

Návrh a optimalizace vstřikovací formy pro plastový díl pomocí tokových analýz

Bc. Adam Chrástecký

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

| | |
|-------------------|--|
| Jméno a příjmení: | Bc. Adam Chrástecký |
| Osobní číslo: | T22380 |
| Studijní program: | N3909 Procesní inženýrství |
| Studijní obor: | Výrobní inženýrství |
| Forma studia: | Prezenční |
| Téma práce: | Návrh a optimalizace vstřikovací formy pro plastový díl pomocí tokových analýz |

Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární studii pro dané téma.
- Provést 3D konstrukci modelu vstřikované součásti.
- Vytvořit simulace procesu vstřikování v software MoldFlow.
- Navrhnout optimalizace vstřikování a vyhodnocení jednotlivých variant.
- Navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobiteľnosť.

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

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem vstřikovací formy pro plastový díl a její optimalizaci pomocí tokových analýz. Zadaným plastovým dílem sloužícím pro návrh formy se stal dvoucestný konektor používaný v kabelových systémech.

Teoretická část práce se zabývá rešerší v oblasti technologie vstřikování, materiálů, konstrukcí forem, simulací vstřikování a vady, které mohou nastat v procesu vstřikování.

Praktická část se zaměřuje na konstrukci zadaného plastového dílu, hledání optimálního řešení vtokového a temperačního systému a samotné konstrukci vstřikovací formy spolu s ověřením její funkčnosti pomocí analýz.

Na závěr práce byl zhotoven výkres sestavy s požadovanými pohledy a kusovníkem.

Klíčová slova: technologie vstřikování, vstřikovací forma, konektor, simulace vstřikování

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of an injection mould for a plastic part and its optimization using flow analyses. The specified plastic part used for the mould design was a two-way connector used in cable systems.

The literary part of the thesis focuses on research in the field of injection moulding technology, materials, mould designs, simulations of moulding injections and defects which can occur in the injection moulding process.

The practical part focuses on the design of the specified plastic part, the search for the optimal solution of the flow and tempering system and the design of the injection mould itself, along with the verification of its functionality by means of analysis.

As conclusion, a drawing of the assembly was made with the required views and bill of materials.

Keywords: injection moulding technology, injection mould, connector, simulation of the injection moulding process

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a čas, který mi věnoval při psaní této práce. Dále bych pak chtěl poděkovat své rodině, přítelkyni a blízkému okolí za podporu po dobu mého studia.

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

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 ÚVOD DO SVĚTA POLYMERŮ | 12 |
| 1.1 KLASIFIKACE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ | 12 |
| 1.1.1 Podle molekulární struktury | 12 |
| 1.1.2 Podle způsobu zpracovatelnosti | 14 |
| 1.1.3 Podle způsobu syntézy | 14 |
| 1.2 USPOŘÁDÁNÍ MAKROMOLEKUL POLYMERU..... | 15 |
| 1.3 REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN | 16 |
| 1.3.1 Viskozita | 17 |
| 1.3.2 Smrštění..... | 18 |
| 1.3.3 Tok uvnitř dutiny formy..... | 19 |
| 1.4 ADITIVA V POLYMERECH..... | 19 |
| 1.4.1 Stabilizátory | 20 |
| 1.4.2 Barviva | 20 |
| 1.4.3 Plniva..... | 20 |
| 1.4.4 Plastifikátory | 22 |
| 1.4.5 Maziva..... | 22 |
| 1.4.6 Retardéry hoření..... | 22 |
| 2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ | 23 |
| 2.1 FÁZE VSTŘIKOVACÍHO CYKLU | 24 |
| 2.1.1 Plastikační fáze..... | 25 |
| 2.1.2 Vstřikovací fáze | 25 |
| 2.1.3 Dotlaková fáze | 25 |
| 2.1.4 Fáze chlazení | 25 |
| 2.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS V P-V-T DIAGRAMU | 26 |
| 2.3 PROCESNÍ OKNO | 27 |
| 2.4 MODIFIKACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ..... | 28 |
| 2.4.1 Vícemateriálové vstřikování | 28 |
| 2.4.2 Technologie zastřikování, obstřikování | 30 |
| 2.4.3 Vstřikování s podporou plynu a vody | 30 |
| 2.4.4 Vstřikování lehčených polymerů | 30 |
| 2.4.5 Vstřikování kovových a keramických prášků | 30 |
| 2.4.6 Vstřikování reaktoplastů | 31 |
| 3 VSTŘIKOVACÍ STROJ | 32 |
| 3.1 PLASTIKAČNÍ JEDNOTKA | 33 |
| 3.2 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA..... | 34 |
| 3.3 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA | 35 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.4 | PERIFERNÍ ZAŘÍZENÍ | 36 |
| 4 | KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY | 37 |
| 4.1 | V TOKOVÉ SYSTÉMY | 39 |
| 4.1.1 | Studený vtokový systém | 39 |
| 4.1.2 | Horký vtokový systém | 41 |
| 4.2 | TEMPERACE..... | 42 |
| 4.3 | ODVZDUŠŇOVÁNÍ..... | 43 |
| 4.4 | VYHAZOVÁNÍ | 44 |
| 4.5 | MATERIÁLY POUŽÍVANÉ K VÝROBĚ FOREM..... | 45 |
| 5 | SIMULACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ..... | 46 |
| 5.1 | TYPY SIMULACÍ | 47 |
| 5.2 | VADY VÝROBKŮ DOPROVÁZEJÍCÍ PROCES VSTŘIKOVÁNÍ | 48 |
| 5.2.1 | Propadliny | 48 |
| 5.2.2 | Studené spoje | 48 |
| 5.2.3 | Volný tok taveniny | 49 |
| 5.2.4 | Tokové čáry..... | 49 |
| 5.2.5 | Spálená místa | 50 |
| 5.2.6 | Bublíny..... | 50 |
| II | PRAKTICKÁ ČÁST | 51 |
| 6 | STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE | 52 |
| 7 | MODEL VSTŘIKOVANÉHO VÝROBKU | 53 |
| 7.1 | VSTŘIKOVANÝ MATERIÁL | 54 |
| 7.2 | ROZVRŽENÍ DĚLÍCÍCH ROVIN | 55 |
| 7.3 | VOLBA NÁSOBNOSTI..... | 56 |
| 8 | OPTIMÁLNÍ ŘEŠENÍ VTOKOVÉHO A TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU | 57 |
| 8.1 | UMÍSTĚNÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ..... | 58 |
| 8.2 | VOLBA VTOKOVÉHO SYSTÉMU | 58 |
| 8.2.1 | Návrh studeného vtokového systému..... | 59 |
| 8.2.2 | Návrh horkého vtokového systému..... | 62 |
| 8.2.3 | Návrh kombinace horkého a studeného systému | 65 |
| 8.2.4 | Vyhodnocení navržených variant..... | 68 |
| 8.3 | VOLBA TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU | 70 |
| 8.3.1 | Návrh konvenčního způsobu chlazení | 71 |
| 8.3.2 | Návrh konformního způsobu chlazení | 74 |
| 8.3.3 | Vyhodnocení navržených variant..... | 77 |
| 9 | KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY | 78 |
| 9.1 | RÁM FORMY | 79 |
| 9.2 | TVAROVÉ KOMPONENTY FORMY | 79 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.3 | BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ | 81 |
| 9.4 | VTOKOVÝ SYSTÉM | 82 |
| 9.4.1 | Horký vtok | 83 |
| 9.4.2 | Studený vtok..... | 84 |
| 9.5 | ODVZDUŠNĚNÍ FORMY..... | 84 |
| 9.6 | TEMPERAČNÍ SYSTÉM..... | 85 |
| 9.7 | VYHAZOVACÍ SYSTÉM..... | 87 |
| 9.8 | VODÍCÍ A STŘEDÍCÍ KOMPONENTY FORMY | 89 |
| 9.9 | MANIPULAČNÍ ZAŘÍZENÍ..... | 90 |
| 10 | OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI VSTŘIKOVACÍ FORMY..... | 92 |
| 10.1 | ČAS PLNĚNÍ | 94 |
| 10.2 | UZAVÍRACÍ SÍLA | 95 |
| 10.3 | TEPLOTA ČELA TAVENINY | 95 |
| 10.4 | STUDENÉ SPOJE | 96 |
| 10.5 | UZAVŘENÝ VZDUCH..... | 96 |
| 10.6 | TLAK..... | 97 |
| 10.7 | PROPADLINY | 97 |
| 10.8 | TEPLOTA TEMPERAČNÍHO MÉDIA..... | 98 |
| 10.9 | EFEKTIVITA ODVODU TEPLA TEMPERAČNÍCH OKRUHŮ | 98 |
| 10.10 | TLAK V TEMPERAČNÍCH OKRUŽÍCH | 99 |
| 10.11 | TEPLOTA POVRCHU FORMY V OBLASTI DUTINY | 99 |
| 10.12 | ČAS PRO DOSAŽENÍ VYHAZOVACÍ TEPLoty | 100 |
| 10.13 | CELKOVÁ DEFORMACE | 101 |
| 11 | VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE | 102 |
| 12 | DISKUZE VÝSLEDKŮ..... | 103 |
| | ZÁVĚR | 105 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 107 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 111 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 113 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 116 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 117 |

ÚVOD

Vstřikování plastů je jednou z nejpoužívanějších a nejefektivnějších metod výroby plastových dílů. Tento proces je široce využíván ve všech odvětvích průmyslu, ať už se jedná o automobilový, elektronický až po spotřební zboží a lékařské aplikace. Technologií vstřikování je umožněno vyrábět výrobky různých tvarů, velikostí a složitostí s vysokou přesností a opakovatelností. Díky širokému spektru dostupných plastových materiálů lze dosáhnout různých mechanických, tepelných, elektrických a chemických vlastností podle potřeb konkrétní aplikace.

S využitím moderních CAD softwarů lze dosáhnout přesných a detailních 3D modelů vstřikovacích forem, což zajišťuje přesnost a správnost konstrukce. Díky možnosti rychle iterovat návrhy je možné snadno provádět úpravy a optimalizace formy, což má za následek urychlení vývoje spolu se zkrácením doby uvedením nové formy do výroby. V případě kombinace s CAE programy lze nasimulovat plnění dutin, teplotní pole formy a deformace dílu a identifikovat tak potenciální problémy ještě před uvedením do výroby. CAE jsou dále schopny optimalizovat procesní parametry jako je tlak, rychlost vstřikování, teplota taveniny, čímž lze dosáhnout požadovaných vlastností výrobku v kombinaci s minimálními výrobními náklady.

Tyto softwary mohou být integrovány s dalšími systémy jako jsou CAM softwary pro generování programů pro CNC obrábění a PLM systémy pro správu dat a procesů.

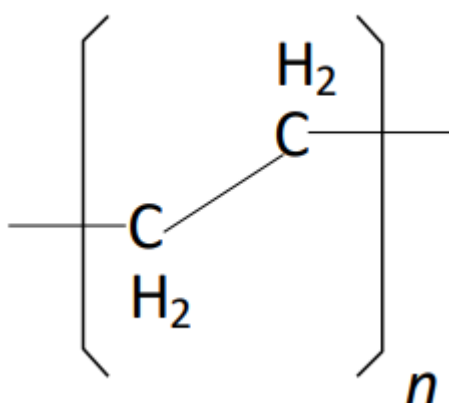
Se schopností ovládat a rozumět těmto programům je možné efektivně konstruovat a vyvíjet vstřikovací formy s vysokou přesností a kvalitou, což vede k optimalizaci výrobního procesu, zlepšení výkonnosti a konkurenceschopnosti výrobků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD DO SVĚTA POLYMERŮ

Polymerní materiály a technologie zabývající se jejich zpracováním zažívají v posledních dekádách ohromný rozvoj téměř ve všech odvětvích průmyslu. Jedná se o velkou skupinu převážně organických látek přírodního nebo syntetického původu, jež jsou složeny z dlouhých a opakujících se makromolekulárních řetězců. Tyto velké řetězce jsou tvořeny články představující základní stavební jednotku polymeru označovanou jako mer. Ta je tvořena převážně organogenními prvky jako jsou uhlík, kyslík, vodík, či dusík. Jelikož polymery jsou skupinou materiálů s obrovskou rozmanitostí, mohou obsahovat i anorganické složky jako je chlor, fluor, síra či brom. [1,2]

Na Obrázku 1 je zobrazena struktura polyethylenu, která je tvořena mnoha malými molekulami $C - H_2$, jež představují monomer ethylenu. Tyto monomery jsou procesem zvaným polymerace spojeny v jeden dlouhý řetězec. Symbol „n“ pak znázorňuje počet opakujících se jednotek ve struktuře PE. Tato hodnota se může pohybovat od několika set až po několik tisíc. [2]



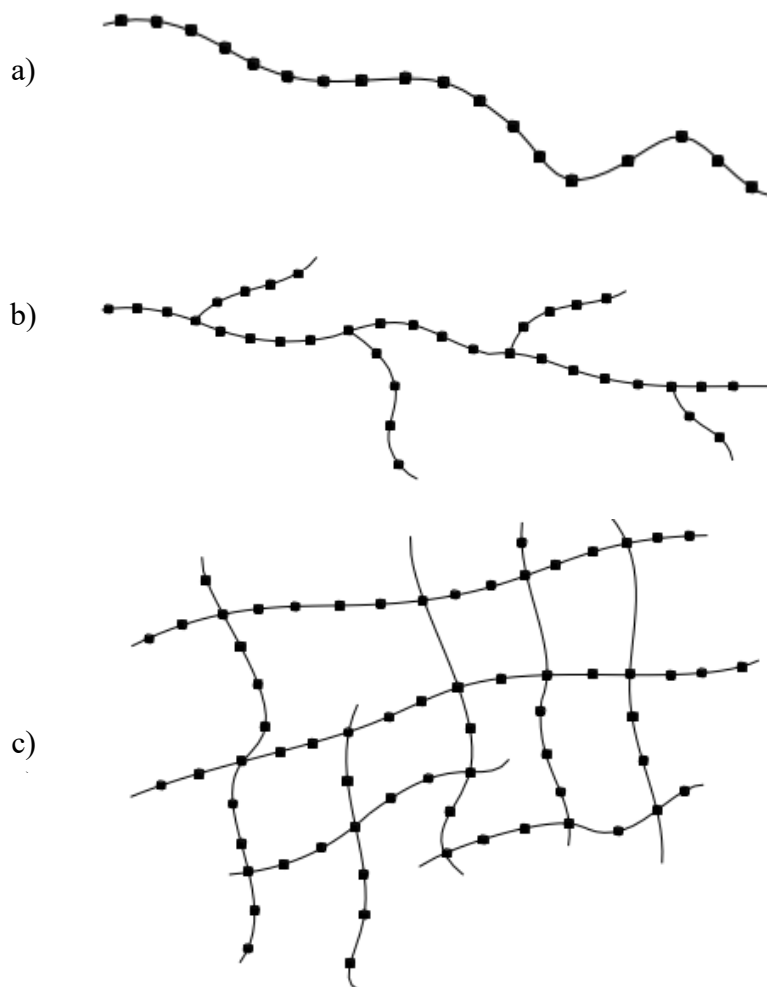
Obrázek 1 Struktura PE [2]

1.1 Klasifikace polymerních materiálů

Polymery je možné rozdělit několika způsoby, ať už na základě odlišné molekulární struktury či rozdílného způsobu zpracovatelnosti nebo způsobu syntézy. [2]

1.1.1 Podle molekulární struktury

Z hlediska molekulární struktury se polymery dělí na lineární, rozvětvené a zesíťované. Schéma znázorňující tyto struktury je uvedeno na Obrázku 2. Čáry reprezentují molekuly polymeru a černé tečky zase jednotlivé monomery. [2]



Obrázek 2 Různé struktury polymerních materiálů [2]

a) lineární, b) rozvětvená, c) zesíťovaná

Lineární uspořádání má jednotlivé monomery spojeny do jednoho dlouhého řetězce bez bočních větví. Každý monomer je tak spojen pouze se dvěma dalšími, což vede ke vzniku dlouhé a úzké molekuly. Typickými představiteli lineárních polymerů jsou PVC či HDPE. [2]

Rozvětvená struktura se vyznačuje u polymerů s nepravidelně rozmístěnými bočními větvemi v hlavním (páteřním) molekulovém řetězci. Tyto větve ztěžují jejich uspořádání, takže jsou méně husté, vykazují menší krystalinitu a snadno se zpracovávají. Počet a typ větví mají vliv na další významné fyzikální vlastnosti jako je elasticita a viskozita. Typickým zástupcem rozvětvených polymerů je LDPE. [2]

Zesíťovaná struktura se skládá z krátkých postranních řetězců nebo příčné vazby, které spojují různé řetězce do mikrostruktury síťového typu. Díky zesíťování získává materiál

větší pružnost, což umožní působit na materiál silou, která způsobí deformaci a po jejímž odeznění se vrátí do původního stavu. Významným zástupcem této kategorie je PAM. [2]

1.1.2 Podle způsobu zpracovatelnosti

Dalším hlediskem, jak lze rozdělit polymerní materiály, je způsob založený na jejich zpracovatelnosti. Liší se podle toho, zdali je možné je opakovaně roztavit či ne. Zde existují dvě velké skupiny. Termoplasty, ty je možné opakovaně roztavit a měnit tak jejich tvar a reaktoplasty, které nelze tavením opětovně měnit. [2]

Termínem termoplast se označuje takový materiál, který je při nízké teplotě pevný a se zvyšující se teplotou je schopný se měnit na viskózní kapalné skupenství, přičemž tato změna je vratná. Vzhledem k tomu, že termoplasty je možné pomocí tepla tavit a přimět k toku, je možné je zpracovávat pomocí technologie vstřikování, vytlačování či vyfukování. Do této kategorie spadají materiály jako PP, PE, PS, PC či ABS. [1,2]

