

Konstrukční návrh vstřikovací formy pro technický díl včetně simulace funkčnosti

Bc. Tomáš Gerych

Diplomová práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

| | |
|-------------------|--|
| Jméno a příjmení: | Bc. Tomáš Gerych |
| Osobní číslo: | T21401 |
| Studijní program: | N3909 Procesní inženýrství |
| Studijní obor: | Konstrukce technologických zařízení |
| Forma studia: | Prezenční |
| Téma práce: | Konstrukční návrh vstřikovací formy pro technický díl včetně simulace funkčnosti. |

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

OSSWALD, Tim A., Lih-Sheng TURNG a Paul J. GRAMANN. Injection molding handbook. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Publishers, c2008, xvii, 764 s. ISBN 978-1-56990-420-6

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

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

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

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

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

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

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o konstrukčním provedení vstřikovací formy pro výrobu vodící lišty rozvodového řetězu. V teoretické části jsou shrnuty základní principy procesu vstřikování, možnosti temperace vstřikovacích forem, druhy vtokových systémů a možné vady výrobků vzniklé při vstřikování. Obsahem praktické části je konstrukce vstřikovací formy podpořená tokovými analýzami provedenými v programu Moldflow. Ke konstrukci formy i tvorbě výkresové dokumentace bylo použito programového prostředí softwaru Catia. Normalizované díly byly vybrány z katalogu firem Meusburger a Hasco.

Klíčová slova: Vstřikování, konstrukce, analýzy, Catia, Moldflow

ABSTRACT

The thesis deals with the design of an injection mould for the production of a timing chain guide rail. The theoretical part summarizes the basic principles of the injection moulding process, the possibilities of injection mould cooling options, types of injection systems and possible defects of products resulting from injection moulding. The content of the practical part is the design of the injection mould supported by flow analyses performed in Moldflow. To the mould design and the creation of the drawing documentation, the Catia software environment was used. The standardized parts were selected from the Meusburger and Hasco catalogues.

Keywords: Injection moulding, design, analysis, Catia, Moldflow

Děkuji doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za cenné rady, podněty, připomínky a čas, který věnoval kontrole a konzultování mé diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval svým blízkým za podporu při celém průběhu studia.

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

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ | 12 |
| 1.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS | 13 |
| 1.2 PLASTIKAČNÍ FÁZE – VSTŘIKOVÁNÍ TAVENINY | 14 |
| 1.5 FÁZE CHLAZENÍ | 17 |
| 1.6 DALŠÍ FÁZE VSTŘIKOVACÍHO CYKLU | 18 |
| 2 SIMULAČNÍ SOFTWARE | 19 |
| 2.1 CAE ANALÝZY | 20 |
| 2.2 TYPY ANALÝZ | 21 |
| 2.3 VÝSLEDKY ANALÝZ | 22 |
| 3 VTOKOVÉ SYSTÉMY | 24 |
| 3.1 STUDENÝ VTOKOVÝ SYSTÉM | 24 |
| 3.1.1 Vtokový kanál | 26 |
| 3.1.2 Rozvodný kanál..... | 27 |
| 3.1.3 Vtokové ústí | 29 |
| 3.1.4 Přidržovače vtoku..... | 35 |
| 3.1.5 Vtoková vložka | 36 |
| 3.2 VYHŘÍVANÉ VTOKOVÉ SYSTÉMY | 37 |
| 3.2.1 Izolované vtokové systémy | 38 |
| 3.2.2 Řešení vyhřívaných vtokových systémů vstřikovacích forem..... | 40 |
| 4 TEMPERAČNÍ SYSTÉMY | 43 |
| 4.1 NÁVRH TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU | 44 |
| 4.2 PŘEPÁŽKOVÉ TEMPERAČNÍ SYSTÉMY | 45 |
| 4.2.1 Ploché přepážky | 45 |
| 4.2.2 Spirálové přepážky | 45 |
| 4.2.3 Fontánkové přepážky | 46 |
| 4.3 TEPelné TRUBICE | 47 |
| 4.4 NEKONVENČNÍ METODY TEMPERACE | 48 |
| 4.4.1 Temperační systém Contura..... | 49 |
| 4.4.2 Direct Metal Laser Sintering – DMLS | 50 |
| 5 VADY VÝROBKŮ | 51 |
| 5.2 STUDENÉ SPOJE | 52 |
| 5.3 PROPADLINY, VTAŽENINY | 52 |
| 5.4 ROZDÍLY V LESKU, ŠPATNÉ KOPÍROVÁNÍ DESĚNU..... | 52 |
| 5.5 VOLNÝ TOK TAVENINY | 53 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.6 | SPÁLENÁ MÍSTA – DIESELŮV EFEKT | 53 |
| 5.7 | VAKUOVÉ BUBLINY – LUNKRY | 53 |
| II | PRAKTICKÁ ČÁST | 54 |
| 6 | CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE | 55 |
| 7 | SPECIFIKACE VÝROBKU | 56 |
| 7.1 | MATERIÁL VÝROBKU | 56 |
| 8 | KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY | 58 |
| 8.1 | NÁSOBNOST FORMY | 58 |
| 8.2 | VOLBA DĚLÍCÍCH ROVIN | 59 |
| 8.3 | ZAFORMOVÁNÍ VÝROBKU..... | 60 |
| 8.4 | BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ..... | 60 |
| 8.5 | RÁM FORMY | 62 |
| 8.6 | VTOKOVÝ SYSTÉM | 63 |
| 8.7 | TEMPERAČNÍ SYSTÉM..... | 64 |
| 8.8 | ODVZDUŠNĚNÍ..... | 66 |
| 8.9 | VYHAZOVACÍ SYSTÉM..... | 66 |
| 8.10 | VODÍCÍ A STŘEDÍCÍ PRVKY..... | 68 |
| 9 | VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE | 70 |
| 10 | NASTAVENÍ MOLDFLOW ANALÝZY | 71 |
| 10.1 | SÍŤ MODELU | 71 |
| 10.2 | ANALÝZA UMÍSTĚNÍ VTOKU (GATE LOCATION)..... | 73 |
| 10.2.1 | Výsledek analýzy umístění vtoku (Gate location) | 73 |
| 10.3 | NASTAVENÍ TEMPERACE..... | 74 |
| 10.4 | NASTAVENÍ VTOKŮ | 75 |
| 10.4.1 | Nastavení studeného vtokového systému..... | 75 |
| 10.4.2 | Nastavení vyhřívaného vtokového systému..... | 76 |
| 10.4.3 | Nastavení kombinovaného vtokového systému | 78 |
| 10.5 | NASTAVENÍ PROCESNÍCH PODMÍNEK KOMPLETNÍ ANALÝZY | 79 |
| 10.5.2 | Nastavení plnění a dotlaku (Fill + Pack settings)..... | 79 |
| 10.5.3 | Nastavení deformací (Warp settings)..... | 80 |
| 10.5.4 | Nastavení temperačních okruhů | 80 |
| 11 | POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VTOKOVÝCH SYSTÉMŮ | 81 |
| 11.1 | VÝSLEDKY PLNĚNÍ A DOTLAKU | 81 |
| 11.1.1 | Čas plnění (Fill time) | 81 |
| 11.1.2 | Uzavírací síla (Clamping force) | 82 |
| 11.1.3 | Rychlost smykové deformace a smykové napětí na stěně (Shear rate, Shear stress at wall)..... | 84 |
| 11.1.4 | Vstřikovací tlak (Pressure)..... | 86 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 11.2 | VÝSLEDKY CHLAZENÍ..... | 87 |
| 11.2.1 | Teplota temperačního média | 87 |
| 11.2.2 | Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty | 88 |
| 11.3 | VÝSLEDKY DEFORMACÍ..... | 89 |
| 11.3.1 | Deformace způsobena všemi vlivy | 89 |
| 12 | ROZBOR NEJVHODNĚJŠÍHO TYPU VTOKOVÉHO SYSTÉMU..... | 91 |
| 12.1 | VÝSLEDKY ANALÝZY PLNĚNÍ A DOTLAKU | 91 |
| 12.1.1 | Vzduchové kapsy (Air traps) | 91 |
| 12.1.2 | Studené spoje (Weld lines)..... | 92 |
| 12.2 | VÝSLEDKY ANALÝZY CHLAZENÍ..... | 93 |
| 12.2.1 | Teplota temperačního média | 93 |
| 12.2.2 | Teplota potřebná k dosažení vyhazovací teploty | 94 |
| 12.2.3 | Reynoldsovo číslo (Reynolds number) | 94 |
| 12.2.4 | Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency)..... | 95 |
| 12.3 | VÝSLEDKY ANALÝZY DEFORMACÍ..... | 96 |
| 12.3.1 | Deformace vlivem smrštění | 96 |
| 13 | DISKUSE VÝSLEDKŮ ANALÝZ | 97 |
| | ZÁVĚR | 98 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 99 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 103 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 105 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 108 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 109 |

ÚVOD

Technologie vstřikování je jednou z nejvíce využívaných metod pro výrobu plastových součástí. Jedná se o velmi rychlou a přesnou metodu, která je skvělou volbou pro sériovou výrobu. Pomocí ní se dají vytvořit výrobky složitých tvarů, které by byly jinými metodami vyrobitelné pouze stěží anebo zcela nevyrobitelné. Vstřikované výrobky dosahují výborných mechanických vlastností. Z tohoto důvodu jsou často používány pro aplikace, ve kterých jsou vystaveny značným namáháním. Takovýmto náročným prostředím může být například spalovací motor ve kterém jsou kromě mechanického namáhání vystaveny i vysokým teplotám. Vstřikovat lze celou řadu polymerních materiálů. Nejvíce vhodnými pro vstřikování jsou termoplastické polymery, ale vstřikovat lze taktéž reaktoplasty či elastomery.

Proces vstřikování je velmi komplexním dějem. Z tohoto důvodu jsou vyvíjeny stále nové způsoby, jakými lze predikovat chování polymeru a pomocí toho optimalizovat celý proces a zvyšovat kvalitu výstřiku. V současné době existuje řada softwarů, které umožňují analyzování procesu jako celku, tak jeho jednotlivých fází. Ať už se jedná o fáze plnění, dotlaku či chlazení nebo deformací vzniklých ve výrobku. Pomocí výsledků analýz lze poté upravit vstupní parametry tak, aby bylo na konci procesu dosaženo výrobku nejvyšší kvality. Použitím softwarů za účelem analyzování a optimalizování lze taktéž ušetřit značné finanční náklady. Případné chyby lze odhalit v raném stádiu vývoje. Opravy vstřikovací formy tedy probíhají pouze v programovém prostředí ještě před tím, než jsou vynaloženy výdaje na výrobu nástroje.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování se řadí mezi nejvíce používané technologie zpracování plastových výrobků. Jedná se konkrétně o tvářecí proces, který je velmi specifický svou komplexností. Při vstřikování vzniká za poměrně krátký čas hotový, použitelný výrobek (odborně zvaný výstřík). Vstřikování spadá do skupiny cyklických procesů, pro něž je typické, že se zpracovaný materiál z termodynamického hlediska v rámci cyklu nedostává v žádném okamžiku do zcela rovnovážného stavu vzhledem k podmínkám, ve kterých se materiál nachází. Mezi tyto podmínky se řadí doba procesu, teplota, rychlost deformace či velikost napětí, které se v průběhu vstřikovacího cyklu rychle mění a také jsou odlišné v různých částech tvarových dutin.

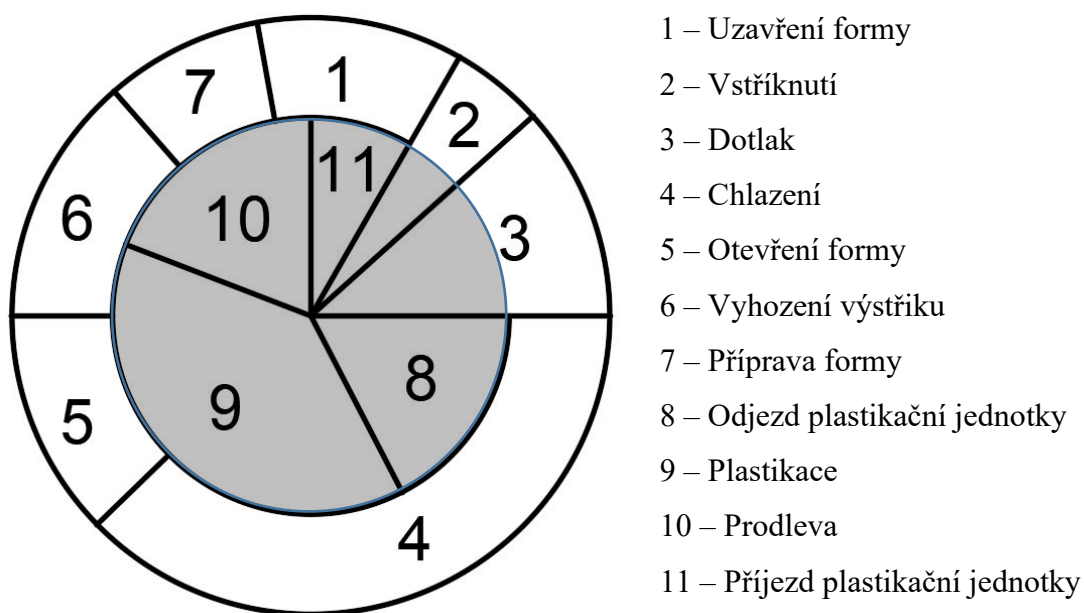
Principiálně jde o převedení vstupního materiálu (nejčastěji ve formě granulátu) zahřátím do tekutého stavu, jenž je následně vstříknut do tvarové dutiny formy. Po vstříknutí je materiál ochlazen na dostatečnou teplotu pro vyhození a následně je z formy vyjmut hotový výrobek.

Hlavními částmi technologie vstřikování je vstřikovací stroj a vstřikovací forma. Vstřikovací stroj má za úkol naplastikovat dostatečnou dávku polymerního materiálu a následně jej vstříknout do tvarové dutiny formy. Vstřikovací forma je nástroj, který má za úkol zformovat tekutý polymer do požadovaného tvaru. [1]

Počátky technologie vstřikování se datují do roku 1870. V tomto roce byl patentován materiál, z něhož byl vyroben celuloid. V patentu se pojednávalo o zařízení pro jeho vstřikování. V padesátých letech minulého století došlo k největšímu rozmachu v technologii vstřikování. V čele rozvoje stála šneková vstřikovací jednotka, první hloubicí elektroerozivní stroj pro výrobu tvarových dílů forem, začalo se ve velkém používat normalizovaných dílů a také byl patentován horký rozvod. V osmdesátých letech došlo k rozvoji prvních simulačních programů a prvních zařízení pro prototypovou výrobu (rapid prototyping). [2]

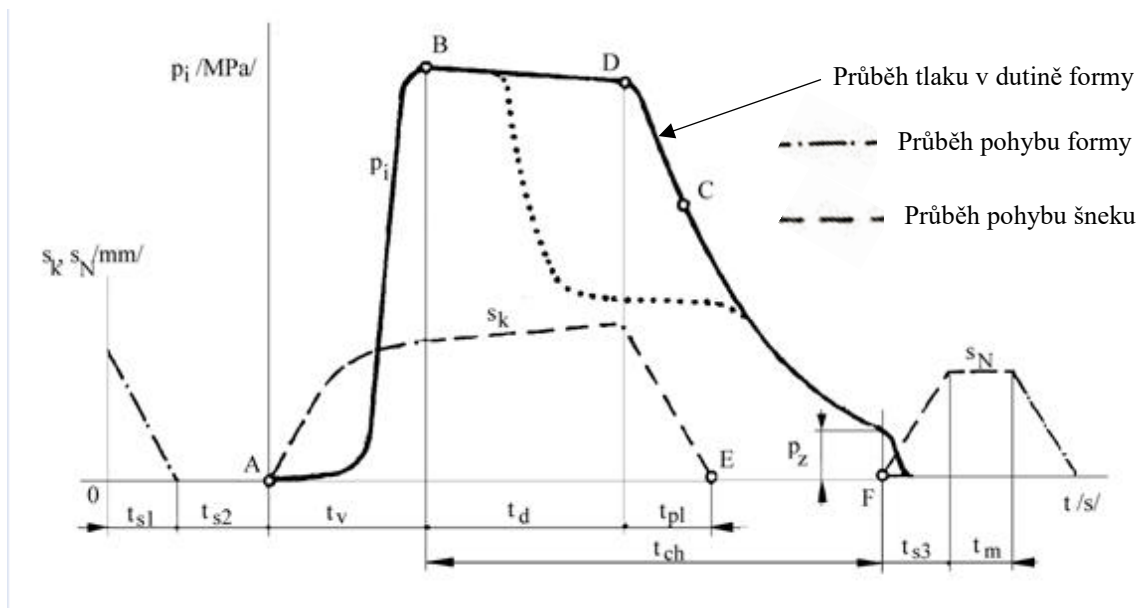
1.1 Vstřikovací cyklus

Jak již zaznělo v úvodu do technologie vstřikování, vstřikování je cyklický děj. Proto je vstřikovací cyklus velmi důležitým základním prvkem technologie. Vstřikovací cyklus je souborem přesně definovaných specifických postupných úkonů. Při procesu se značně mění teploty, a proto je tento proces označován jako neizotermický. Celý cyklus lze rozdělit na úkony prováděné plastikační jednotkou a úkony prováděné formou. [3]



Obr. 1 Schéma vstřikovacího cyklu

Fáze 1 až 7 jsou prováděny vstřikovací formou. Fáze 2, 3 a 8 až 11 (ve schématu zvýrazněny světle šedou barvou) jsou prováděny plastikační jednotkou.



Obr. 2 Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování [5]

Na obrázku 2 je zobrazena časová závislost vstřikovacího tlaku ve tvarové dutině vstřikovací formy.

V počátečním bodě je forma prázdná a otevřená. K zahájení cyklu dojde v bodě 0. Časový úsek t_{s1} zachycuje zavírání formy (přisunutí pohyblivé části formy k pevné). Příjezd plastikační jednotky probíhá v úseku t_{s2} . V bodě A začíná dopředný pohyb šneku, čímž dochází ke vstřikování polymerní taveniny do dutiny formy. Vstřikovací fáze končí v bodě B, v němž také tlak dosáhne nejvyšší hodnoty a dochází k přepnutí na dotlak. Doba dotlaku je vymezena body B a D. v Bodě F dojde k otevření vstřikovací formy a vyhození výstřiku. [3]

1.2 Plastikační fáze – vstřikování taveniny

Tato fáze je prováděna plastikační jednotkou vstřikovacího stroje. Předpokladem pro ideální naplnění dutiny formy je zajištění viskózní i teplotní homogenity v celém objemu dávky a její nahromaděním před čelem šneku. Toho lze docílit správným nastavením topných pásem plastikačního válce nebo také otáčkami šneku. Při špatné homogenitě (teplotní i viskózní) taveniny vstřikované dávky se na výrobku projeví nedokonalosti jako jsou například: studené spoje, lesk, stokové čáry, vnitřní pnutí, rozložení orientace plniva a makromolekul. Ohřev polymerní taveniny v plastikační jednotce není zajištěn pouze topnými pásmy, ale také disipací. Disipace je přeměna mechanické energie na tepelnou pomocí tření. Jedná se o nevratný děj.

Topné pásy ohřívají materiál zhruba ze 70 % a zbylých 30 % je tvořeno disipací.

Teplotou taveniny lze zásadně ovlivnit orientaci makromolekul ve výstřiku – s rostoucí teplotou klesá stupeň orientace a výstřik se stává více izotropním. Ve směru toku také klesají mechanické vlastnosti jako jsou houževnatost či pevnost v tahu. Na druhou stranu se tím zvyšuje pevnost studených spojů a dochází k redukci vnitřního pnutí.

Zvláště u semikrystalických materiálů dochází ke značnému rozdílu ve smrštění a následného dosmrštění při dodržení správné teploty tvarové dutiny dané výrobcem. Pokud je při vstřikování dodržena teplota tvarové dutiny daná výrobcem granulátu, mají výrobky vyšší výrobní smrštění a nižší dosmrštění oproti výrobků vyrobeným ve tvarové dutině o nižší teplotě, než je udávána výrobcem granulátu.

Dále se musí dbát zvýšené pozornosti u aditivovaných materiálů (retardéry hoření, UV stabilizace, vyšší teplotní odolnost). U nich je velmi důležité nepřekročit maximální dobu výdrže polymerní taveniny na zpracovatelské teplotě, v opačném případě by mohlo dojít k tepelnému rozkladu. [1]

1.3 Vstřikovací fáze

Vstřikovací fáze je jedna ze dvou fází, které jsou v rámci vstřikovacího cyklu společné pro plastikační jednotku i vstřikovací formu. Hlavním úkolem vstřikovací fáze je naplnění tvarové dutiny teplotně homogenní taveninou. V ideálním případě by měla být rychlost čela taveniny i její teplota v celém průřezu tokové dráhy stejná. To lze přibližně dodržet u tvarově jednoduchých výrobků s konstantní tloušťkou stěny. U tvarově složitých výrobků s proměnlivou tloušťkou stěny je velmi komplikované tyto podmínky dodržet i přes využití výsledků získaných počítačovou simulací fáze plnění. Tvarová dutina se nikdy při vstřikovací fázi neplní ze 100 %, ale pouze z 90 % - 99 %. Zbytek tvarové dutiny je zaplněn až při dotlakové fázi.

Nesprávným nastavením vstřikovací rychlosti mohou vznikat na povrchu výstřiku defekty – vrásnění, tokové čáry, stopy po studených spojích. Z tohoto důvodu je nutné rychlost plnění, teplotu taveniny a i samotné formy optimalizovat tak, aby smykové napětí na povrchu výstřiku nedosahovalo příliš vysokých hodnot. Jestliže se vstřikuje polymerní materiál s částicovým plnivem, je žádoucí nastavit nižší vstřikovací rychlost a vyšší teplotu. Pokud je však polymerní materiál plněn vláknitými plnivy, je potřeba nastavit vyšší vstřikovací rychlost a vyšší teplotu taveniny. Je-li vstřikovací rychlost nízká, dochází

k rychlému ochlazení čela taveniny, což má za následek růst orientace. Z toho pramení anizotropie. Anizotropie znamená, že veličina je závislá na zvoleném směru, takže v různých směrech se dosahuje odlišných vlastností. Pokud klesá rychlost plnění, tak se sice zvyšuje hodnota pevnosti a houževnatosti ve směru toku taveniny, ale dochází ke snížení pevnosti studených spojů a ke snížení povrchového lesku. Součástí vstřikovací fáze je také přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak. To musí proběhnout tak, aby nedošlo k ovlivnění plynulosti tlakové odezvy v průběhu plnicí fáze v tvarové dutině. Jinými slovy nesmí dojít k propadu tlaku ani k jeho výraznému zvýšení (tlaková špička) na tlakové křivce. Ideální průběh tlakové křivky je plynulý vzestup až do maxima, následovaný plynulým přechodem na dotlakový průběh. Tím se dosáhne minimalizace pnutí a největší izotropie vlastností. Izotropie je opakem anizotropie, tudíž veličina není závislá na zvoleném směru. Pokud dojde k přepnutí na dotlak předčasně, tak je dutina formy plněna dotlakem (dutina není plněna požadovanou rychlostí). Předčasným přepnutím na dotlak se však může paradoxně dosáhnout lepšího povrchu výrobku. Tohoto lze také využít v případě, kdy je požadováno velmi pomalé vstřikování. Rychlost dotlaku je často nižší než nejnižší rychlost, jaké lze dosáhnout samotným vstřikováním. Malou rychlostí plnění dutiny lze pomoci odvzdušnění, jelikož má tak vzduch delší čas na opuštění tvarové dutiny. Při pozdním přepnutí na dotlak dojde ke zvýšení jak vnitřního pnutí ve výrobku, tak i anizotropie vlastností. V kombinaci s nedostatečnou tuhostí formy nebo nízkou uzavírací silou může dojít k přetokům v dělicí rovině. [1,3]

Doba plnění dutiny by měla být co možná nejkratší, poněvadž při tečení vtokovým systémem i samotnou dutinou formy se polymer při styku s chladnější stěnou velmi ochlazuje a tuhne. Při velmi dlouhé době vstřiku by tedy polymer mohl zatuhnout ještě předtím, než by došlo k požadovanému zaplnění formy. [4]

1.4 Dotlaková fáze

Dotlak lze popsat dobou jeho působení a hodnou tlakové odezvy ve tvarové dutině formy. Správná optimalizace jeho průběhu je klíčová z hlediska získání požadovaných rozměrů a hmotnosti výstřiku. Samotné působení dotlaku lze nastavit jako celek nebo pomocí jednotlivých částí (tlaková úroveň dotlaku, jeho doba, dotlakový profil). Pokud se působení dotlakové fáze zvolí nad optimum, tak dojde ke zvýšení vnitřního pnutí ve výstřiku. Optimum se rozumí ideální vytvarování výstřiku stěnami tvarové dutiny,

dosažení zadaných rozměrů, tvarů i hmotnosti). Dále lze počítat jak s přetoky v dělicí rovině, tak nadbytečnou činností hydraulických čerpadel, či celého elektropohonu.

Odezva na vstřikovací tlak i dotlak se s rostoucí vzdáleností od vtokového ústí snižuje. Z tohoto důvodu je nutné dimenzovat vtokové ústí tak, aby nedošlo k předčasnému zamrznutí vtokového ústí v době, kdy je působení dotlaku nezbytné. Na opačnou stranu nesmí být průměr vtokového ústí příliš velký, aby se zabránilo zpětnému toku polymerní taveniny do vtokového rozvodu.

Hlavním účelem dotlakové fáze je kompenzace smrštění materiálu v dutině vstřikovací formy. Tím dojde ke korekci rozměrů a deformací a také k odstranění lunkrů či bublin. Hmotnost výstřiku se bere pouze jako indikátor o naplněnosti tvarové dutiny. Není totiž v korelaci ani s kvalitativními parametry a ani s rozměry výstřiku.

Pomocí polštáře (ten označuje nadbytečné množství taveniny, které i po skončení dotlaku zůstane před čelem šneku) lze kontrolovat působení plnicí i dotlakové fáze. Pokud se objem polštáře v jednotlivých cyklech pohybuje v tolerančních mezích, tak lze říct, že je vstřikovací proces reprodukovatelný. Jednotlivé výstřiky se tedy budou pohybovat v požadovaných mezích. [1]

1.5 Fáze chlazení

Proces ochlazení výstřiku uvnitř tvarové dutiny začíná okamžikem plnění tvarové dutiny taveninou, přesněji řečeno po objemovém naplnění dutiny a končí až vyhozením výstřiku ze vstřikovací formy. Doba ochlazování a teplota formy jsou klíčovými parametry fáze chlazení. Kritérium pro určení minimální požadované doby pro chlazení výstřiku je jeho dostatečná tuhost pro vyhození. V opačném případě by došlo k deformacím výstřiku způsobené vyhazovacím systémem vstřikovací formy. Mezi tyto deformace patří zanechání stop vyhazovači nebo jejich zaboření do výstřiku.

Z tohoto hlediska je dominantní teplota formy. Rychlost, jakou dochází k ochlazování, je klíčová pro relaxační jevy, jež následně ovlivní konečné rozložení orientace a její stupeň, velikost tepelného a orientačního pnutí, rozměrovou i tvarovou stálost výstřiku. U semikrystalických materiálů rychlost ochlazování také ovlivní krystalickou strukturu.

Obecně lze říct, že je vhodnější pomalejší ochlazování výstřiku. Čím je teplota formy vyšší a doba ochlazování delší, tím větší je obsah krystalického podílu (u semikrystalických polymerů), následkem čehož se zvýší výrobní smrštění (vlivem uspořádanosti krystalické

fáze), specifická hmotnost, tvrdost, tuhost a pevnost. Zvýšení teploty formy také přináší pozitivní vliv na kvalitu povrchu a jeho lesk.

Vyšší teplota formy tedy zvyšuje výrobní smrštění, a tím zmenšuje rozměry výstřiku. Větší výrobní smrštění může také zvýšit deformace výstřiku.

Velký vliv na dobu ochlazování má požadovaná tloušťka výrobku. Čím tlustší je stěna, tím delší je potřebná doba pro ochlazení.

Z technologického pohledu by měla být doba ochlazování co možná nejdelší, to je však v rozporu s ekonomickým pohledem. Z ekonomického hlediska je ideální co nejkratší ochlazovací fáze, čímž se zkrátí celková doba cyklu. Je tedy nutné zvolit kompromis mezi těmito dvěma hledisky. [1,3]

1.6 Další fáze vstřikovacího cyklu

Mezi další fáze vstřikovacího cyklu se řadí například otevření, zavření formy a vyhození výstřiku. Jak pro otevření, tak i uzavření formy jsou důležité strojní časy těchto operací. Ty se přímo odvíjí od rychlosti pohybu levé (pohyblivé) části formy a také vzdálenosti, po které se levá část pohybuje. Strojní časy je žádoucí co nejvíce redukovat, aby došlo ke zkrácení vstřikovacího cyklu. Dnešní stroje umožňují variabilní nastavení rychlosti pohybu levé části. Toho se využívá zvláště u zavírání, kdy se levá část formy nejprve pohybuje vyšší rychlostí a následně zpomalí tak, aby došlo k bezpečnému dosednutí obou částí forem na sebe, čímž dochází k menšímu opotřebení desek.

Při vyhazovací fázi dojde k rozevření dělicí roviny a působením vyhazovačů nebo stíracích desek dojde k vyhození výstřiku z dutiny formy. Při otevření je nutné zajistit dostatečnou vzdálenost mezi deskami, aby nedošlo ke vzpříčení výstřiku při jeho vyhození, případně aby se k výstřiku bezpečně dostal manipulátor.

Odjezd a příjezd plastikační jednotky je do vstřikovacího cyklu zařazen proto, aby nedocházelo k nechtěnému ohřívání vstřikovací formy plastikační jednotkou. Tak jako u zavírání formy, lze u plastikační jednotky nastavit proměnlivou rychlost posuvu. [5]

2 SIMULAČNÍ SOFTWARE

Vstřikování je komplexní operace, která pro svůj bezproblémový chod vyžaduje precizně odladěnou vstřikovací formu a vhodně nastavené podmínky vstřikovacího stroje. Samotná výroba vstřikovací formy je velmi nákladná a její následné opravení je v případě výskytu vad velmi zdoluhavé. Proto se v praxi hojně využívají simulační softwary. Ty umožňují optimalizovat jak konstrukci výrobku, tak samotné formy ještě před jejím vyrobáním, čímž dojde k úspoře nákladů i času.

V digitálním prostředí může na vývoji zároveň spolupracovat celý tým konstruktérů, který tak může editovat a ověřovat funkčnost v reálném čase. Pro tyto účely se používá takzvaný DMU (Digital Mock Up). Jedná se o digitální prototyp výrobku, na kterém lze provádět jak úpravy, tak i zkoušky jako u reálného výrobku, avšak bez nutnosti jeho výroby.

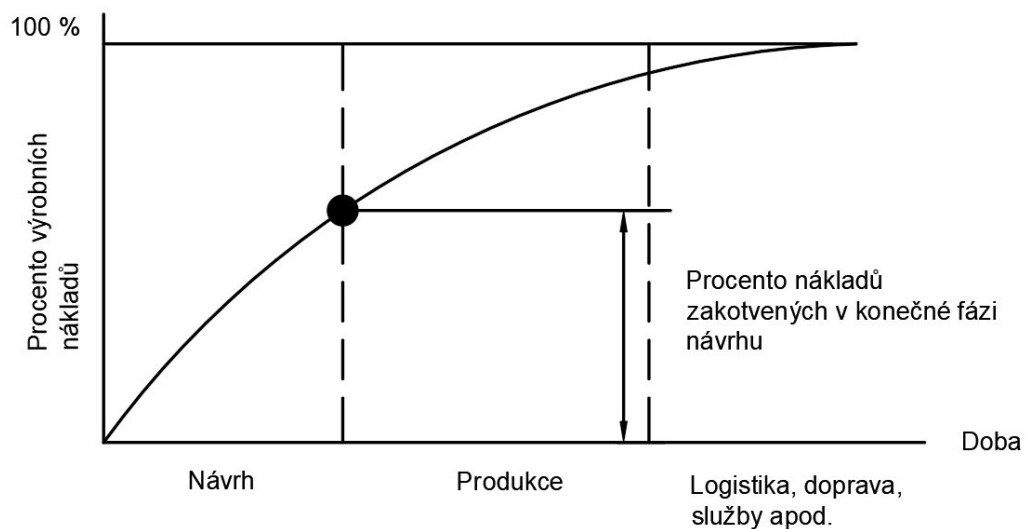
Nejvíce používanými programy pro analyzování procesu vstřikování jsou:

- Moldflow Insight firmy Autodesk.
- Cadmould 3D nebo také Varimos firmy Simcon.
- SolidWorks Plastics, jedná se o implementaci do prostředí SolidWorks (výrobce Dassault Systemes).
- Moldex 3D.

Přesnost a rychlost výpočtů je však limitována výkonem hardwaru, kvalitou vstupních dat a v neposlední řadě na zkušenostech a znalostech konstruktéra.

Vstupními daty mohou být kromě materiálových parametrů či procesních podmínek také 3D model výrobku v CAD formátu (catpart, STEP, STL), trajektorie vtokového systému či temperačního systému (například ve formátu IGS).

Na obrázku 3 je znázorněna závislost mezi procentem výrobních nákladů a časem. To znamená, že použitím simulačních programů lze odstranit řadu problémů již v části navrhování a ušetřit tím značnou část nákladů. Graf zobrazuje, že v počáteční etapě vývoje lze ušetřit až 75 % z celkových výrobních nákladů. [1,34]



Obr. 3 Závislost procenta výrobních nákladů na době vývoje [1]

2.1 CAE analýzy

Pojem CAE znamená Computer Aided Engineering což lze přeložit jako využití počítačových softwarů pro usnadnění inženýrských optimalizací a analýz.

Podstatou je zkoumání a optimalizace virtuálního modelu za působení vnějších vlivů, například tok polymeru, působení vstřikovacího tlaku na tvarovou dutinu.

Pro samotnou analýzu se díl musí rozdělit pomocí metody konečných prvků (FEM – Finite Element Method). Tímto dojde k nahrazení nekonečného objemu bodů CAD modelu konečným počtem prvků – uzlových bodů. Tyto body jsou soustředěny buďto ve 2D nebo 3D síti. Například program Moldflow nabízí 3D síť nebo 2D síť. 2D síť ve verzi midplane – stěna je proložena střednicovou plochou nebo ve verzi dual domain – kdy dojde k vytvoření sítě na obou stěnách plochy. Pro každý jednotlivý bod sítě se počítají rovnice ve všech třech osách – X, Y, Z. Zavedou se okrajové podmínky a dochází k řešení algebraických lineárních rovnic. Po dokončení výpočtu následuje grafické zobrazení výsledků či výčet výsledných hodnot.

CAE systémy jsou ve výrobním procesu následovány systémy CAD (Computer Aided Design) či CAM (Computer Aided Manufacturing). CAD systémy se používají pro modelování nebo také tvorbu výkresové dokumentace. CAM zase pro tvorbu CNC obráběcích programů a analýze obrábění. [1,34]

2.2 Typy analýz

Pro optimalizaci procesu vstřikování, vtokového systému i teploty jsou klíčové čtyři základní typy analýz.

- Umístění vtokového ústí (Gate location)

Výsledkem analýzy je grafické znázornění vhodnosti umístění vtokového ústí. Tímto způsobem lze buďto ověřit správnost umístění vtokového ústí anebo jej na základě výsledku zvolit. Analýza také odhalí místa, které mají největší odpor vůči tečení taveniny. [36]

- Plnění + dotlak (Fill + Pack)

Analýza je vhodná k prvotnímu zhodnocení procesu plnění tvarové dutiny. Lze díky ní odhadit zda dojde k dokonalému zaplnění tvarové dutiny. Dále je vhodná pro určení uzavírací síly vstřikovacího stroje a také hodnoty vstřikovacího tlaku. Pro potřeby analýzy se počítá s ideální teplotou. To znamená s rovnoměrným teplotním polem dutiny formy bez ohřevu formy výstřikem. [37]

- Chlazení + plnění + dotlak (Cool + Fill + Pack)

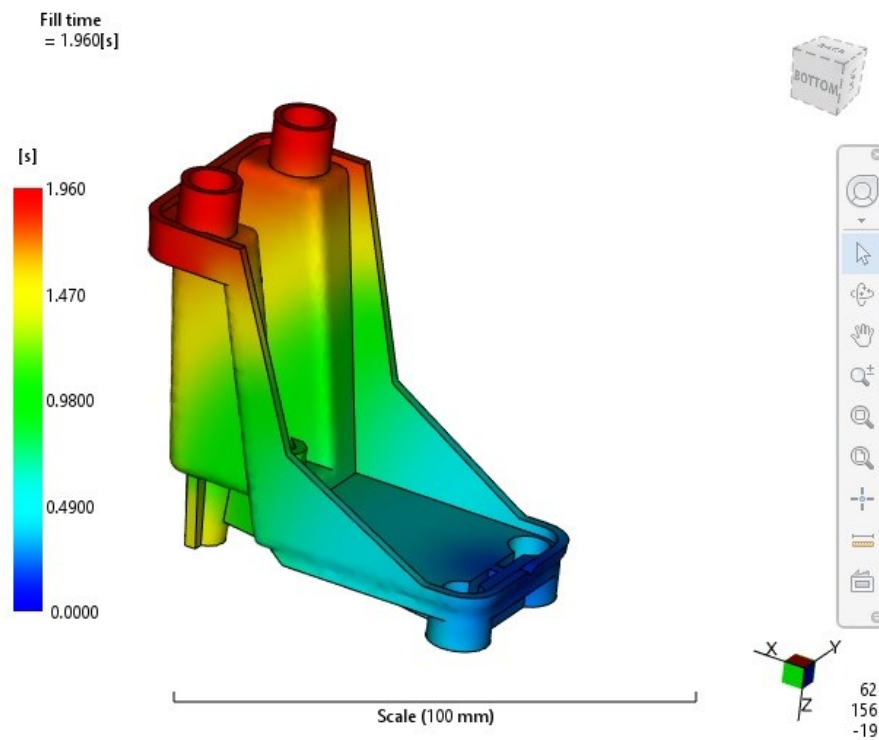
Princip je stejný jako u předešlé analýzy Plnění + dotlak. Ovšem do analýzy je nutné vložit temperační okruhy a nastavit parametry teploty (druh, tlak, teplota, popřípadě průtok temperačního média). Analýza umožňuje zhodnocení efektivity odvodu tepla navrženými temperačními okruhy. [38]

- Chlazení + plnění + dotlak + deformace (Cool + Fill + Pack + Warp)

Jedná se o kompletní analýzu, která bere v úvahu vznik deformací ve výstřiku a znázorňuje jejich typ, orientaci i velikost.

