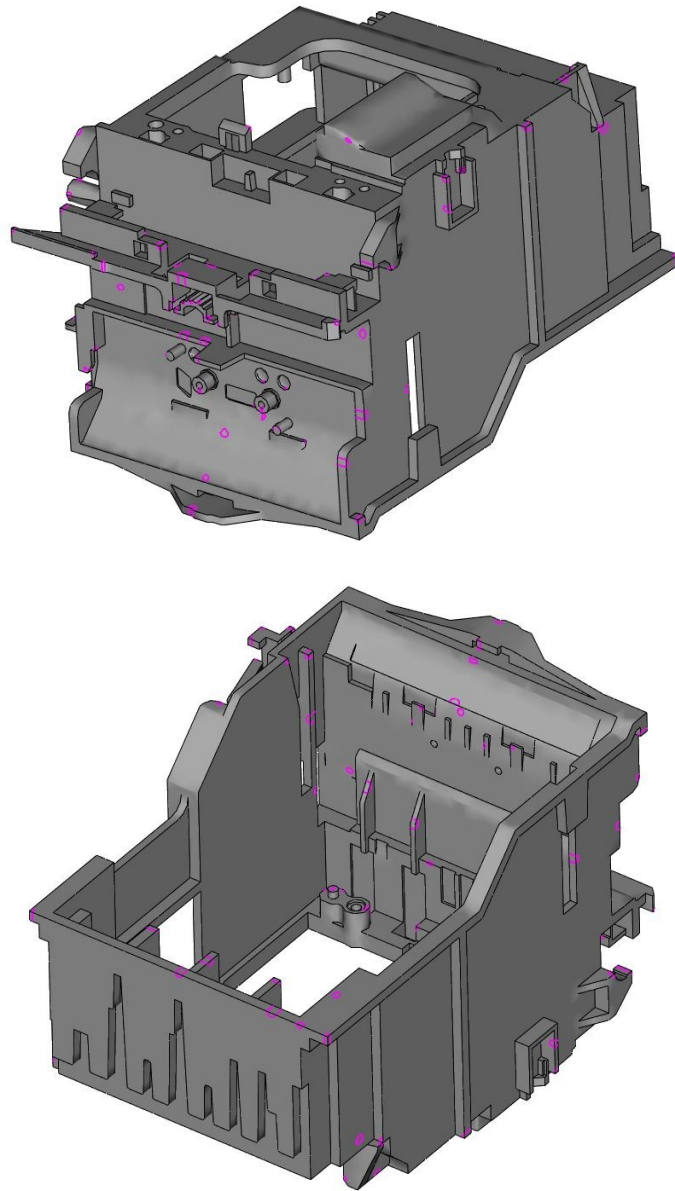
Obrázek 61. Výsledek analýzy tlaku v místě vtokového ústí

13.1.4 Rychlost smykové deformace (Shear rate)

V materiálovém listu maximální dovolená hodnota smykové deformace činí $40\,000\text{ s}^{-1}$. Z výsledků analýzy plyne, že v žádné variantě vtokového systému nedochází k překročení této hodnoty a nedochází tak k degradaci materiálu. U horkého vtokového systému se nejvyšší hodnoty rychlosti smykové deformace ($98771,4\text{ s}^{-1}$) nacházely v oblasti vtokového ústí a v čele výrobku, které obsahuje náhlé změny tloušťek a jedná se o tvarově nejsložitější oblast dílu. Ve variantách s kombinovaným a studeným vtokovým systémem se nejvyšší hodnoty rychlosti smykové deformace nacházely taktéž v místech vtokových ústí a v oblastech náhlých zúžení dutiny, jednalo se o hodnoty $32713,8\text{ s}^{-1}$ (kombinovaný) a $38317,8\text{ s}^{-1}$ (studený).

13.1.5 Vzduchové kapsy (Air traps)

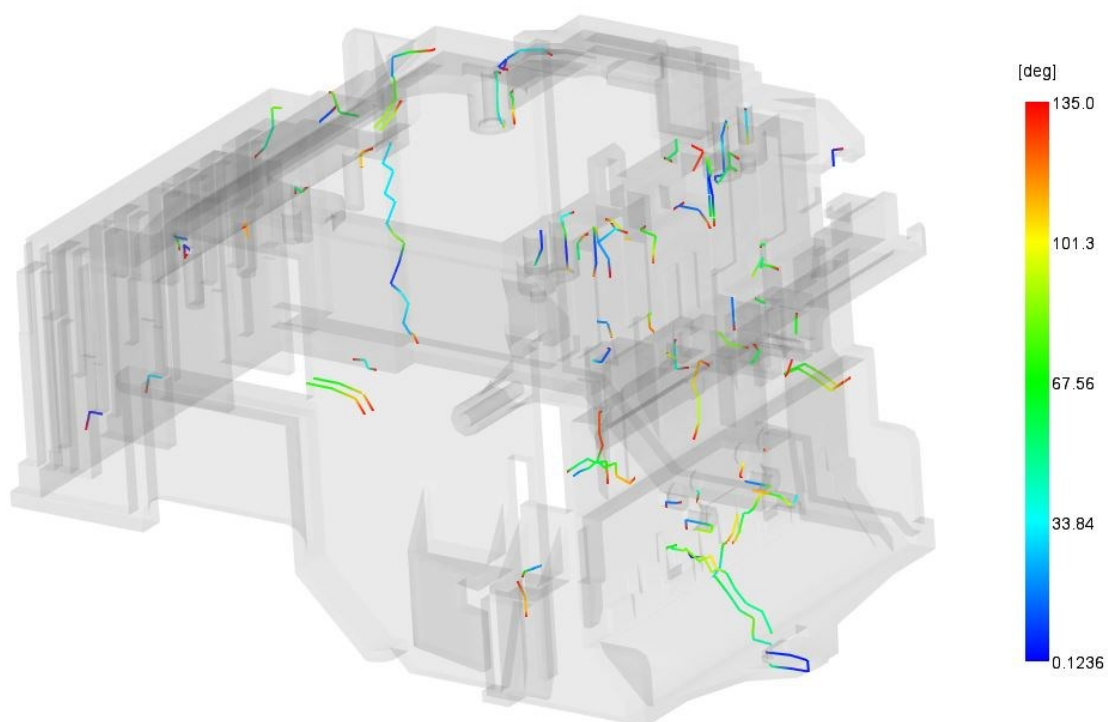
Výsledek této analýzy graficky zobrazuje oblasti ve kterých může docházet k výskytu vzduchových kapes výstřiku. V těchto oblastech může docházet k prudkému stlačování vzduchu, které může následně vést k nechtěnému zvýšení teploty polymerní taveniny. Nárůst teploty vlivem stlačeného vzduchu se na výstřiku projevuje jako spálené místo vlivem Diesel efektu. Oblasti s uzavřeným vzduchem se také zvyšuje riziko výskytu povrchových a skrytých bublin. Výsledky analýzy lze vidět na obrázku č. 64 a pomocí této analýzy je schopen konstruktér navrhnout řešení pro únik vzduchu z tvarové dutiny. Běžně se tento problém řeší přidáním odvzdušňovacích kanálů, které v tomto případě nebyly řešeny, protože se předpokládá, že vzduch unikne mezi vůlemi mezi posuvnými čelistmi, a vyhazovači. V navržené konstrukci vstřikovací formy se odformují tři stěny výstřiku pomocí bočních čelistí, tudíž je zde spousta lícovaných spojů, kterými může vzduch uniknout. V případě, že by všechen vzduch nestačil uniknout skrze vůle, je možné odvzdušňovací kanály doplnit dodatečně. U všech variant vtokových systému byly výsledky vzniku vzduchových kapes téměř totožné.