Reaktoplasty jsou skupina polymerů skládající se převážně z pryskyřic, u kterých dochází k procesu vytvrzování, což je nevratná přeměna z viskózního stavu na pevný za vzniku sítí s trojrozměrnou vazbou. Vytvrzování může být vyvoláno působením tepla nebo záření případně kombinací. Reaktoplasty jsou oproti termoplastům pevnější, ale zase křehčí a díky nevratným přeměnám pak nerecyklovatelné. Patří mezi ně polyuretany, polyimidy nebo polyesterové pryskyřice. [1,2]

1.1.3 Podle způsobu syntézy

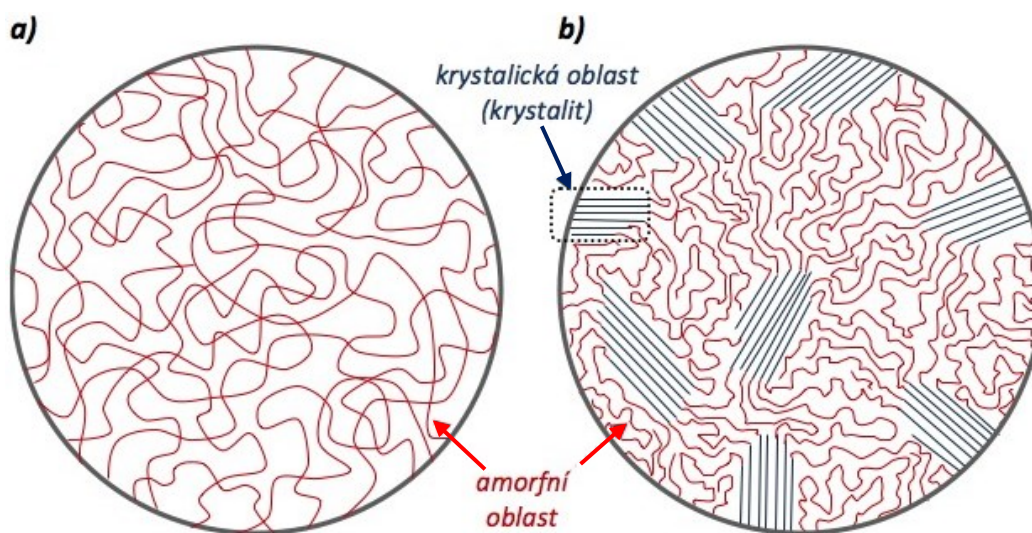
Proces slučování, nazývaný též jako polymerace, je nejdůležitější proces přeměny molekul monomerů prostřednictvím chemické reakce na polymerní řetězce nebo trojrozměrné sítě. Aby vůbec k polymeraci došlo, musí být dodáno systému potřebné množství aktivační energie. To může být realizováno skrze ohřev, působení UV záření nebo přidáním iniciátoru či katalyzátoru. Dle mechanismu se dělí polymerace na radikálovou, iontovou a na tři polyreakce – polyinzerce, polyadice, polykondenzaci. [2,3,18]

- **Polyinzerce** – je založena na principu „vsunutí“ molekuly monomeru zpravidla s dvojnou vazbou mezi dva atomy uhlíku do vazby jednoduché, nejčastěji C – H. Jedná se o řetězovou reakci, při které nevzniká další vedlejší nízkomolekulární látka. Polyinzerce je typická pro skupinu olefinů (propylen, ethylen, styren, butadien, ..) [3,18]

- **Polykondenzace** – je stupňovitá reakce během níž se velikost rostoucí molekuly mění přibližně geometrickou řadou. Chemické reakce se účastní monomery odlišného druhu, za současného odštěpení kondenzující látky, nejčastěji vody. V některých případech může vznikat také NH_3 či HCl . Polymer má jiné složení než výchozí jednotlivé monomery vstupující do reakce. Slouží k výrobě například PET, PC, PA, PBT či PPA. [3,18]
- **Polyadice** – je reakcí dvou různých monomerů s rozdílem, že nevzniká žádný vedlejší produkt. Používá se při výrobě PU či epoxidových pryskyřic. [3,18]

1.2 Uspořádání makromolekul polymeru

Makromolekuly polymeru mohou být uspořádány ve třech stupních struktury. První stupeň popisuje uspořádání atomů v makromolekule a jejich vazby mezi nimi. Druhý stupeň se zabývá uspořádáním makromolekulárního řetězce, který může být buď lineární, rozvětvený nebo zesíťovaný. Třetí stupeň charakterizuje prostorové uspořádání makromolekul polymeru, který má zásadní vliv na výsledné vlastnosti výrobku. U polymerů mohou nastat dva případy uspořádání, a to podle toho, zda dochází při chlazení taveniny k náhodnému uspořádání nebo pravidelnému viz Obrázek 3. [1]



Obrázek 3 Schéma uspořádání makromolekul polymeru [1]

a) amorfní, b) semikrystalické

- **Amorfní** nebo také náhodné uspořádání se vyznačuje náhodnými klubky, která se mohou vzájemně proplétat. Polymery s touto strukturou jsou izotropní a rozměrově stabilní. Dochází u nich k rovnoměrnějšímu smršťování a rovněž hodnoty smrštění jsou

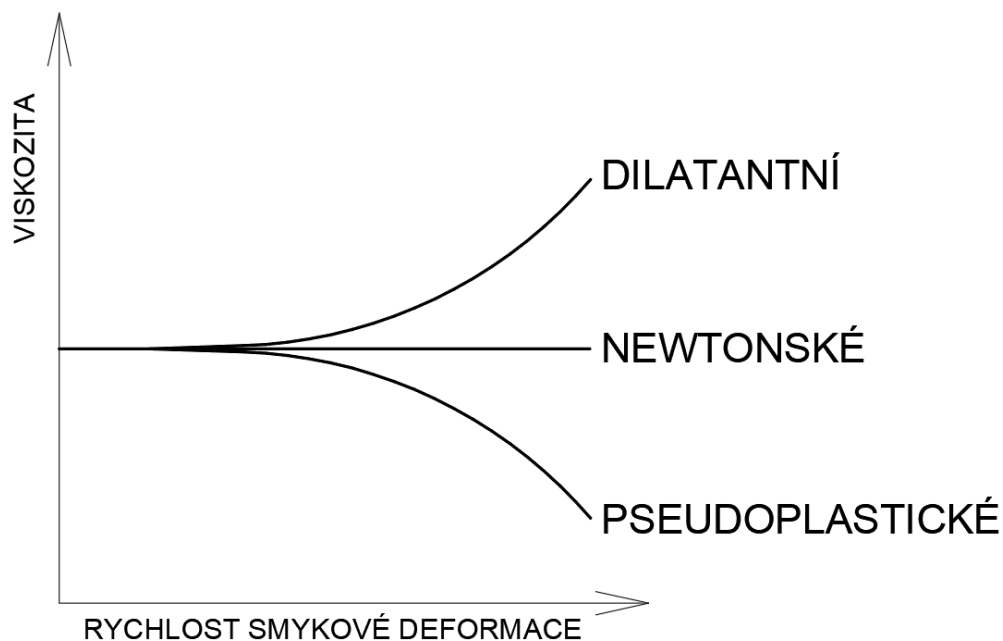
velmi nízké. Mají poměrně nízkou chemickou odolnost. Výrobky z amorfního materiálu mohou být transparentní. Typickými představiteli této kategorie jsou PS, PC, SB, PMMA. [4]

- **Semikrystalické** také nazývané jako částečně uspořádané polymery mají ve své struktuře oblasti vykazující pravidelné uspořádání makromolekul (tzv. krystality). Ke vzniku těchto oblastí dochází během procesu krystalizace ve fázi chlazení taveniny. Podíl krystalické fáze v polymeru se označuje jako stupeň krystalinity, ten se pohybuje od 10 do 80 %. Semikrystalické polymery vykazují dobrou chemickou odolnost a odolnost proti únavě. Jsou anizotropní, dochází u nich k rozdílnému smrštění v různých směrech. Z hlediska mechanických vlastností mají dobrou pevnost a modul pružnosti v tahu. Oproti amorfním polymerům mají nižší viskozitu. Mezi hlavní zástupce se řadí PP, PA, POM, PTFE nebo PE. [2,4]

1.3 Reologie polymerních tavenin

Termínem reologie se označuje vědní obor zabývající se deformačním chováním látek jakožto reakci vlivem působící síly. Mechanismus toku polymerních tavenin je zcela odlišný od toku nízkomolekulárních kapalin, jejichž chování je definováno jako newtonské, které má například voda. Newtonské kapaliny mají konstantní viskozitu se zvyšující se rychlostí smykové deformace. Tok polymerních tavenin je neneutonský, pseudoplastický. Tato skupina látek se vyznačuje poklesem viskozity při zvyšující se rychlosti smykové deformace. Třetí skupinou jsou látky dilatantní u nichž dochází k nárůstu viskozity s rostoucí rychlostí smykové deformace. Toto chování je znázorněno na Obrázku 4, kde je zobrazen vliv viskozity na rychlosti smykové deformace pro všechny tři skupiny látek. [2, 3]

Reologie polymerních tavenin zahrnuje dále pojmy jako viskozita, index toku taveniny, smrštění či tok materiálu uvnitř dutiny. Jedná se o základní vlastnosti, kterým by měl kvalifikovaný konstruktér vstřikovacích forem rozumět. [5]



Obrázek 4 Vliv viskozity na rychlosti smykové deformace různých skupin látek [6]

1.3.1 Viskozita

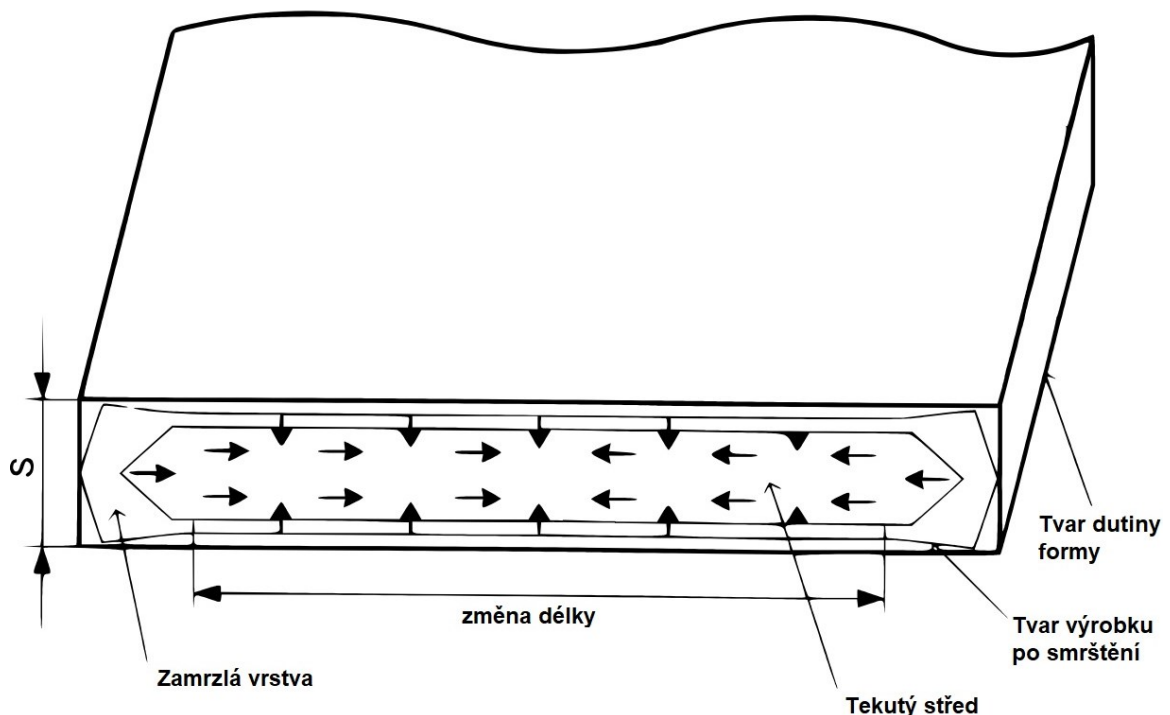
Viskozita představuje vlastnost materiálu, která je definována jako míra odporu taveniny vůči toku. Je to důležitý parametr v oblasti zpracování polymerů a určuje, jak snadno lze polymer zpracovat. Obecně platí, že čím menší hodnoty dosahuje, tím lépe teče a lépe se zpracovává. Viskozitu taveniny ovlivňují různé faktory, jako je teplota, tlak, smyková rychlost, molekulová hmotnost nebo přítomnost přísad a plniv. Dále platí, že čím vyšší je teplota, tím nižší je viskozita a tím snadněji lze polymer zpracovávat. Naopak čím vyšší je tlak nebo čím menší je smyková rychlost, tím vyšší je viskozita a tím obtížnější je polymer zpracovat. Viskozitu taveniny lze měřit různými způsoby, například kapilární reometrií, rotační reometrií nebo testováním indexu toku taveniny. Kapilární reometrie zjišťuje tlak potřebný k protlačení polymerní taveniny kapilárou o malém průměru při konstantní smykové rychlosti, zatímco rotační reometrie měří točivý moment potřebný k otáčení kruhového disku v kontaktu s polymerní taveninou. Zkouška stanovující index toku taveniny měří hmotnostní nebo objemový průtok polymerní taveniny kapilárou při konstantním zatížení. Vhodná viskozita taveniny je klíčovým faktorem ovlivňující výslednou kvalitu výrobku, efektivitu zpracování a celkovou ekonomičnost výroby. [5,7]

1.3.2 Smrštění

Smrštění významně ovlivňuje rozměry plastových výrobků vyráběných vstřikováním. Jedná se o objemovou změnu způsobenou chladnutím taveniny, která je způsobena stlačitelností, tepelnou rozpínavostí, tepelnou kontrakcí plastů a u semikrystalických polymerů ještě krystalizačními změnami. Smrštěním se rozumí rozdíl mezi rozměry dutiny formy a výrobku vyjádřený v procentech. Během návrhu vstřikovací formy musí být s touto hodnotou počítáno a příslušné tvarové části musejí být zvětšeny. Smrštění je možné rozdělit na výrobní, které vzniká během fáze chlazení a bezprostředně po vyhození dílce z formy a na dodatečné, které je způsobeno příčinou relaxace napětí, teplotou, vlhkostí nebo sekundární krystalizací u krystalických polymerů. [8,9]

Výsledné smrštění není ve všech směrech stejné a také je časově závislé. Dále na něj působí celá řada parametrů jako jsou:

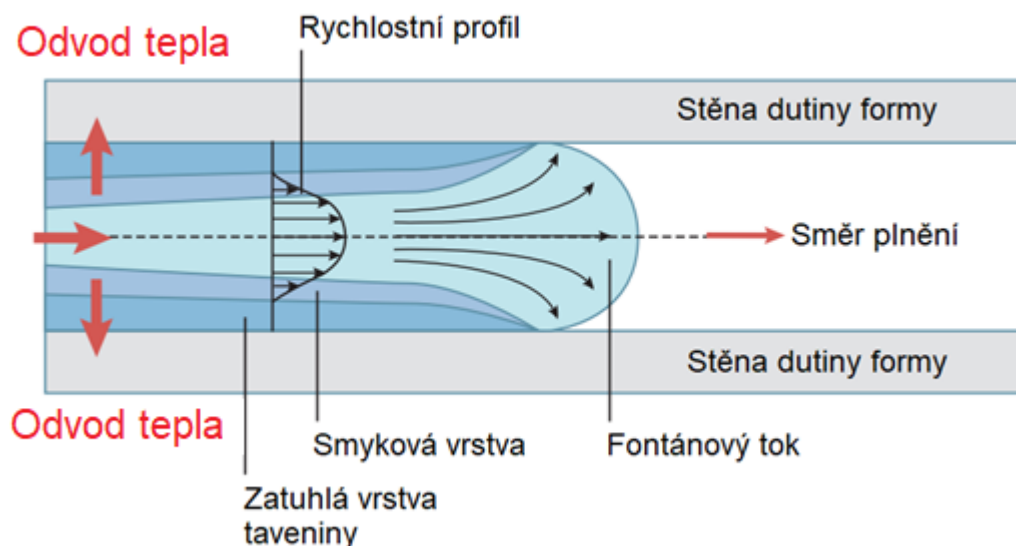
- procesní podmínky – tlak, teplota, čas,
- druh zpracovávaného polymeru – amorfní, semikrystalický, plněný, neplněný, přítomnost aditiv,
- konstrukce výrobku – především tloušťka stěn, zaoblení, umístění vtoku. [8,9]



Obrázek 5 Průběh smrštění u chlazenoucí plastové desky [8]

1.3.3 Tok uvnitř dutiny formy

Během procesu vstřikování je teplota povrchu formy zpravidla nižší než teplota vstřikovaného materiálu, z tohoto důvodu dochází k okamžitému tuhnutí taveniny na její stěně. Na čele toku má tavenina nejvyšší rychlost, směrem ke stěně dochází k jejímu poklesu. Tento jev má za následek tvorbu specifického toku taveniny nazývaného jako fontánový tok. Rychlostní profil má tvar paraboly, jejíž maximum leží uprostřed mezi stěnami dutiny formy. Dochází k laminárnímu typu proudění, které je žádoucí pro dokonalé plnění. Zatuhlá vrstva na stěnách se s časem zvětšuje a zmenšuje tak otvor pro plnění, což může mít za následek kompletní zatuhnutí a nedotečení výrobku. Z tohoto důvodu je nutná správná konstrukce výrobku, vtokového systému, vtokového ústí a taktéž správné nastavení procesních podmínek na stroji. [8,10]



Obrázek 6 Fontánový tok při plnění dutiny [10]

1.4 Aditiva v polymerech

Samostatné polymerní materiály nejsou příliš vhodné pro zpracování a následnému používání, z tohoto důvodu se doplňují o takzvaná aditiva, čímž vznikají polymerní směsi. Například polypropylen by bez aditiv nebyl jeden z nejpoužívanějších polymerů. K jeho rozkladu by docházelo v rámci několika týdnů, jelikož má malou odolnost vůči oxidaci. Přísady proto také ovlivňují odolnost finálního výrobku, životnost, vzhled, mechanické vlastnosti nebo cenu. [3,11]

1.4.1 Stabilizátory

Stabilizátory mají za úkol zpomalit degradaci a zlepšit odolnost polymeru za vyšších teplot v důsledku jejich zpracování. Tepelná degradace materiálu se projevuje výrazným zhoršením jeho užitečných vlastností a také dochází ke změně zbarvení, křehnutí, praskání a drolení. Při návrhu vhodného stabilizátoru je potřeba brát v úvahu i další přísady, jako jsou změkčovadla a plniva, která degradaci často urychlují.