2.3 Výsledky analýz

Výsledek analýzy je nejčastěji znázorněn pomocí barevné škály na zkoumaném modelu. Dále může být zobrazen v tabulce nebo grafu.



Obr. 4 Znázornění výsledku programu Moldflow

Na obrázku 4 je zobrazen výsledek analýzy provedené v programu Moldflow. Na levé straně se nachází barevná škála, pomocí níž je hodnocen daný výsledek. Modře jsou značeny nejnižší hodnoty a červeně nejvyšší.

Pro každý ze zmíněných druhů analýz jsou charakteristické určité typy výsledků.

- Tok taveniny a plnění tvarové dutiny

Znázorňují způsob plnění tvarové dutiny. Zda dojde k jejímu kompletnímu zaplnění nebo k nedostříknutí výrobku. Konkrétně se jedná o výsledky: čas plnění, smykové napětí na stěně či rychlost smykové deformace, studené spoje, propadliny. Pro volbu vstřikovacího stroje – velikost uzavírací síly, vstřikovací tlak.

- Chlazení

Tyto výsledky jsou nedílnou součástí optimalizování temperačních okruhů. Zobrazují efektivitu odvodu tepla temperačními kanály, rovnoměrnost teplotního pole dutiny formy, za jakou dobu dojde k dostatečnému ochlazení pro vyhození výrobku. Výsledky: teplota temperačního média, Reynoldsovo číslo, čas k dosažení vyhazovací teploty (výrobku nebo vtokového systému), teplotní profil (výrobku nebo vtokového systému), teplota povrchu formy.

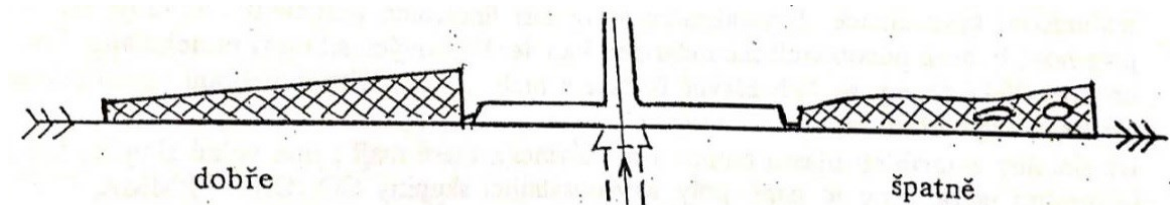
- Deformace

Dělí se dle vlivů, jimiž jsou způsobeny: chlazení, smrštění, orientace plniva. Lze je zobrazit jak souhrnně nebo jako složky v jednotlivých směrech X, Y, Z.

3 VTOKOVÉ SYSTÉMY

Existují dva druhy vtokových systémů – studený vtokový systém a horký vtokový systém (též nazývaný bezodpadový). Účel obou vtokových systémů je však stejný, a to dopravit taveninu z plastikační jednotky do tvarové dutiny formy v co možná nejkratším čase a s nejmenším odporem.

Vtoková ústí by měla být obecně umístěována do nejtlustšího místa výrobku. To však neplatí v případě, že se vstříkuje s nadouvadlem, zde je nutné vtokové ústí umístit do nejtenčího místa. [6,7]



Obr. 5 Správné umístění vtokového ústí [6]

3.1 Studený vtokový systém

Studený vtokový systém je složen ze tří částí. Těmi jsou vtokový kanál, rozvodný kanál a vtokové ústí. Mezi klady studeného vtokového systému se řadí cena, jednoduchost, absence energetického připojení a také jednodušší konstrukce jak jednonásobných, tak i vícenásobných forem. Mezi nevýhody lze zařadit větší spotřeba materiálu vůči vyhřívanému vtokovému systému. Celý vtokový systém se stává odpadním materiálem, který je však možné dále zpracovat – recyklace (drcení), následuje smísení s dalšími aditivami a čistým polymerním materiálem, poté je materiál opět roztaven a vstříknut do dutiny formy. [1,7]

Geometrie vtokového systému spolu s umístěním vtokového ústí ovlivňují:

- vzhled, rozměry i vlastnosti,
- objem spotřebovaného materiálu,
- energetickou náročnost,
- náročnost následujícího opracování pro začištění.

Při konstrukci vtokového systému je nutné mít na paměti, že vstřikování taveniny probíhá za vysoké rychlosti a do relativně studené formy. To způsobuje, že tavenina průchodem vtokovým systémem chladne a tím zvyšuje svou viskozitu. Pokud provedeme řez kolmý na směr toku taveniny, tak zjistíme, že nejvyšší viskozita je na vnějším povrchu a uprostřed kanálu je naopak nejnižší. To je dáno okamžitým ochlazením krajní vrstvičky polymeru (ta poskytuje izolaci vnitřnímu proudu taveniny), která je v kontaktu se stěnou formy. Proto je nutné dosáhnout vysokých vstřikovacích tlaků (40 až 200 MPa). [7]

Studený vtokový systém je úzce svázán s konstrukcí formy. Jsou dva typy konstrukce – dvoudesková a třídesková.

V případě dvoudeskové konstrukce je rozvodný kanál umístěn přímo do hlavní dělicí roviny. U jednonásobných forem je ústí umístěno do středu, u vícenásobných forem se ústí umísťuje z boční strany výrobku. Na základě typu vtokového ústí dojde při otevření formy buď k jeho samovolnému oddělení anebo je z formy vyhozen výstřik, jehož součástí je i vtokový systém, ten je však poté nutno přídatnými operacemi oddělit.

Třídeskový vtokový systém je používán u vícenásobných forem. Tyto formy mají dvě dělicí roviny, přičemž součástí hlavní dělicí roviny je tvarová dutina s vtokovým ústím a součástí vedlejší dělicí roviny (umístěna za tvarovou vložkou formy) je rozvodný kanál. Při otevření formy dochází k odformování výstřiku z hlavní dělicí roviny a také k vypadnutí vtokového systému z vedlejší dělicí roviny. Nevýhodou třídeskové konstrukce vstřikovacích forem je jejich velká stavební výška potřebná k otevření vedlejší dělicí roviny. [1]

Hlavními částmi vtokového systému jsou:

- vtokový kanál,
- rozvodný kanál,
- vtokové ústí.

Mezi další části vtokového systému se řadí:

- vtoková vložka,
- přídržovače vtoku.

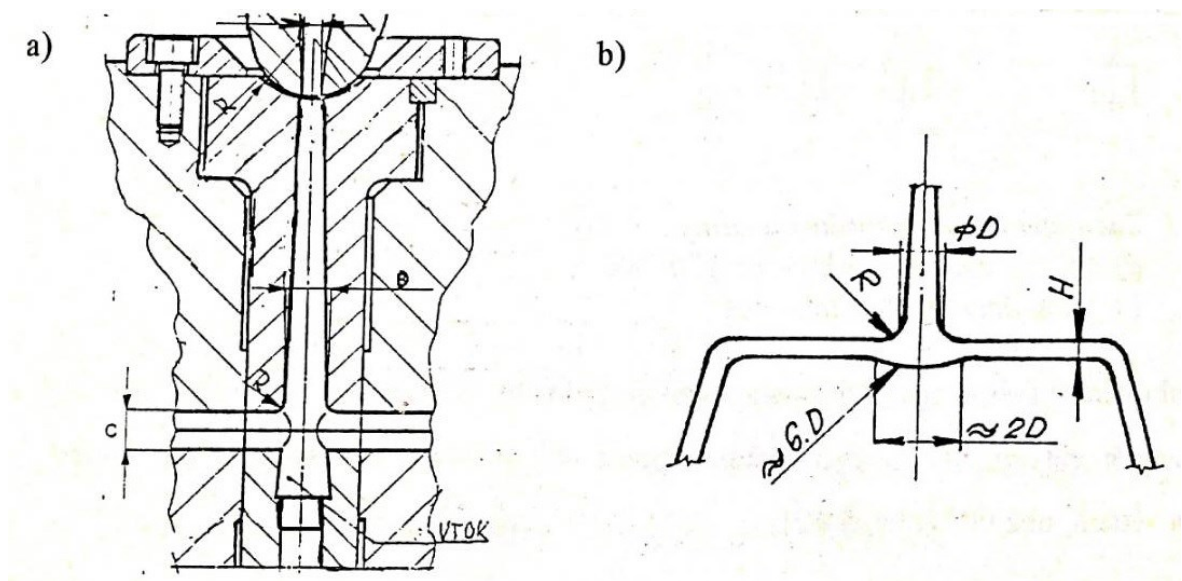
3.1.1 Vtokový kanál

Vtokový kanál je vstupním místem, ve kterém začíná plnění formy taveninou. Nachází se uvnitř vtokové vložky a distribuuje taveninu z plastikační jednotky do rozvodného kanálu. Nejpoužívanějším typem geometrie je kužel (zabezpečuje snadné odformování z vtokové vložky). Vtokový kanál ústí buď do rozvodného kanálu nebo přímo do tvarové dutiny.

Pokud vtokový kanál ústí do rozvodného kanálu, je vhodné zvolit jeho průměr stejný nebo nepatrně větší, než je průměr rozvodného kanálu.

Pokud vtokový kanál ústí do tvarové dutiny, tak je vhodné naproti jeho vyústění vytvořit čočkovité zahloubení. Obzvláště pak u tenkostěnných výrobků.

Při konstruování je nutné zajistit, aby byl vtokový kanál minimálně o 0,5 až 1 mm větší (na straně trysky) než je průměr otvoru trysky.



Obr. 6 Schéma vtokových kanálů [7]

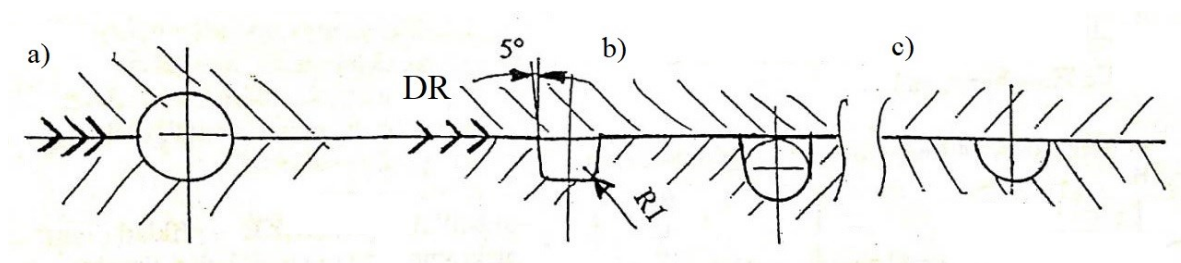
a) S přídržovačem b) s čočkovitým zahloubením

3.1.2 Rozvodný kanál

Účelem rozvodných kanálů je vedení taveniny z vtokového kanálu do vtokového ústí. Jejich geometrie průřezu i délka jsou ovlivněny řadou parametrů:

- Požadovaná geometrie výstřiku, nejdůležitějším parametrem je tloušťka.
- Použitý materiál s ohledem na tepelné a reologické vlastnosti, zejména viskozita taveniny.
- Nastavení stroje – vstřikovací tlak i rychlost.

Nejpoužívanějšími typy průřezů rozvodných kanálů jsou kanály kruhové a lichoběžníkové. Ostatní typy vychází z kruhového průřezu přepočtem na smáčivý průměr.



Obr. 7 Průřezy rozvodných kanálů [6]

- a) s ohledem na tečení taveniny nejvhodnější, avšak výrobně nevýhodné
 c) S ohledem na tečení taveniny nevýhodné, avšak výrobně výhodné

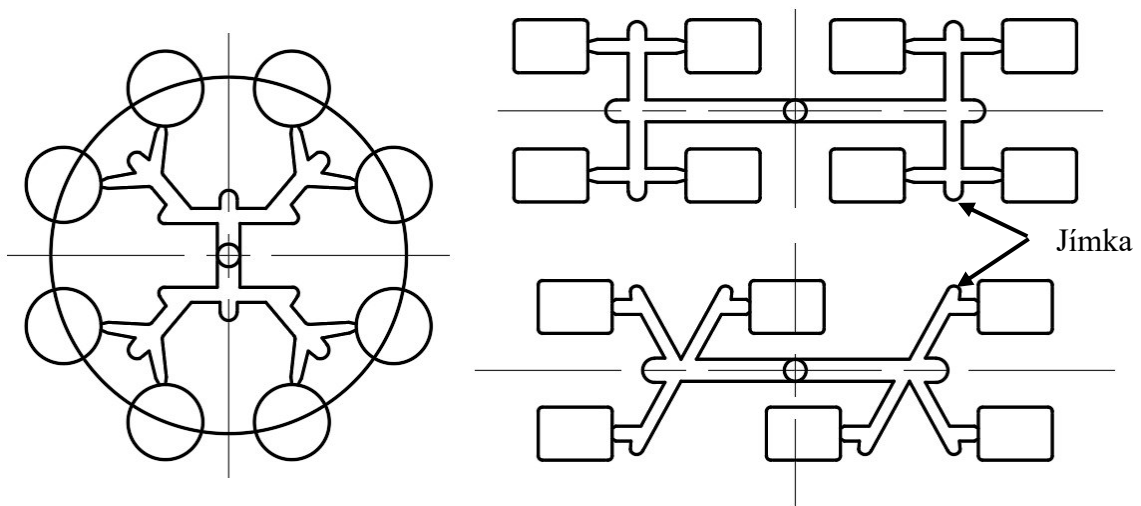
V případě vícenásobných forem musí být rozvodné kanály pečlivě balancovány, aby zajistily optimální plnění všech tvarových dutin. Pro nalezení ideálního řešení je vhodné využít simulační programy (například Moldflow, Cadmould).

Délka rozvodných kanálů by měla být co nejkratší, aby se redukovalo množství odpadu a také pro zajištění ideálních reologických vlastností při plnění dutiny (viskozita, teplota taveniny). Trajektorie by měla být ke všem tvarovým dutinám stejně dlouhá. Tím se zajistí rovnoměrné plnění všech tvarových dutin. Dále se zamezí přeplňování dutin, které by vedlo k rozdílným vlastnostem výstřiků. [6,7]

Balancování hraje obzvláště důležitou roli u výstřiků, které jsou vázány úzkým tolerančním polem. Odlišnosti v tlakovém spádu by totiž mohly způsobit rozměrové odchylky výstřiků vyrobených v jednom vstřikovacím cyklu.

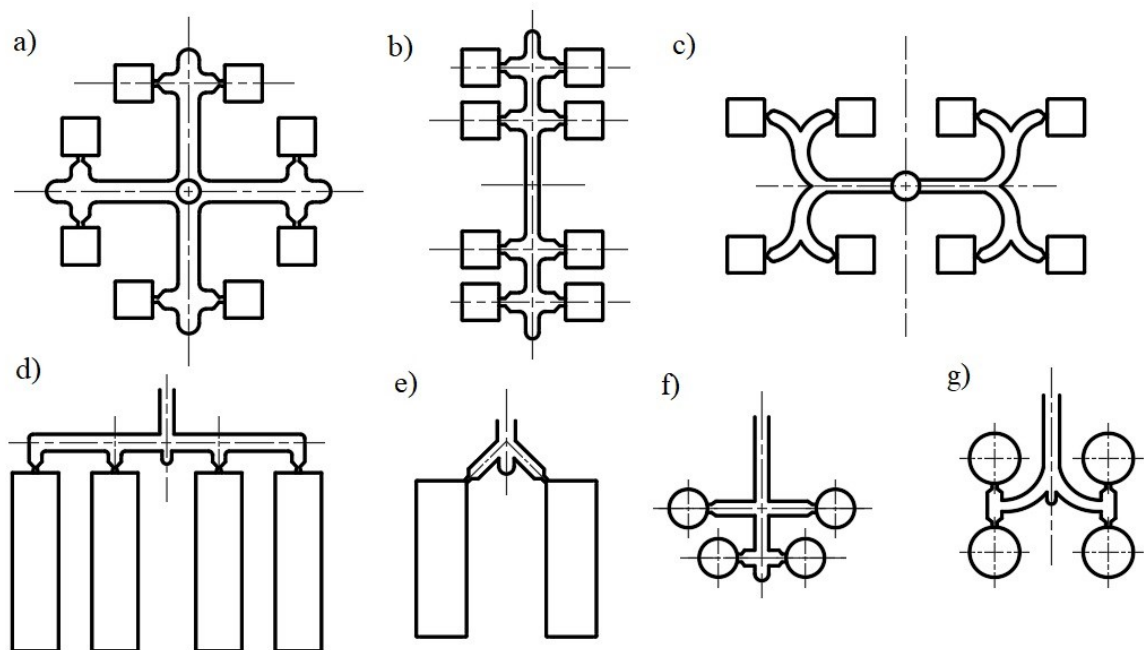
Pro materiály transparentní nebo také velmi citlivé na změny teplot se doporučuje použít větších průměrů rozvodných kanálů.

Na obrázku 6 jsou znázorněny možné typy rozvodných kanálů při zachování stejné délky tokových drah. Dále je zde znázorněna jímka, což je část rozvodného kanálu, která má za účel zachytit chladnější čelo taveniny.



Obr. 8 Návrhy rozvodných kanálů při dodržení stejné délky toku pro všechny dutiny [6]

Na obrázku 7 jsou vykresleny různé typy vtokových systémů. Vhodnými typy řešení jsou a, c, e, f, g. U typů b, d je nutná korekce vtokových ústí, aby došlo ke stejnoměrnému plnění všech tvarových dutin.



Obr. 9 Typy vtokových systémů [7]

3.1.3 Vtokové ústí

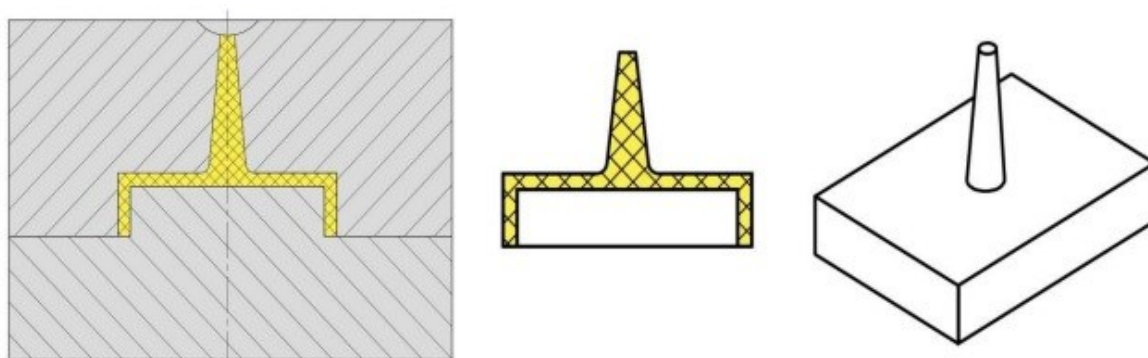
Účelem vtokového ústí je vedení taveniny z rozvodného kanálu do dutiny formy. Je tedy posledním článkem vtokového systému. Vtokové ústí vzniká zúžením rozvodného kanálu, ovšem v některých, velmi specifických případech může být stejně velké jako rozvodný kanál. Pokud je například žádoucí potlačit vznik lunek nebo propadlin (u výstřiků s velkým objemem).

Zúžením dojde ke zvýšení teploty a také se částečně zabrání strhávání chladnějších vrstviček polymeru, které by jinak vytvářely povrchové defekty výstřiku. Velikost vtokového ústí se volí tak, aby bylo co nejmenší, ale zároveň musí bezpečně zaplnit tvarovou dutinu a také umožnit působení dotlaku. Čím užší a kratší je zúžené místo vtokového ústí, tím snazší je jeho následné začištění. Pokud je však vtokové ústí příliš úzké, může dojít k delaminaci (oddělování) vrstev výstřiku. [4,6,7]

Jednotlivé typy vtokových ústí:

Plný kuželový vtok – Tavenina je do formy vedena nezúženým ústím. Převážně je používán pro jednonásobné formy, ve kterých jsou tvarové dutiny symetricky uloženy. Je zvláště vhodný pro výrobky s větší tloušťkou stěny. Lze jej použít i u výstřiků s menší tloušťkou stěny, v tom případě však musí být strana naproti vtokovému ústí opatřena čokovitým zahloubením. Vtokové ústí tohoto typu zatuhne až jako poslední část, tudíž je velmi vhodné z hlediska působení dotlaku.

Jeho největší nevýhodou je pracné odstranění, které vždy zanechá na výstřiku stopy.

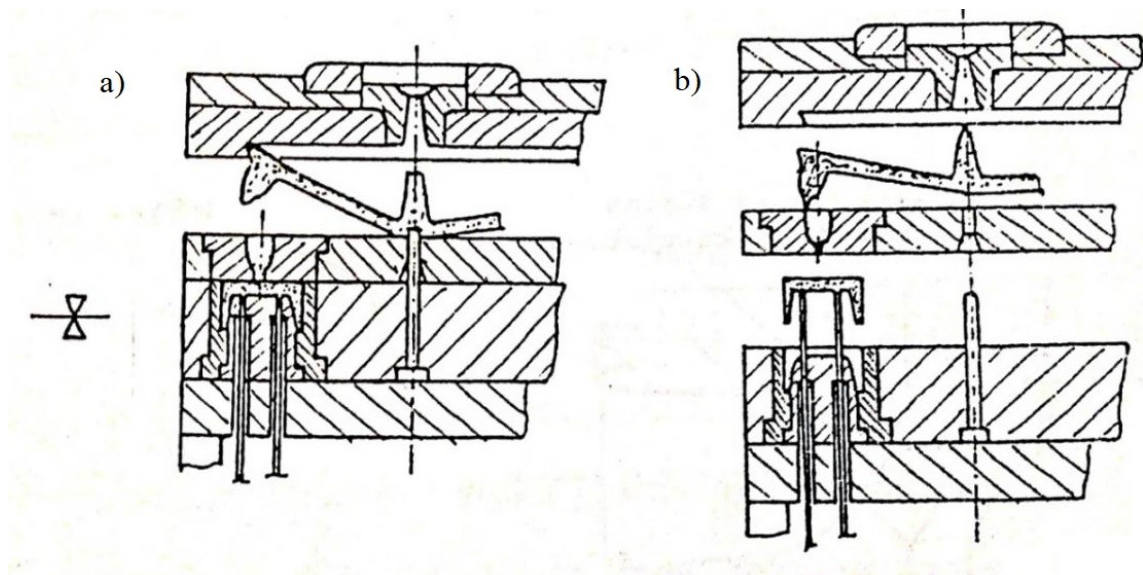


Obr. 10 Plný kuželový vtok [8]

Bodový tok – Jedná se o nejpoužívanější typ vtokového ústí. Nejčastěji má kruhový průřez a může ležet jak uvnitř dělicí roviny, tak i mimo ni. Vychází buď z předkomůrky, rozvodných kanálů nebo rovnou z vtokového kanálu.

Pro jeho správnou funkci je nutné použít třídeskovou konstrukci vstřikovací formy. Nejprve se totiž musí odtrhnout vtokové ústí od výrobku a až poté může být otevřena hlavní dělicí rovina za účelem vyhození výstřiku.

K odtržení vtokového ústí od výstřiku dochází v jeho nejužším místě. V případě tenkostěnných výrobků je vhodné toto zúžení posunout dále od tvarové dutiny. Tímto se zamezí vzniku kráteru po odtržení. U tlustostěnných výrobků je možné nejužší místo posunout blíže ke tvarové dutině. Stejná pravidla platí i u navrhování předkomůrky, aby došlo k bezpečnému vyhození celého vtokového zbytku. [7,8]



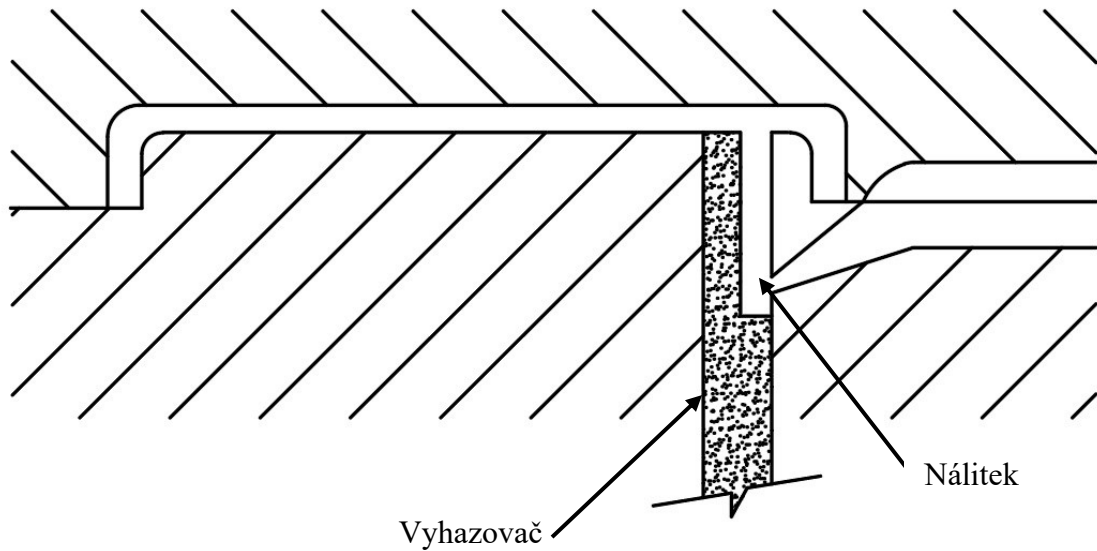
Obr. 11 Odformování bodového vtoku [7]

a) odtržení vtokového systému b) vyhození výstřiku i vtokového systému

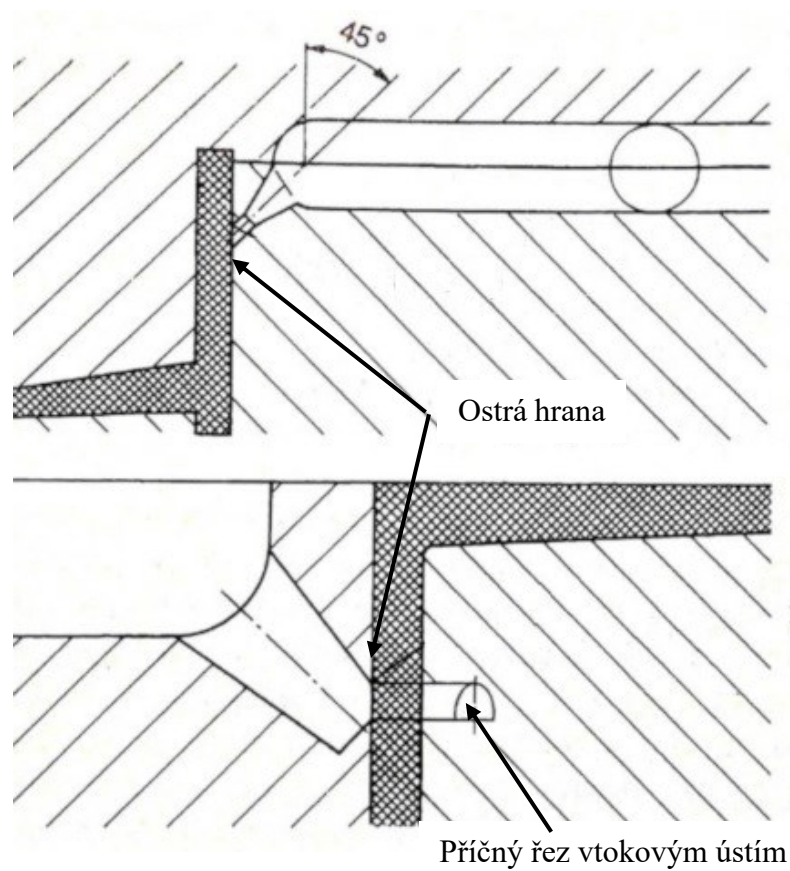
Tunelový vtok – Vychází principiálně z bodového vtoku, avšak rozvodný kanál může být součástí dělicí roviny. Může být umístěn jak v pohyblivé, tak i pevné části vstřikovací formy. Díky tomu odpadá potřeba další dělicí roviny (pro odformování vtokového zbytku). Vtokové ústí je vhodné umístit do nepohledové strany výstřiku. Takovými místy jsou například žebra, spodní strany výstřiku nebo do nálitku. Při odformování dochází k oddělení vtokového zbytku od výstřiku přes ostrou hranu.

Výhodou je automatické oddělení výstřiku od vtoku bez toho, aniž by musela být použita třetí deska.

Pokud je materiál vyztužen vláknitým plnivem, tak se použití tunelového vtokového ústí nedoporučuje. Tento typ vtokového ústí je také náročnější na výrobu než například bodový vtok.

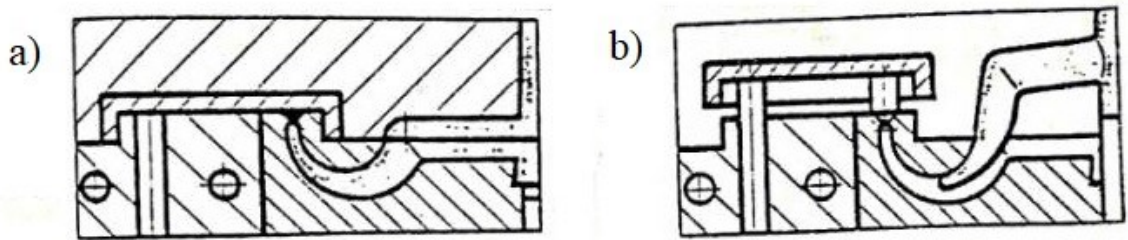


Obr. 12 Tunelový vtok s vyústěním do nálitku [7]



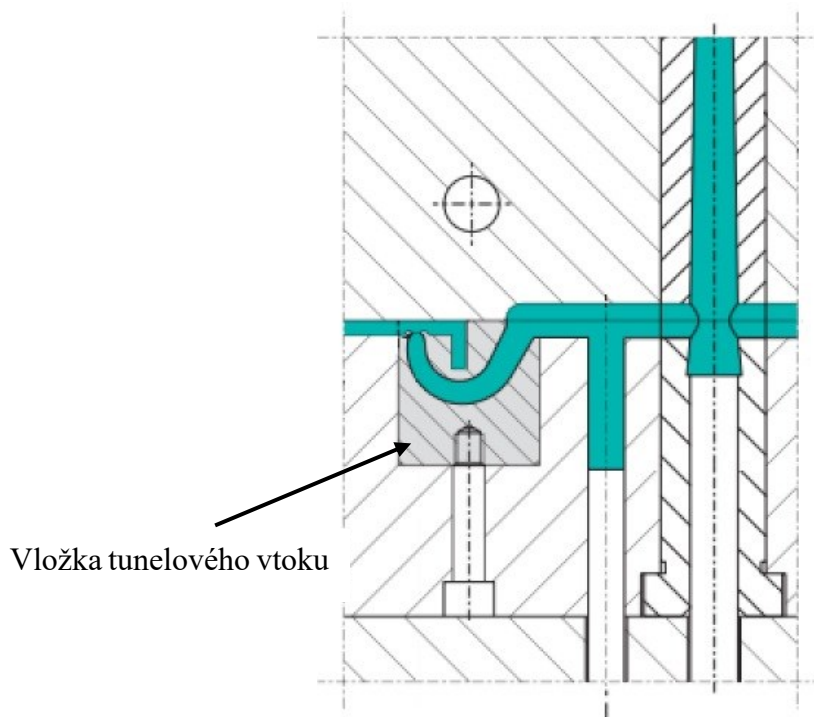
Obr. 13 Tunelový vtok [9]

Banánový vtok – Někdy zvaný i jako srpkovitý. Jedná se o zvláštní typ tunelového vtoku. Nejvíce se používá u výstřiků, u nichž není možné umístit vtokové ústí do boční strany výrobku. Není vhodný pro křehké materiály. Geometrie je udávána normalizovanou tvarovou vložkou, která se vsadí do formy. Na obrázku 13 je zobrazena normalizovaná vložka tunelového vtoku firmy Meusburger. [7,8]



Obr. 14 Banánový vtok [7]

a) před vyhozením b) při vyhození



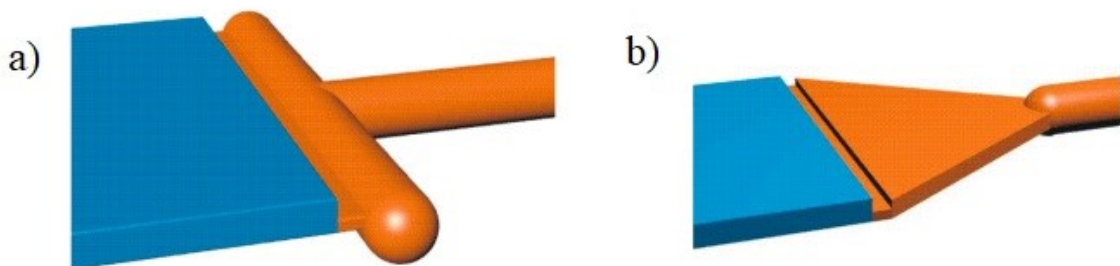
Obr. 15 Vložka tunelového vtoku firmy Meusburger [10]

Filmový vtok – S výhodou se využívají pro plošné výstřiky (zejména obdélníkových tvarů). Je vhodný jak pro semikrystalické, tak i plněné polymerní materiály. Často se používá pro velmi namáhané nebo optické výstřiky. Vtokové ústí bývá zpravidla umístěno do kratší strany. Výhodami filmových vtoků jsou:

- minimální vnitřní pnutí,
- eliminace studených spojů,
- snížení rychlosti taveniny,
- vyvážení tlaku působícího na jádra,
- dodržení přímosti, přesnosti a rovinnosti výstřiku.

Největší nevýhodou je velký objemný vtokový systém, který je třeba následně oddělit. Tavenina není rovnoměrně rozváděna do celé plochy vtokového ústí, jelikož s rostoucí vzdáleností od rozvodného kanálu klesá tlak.

Z filmového vtokového ústí dále vycházejí vějířové a zvonové ústí. Ty jsou charakteristické svým rozšiřováním směrem od rozvodného kanálu. [4,7]



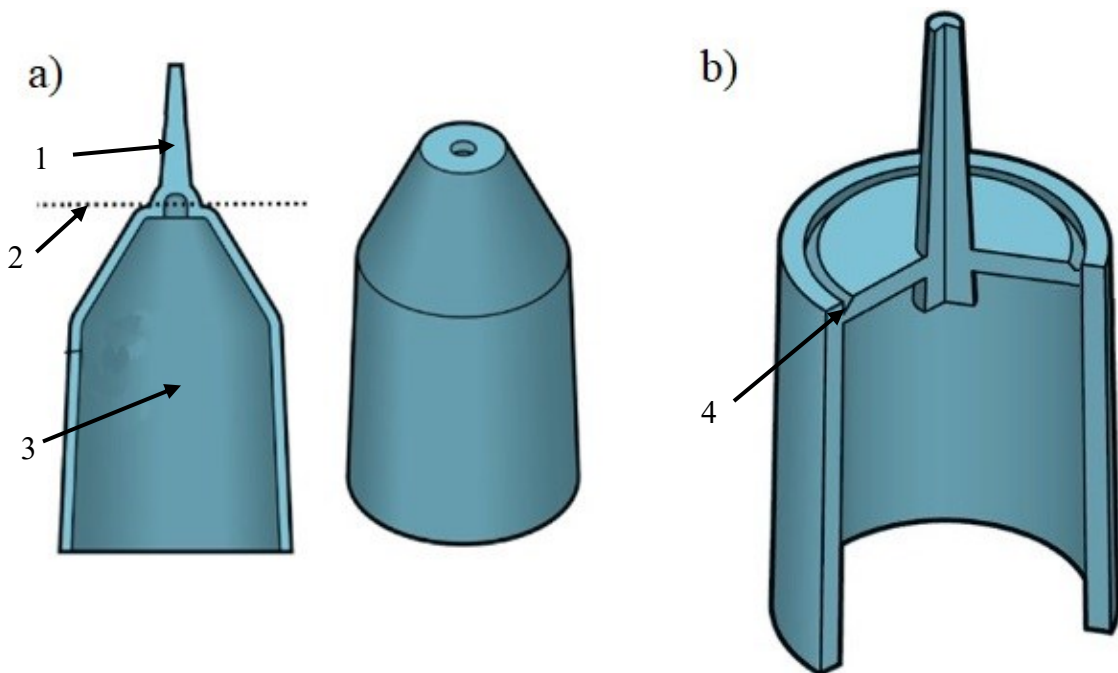
Obr. 16 Filmové vtokové ústí [11]
a) filmové vtokové ústí b) vějířové vtokové ústí

Deštníkový, talířový– Deštníkové vtokové ústí se s výhodou využívá pro vstřikování dílů s velkými otvory v hlavní ose (ozubená kola, rotory větráků), jelikož zajišťují rovnoměrné plnění tvarové dutiny bez vzniku studených spojů. Samotné vtokové ústí se obvykle směrem ke tvarové dutině zužuje.