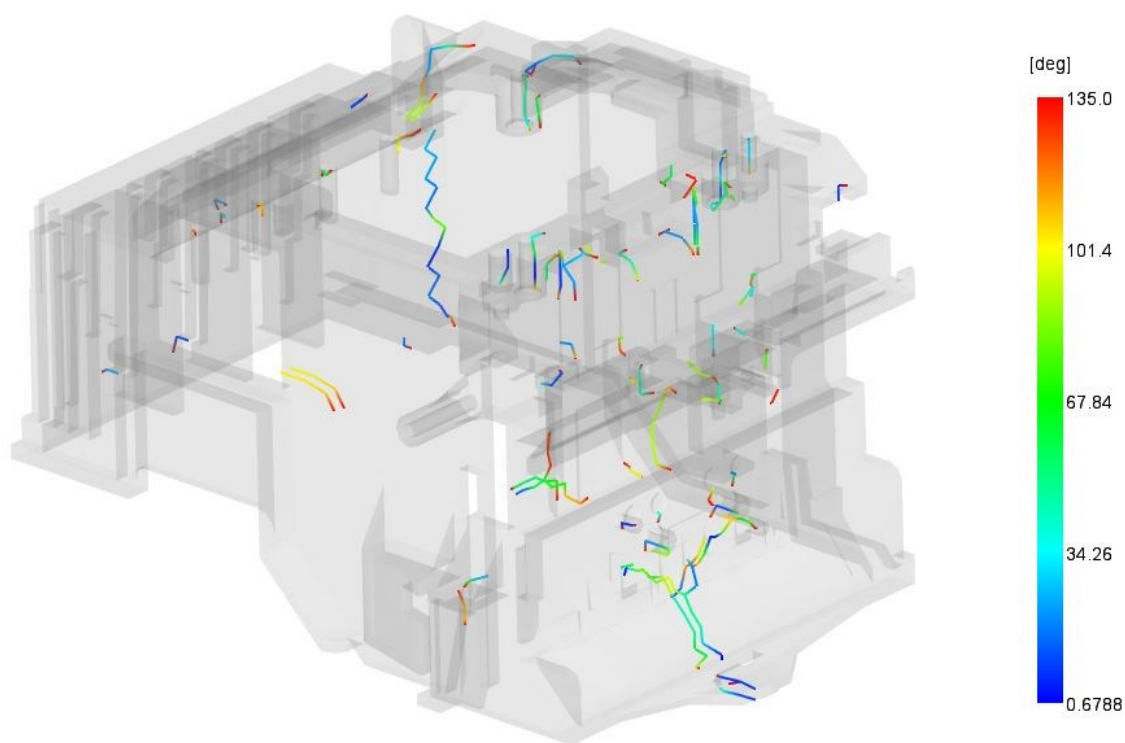
Obrázek 62. Výsledky analýzy vzniku vzduchových kapes horkého systému

13.1.6 Studené spoje (Weld lines)

Analýza graficky zobrazuje oblasti náchylné ke vzniku studených spojů. Studené místa jsou spoje dvou čel proudů taveniny, kdy tyto čela nemají dostatečnou teplotu pro kvalitní spojení makromolekulárních řetězců polymeru. To zapříčiňuje zhoršení mechanických vlastností a studené spoje se taktéž můžou projevit jako optická vada. Jejich výskyt je dán geometrií dílu a způsobem plnění tvarové dutiny polymerní taveninou. Polymerní tavenina obtéká různá tvarová vybrání a tudíž nelze odstranit vznik studených spojů. Omezit však lze vhodným umístěním vtokového ústí či úpravou procesních podmínek. Výsledek analýz horkého a kombinovaného systému dosahoval obdobných oblastí a hodnot, výrazněji se lišila pouze analýza studeného vtokového systému.



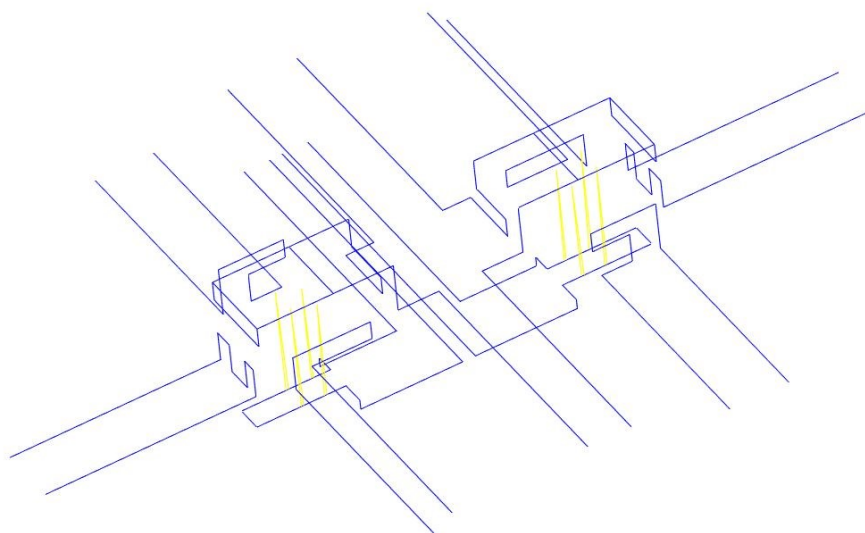
Obrázek 63. Výsledek analýzy vzniku studených spojů horkého vtokového systému



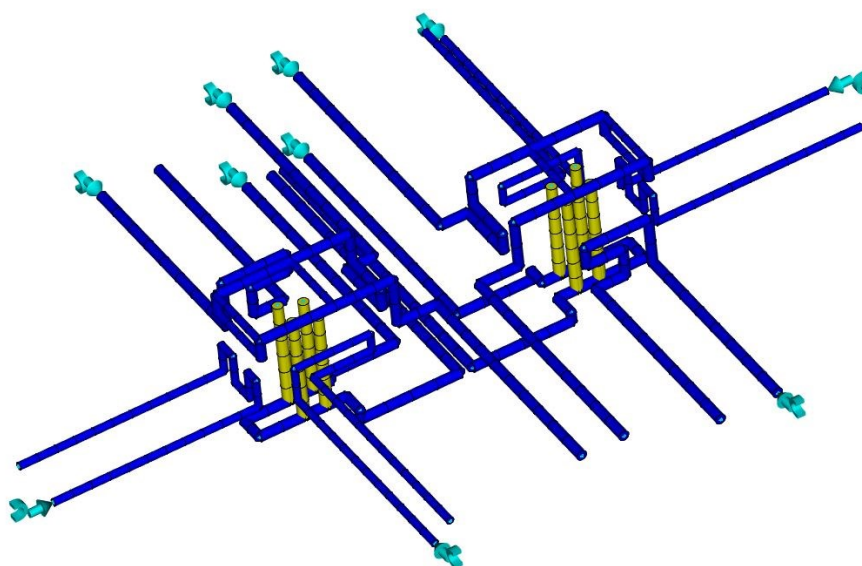
Obrázek 64. Výsledek analýzy vzniku studených spojů studeného vtokového systému

13.2 Výsledky analýzy teploty

Tepepační systém na následujícím obrázku byl vytvořen pomocí křivek v prostředí softwaru Catia V5. Byl importován do softwaru Moldflow Synergy ve formátu .igs kde mu byly přidány potřebné vlastnosti. Tepepační systém tvoří deset větví, kdy každá má svůj vstup pro přívod tepepačního média a jeho výstup. Tepepační systém tvoří kanály o průměru 6 a 8 mm a pro usměrnění toku tepepačního média byly použity ucpávky a přepážky z katalogu Meusburger. Jako tepepační médium byla definována voda o teplotě 85°C a objemovém průtoku 10 l/min. Kromě přidání vstupů média do větví a přiřazení vlastností tepepačního média byla trajektorii tepepačního systému přidána síť, která byla vzápětí zkontrolována funkcí Beam L/D ratio.