Zvláštní skupinu pak tvoří antidegradanty, což jsou přísady, které chrání dlouhodobě polymerní výrobek před vnějšími vlivy jako je sluneční svit (UV stabilizátory), ozon (antiozonanty) nebo atmosférický kyslík (antioxidanty). Tyto látky zpomalují postupné zhoršování vlastností polymerů stárnutím. [3,11]

1.4.2 Barviva

Tato skupina přísad nazývaná také jako pigmenty dodává polymerům požadovaný odstín. Jsou to látky anorganického i organického původu, přičemž organické sloučeniny jsou schopny se v polymeru rozpustit a zachovat tak průhlednost u amorfních polymerů. Při volbě vhodného barviva je potřeba dbát, aby byl dostatečně odolný vůči běžným zpracovatelským teplotám. [3,11]

1.4.3 Plniva

Přidáním plniva do polymerního materiálu vzniká kompozitní materiál. Kompozit je označení pro materiálovou strukturu, jenž vznikne ze dvou a více složek odlišných vlastností, které vytváří spolu synergický účinek. Polymer s ostatními aditivami má funkci matrice – pojiva a plnivo tvoří výtzuž. Přidávání plniv do polymerů se používá již od počátku jejich průmyslového využití, kdy hlavním důvodem bylo snížení jejich ceny a zlepšení užitečných vlastností. [3,11]

Plniva mohou být částicová, vyztužující nebo nanoplňiva. Částicová plniva se často přidávají za účelem snížení ceny drahé polymerní matrice. Z tohoto důvodu se používá například mastek, uhličitan vápenatý, dřevitá moučka nebo skleněné kuličky. Do kategorie vyztužujících plniv se řadí skelná vlákna, uhlíková, přírodní, aramidová či kovová. Ty mají za úkol dodat výslednému materiálu zejména tuhost, pevnost a také tvarovou stálost. Naopak zvyšují anizotropii smrštění, která způsobuje problémy při zpracovatelských procesech a celkovou cenu. Nanoplňiva jsou materiály, jejichž jeden rozměr se pohybuje v řádech nanometrů, čímž se více blíží velikosti molekuly polymerní matrice. Takto malá částice

umožňuje velmi blízké spojení s matricí, což má za následek zlepšení mechanických vlastností, při jejich malém procentuálním obsahu. Tato vlastnost také vede ke snížení hmotnosti vstřikovaného výrobku v porovnání s běžnými plněnými termoplasty. Nanoplňivem mohou být jíly (např. montmorillonit) nebo uhlíkové nanotrubičky. Tabulka některých druhů plniv a jejich vliv na vlastnosti PTFE je uvedena níže. [3, 12]

Tabulka 1 Vliv plniv na vlastnosti PTFE [12]

modrá – neutrální vliv, zelená – pozitivní, červená – negativní

| Vlastnost | Typ plniva | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------|
| | Sklo (až do 40 %) | Uhlí (až do 35 %) | Černé uhlí (až do 50 %) | Grafit (až do 15 %) | MoS ₂ (až do 5 %) | Bronz (až do 60 %) | Ocel (až do 60 %) |
| Opotřebení | | | | | | | |
| Abrázivita (nástroje) | | | | | | | |
| Chemická odolnost | | | | | | | |
| Tepelná vodivost | | | | | | | |
| Kluzné vlastnosti | | | | | | | |
| Koeficient tření | | | | | | | |
| Tvrдость | | | | | | | |
| Tuhost | | | | | | | |

1.4.4 Plastifikátory

Plastifikátory neboli změkčovadla jsou organické sloučeniny používající se ke změkčení polymeru, čímž dojde ke snížení jeho tvrdosti, tuhosti a zvýší se tažnost, tvárnost, houževnatost a ohebnost. Navíc snižují viskozitu polymerní taveniny. Princip působení změkčovadel je založen na zvyšování vnitřní pohyblivosti makromolekul. Nejčastěji nachází uplatnění při výrobě PVC a přípravě kaučukových směsí. [3,11]

1.4.5 Maziva

Lubrikanty (maziva) se přidávají do polymerních směsí za účelem zlepšení zpracovatelských vlastností. Významně snižují viskozitu polymerní taveniny, čímž zvyšují tekutost, dále snižují přilnavost polymerních materiálů ke zpracovatelským strojům a nástrojům, usnadňují odformování, zvyšují lesk, tepelnou stabilitu a odolnost vůči povětrnostním vlivům. Maziva jsou látky založeny na kombinaci uhlovodíků, mastných kyselin, vosků nebo těžkých alkoholů. [3,11]

1.4.6 Retardéry hoření

Jelikož jsou polymery materiály na bázi uhlíku, tak je lze spalovat, pokud je přítomen kyslík a teplo. Úkolem retardéru hoření je zabránit nebo zpomalit proces hoření. K tomuto účelu se používají sloučeniny obsahující halogenové prvky jako jsou fluor, chlor, brom nebo jód. Dále se používají přísady na bázi hydroxidů kovů, z nichž nejvíce užívaný je hydroxid hořečnatý. Poslední skupinou retardérů jsou sloučeniny na bázi fosforu a křemíku. [3,11]

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování hraje významnou roli v oblasti zpracování polymerů. Umožňuje výrobu plastových výrobků s různými tvary, velikostmi a složitostmi za relativně krátkou dobu a s vysokou přesností. Tento proces se široce využívá v průmyslových odvětvích od automobilového průmyslu až po spotřební elektroniku a lékařské přístroje. Vstřikováním lze zpracovávat také reaktoplasty či kaučukové směsi. Vstřikování se řadí mezi cyklické tvářecí procesy. Výrobky nemusejí mít pouze charakter konečného výrobku, ale je možné vyrábět i polotovary či dílce, které slouží pro další zkompletování do samostatného výrobního celku. Klíčovou roli zde hraje nástroj nazývaný jako vstřikovací forma, která nese negativ požadovaného výrobku, dále pak stroj, na kterém je realizována výroba, označovaný jako vstřikovací stroj. [10,13]

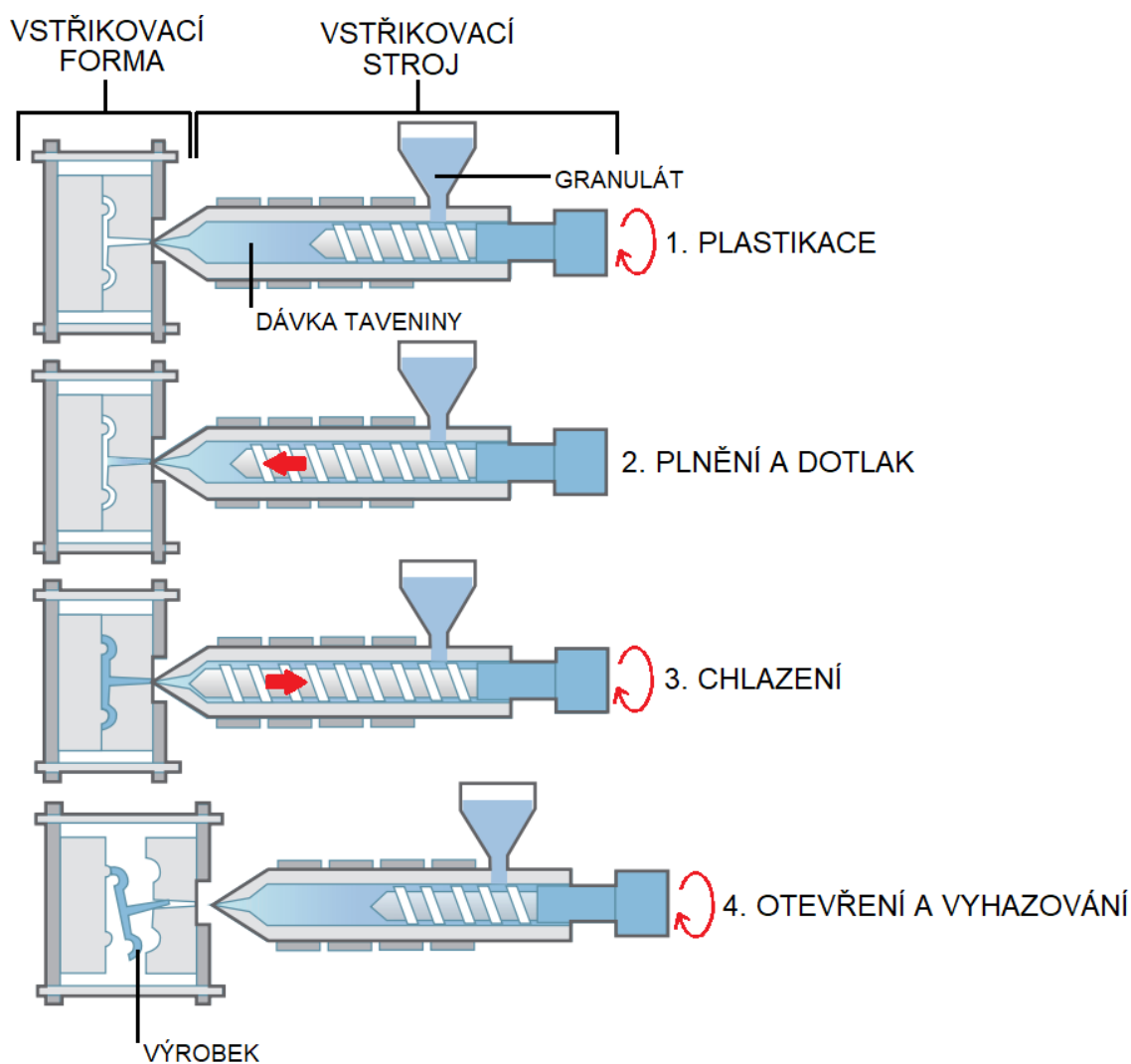
Mezi další nesporné výhody patří vysoká míra opakovatelnosti spolu s výbornou kvalitou povrchu. Nevýhodami ovšem jsou velké pořizovací náklady na stroje, formy, periferie ke strojům či transportní zařízení. Z tohoto důvodu nachází uplatnění především při velkosériové výrobě. [13]

Sled od návrhu a vývoje výrobku až po samotnou sériovou výrobu lze popsat čtyřmi fázemi:

- 1) Designování výrobku podle jeho požadované funkce, vzhledu, materiálu a procesů s následným předáním podkladů (3D dat, výkresů) pro konstruktéry vstřikovacích forem.
- 2) Konstruktéři provádějí brainstorming a navrhují konstrukci formy. Současně probíhá simulace vstřikování, dochází ke konzultaci s technologií ohledně vyrobitelnosti. Po poradě se zahajuje výroba, vyrobená forma putuje do lisovny, kde se upíná na stroj.
- 3) Nástrojaři a procesní inženýři provádějí testování, aby získali vhodné procesní podmínky k zahájení hromadné výroby. Výrobky odesílají na měření, poskytují zpětné komentáře a navrhují úpravy. Zkoušení se provádí do té doby, než jsou získány excelentní výsledky.
- 4) Po optimalizaci procesu, popřípadě designu formy se zahajuje hromadná výroba. Ta může být až plně automatizovaná, což spočívá v zajištění vstupních surovin až po dopravu vyrobených dílců bez nutnosti zásahu operátora. [10]

2.1 Fáze vstřikovacího cyklu

Proces začíná nasypáním vstupní suroviny – granulátu do násypky vstřikovacího stroje. Odsud je materiál odebrán pracovní částí stroje, kterým bývá zpravidla šnek do prostoru, kde dochází k jeho plastifikaci vlivem topných elementů a disipace. Vzniklá dokonale zhomogenizovaná polymerní tavenina se hromadí před čelem šneku, kde je připravena ke vstřikování. Dopředným pohybem šneku dochází k samotnému vstřikování, tavenina opouští stroj a putuje skrze vtokovou vložku do dutiny vstřikovací formy. Následuje přepnutí stroje na dotlak, který zaručí dokonalé vyplnění všech míst dutiny. Poté nastává chlazení výstřiku až na teplotu odpovídající jeho bezpečnému odformování. Cyklus končí otevřením formy a vyhozením výrobku. Fáze vstřikovacího cyklu, které významně ovlivňují stav výstřiku a následně jeho kvalitu, lze rozdělit na čtyři úseky. Schematické znázornění cyklu je zobrazeno na Obrázku 7. [3,13]



Obrázek 7 Schéma vstřikovacího cyklu [10]

2.1.1 Plastikační fáze

Předpokladem pro optimální naplnění dutiny formy taveninou je zabezpečení teplotní a viskozitní homogenity v dávce připravené před čelem šneku, které lze ovlivnit správným nastavením teplot na jednotlivých pásmech stroje, zpětným odporem na šneku a otáčkami šneku. V případě, že dávka taveniny nebude teplotně a viskózně homogenní, vzniknou studené spoje, vnitřní pnutí nebo budou patrné tokové čáry. Během plastikace polymerů je potřeba dbát, především u aditivovaných materiálů, na dobu výdrže na zpracovatelské teplotě, kdy po překročení nastává tepelná degradace a tím jeho znehodnocení. [3,10,13]

2.1.2 Vstřikovací fáze

Cílem vstřikovací fáze je naplnění dutiny formy homogenní taveninou tak, aby rychlost čela toku taveniny byla v každém místě průřezu dutiny konstantní. U tvarově jednoduchých výrobků s neměnnou tloušťkou stěny je možné tento požadavek víceméně dodržet, v případě složitých dílců s rozdílnou tloušťkou je to problematické, a to i při využití simulací. Rychlost vstřikování má vliv na vady vzniklé na povrchu jako zvrásnění, tokové čáry, stopy po studených spojích atd. [3,10,13]

2.1.3 Dotlaková fáze

Průběh a doba působení dotlaku musí být volena tak, aby bylo dosaženo požadovaného tvaru, rozměrů a hmotnosti dílce. Na stroji je potřeba nastavit vhodné parametry jako je doba dotlaku, tlaková úroveň a profil dotlaku, který dělí dobu dotlaku na jednotlivé časové segmenty s různou hodnotou tlaku. V případě, že je nastavena dlouhá doba působení nebo vysoká hodnota tlaku, hrozí nebezpečí vzniku přetoků v dělicích rovinách a také se stává proces neekonomický prodlužováním doby cyklu či přetěžováním stroje. Dotlaková fáze má vliv na smrštění a tím spojené výsledné rozměry, eliminuje lunkry, bubliny, propadliny a je schopna zajistit dokonalé okopírování požadovaného dezénu. [3,10,13]

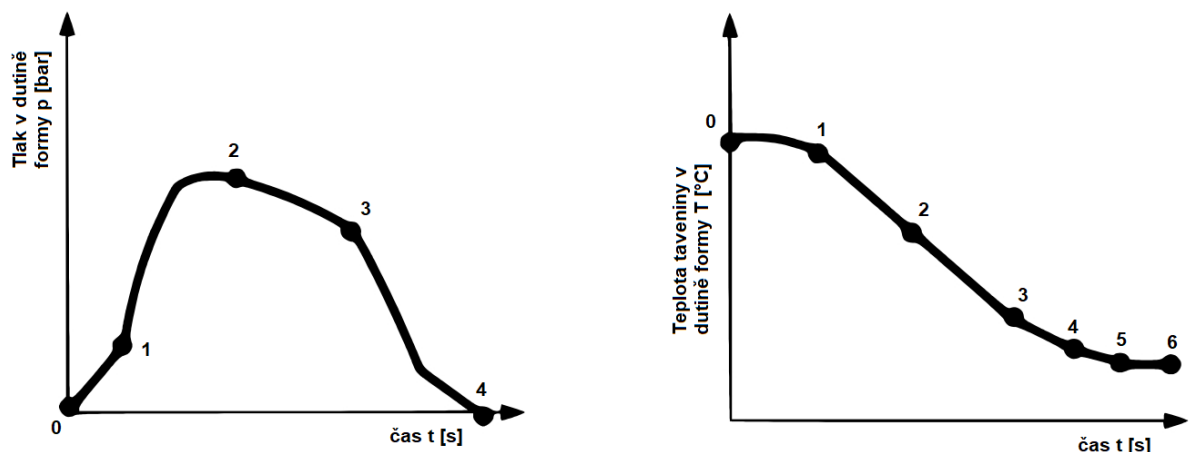
2.1.4 Fáze chlazení

Chlazení začíná již při prvním kontaktu taveniny s povrchem dutiny formy a trvá až do vyhození výrobku z formy. Parametry, které řídí dobu chlazení, jsou teplota formy a doba ochlazování. Minimální doba chlazení musí zaručit, že výrobek bude ochlazen na bezpečnou teplotu tzn., že nedojde k jeho propíchnutí vyhazovači nebo jejich zaboření. Z hlediska

požadavků na kvalitu (rovnoměrná struktura výrobku, minimální vnitřní pnutí a anizotropie) by měla být ochlazovací fáze co nejdelší, naopak z ekonomického hlediska je snahou mít proces co nejkratší. Skutečný čas je pak kompromisem mezi kvalitou a cenou vycházející z požadavků zákazníka. [3,10,13]

2.2 Vstřikovací cyklus v p-v-T diagramu

Vstřikovací cyklus je možné popsat také pomocí stavových termodynamických veličin, jako je tlak – p, měrný objem – v a teplota – T. Průběh stavových veličin je v každém místě na výrobku jiný. Je ovlivněn druhem plastu, tvarem výstřiku, tloušťkou stěn, teplotou taveniny a formy, vstřikovací rychlostí a dotlakem. Jakákoliv změna některé z veličin má vliv na strukturu, hmotnost a rozměry výrobku. Diagram p-v-T má v současnosti velký význam jak při simulování procesu vstřikování, tak při samotném zpracování plastů pomocí moderních strojů řízených mikroprocesory. [8,13]



Obrázek 8 Průběh teploty a tlaku v dutině formy v závislosti na čase [8]

Diagram p-v-T má šest stěžejních úseků (Obrázek 9):

0–1: Nastává plnění tvarové dutiny formy polymerní taveninou, v bodě 1 je dutina naplněna.