Talířový vtok je obdobou deštníkového vtokového ústí, na rozdíl od něj však dochází k plnění z vnitřní části výstřiku.

U obou typů je nutné následné začištění výstřiku, které je však mechanicky velmi náročné. Nejčastěji se vtokový zbytek odděluje vyseknutím či vrtáním. Nevýhodou je také vysoká spotřeba materiálu pro vtokový systém.

Tyto typy vtokových ústí lze nahradit větším počtem tunelových vtokových ústí. Při záměně za tunelové vtokové ústí se však ve výstřiku začnou tvořit studené spoje. [4,7]



Obr. 17 Deštníkové a talířové vtokové ústí [4]

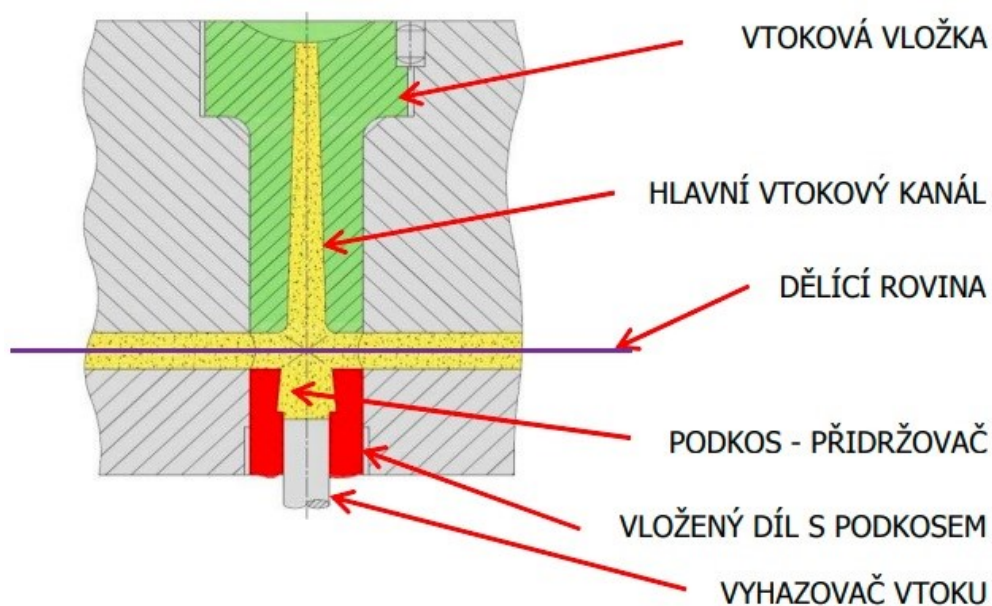
a) Deštníkové vtokové ústí b) Talířové vtokové ústí

1 – vtokový systém, 2 – rovina oddělení vtokového systému, 3 – výstřik, 4 – plocha oddělení vtokového systému

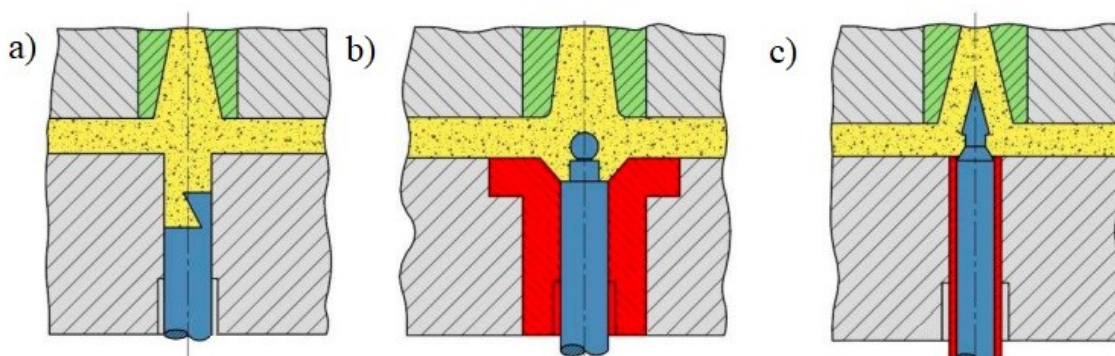
3.1.4 Přidržovače vtoku

Jakmile je výstřík ochlazen na požadovanou teplotu, může započnout otevírání vstříkovací formy. Při tomto procesu je nutné, aby celý vtokový zbytek zůstal na levé straně formy, a bylo jej tak možné vyhodit pomocí vyhazovačů. Tím dojde také k vyjmutí vtokového zbytku z vtokové vložky, které by jinak nebylo možné. Za tímto účelem bývají vtokové systémy opatřeny přidržovačem vtoku. Nejčastěji bývá umístěn naproti hlavního vtokového kanálu. Zvláště důležité jsou přidržovače v kombinaci s tunelovým vtokovým ústím.

Možné konstrukce přidržovačů vtoku jsou znázorněny na obrázku 17.



Obr. 18 Schéma vtokového systému s přidržovačem [4]



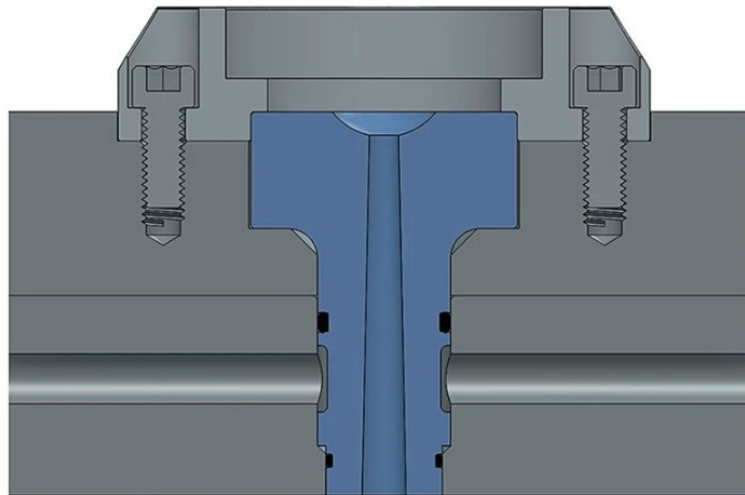
Obr. 19 Typy přidržovačů vtoku [4]

a) Vyhazovač s vytrhávačem b, c) strhovač vtoku (červená část)

3.1.5 Vtoková vložka

Jedná se o normalizovanou součást, která je v přímém kontaktu s tryskou plastikační jednotky vstřikovacího stroje. Kvůli značnému mechanickému i tepelnému namáhání je třeba vtokové vložky tepelně zpracovat. Její vnitřní kuželová část udává tvar hlavnímu vtokovému kanálu. Úhel sklonu se pohybuje v rozmezí od $0,5^\circ$ do $1,5^\circ$. Dále je nutné zajistit, aby bylo nejužší místo vtokové vložky alespoň o 0,5 mm až 1 mm větší, než je průměr trysky stroje.

Do vtokové vložky je vyvrtána dvojice na sebe kolmých děr, které mají za úkol zajištění správné polohy vtokové vložky a také brání jejímu pootočení ve vstřikovací formě. [4]



Obr. 20 Vtoková vložka (modře zvýrazněná) [12]

3.2 Vyhřívání vtokových systémů

Neustálá snaha o zefektivnění procesu, co možná nejvyšší automatizace a také snížení odpadu na minimum vedly k vývoji vyhřívání vtokových systémů. V padesátých letech minulého století firma DME představila svou patentovanou technologii bezodpadového vstřikování termoplastů. Jejich technologie nepoužívala studený vtokový systém, který po vstřikovacím cyklu končí jako odpadní materiál. [1]

Základním znakem vyhřívání vtokového systému je přivádění taveniny přímo do tvarové dutiny formy nebo do pomocného studeného vtokového systému (v případě kombinovaných vtokových systémů). Tavenina je ve vyhřívání vtokovém systému stále v tekutém stavu. Teplo pro ohřívání se nejčastěji dodává elektrickým topením (nejčastěji se jedná o odporové). [1,6]

Výhody:

- Lze docílit vyšší automatizace výroby.
- Výhodné pro hromadnou výrobu (díky vyšší automatizace).
- Zkrácení vstřikovacího cyklu (doby chlazení).
- Nevzniká odpad ve formě vtokového zbytku.
- Není potřeba odstraňovat vtokový zbytek = snížení nákladů na dokončovací operace.
- Není potřeba odpadové hospodářství pro likvidaci a recyklaci vtokového zbytku.

Nevýhody:

- Velmi nákladné na pořízení.
- Vyšší provozní náklady.
- Vyšší cena samotné formy. S tím souvisí i velmi obtížná či nemožná změna polohy vtoků.
- Vyšší požadavky na vybavení vstřikovny i na úroveň obsluhy.
- Při přechodu z jedné barvy materiálu na druhý je nutno systém důkladně vyčistit.

[1,6]

3.2.1 Izolované vtokové systémy

Principem izolovaných vtokových systémů je vlastní termoplastická izolace okrajových vrstviček vtokových kanálů nebo předkomůrky. Samotná tryska není nijak vytápěna. Teplota je udržována izolačními vlastnostmi silné vrstvy taveniny anebo nepřímým ohříváním. Polymerní tavenina zůstává uvnitř vtokového systému i po ukončení cyklu. Ve vtokovém ústí vzniká při každém vstřikovacím cyklu tenká blána, která je při následujícím cyklu protržena proudem taveniny. Blána zadržuje taveninu uvnitř vtokového systému při otevření formy. [6,13]

Existují dva druhy izolovaných vtokových systémů:

- První typ je jednodušší, avšak dnes méně používaný. Jedná se o izolované vtokové systémy se zesíleným vtokem. Průměr vtokového systému je od vtokové vložky, přes rozvodné kanály až po vtokové ústí dimenzován tak, aby při vstřikovacím cyklu nedošlo k zatuhnutí taveniny. Úkolem prvního vstřiku je zaplnění celého objemu zesílených kanálů i předkomůrky taveninou. Délka vstřikovacího cyklu musí být nastavena tak, aby polymerní tavenina uvnitř vtokového kanálu zůstala stále plastická. U vnější vrstvičky je naopak žádoucí, aby při kontaktu s chladnějším povrchem formy zatuhla a vytvořila tak izolační vrstvu. Pro tento typ izolovaných vtokových systémů jsou vhodné polymery s nízkou teplotou tavení a také s širším zpracovacím intervalem.
- Druhým typem jsou izolované vtokové systémy opatřené předkomůrkou. Ty jsou vhodné pro tlustostěnné výstřiky, u kterých by při delším chlazení mohlo dojít k zatuhnutí taveniny, a to v celém průřezu vtokového systému. Předkomůrka je tedy zvětšena nebo je v ní umístěn nástavec či prodloužená tryska. Nástavec i tryska jsou ohřívány nepřímo vstřikovacím strojem. Z vnější strany je nutné předkomůrku ochlazovat, aby došlo k zatuhnutí vrstvy taveniny, která poté stane izolační vrstvu. Díky této izolaci může tavenina proudit okolo nástavce bez poklesu teploty. [6,8]

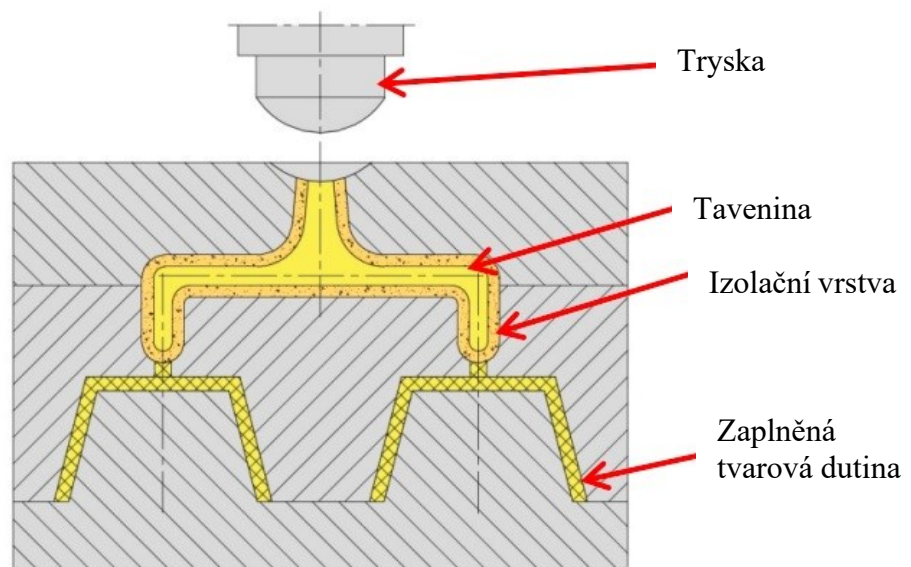
Výhody:

- Jednoduchá konstrukce.
- Nižší spotřeba polymeru.
- Nevzniká vtokový zbytek.

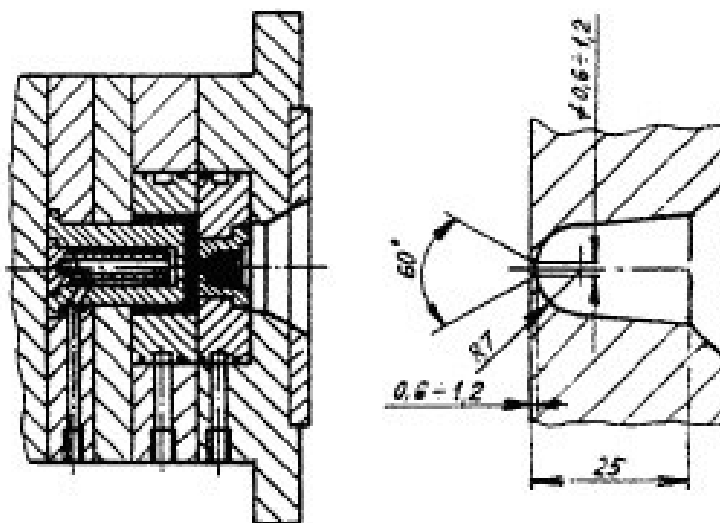
- Menší objem zplastikovaného materiálu vede ke kratšímu vstřikovacímu cyklu.

Nevýhody:

- Vhodné pouze pro krátké vstřikovací cykly.
- Vyšší cena formy – třídeskový systém.
- Komplikovanější a nákladnější opravy formy.
- Ke stabilizaci teploty jsou potřeba dlouhé spouštěcí doby. [8,14]



Obr. 21 Řez izolovaným vtokovým systémem se zesíleným vtokem [8]



Obr. 22 Izolovaný vtokový systém s předkomůrkou [15]

3.2.2 Řešení vyhřívaných vtokových systémů vstříkovacích forem

Samotný vyhřívaný vtokový systém se sestává ze tří základních prvků:

- Vyhřívaná vtoková vložka – Je spojením mezi tryskou stroje a rozváděcím blokem.
- Rozváděcí blok – Jeho úkolem je vedení taveniny do horkých trysek.
- Horké trysky – Plní tvarovou dutinu formy polymerní taveninou.

Výrobci nabízejí jak čistě jednotlivé trysky, tak komplexní řešení celého horkého bloku, či celé pevné části vstříkovací formy. Nezbytnou součástí jsou také senzory a regulátory teplot. [1]

Vyhřívané trysky se dělí na dva druhy:

- S vnějším ohřevem – topné těleso ohřívá taveninu proudící uvnitř něj. Těleso je vyrobeno z tepelně vodivého materiálu, může být legováno molybdenem (pokud se používá pro vstříkování abrazivních polymerů). U tohoto typu trysky dochází k menšímu úbytku tlaku.
- S vnitřním ohřevem – topné těleso (torpédo) obtéká tavenina. I v tomto případě je nutné těleso vyrobit z tepelně vodivého materiálu. U tohoto typu trysky lze lépe regulovat teplotu taveniny. Také dochází k lepší teplotní izolaci od okolí. [16]

Hrot trysky může být zakončen několika způsoby:

- Otevřené – vhodné pro polymery, které netáhnou vlas (například PE).
- Se špičkou (hrotem) – pokud je polymer náchylný k tažení vlasu (ABS, PS, PP).
- S uzavírací jehlou – perfektní vzhled výstřiku bez stop po vtoku.

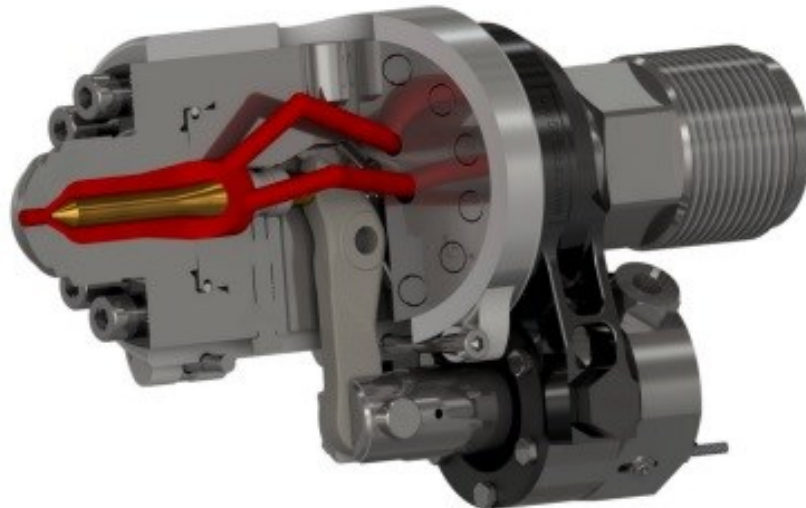
Typy uzavíracích jehel:

- Kuželová jehla – během uzavírání jehla dosedne do odpovídající geometrie hrdla vložky formy. Síla při zavírání hrdla trysky musí být zvolena tak, aby nedošlo k poškození vložky formy. Při zavírání je tavenina vytlačena ze zužující se mezery mezi vložkou a jehlou.
- Válcová jehla – vložka má válcový tvar, tak jako jehla. Při uzavírání je tavenina zatlačena do součásti.

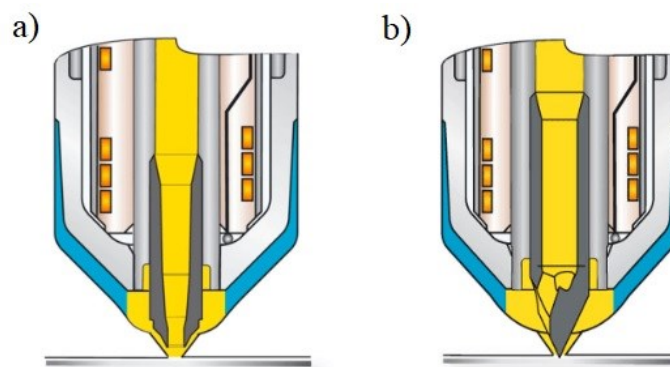
Jehly mohou být orientovány ve stejné ose jako je osa vtokového ústí anebo můžou do vtokového ústí směřovat pod úhlem. Jehla směřující pod úhlem do vtokového ústí v otevřené poloze pouze nepatrně blokuje tok taveniny. Avšak podléhá vyššímu opotřebení, proto se v praxi používá méně. [17]

Otevírání a uzavírání trysek lze uskutečnit dvěma způsoby:

- Vstřikovacím tlakem – v počáteční poloze je tryska uzavřená a k otevření dochází až poté, co vstřikovací tlak stoupne nad definovanou mez. Operace je závislá na vstřikovacím tlaku.
- Hydraulicky nebo pneumaticky – otevírání a uzavírání trysky je ovládáno skrze řídicí jednotku stroje. Operace není závislá na vstřikovacím tlaku.



Obr. 23 Uzavíratelná tryska s jehlovým uzávěrem firmy Herzog [19]



Obr. 24 Příklady otevřených trysek [20]

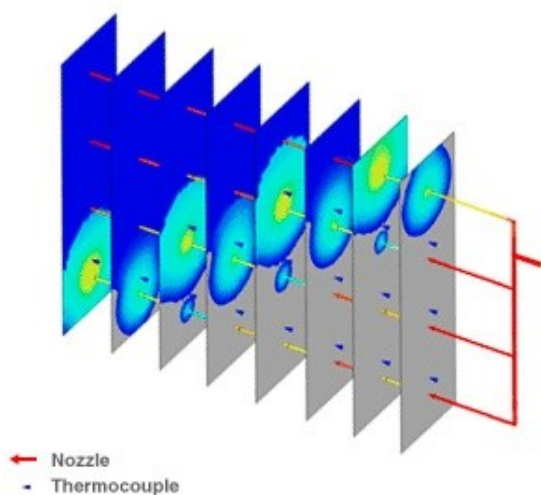
a) s přímým výstupem b) s hrotem

Obrovskou výhodou uzavíratelných trysek s jehlovým uzávěrem je, že umožňují kaskádové a sekvenční vstřikování. Tyto technologie lze použít pouze v kombinaci s vícebodovým vstřikováním do jedné tvarové dutiny. Účelem těchto technologií je buďto odstranění nebo alespoň přesunutí místa vzniku studených spojů a minimalizování povrchových vad.

Kaskádové vstřikování – trysky jsou seřazeny za sebe a dochází jimi k postupnému plnění dutiny tak, že vzniká pouze jedno čelo tekoucí taveniny. S výhodou se tato metoda využívá pro dlouhé výstřiky nebo u výstřiků s vysokými nároky na vzhled (přístrojové desky, nárazníky automobilů).

Sekvenční vstřikování – tato metoda využívá postupného otevírání a zavírání trysek k ovlivnění chování, polohy i toku čela taveniny uvnitř tvarovou dutiny vstřikovací formy. Je vhodná pro členité výstřiky nebo výstřiky s tvarovými vložkami, které tavenina obtéká.

[1,20]



Obr. 25 Kaskádové plnění tvarové dutiny [22]

4 TEMPERAČNÍ SYSTÉMY

Jedním z nejdůležitějších parametrů pro správný průběh a nastavení procesu vstřikování je bezpochyby teplota vstřikovací formy. Ta má zásadní vliv na:

- výrobní i dodatečné smrštění vstřikované dílu – velikost výstřiku,
- kvalitu výstřiku,
- náklady na výrobu,
- reprodukovatelnost požadovaného povrchu,
- u krystalických polymerů na stupni krystalinity,
- velikost deformací a napětí ve výstřiku.

Požadované kvality výstřiku (kvalitní povrch, mechanické či fyzikální vlastnosti, dodržení rozměrové tolerance) lze tedy dosáhnout samotnou teplotou formy, volbou temperačního média nebo správnou konstrukcí temperace (zkrácení vstřikovacího cyklu).

Správně navržený temperační systém by měl při vstřikovacím cyklu ustavit požadovanou teplotu vstřikovací formy a následně ji udržet v co nejmenším rozpětí. Dalším úkolem temperace je odvádět přebytečné teplo z dutiny formy a tím efektivně ochlazovat výrobek. [4,23]

Pro přenos tepla z taveniny do vstřikovací formy je zásadní veličinou tepelná vodivost. Čím vyšší je tepelná vodivost, tím rychleji lze teplo odvádět z tvarové dutiny. Na základě této vlastnosti lze temperace rozdělit na dva základní typy provedení:

- pasivní,
- aktivní.

Pasivní temperace je kombinací izolačních a vodivých materiálů. Pro zvýšení rychlosti odvodu tepla lze využít vysoce tepelně vodivých materiálů (měď nebo slitiny mědi). Ty mají tepelnou vodivost několikanásobně vyšší než oceli. Nejvíce se používají pro temperování špatně dostupných míst, jakými jsou například tenké tvárníky.

Úkolem izolačních materiálů je naopak udržení tepla uvnitř vstřikovací formy a zamezení přestupu do upínacích ploch vstřikovacího stroje. Izolační desky mohou být tedy umístěny jak na upínacích deskách, tak na bocích formy. Jedná se o normalizované díly. [24]

Aktivní temperace je řešena pomocí kanálů, ve kterých proudí médium, které odvádí teplo z formy ven. Možnosti aktivní temperace spolu s rozdělením jsou popsány v kapitole 4.1.

Pro navrhování temperačního systému je naprosto nezbytné vycházet z umístění vyhazovačů nebo tvarových jader bočních odformování. Je nutné nalézt kompromis mezi umístěním a počtem temperačních kanálů a také vhodnou pozicí pro vyhazovací systém či dalších normalizovaných prvků (šroubů, vtoků). Dále je nutné myslet na to, že temperační systém snižuje pevnost a tuhost vstřikovací formy. Pro obsluhu vstřikovací formy je vhodné zajistit snadné zapojení či vypojení systému k temperační jednotce. Toho lze docílit dobře viditelným značením a také vhodnou polohou rychlospojek pro hadice. [4]

4.1 Návrh temperačního systému

Nejrozšířenějším druhem temperačního systému je systém s kanály, kterými proudí temperační médium. Tento systém se sestává z následujících částí:

- řídicí a temperační jednotka,
- temperační médium,
- temperační kanály,
- spojovací prvky – normálie.

Nejefektivnějším řešením temperace je vyšší počet kanálů menšího průměru. Tím se dosáhne rovnoměrnějšího teplotního pole povrchu dutiny. Běžně používané jsou vrtané kanály, v určitých aplikacích se lze setkat také s frézovanými kanály.

Vhodně navržený temperační systém by měl splňovat tato kritéria:

- Nesmí obsahovat mrtvá místa. V těchto místech nedochází k proudění média a je tedy náchylné k zanášení nečistotami či vodním kamenem.
- Pokud je průměr kanálu menší než 6 mm, je nutné médium upravit tak, aby nedocházelo k zanášení kanálů (malé kanály se velmi rychle zanáší).
- V místě ústí vtoku či vtokové vložky je žádoucí zvýšit temperační účinek. [4]

U některých prvků vstřikovacích forem si však nelze vystačit pouze s obvyčejnými temperačními kanály. Například při výrobě dutých výrobků, které mají poměr hloubky ku průměru větší než 3:4, nebo pokud je vzdálenost sousedních žeber menší než trojnásobek tloušťky přiléhající stěny. Z tohoto důvodu se používá řada typů přepážek.

4.2 Přepážkové temperační systémy

Umožňují rozvod temperačního média do hůře dostupných míst (například u dlouhých dutých tvárníků). Jedná se o normalizované součásti vstřikovacích forem. Přepážkové temperační systémy se dělí se na tři základní typy:

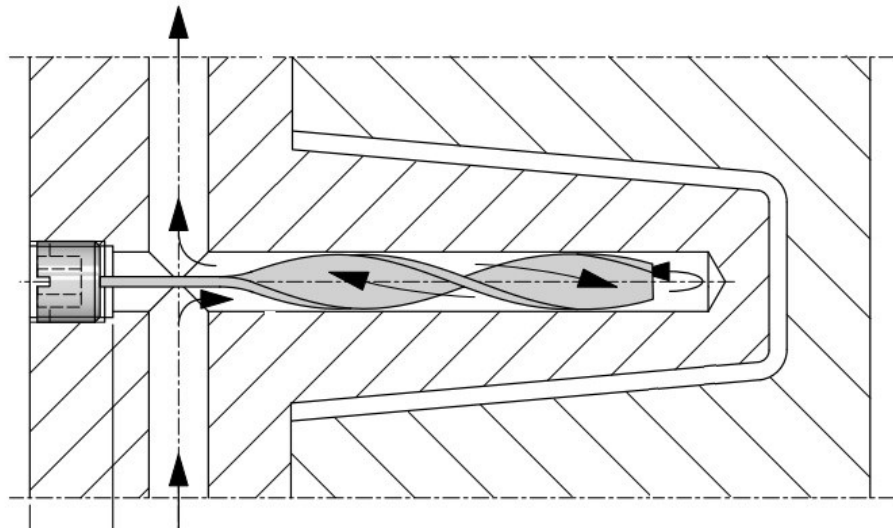
- ploché,
- spirálové,
- fontánky.

4.2.1 Ploché přepážky

Přepážka je umístěna ve vedleším temperačním kanálu, který je kolmý vůči hlavnímu temperačnímu kanálu. Dále pak dělí tento vedlejší kanál na dva dílčí, které mají půlkruhový průřez. Temperační médium proudí nejprve hlavním kanálem, poté je nuceno obtéct přepážku přes vedlejší kanál a následně se vrací zpět do hlavního kanálu. Největší výhodou tohoto řešení je jednoduchá konstrukce. Nevýhodou je zvyšování teploty temperačního média ve směru od vstupu k výstupu. Rozdíl v teplotách je ještě vyšší s rostoucí délkou přepážky nebo se zmenšujícím se průměrem kanálu. To vede k rozdílnému teplotnímu poli ve tvarové vložce formy. Ploché přepážky se používají nejčastěji pro výstřiky s nižšími požadavky na kvalitu a rozměrovou přesnost. [4,25]

4.2.2 Spirálové přepážky

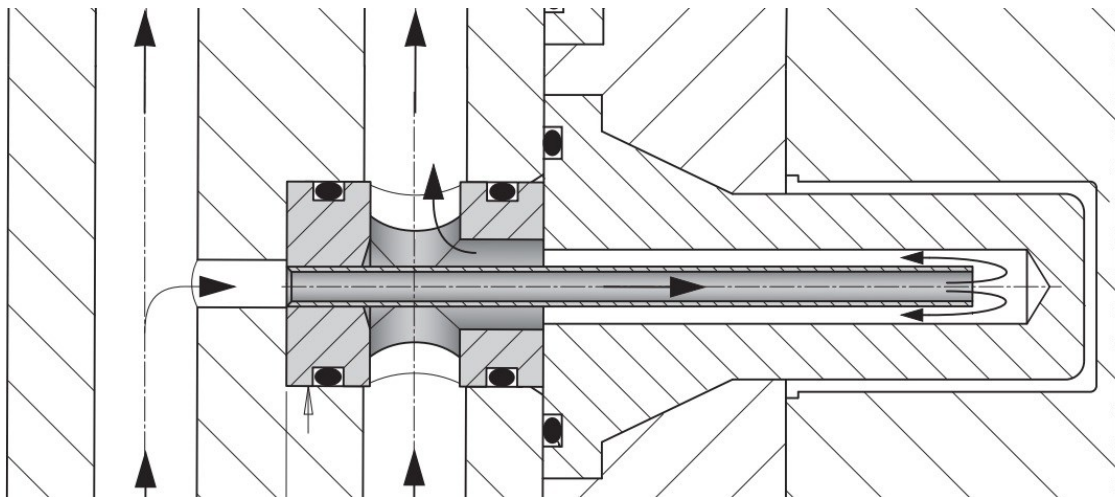
Princip je totožný jako u plochých přepážek, avšak rozdílná je geometrie přepážky (spirála). Dílčí kanály vedlejšího temperačního kanálu mají tedy tvar šroubovice. Od vstupu médium proudí jednou stranou šroubovice, na konci přepážky vstoupí do druhé a v ní pokračuje zpět až k hlavnímu temperačnímu kanálu. Tím se docílí rovnoměrnějšího teplotního pole, než je tomu u ploché přepážky. Spirálové přepážky se nedělají menší než 6 mm. [4,26]



Obr. 26 Spirálová přepážka firmy Meusburger [27]

4.2.3 Fontánkové přepážky

Uvnitř vedlejšího temperačního kanálu je umístěna trubička. Z hlavního temperačního kanálu do ní vstupuje temperační médium, proudí skrze ni a na jejím konci z ní vystoupí. Odtud teče mezerou mezi vnější stěnou trubičky a stěnou vedlejšího kanálu až do hlavního temperačního kanálu. [4,25]



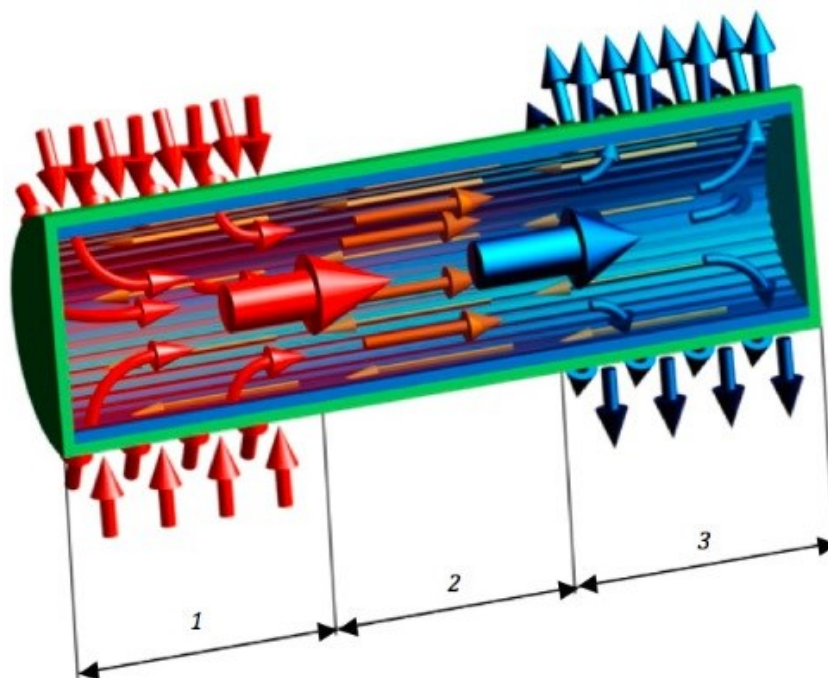
Obr. 27 Fontánková přepážka firmy Meusburger [28]

4.3 Tepelné trubice

Jedná se nejčastěji o trubici kruhového průřezu, která má mechanicko – chemicky ošetřenou vnitřní část, která je vakuově utěsněna. Z trubičky se následně odsaje vzduch (požaduje se tlak menší než 10 Pa) pomocí plnicí trubičky. Poté se dovnitř pustí pracovní látka (například čpavek, freon, etanol či voda). Poté se neprodyšně vakuově uzavře.

Při provozní teplotě je náplň v kapalně nebo plynné fázi (pára). Po ohřátí výparné části dochází k vypařování kapalně fáze náplně a tím k rozprouzení páry směrem do chladnější kondenzační části. Na chladnější stěně dojde ke kondenzaci, čímž se odevzdá teplo a celý proces se znovu opakuje.

Tepelné trubice musí být v těsném kontaktu s povrchem formy bez přítomnosti vzduchových mezer. Ty by mohly zvýšit tepelný odpor a tím snížit účinnost tepelných trubic. Proto se používají takzvané tepelné spoje. Jedná se o vysoce tepelně vodivý materiál ve formě gelu, který funguje jako výplň, pokud by trubici nedoléhala na formu. [4,26]



Obr. 28 Tepelná trubice [4]

1 – výparná část trubice (červeně), 2 – adiabatická část trubice, 3 – kondenzační část trubice (modře)

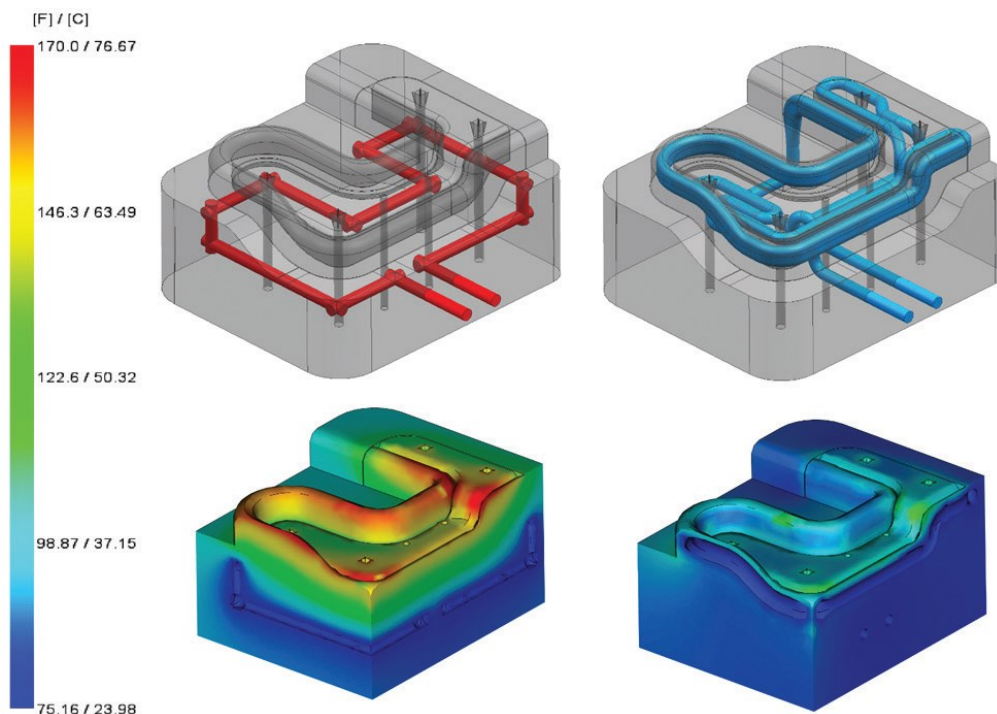
4.4 Nekonvenční metody temperace

V praxi se můžeme setkat s případy, kdy nelze dostatečně temperovat tvarové dutiny konvenčními (běžnými) temperačními kanály. Pro tyto případy byly vyvinuty nekonvenční metody temperace. Metoda spočívá v kopírování povrchu dutiny formy temperačními kanály. Tímto lze temperovat i velmi složité a členité výstřiky. Pro zabezpečení co nejhomogennějšího teplotního pole je nutné okruhy dělit na dílčí. [29]

Další výhodou konformního chlazení je, že konstruktér nemusí posouvat geometrii temperačních kanálů kvůli nutnosti vézt tímto místem vyhazovače nebo vtokový systém. Zkrácení vstřikovacího cyklu, nižší energetická náročnost vůči vysoké účinnosti. [30]

Nevýhodami mohou být například vysoká pořizovací cena, nutné dodatečné obrábění povrchu tvarové dutiny, možná pórovitost.