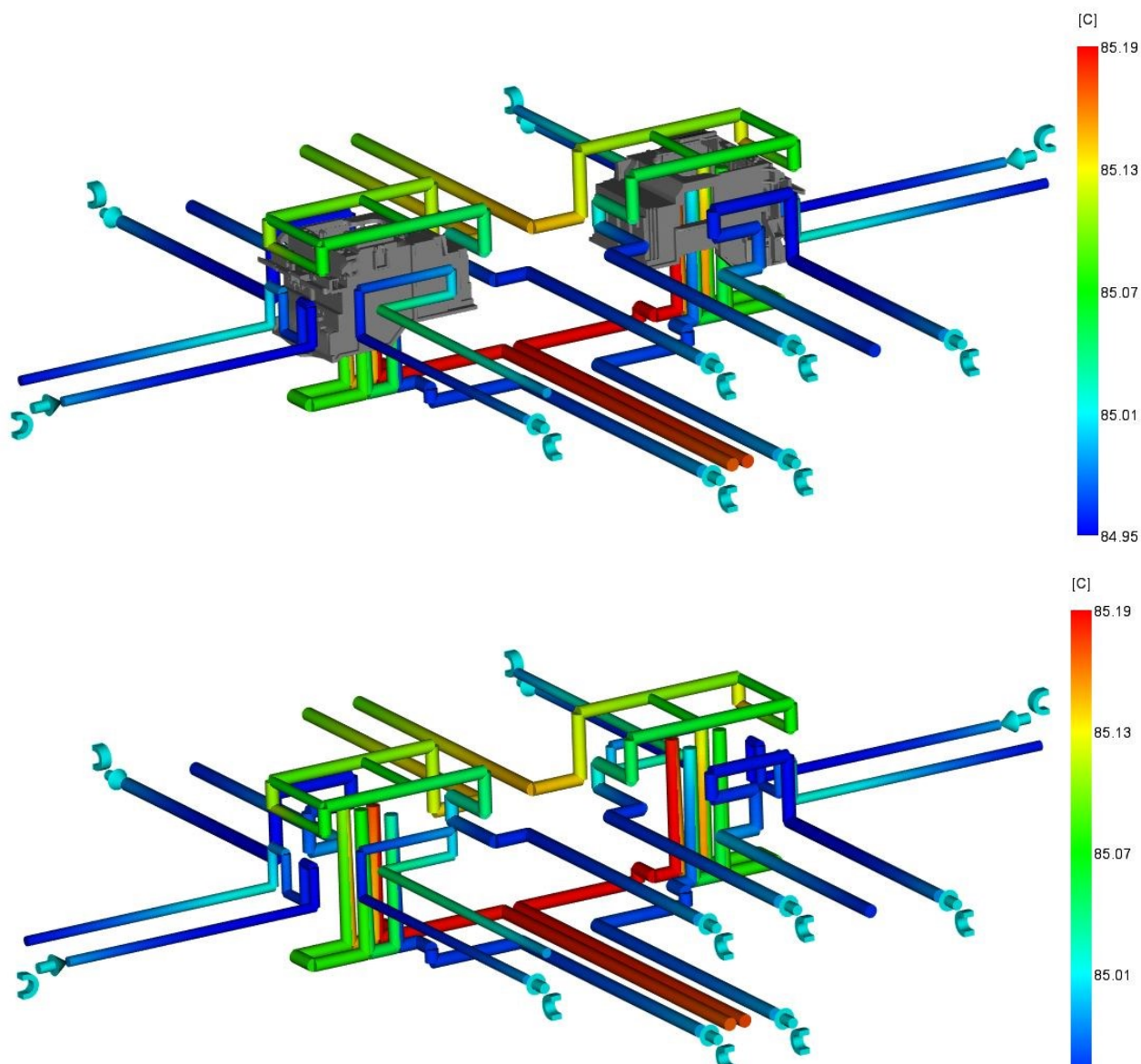
Obrázek 65. Trajektorie tepepačního systému



Obrázek 66. Beam elementy tepepačního systému

13.2.1 Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)

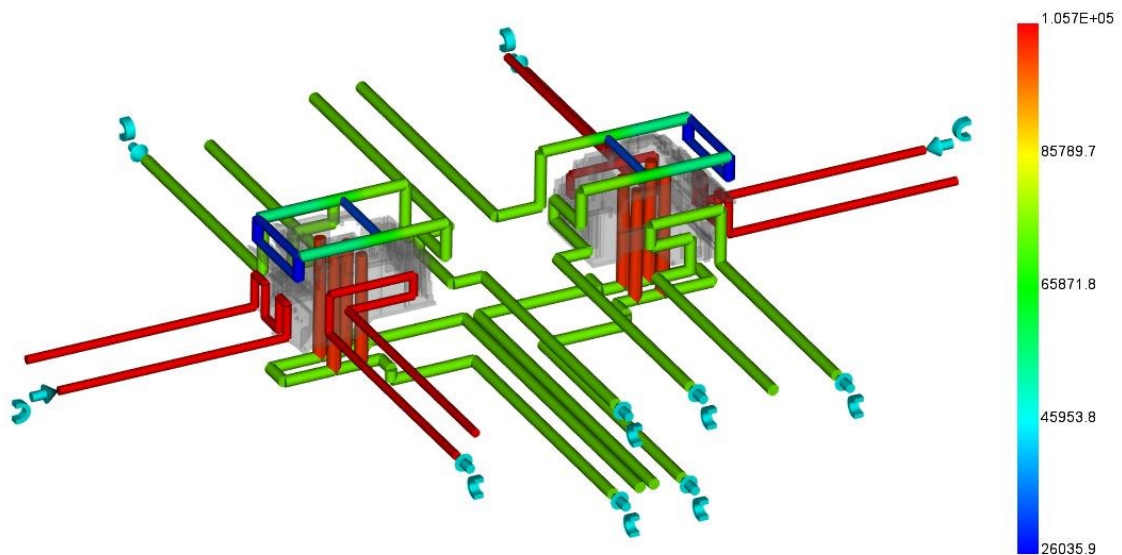
Výsledkem je grafické znázornění teploty temperačního média v jednotlivých temperačních okruzích. Obecně platí, že rozdíl teploty na vstupu a výstupu temperačního média by neměl přesáhnout hodnotu 3 °C. V navrženém temperačním systému mělo temperační médium největší rozdíl teplot 0,24 °C a okruh vyhovuje. Při konstrukci temperačního systému je snaha dosáhnout co nejrovnoměrnější teploty vstřikovací formy. Rovnoměrné teplotní pole přispívá přesnosti a vzhledu výstřiku. Nerovnoměrné teplotní pole pak může zapříčinit velké a nežádoucí vnitřní pnutí, což se odrazí na výsledné deformaci a vzhledu výstřiku. Při prvotní konstrukci temperačního systému byl rozdíl teplot okruhu tvárnice větší než 8 °C a proto byl tento okruh rozdělen na dvě větve, čímž výsledný rozdíl teplot nepřekračoval doporučenou hodnotu.