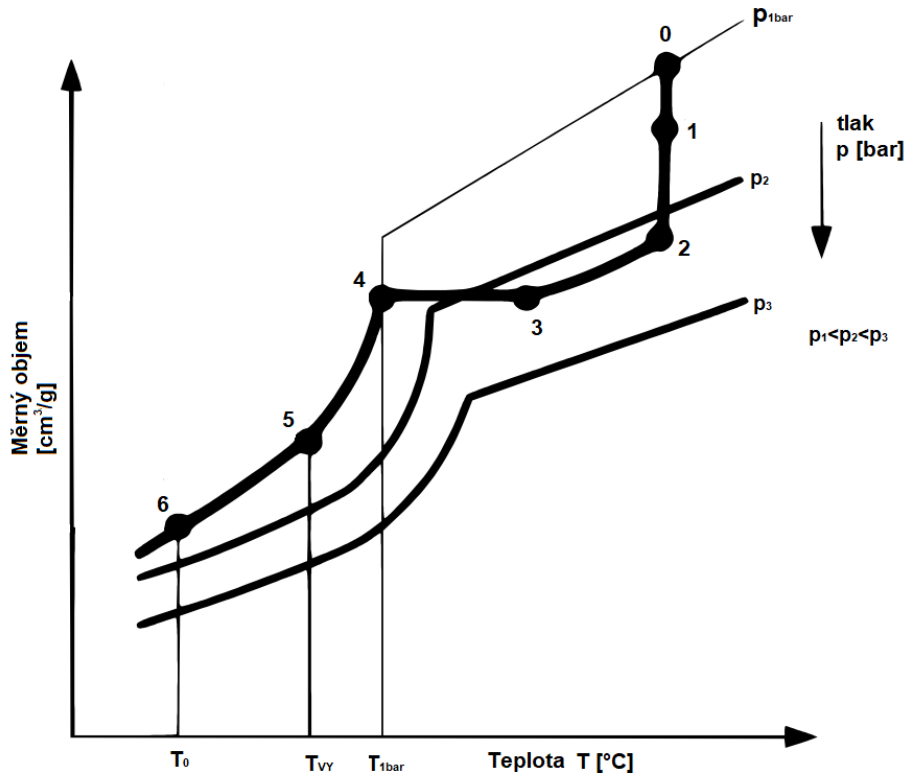
1–2: Dochází ke stlačování taveniny až do bodu 2, kdy se přepíná stroj ze vstřikovací fáze na dotlak. Při optimálním procesu je dosaženo v bodě 2 maximálního tlaku.

2–3: Během dotlakové fáze probíhá chlazení taveniny a smršťuje se výrobek. Smrštění je kompenzováno právě dotlakem, který stále dodává do dutiny taveninu. Fáze končí bodem 3, kdy zatuhne vtokové ústí.

3–4: Dochází k poklesu tlaku až na hodnotu atmosférického tlaku za konstantního objemu výstřiku.

4–5: Výstřik je neustále ochlazován až na vyhazovací teplotu, kterou dosahuje v bodě 5. Následně se forma otevře a dochází k vyhození.

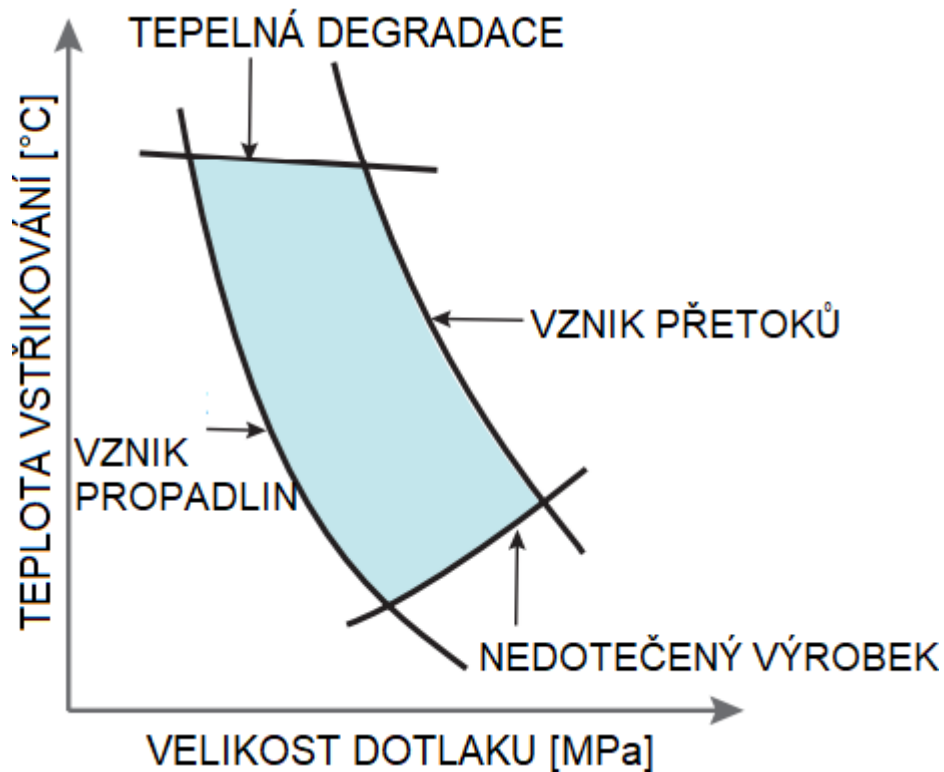
5–6: Probíhá chlazení výrobku mimo formu. Ustaluje se tvar a rozměry po 16 až 48 hodinách od vyjmutí z formy v závislosti na složitosti dílce a druhu polymeru. [8,13]



Obrázek 9 p - v - T diagram pro vstřikování termoplastů [8]

2.3 Procesní okno

Teplota a tlak jsou jedním z hlavních parametrů doprovázející proces vstřikování, proto jejich správné nastavení hraje důležitou roli pro vznik kvalitních výrobků. Vztah mezi zadaným dílem, zpracovávaným materiálem a výrobním procesem lze zanést do takzvaného procesního okna. To představuje oblast, která zaručí produkci dílců s dobrou jakostí. Při překročení hranice této oblasti vznikají výrobní vady jako jsou přetoky, propadliny, nedotečená místa nebo spálené díly. Grafické znázornění procesního okna je uvedeno na Obrázku 8. [10,13]



Obrázek 10 Procesní okno technologie vstřikování [10]

2.4 Modifikace procesu vstřikování

Výše popsany standardní postup vstřikování termoplastů, kdy se ke vstřikování používá šnekový vstřikovací stroj s horizontálním uložením šneku a s hlavní dělicí rovinou, která je na něj kolmá, má spoustu modifikací a variant, jenž mají své důležité postavení v moderním průmyslu. Tyto metody byly vyvinuty za účelem zvýšení užité hodnoty výrobku – vyšší složitosti a funkčnosti dílců, získání lepších mechanických a fyzikálních vlastností nebo zefektivnění výroby. [3,15,18]

2.4.1 Vícemateriálové vstřikování

Princip této technologie je založen na vstřikování dvou a více typů materiálu do jedné tvarové dutiny. Na výrobku nejsou přesně definována materiálová rozhraní. Do této kategorie spadá vstřikování sendvičové, sekvenční a mramorové. [3,17]

- **Sendvičové vstřikování**

Příprava taveniny probíhá ve dvou oddělených plastikačních jednotkách, jejichž dávku řídí jehlový ventil. Skrze něj se nejprve vstříkne dávka první taveniny, která bude tvořit povrchovou vrstvu výrobku. Následně dojde k přestavení jehlového ventilu a nastává plnění stejnou vtokovou soustavou druhé polymerní taveniny, ta bude tvořit ve finálním výrobku

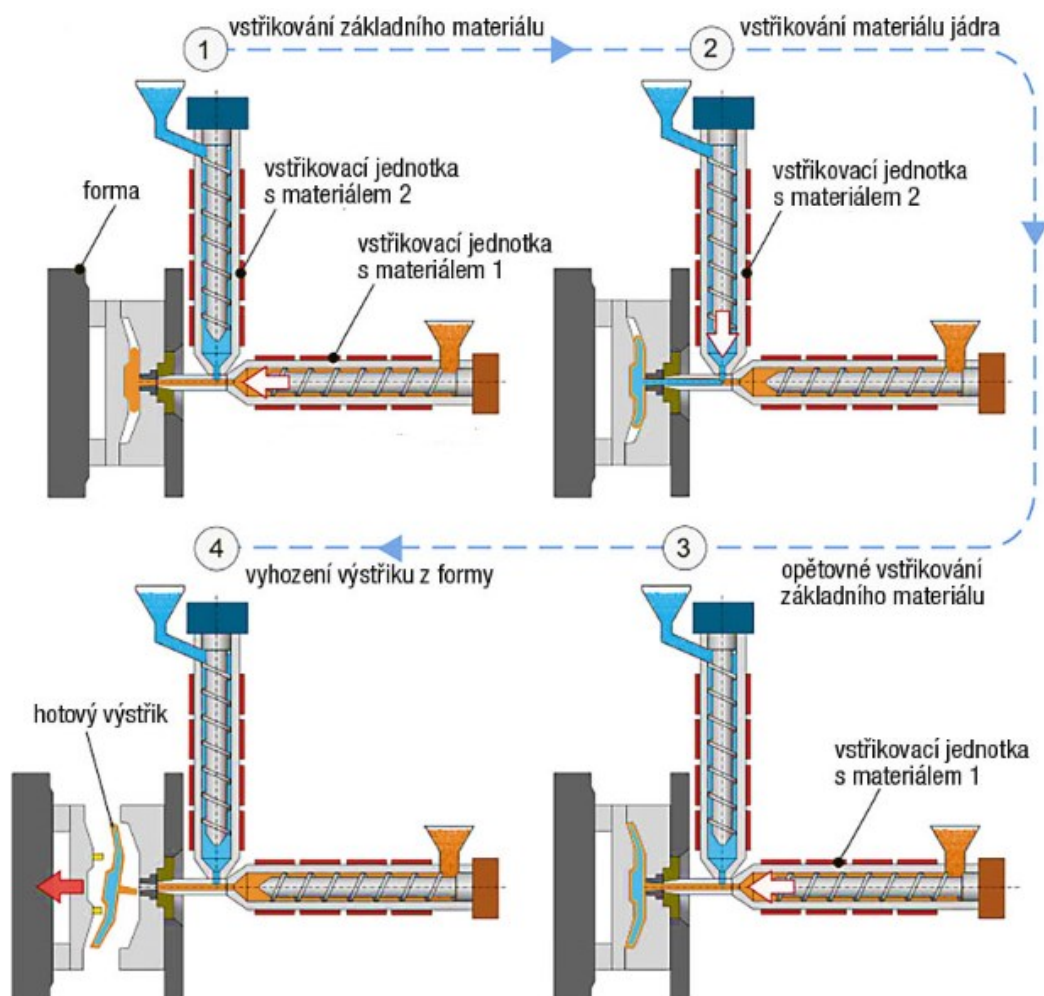
jádro. Po naplnění dutiny dojde opět k přenastavení na základní materiál a přepnutí stroje na dotlak. Cyklus končí standardním způsobem vstřikování. [3,17]

- **Intervalové vstřikování**

Jedná se o vstřikování jednoho druhu materiálu, ale ve více barevných provedeních. Plastikační jednotky s různými odstíny dávají střídavě taveninu do míchací trysky, kde se taveniny potkají a odsud následně vstupují do vtokového systému. Na výsledném výrobku jsou patrné odlišné barevné sekvence. [3,17]

- **Mramorové vstřikování**

Princip spočívá v dávkování granulátu s odlišným barevným odstínem do vstřikovacího stroje. Ten je vybaven namísto šneku hnětacím členem, který v sobě spojuje píst a plastikační šnek. V důsledku toho vznikají v polymerní tavenině barevné vrstvy orientované ve směru posuvu k trysce stroje. Podobně jako u intervalového vstřikování je produktem výrobek s různou barevnou škálou. [3,17]



Obrázek 11 Průběh vícemateriálového sendvičového vstřikování [3]

2.4.2 Technologie zastříkování, obstříkování

Postup při této technologii začíná vložením předem připraveného komponentu nebo komponenty do formy v požadované poloze. Poté, co se forma uzavře, dojde k zastříknutí daného dílu polymerní taveninou. Po ochlazení na vyhazovací teplotu se forma otevře a výrobek je odejmut. Na účinnost chlazení má vliv nejen temperační systém a polymerní materiál, ale také vložená součást. Zastříkovaný díl (insert) může být kovový, textilní nebo plastový. Plast, kterým je vložený díl obklopen, má funkci nosiče a taktéž zabezpečuje rozměrovou a tvarovou stabilitu. Cílem celého procesu je zvýšit užité vlastnosti kompletního výrobku kombinací vlastností dílčích komponent. [3,15]

2.4.3 Vstříkování s podporou plynu a vody

Technologie vstříkování termoplastů za podporu plynu spočívá v tom, že se do definovaných míst chladnoucí polymerní taveniny v dutině formy přivede plyn, který utvoří vnitřní dutiny. V případě použití vody se přivede do chladnoucího jádra výstřiku tlaková voda a dosáhne se stejného efektu. Obě tyto metody se používají za účelem vytváření dutin na výrobku, zkrácení cyklu, vstříkování výrobků s rozdílnou tloušťkou stěn, minimalizace deformací a zvýšení rozměrové stability. [14,15]

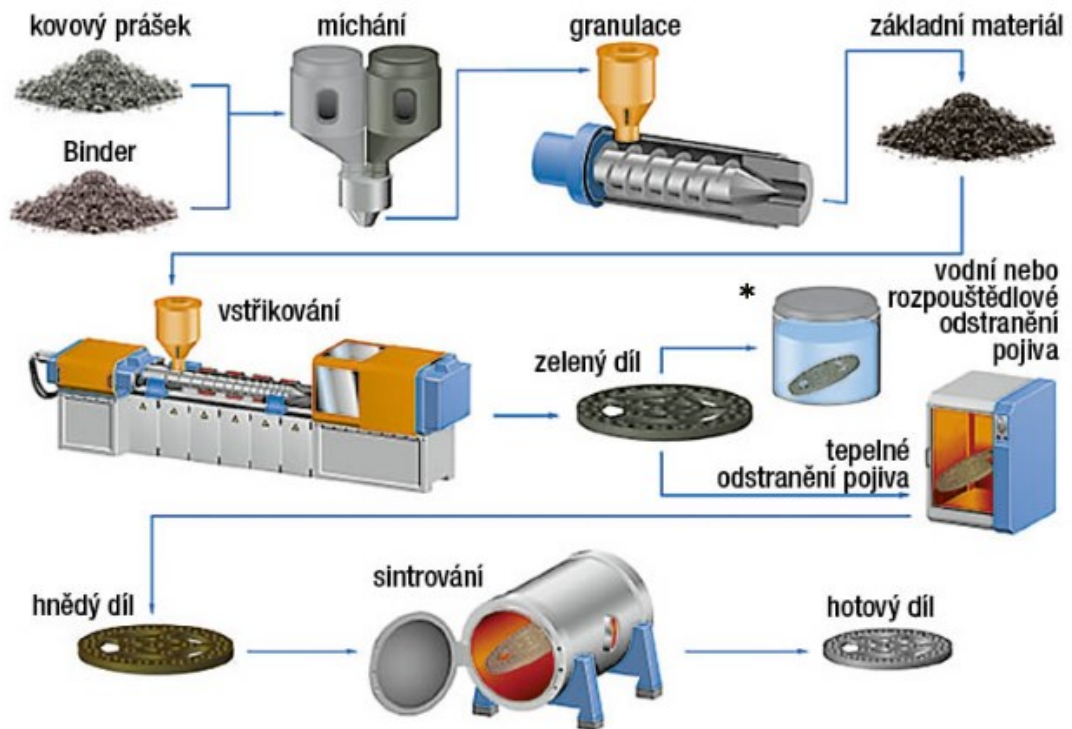
2.4.4 Vstříkování lehčených polymerů

Při vstříkování lehčených polymerů se využívá fyzikální nebo chemické nadouvadlo, což je látka, která se za zpracovatelských teplot rozkládá a vytváří plyn, jenž pak ve výrobku způsobí póry. Výrobky z lehčených polymerů se vyznačují napěněným jádrem a pevnou povrchovou vrstvou. Taktéž je možné vytvářet kompaktní jádro a lehčený povrch. Existuje několik způsobů výroby lehčených struktur, mezi nejznámější se řadí technologie MuCell a Co-vstříkování. Během Co-vstříkování se připravuje v jedné plastikační jednotce klasická polymerní tavenina a ve druhé polymer s nadouvadly. Nejprve se vstříkne polymerní tavenina, která bude vytvářet povrch výrobku a následně napěněné jádro. Vstříkování lehčených výstřiků se provádí s cílem snížit hmotnost výrobku, zvýšit izolační vlastnosti nebo minimalizovat vnitřní pnutí. [14,15]