Na obrázku 27 je znázorněn rozdíl mezi konvenční metodou temperování (pomocí vrtaných kanálů) a nekonvenčním temperačním systémem. Je patrné, že u konvenčních temperačních systémů je daleko méně rovnoměrně rozložené teplotní pole, než je tomu u nekonvenčních temperačních systémů.

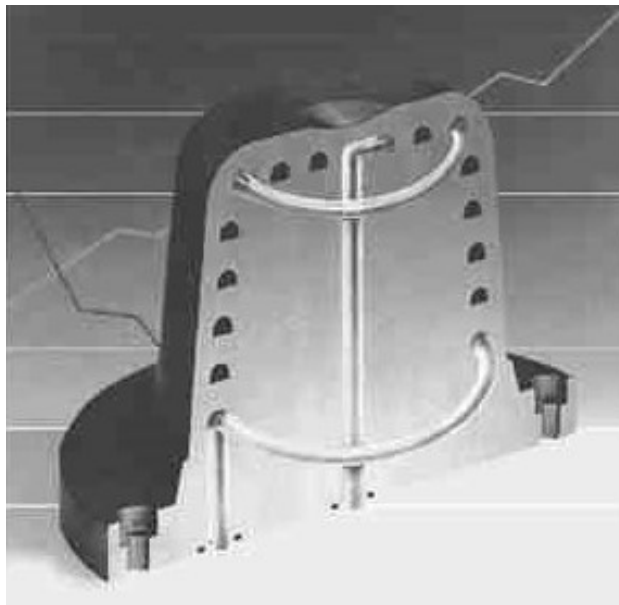


*Obr. 29 Konvenční vs nekonvenční temperační systém [32]
Konvenční temperační systém vlevo, nekonvenční temperační systém vpravo*

4.4.1 Temperační systém Contura

První způsob temperace kopírující povrch dutiny je systém CONTURA. Spočívá v kopírování tvaru výrobku v definované vzdálenosti. Výrobek se pomyslně rozdělí na vrstvy (hladiny), kterých je nejčastěji 2 až 7. Na těchto hladinách se vyrobí temperační kanály, nejčastěji jsou vyrobeny frézováním. Vrstvy jsou poté spojeny dohromady zpravidla pájením natvrdo ve vakuu. Tvarová vložka se musí před použitím brousit, popřípadě leštit. Alternativou je 3D tisk kovů, jímž lze tvarovou vložku vyrobit rovnou spolu s temperačními kanály. Metoda je založena na laserové sintraci.

Výhodou metody je dosažení homogenního teplotního pole uvnitř tvarové vložky i u složitých, členitých výstřiků. To má za následek redukci problémů se smrštěním a deformacemi vzniklými nerovnoměrným teplotním polem dutiny při chlazení. [4]



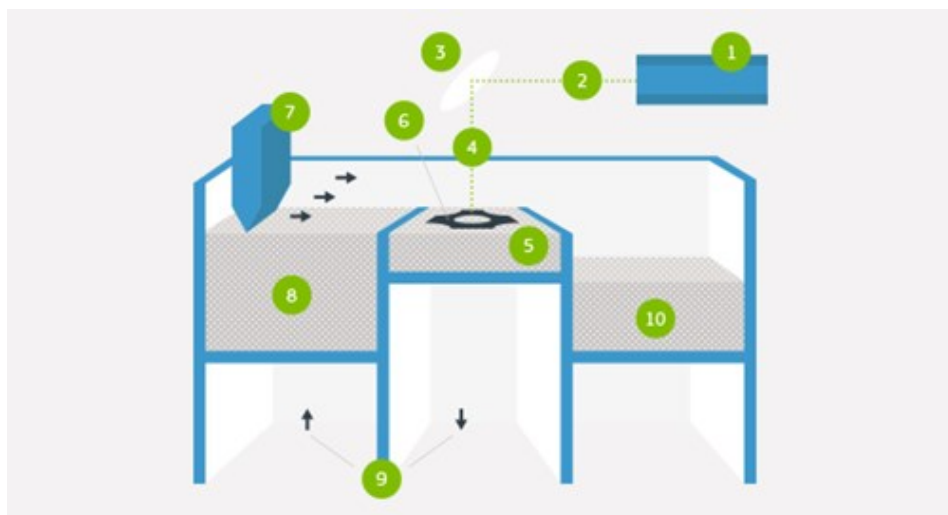
Obr. 30 Temperační systém CONTURA [31]

4.4.2 Direct Metal Laser Sintering – DMLS

Tato metoda je nejefektivnější ze všech typů výroby temperačních systémů nekonvenčními technologiemi. Metoda je schopná zhotovit 3D tělesa přímo z 3D CAD modelů.

Nejprve je nutné virtuálně rozdělit model do tenkých vrstev. Následně dochází k postupnému vrstvení kovového prášku (tloušťka vrstvy se pohybuje od 0,02 do 0,04 mm) na pracovní plochu stroje. Mezi položením jednotlivých vrstev je kovový prášek taven laserem. Každá ztuhlá vrstva poté přesně kopíruje definovanou geometrii 3D modelu. Technologie DMLS je rychlá a vhodná pro výrobu velmi složitých tvarů, prototypovou či malosériovou výrobu.

V současné době se metoda nejvíce rozvíjí právě u temperace vstřikovacích forem. Metoda zkracuje výrobní cyklus až na 40 % celkového času. Produkuje minimální množství odpadu (nevyužitý prášek lze znovu použít). Nevýhodami mohou být vysoká pořizovací cena, vysoká drsnost povrchu nebo pórovitost. Nejčastějším používaným kovovým práškem pro technologii DMLS je martenzitická nástrojová ocel nesoucí označení 1.2709. Tvrdost tvarových vložek z konstrukční oceli 1.2709 se pohybuje v rozmezí 36–39 HRC. Je možné je ovšem zušlechtit a dosáhnout výsledné tvrdosti 52–54 HRC. Tvarovou vložku lze poté bez obtíží obrábět, erodovat i leštit jako konvenčně vyráběné tvarové vložky z konstrukční oceli. [2,33]



Obr. 31 Princip metody DMLS [34]

1 – zdroj laserového paprsku, 2 – laserový paprsek, 3 – zrcadlový systém, řízení paprsku,
4 – zaostřený usměrněný paprsek, 5 – pracovní komora, 6 – výrobek, 7 – stahovací nůž,
8,10 – zásobník prášku, 9 – písty

5 VADY VÝROBKŮ

I přes veškerou vynaloženou snahu při optimalizaci procesu, nastavení předepsaných parametrů, kontrole materiálu i kvality vstřikovací formy se v praxi setkáváme vadnými výrobky. Zdrojem vad mohou být špatně zvolené materiály, nedodržení technologického postupu, špatná konstrukce výstřiku, špatně zvolený stroj, nevhodně konstruovaná vstřikovací forma.

Výrobek se považuje za neshodný (vadný), pokud se odkloňuje od výkresové dokumentace o více než je tolerováno. Sledovanými parametry jsou rozměry, hmotnost, tvar, estetická stránka (pohledové vady) nebo fyzikální či mechanické vlastnosti.

Běžně viditelné vady se dělí do čtyř základních kategorií:

- všeobecně přijatelné vady – nemají zásadní vliv na funkci a neohrožují životnost výstřiku (například vady v lesku),
- omezeně přijatelné vady – nesmí ovlivňovat funkci nebo životnost a nesmí překročit smluvenou přijatelnou mez,
- opravitelné vady – vady lze opravit způsobem, který neovlivní použitelnost výrobku (například přetoky v dělicí rovině),
- nepřijatelné vady – nejsou odstranitelné anebo nejsou odstranitelné přijatelným způsobem, který by neovlivnil funkčnost či životnost výrobku (trhliny, nedostříknutý výstřik).

V následujících kapitolách budou shrnuty nejčastější vady vstřikovaných výrobků a jak je lze eliminovat. [1,2]

5.1 Neúplný výstřik

Tato vada nastává při nedostatečném zaplnění vstřikovací dutiny polymerní taveninou. Obvykle se jedná o místa nejvíce vzdálená od vtokového ústí, při stékání více proudů tavenin nebo v případě míst s malým průřezem stěny.

Příčinami mohou být nízký index toku taveniny s tím související nízká tekutost. Nedostatečně velká vstřikovací dávka, chybná konstrukce výstřiku, nesprávně zvolené umístění ústí vtoku nebo jeho rozměry. Z pohledu vstřikovacího stroje to může být nízký vstřikovací tlak, nízká teplota formy nebo taveniny, nebo situace, kdy dojde k předčasnému přepnutí na dotlak. [1,2]

5.2 Studené spoje

Studený spoj je jev vznikající při setkání dvou chladných čel polymerní taveniny. Například pokud se tavenina musí rozdělit, aby mohla obtéct jádra nebo jiné překážky. Vzniká také při plnění tvarové dutiny vícero vtoky. Studený spoj je slabým místem náchylným k prasknutí. Dochází v něm ke snížení mechanických vlastností.

Studené spoje lze přesunout do méně namáhaných míst výstřiku použitím sekvenčního vstřikování nebo změnou umístění vtokového ústí. Snížit výskyt studených spojů lze také zvýšením rychlosti vstřikování nebo zvýšením teploty taveniny a také vstřikovací formy. U výstřiků velkých rozměrů (nárazníky, palubní desky) je vhodné použít technologii kaskádové vstřikování, čímž lze studené spoje takřka eliminovat. [1,2]

5.3 Propadliny, vtaženiny

Jedná se o povrchové vady, při nichž dojde k vytvoření otevřené dutiny. Vznikají nestejným smršťováním chladnoucí taveniny. Nejčastěji vznikají v místech s velkou tloušťkou stěny výstřiku (u žeber). Na vině je nevhodná konstrukce výrobku (nerovnoměrná tloušťka stěn).

Možným řešením je zvýšení teploty taveniny i formy, zvýšení vstřikovacího tlaku či pozdější přepnutí na dotlak. Dále je možné zvětšit průměr vtokového ústí, aby nedocházelo k jeho předčasnému zamrznutí a tím k dřívějšímu ukončení dotlaku. [1,2]

5.4 Rozdíly v lesku, špatné kopírování desénu

Celkově lze tyto vady označit za místa ve kterých se dosahuje rozdílné kvality povrchu. U výstřiku s vadným povrchem dochází ke většímu lomu světelných paprsků, jejichž menší část se poté vrací zpět k pozorovateli. Pozorovatel si tedy může všimnout rozdílů v lesku. Obecně jsou tato místa objevují ve větší vzdálenosti od vtokového ústí. To je často dáno nestejných tlakových a teplotních podmínek, což vede také k nedokonalému kopírování povrchu formy. Na vině může být špatná konstrukce temperačního systému, v tavenině se nachází vlhkost (špatně vysušený granulát, popřípadě mohla tavenina nasát vlhkost ze vzduchu při zpracování).

Řešením může být zvýšení teploty formy i taveniny, zvýšit vstřikovací rychlost, přelestit tvarovou vložku. [1,2]

5.5 Volný tok taveniny

Tato vada je známá také jako Jetting. Vzniká tehdy, pokud nedochází k ideálnímu fontánovému plnění tvarové dutiny. Taveninový paprsek je doslova vystřelen do tvarové dutiny, dopadá na protilehlou plochu a na ní okamžitě chladne. Vzniklý pramenec se špatně spojuje s další taveninou nebo se dokonce taveninou nechává unášet uvnitř tvarové dutiny. Řešením je buďto snížit vstřikovací rychlost, zvýšit teploty formy a taveniny nebo změnit pozici vtokového ústí. Dalším řešením může být umístění přepážky (kolíčku) do tvarové dutiny tak, aby se vstupující paprsek o přepážku rozptýlil a zpomalil. [1,2]

5.6 Spálená místa – Dieselův efekt

Obě vady nastávají, pokud je vzduchu zamezeno opustit tvarovou dutinu formy a je zde taveninou uzavřen. Vzduch je stlačováním zahříván až nakonec dojde k jeho vzplanutí. To způsobuje zuhelnatění daného místa výstřiku.

Řešením je snížení vstřikovací rychlosti, čímž se vzduchu poskytne více času na opuštění dutiny formy. Popřípadě je možné vytvořit odvodušňovací kanálky v místech, kde by k uzavírání s největší pravděpodobností došlo. [1,2]

5.7 Vakuové bubliny – lunkry

Vakuové bubliny jsou defacto dutá místa uvnitř výstřiku. Nejčastěji vznikají v místech s větší tloušťkou stěny. Povrchová vrstva výstřiku se ochladí rychleji a zformuje takzvaný obal, zatímco vnitřní části se ochlazují pomaleji. Dochází k jejich smrštění směrem k vnějším částem, čímž se materiál uvnitř rozestoupí a vznikne duté místo. U transparentních výrobků je jejich identifikace snadná, u neprůhledných výrobků je nutné je buďto rozřezat anebo prohlédnout s pomocí ultrazvuku.

Řešením je zvýšit úroveň dotlaku, aby se více kompenzovalo smrštění. Snížit teplotu formy, zvýšit teplotu formy nebo změnit konstrukci výrobku (zmenšit tloušťku stěny). [1,2]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Za cíle diplomové práce byly stanoveny následující body:

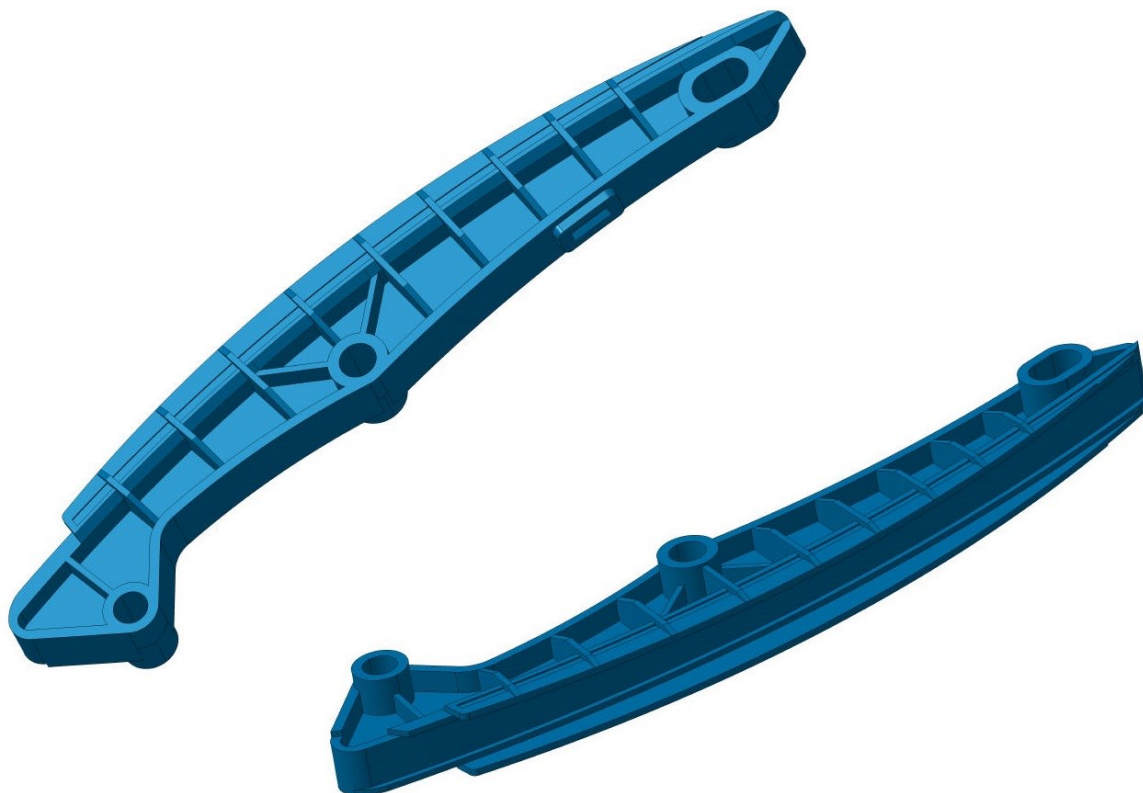
1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Provést konstrukci modelu zadané součásti.
3. Navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobiteľnost.
4. Ověřit funkčnost navrženého řešení pomocí simulace v software MoldFlow.
5. Nakreslit 2D řez vstřikovací formou s kusovníkem.

Cílem teoretické části je seznámení čtenáře s principy a základními informacemi o technologii vstřikování, vtokových systémů, možnostech temperování vstřikovacích forem a vadách vzniklých při procesu vstřikování.

Cílem praktické části je zhotovení vstřikovací formy pro zadaný výrobek (vodí lišta rozvodového řetězu). Pomocí simulací v softwaru MoldFlow je vybrán nejvhodnější typ vtokového systému. Pro modelování 2D výkresů i 3D modelu je použito prostředí programu CATIA V5R19. Normalizované díly jsou vybrány z online katalogu firmy MEUSBURGER a katalogu firmy HASCO.

7 SPECIFIKACE VÝROBKU

Vybraným vstřikovacím dílem byla vodící lišta rozvodového řetězu automobilu. Funkcí této lišty je vymezení rozsahu pohybu řemene. Vodící lišty z polymerních materiálů také snižují hlučnost rozvodů. Maximální rozměry výrobku (d x š x v): 275 x 42 x 23,4 mm. Hmotnost výrobku je 72 g.



Obr. 32 Vodící lišta rozvodového řemene – model

7.1 Materiál výrobku

Materiálem vodící lišty rozvodového řemene je polyamid PA66. Jedná se o odolný a pevný materiál vhodný pro vysoce namáhané strojní součásti (ozubená kola, elektrotechnické součástky, cívky). Díky svým samomazným vlastnostem a nízkému koeficientu tření je ideální pro kluzné či otáčivé součásti (ložiska, kluzné elementy). Odolává olejům, rozpouštědlům i tukům. Dlouhodobě je schopný odolávat teplotám v rozmezí od -40 °C do 80 °C. Pro konkrétní zadání byl zvolen polyamid PA66 UltramidA3W firmy BASF.

Tab. 1 Vlastnosti Polyamidu PA66 UltramidA3W [39]

| Vlastnosti | Norma | Hodnota | Jednotka |
|-------------------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| Fyzikální a mechanické | | | |
| Hustota | ISO 1183 | 1130 | kg/m ³ |
| Index toku taveniny | ISO 1133 | 100 | cm ³ /10min |
| Smrštění | ISO 294-4 | 1,5 – 1,8 | % |
| Modul pružnosti v tahu | ISO 527 | 3000 | MPa |
| Napětí při mezi kluzu | ISO 527 | 85 | MPa |
| Poměrné prodloužení při mezi kluzu | ISO 527 | 4,4 | MPa |
| Poměrné prodloužení při přetržení | ISO 527 | 25 | MPa |
| Nasákavost | ISO 62 | 8,5 | % |
| Zpracovatelské – vstřikování | | | |
| Rozsah teplot pro vstřikování | - | 280–300 | °C |
| Optimální teplota tání | - | 280 | °C |
| Rozsah teplot formy | - | 60-80 | °C |
| Optimální teplota formy | - | 60 | °C |
| Teplota sušení | - | 80 | °C |

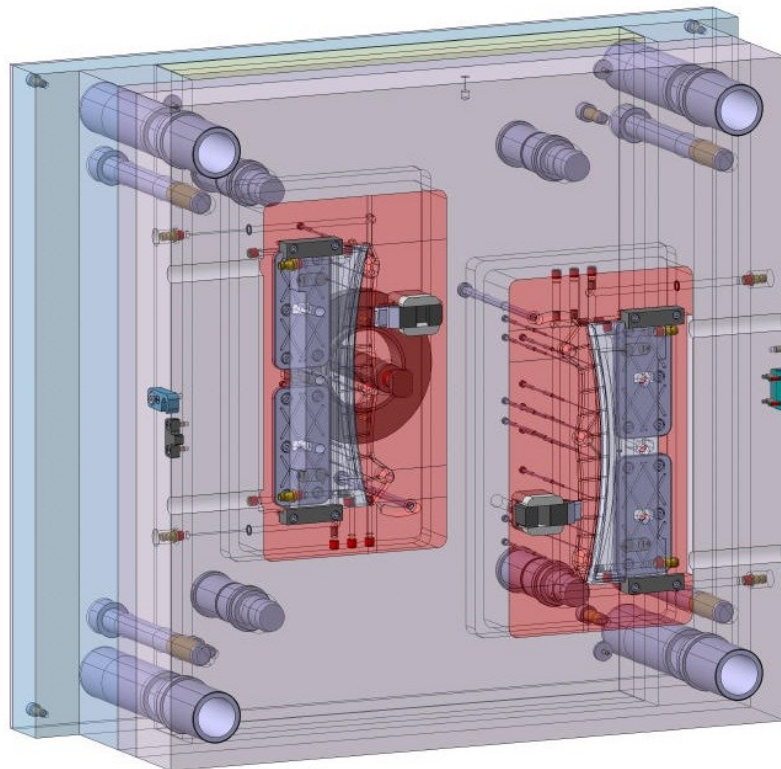
8 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

Pro konstruování vstřikovací formy bylo využito prostředí programu CATIA V5R19. Nejprve bylo nutné vymodelovat zadaný vstřikovací díl v modulu Part Design. Poté bylo možné v modulu Core & Cavity design vytvořit dělicí roviny pomocí nichž následně vznikly tvarové dutiny (tvárník, tvárnice) a obě boční odformování. V modulu Mold Tooling Design byly vygenerovány desky vstřikovací formy, do nichž byly postupně vkládány normalizované díly (vodící a středící elementy, vtokový systém, prvky temperačního systému, součásti pro manipulaci). Díky použití normalizovaných dílů došlo k usnadnění a zrychlení konstruování vstřikovací formy.

8.1 Násobnost formy

Násobnost udává počet výstřiků vyrobených za jeden vstřikovací cyklus. Čím vyšší násobnost je, tím vyšší je efektivita výroby, ale klesá přesnost. Nelze zaručit naprosto stejné vlastnosti a rozměry u dvou různých tvarových dutin.

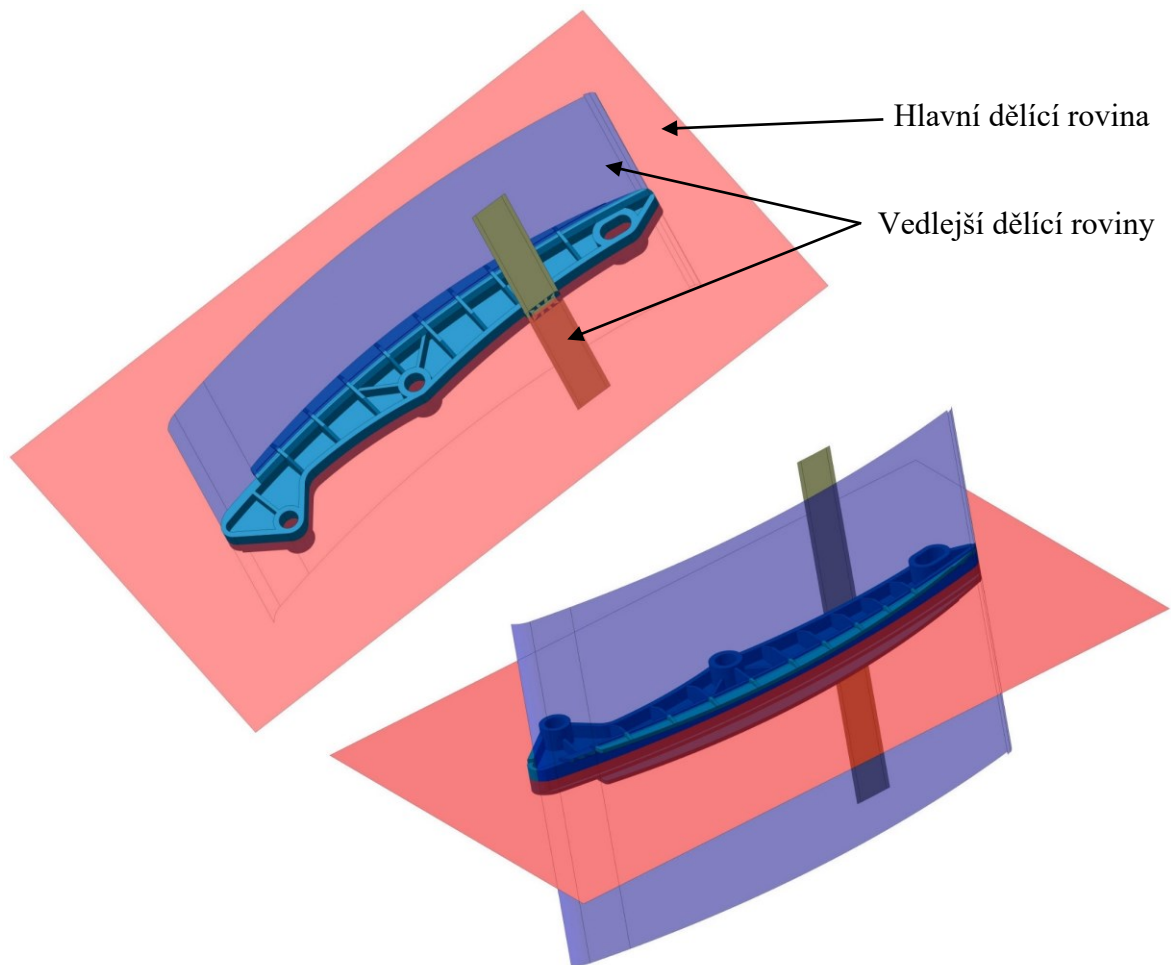
Pro zadaný díl byla zvolena násobnost dva. To znamená, že za jeden vstřikovací cyklus se vyrobí dva výstřiky.



Obr. 33 Násobnost formy

8.2 Volba dělicích rovin

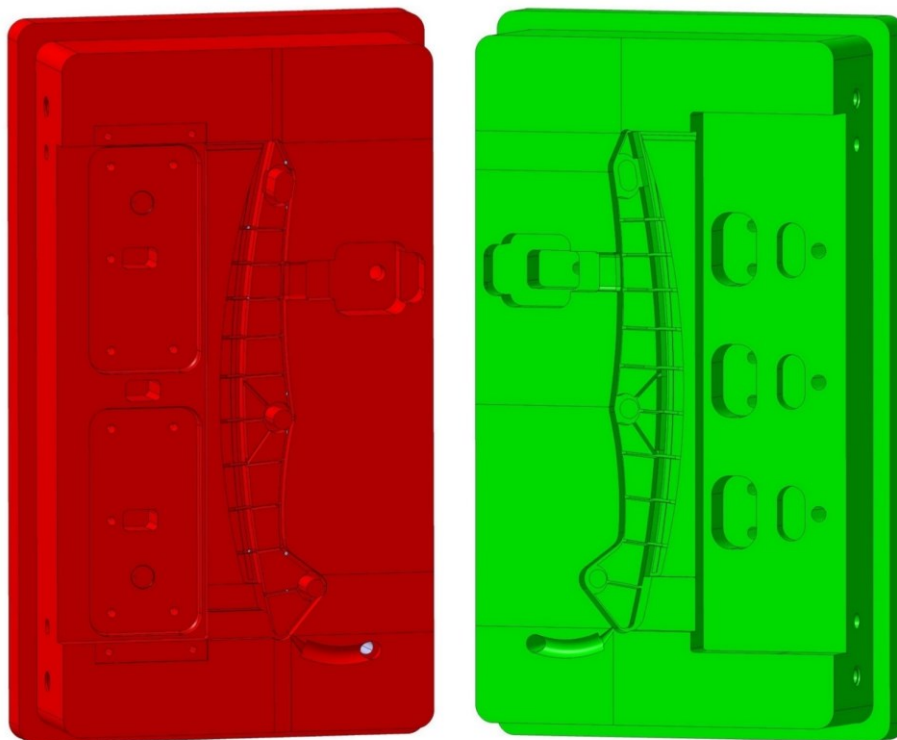
Dělicí roviny byly zvoleny s ohledem na snadné a bezpečné odformování výstřiku. Pro odformování zadaného výstřiku byla použita jedna hlavní a dvě vedlejší dělicí roviny. Hlavní dělicí rovina je kolmá vůči směru otevírání formy, zatímco obě vedlejší dělicí roviny jsou se směrem otevírání rovnoběžné.



Obr. 34 Volba dělicích rovin

8.3 Zaformování výrobku

Pro vytvoření tvárníku, tvárnice i obou bočních odformování bylo nejprve nutné model výrobku zvětšit o smrštění materiálu. To činí 1,5 % v paralelním a 1,8 % v kolmém směru. Tvárník je umístěn v levé (pohyblivé) části vstřikovací formy a skrze něj dosedají plochu tvarové dutiny čela vyhazovačů. Tvárnice je umístěna v pravé (nepohyblivé) části vstřikovací formy.

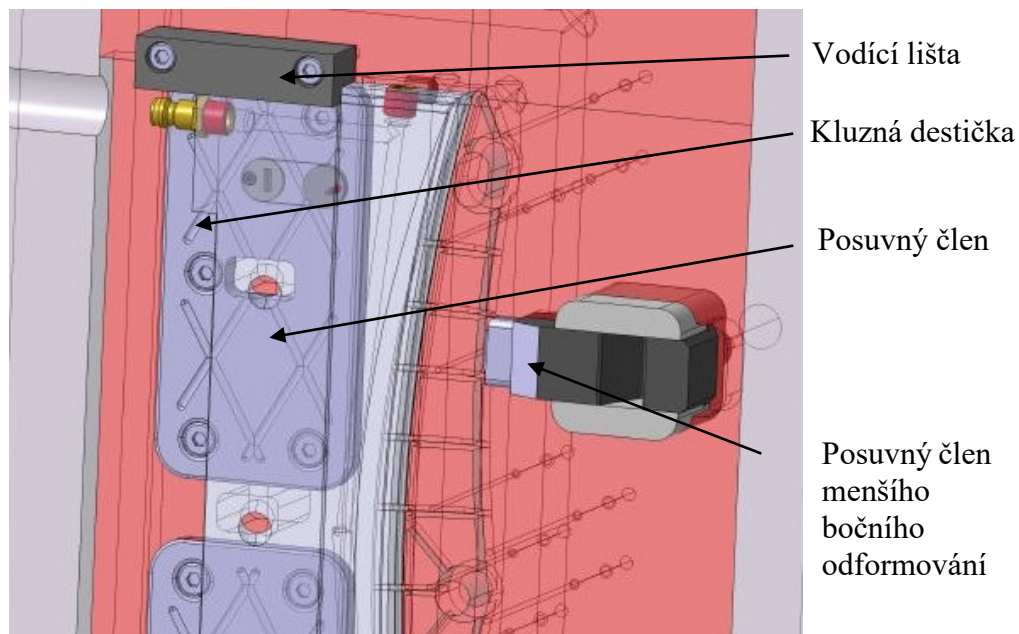


*Obr. 35 Tvarové vložky
tvárník – červeně, tvárnice – zeleně*

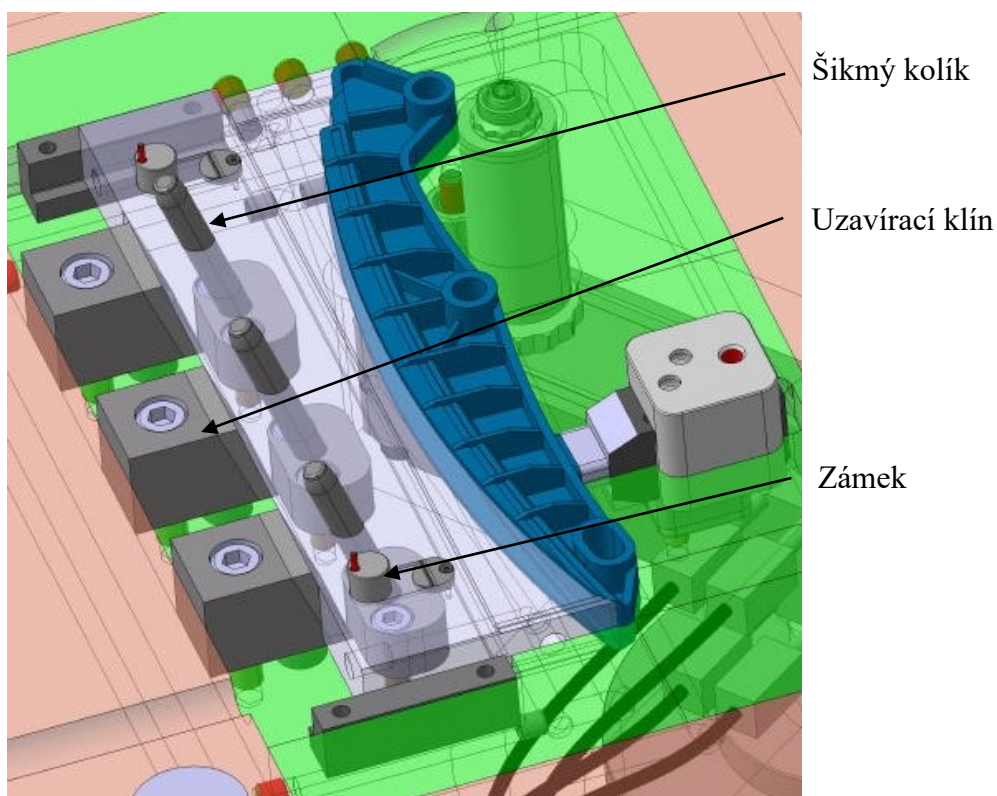
8.4 Boční odformování

Pro každý výrobek bylo potřeba zkonstruovat dvojici bočních odformování (větší, menší). Větší boční odformování je nezbytné pro výrobu pracovní části vodící lišty, která se táhne po celé délce součásti. Celý posuvný člen se pohybuje po trojici šikmých kolíků. Správná pozice při uzavření formy je zabezpečena uzavíracími klíny, na které boční odformování dosedá. Pro zajištění v krajní poloze je použit zámek. Ten znemožní zajetí bočního odformování, dokud do něj nejsou navedeny šikmé kolíky.

Menší boční odformování je realizováno pomocí kompaktní posuvné jednotky firmy Meusburger. K normalizované části se pouze připojí na míru vyrobený posuvný člen, který kopíruje konturu dutinu budoucího výrobku.