Obrázek 67. Výsledek analýzy teploty temperačního média

13.2.2 Reynoldsovo číslo (Circuit Reynolds number)

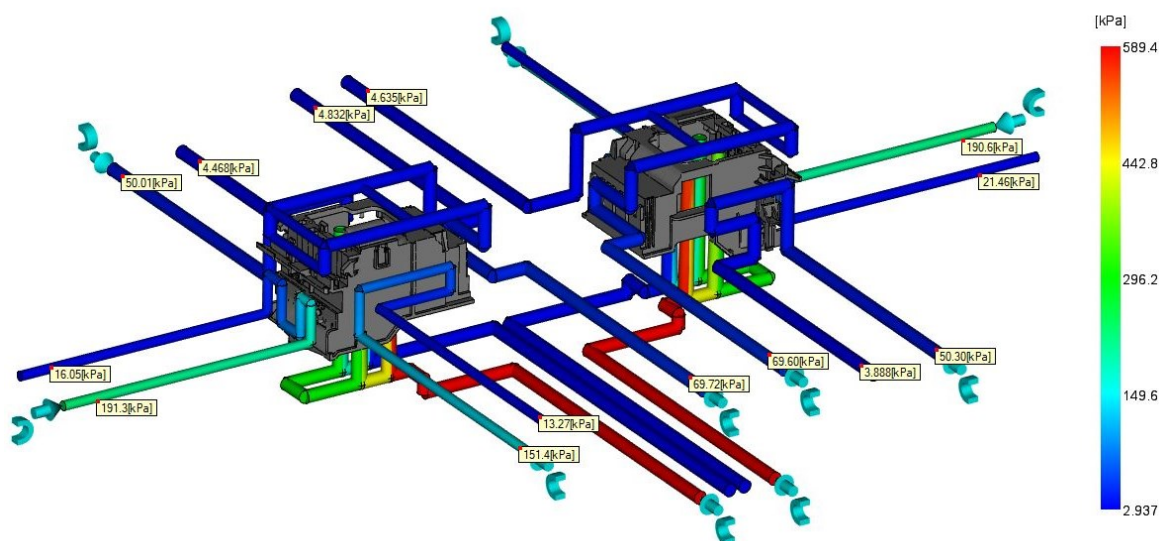
Pomocí Reynoldsova čísla proudící kapaliny v temperačních kanálech lze určit způsob tečení temperačního média. Nežádoucí je laminární typ tečení, který se vyskytuje při hodnotách Reynoldsova čísla menšího než 2500. Žádoucí turbulentní proudění nabývá hodnot Reynoldsova čísla přes 10 000, kdy v rozmezí hodnot 2500 až 10 000 se nachází přechodová oblast. Ve všech okruzích temperačního systému temperační médium teče turbulentně a nejnižší hodnota Reynoldsova čísla nabývá hodnoty 26 035,9 a nejvyšší je 105 750 při objemovém průtoku temperačního média 10 l/min. Při zadání objemového průtoku 10 l/min jsou hodnoty Reynoldsova čísla vysoká, je tedy možné z ekonomických důvodů tento objemový průtok snížit na poloviční hodnotu, při kterém by stále probíhalo turbulentní proudění.



Obrázek 68. Výsledek analýzy Reynoldsova čísla

13.2.3 Tlak v temperačních kanálech (Circuit pressure)

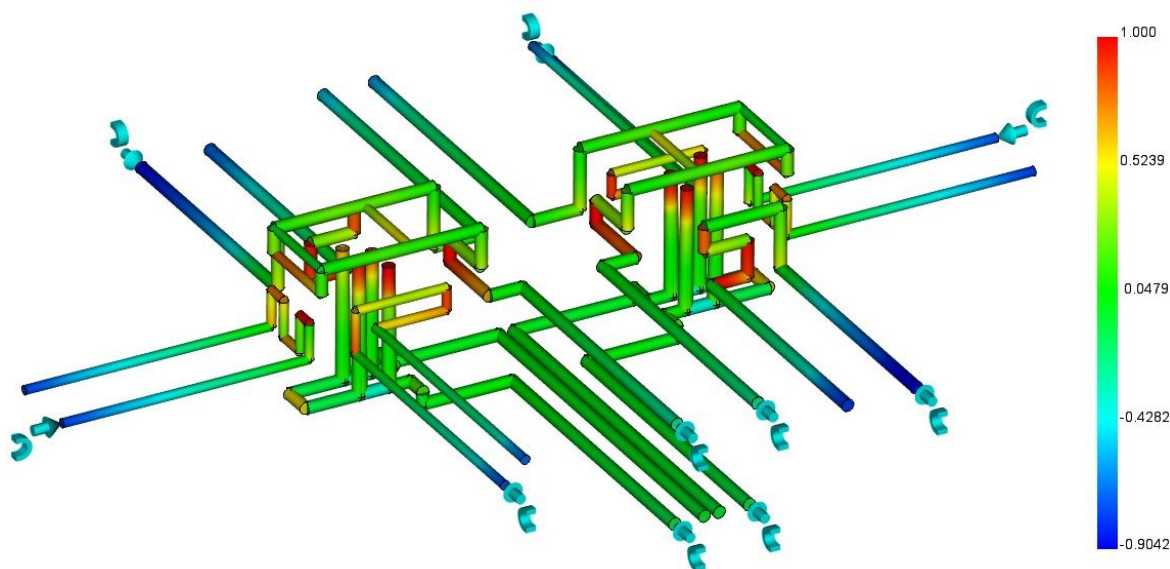
Výsledek analýzy zobrazuje průběh tlaku v jednotlivých kanálech temperačního systému. Tlak by měl mít v kanálech klesající tendenci, pokud se v temperačním kanále objeví oblast s nulovou hodnotou tlaku, nedochází tak zde k dopravě temperačního média. Tyto místa se označují jako mrtvá místa. V případě navrženého temperačního systému má tlak klesající tendenci a neobsahuje mrtvá místa. Tlak v temperačních kanálech dosahuje nejvyšší hodnoty 589,4 kPa, což odpovídá 5,89 bar. Použité ucpávky jsou dle katalogu vhodné použít do maximální hodnoty tlaku 10 bar, tudíž jejich zvolení bylo vhodné.