2.4.5 Vstříkování kovových a keramických prášků

Princip obou metod vychází ze standardního postupu vstříkování termoplastů. Teplem tavitelný polymerní materiál s vysokým obsahem práškového plniva (keramického nebo kovového) se vstříkuje do formy. Termoplast ve směsi má funkci pojiva a taktéž umožňuje

její tok. Po vyjmutí z formy se musí odstranit teplem nebo rozpouštědlem, čímž se získá těleso tvořené pouze práškovým plnivem. Proces končí sintrováním v peci za vysokých teplot a za použití vakua, kdy se získá konečný výrobek tvořený kovem nebo keramikou. [15]



Obrázek 12 Proces vstřikování prášku [3]

2.4.6 Vstřikování reaktoplastů

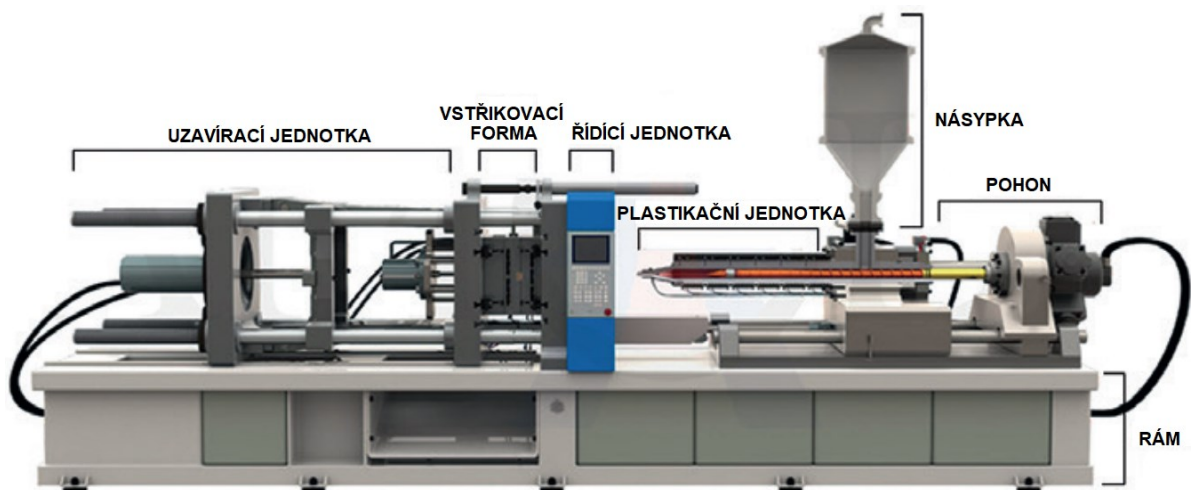
Vstřikování reaktoplastů probíhá na konstrukčně podobných strojích jako vstřikování termoplastů. Plastičnická jednotka zde není vybavena elektrickými topnými pásy, ale je temperována tlakovou vodou, rovněž i šnek je možné temperovat, a to za pomoci vnitřních kanálů. Temperací je možné regulovat vytvrzovací proces ve stroji. Vstřikovací forma je zde vyhřívána na požadovanou teplotu umožňující vytvrzování, při kterém dochází k zesíťování výrobku. Po vytvrzení je forma otevřena a výrobek je vyhozen. [3,13]

3 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Vstřikovací stroje jsou primárně určeny pro zpracování polymerních materiálů dodávaných nejčastěji ve formě pelet, granulí či prášků. Slouží pro dopravu vstupní suroviny do pracovní části, jejímu převedení na taveninu a následnému vstříknutí do tvarové dutiny. Rovněž řídí pohyby formy během vstřikovacího cyklu. Samotný stroj se skládá ze třech hlavních modulů – plastikační jednotky, uzavírací jednotky a řídicí jednotky. [10,21]

Na základě několika kritérií je možné stroje rozdělit podle:

- pracovního členu v plastikační jednotce na: šnekové, pístové,
- pohonu zajišťujícího pohyby v hlavních osách stroje na: elektrické, hydraulické, hybridní,
- směru pohybu uzavírací jednotky na: horizontální, vertikální.
- maximální síly, kterou je uzavírací jednotka schopna vyvinout na: malé, střední, velké,
- počtu šneků na jednošnekové, vícešnekové. [19]

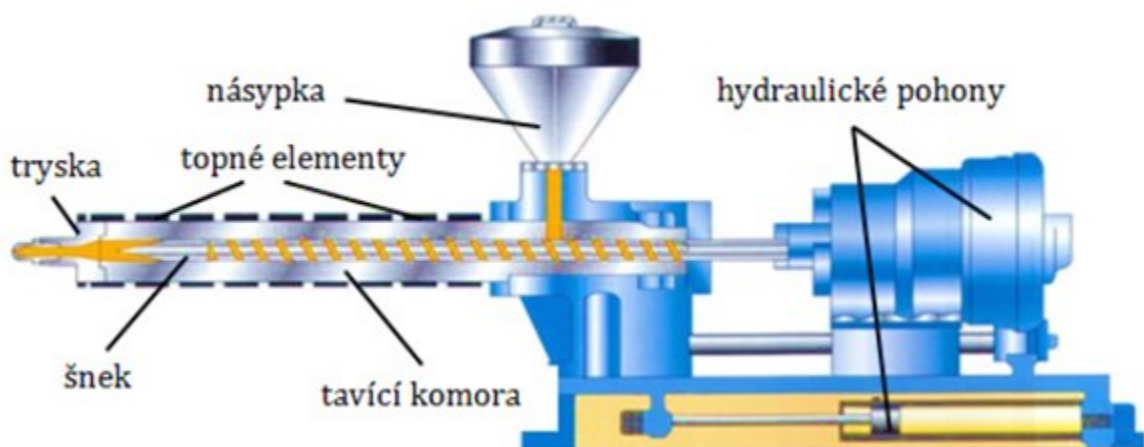


Obrázek 13 Popis vstřikovacího stroje [10]

Jelikož se jedná o velmi drahá a nákladná zařízení, nacházejí uplatnění zejména pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Mezi nejvýznamnější světové výrobce a dodavatele strojů se řadí Arburg, Engel, Fanuc, Mitsubishi nebo Krauss Maffei. Jeho správná volba závisí především na velikosti formy, znalosti objemu výstřiků včetně vtokového systému, požadované uzavírací síly, vzdálenosti mezi vodícími sloupky nebo maximální velikosti upínacích desek pro umístění formy. [19]

3.1 Plastikační jednotka

Plastikační jednotka má za úkol převést tuhý polymer do stavu vysoce viskózní taveniny, a tou vyplnit tvarovou dutinu vstřikovací formy s co nejlepší tvarovou a rozměrovou přesností. Pracovním elementem bývá buď píst nebo šnek. V současnosti však jsou pístové stroje nahrazeny šnekovými, a to z důvodu jejich nesporných výhod. Ty spočívají v dokonalé plastikaci a homogenizaci roztaveného materiálu, vysokým plastikačním výkonem bez přehřívání materiálu v tavicí části. Plastikační jednotka je uvedena na Obrázku 7, násypka tvoří vstupní část pro polymerní materiál, na ni navazuje tavicí (plastikační) komora, jenž je opatřena topnými elementy. Komora je zakončena tryskou, která ve fázi vstřikování těsně dosedá na vtokovou vložku vstřikovací formy. Uvnitř komory je pak umístěn šnek se specifickou geometrií. Na zpracovávaný materiál působí teplo z topných elementů a tření mezi stěnou komory a šnekem. Až 70 % tepla je získáváno vlivem tření, což má příznivý dopad na ekonomickou stránku výroby. [19]



Obrázek 14 Plastikační jednotka [19]

Šnek má tři funkční pásma: (Obrázek 15):

1) Vstupní

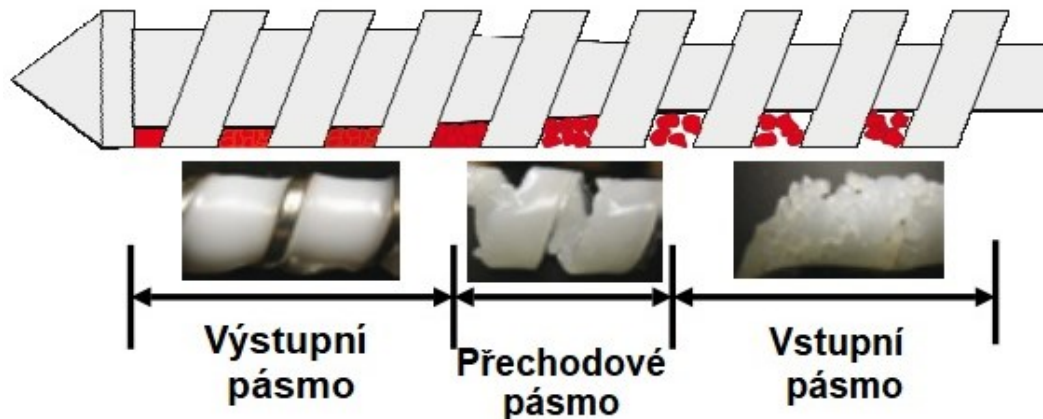
Vstupní pásmo slouží k dopravě granulátu a jeho předehřívání. Šnek má zde konstantní hloubku závitů s nejmenším průměrem jádra. Ve vstupní části nesmí docházet k jeho roztavení. [21]

2) Přechodové

V přechodové zóně se hloubka závitů postupně snižuje, materiál se taví a míchá. Průchodem materiálu skrze toto pásmo dochází také k jeho stlačování, čímž se dostávají těkavé látky a vzduch ven z materiálu. Tato zóna se označuje také jako tavicí. [21]

3) Výstupní pásmo

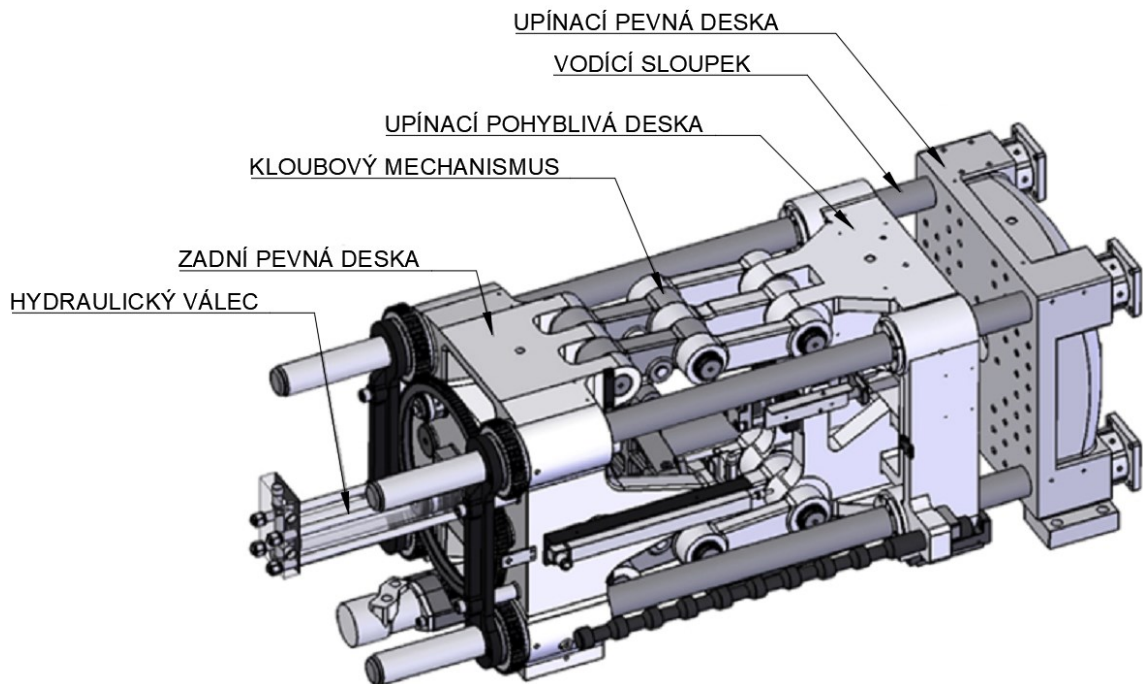
Poslední část šneku se nazývá jako výstupní a je zde v porovnání s předchozími nejmenší výška závitů. Úkolem tohoto pásma je dokonalá homogenizace taveniny a její doprava před čelo šneku. [21]



Obrázek 15 Pásma šneku [21]

3.2 Uzavírací jednotka

Úkolem uzavírací jednotky je zařídit plynulý pohyb vstřikovací formy během cyklu. K uzavření formy je potřeba vyvinout dostatečnou uzavírací sílu tak, aby se forma během procesu neotevřela. V současné době umožňují stroje nakonfigurovat přesnou velikost této síly a také rychlost pohybu při otevírání a zavírání. V případě, že by došlo k pootevření formy během vstřikování vlivem malé síly, vznikaly by vady na výrobku jako jsou přetoky a rovněž by hrozilo její poškození. Velikost uzavírací síly je primárně dána vstřikovacím tlakem, plochou dutiny včetně vtoků v dělicí rovině. Uzavírací jednotka se skládá z pevné a pohyblivé desky, na které se upíná forma, vodících sloupků a samotného mechanismu, jenž pohybuje s formou. Vodící sloupky zajišťují dokonalou rovnoběžnost funkčních ploch obou upínacích desek. Pokud by došlo k přetížení stroje vlivem špatně nastavených technologických parametrů, hrozí jejich deformace či prasknutí. Pohon mechanismu může být vyvozen hydraulickým pístem nebo elektromotorem. Tyto systémy se poté nazývají jako hydraulicko-mechanické nebo elektro-mechanické. Píst může být spojen přímo s pohyblivou upínací deskou (hydraulický upínací systém) nebo obdobně jako u elektromotoru skrze další mechanický systém. Schéma hydraulické uzavírací jednotky s kloubovým mechanismem je uvedeno na Obrázku 16. [19]



Obrázek 16 Hydraulická uzavírací jednotka s kloubovým mechanismem [20]

3.3 Řídící jednotka

Řídící jednotka se skládá z hlavního prvku – regulátoru, který zpracovává aktuální hodnoty sledovaných parametrů získávaných ze soustavy čidel a ty se následně snaží pomocí regulačních prvků dorovnávat s požadovanými hodnotami. Celý systém je opatřen mikroprocesory, které jsou schopny automaticky optimalizovat průběh cyklu. Operátor komunikuje se strojem skrze komunikační rozhraní, jenž představuje dotykový displej s klávesami. Stroj taktéž disponuje vstupy pro paměťová média, kde je možné ukládat data z výrobního procesu a ty následně porovnat či optimalizovat pomocí simulačního softwaru. Standardně je stroj schopen pracovat ve třech režimech. První, manuální režim, se využívá při zahájení výroby, upínání formy a jejímu seřizování. Druhý režim je poloautomatický, kdy stroj vykoná celý cyklus dle nakonfigurovaného programu, ale je potřeba jej spustit ručně. Používá se především v případě, kdy je nutné výrobky odebrat manuálně nebo při zastřikování insertů. Třetím režimem je plně automatický, kdy se spouští jeden vstřikovací cyklus za druhým bez přítomnosti operátora. V současnosti je kladen důraz, aby stroj běžel právě v tomto režimu z ekonomických hledisek provozu. [19]

3.4 Periferní zařízení

Vstřikovací stroje mohou být doplněny o další přídatná zařízení, která umožňují vyšší stupeň automatizace. V moderním průmyslu se jedná o velmi žádané prvky. Mezi nejpoužívanější periferní zařízení se pak řadí:

- temperační systémy pro chlazení vstřikovacích forem,
- zařízení pro upínání a výměnu forem,
- sušárny granulátů,
- dávkovače aditiv,
- roboty a manipulátory pro manipulaci s výrobky a vtokovými zbytky,
- mlýny pro drcení odpadu,
- roboty pro zakládání insertů,
- dopravníky pro výrobky a vstupní suroviny,
- kontrolní systémy. [3]

4 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

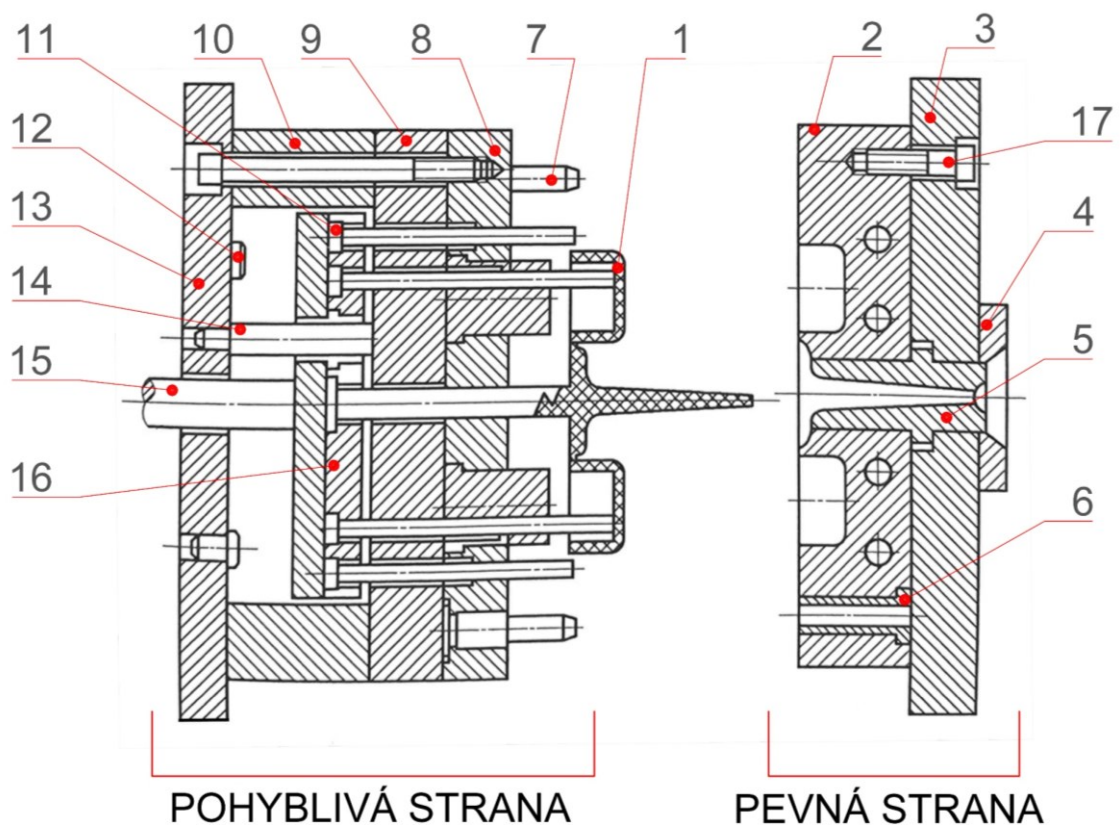
Vstřikovací forma je klíčovým prvkem v oblasti vstřikování polymerů. Reprezentuje specializovaný nástroj, který udává tvar budoucímu výrobku a skládá se z poměrně velkého množství komponent. Primární funkcí vstřikovací formy je distribuce taveniny od trysky vstřikovacího stroje tak, aby v dostatečné době a kompletně zaplnila její dutinu, která představuje negativ tvaru vyráběného dílce, čímž získá finální podobu. Sekundární funkcí vstřikovací formy je efektivní odvod tepla ze zpracovávaného polymeru tak, aby byl výrobek co nejrychleji ochlazen s ohledem na požadovanou kvalitu. Dále je kladen důraz, aby forma byla schopna bezpečně odformovat výrobek, čímž se předpokládá, že nedojde k jeho poškození. Z ekonomického hlediska se jedná o velmi nákladný nástroj, který podléhá značnému mechanickému a teplotnímu namáhání. [23,33]