Obr. 36 Boční odformování



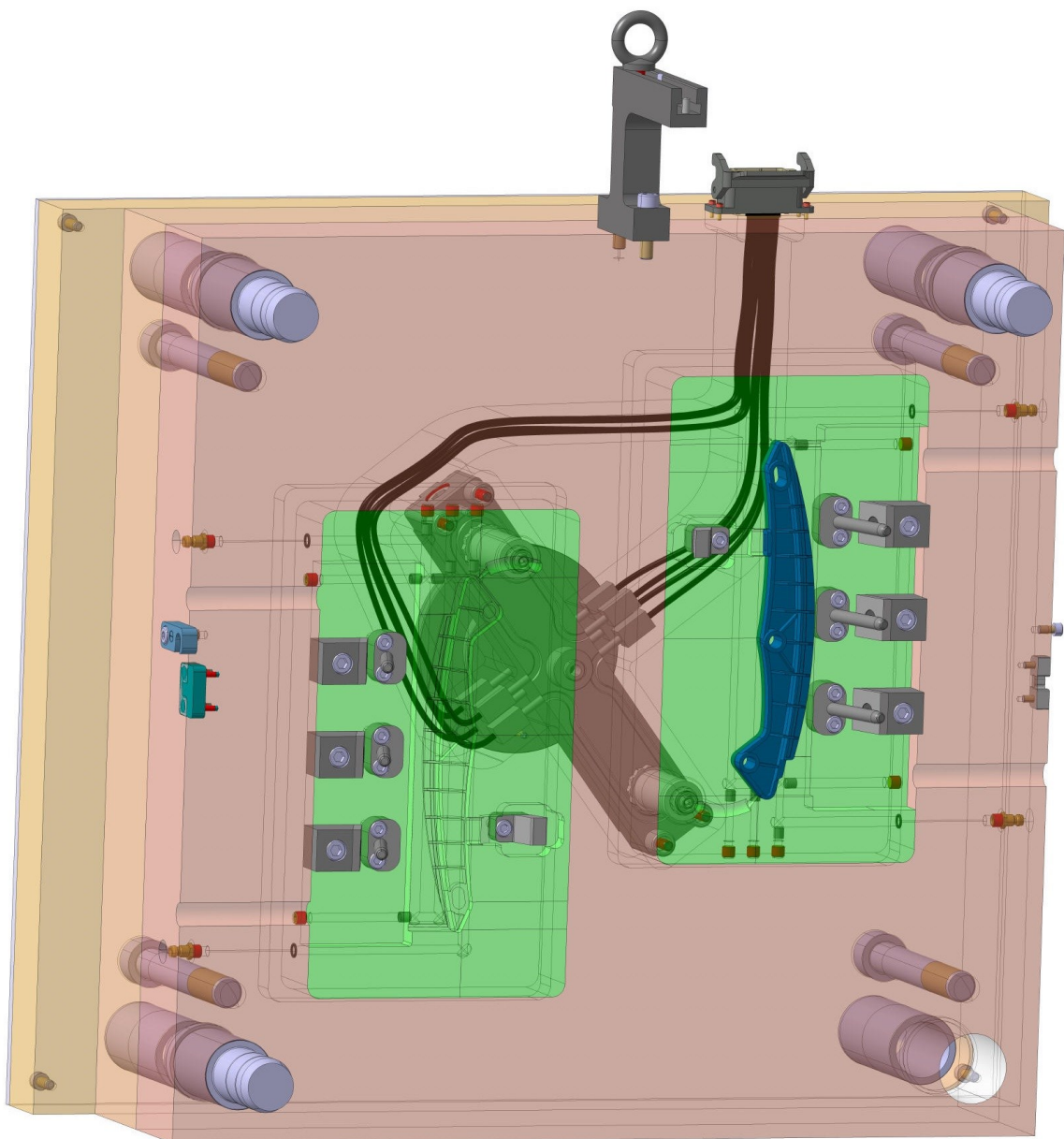
Obr. 37 Boční odformování – pohled ze strany tvárnice

8.5 Rám formy

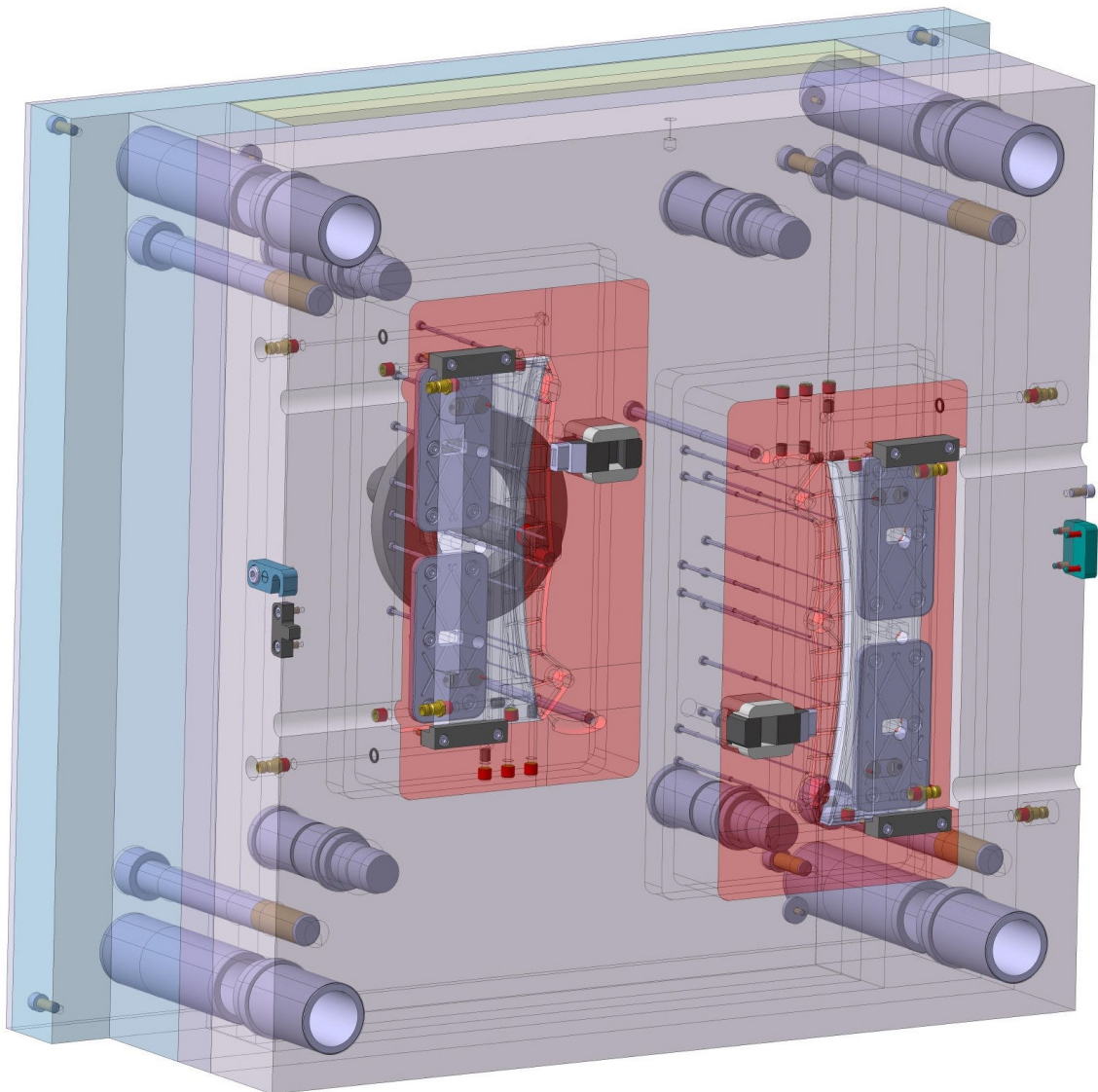
Rám formy je rozčleněn na dvě části. Na pravou (nepohyblivou) a levou (pohyblivou) část. Pravá část se skládá ze tří desek – kotevní, opěrné a upínací. Třídeskový systém je volen z důvodu použití horkého vtokového systému.

Levá část se skládá z pěti desek – kotevní, dvou rozpěrných desek, opěrné a upínací. Levá část dále obsahuje vyhazovací systém, který se sestává ze dvou desek – opěrné a kotevní.

Z venkovní strany obou upínacích desek jsou připevněny desky izolační. Ty zamezují přestupu tepla z formy do upínacích ploch vstřikovacího stroje.



Obr. 38 Pravá (nepohyblivá) část vstřikovací formy

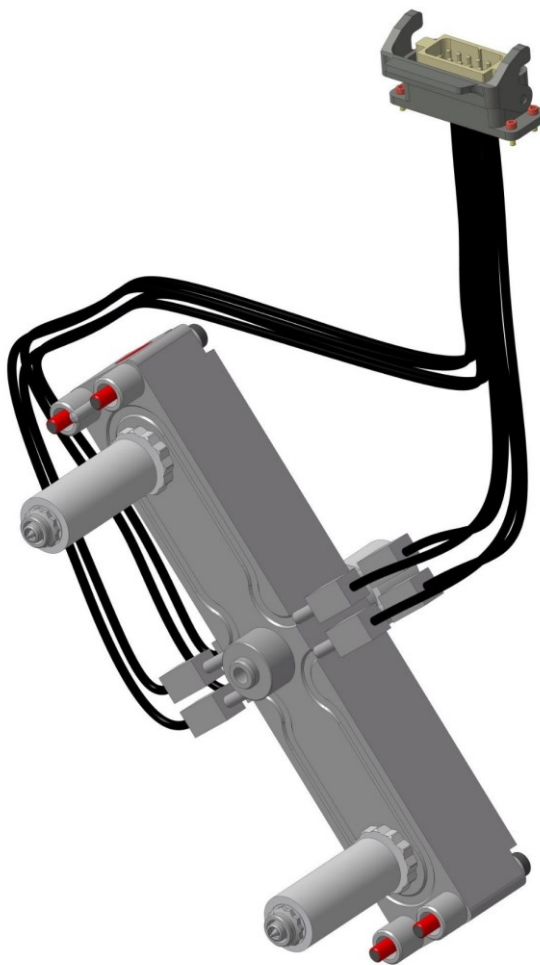


Obr. 39 Levá (pohyblivá) část vstřikovací formy

8.6 Vtokový systém

Vtokový systém byl zvolen na základě výsledků kapitoly 11. Nejlepší variantou pro zadanou koncepci vstřikovací formy i díl je vyhřívaný vtokový systém. Jelikož se však umístění vtoku nachází přímo v dělicí rovině, není možné použít čistě horký vtokový systém. Z tohoto důvodu musí být použita část studeného vtokového systému. Vyhřívaný vtokový systém je umístěn do dutiny v pravé opěrné desce, kde je zajištěn šrouby. Kabeláž z horkého těla horkého bloku je svedena do jedné zásuvky nacházející se na horní straně vstřikovací formy.

Z těla horkého bloku vystupují dvě trysky, tudíž každá tryska plní pouze jednu tvarovou dutinu. Jedná se o normalizovaný díl, který byl vybrán z katalogu firmy Meusburger.

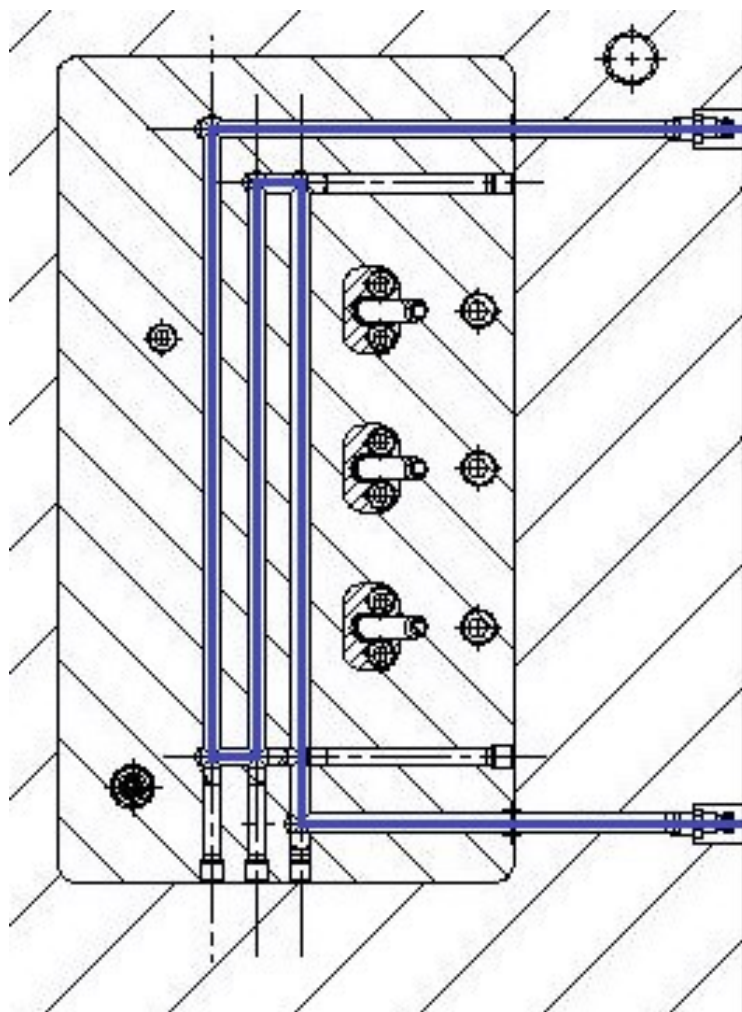


Obr. 40 Vyhříváný vtokový systém

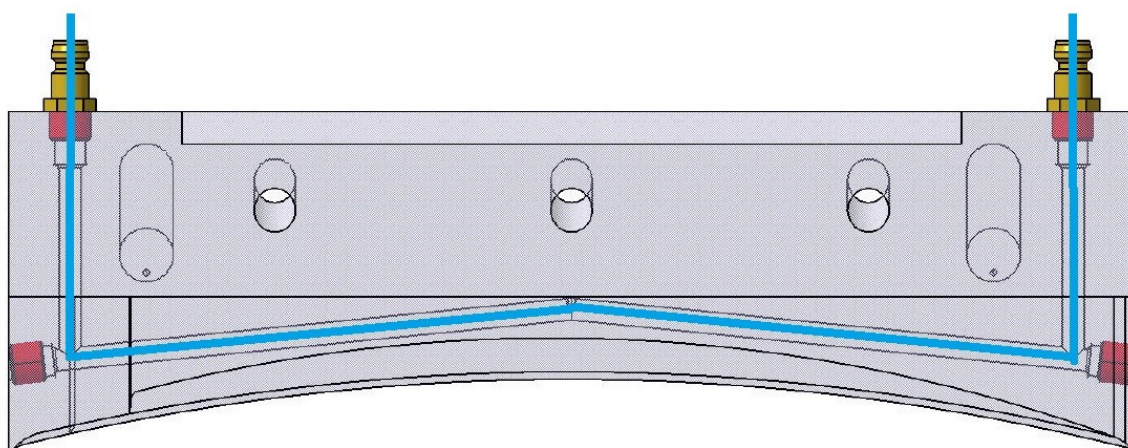
8.7 Temperační systém

Správně navržený temperační okruh zajišťuje rovnoměrné chlazení výstřiku a tím ovlivňuje jeho rozměrovou přesnost a kvalitu. Pro zadaný díl byl navržen temperační systém řešený pomocí vrtaných kanálů. Na každý výrobek připadají tři temperační okruhy, kterými je temperován tvárník, tvárnice i boční odformování (větší). Temperační okruhy ve tvárníku i tvárnici jsou symetrické dle hlavní dělicí roviny.

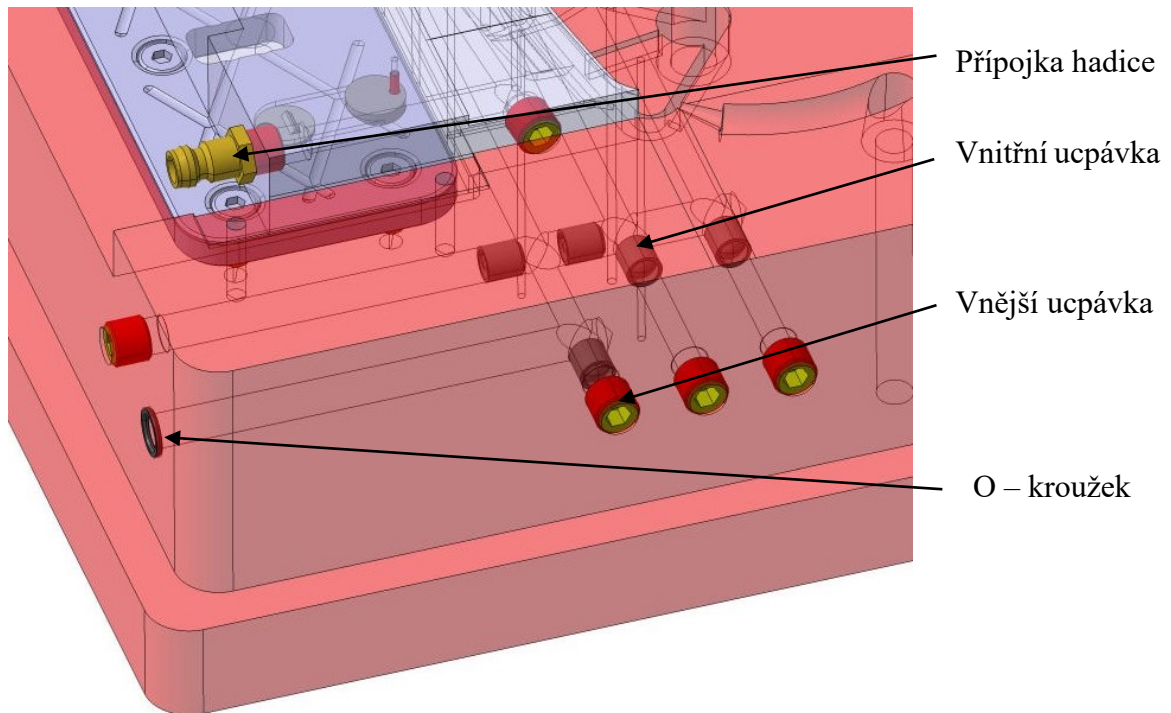
Součástí temperačního systému jsou i normalizované díly – vnitřní i vnější ucpávky, O – kroužky a přípojky hadic. Účel ucpávek je utěsnění temperačního okruhu uvnitř tvarových vložek a O – kroužky utěsňují místa přechodu mezi tvarovou vložkou a deskou formy. Všechny normalizované díly temperačního systému jsou zobrazeny na obrázku 43.



Obr. 41 Trajektorie temperačního okruhu tvárnice



Obr. 42 Trajektorie temperačního okruhu bočního odformování



Obr. 43 Normalizované součásti temperačního okruhu

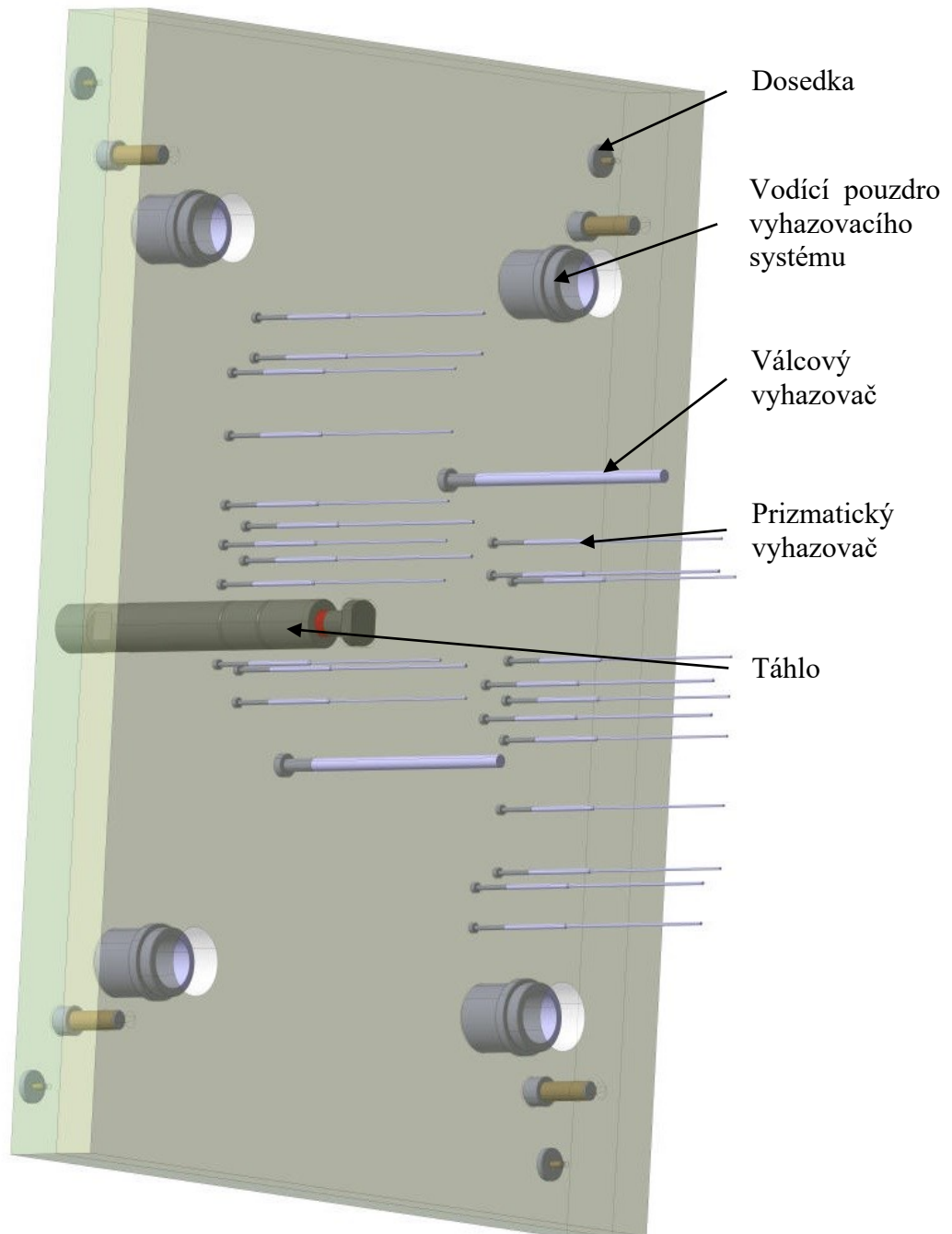
8.8 Odvzdušnění

Vzduch je při uzavření formy zachycen uvnitř a nemá kudy uniknout ven. Při vstřikování je však veškerý vzduch ve tvarové dutině nežádoucí a způsobuje vady na výrobku. U zadané koncepce formy se předpokládá, že vzduch bude z tvarové dutiny odcházet vůlí mezi vyhazovači a tvarovými vložkami. Pokud by toto řešení bylo nedostatečné, tak by musely být zkonstruovány odvzdušňovací kanálky, kterými by vzduch mohl tvarové dutiny opustit.

8.9 Vyhazovací systém

Úkolem vyhazovacího systému je bezpečné vyhození výstřiku z tvarové dutiny. Toho lze docílit rovnoměrným působením vyhazovačů na plochu výstřiku. Celý systém je umístěn na levé (pohyblivé) části formy a působí rovnoběžně se směrem otevření formy. Po vyhození výstřiku je nutné, aby se vyhazovací systém dostal opět do výchozí polohy a čela vyhazovačů kopírovala kontury tvarové dutiny. To je zajištěno dosedkami. Pohyby vyhazovacího paketu jsou ovládány táhlem, které je uchyceno do desek vyhazovacího systému. Pro středění i vedení vyhazovacího systému jsou použity vodící čepy spolu s vodícími pouzdry.

Ve formě je použito celkem 26 vyhazovačů. Ze 13 vyhazovačů působících na jeden výrobek je 12 prizmatických o průměru 1,6 mm a jeden válcový, který slouží pro vyhození přidržovače vtoku. Veškeré součásti jsou normalizované a byly vybrány z katalogu firmy Meusburger.



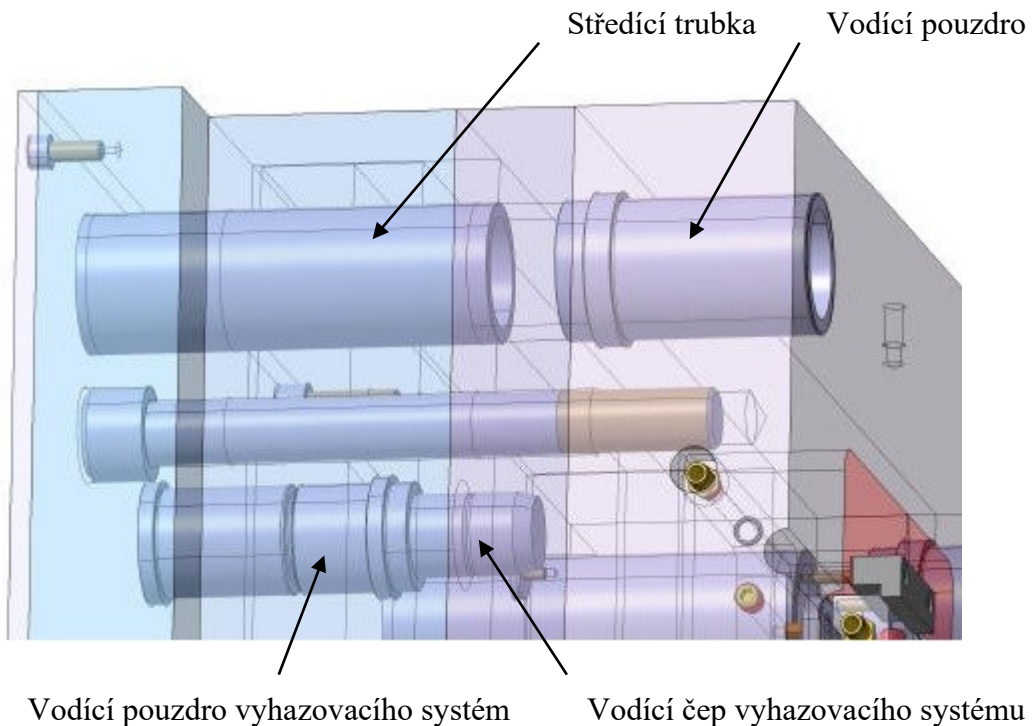
Obr. 44 Vyhazovací systém

8.10 Vodící a středící prvky

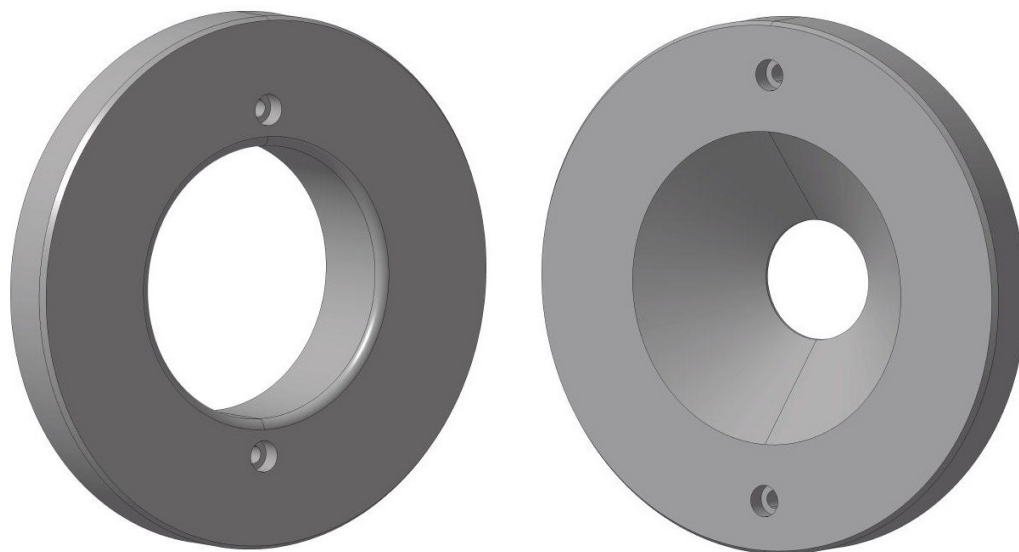
Pro bezproblémový chod vstříkovací formy je nutné zajistit vystředění desek a tím pádem jednotlivých komponentů vůči sobě. Pro středění desek jsou ve formě použity středící trubky. Ty jsou použity jak v levé (pohyblivé), tak i pravé (nepohyblivé) části vstříkovací formy. Při uzavírání je nutné navádět levou část formy do správné pozice. K tomuto účelu jsou použity vodící čepy v kombinaci s vodícími pouzdry. Pro vystředění formy vůči vstříkovacímu stroji je forma opatřena středícími kroužky (pravým a levým). Ty jsou v těsném kontaktu s otvory v upínacích deskách stroje. Veškeré součásti jsou normalizované a byly vybrány z katalogu firmy Meusburger.



Obr. 45 Vodící a středící prvky pravé části formy



Obr. 46 Vodící a středící prvky levé části formy



Obr. 47 Středící kroužky (levé části – vlevo, pravé části – vpravo)

9 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Dle požadovaných parametrů vstřikovací formy byl vybrán vhodný vstřikovací stroj. Jedná se o vstřikovací stroj firmy Arburg ALLROUNDER 720 S.

Tab. 2 Vybrané technické parametry stroje v porovnání s požadavky formy

| Parametr | Forma | Stroj | Jednotka |
|---|-----------|-----------|----------|
| Velikost mezi vodícími sloupky (délka x šířka) | 696 x 796 | 720 x 720 | mm |
| Max. uzavírací síla | 586,68 | 3200 | kN |
| Vstřikovací tlak | 355,7 | 2380 | bar |
| Maximální vstřikovací dávka | 172,71 | 507 | g |
| Průměr šneku | - | 55 | mm |
| Průměr středícího kroužku | 160 | 160 | mm |
| Minimální výška formy | 538 | 300 | mm |
| Maximální výška formy | - | 700 | mm |



Obr. 48 Vstřikovací stroj Allrounder 720 S firmy Arburg [40]

10 NASTAVENÍ MOLDFLOW ANALÝZY

Jedním ze zadaných cílů diplomové práce bylo provedení simulací pro optimalizování vstřikovacího procesu. To obnášelo vytvoření sítě modelu, vytvoření teploty, vtokového systému a jejich následné vysítování. Vtokový systém byl vymodelován ve třech typech provedení (studený, horký a kombinovaný). Poté byly zvoleny procesní parametry, jako například vstřikovací tlak, teplota taveniny, teplota formy, ale také teplota i druh temperačního média. Na základě výsledných hodnot byly simulace optimalizovány do doby, než se dosáhlo nejideálnějších výsledků. Následně došlo ke srovnání třech optimalizovaných vtokových systémů a byl vybrán ten s nejlepšími vlastnostmi pro zadanou koncepci formy.

10.1 Sít' modelu

Prvotním krokem při nastavování analýz je tvorba sítě modelu. Po importu modelu z programu CATIA je nutné vybrat typ sítě. Pro zadaný díl byla vybrána 2,5D síť – Dual domain. Povrch modelu je pokryt sítí trojúhelníkových elementů o délce strany 1,8 mm. V oblasti vtokového ústí byla síť zjemněna o 20 %.

Pro vygenerování sítě je nutná její kontrola. Ta se provádí pomocí nástroje statistiky sítě – mesh statistics. Nejdůležitější body kontroly jsou shrnuty v tabulce 3.

Tab. 3 Kvalita sítě

| Parametr | Povolená hodnota | Hodnota sítě |
|--|---------------------------------------|--------------|
| Aspect ratio (poměr stran trojúhelníku) | <15 | 15,56 |
| Free edges (volné hrany) | 0 | 0 |
| Non – manifold edges (nepropojené hrany) | 0 | 0 |
| Element not oriented (neorientované elementy) | 0 | 0 |
| Element intersections (protínající se elementy) | 0 | 0 |
| Fully overlapping elements (překrývající se elementy) | 0 | 0 |
| Match percentage (procento shody) | >50 % (minimálně) > 85 % (ideálně) | 92 % |

```
Triangles
-----
Entity counts:
  Triangles          91278
  Connected nodes   45633
  Connectivity regions 3

  Invisible triangles          756

Area:
(Mold blocks and cooling channels are
not included)
  Surface Area:          978.377 cm^2

Volume by element types:
  Triangle: 124.936 cm^3

Aspect Ratio:
  Maximum   Average   Minimum
    15.56     1.71     1.16

Edge details:
  Free edges          0
  Manifold edges     136917
  Non-manifold edges 0

Orientation details:
  Elements not oriented 0

Intersection details:
  Element intersections 0
  Fully overlapping elements 0

Match percentage:
  Match percentage     92.0%
  Reciprocal percentage 92.5%
```

Obr. 49 Kvalita sítě – mesh statistics

Na základě kontroly kvality sítě lze síť označit za vyhovující pro potřeby analýzy. Síť splňuje veškeré limity hodnotících parametrů.



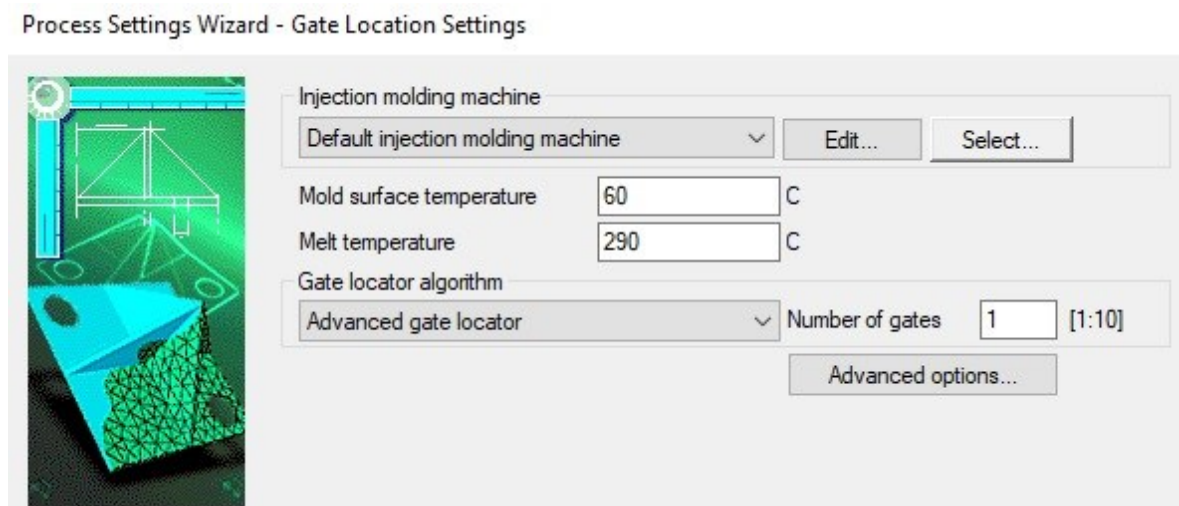
Obr. 50 Vysítovaný model

10.2 Analýza umístění vtoku (Gate location)

Tento druh analýzy pomáhá vizualizovat vhodnost umístění vtokového ústí. Výsledek je orientační, protože hodnotí výhradně plnění tvarové dutiny, ale nebere v úvahu odformování či vznik vad (studené spoje, propadliny, vzduchové kapsy). Vstupní parametry pro nastavení analýzy byly zvoleny na základě doporučení materiálového listu.

Vstupní parametry:

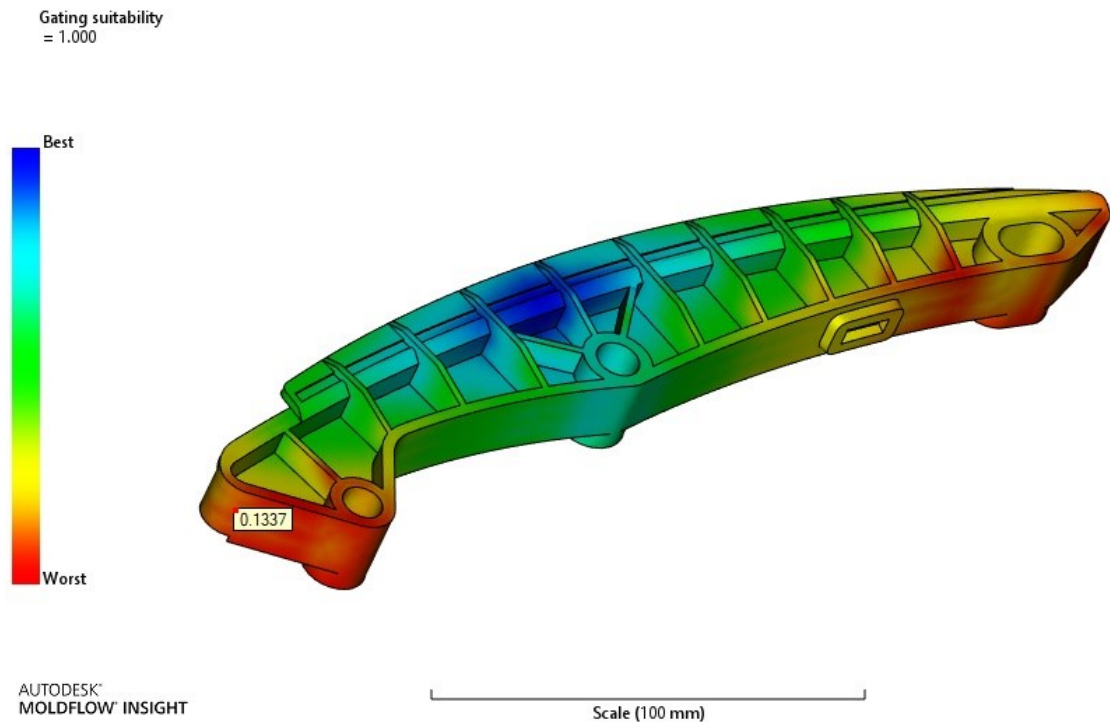
- Teplota stěny formy – 60 °C.
- Teplota taveniny – 290 °C.
- Počet vtokových ústí – 1.



Obr. 51 Procesní podmínky pro analýzu umístění vtoku

10.2.1 Výsledek analýzy umístění vtoku (Gate location)

Z výsledku analýzy je patrné, že nejlepší možností pro umístění vtokového ústí je ve střední části výrobku. To by však nebylo možné využít z důvodu dodržení snadného odformování. Dále by bylo nutné optimalizovat umístění vtokového ústí tak, aby při vstříkování nedocházelo k přeplňování protilehlých konců výrobku. Na obrázku 52 je znázorněn výsledek analýzy umístění vtoku. Místa nejvíce vhodná pro umístění vtoku jsou označena modře a nejméně vhodná červeně. Dále je zde vybráno místo, ve kterém bude umístěno budoucí vtokové ústí. Toto místo má vhodnost umístění pouze 13 %, avšak z hlediska odformování a možného vzniku vad na dílu je vyhovující.