Obrázek 69. Výsledek analýzy tlaku v temperačních kanálech

13.2.4 Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency)

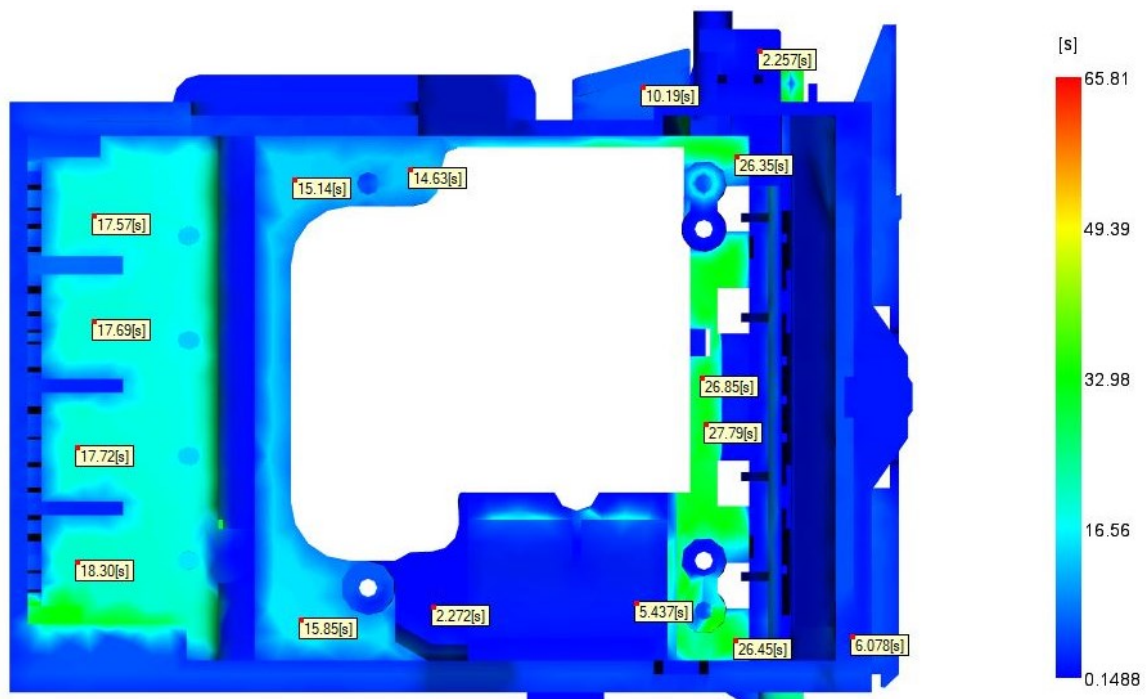
Na základě výsledku této analýzy lze zhodnotit míru efektivitu odvodu tepla z formy temperačními kanály systému. Červeně znázorněna hodnota 1 označuje oblasti s nejvyšší účinností odvodu tepla. Červeně jsou označeny vrcholy přepážek tvárníků a kanály bočních tvarových čelistí. Ostatní oblasti dosahují hodnot 0,05 až 0,52. Efektivita odvodu tepla těchto oblastí by byla možná zvýšit přiblížením os temperačních kanálů k tvarové dutině, což by mohlo negativně ovlivnit tuhost tvarových částí. Navržený temperační systém je schopen efektivně odvádět teplo předané polymerní taveninou tvarovým částem vstříkovací formy.



Obrázek 70. Výsledek analýzy efektivitu odvodu tepla

13.2.5 Čas pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)

Výsledek analýzy graficky znázorňuje čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty měřeného od začátku vstřikovacího cyklu. Vyhazovací teplota dle materiálového listu byla definována na 133 °C. Jedná se o teplotu, při které nedojde během vyhazování výstřiku k jeho deformaci. Z důvodu rozdílných tloušťek v oblastech, kde jsou uloženy vyhazovače není možné dosáhnout stejných časů pro dosažení vyhazovací teploty. Nejmenší čas v místě vyhazovače nabýval hodnoty 2,26 s a nejvyšší dosahoval hodnoty 27,79 s. Důležité jsou také vnější stěny výstřiku, které se mohou deformovat po vyhození výstřiku například dopadem na dopravník pod vstřikovací formou. Ve výsledcích se nenachází žádná oblast, která by měla delší čas pro dosažení vyhazovací teploty, tudíž k vyhození výstřiku z dutiny formy může dojít v čase 28 s od začátku vstřikování.



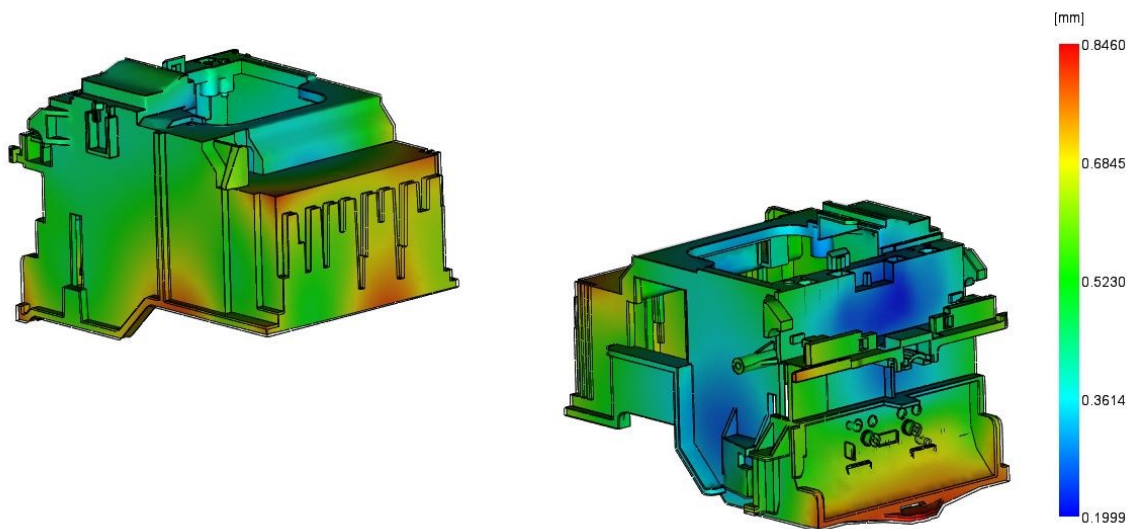
Obrázek 71. Výsledek času pro dosažení vyhazovací teploty s vyznačenými hodnotami v místech uložení vyhazovačů

13.3 Výsledky analýzy smrštění a deformace

Kapitola se zabývá výsledky analýzy smrštění a deformace, které vznikají během vstřikovacího cyklu. Smrštění je objemová změna vstřikovaného materiálu při tuhnutí, jako deformace se udává změna tvaru výstřiku, při zachovaném objemu. Veškeré vzniklé odchylky od požadovaného tvaru jsou důležitými údaji, pomocí kterých lze volit procesní parametry a způsob konstrukce vstřikovací formy.