Obrázek 17 Funkce vstřikovací formy [23]

Existuje několik variací vstřikovacích forem, jejichž konstrukce se odvíjí především od charakteru vyráběné součásti. Zpravidla je forma rozdělena na dvě hlavní části – pohyblivou a pevnou stranu. Samotná sestava formy se skládá ze systému desek, dále z konstrukčních prvků, které zajišťují správnou funkci formy a také z funkčních prvků, jenž přicházejí do styku se zpracovávaným polymerem. Převážnou většinu komponentů je možné nakupovat od světových dodavatelů normalizovaných dílů, jakým je například Meusburger nebo Hasco. Používáním standardizovaných dílů lze významně snížit náklady na výrobu a konstrukci, zrychlit čas dodání nebo zajistit náhradní součásti v případě potřeby oprav či údržby. Ostatní prvky jako tvarové vložky nebo boční tvarová jádra se vyrábějí individuálně dle geometrie výrobku a navrženého způsobu zaformování. [25,33]

Na obrázku 18 je zobrazeno jedno z nejjednodušších konstrukčních řešení, a to dvoudesková vstřikovací forma. Označení dvoudesková forma vyplývá z počtu desek, které přicházejí do styku s taveninou. Koncepce formy je tvořena deskami, které spolu tvoří rám a jsou mezi sebou propojeny šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem. Dále vodícími prvky, jež zabezpečují jejich polohu. Vodící čepy spolu s vodícími pouzdry se starají o dokonale přesnou polohu pevné a pohyblivé strany formy, vodící paket vyhazovacího systému pak o jeho správné vedení během vyhazování. Pomocí upínacích desek se jednotlivé strany upínají na stroj. Další důležitou součástí jsou středící kroužky, které zajišťují přesnou polohu formy vůči stroji. Díky tomu může tryska stroje přesně dosednout na vtokovou vložku a taktéž je možné připojit táhlo pro ovládání vyhazovačů. [22,23,33]



Obrázek 18 Základní koncepce vstřikovací formy [22]

1 – výrobek, 2 – tvarová deska pravá, 3 – upínací deska pravá, 4 – středící kroužek pravý, 5 – vtoková vložka, 6 – vodící pouzdro, 7 – vodící čep, 8 – tvarová deska levá, 9 – opěrná deska, 10 – rozpěrná deska, 11 – vyhazovač, 12 – dosedka, 13 – upínací deska levá, 14 – vedení vyhazovacího systému, 15 – táhlo, 16 – vyhazovací deska, 17 – šroub

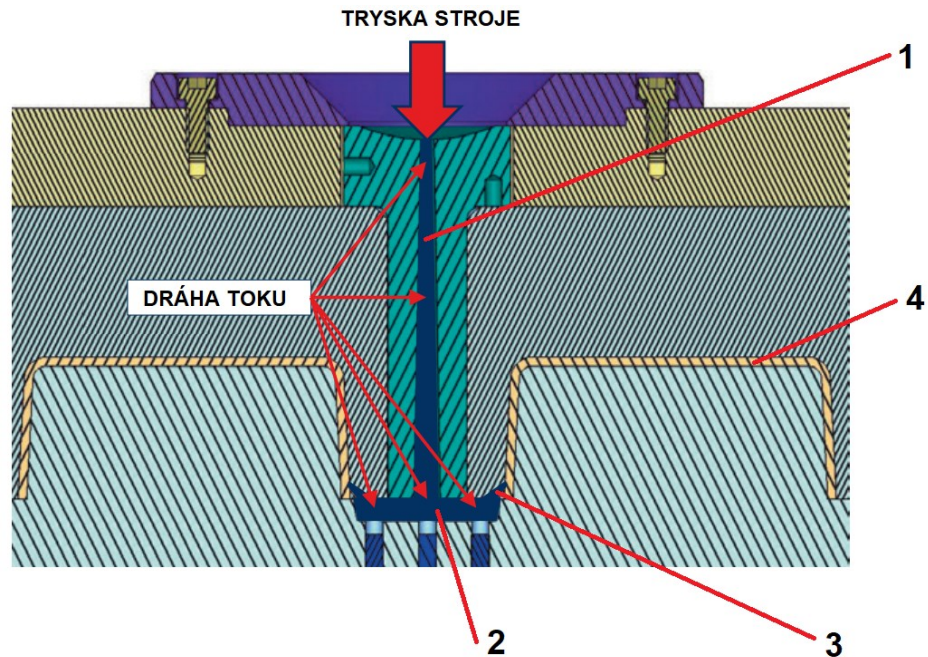
4.1 Vtokové systémy

Hlavní funkcí vtokového systému je rychlá a rovnoměrná doprava taveniny z trysky do dutiny formy. Tavenina vstupuje do vtokového systému skrze vtokovou vložku, poté prochází rozvodným kanálem do bočních rozvodných kanálů až do samotného vtokového ústí na výrobku. Optimalizovaný návrh vtokového systému by měl zohlednit umístění vtoku, použití studeného nebo horkého rozvodu taveniny, množství a rozměry jednotlivých kanálů. Dobře navržený systém se vyznačuje:

- bezproblémovým zaplněním tvarové dutiny,
- umožněním působit dotlakem,
- minimálními vadami na vstříkovaném dílu,
- vyváženým plněním jednotlivých dutin u vícenásobných forem,
- minimálním odpadem,
- snadným odformováním. [5,10]

4.1.1 Studený vtokový systém

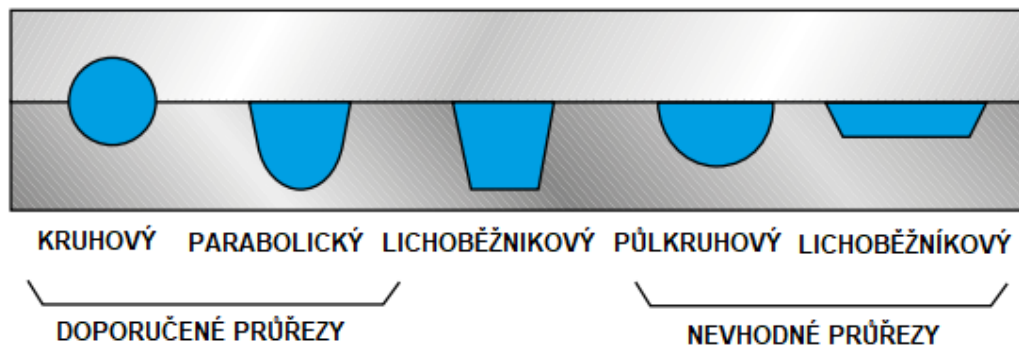
Studený vtokový systém se skládá ze soustavy kanálů umožňujících dopravu taveniny z trysky stroje až k nejzazšímu místu na výrobku bez jejího dodatečného ohřevu, čímž dochází k jejímu okamžitému chladnutí po kontaktu s povrchem formy. Jeho hlavní přednosti spočívají v jednoduchosti, nenáročnosti na údržbu a v neposlední řadě je ekonomicky příznivější v porovnání s horkým rozvodem. Naopak velkou nevýhodou je vyšší spotřeba materiálu, který ve formě tuhne a musí být v každém cyklu z formy vyjmut. S tímto se pojí také starost o jeho oddělení od výrobku a další nakládání často končící recyklací. V ojedinělých případech může být objem vtokového systému vyšší než objem vstříkovaného výrobku. [5,30]



Obrázek 19 Studený vtokový systém [26]

1 – vtokový kanál, 2 – rozvodný kanál, 3 – vtokové ústí, 4 – výrobek

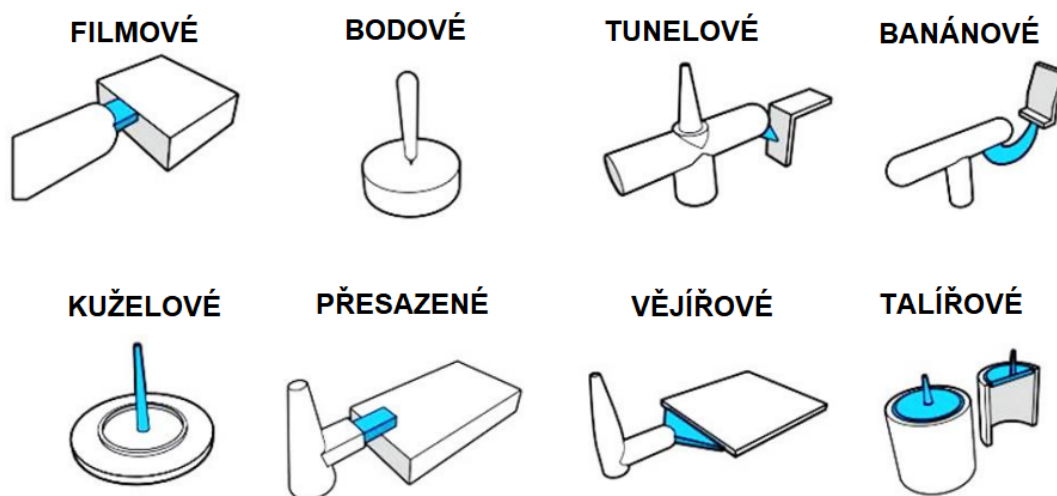
Studené vtokové systémy jsou běžně tvořeny vtokovým kanálem, jehož tvar udává vložka, rozvodným kanálem, z něhož se rozvádí tavenina až k vtokovému ústí na výrobku. Průřez samotného rozvodného kanálu se navrhuje s cílem dosáhnout maximální plochy průřezu při minimálním povrchu v kontaktu s formou a rovněž se klade důraz na snadnou vyrobiteľnost. [5,26]



Obrázek 20 Varianty průřezů rozvodných kanálů [5]

Vtokové ústí umožňuje spojení mezi rozvodným kanálem a vstřikovaným dílcem. Jeho rozměry, zejména tloušťka, je výrazně menší než tloušťka rozvodného kanálu, což způsobí jeho prvotní zamrznutí. Tento jev zabrání nežádoucímu zpětnému úniku polymeru po dotlakové fázi. Díky malému průřezu je možné v tomto místě výrobek snadno oddělit od vtokového zbytku. Existuje celá řada typů vtokových ústí lišících se různou geometrií. Mezi

nejpoužívanější se řadí bodové, tunelové, banánové či filmové. Jejich volba závisí na typu výrobku, možnosti jeho umístění či výsledku softwarové simulace. [5,26]



Obrázek 21 Vybraná vtoková ústí [24]

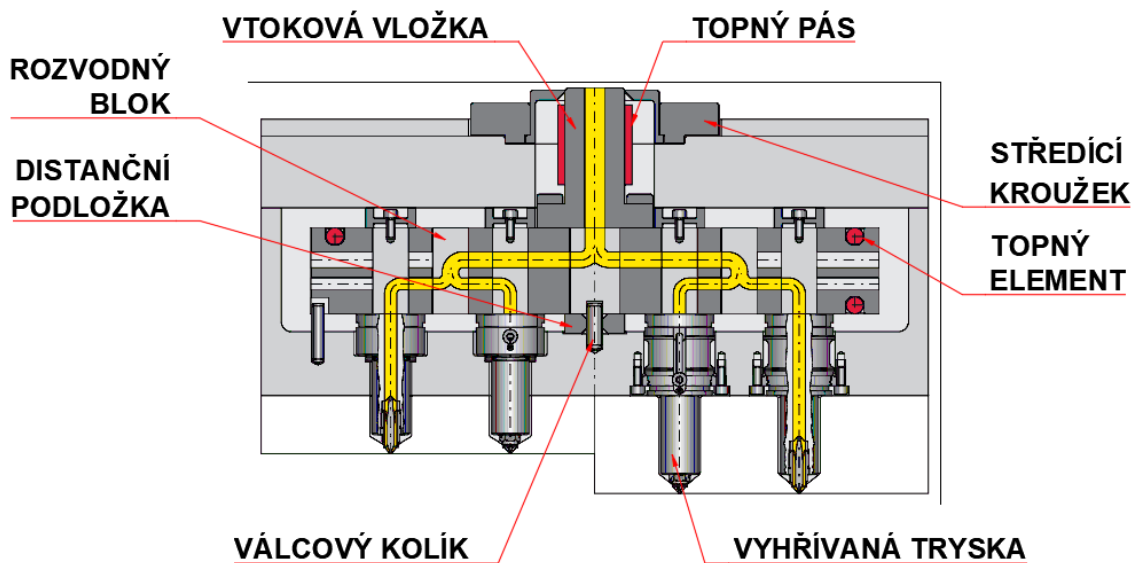
4.1.2 Horký vtokový systém

Další možností, jak dopravovat taveninu polymeru do dutiny formy, je použití horkého vtokového systému. Ten umožňuje udržet polymer v roztaveném stavu v oblasti mezi tryskou stroje a vtokovým ústím po celou dobu vstřikovacího cyklu. Horký vtokový systém se skládá primárně z vtokové vložky opatřené topným pásem, rozvodného bloku temperovaného pomocí topných elementů a vyhřívané trysky. Systém musí být navržen tak, aby odolával vysokým teplotám a tlakům. Taktéž je potřeba zajistit dostatečnou izolaci mezi horkým rozvodným blokem a ostatními komponentami formy, aby byly tepelné ztráty co nejnižší a proces co nejvíce ekonomický. Horké vtokové systémy tvoří samostatnou skupinu normálíí a je možné si je nakonfigurovat dle dané aplikace přímo u dodavatelů. Přinášejí spoustu výhod pro optimální průběh vstřikovacího cyklu, avšak mají i své nedostatky. Mezi hlavní výhody ve srovnání se studenými vtokovými systémy se řadí: [28,29]

- absence vtokového zbytku a s tím spojená úspora materiálu,
- možnost použití stroje s nižší plastikační kapacitou,
- kratší doba vstřikovacího cyklu (rychlejší chlazení a vstřikování),
- kontrolovanější tok taveniny do dutiny díky snadné regulaci teploty, minimalizace vad na díle,
- odpadá starost o separování a recyklaci vtokového zbytku. [28,30]

Naproti tomu horké vtokové systémy mají nevýhody, jakými jsou:

- značné pořizovací náklady,
- vyšší složitost formy,
- problematická změna umístění vtoku,
- obtížnější chlazení v okolí horkého vtoku,
- energetická náročnost. [28,30]



Obrázek 22 Řez horkým rozvodným blokem [27]

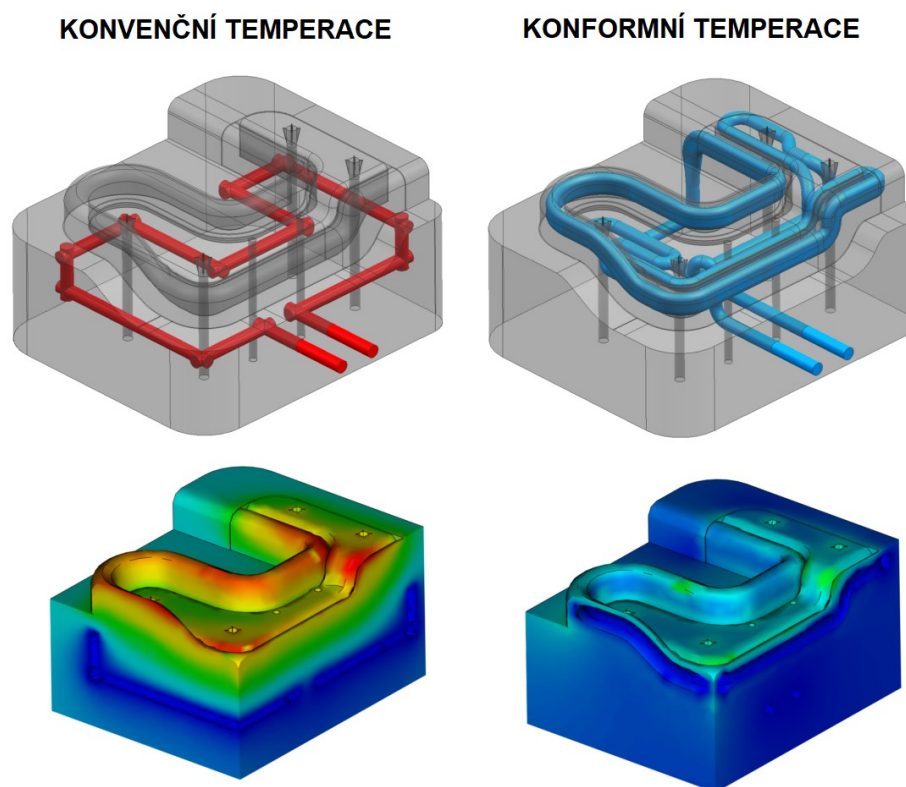
4.2 Teplotce

Na kvalitě vstřikovaného dílu zvláště jeho smrštění a deformaci se významně podílí teplotní systém vstřikovací formy. Úkolem takového systému je udržet optimální teplotní pole ve formě, které spočívá jednak ve vyhřátí formy na požadovanou teplotu před zahájením výroby, tak efektivním odváděním tepla přivedeného taveninou během procesu. Aby bylo chlazení formy účinné, musí být forma vhodně opatřena soustavou chladicí kanálů, přepážek či spirál, v nichž proudí chladící médium. Médium bývá zpravidla olej, voda, glycerol nebo kombinace vody a glycerolu. Rozměry kanálů, jejich počet a pozice je nutné navrhovat s ohledem na charakter vyráběného dílu tak, aby byla zachována tuhost a pevnost formy. [31,33]