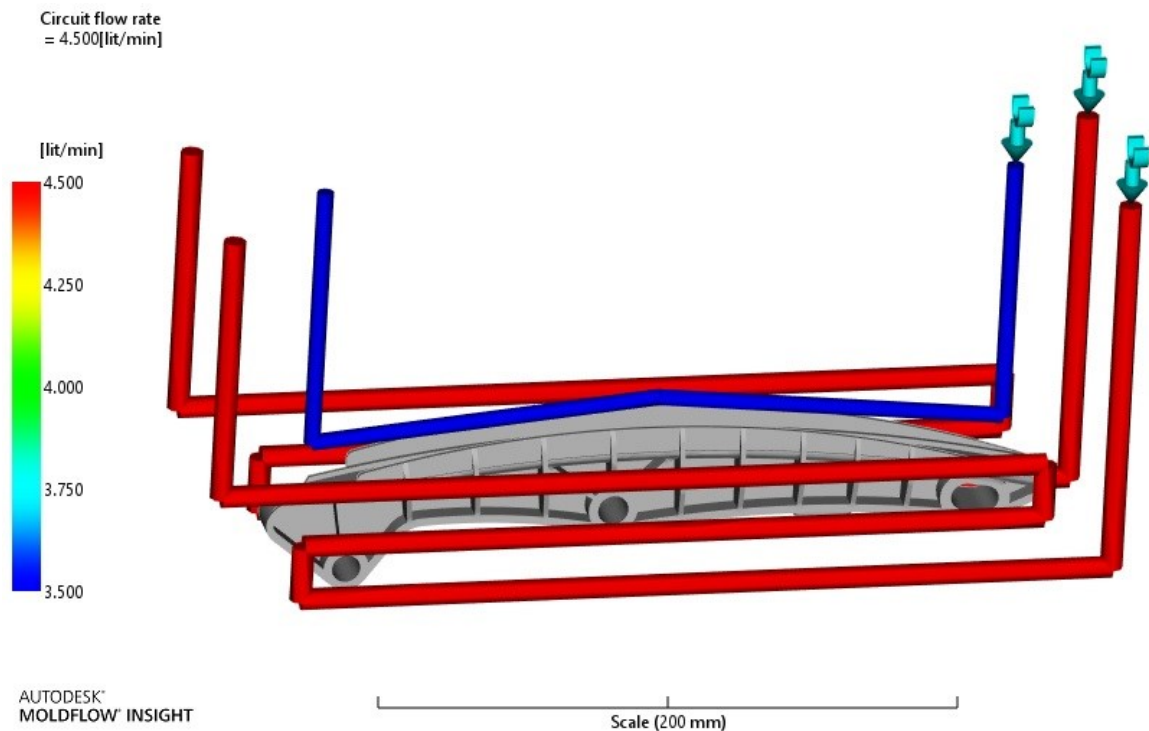
Obr. 52 Výsledek – analýza umístění vtoku (Gate location)

10.3 Nastavení teploty

Pro návrh teploty bylo nejprve nutné importovat trajektorie teplotních okruhů ve formách IGS. Čarám byl poté přiřazen typ – kanál (channel). Průměr kanálů teplotních okruhů tvárníků i tvárnice je 8 mm, pro teplotaci bočního odformování byl zvolen průměr 6 mm. Po přiřazení typu a rozměrů bylo možné teplotaci vysítovat a zkontrolovat dle parametru L/D (délka elementu/průměr elementu). Po kontrole byl okruh přesítován tak, aby se co nejvíce přiblížil ideálnímu poměru $L/D = 2,5$.

Následně mohly být zvoleny vstupy do teplotního okruhu a parametry teplotního média.

Jako teplotní médium byla vybrána směs etylenglykolu a vody v poměru 20 % /80 % o teplotě 40 °C. Teplotní okruh byl regulován dle Reynoldsova čísla. Tedy aby Reynoldsovo číslo nenabývalo nižších hodnot, než je 10 000. Tím se zabezpečilo turbulentní proudění v teplotním okruhu. Po odsimulování byl zobrazen průtok teplotního média. V okruzích tvárníku a tvárnice byl průtok 3,9 l/min a u bočního odformování 2,9 l/min. Z toho důvodu bylo u všech následujících analýz změněn typ regulace z Reynoldsova čísla na řízení průtokem. Průtok byl navýšen z 3,9 l/min na 4,5 l/min a ze 2,9 l/min na 3,5 l/min, čímž bylo došlo ke zvýšení Reynoldsova čísla (viz obrázek 53).



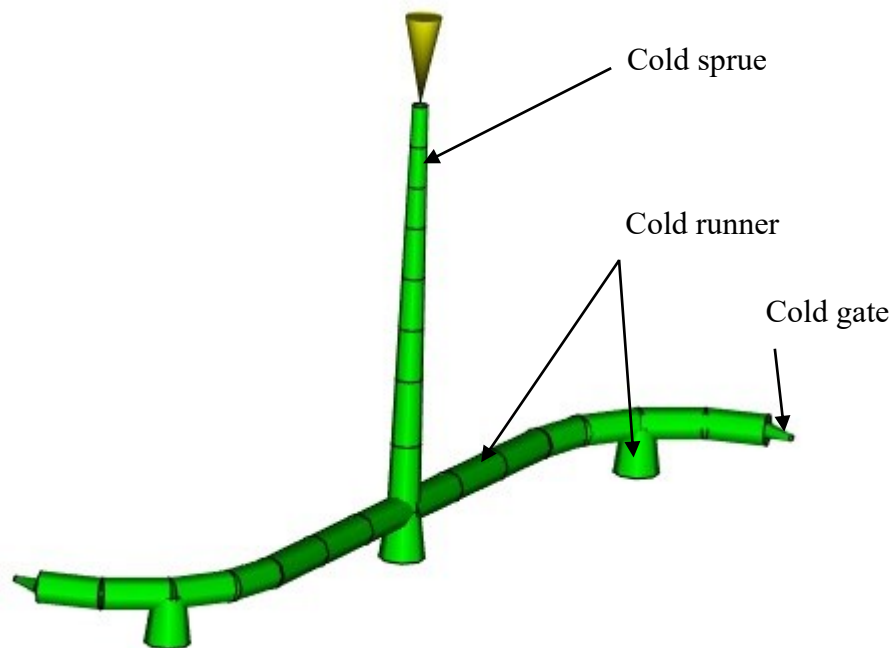
Obr. 53 Průtok temperačního média temperačními okruhy

10.4 Nastavení vtoků

Jak jsem již zmínil výše, jedním z cílů praktické části diplomové práce je srovnání tří typů vtokových systémů. Z tohoto důvodu bylo nutné navrhnout tři typy geometrií, které byly následně použity do analýz.

10.4.1 Nastavení studeného vtokového systému

Výchozím typem geometrie byl studený vtokový systém. Nejprve bylo nutné importovat trajektorii vtokového systému ve formátu IGS. Poté byly čarám přiřazeny jejich typy – studený vtokový kužel (cold sprue), studený rozvodný kanál (cold runner), studené vtokové ústí (cold gate) a rozměr. Po vysíťování byl vtokový systém kontrolován dle parametru L/D. Následně byl vtokový systém optimalizován pomocí výsledků analýzy plnění (Fill). Optimalizované rozměry elementů studeného vtokového systému jsou uvedeny v tabulce 4.



Obr. 54 Studený vtokový systém – model Moldflow

Tab. 4 Rozměry studeného vtokového systému

| Typ elementu | Tvar průřezu elementu | Rozměr elementu |
|--------------------------------------|-----------------------|--|
| Cold sprue (studený vtokový kužel) | Kružnice | $D_1 = 4,8 \text{ mm}$, $D_2 = 10 \text{ mm}$ |
| Cold runner (studený rozvodný kanál) | Kružnice | $D = 10 \text{ mm}$ |
| Cold runner (přidržovač vtoku) | Kružnice | $D_1 = 10 \text{ mm}$, $D_2 = 14 \text{ mm}$ |
| Cold gate (studené vtokové ústí) | Kružnice | $D_1 = 5 \text{ mm}$, $D_2 = 2 \text{ mm}$ |

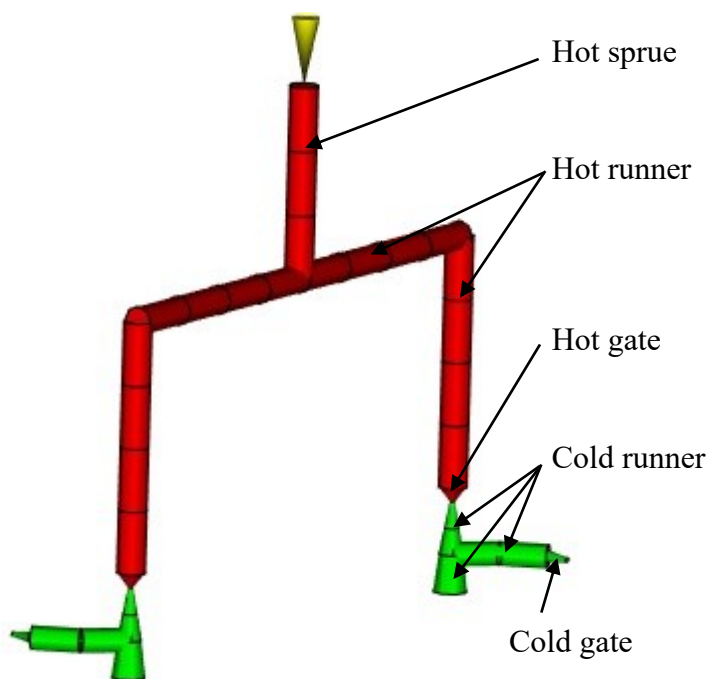
10.4.2 Nastavení vyhřívaného vtokového systému

Prvním krokem byl výběr normalizovaného vyhřívaného vtokového systému z katalogu firmy Meusburger, který odpovídá zadané návrhu vstřikovací formy.

Parametry výběru:

- Počet trysek – 2.
- Hmotnost dávky – cca 173 g.
- Rozteč trysek – 116 mm.
- Stavební výška horkého bloku – 96 mm.

Poté byla trajektorie vyhříváného vtokového systému překreslena a doplněna o přidržovače vtoku naproti ústí trysek, studené rozvodné kanály a vtokové ústí. Následně došlo k vysítování, kontrole a optimalizaci dle parametru L/D. Optimalizované rozměry elementů vyhříváného vtokového systému jsou uvedeny v tabulce 5.



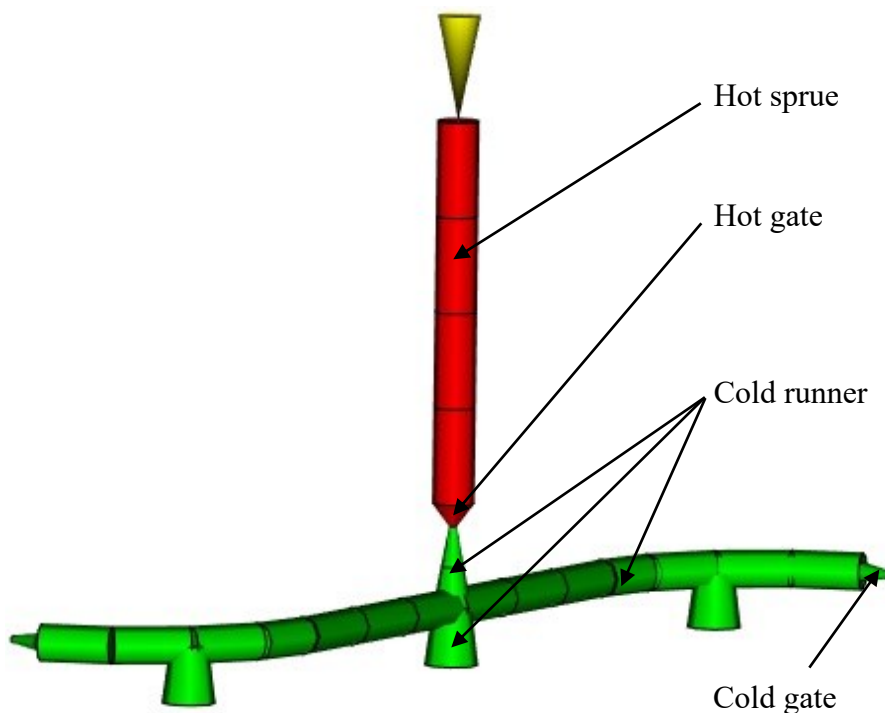
Obr. 55 Vyhříváný vtokový systém – model Moldflow

Tab. 5 Rozměry vyhříváného vtokového systému

| Typ elementu | Tvar průřezu elementu | Rozměr elementu |
|---------------------------------------|-----------------------|--|
| Hot sprue (vyhříváný vtokový kužel) | Kružnice | D = 12 mm |
| Hot runner (vyhříváný rozvodný kanál) | Kružnice | D = 12 mm |
| Hot runner (vyhříváný rozvodný kanál) | Kružnice | D = 11 mm |
| Hot gate (vyhříváné vtokové ústí) | Kružnice | D ₁ = 11 mm, D ₂ = 2 mm |
| Cold runner (studený vtokový kužel) | Kružnice | D ₁ = 2 mm, D ₂ = 10 mm |
| Cold runner (studený rozvodný kanál) | Kružnice | D = 10 mm |
| Cold runner (přidržovač vtoku) | Kružnice | D ₁ = 10 mm, D ₂ = 14 mm |
| Cold gate (studené vtokové ústí) | Kružnice | D ₁ = 5 mm, D ₂ = 2 mm |

10.4.3 Nastavení kombinovaného vtokového systému

Posledním typem vtokového systému je kombinovaný vtokový systém. Byl vybrán způsob plnění jednou horkou tryskou, z níž dále tavenina pokračuje studeným vtokovým systémem. Opět byla použita část již optimalizovaného studeného vtokového systému, k níž byla připojena trajektorie popisující horkou trysku. Po vysíťování proběhla kontrola a optimalizace dle parametru L/D. Optimalizované rozměry elementů kombinovaného vtokového systému jsou uvedeny v tabulce 6.



Obr. 56 Kombinovaný vtokový systém – model Moldflow

Tab. 6 Rozměry kombinovaného vtokového systému

| Typ elementu | Tvar průřezu elementu | Rozměr elementu |
|--------------------------------------|-----------------------|--|
| Hot sprue (vyhříváný vtokový kužel) | Kružnice | $D = 11 \text{ mm}$ |
| Hot gate (vyhříváné vtokové ústí) | Kružnice | $D_1 = 11 \text{ mm}, D_2 = 2 \text{ mm}$ |
| Cold runner (studený vtokový kužel) | Kružnice | $D_1 = 2 \text{ mm}, D_2 = 10 \text{ mm}$ |
| Cold runner (studený rozvodný kanál) | Kružnice | $D = 10 \text{ mm}$ |
| Cold runner (přidržovač vtoku) | Kružnice | $D_1 = 10 \text{ mm}, D_2 = 14 \text{ mm}$ |
| Cold gate (studené vtokové ústí) | Kružnice | $D_1 = 5 \text{ mm}, D_2 = 2 \text{ mm}$ |

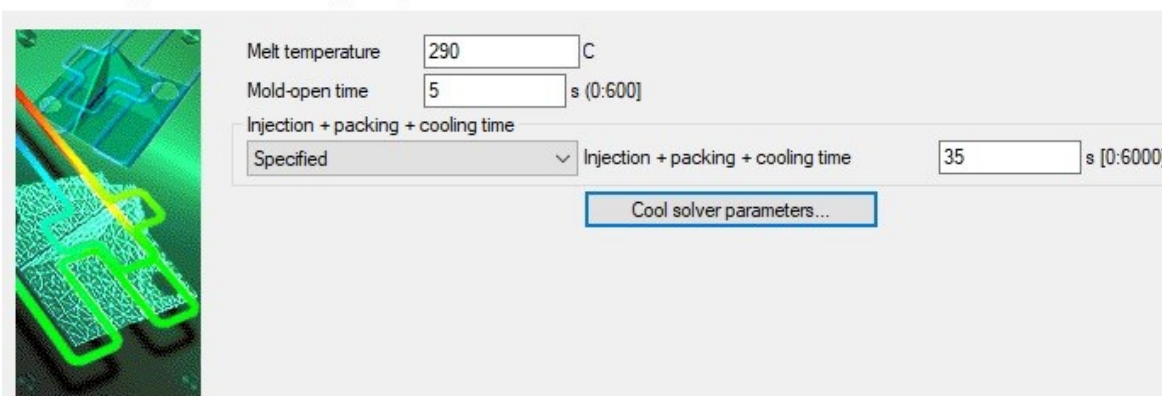
10.5 Nastavení procesních podmínek kompletní analýzy

Správné nastavení procesních podmínek hraje klíčovou roli v optimalizaci procesu vstřikování. Procesní podmínky se volí zejména na základě doporučených hodnot uvedených v materiálovém listu. Musí se však brát v úvahu také délka vstřikovacího cyklu a s tím spojená doba pro dostatečné ochlazení výstřiku nebo maximální hodnoty stroje (vstřikovací tlak, uzavírací síla).

10.5.1 Nastavení chlazení (Cool settings)

V tomto dialogovém je nejprve nutné nastavit teplotu taveniny. Teplota byla zvolena 290 °C, což spadá do doporučeného rozmezí daného výrobce (280 °C – 300 °C). Doba otevření formy byla ponechána na přednastavené hodnotě – 5s. Celková doba vstřikovacího cyklu byla manuálně přenastavena na 35 s, a to na základě předchozích výsledků simulací. Materiálu je díky tomu ponechána větší doba na dostatečné ochlazení.

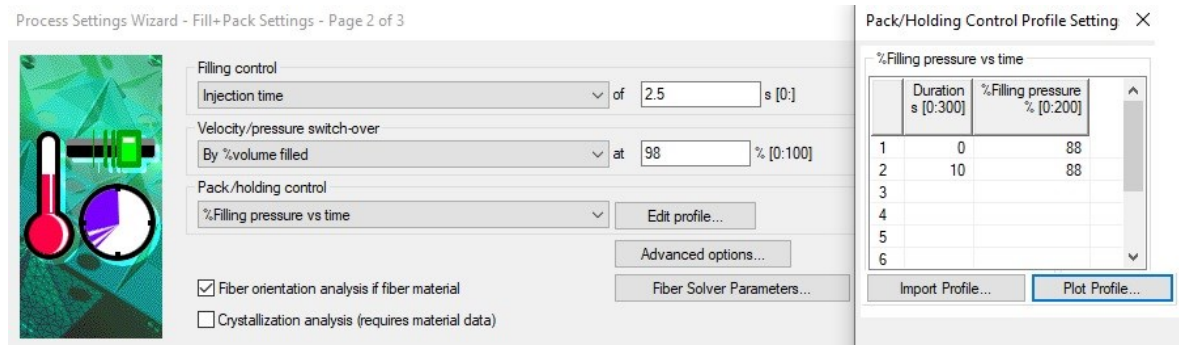
Process Settings Wizard - Cool Settings - Page 1 of 3



Obr. 57 Nastavení procesních podmínek chlazení

10.5.2 Nastavení plnění a dotlaku (Fill + Pack settings)

V následujícím dialogovém okně byl zvolen jako typ kontroly plnění vybrána doba vstřiku. Program proto bude optimalizovat ostatní parametry tak, aby se doba vstřiku blížila zadaným 2,5 s. K přepnutí na dotlak dojde při zaplnění tvarové dutiny z 98 %. Dále byl pozměněn tlakový profil dotlaku a délka dotlakové fáze. Velikost dotlaku byla nastavena na hodnotu 88 % vstřikovacího tlaku, po celou dobu působení – 10 s.



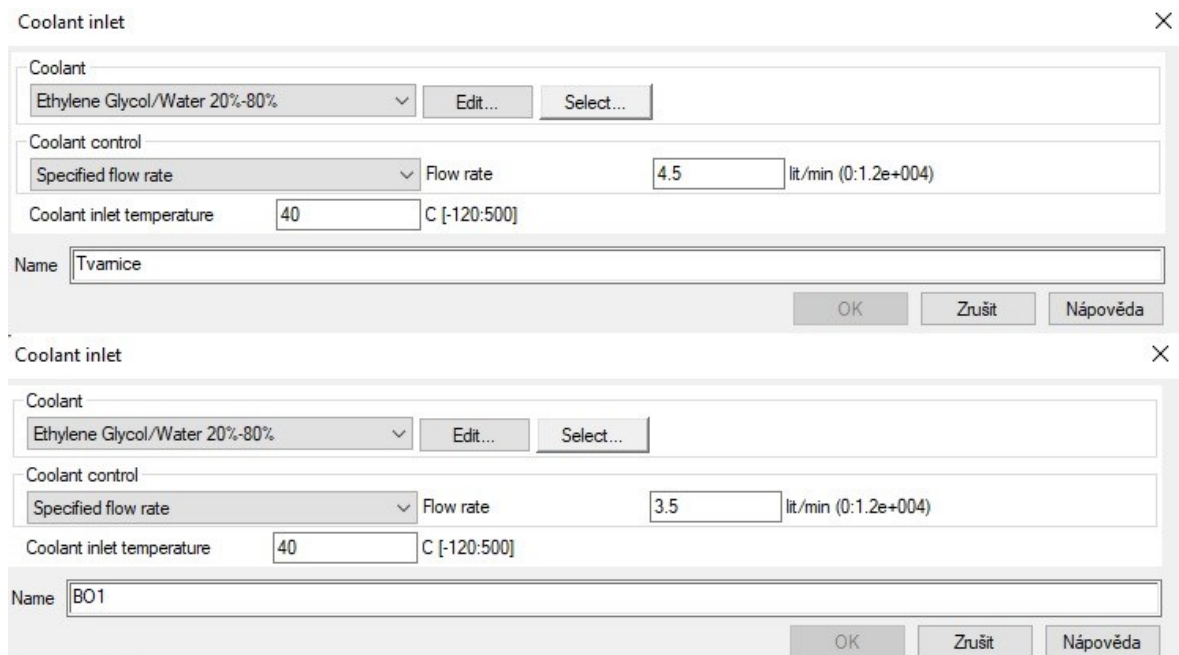
Obr. 58 Nastavení procesních podmínek plnění a dotlaku

10.5.3 Nastavení deformací (Warp settings)

V posledním dialogovém okně procesních podmínek lze pouze zaškrtnout s jakými typy deformací má software počítat. Bylo zaškrtnuto, aby software pro analýzu uvažoval s teplotní roztažností, izoloval příčné deformace a zohlednil vznik rohových efektů.

10.5.4 Nastavení temperačních okruhů

Konečným krokem pro konfiguraci analýzy bylo nastavení temperačních okruhů. Byly použity stejné hodnoty jako v kapitole 10.3 (nastavení teploty). V horní části obrázku 59 je znázorněno nastavení temperačních okruhů pro tvárník i tvárnici. Ve spodní části obrázku 59 se nachází nastavení okruhu pro temperaci bočního odformování.



Obr. 59 Nastavení temperačních okruhů.

11 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VTOKOVÝCH SYSTÉMŮ

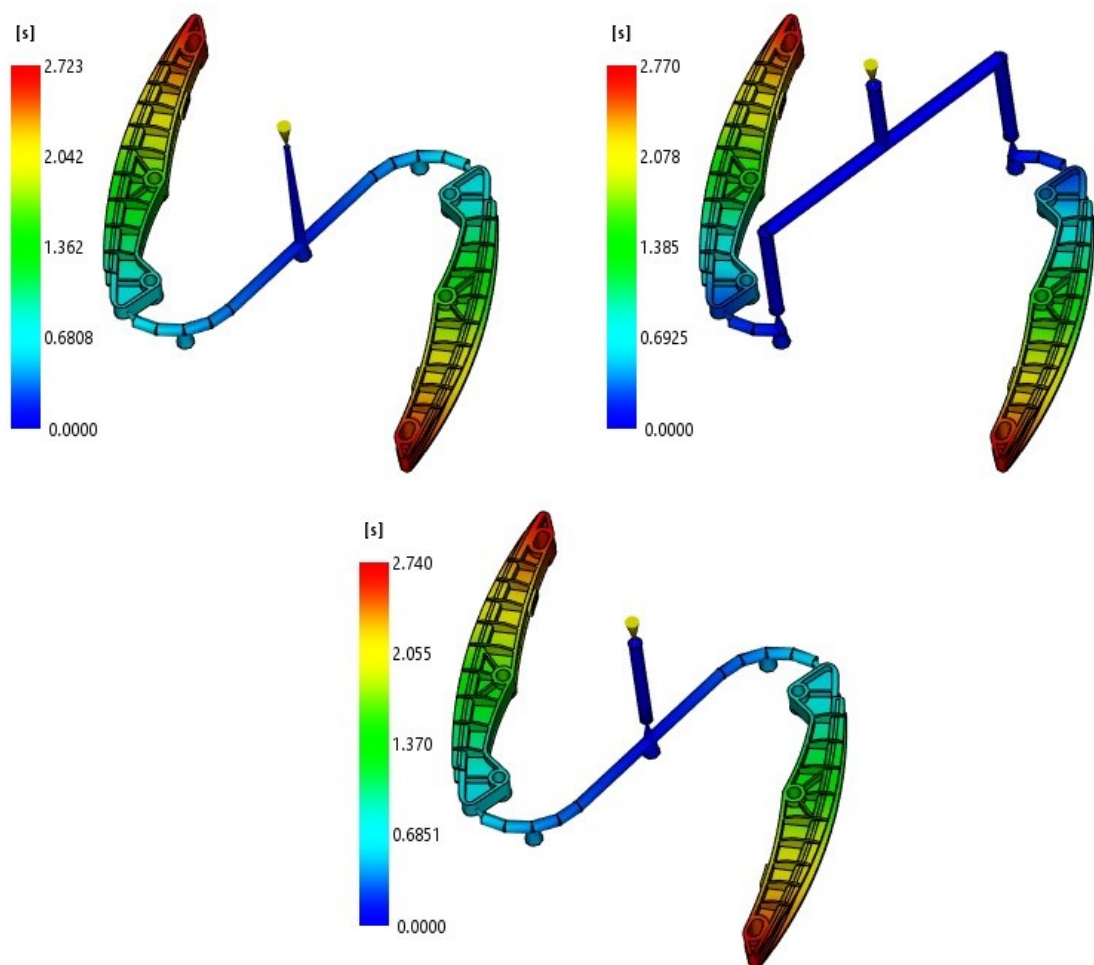
V následující kapitolách jsou porovnány výsledky analýz všech tří typů vtokových systémů (studený, vyhříváný a kombinovaný) dle vybraných parametrů.

11.1 Výsledky plnění a dotlaku

V těchto podkapitolách jsou hodnoceny výsledky charakteristické pro fáze plnění a dotlaku.

11.1.1 Čas plnění (Fill time)

Jedná se o jeden z nejdůležitějších výsledků. Popisuje dobu, za kterou dojde k úplnému naplnění tvarové dutiny. Z výsledku lze také zjistit, jestli dojde k dokonalému zatečení polymeru anebo ve tvarové dutiny zůstanou nedostříknutá místa.



Obr. 60 Čas plnění

*Vlevo nahoře – studený vtokový systém, vpravo nahoře vyhříváný vtokový systém,
ve spodní části – kombinovaný vtokový systém*

Červená místa, která jsou nejvíce vzdálena od vtokového ústí, jsou zaplněna až jako poslední. Naopak modrá místa jsou zaplněna nejdříve. Ani u jednoho typu vtokového systému nevznikne nedostříknutý výrobek. Na základě hodnot shrnutých v tabulce 7 lze konstatovat, že u všech tří vtokových systémů dojde k zaplnění tvarové dutiny v téměř stejnou dobu. Čas plnění je nejvíce ovlivňován viskozitou polymeru, vstřikovacím tlakem nebo průměrem vtokového systému.

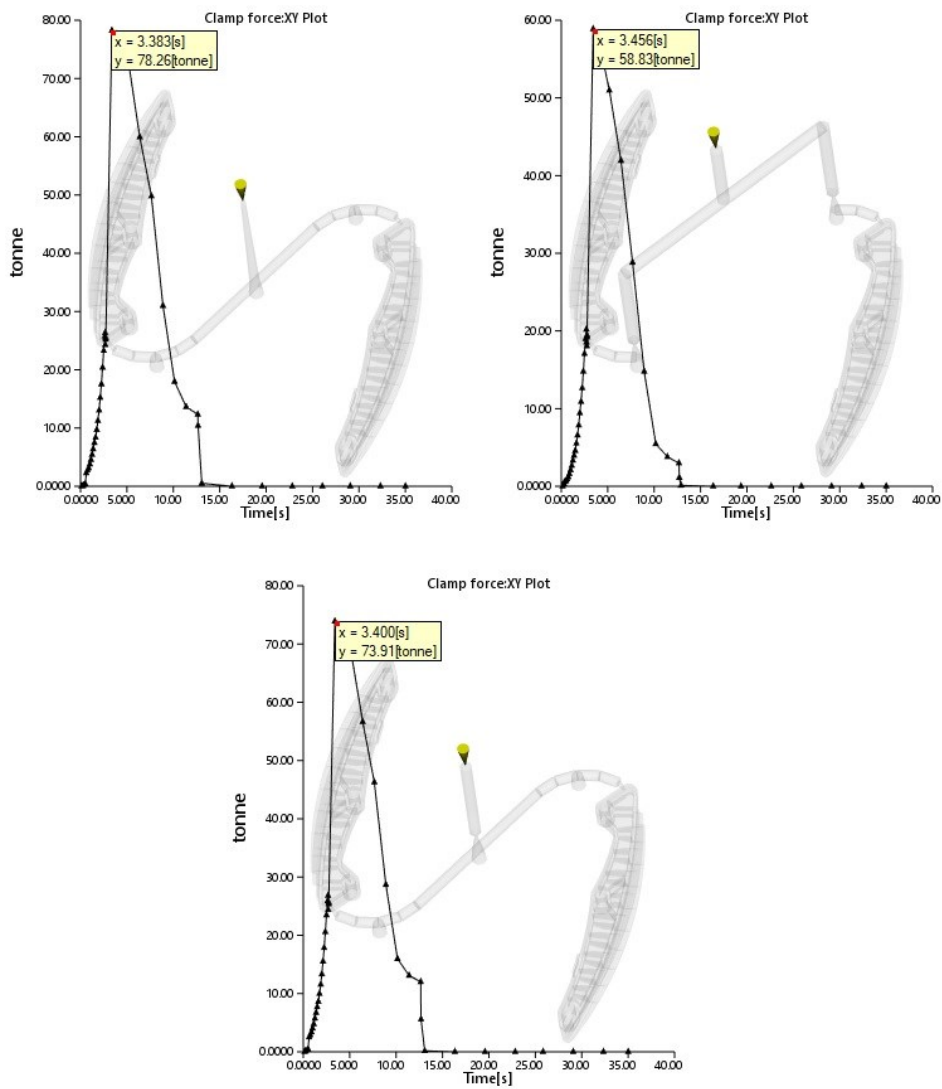
Tab. 7 Srovnání vtokových systémů dle času plnění

| Typ vtokového systému | Maximální hodnota |
|-----------------------|-------------------|
| Studený | 2,723 s |
| Vyhřívaný | 2,770 s |
| Kombinovaný | 2,740 s |

11.1.2 Uzavírací síla (Clamping force)

Jelikož databáze programu Moldflow neobsahuje vstřikovací stroje větší, než je Arburg Allrounder 630 S (vybraný vstřikovací stroj – Arburg Allrounder 720 S), tak bylo nutné ponechat přednastavený vstřikovací stroj. Z tohoto důvodu je výsledek uzavírací síly obzvláště důležitý. Díky němu lze přezkoumat, zda není při vstřikování potřeba vyvinout větší uzavírací síla, než jakou disponuje vybraný vstřikovací stroj.

Ze srovnání hodnot uvedených v tabulce 8 je patrné, že při použití vyhřívaného vtokového systému je zapotřebí nižší uzavírací síly. Na základě hodnot uvedených v kapitole 9 je vstřikovací stroj schopný vyvinout uzavírací sílu až 3200 kN což odpovídá 359.694 tunám. Tudíž ani u jednoho typu vtokového systému nedojde k překročení maximální dovolené hodnoty uzavírací síly vstřikovacího stroje.



Obr. 61 Uzavírací síla

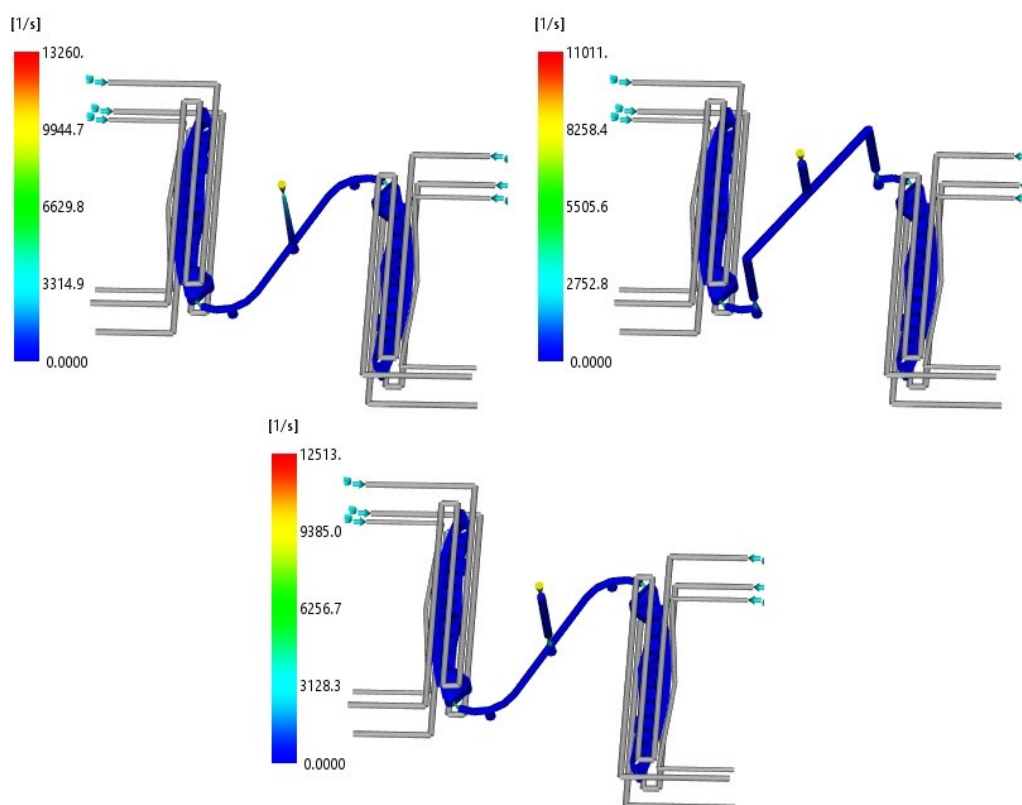
Vlevo nahoře – studený vtokový systém, vpravo nahoře vyhřívaný vtokový systém,
ve spodní části – kombinovaný vtokový systém

Tab. 8 Srovnání vtokových systémů dle uzavírací síly

| Typ vtokového systému | Maximální hodnota |
|-----------------------|-------------------|
| Studený | 78,26 tun |
| Vyhřívaný | 58,83 tun |
| Kombinovaný | 73,91 tun |

11.1.3 Rychlost smykové deformace a smykové napětí na stěně (Shear rate, Shear stress at wall)

Výsledky jsou spojeny do jedné podkapitoly, jelikož se oba vážou k materiálovým požadavkům zadaným výrobcem. Výrobce v materiálovém listu výrobku stanovuje mez, která nesmí být při procesu vstřikování překročena, aby nedošlo k degradaci materiálu a tím ke znehodnocení výstřiku. Veličiny jsou svázány s viskozitou polymeru, průměrem vtokového ústí, popřípadě rychlostí vstřikování. Maximální dovolená hodnota rychlosti smykové deformace – 60000 1/s a smykového napětí na stěně – 0,5 MPa.