13.3.1 Celková deformace (Deflection, all effects)

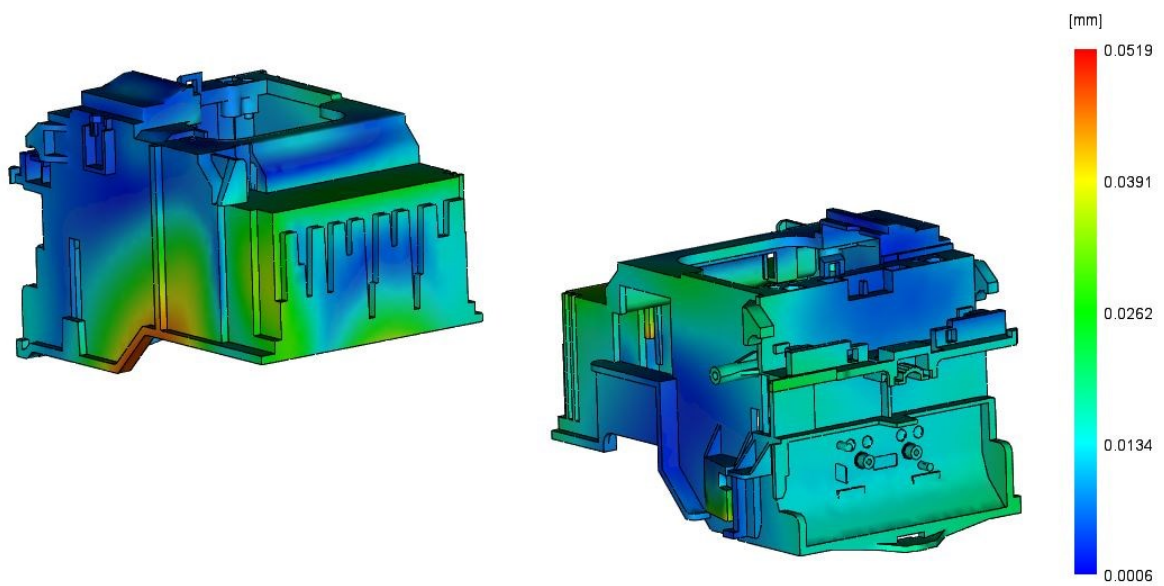
Výsledek této analýzy znázorňuje celkovou velikost vzniklých deformací ve všech směrech způsobenou rozdílným smrštěním a rozdílnou intenzitou chlazení. Výsledky jsou vykresleny pomocí barevné škály a referenčním obrysu zadaného výstřiku, kdy červeně označené oblasti znázorňují oblasti, které jsou nejvíce zdeformované. Naopak oblasti modré jsou zdeformovány nejméně. Celková deformace výstřiku nabývá největší hodnoty 0,8460 mm, nejmenší hodnota je poté 0,1999 mm.



Obrázek 72. Výsledek celkové deformace

13.3.2 Deformace vlivem teploty

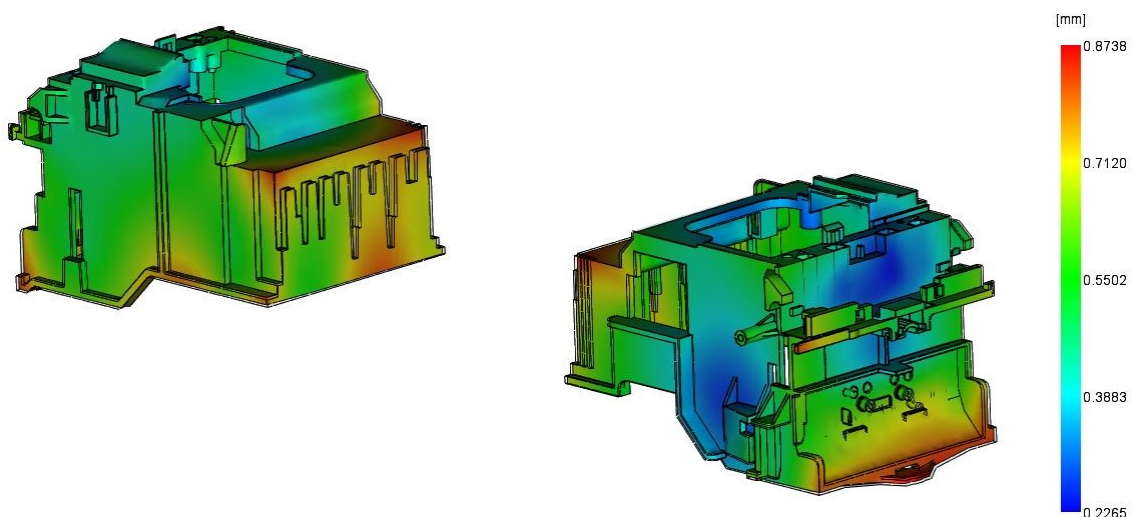
Deformace vlivem teploty představuje malý podíl celkové deformace, kdy její největší hodnota je 0,0519 mm, nejmenší hodnota nabývá 0,0006 mm. Oblast největší deformace se nachází v místech, které jsou nejvíce vzdáleny od teplotních kanálů. V porovnání s deformací vlivem smrštění polymeru je tato deformace zanedbatelná.



Obrázek 73. Výsledek deformace vlivem temperace

13.3.3 Deformace vlivem smrštění

Deformace vlivem smrštění má největší podíl na celkovou deformaci. Tuto deformaci způsobuje nerovnoměrné smrštění polymeru, za což může nepravidelná tloušťka stěn zadaného dílu. Největší hodnotu tato deformace nabývá v místech náhlých rozšíření a jedná se o hodnotu 0,8738 mm, nejmenší je naopak v místech s konstantní tloušťkou s hodnotou 0,2265.



Obrázek 74. Výsledek deformace vlivem smrštění

13.4 Diskuze výsledků

V programu Moldflow Synergy byly provedeny tokové analýzy s cílem získat informace o průběhu vstřikování. Prvotní analýzy se zabývaly vhodností umístění vtokového ústí a plněním tvarové dutiny. V rámci dalších analýz byly řešeny varianty s horkým, studeným a kombinovaným vtokovým systémem. Z výsledků uvedených níže je možné konstatovat, že změna vtokového systému neměla na určité parametry zásadní vliv.

Pro konstrukci vstřikovací formy byl zadán horký vtokový systém. Při použití studeného, nebo horkého systému by bylo nutné zvolit složitější konstrukci formy, při kterém by se její rozměry v poměru se vstřikovaným dílem zbytečně zvětšovaly. U varianty s horkým vtokovým systémem bylo dosaženo lepších výsledků analýz, které však nebyly výrazné, jako u zbylých vtokových systémů. Vtokové ústí horkého systému bylo díky jeho konstrukci možné umístit do vhodnějšího místa, než u systému studeného a kombinovaného. V případě výrazných změn výsledků vstřikovacího procesu by stálo za uvážení použití jiného druhu vtokového systému. U horkého vtokového systému byl nejvyšší vstřikovací tlak 78,52 MPa, u kombinovaného byl vstřikovací tlak mírně nižší 78,44 MPa a u studeného vtokového systému vstřikovací tlak nabýval hodnoty 112,5 MPa. Horký vtokový systém taktéž zapříčiňuje nejrychlejší přepnutí na dotlakovou fázi v důsledku absence rozvodných kanálů. Tavenina je vstřikována přímo do dutiny formy a tím se značně zkracují časy pro bezpečné vyhození výstřiku z dutiny, protože zde není potřeba čekat na dostatečné ochlazení taveniny v rozvodných kanálech formy. Analýza teploty byla u všech navržených variant téměř totožná a změna typu vtokového systému tak nemá vliv na chlazení samotného výrobku. Největší rozdíl teplot temperačního média na vstupu a výstupu temperačního systému dosahoval hodnot 0,24 °C, jeho tlak má klesající tendenci a nenacházejí se zde mrtvá místa. U analýzy smrštění a deformace výsledek celkové deformace nabýval největší hodnoty 0,846 mm a největší podíl na něm měla deformace vlivem smrštění.