V konvenčním způsobu chlazení jsou chladicí kanály zhotovené vrtáním na strategických místech kolem dutiny formy. Tento způsob se používá pro většinu aplikací, zejména u dílců s jednoduchou geometrií. U složitějších tvarů se stává konvenční teplotce neefektivní

vlivem technologické nemožnosti dosáhnout optimálního tvaru kanálu. Některá místa na výrobku tak nejsou ovlivněna shodným chladícím efektem a neochlazují se stejně rychle jako zbytek součásti. [32]

S rozvojem aditivních technologií přichází možnost výroby tvarových vložek formy s temperací, která je daleko více komplexní, a to jak průřezem, tak drahou toku. Složitost chladícího kanálu není téměř nijak omezena. Konformní chlazení je pak daleko účinnější obzvláště u dílců se složitou geometrií, výrobní cykly jsou kratší, zhotovené díly dosahují vysoké kvality. Vzhledem k požadované výrobní metodě je však výroba konformních kanálů mnohem nákladnější. O tom, zda se vyplatí konvenční nebo konformní způsob chlazení, lze rozhodnout na základě analýzy vstřikování a nákladů. [32]



Obrázek 23 Porovnání výsledků teplotního pole tvarové vložky [32]

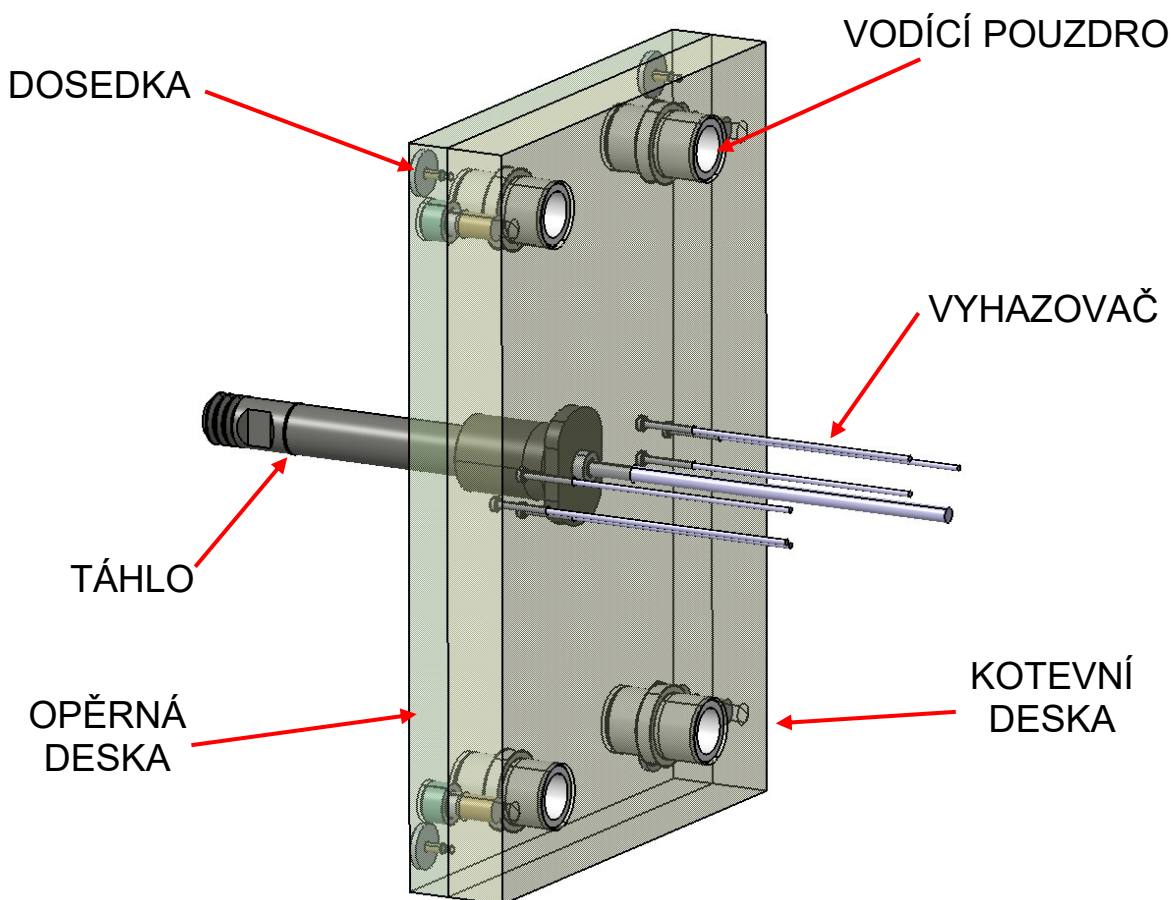
4.3 Odvzdušňování

Během uzavírání formy a následnému vstřikování zůstává uvnitř tvarové dutiny vzduch, jehož nemožnost uniknout způsobuje vady na výrobku, jakými mohou být spálená nebo nedotečená místa, popřípadě bubliny. Tento problém lze eliminovat pomocí vhodného návrhu odvzdušnění. Nejčastěji se k odvzdušňování forem přistupuje skrze vzniku vůlí mezi tvarovými díly a vyhazovači. Pokud je však takové odvzdušnění neúčinné, musí se forma opatřit drážkami v dělicí rovině a místech, kde dotéká tavenina jako poslední. Hloubka

kanálu závisí na druhu vstřikovaného materiálu, obecně však platí, že polymer nesmí být schopen tuto drážku zaplnit. [26]

4.4 Vyhazování

Po ochlazení polymerní taveniny na vyhazovací teplotu, nastává otevření formy a vyhození výrobku skrze vyhazovací systém. Ten bývá tvořen nejčastěji vyhazovacími kolíky, jež mohou být válcové, trubkové nebo prizmatické. Neméně častým případem je použití stírací desky či stíracích kroužků zejména u vstřikování tenkostěnných rozměrnějších výrobků. Jejich hlavní předností je působení vyhazovací síly na celou styčnou plochu a také nejsou po nich patrné stopy po vyhazování. Při návrhu samotného systému je potřeba dbát na správné rozložení vyhazovačů na díle tak, aby nebyla poškozena pohledová strana a nedošlo k jeho deformaci. Při konstrukci formy se studeným vtokovým systémem je potřeba zajistit kromě odformování výrobků také vyhození vtokové soustavy. Vyhazovací systém tvoří jednu z podsestav formy. Samostatné vyhazovače jsou ukotveny v kotevní desce zajištěné opěrnou deskou. Desky jsou vzájemně sešroubovány a jejich přesný pohyb řídí vodící prvky. Vyhazovací systém je pak propojen se strojem skrze táhlo. [23,33]



Obrázek 24 Sestava vyhazovacího systému

4.5 Materiály používané k výrobě forem

Výběr vhodného materiálu pro jednotlivé komponenty forem je klíčovou součástí celkového návrhu vstřikovací formy tak, aby byla dosažena požadovaná životnost formy a kvalita s ohledem na minimální pořizovací náklady. Existuje několik druhů železných či neželezných materiálu vhodných k výrobě vstřikovacích forem. Jakost použitého materiálu formy závisí na typu vstřikovaného polymeru, rozměrech a požadované přesnosti výrobku, velikosti série, procesních podmínkách i ceně. [23,33]

Nejrozšířenějším materiálem pro výrobu forem jsou právě oceli pro své výborné mechanické a fyzikální vlastnosti. Dále jsou schopny podrobit se tepelnému zpracování nebo je možné jejich povrch upravovat povlakováním, čímž se jejich užitné vlastnosti znásobí. Neexistuje jediná třída oceli, jenž by byla vyhovující pro všechny jednotlivé součásti formy. Na části formy, které přicházejí do styku s polymerní taveninou, je potřeba navrhnout kvalitnější a odolnější typ oceli s odpovídající tepelnou a povrchovou úpravou. Naproti tomu pro konstrukční součásti se využívají levnější oceli s dobrou obrobiteľností. [23,33]

Tabulka 2 Vybrané druhy ocelí užívaných k výrobě forem [23]

| OZNAČENÍ MATERIÁLU | VLASTNOSTI | DOPORUČENÉ POUŽITÍ |
|--------------------|---|--|
| 1.0577 | ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ OCEL Dobrá svařitelnost, nekalená | Obyčejné díly formy bez požadavku na vyšší mechanické vlastnosti |
| 1.1730 | NÁSTROJOVÁ OCEL Desková ocel | Netvrzené díly forem a přípravků, upínací desky, rozpěry |
| 1.2083 | PROKALITELNÁ OCEL Částečně korozivzdorná, legovaná, vhodná k leštění | Vložky dutiny forem, tvarové desky |
| 1.2162 | OCEL K LOKÁLNÍMU KALENÍ Legovaná | Desky forem |
| 1.2210 | CHROM-VANADOVÁ OCEL Odolnost proti opotřebení | Jádrové kolíky, malé soustružené díly |
| 1.2312 | NÁSTROJOVÁ OCEL Legovaná, dobře obrobiteľná | Desky a díly vysoce mechanicky namáhané |
| 1.2738 | NÁSTROJOVÁ OCEL Předtvrzená, s rovnoměrnými mechanickými vlastnostmi | Rozměrné desky s hlubokými dutinami |
| 1.7131 | OCEL K LOKÁLNÍMU KALENÍ Legovaná | Vodící prvky, jádra |
| 1.2379 | OCEL K PROKALENÍ Rozměrově stálá, vysoká tvrdost, otěruvzdornost | Desky forem, vložky |

5 SIMULACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

Simulace procesu vstřikování představují prostředek, který umožňuje testovat či ověřovat výrobek spolu s nástrojem ještě před samotnou výrobou. Je to způsob, jak rentabilně pracovat ve všech fázích realizace, a to pouze s virtuálními daty. Ty lze sdílet s dalšími firemními odděleními jako je vývojové, konstrukční, technologické, prodejní či marketingové a zdokonalovat tak výrobek ještě před tím, než je fyzicky zhotoven. Simulacemi je tedy možné prověřit všechny aspekty konstrukce či navržených změn bez vynaložení nákladů na jejich realizaci. Náklady na odstranění vad na již existujícím nástroji jsou v oboru vstřikování velmi vysoké. [3]

Dále významně zkracují čas spojený s vývojem, pomáhají pochopit příčiny vzniku vad v reálném výrobním procesu včetně možnosti hledání nápravy. Jistou nevýhodou je však požadovaná způsobilost jak pro nastavení celkové simulace, tak pro interpretaci dosažených výsledků. Spolehlivost, přesnost a rychlost simulace se odvíjí od použitého softwaru a hardwaru. Přesnost výsledků je ovlivněna zejména vstupními daty, především specifikací konkrétního vstřikovaného materiálu. Simulační programy disponují databázemi polymerů, chladících kapalin či materiálů forem. Vstupní data tvoří kromě materiálu ještě 3D model výrobku, návrh vtokového a temperačního systému. [3]

Pro simulace konstrukce výrobků, vstřikovací formy a vstřikovacího procesu se používá řada softwarů. Mezi ně se řadí například:

- Autodesk Simulation Moldflow,
- Cadmould 3D,
- Moldex 3D. [3]

Jedná se o programy spadající do systému CAE (Computer Aided Engineering), což je způsob použití počítačového softwaru k usnadnění inženýrských analýz a optimalizací. Termínem CAE se obecně označují simulace, validace a optimalizace výrobků a výrobních nástrojů. K realizaci modelů do simulačního prostředí se používá metoda konečných prvků, kdy se geometrický model nahradí konečným počtem prvků. Získá se pro každý bod tři rovnice posuvů ve směrech x, y, z a počítá se pole deformací (šest rovnic) a pole napětí (šest rovnic). Funkce posuvů se nahradí polynomem, definují se okrajové podmínky a řeší se lineární rovnice, ze kterých se získá deformace a napětí pro každý bod. Výsledkem je

grafické zobrazení vypočtených dat na modelu, doplněný případně o výpis vybraných hodnot. [3]

5.1 Typy simulací

- Simulace vhodného umístění vtoku (Gate Location Analysis) se provádí za účelem zjištění ideálního místa pro umístění vtokového ústí na výrobku. Jedná se o jednu z prvotních simulací, kterou vývojář provádí. Výsledkem je barevná škála od nevhodnějšího místa po nejméně vhodné, kterou je možno také zobrazit v hodnotách od 0 do 1, přičemž 1 značí nejvíce vhodné místo. Samotná volba vtokového ústí je pak udělena konstruktérem, jelikož simulace neberou v potaz reálné možnosti spojené se zaformováním výrobku. [34]
- Simulace plnění a dotlaku (Fill + Pack Analysis) charakterizuje, jak tavenina polymeru plní dutinu formy od vtokového ústí až po přepnutí stroje na dotlak. Společně je možné spustit i simulaci vtokového systému (Runner Balance), která slouží k optimalizaci rovnoměrného plnění všech dutin. Při simulaci plnění a dotlaku vstupují parametry jako vstříkovaný materiál, stroj, teplota taveniny, materiál formy, vstříkovací rychlost a přepnutí stroje na dotlak. Z výsledků lze stanovit čas plnění, smykovou rychlost, tlak nebo kritické oblasti se studenými spoji, propadlinami a vzduchovými kapsami. U plněných materiálů lze zjistit, jak bude plnivo orientováno. [34]
- Simulace chlazení (Cooling Analysis) popisuje tepelné procesy, jenž se odehrávají ve formě během cyklu. Před jejím spuštěním je potřeba navrhnout temperační systém pro chlazení výrobku. Z nejvýznamnějších výsledků lze zmínit efektivitu temperačního systému, teplotu výrobku a formy, čas potřebný k bezpečnému vyhození výrobku či rozdíl teplot na vstupu a výstupu okruhů. Simulaci chlazení lze optimalizovat počet, umístění a rozměry chladících kanálů včetně typu média. [34]
- Simulace deformací (Warp Analysis) nachází uplatnění při řešení příčin deformací vyráběného dílu. Simulace zobrazuje celkovou hodnotu deformace skládající se ze třech příčin. Ty tvoří deformace způsobené rozdílným chlazením, deformace vlivem smrštění materiálu a vlivem orientace. Deformace výrobku lze minimalizovat změnou materiálu, úpravou procesních podmínek či optimalizací temperačního systému. [34]

5.2 Vady výrobků doprovázející proces vstřikování

Technologie vstřikování se řadí mezi komplexní způsoby výroby polymerních výrobků, na jehož výsledku se podílí zejména kvalifikovanost pracovníka, návrh výrobku, konstrukce formy a optimálně zvolené procesní podmínky. Existuje nepřeberné množství vad, které mohou doprovázet proces vstřikování. Souhrn vad lze rozdělit podle toho, kde k nim dochází na:

- vady zjevné (neúplné výrobky, přetoky, propadliny, zvrásnění, změna barvy, stříbrná místa, tokové čáry, delaminace, mikrotrhliny, pórovitý povrch, žloutnutí až hnědnutí materiálu, spálená místa, kresba po volném toku taveniny),
- skryté vady (vnitřní pnutí, studené spoje, bubliny, nerovnoměrná orientace makromolekul),
- vady vzniklé při vstřikování (deformace výrobku vlivem vyhazování, znatelné stopy po vyhazovačích, samovolné vytékání taveniny z trysky).