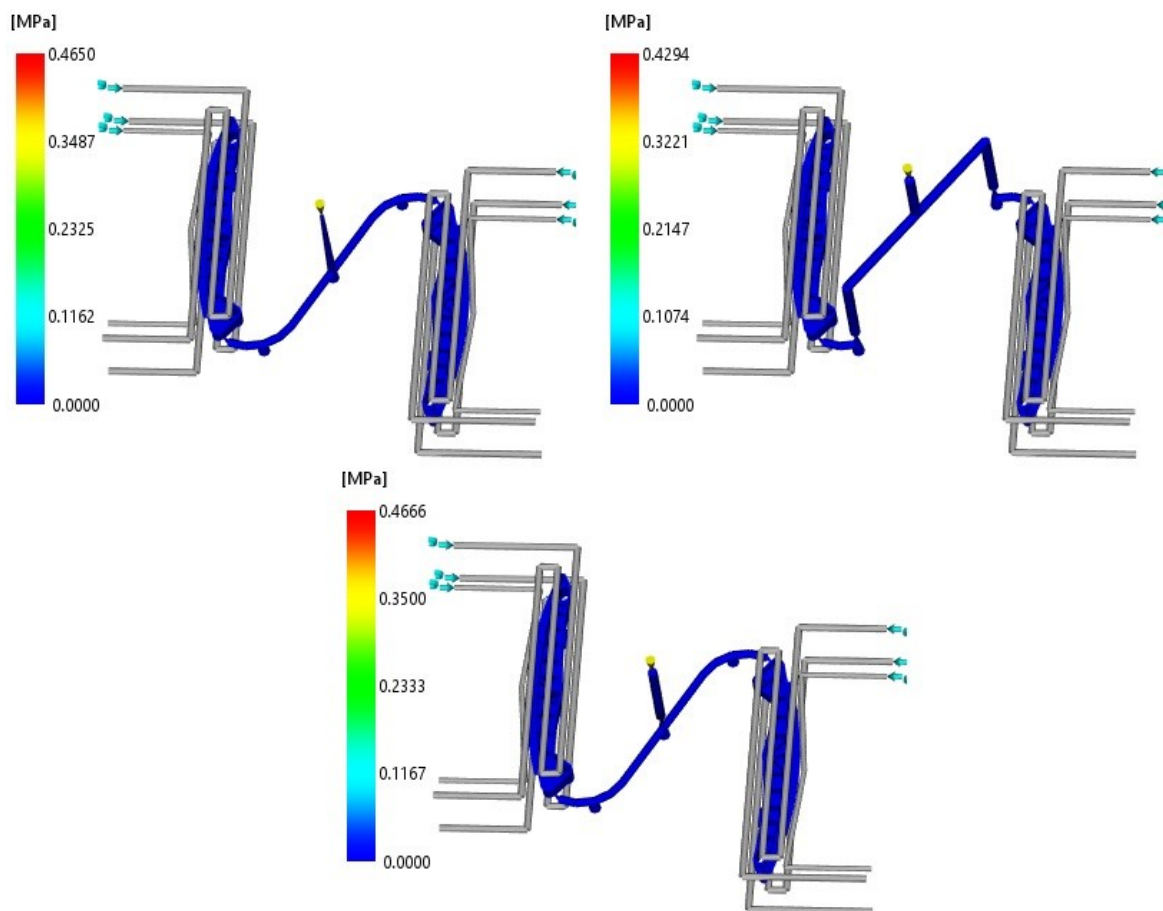


Obr. 62 Rychlost smykové deformace

Vlevo nahoře – studený vtokový systém, vpravo nahoře vyhříváný vtokový systém,
ve spodní části – kombinovaný vtokový systém

Tab. 9 Srovnání vtokových systémů dle rychlosti smykové deformace

| Typ vtokového systému | Maximální hodnota |
|-----------------------|-------------------|
| Studený | 13260 1/s |
| Vyhříváný | 11011 1/s |
| Kombinovaný | 12513 1/s |



Obr. 63 Smykové napětí na stěně

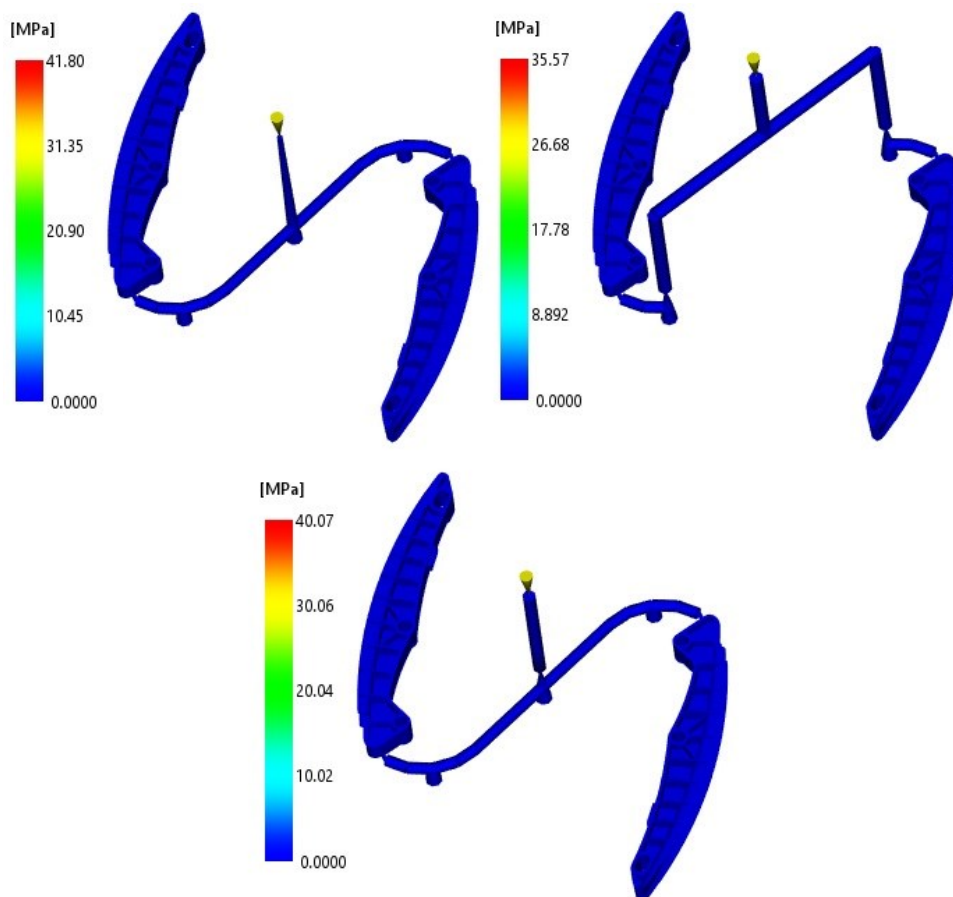
Vlevo nahoře – studený vtokový systém, vpravo nahoře vyhřívaný vtokový systém,
ve spodní části – kombinovaný vtokový systém

Tab. 10 Srovnání vtokových systémů dle smykového napětí na stěně

| Typ vtokového systému | Maximální hodnota |
|-----------------------|-------------------|
| Studený | 0,4650 MPa |
| Vyhřívaný | 0,4294 MPa |
| Kombinovaný | 0,4666 MPa |

11.1.4 Vstřikovací tlak (Pressure)

Na základě výsledku vstřikovacího tlaku lze říct, jak moc bude namáhána tvarová dutina vstřikovací formy i samotný výstřik. Velikost vstřikovacího tlaku lze ovlivnit opět viskozitou polymeru, rychlostí vstřikování, délkou vstřikování nebo průměrem vtokového ústí. Z hlediska výstřiku je tedy ideální, aby ve tvarové dutině vznikl co nejmenší možný tlak. Na obrázku 64 je znázorněna hodnota vstřikovacího tlaku v čase 35 s.



Obr. 64 Vstřikovací tlak

Vlevo nahoře – studený vtokový systém, vpravo nahoře vyhřívaný vtokový systém,
ve spodní části – kombinovaný vtokový systém

Tab. 11 Srovnání vtokových systémů dle vstřikovacího tlaku

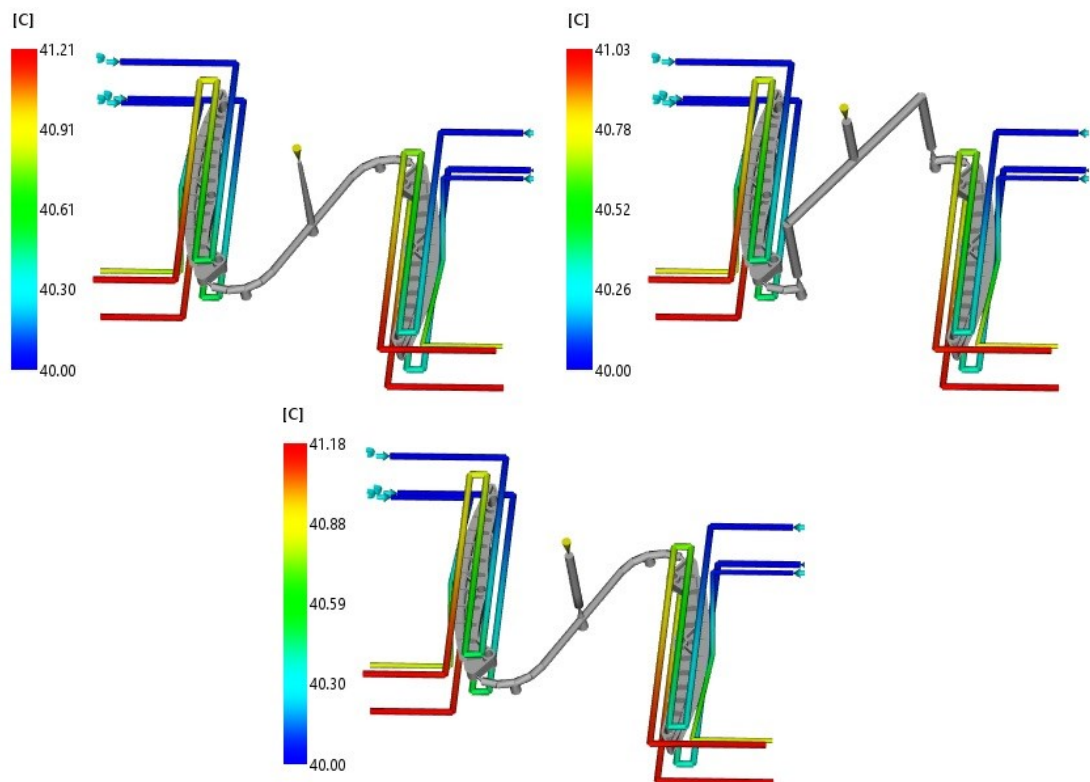
| Typ vtokového systému | Maximální hodnota |
|-----------------------|-------------------|
| Studený | 41,80 MPa |
| Vyhřívaný | 35,57 MPa |
| Kombinovaný | 40,07 MPa |

11.2 Výsledky chlazení

Jelikož je pro všechny tři typy vtokových systémů zvolena stejná teplota, tak jsou výsledky chlazení prakticky totožné.

11.2.1 Teplota temperačního média

Z výsledku analýzy je patrné, že nejméně je médium ohříváno při použití vyhřívaného vtokového systému. Rozdíl mezi maximálními teplotami všech třech druhů vtokových systémů je v řádu desetin °C, proto jej lze označit za zanedbatelný.



Obr. 65 Teplota temperačního média

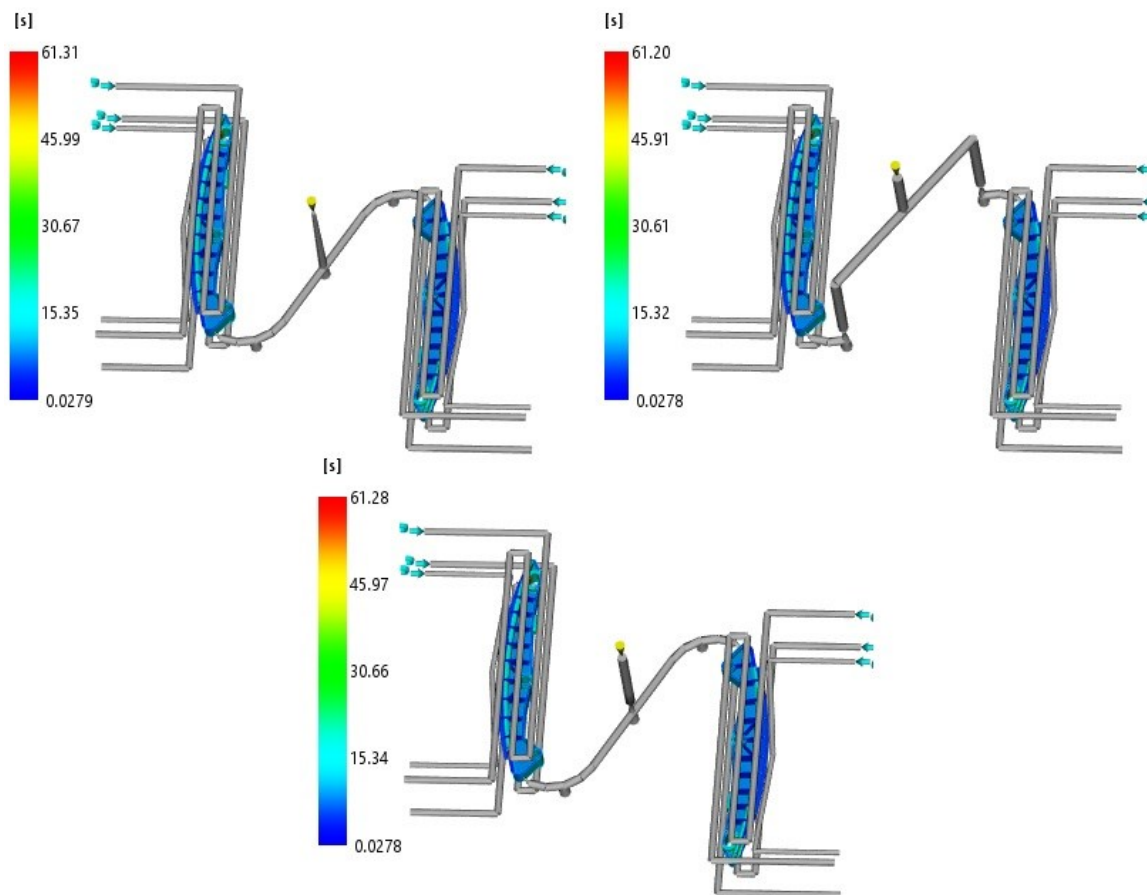
Vlevo nahoře – studený vtokový systém, vpravo nahoře vyhřívaný vtokový systém,
ve spodní části – kombinovaný vtokový systém

Tab. 12 Srovnání vtokových systémů dle teploty temperačního média

| Typ vtokového systému | Maximální hodnota |
|-----------------------|-------------------|
| Studený | 41,21 °C |
| Vyhřívaný | 41,03 °C |
| Kombinovaný | 41,18 °C |

11.2.2 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty

Jedná se o nejdelší úsek vstřikovacího cyklu. Hodnota vyhazovací teploty je udávána výrobcem materiálu. Výsledek znázorňuje čas, při kterém dojde k ochlazení celého objemu výstřiku na vyhazovací teplotu. To však v praxi není možné, jelikož je to neekonomické a značně to prodlužuje celkový čas cyklu. Pro zefektivnění je vhodné, aby byly ochlazeny na vyhazovací teplotu alespoň místa výstřiku, na které dosedají vyhazovače.



Obr. 66 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty

Vlevo nahoře – studený vtokový systém, vpravo nahoře vyhříváný vtokový systém,
ve spodní části – kombinovaný vtokový systém

Tab. 13 Srovnání vtokových systémů dle času potřebného k dosažení vyhazovací teploty

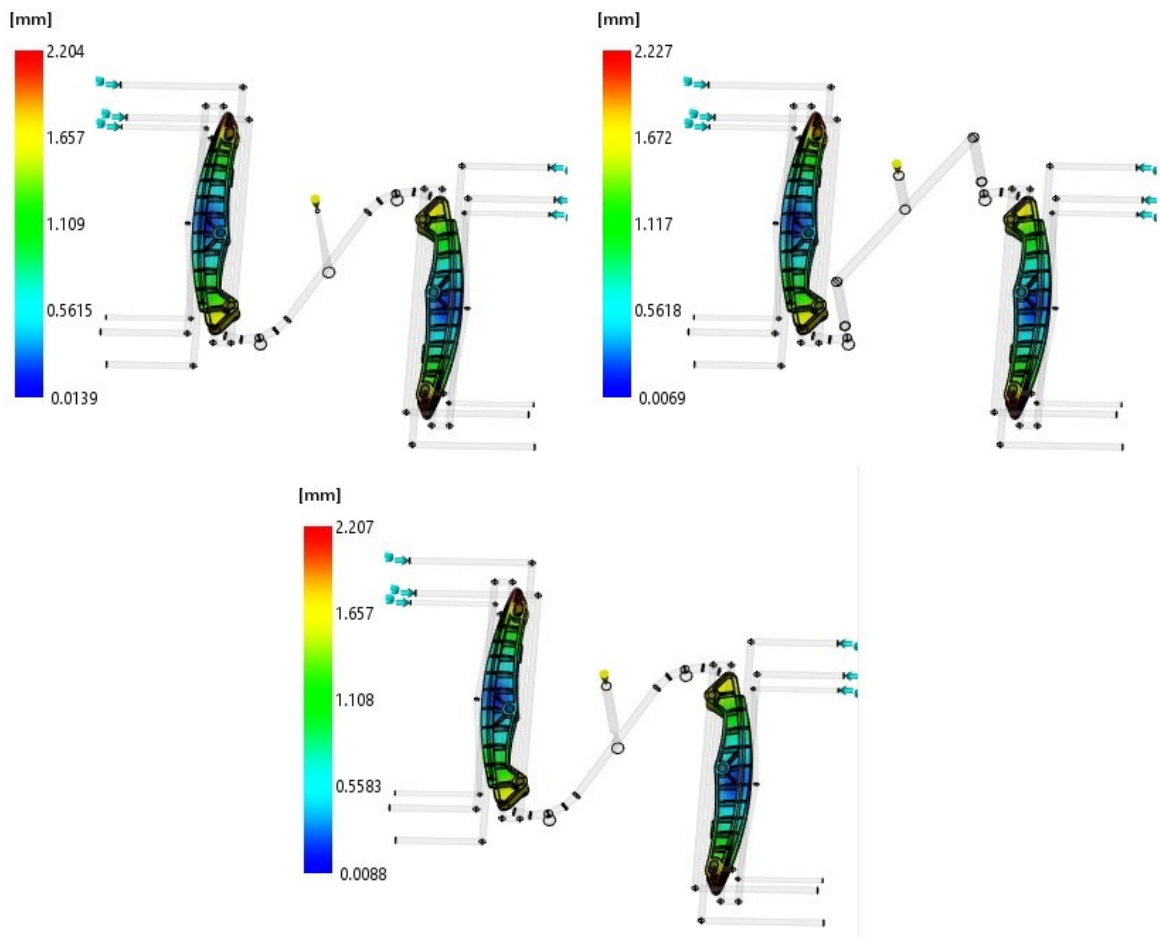
| Typ vtokového systému | Maximální hodnota |
|-----------------------|-------------------|
| Studený | 61,31 s |
| Vyhříváný | 61,20 s |
| Kombinovaný | 61,28 s |

11.3 Výsledky deformací

Výsledky deformací všech tří druhů vtokových systémů se téměř nelišily. Rozdíl mezi hodnotami byl až v řádu setin milimetru. Z tohoto důvodu je zde uveden pouze reprezentativní výsledek deformace, která je způsobena všemi vlivy současně (smrštění, chlazení, teplotní roztažnost atd.).

11.3.1 Deformace způsobena všemi vlivy

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, tak vyobrazená deformace je způsobena řadou vlivů. Největší vliv na celkovou deformaci má smrštění materiálu. Další vlivy jako je orientace, nebo chlazení mají oproti smrštění pouze minimální vliv.



Obr. 67 Deformace způsobena všemi vlivy

Vlevo nahoře – studený vtokový systém, vpravo nahoře vyhřívavý vtokový systém,
ve spodní části – kombinovaný vtokový systém

Tab. 14 Srovnání vtokových systémů dle deformace způsobené všemi vlivy

| Typ vtokového systému | Maximální hodnota |
|------------------------------|--------------------------|
| Studený | 2,204 mm |
| Vyhřívaný | 2,227 mm |
| Kombinovaný | 2,207 mm |

12 ROZBOR NEJVHODNĚJŠÍHO TYPU VTOKOVÉHO SYSTÉMU

Z výsledků analýz v kapitole 11 byl vybrán vtokový systém, který je pro zadanou koncepci formy nejvhodnější. Nejlepších výsledků dosáhnul vyhřívaný vtokový systém. V následujících podkapitolách jsou podrobněji rozebrány výsledky analýz plnění a dotlaku, chlazení a v neposlední řadě deformací při použití vyhřívaného vtokového systému.

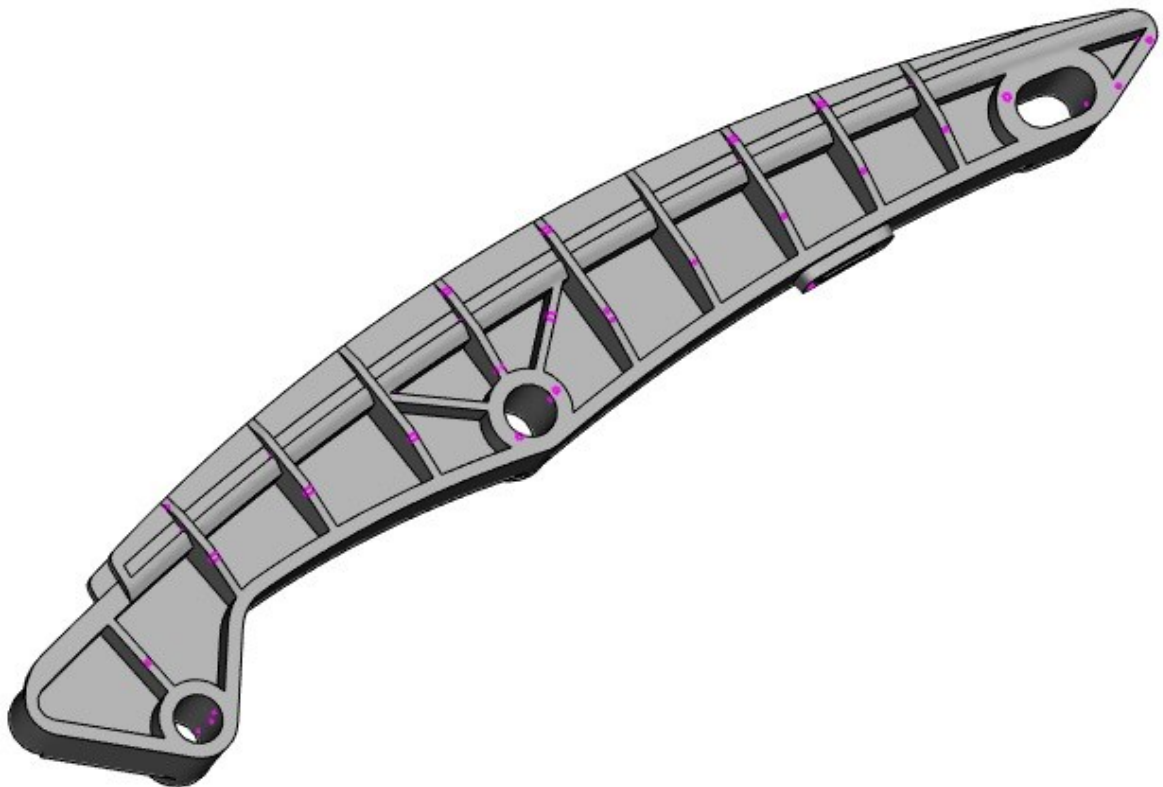
Tato simulace odpovídá navržené koncepci vstřikovací formy uvedené v kapitole 8.

12.1 Výsledky analýzy plnění a dotlaku

V této kapitole jsou zmíněny výsledky, které vycházejí takřka totožně u všech tří typů vtokových systémů. Z tohoto důvodu nebyly zahrnuty do srovnání v kapitole 11.1.

12.1.1 Vzduchové kapsy (Air traps)

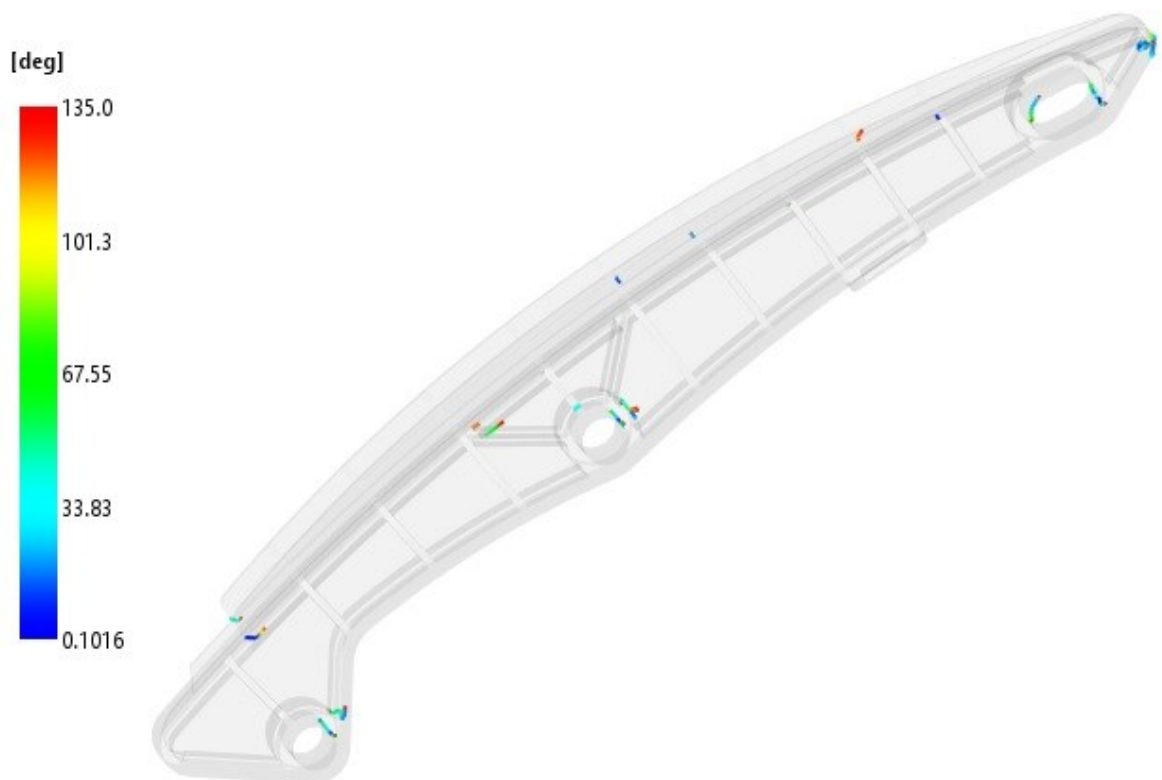
Na modelu jsou zvýrazněna místa, ve kterých by při vstřikování s největší pravděpodobností došlo k nahromadění a uzavření vzduch. V těchto místech by proto měly být umístěny vyhazovače (vůli mezi nimi a tvarovou dutinou může vzduch uniknout) nebo odvzdušňovací kanálky.



Obr. 68 Vzduchové kapsy

12.1.2 Studené spoje (Weld lines)

Výsledek charakterizuje místa vzniku studených spojů, které vznikají při spojení dvou chladnějších čel taveniny. Jedná se o místa s nižší pevností, která jsou více náchylná k prasknutí. Studené spoje nelze eliminovat, ale lze je přemístit například změnou pozice vtokového ústí. Z hlediska nastavení podmínek vstřikování lze pouze zvýšit teplotu taveniny i formy, aby se setkaly čela taveniny s vyšší teplotou, čímž vznikne pevnější studený spoj.



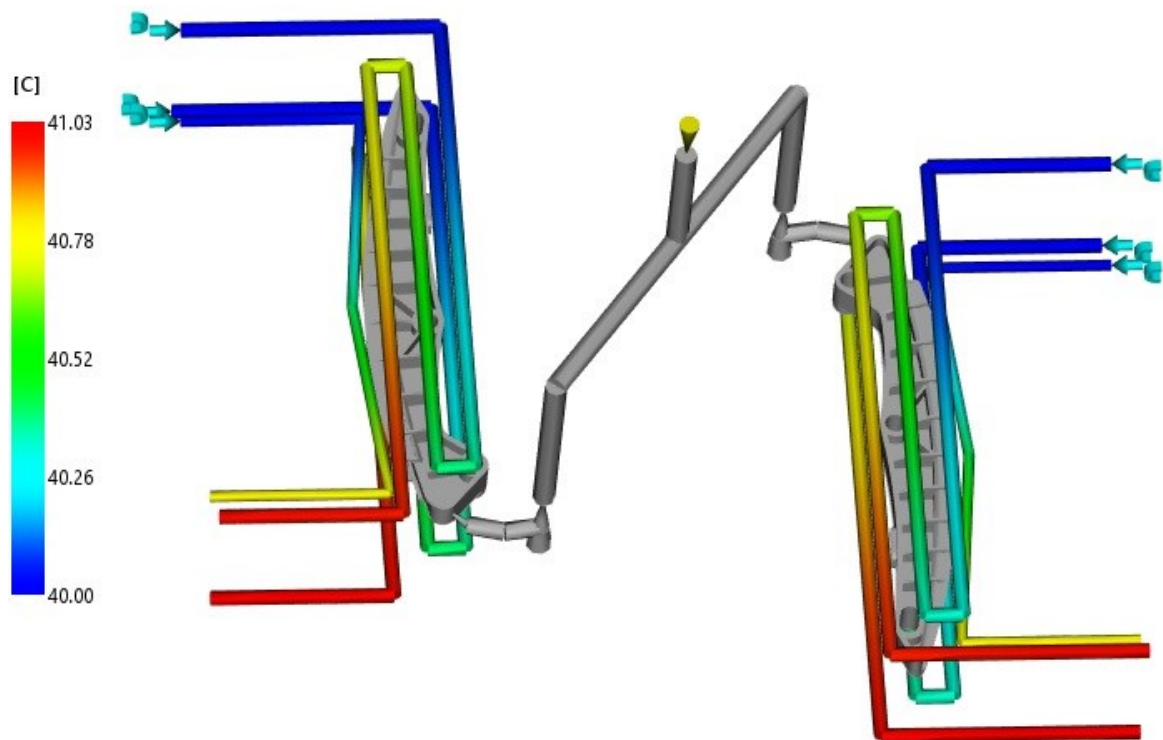
Obr. 69 Studené spoje

12.2 Výsledky analýzy chlazení

V následujících podkapitolách jsou rozebrány výsledky fáze chlazení. Zmíněné výsledky nebyly zahrnuty do kapitoly 11.2, jelikož se při změně vtakového systému téměř nemění.

12.2.1 Teplota temperačního média

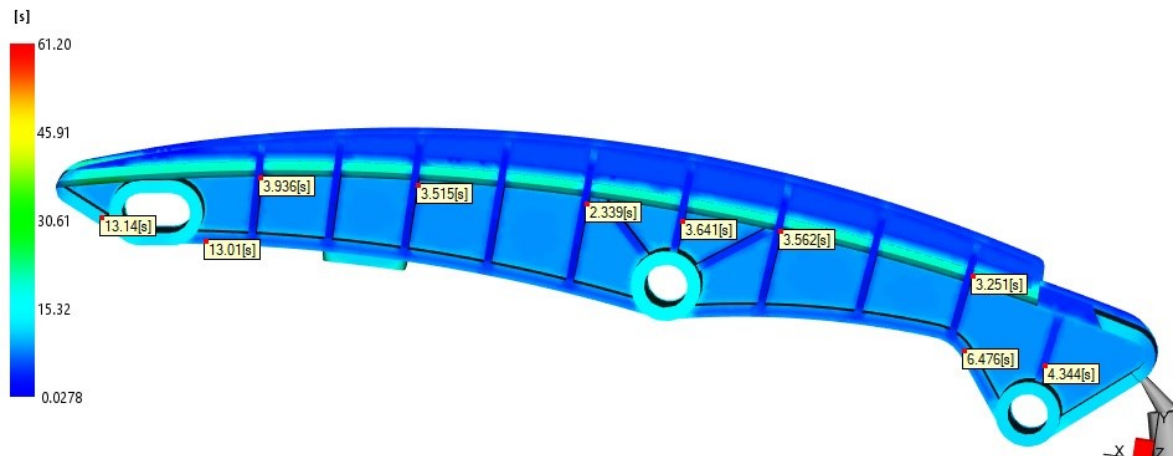
Temperační médium se při průchodu temperačními okruhy uvnitř teplejší formy ohřívá, čímž odvádí přebytečné teplo z formy ven. Rozdíl mezi teplotami mezi vstupem a výstupem z temperačního okruhu by neměl být vyšší než 3 °C. Tato podmínka je dodržena, jelikož se temperační médium ohřeje maximálně o 1,03 °C.



Obr. 70 Teplota temperačního média

12.2.2 Teplota potřebná k dosažení vyhazovací teploty

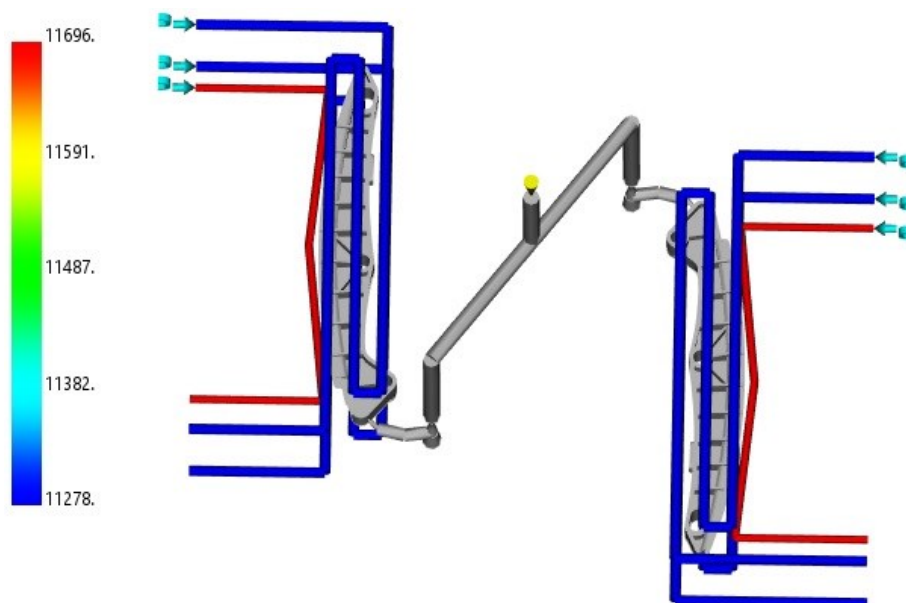
Doba pro chlazení výstřiku je nastavena na 15 s. Na obrázku 71 jsou vybrány místa, o které se budou opírat čela vyhazovačů. V těchto místech musí být při vyhazování materiál ztuhlý, aby nedošlo k zaboření vyhazovačů do výstřiku a tím k jeho znehodnocení. Nejvyšší hodnota je 13,14 s.



Obr. 71 Teplota potřebná k dosažení vyhazovací teploty

12.2.3 Reynoldsovo číslo (Reynolds number)

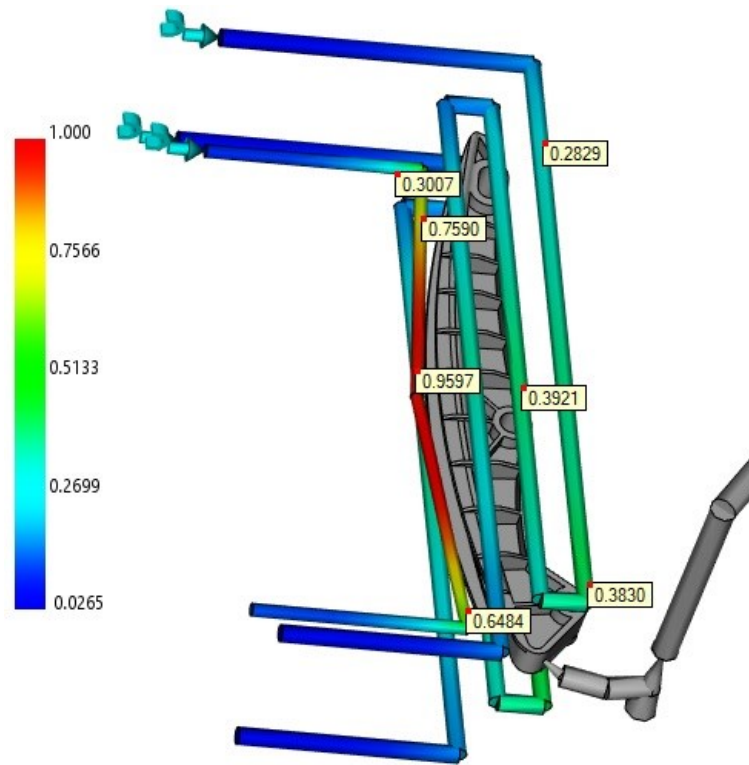
Jak již bylo zmíněno v kapitole 10.3, tak pro nejefektivnější odvod tepla je nutné zajistit turbulentní proudění temperačního média uvnitř temperačního okruhu. Z obrázku 72 je patrné, že ve všech temperačních okruzích je hodnota Reynoldsova čísla vyšší než 10 000 (nejnižší hodnota – 11 278), čímž je podmínka turbulentního proudění splněna.



Obr. 72 Reynoldsovo číslo

12.2.4 Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency)

Výsledek znázorňuje, jaké části temperačního okruhu jsou nejvíce či nejméně efektivní. Části označené červeně mají hodnotu 1, to znamená, že dosahují nejvyšší efektivity odvodu tepla. Modré úseky označené 0 dosahují nejnižší efektivity. Z obrázku 73 je patrné, že nejvyšší efektivitu má okruh pro temperování bočního odformování (až 0,9597). Efektivitu lze zvýšit například přiblížením temperačních kanálů tvarové dutině.



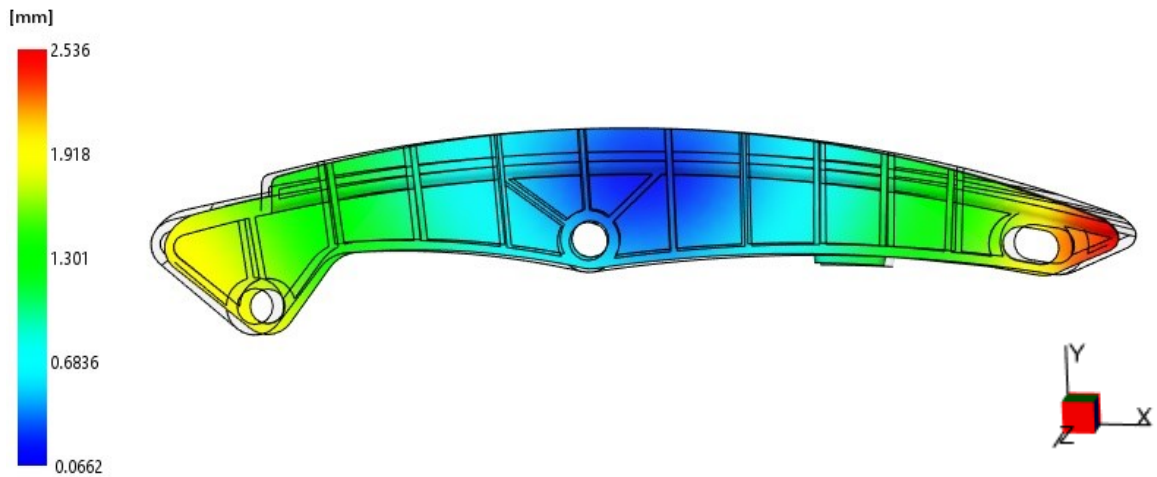
Obr. 73 Efektivita odvodu tepla

12.3 Výsledky analýzy deformací

V níže uvedené podkapitole je podrobněji rozebrána deformace vlivem smrštění a její složky.

12.3.1 Deformace vlivem smrštění

Jak již bylo zmíněno v kapitole 11.3.1, tak největším vlivem na deformaci výstřiku má smrštění materiálu. Pro názornost je výsledek zvětšen v měříku 2:1. Dále si lze povšimnout, že největší smrštění se odehrává ve směru X. V tabulce 15 jsou shrnuty maximální hodnoty deformace vlivem smrštění ve všech třech směrech (X, Y, Z).