Tabulka 7. Porovnání výsledků různých vtokových systémů

Vtokový systém:	Horký	Kombinovaný	Studený
Maximální tlak [MPa]	78,52	78,44	112,5
Tlak při působení dotlaku [MPa]	62,82	62,752	90
Přepnutí na dotlak [s]	1,665	1,704	1,689
Maximální rychlost smykové deformace [s^{-1}]	38 317,8	32 713,8	29 771,4

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit konstrukční návrh vstřikovací formy pro výrobu zadaného dílu. Zadaný díl byl tiskový košík inkoustové tiskárny z materiálu polyoxymetylen se základními rozměry 71 x 76 x 98 mm (výška x šířka x délka). Konstrukční návrh obsahuje 3D sestavu vstřikovací formy s kusovníkem a příslušnými výkresy. Dalším cílem bylo ověření funkčnosti vstřikovací formy pomocí tokových analýz, které byly provedeny v programu Moldflow synergy.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá polymerními materiály, jejich historií a dělením, technologií vstřikování plastů, konstrukcí vstřikovacích forem a popisem využívaných normálií a tvorbou tokových analýz.

Praktická část práce je věnována tvorbě 3D modelu zadaného dílu a následnou konstrukcí vstřikovací formy společně s ověřením funkčnosti pomocí analýz. Praktická část práce se dá rozdělit na dvě části, kdy se první část věnuje navržené vstřikovací formě. V první části byl vytvořen 3D model výrobku, byly vytvořeny dělicí roviny s ohledem na bezpečné odformování a následně byly zkonstruovány tvarové prvky formy, které společně s ostatními normáliemi, zaručujícími funkčnosti formy, byly vloženy do sestavy. Vstřikovací forma byla zadána jako dvounásobná a tudíž obsahuje posuvné tvarové čelisti, které jsou ovládány šikmými čepy. Pro zajištění rovnoměrného teplotního pole byly vytvořeny temperační kanály ve všech tvarových částech formy, ve kterých temperační médium usměřňuje řada ucpávek a přepážek. Vyhození výstřiku z dutiny formy je realizováno vyhazovacími kolíky, které jsou ukotveny mezi vyhazovacími deskami ovládanými táhlem vyhazovacího systému. Druhá část se poté věnuje simulacemi vstřikování dílu. V rámci analýz byly variovány různé vtokové systémy a jejich výsledky byly následně porovnávány. Zadán byl horký vtokový systém, který taktéž dosahoval nejlepších výsledků. První navržený temperační systém byl díky analýze temperace možno upravit a tím bylo získáno temperačního systému, který splňuje pravidla konstrukce je efektivnější než prvotní návrh. Bylo nutné rozdělit okruh tvárnic na dva samostatné okruhy, jelikož rozdíl teplot na vstupu a výstupu přesahoval 8 °C a pro zefektivnění temperace byla přidána druhá dvojice přepážek. Pro navrženou vstřikovací formu byl zvolen vhodný vstřikovací stroj.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Global production of plastics since 1950. Online. In: Statista.com. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>. [cit. 2024-03-14].
- [2] HALARY, Jean Louis, Françoise LAUPRÊTRE a Lucien MONNERIE. Polymer Materials: Macroscopic Properties and Molecular Interpretations. Hoboken: John Wiley, 2011. ISBN 9780470616192.
- [3] DUCHÁČEK V.: Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [4] LENFELD, Petr. Technologie II. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-467-2
- [5] Technologická univerzita Liberec: Technologie II. Online. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/>. [cit. 2024-03-14]
- [6] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada, 2018. ISBN 978 80-271-0614-1.
- [7] KAZMER, David. Injection mold design engineering. 2nd edition. Munich: Hanser, [2016]. ISBN 9781569905708
- [8] LENFELD, Petr. Technologie vstřikování. Online. Brno: Code Creator. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>. [cit. 2024-03-14]
- [9] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [10] PORTÁL MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM: Plasty v automobilovém průmyslu. Online. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-v-automobilovem-prumyslu.html>. [cit. 2024-03-14]
- [11] OSSWALD, T. A. Injection molding handbook. 2nd ed. Munich, Germany: Carl Hanser Publishers, 2008. ISBN 978-3-446-40781-7.
- [12] BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-590-6
- [13] MAŇAS, Miroslav. Výrobní stroje a zařízení I. Stroje gumárenské a plastikářské. 1. vyd. – Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-596-1

- [14] STOKLASA, K. Zpracovatelské inženýrství I – Základy gumárenské a plastikářské technologie. Skripta, 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická 2007
- [15] Příčiny a řešení vzniku vzduchových bublin ve vstřikovaných výrobcích. Online. Zetarmold. 2022. Dostupné z: <https://zetarmold.com/causes-solutions-air-bubbles-injection-molded-parts/>. [cit. 2024-03-14].
- [16] Příčiny vzniku spálených míst při vstřikování. Online. Nanomoldcoating. 2020. Dostupné z: <https://nanomoldcoating.com/4-causes-for-burns-in-injection-molding/>. [cit. 2024-03-14].
- [17] PORTÁL MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM: Vady výstřiků. Online. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-1-dil-priviny-vzniku-vad-a-studene-spoje>. [cit. 2024-03-14].
- [18] BLOG NEXPCB: How to Avoid Jetting and Gate Blush in your Plastic Production. online 2018. Dostupné z: <https://www.nexpcb.com/blog/how-to-avoid-jetting-and-gate-blush>. [cit. 2024-03-14].
- [19]
- [20] LERMA VALERO, José R. Plastics injection molding: scientific molding, recommendations, and best practices. Munich: Hanser publications, 2020. xxiii, 400 s. ISBN 978-1-56990-689-7
- [21] Temperační jednotky SPTCW. Online. Vstřikovací systémy pro plast. 2020. Dostupné z: <https://ivsp.cz/katalog/temperacni-jednotky-sptcw/>. [cit. 2024-03-14].
- [22] BOBEK, Jiří V.: Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů. Brno: Code Crea tor, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-88058-65-6.
- [23] BOBČÍK, Ladislav. Formy pro zpracování plastů. I. díl, Vstřikování termoplastů. 2. vydání. Brno: Uniplast Brno.
- [24] HASCO. Vtoková pouzdra. Online. Dostupné z: https://www.hasco.com/cs/Z/Vtoky/Vtokov%C3%A1-pouzdra/p/Z51_d2x11xd1xsr1. [cit. 2024-03-14].

- [25] HYNEK, Martin. Plastové díly: Studené a živé vtokové systémy. Online. Západočeská univerzita v Plzni. Online. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18161288-Studene-a-zive-vtokove-systemy.html> [cit. 2024-04-17]
- [26] BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 2nd ed. Cincinnati: Hanser, 2007. ISBN 1569904219.
- [27] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-645-3.
- [28] BOBČÍK, Ladislav. Formy pro zpracování plastů. II. díl, Vstřikování termoplastů. Brno: Uniplast Brno, 1999.
- [29] Lentus, spol. s.r.o. Ocel na výrobu forem. Online. Dostupné z: <https://www.lentus-ocel.cz/>. [cit. 2024-03-14]
- [30] AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK: Learn and Explore. Online. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-Synergy>. [cit. 2024-03-14]
- [31] 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
- [32] ŘEHULKA, Zdeněk. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2015. ISBN 978-80-7204-919-6.
- [33] ARBURG. *Hydraulický vstřikovací stroj*. Online. Arburg. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/svet-vyroby/vstrikovaci-stroje/hydraulicke-stroje/>. [cit. 2024-04-23].
- [34] *Sabic*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.sabic.com/en>. [cit. 2024-04-23].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PLA	kyselina polyléčná
PC	polykarbonát
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
POM	polyoxymetylen
PS	polystyren
PE	polyetylen
PP	polypropylen
PA	polyamid
ČSN	česká technická norma
CAD	počítačem podporované konstruování
CAM	počítačem podporované obrábění
CAE	počítačem podporované analýzy
T _m	teplota tání
T _f	teplota viskozního toku
T _g	teplota skelného přechodu
PTFE	polytetrafluoretylen
mm	milimetr
cm ³	centimetr krychlový
kN	kilo Newton
MPa	megapascal
kPa	kilopascal
s ⁻¹	reciproká sekunda
t	tuna
°C	stupeň Celsia
g	gram

% procento

p tlak

T teplota

l/min litrů za minutu

Obr. Obrázek

2D dvourozměrný prostor

3D třírozměrný prostor

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Evropská produkce polymerních materiálů od roku 1950 do roku 2022 [1]	12
Obrázek 2. Světová produkce polymerních materiálů od roku 1950 do roku 2022 [1]	12
Obrázek 3. Rozdělení polymerů [A].....	14
Obrázek 4. Nadmolekulární struktura termoplastů [5]	15
Obrázek 5. Nadmolekulární struktura reaktoplastů [5]	15
Obrázek 6. Nadmolekulární struktura elastomeru [5]	16
Obrázek 7. Ukázka granulace ze strun za tepla [8].....	17
Obrázek 8. Vstřikovací cyklus [13]	21
Obrázek 9. Průběh vstřikování [5].....	21
Obrázek 10. Příklad šneku pro znázornění jednotlivých zón [12].....	22
Obrázek 11. Vzduchové bubliny ve výstřiku [14].....	25
Obrázek 12. Spálené místo na výstřiku [15].....	25
Obrázek 13. Studený spoj [16]	26
Obrázek 14. Ukázka jettingu [17].....	27
Obrázek 15. Fontánový tok taveniny [8]	27
Obrázek 16. Schéma vstřikovacího stroje [5]	28
Obrázek 17. Temperační jednotka od společnosti Super Sun [20].....	30
Obrázek 18. Uspořádání vstřikovací formy [22]	33
Obrázek 19. Studený vtokový systém vstřikovací formy [22]	34
Obrázek 20. Ukázka a řez vtokové vložky [23].....	35
Obrázek 21. Rozmístění a průřezy rozvodných kanálů [22]	35
Obrázek 22. Typy vtokových ústí [24]	36
Obrázek 23. Horký vtokový systém [25].....	38
Obrázek 24. Ukázka temperačních insertů [11]:	39
Obrázek 25. Volba průměrů a umístění temperačních kanálů [22]	39
Obrázek 26. Vyhazovací systém [22]	41
Obrázek 27. Odvzdušňovací kanál [22].....	42
Obrázek 28. Konstrukční řešení tloušťky stěn [11]	44
Obrázek 29. Konstrukční řešení nálitků [11].....	45
Obrázek 30. Typy sítí [28] : zleva 2D síť, 2,5D síť, 3D síť.....	47
Obrázek 31. 3D model zadaného výrobku.....	52
Obrázek 32. Vybraný vstřikovací stroj	54
Obrázek 33. Sestava vstřikovací formy	55
Obrázek 34. Pohled na pravou pevnou stranu vstřikovací formy.....	56

Obrázek 35. Pohled na levou pohyblivou stranu vstříkovací formy.....	57
Obrázek 36. Tvarové části vstříkovací formy.....	58
Obrázek 37. Vyhazovací systém.....	59
Obrázek 38. Výsledek vhodnosti umístění vtokového ústí.....	60
Obrázek 39. Výsledek odporu vůči tečení taveniny	61
Obrázek 40. Horký vtokový systém	62
Obrázek 41. Usazený horký blok v desce.....	62
Obrázek 42. Trajektorie temperačního média v navrženém temperačním systému	63
Obrázek 43. Temperační okruh tvárníku vstříkovací formy.....	64
Obrázek 44. Temperační okruh tvarové čelisti 2	64
Obrázek 45. Temperační okruh tvarové čelisti 3	65
Obrázek 46. Temperační okruh tvarové čelisti 1	65
Obrázek 47. Pohled na transportní prvky vstříkovací formy	66
Obrázek 48. 2,5D síť modelu a její statistiky	67
Obrázek 49. Nastavení procesních podmínek (1. krok).....	68
Obrázek 50. Nastavení procesních podmínek (2. krok).....	68
Obrázek 51. Nastavení působení dotlaku	69
Obrázek 52. Nastavení procesních podmínek (3. krok).....	69
Obrázek 53. Nastavení materiálu.....	69
Obrázek 54. Varianty vtokového systému (A- horký, B- kombinovaný, C- studený)	70
Obrázek 55. Výsledek analýzy času plnění studeného vtoku	71
Obrázek 56. Výsledek analýzy času plnění kombinovaného vtoku	71
Obrázek 57. Výsledek analýzy času plnění horkého vtoku	72
Obrázek 58. Výsledek analýzy teploty na čele taveniny kombinovaného vtokového systému	73
Obrázek 59. Výsledek analýzy teploty na čele taveniny studeného vtokového systému	73
Obrázek 60. Výsledek analýzy teploty na čele taveniny horkého vtokového systému	74
Obrázek 61. Výsledek analýzy tlaku v místě vtokového ústí.....	75
Obrázek 65. Výsledky analýzy vzniku vzduchových kapes horkého systému.....	77
Obrázek 66. Výsledek analýzy vzniku studených spojů horkého vtokového systému	78
Obrázek 67. Výsledek analýzy vzniku studených spojů studeného vtokového systému	78
Obrázek 68. Trajektorie temperačního systému	79
Obrázek 69. Beam elementy temperačního systému	79
Obrázek 70. Výsledek analýzy teploty temperačního média.....	80
Obrázek 71. Výsledek analýzy Reynoldsova čísla	81

Obrázek 72. Výsledek analýzy tlaku v temperačních kanálech.....	82
Obrázek 73. Výsledek analýzy efektivity odvodu tepla	82
Obrázek 74. Výsledek času pro dosažení vyhazovací teploty s vyznačenými hodnotami v místech uložení vyhazovačů	83
Obrázek 75. Výsledek celkové deformace	84
Obrázek 76. Výsledek deformace vlivem temperace	85
Obrázek 77. Výsledek deformace vlivem smrštění	85

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Průřezy odvzdušňovacích kanálů polymerů [22]	42
Tabulka 2. Oceli vhodné pro konstrukci forem [28]	43
Tabulka 3. Vybrané vlastnosti materiálu	53
Tabulka 4. Doporučené procesní parametry vstřikování	53
Tabulka 5. Parametry zvoleného vstřikovacího stroje.....	54
Tabulka 6. Výsledky analýz tlaků v místech vtokového ústí daných variant.....	74
Tabulka 7. Porovnání výsledků různých vtokových systémů.....	86

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkresová dokumentace.

Příloha P II: CD disk obsahující elektronickou verzi diplomové práce, modely a výkres