Obr. 74 Deformace vlivem smrštění

Tab. 15 Deformace v jednotlivých směrech

| Směr deformace | Maximální hodnota |
|----------------|-------------------|
| X | 2,496 mm |
| Y | 0,6105 mm |
| Z | 0,4506 mm |

13 DISKUSE VÝSLEDKŮ ANALÝZ

Za účelem optimalizace procesu vstřikování pro zadaný díl byly vypracovány analýzy pro tři různé typy vtokových systémů (studený, vyhřívaný, kombinovaný). Nejprve proběhlo analyzování vhodnosti umístění vtokového ústí. Následovalo analyzování temperačních okruhů a jejich následná optimalizace. Poté mohly být spuštěny kompletní analýzy chlazení + plnění + dotlak + deformace pomocí nichž byl vybrán typ vtokového systému, který dosahoval nejlepších výsledků.

Pro zadanou koncepci formy byl vybrán jako nejlepší varianta vyhřívaný vtokový systém. Dosahoval nejlepších výsledků u parametrů: uzavírací síla, vstřikovací tlak, materiálové parametry, teplota temperačního média či čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty. Na druhou stranu při použití vyhřívaného vtokového systému vznikají největší deformace, které lze však snížit kompenzací rozměrů a dosahuje také nejdelšího času plnění.

V tabulce 16 jsou shrnuty výsledky analýz. U každého parametru je barevně označena nejnižší hodnota.

Tab. 16 Srovnání vtokových systémů

| Parametr [Jednotka] | Typ vtokového systému | | |
|--|-----------------------|-----------|-------------|
| | Studený | Vyhřívaný | Kombinovaný |
| Čas plnění [s] | 2,723 | 2,770 | 2,740 |
| Uzavírací síla [tuny] | 78,26 | 58,83 | 73,91 |
| Vstřikovací tlak [MPa] | 41,80 | 35,57 | 40,07 |
| Rychlost smykové deformace [1/s] | 13 260 | 11 011 | 12 513 |
| Smykové napětí na stěně [MPa] | 0,4650 | 0,4294 | 0,4666 |
| Teplota temperačního média [°C] | 41,21 | 41,03 | 41,18 |
| Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty [s] | 61,31 | 61,20 | 61,28 |
| Celková deformace [mm] | 2,204 | 2,227 | 2,207 |

ZÁVĚR

Účelem diplomové práce bylo zkonstruovat dvojnásobnou vstřikovací formu pro zadaný díl. Tím byla vodící lišta rozvodového řetězu. Materiálem dílu byl polyamid 66 nesoucí označení od firmy UltramidA3W BASF. Po návrhu formy byly zhotoveny analýzy ověřující její funkčnost. Poslední částí bylo vytvoření výkresové dokumentace – výkres sestavy společně s řezy a pohledy a také kusovník.

Teoretická část pojednává o obecných principech vstřikování, možnostech temperování vstřikovacích forem, druzích vtokových systémů a vadách výstřiků. Dále je zde zmíněna možnost využití softwarových simulací.

Praktická část pojednává o konstrukčním provedení vstřikovací formy a všech jejích částí. Pro konstrukci byly použity normalizované díly firem Meusburger a Hasco. Za účelem snadného odformování výrobku bylo nutné použít tři dělicí roviny (hlavní a dvě vedlejší). Obě vedlejší dělicí roviny sloužily k odformování bočních dutin výrobku. Větší boční odformování bylo řešeno jako jeden posuvný člen. K pohybu obou větších bočních odformování slouží šikmé vodící kolíky, vodící lišty a kluzné destičky. Pro zabezpečení krajních poloh byly použity zámky a uzavírací klíny. Jako menší boční odformování byla použita normalizovaná posuvná jednotka firmy Meusburger. Pro temperování jedné tvarové dutiny jsou vytvořeny tři temperační okruhy. Pro temperaci tvárníku, tvárnice a bočního odformování. Celkem je tedy ve vstřikovací formě šest temperačních okruhů.

Pro vstřikovací formu byly vytvořeny analýzy třech typů vtokových systémů (studený, vyhřívaný, kombinovaný). Na základě jejich výsledků byl vybrán vyhřívaný vtokový systém, jelikož dosahoval nejlepších vlastností. Analýzy se týkaly jak vhodnosti umístění vtokového ústí, fáze plnění a dotlaku, chlazení tak i deformací vzniklých při vstřikování.

Vstřikovací forma je osazena na stroji Arburg Allrounder 720 S, který splňuje všechny parametry pro správný výběr vstřikovacího stroje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZEMAN, Lubomír, 2021. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. 2021. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-271-1294-4.
- [2] ZEMAN, Lubomír, 2018. *Vstřikování plastů 2: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [3] LENFELD, Petr, 2009. *Technologie II*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [4] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. Code creator, 2015 [cit. 2023-01-26]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [5] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 2015, [cit. 2023-01-27]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>
- [6] ŘEHULKA, Zdeněk, 2013. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-7204-833-5.
- [7] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů. I. díl, Vstřikování termoplastů*. 2. vydání. Brno: Uniplast Brno, 1999, 133 s.
- [8] HYNEK, Martin, a kolektiv. *Studené a živé vtokové systémy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2013, [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18161288-Studene-a-zive-vtokove-systemy.html>
- [9] GASTROW, Hans, E. LINDNER a P. UNGER, c2002. *Injection molds: 130 proven designs*. 3rd ed. / edited by Edmund Lindner and Peter Unger. Cincinnati: Hanser/Gardner [distributor]. ISBN 15-699-0316-6.
- [10] Tunnel gate insert. Meusburger [online]. Wolfurt Austria [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://ecom.meusburger.com/files/pdf/e/e1693.pdf>
- [11] Gate. Beaumont [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://www.beaumontinc.com/injection-molding-glossary/gate/>
- [12] Tooling: Critical Design Considerations for Sprue Bushings. Plastics Technology [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/articles/critical-design-considerations-for-sprue-bushings>

- [13] LEARN MORE ABOUT HOT RUNNER SYSTEMS. GlobalSpec [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/manufacturing_equipment_components/hot_runner_systems
- [14] Hot runners – insulated runners. Autodesk [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight-Modelprep/files/GUID-50E7DBD3-82CF-4199-A207-1A790F6849F0-htm.html>
- [15] Vyhříváné vtokové soustavy (VVS): Metoda vstřikování bez vtokového zbytku. Techportal [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/33/vyhrivane-vtokove-soustavy-vvs-metoda-vstrikovani-bez-vtokoveho-zbytku-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1Gxh_vqjvaLmBA/
- [16] HYNEK, Martin, a kolektiv. *Horké vtoky* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2013, [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14044724-Horke-vtoky-k-5-plastove-doc-ing-martin-hynek-ph-d-a-kolektiv-verze-1-0.html>
- [17] Hot Runners and Valve Gate Systems: A Moldmaking Team. MoldMaking Technology [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/hot-runners-and-valve-gate-systems-a-moldmaking-team>
- [18] Shut-Off Nozzles. Flamingo Additives and Colourants LLP [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.flamingoindia.com/product/shut-off-nozzles>
- [19] EXPO21XX: Herzog – Machine shut-off nozzles. Expo21XX [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://www.herzog-ag.com/Pdfs/Technical_English/2010/5_Needleshut-offtypeHP.pdf
- [20] Hot runner nozzles. Gunther: Hot Runner Technology [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.guenther-hotrunner.com/products/hot-runner-systems/open-hot-runner-systems/hot-runner-nozzles.html>
- [21] Speciální vyhříváné vtokové systémy forem pro zpracování termoplastů. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/specialni-vyhrivane-vtokove-systemy-forem-pro-zpracovani-termoplastu-v>
- [22] Cascade Molding. Westfall Technik [online]. [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.moldhotrunnersolutions.com/cascadeinjection.html>

- [23] Ing. Luboš Běhálek, *Temperace vstřikovacích forem s ohledem na vlastnosti a morfologii výstřiků*, časopis Strojírenská technologie ročník X–zvláštní číslo, prosinec 2005, s.9-13, vydavatel: ÚTŘV, UJEP Ústí nad Labem ISSN1211-4162, 2005.
- [24] HYNEK, Martin, a kolektiv. *Temperace vstřikovacích forem* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2013, [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8569192-Temperace-vstrikovacich-forem.html>
- [25] CHOOSING THE RIGHT COOLING METHOD IS THE KEY TO CYCLE TIME REDUCTION. Sealect Plastics [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://sealectplastics.com/news/choosing-the-right-cooling-method-is-the-key-to-cycle-time-reduction/>
- [26] Injection Mold Cooling Design. UPMOLD [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/>
- [27] Threaded spiral baffle. Meusburger [online]. Wolfurt Austria [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://ecom.meusburger.com/files/pdf/e/e2103.pdf>
- [28] Parallel-flow fountain. Meusburger [online]. Wolfurt Austria [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://ecom.meusburger.com/files/pdf/e/e2112.pdf>
- [29] WESTHOFF, R.: Kontrufolgende Temperierung auf dem Vormarsch, In: Kunststoffe 8/2006, s. 24-26.
- [30] Konformní chlazení. Konformní chlazení [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <http://www.konformni-chlazení.cz/>
- [31] New technologies speed mold cooling. Canadian Plastics [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.canplastics.com/features/new-technologies-speed-mold-cooling/>
- [32] Don't Worry, It's Cool – The Power of Conformal Cooling. Tagma India [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://tagmaindia.org/blog/post/8/don-t-worry-it-s-cool-the-power-of-conformal-cooling.html>
- [33] Technologie DMLS – 3D tisk kovů. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-dmls-3d-tisk-kovu>
- [34] Metal 3D printing DMLS. Protolabs [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: https://www.protolabs.com/en-gb/services/3d-printing/direct-metal-laser-sintering/#Design_Guidelines:_Direct_Metal_Laser_Sintering

- [35] SHOEMAKER, Jay. Moldflow Design Guide: A Resource for Plastic Engineers. Framingham, Massachusetts, USA: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978-3-446-40640-7.
- [36] Gate location analysis. Autodesk Moldflow Insight 2021 [online]. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: https://help.autodesk.com/view/MFIA/2021/ENU/?guid=MoldflowInsight_CLC_Analyses_analysis_sequences_Gate_Location_analysis_html
- [37] Fill + Pack. Autodesk Moldflow Insight 2021 [online]. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: https://help.autodesk.com/view/MFIA/2021/ENU/?guid=MoldflowInsight_CLC_Analyses_analysis_sequences_Fill_analysis_Fill_Pack_analysis_html
- [38] Cool analysis. Autodesk Moldflow Insight 2021 [online]. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: https://help.autodesk.com/view/MFIA/2021/ENU/?guid=MoldflowInsight_CLC_Analyses_analysis_sequences_Cool_analysis_products_html
- [39] Material Sheet Ultramid A3W PA66. Albis [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.albis.com/en/products/download/doc/en/SI/basf/UltramidA3W.pdf>
- [40] Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 720S. Arburg [online]. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: https://www.arburg.com/media/_processed_/1/0/csm_179605-hydraulic-ALLROUNDER-720S_37eb10bfe1.jpg

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------|---|
| UV | Ultrafialové záření |
| DMU | Digitální prototyp výrobku |
| 2D | Dvourozměrný prostor |
| 3D | Trojrozměrný prostor |
| CAD | Počítačová podpora konstrukce |
| CAM | Počítačová podpora obrábění |
| CAE | Počítačová podpora analyzování |
| FEM | Metoda konečných prvků |
| CNC | Číslicově řízený obráběcí stroj |
| DMLS | Direct metal laser slitering |
| STEP | Formát – Norma pro výměnu údajů o výrobku |
| STL | Formát – Soubor určený k tisku stereolitografií |
| IGS | Formát – Počáteční specifikace výměny grafiky |
| PE | Polyethylen |
| PS | Polystyren |
| PP | Polypropylen |
| PA66 | Polyamid 66 |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| d x š x v | délka x šířka x výška |
| L/D | délka / průměr |
| HRC | Tvrdost dle Rockwella |
| Obr. | Obrázek |
| Tab. | Tabulka |
| Pa | pascal |
| MPa | megapascal |

| | |
|-----------------|---------------------|
| mm | milimetr |
| cm ³ | centimetr krychlový |
| m ³ | metr krychlový |
| g | gram |
| kg | kilogram |
| s | sekunda |
| min | minuta |
| kN | kilonewton |
| % | procento |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 1 Schéma vstřikovacího cyklu.....</i> | 13 |
| <i>Obr. 2 Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování [5]</i> | 14 |
| <i>Obr. 3 Závislost procenta výrobních nákladů na době vývoje [1]</i> | 20 |
| <i>Obr. 4 Znárodnění výsledku programu Moldflow.....</i> | 22 |
| <i>Obr. 5 Správné umístění vtokového ústí [6]</i> | 24 |
| <i>Obr. 6 Schéma vtokových kanálů [7].....</i> | 26 |
| <i>Obr. 7 Průřezy rozvodných kanálů [6]</i> | 27 |
| <i>Obr. 8 Návrhy rozvodných kanálů při dodržení stejné délky toku pro všechny dutiny [6]</i> | 28 |
| <i>Obr. 9 Typy vtokových systémů [7]</i> | 28 |
| <i>Obr. 10 Plný kuželový vtok [8]</i> | 29 |
| <i>Obr. 11 Odformování bodového vtoku [7]</i> | 30 |
| <i>Obr. 12 Tunelový vtok s vyústěním do nálitku [7]</i> | 31 |
| <i>Obr. 13 Tunelový vtok [9].....</i> | 31 |
| <i>Obr. 14 Banánový vtok [7]</i> | 32 |
| <i>Obr. 15 Vložka tunelového vtoku firmy Meusburger [10].....</i> | 32 |
| <i>Obr. 16 Filmové vtokové ústí [11].....</i> | 33 |
| <i>Obr. 17 Deštníkové a talířové vtokové ústí [4].....</i> | 34 |
| <i>Obr. 18 Schéma vtokového systému s přidržovačem [4]</i> | 35 |
| <i>Obr. 19 Typy přidržovačů vtoku [4]</i> | 35 |
| <i>Obr. 20 Vtoková vložka (modře zvýrazněná) [12].....</i> | 36 |
| <i>Obr. 21 Řez izolovaným vtokovým systémem se zesíleným vtokem [8]</i> | 39 |
| <i>Obr. 22 Izolovaný vtokový systém s předkomůrkou [15].....</i> | 39 |
| <i>Obr. 23 Uzavíratelná tryska s jehlovým uzávěrem firmy Herzog [19].....</i> | 41 |
| <i>Obr. 24 Příklady otevřených trysek [20]</i> | 41 |
| <i>Obr. 25 Kaskádové plnění tvarové dutiny [22]</i> | 42 |
| <i>Obr. 26 Spirálová přepážka firmy Meusburger [27].....</i> | 46 |
| <i>Obr. 27 Fontánková přepážka firmy Meusburger [28]</i> | 46 |
| <i>Obr. 28 Tepelná trubice [4].....</i> | 47 |
| <i>Obr. 29 Konvenční vs nekonvenční temperační systém [32].....</i> | 48 |
| <i>Obr. 30 Temperační systém CONTURA [31]</i> | 49 |
| <i>Obr. 31 Princip metody DMLS [34]</i> | 50 |
| <i>Obr. 32 Vodící lišta rozvodového řemene – model.....</i> | 56 |
| <i>Obr. 33 Násobnost formy.....</i> | 58 |
| <i>Obr. 34 Volba dělicích rovin</i> | 59 |

| | |
|---|----|
| Obr. 35 Tvarové vložky..... | 60 |
| Obr. 36 Boční odformování | 61 |
| Obr. 37 Boční odformování – pohled ze strany tvárnice..... | 61 |
| Obr. 38 Pravá (nepohyblivá) část vstřikovací formy..... | 62 |
| Obr. 39 Levá (pohyblivá) část vstřikovací formy | 63 |
| Obr. 40 Vyhřívavý vtokový systém..... | 64 |
| Obr. 41 Trajektorie temperačního okruhu tvárnice..... | 65 |
| Obr. 42 Trajektorie temperačního okruhu bočního odformování | 65 |
| Obr. 43 Normalizované součásti temperačního okruhu | 66 |
| Obr. 44 Vyhazovací systém | 67 |
| Obr. 45 Vodící a středící prvky pravé části formy..... | 68 |
| Obr. 46 Vodící a středící prvky levé části formy | 68 |
| Obr. 47 Středící kroužky (levé části – vlevo, pravé části – vpravo) | 69 |
| Obr. 48 Vstřikovací stroj Allrounder 720 S firmy Arburg [40]..... | 70 |
| Obr. 49 Kvalita sítě – mesh statistics | 72 |
| Obr. 50 Vysíťovaný model | 72 |
| Obr. 51 Procesní podmínky pro analýzu umístění vtoku | 73 |
| Obr. 52 Výsledek – analýza umístění vtoku (Gate location)..... | 74 |
| Obr. 53 Průtok temperačního média temperačními okruhy | 75 |
| Obr. 54 Studený vtokový systém – model Moldflow | 76 |
| Obr. 55 Vyhřívavý vtokový systém – model Moldflow..... | 77 |
| Obr. 56 Kombinovaný vtokový systém – model Moldflow..... | 78 |
| Obr. 57 Nastavení procesních podmínek chlazení..... | 79 |
| Obr. 58 Nastavení procesních podmínek plnění a dotlaku | 80 |
| Obr. 59 Nastavení temperačních okruhů. | 80 |
| Obr. 60 Čas plnění..... | 81 |
| Obr. 61 Uzavírací síla | 83 |
| Obr. 62 Rychlost smykové deformace..... | 84 |
| Obr. 63 Smykové napětí na stěně..... | 85 |
| Obr. 64 Vstřikovací tlak..... | 86 |
| Obr. 65 Teplota temperačního média | 87 |
| Obr. 66 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty | 88 |
| Obr. 67 Deformace způsobena všemi vlivy..... | 89 |
| Obr. 68 Vzduchové kapsy..... | 91 |
| Obr. 69 Studené spoje..... | 92 |

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 70</i> Teplota temperačního média | 93 |
| <i>Obr. 71</i> Teplota potřebná k dosažení vyhazovací teploty | 94 |
| <i>Obr. 72</i> Reynoldsovo číslo | 94 |
| <i>Obr. 73</i> Efektivita odvodu tepla | 95 |
| <i>Obr. 74</i> Deformace vlivem smrštění | 96 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| <i>Tab. 1 Vlastnosti Polyamidu PA66 UltramidA3W [39]</i> | 57 |
| <i>Tab. 2 Vybrané technické parametry stroje v porovnání s požadavky formy</i> | 70 |
| <i>Tab. 3 Kvalita sítě</i> | 71 |
| <i>Tab. 4 Rozměry studeného vtokového systému</i> | 76 |
| <i>Tab. 5 Rozměry vyhřívaného vtokového systému</i> | 77 |
| <i>Tab. 6 Rozměry kombinovaného vtokového systému</i> | 78 |
| <i>Tab. 7 Srovnání vtokových systémů dle času plnění</i> | 82 |
| <i>Tab. 8 Srovnání vtokových systémů dle uzavírací síly</i> | 83 |
| <i>Tab. 9 Srovnání vtokových systémů dle rychlosti smykové deformace</i> | 84 |
| <i>Tab. 10 Srovnání vtokových systémů dle smykového napětí na stěně</i> | 85 |
| <i>Tab. 11 Srovnání vtokových systémů dle vstřikovacího tlaku</i> | 86 |
| <i>Tab. 12 Srovnání vtokových systémů dle teploty temperačního média</i> | 87 |
| <i>Tab. 13 Srovnání vtokových systémů dle času potřebného k dosažení vyhazovací teploty</i> .. | 88 |
| <i>Tab. 14 Srovnání vtokových systémů dle deformace způsobené všemi vlivy</i> | 90 |
| <i>Tab. 15 Deformace v jednotlivých směrech</i> | 96 |
| <i>Tab. 16 Srovnání vtokových systémů</i> | 97 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I Výňatek materiálového listu polyamidu PA66 UltramidA3W

Příloha P II Výňatek technického listu vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 720 S

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

Příloha P IV CD obsahující:

- Soubor diplomové práce
- 3D model vstřikovací formy
- Soubory tokových analýz
- Výkresovou dokumentaci
- Kompletní materiálový list polyamidu PA66 UltramidA3W
- Kompletní technický list vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 720S

PŘÍLOHA P I: VÝŇATEK MATERIÁLOVÉHO LISTU POLYAMIDU PA66 ULTRAMIDA3W



Ultramid® A3W
PA66

BASF

An easy flowing, heat aging resistant injection moulding grade for fast processing. Uses include highly stressed parts such as bearings, bearing cages, gear-wheels, coil formers and cable connectors.

| Rheological properties | dry / cond | Unit | Test Standard |
|-----------------------------|------------|------------------------|-----------------|
| ISO Data | | | |
| Melt volume-flow rate, MVR | 100 / * | cm ³ /10min | ISO 1133 |
| Temperature | 275 / * | °C | - |
| Load | 5 / * | kg | - |
| Molding shrinkage, parallel | 1.5 / * | % | ISO 294-4, 2577 |
| Molding shrinkage, normal | 1.8 / * | % | ISO 294-4, 2577 |

| Mechanical Properties | dry / cond | Unit | Test Standard |
|---|---------------------|-------------------|---------------|
| ISO Data | | | |
| Tensile Modulus | 3000 / 1100 | MPa | ISO 527 |
| Yield stress | 85 / 50 | MPa | ISO 527 |
| Yield strain | 4.4 / 20 | % | ISO 527 |
| Nominal strain at break | 25 / >50 | % | ISO 527 |
| Tensile Creep Modulus, 1h | * / 1100 | MPa | ISO 899-1 |
| Tensile Creep Modulus, 1000h | * / 700 | MPa | ISO 899-1 |
| Impact Strength (Charpy), +23°C | no break / no break | kJ/m ² | ISO 179/1eU |
| Notched Impact Strength (Charpy), +23°C | 6 / 20 | kJ/m ² | ISO 179/1eA |
| Notched Impact Strength (Charpy), -30°C | 5 / - | kJ/m ² | ISO 179/1eA |

| Thermal Properties | dry / cond | Unit | Test Standard |
|---|------------|-------|----------------|
| ISO Data | | | |
| Melting Temperature (10°C/min) | 260 / * | °C | ISO 11357-1/-3 |
| Temp. of deflection under load (1.80 MPa) | 75 / * | °C | ISO 75-1/-2 |
| Temp. of deflection under load (0.45 MPa) | 220 / * | °C | ISO 75-1/-2 |
| Vicat softening temperature, 50°C/h 50N | 250 / * | °C | ISO 306 |
| Coeff. of Linear Therm. Expansion, parallel | 98 / * | E-6/K | ISO 11359-1/-2 |
| Burning Behav. at 1.5 mm Nom. Thicken. | V-2 / * | class | UL 94 |
| Thickness tested | 1.5 / * | mm | - |
| UL recognition | yes / * | - | - |
| Burning Behav. at thickness h | V-2 / * | class | UL 94 |
| Thickness tested | 0.8 / * | mm | - |
| UL recognition | yes / * | - | - |
| Oxygen index | 28 / * | % | ISO 4589-1/-2 |

| Electrical Properties | dry / cond | Unit | Test Standard |
|------------------------------|------------|-------|---------------|
| ISO Data | | | |
| Relative permittivity, 100Hz | 3.8 / - | - | IEC 62631-2-1 |
| Relative permittivity, 1MHz | 3.2 / 5 | - | IEC 62631-2-1 |
| Dissipation Factor, 100Hz | 50 / - | E-4 | IEC 62631-2-1 |
| Dissipation Factor, 1MHz | 250 / 2000 | E-4 | IEC 62631-2-1 |
| Volume Resistivity | 1E13 / 1E9 | Ohm*m | IEC 62631-3-1 |
| Surface Resistivity | * / 1E9 | Ohm | IEC 62631-3-2 |
| Comparative tracking index | - / 500 | - | IEC 60112 |

| Other Properties | dry / cond | Unit | Test Standard |
|---------------------|------------|-------------------|----------------|
| ISO Data | | | |
| Water Absorption | 8.5 / * | % | Sim. to ISO 62 |
| Humidity absorption | 2.8 / * | % | Sim. to ISO 62 |
| Density | 1130 / - | kg/m ³ | ISO 1183 |

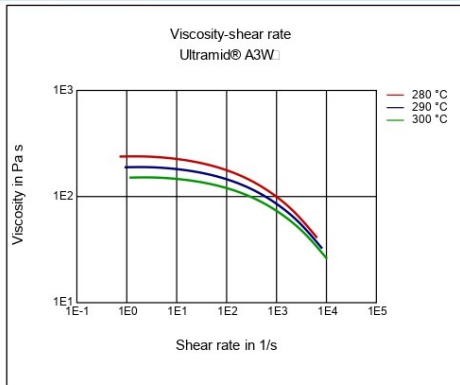
| Material Specific Properties | dry / cond | Unit | Test Standard |
|------------------------------|------------|--------------------|---------------------|
| ISO Data | | | |
| Viscosity number | 150 / * | cm ³ /g | ISO 307, 1157, 1628 |

| Rheological calculation properties | Value | Unit | Test Standard |
|------------------------------------|-------|------|---------------|
| ISO Data | | | |
| Ejection temperature | 180 | °C | - |

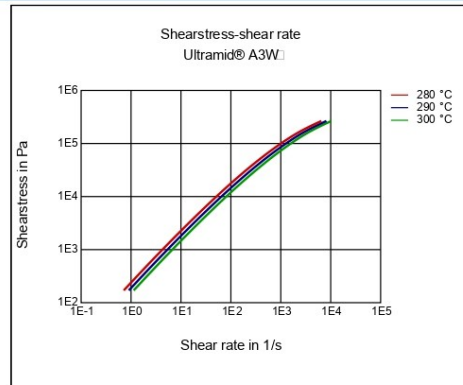
| Test specimen production | Value | Unit | Test Standard |
|---------------------------------------|-------|------|---------------|
| ISO Data | | | |
| Injection Molding, melt temperature | 290 | °C | ISO 294 |
| Injection Molding, mold temperature | 80 | °C | ISO 294 |
| Injection Molding, injection velocity | 200 | mm/s | ISO 294 |

Diagrams

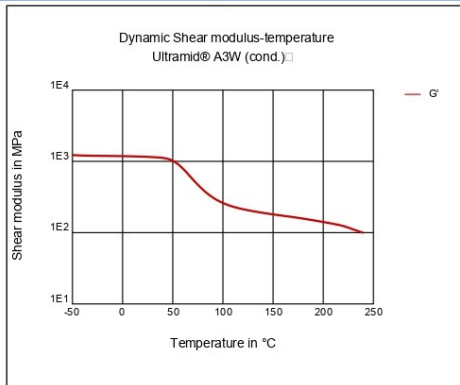
Viscosity-shear rate



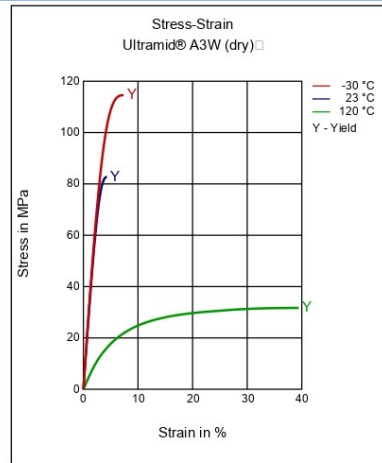
Shearstress-shear rate



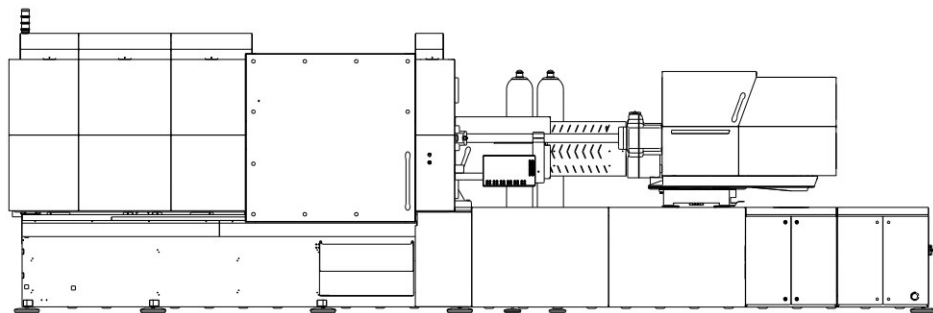
Dynamic Shear modulus-temperature



Stress-strain



PŘÍLOHA P II: VÝŇATEK TECHNICKÉHO LISTU VSTŘIKOVA- CÍHO STROJE ARBURG ALLROUNDER 720 S



ALLROUNDER 720 S

Clamp-Design

Distance between tie bars: 720 x 720 mm

Clamping force: 3200 kN

Injection unit (acc. to EUROMAP): 1300, 2100, 3200

ARBURG

TECHNICAL DATA | 720 S

| Clamping unit | | | 720 S | | |
|-------------------------------------|--------------|-------------|--------------------|--|--|
| with clamping force | max. kN | | 3200 | | |
| Opening force stroke | max. kN mm | | 800 700 | | |
| Mould height, fixed variable | min. mm | | 700 [300-700] | | |
| Platen daylight fixed variable | max. mm | | 1400 [1000-1400] | | |
| Distance between tie bars (w x h) | mm | | 720 x 720 | | |
| Mould mounting platens (w x h) | max. mm | | 1040 x 1040 | | |
| Weight of movable mould half | max. kg | | 3600 | | |
| Ejector force stroke | max. kN mm | | 100 250 | | |
| Dry cycle time EUROMAP ² | 1 pump | min. s - mm | 4,8 - 504 | | |
| | 2 pumps | min. s - mm | 3,5 - 504 | | |
| | Accum. | min. s - mm | 2,1 - 504 | | |

| Injection unit | | | 1300 | | | 2100 | | | 3200 | | |
|--|----------------------|-------------------------|----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| with screw diameter | mm | | 55 | 60 | 70 | 60 | 70 | 80 | 70 | 80 | 90 |
| Effective screw length | L/D | | 22 | 20 | 17 | 23 | 20 | 17,5 | 23 | 20 | 18 |
| Screw stroke | max. mm | | 240 | | | 280 | | | 320 | | |
| Calculated stroke volume | max. cm ³ | | 558 | 664 | 904 | 792 | 1078 | 1407 | 1232 | 1608 | 2036 |
| Shot weight | max. g PS | | 510 | 607 | 826 | 723 | 984 | 1286 | 1125 | 1469 | 1860 |
| Material throughput | max. kg/h PS | | 86 | 96 | 115 | 125 | 145 | 175 | 185 | 215 | 250 |
| | max. kg/h PA6.6 | | 43 | 48 | 58 | 62 | 74 | 88 | 93 | 110 | 125 |
| Injection pressure | max. bar | | 2380 | 2000 | 1470 | 2500 | 2000 | 1530 | 2500 | 2000 | 1580 |
| Holding pressure | max. bar | | 2380 | 2000 | 1470 | 2500 | 2000 | 1530 | 2500 | 2000 | 1580 |
| Injection flow ² | 1 pump | max. cm ³ /s | 238 | 284 | 388 | 224 | 306 | 400 | --- | | |
| | 2 pumps | max. cm ³ /s | 238 | 284 | 388 | 224 | 306 | 400 | 290 | 380 | 482 |
| | Accum. | max. cm ³ /s | 714 | 848 | 1156 | 1132 | 1540 | 2012 | 1188 | 1552 | 1964 |
| Screw circumferential speed ² | 1 pump | max. m/min | 40 | 43 | 51 | 43 | 51 | 58 | --- | | |
| | 2 pumps | max. m/min | 40 | 43 | 51 | 43 | 51 | 58 | 47 | 54 | 61 |
| | Accum. | max. m/min | 19 | 21 | 25 | 21 | 25 | 28 | 23 | 26 | 29 |
| Screw torque | max. Nm | | 1510 | 1640 | 1920 | 2140 | 2500 | 2550 | 3140 | 3510 | 3510 |
| Nozzle contact force retraction stroke | max. kN mm | | 90 550 | | | 110 600 | | | 110 600 | | |
| Heating capacity zones | kW | | 22,9 8 | | | 31,4 8 | | | 38,4 8 | | |

| Drive and connection | | | 1 pump (servo) | | 2 pumps | | | Accum. | | |
|--|-------------|---|----------------|-------|-------------|-------|-------|-------------|------|------|
| with injection unit | | | 1300 | 2100 | 1300 | 2100 | 3200 | 1300 | 2100 | 3200 |
| Net weight of machine | kg | | 17000 | 17700 | 17000 | 17700 | 19200 | --- | | |
| Sound press. level Insecurity ⁴ | dB(A) | | < 65 | | 73 3 | | | < 70 | | |
| Oil filling | l | | 410 | | 410 | 410 | 530 | 460 | 530 | 610 |
| Drive power ² | max. kW | | 45 | 55 | 45 | 55 | 55 | 37 | 37 | 45 |
| Electrical connection ³ | kW | | 71 | 76 | 71 | 89 | 96 | 63 | 71 | 86 |
| | Total | A | --- | | --- | | | --- | | |
| | Machine | A | 100 | 125 | 125 | 125 | 125 | 100 | 100 | 125 |
| Cooling water connection | max. °C | | 30 | | 30 | | | 30 | | |
| | min. Δp bar | | 1,5 DN 25 | | 1,5 DN 25 | | | 1,5 DN 32 | | |

| Machine type | |
|--|----------------|
| with EUROMAP size designation ¹ | Drive |
| 720 S 3200-1300 | 1 2 - |
| 720 S 3200-2100 | 1 2 Accum. |
| 720 S 3200-3200 | 1 2 Accum. |

Upon request: other machine types and mould installation heights, screws, drive powers etc.

All specifications relate to the basic machine version. Deviations are possible depending on variants, process settings and material type. Depending on the drive, certain combinations, e.g. max. injection pressure and max. injection flow may be mutually exclusive.

1) Clamping force (kN) - size of injection unit = max. stroke volume (cm³) x max. injection pressure (kbar)

2) Specifications depend on the drive variant / drive configuration.

3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.

4) Detailed info in the operating instr.

[] Specifications apply to alternative equipment.

SHOT WEIGHTS | 720 S

Theoretical shot weights for the most important injection moulding materials

| Injection units according to EUROMAP | | 1300 | | | 2100 | | | 3200 | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Screw diameter | mm | 55 | 60 | 70 | 60 | 70 | 80 | 70 | 80 | 90 |
| Polystyrene | max. g PS | 510 | 607 | 826 | 723 | 984 | 1286 | 1125 | 1469 | 1860 |
| Styrene heteropolymerizates | max. g SB | 498 | 593 | 807 | 707 | 962 | 1256 | 1099 | 1436 | 1817 |
| | max. g SAN, ABS ¹⁾ | 488 | 581 | 791 | 693 | 943 | 1231 | 1077 | 1407 | 1781 |
| Cellulose acetate | max. g CA ¹⁾ | 574 | 683 | 930 | 814 | 1108 | 1447 | 1266 | 1654 | 2093 |
| Celluloseacetobutyrate | max. g CAB ¹⁾ | 534 | 635 | 865 | 757 | 1030 | 1346 | 1177 | 1538 | 1946 |
| Polymethyl methacrylate | max. g PMMA | 527 | 627 | 854 | 747 | 1017 | 1329 | 1163 | 1518 | 1922 |
| Polyphenylene ether, mod. | max. g PPE | 473 | 563 | 767 | 671 | 914 | 1194 | 1044 | 1364 | 1726 |
| Polycarbonate | max. g PC | 536 | 638 | 868 | 760 | 1034 | 1351 | 1182 | 1544 | 1954 |
| Polysulphone | max. g PSU | 554 | 659 | 897 | 785 | 1069 | 1396 | 1222 | 1596 | 2019 |
| Polyamides | max. g PA 6.6 PA 6 ¹⁾ | 507 | 603 | 821 | 719 | 978 | 1278 | 1118 | 1461 | 1848 |
| | max. g PA 6.10 PA 11 ¹⁾ | 473 | 563 | 767 | 671 | 914 | 1194 | 1044 | 1364 | 1726 |
| Polyoximethylene (Polyacetal) | max. g POM | 630 | 749 | 1020 | 893 | 1215 | 1588 | 1389 | 1814 | 2296 |
| Polyethylene terephthalate | max. g PET | 607 | 723 | 984 | 861 | 1172 | 1531 | 1340 | 1750 | 2215 |
| Polyethylene | max. g PE-LD | 385 | 458 | 624 | 546 | 744 | 971 | 850 | 1110 | 1405 |
| | max. g PE-HD | 398 | 473 | 644 | 564 | 768 | 1003 | 877 | 1146 | 1450 |
| Polypropylene | max. g PP | 406 | 484 | 658 | 576 | 784 | 1025 | 897 | 1171 | 1482 |
| Fluoropolymerides | max. g FEP, PFA, PCTFE ¹⁾ | 816 | 971 | 1322 | 1157 | 1575 | 2058 | 1800 | 2352 | 2976 |
| | max. g ETFE | 716 | 852 | 1160 | 1015 | 1382 | 1805 | 1579 | 2063 | 2611 |
| Polyvinyl chloride | max. g PVC-U | 616 | 734 | 998 | 874 | 1190 | 1554 | 1360 | 1776 | 2247 |
| | max. g PVC-P ¹⁾ | 569 | 678 | 922 | 808 | 1099 | 1436 | 1256 | 1641 | 2076 |

1) average value

ARBURG GmbH + Co KG
 Arthur-Hehl-Strasse
 72290 Lossburg
 Tel.: +49 7446 33-0
 www.arburg.com
 contact@arburg.com