Porozumět těmto vadám a znát postup pro jejich eliminaci je klíčové pro dosažení vysoké kvality vstřikovaných výrobků. [3,35]

5.2.1 Propadliny

Propadliny se projevují díky smrštění hmoty v závislosti na jejím tuhnutí. Postupují od povrchu směrem dovnitř. Nachází se na místech s nahromaděným množstvím materiálu, kde plast chladne pomaleji než okolí. Příkladem lze uvést napojení základní stěny na žebro výrobku. Důvod vzniku propadlin vychází z nerovnoměrné tloušťky stěn výstřiku. Z technologických aspektů lze zmínit nízkou plnicí fázi cyklu, nízkou teplotu formy nebo špatně zvolený bod přepnutí na dotlak a jeho průběh. [3,35]

5.2.2 Studené spoje

Studeným spojem se označuje místo, kde dochází ke kontaktu dvou čel taveniny, které se musely rozdělit na více proudů v důsledku nárazu na překážku v toku. Vzhledově se projevuje jako svar či rýha se zaoblenými okraji nebo vznikne trhlina. Lokálně snižuje mechanické vlastnosti výrobku. Představuje místo, které je potencionálním zdrojem pro vznik trhlin. Problematické není jen výrazné snížení mechanické vlastností, ale i vzhledová vada při vstřikování transparentních plastů. Při vstřikování standardním procesem nelze zabránit vzniku studených spojů, pouze je možné jejich účinky minimalizovat, a to pomocí

odvzdušnění a adekvátních technologických parametrů jako je co nejvyšší teplota taveniny (z doporučeného rozsahu), co nejvyšší teplota formy (z doporučeného rozsahu) a co nejvyšší možná rychlost vstřikování. [3,35]

5.2.3 Volný tok taveniny

K volnému toku taveniny (jettingu) dochází v případě, kdy plnění dutiny formy neprobíhá ve vlnoplochách směrem od ústí vtoku (kde vstupující tavenina narazila na stěnu dutiny a vytvořila tak čelo proudu, které se rozšířilo až do všech míst), ale když je hlavní proud taveniny vstříknut do dutiny velkou rychlostí tak, že vytvoří pramenec, který je volně vržen do tvarové dutiny, až narazí na stěnu. Takto vzniklé pramenice se na svém povrchu ochladí a špatně se pojí s další postupující taveninou, což má za následek vzniku nedokonalého spojení obdobné studenému spoji, čímž se zhoršuje kvalita výrobku. Jetting lze eliminovat vhodným umístěním vtokového ústí tak, aby tavenina narazila co nejdříve na stěnu dutiny a také snížením vstřikovací rychlosti. [3,35]



Obrázek 25 Volný proud taveniny – jetting [35]

5.2.4 Tokové čáry

Tokové čáry se projevují na povrchu výrobku jako soustava čar, jenž se od okolí odlišuje jiným barevným odstínem, i přestože jde o vstřikování téhož druhu materiálu. Čáry kopírují směr toku taveniny a nejčastěji se vyskytují v okolí ústí. Příčinou jejich vzniku je stržení již zatuhlé části polymeru ze stěny formy a její přeplavení proudící taveninou. K odstranění tokových čar je možné přistoupit ovlivněním přípravy taveniny v plastikační komoře (teplotou taveniny, obvodovou rychlostí šneku) a parametry plnicí fáze (vstřikovací tlak, vstřikovací rychlost, teplota formy). [3,35]

5.2.5 Spálená místa

Při lokálním spálení materiálu (diesel efektu) vznikají černé skvrny na místech, kde došlo k uzavření vzduchu, který neměl možnost z formy uniknout. K zuhelnatění vstřikovaného materiálu dochází vlivem komprese vzduchu blížící se adiabatickému ději, jehož teplota může dosahovat až několik set stupňů Celsia. Tato vada při delší ignoraci vede až k poškození dutiny formy v daném místě. V některých případech nemusí dojít až ke spálení. Na zasaženém povrchu se objeví pouze lesklá skvrna, která značí, že vzduch zde byl sice uzavřen, ale těsně před zahořením materiálu unikl z dutiny. K odstranění spálených míst se přistupuje tvorbou odvzdušnění v daném místě. [3,35]



Obrázek 26 Spálená místa [35]

5.2.6 Bubliny

Bubliny, označované též jako lunkry, jsou vzduchové kapsy nacházející se uvnitř stěny výrobku na místech s větší tloušťkou stěny. Odhalit je lze rozřezáním výrobku nebo pomocí ultrazvuku. Při vstřikování transparentních plastů jsou viditelné pouhým okem. Způsobují nejen pohledové vady, ale i snižují mechanické vlastnosti. Primární příčina tkví ve špatné konstrukci výrobku. Plynné složky se dostávají do taveniny vlivem vlhkosti, termického rozkladu aditiv, zplodin degradace nebo při nevhodné plastikaci taveniny. [3,35]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

K realizaci diplomové práce byly stanoveny následující body:

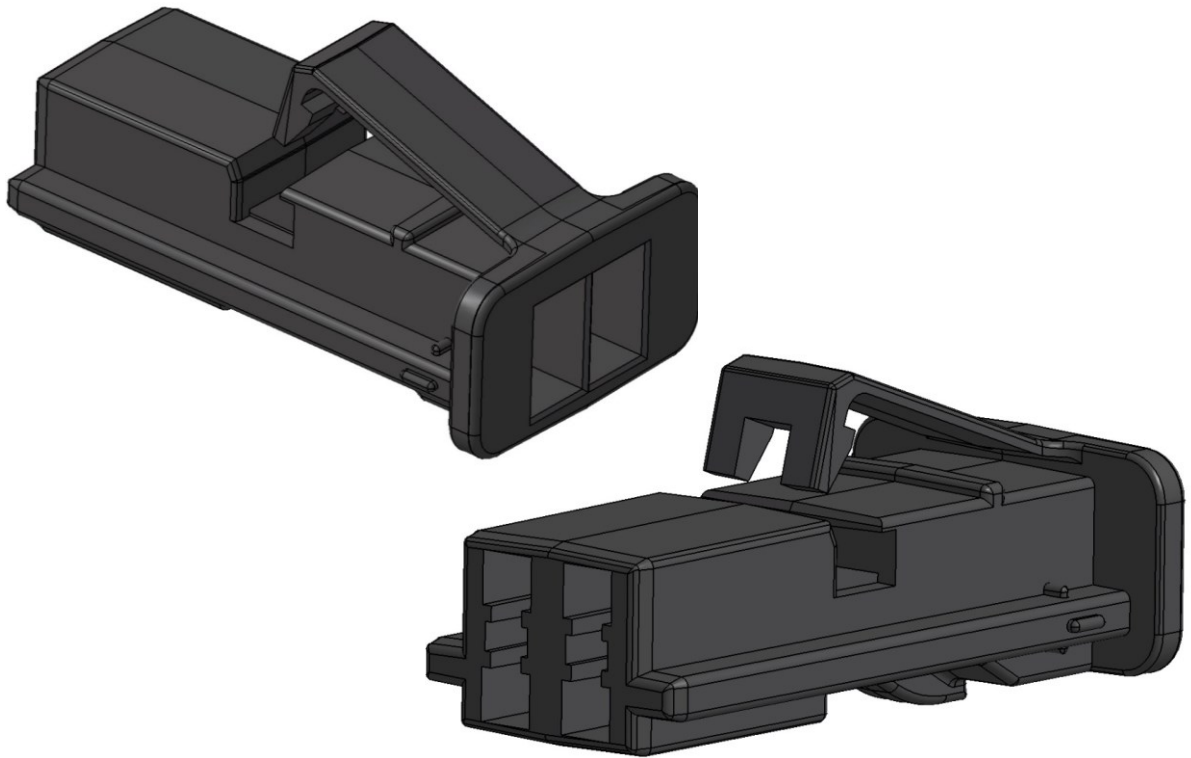
- vypracovat literární studii na dané téma,
- provést 3D konstrukci modelu vstřikované součásti,
- vytvořit simulace procesu vstřikování v softwaru MoldFlow,
- navrhnout optimalizace vstřikování a vyhodnocení jednotlivých variant,
- navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobitelnost.

V literární studii jsou shrnuty poznatky k tématům týkající se samotného procesu vstřikování, vstřikovacího stroje a simulace procesu vstřikování. Dále zde byly uvedeny polymerní materiály, jejich klasifikace, vlastnosti či reologické chování. V neposlední řadě byla studie zaměřena na vady, které doprovázejí proces vstřikování a jejich způsob eliminace.

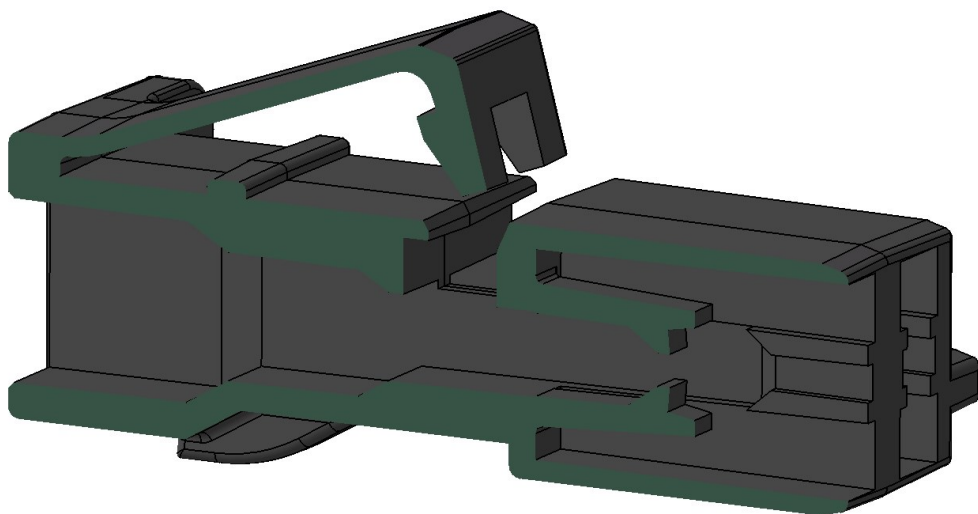
Cílem praktické části je provést 3D konstrukci modelu zadané vstřikované součásti. Následně navrhnout vstřikovací proces pro tuto součást s různým vtokovým a temperačním systémem, návrhy ověřit pomocí simulačního softwaru Autodesk MoldFlow a provést vyhodnocení daných variant. Na základě zhodnocení daných variant navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl v programu CATIA V5R20 s ohledem na vyrobitelnost za současného maximálního využití normalizovaných komponent. Na závěr zhotovit výkresovou dokumentaci skládající se z výkresu sestavy a kusovníku.

7 MODEL VSTŘIKOVANÉHO VÝROBKU

Zadaným výrobkem určeným k návrhu vstřikovací formy je dvoucestný konektor používaný v kabelových systémech, jehož hlavní rozměry činí délka 23,5 mm, šířka 12,9 mm a výška 11,6 mm. Objem součásti byl stanoven na 0,8 cm³ a hmotnost 1 g. Na základě vstupních dat byl zhotoven model opatřený o technologické úkosy a rádiusy, které umožní snadné vyjmutí výrobku z formy.



Obrázek 27 3D Model vstřikované součásti



Obrázek 28 Řez součásti

7.1 Vstřikovaný materiál

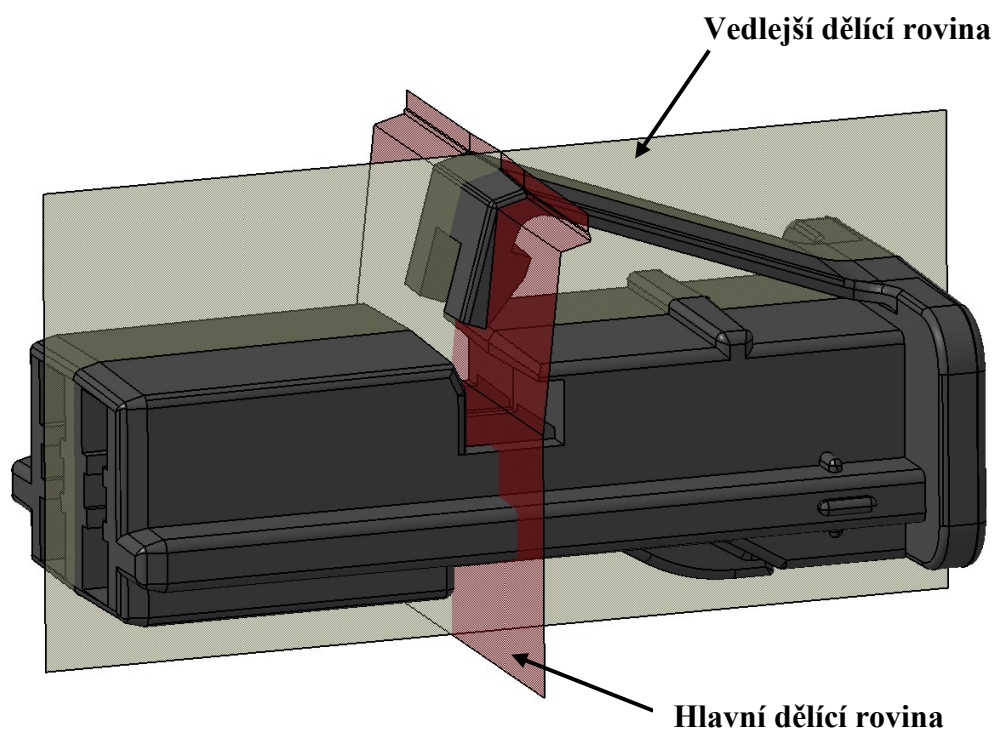
Pro daný díl byl zvolen semi-krystalický termoplast PBT. Konkrétně se jedná o materiál od firmy BASF s obchodním označením Ultradur B 4520. PBT je polymer používaný především ke zpracování vstřikováním pro technické aplikace. Vyniká svými dobrými zpracovatelskými a mechanickými vlastnostmi, chemickou odolností a rozměrovou přesností. Dále významně zpomaluje hoření a má dobré elektrické vlastnosti. Díky tomu nachází uplatnění při výrobě konektorů v automobilovém průmyslu, osvětlovací techniky či elektro skříní.

Tabulka 3 Specifika vstřikovaného materiálu [34,36]

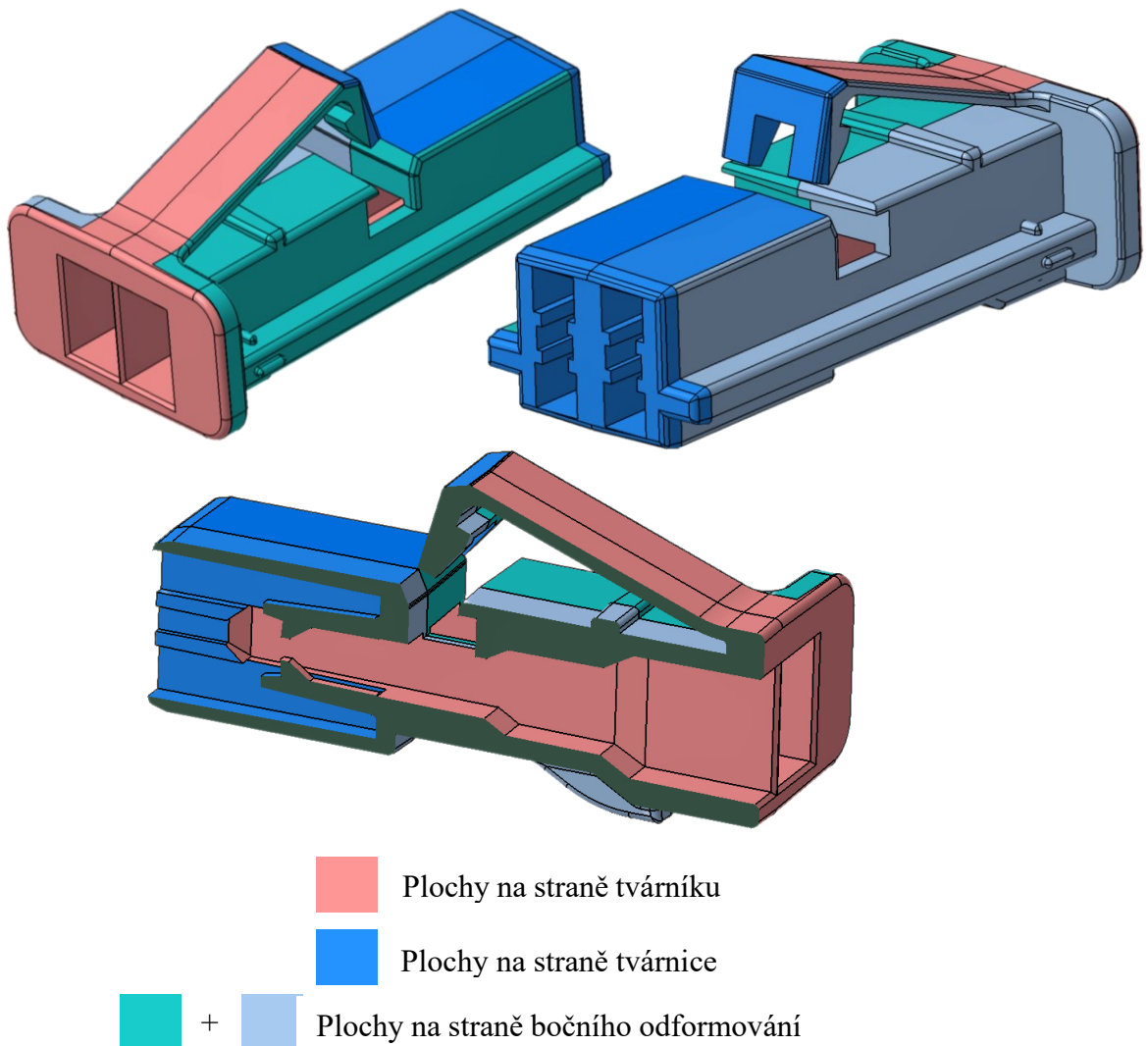
| Fyzikální vlastnosti | | |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|
| VLASTNOST | HODNOTA | JEDNOTKA |
| Hustota | 1,3 | g/cm ³ |
| Smrštění | 1,6 | % |
| Nasákavost | 0,5 | % |
| Index toku taveniny | 23,1 | g/10 min |
| Mechanické vlastnosti | | |
| Tvrdost dle ISO 2039-1 | 130 | MPa |
| Pevnost v tahu | 60 | MPa |
| Modul pružnosti | 2500 | MPa |
| Poissonovo číslo | 0,42 | - |
| Zpracovatelské vlastnosti | | |
| Teplota trysky | 250–275 | °C |
| Teplota formy | 40–70 | °C |
| Vyhazovací teplota | 171,4 | °C |
| Vstřikovací rychlost | ≤ 250 | mm/s |
| Obsah vlhkosti | 0,04 | % |
| Teplota sušení | 80–120 | °C |
| Maximální smykové napětí | 0,4 | MPa |
| Maximální rychlost smykové deformace | 50 000 | s ⁻¹ |

7.2 Rozvržení dělicích rovin

Správné rozvržení dělicích rovin je nezbytným úkonem prováděným ještě před samotnou konstrukcí formy. V případě, že by došlo k jejich chybnému zvolení, hrozila by úplná nefunkčnost formy nebo by nastaly problémy v průběhu výrobního procesu. Hlavní dělicí rovinou se rozumí ta rovina, kde na sebe dosedá tvárník a tvárnice a kde dochází k otevření formy společně s vyhozením výrobku. V případě tohoto konstrukčního řešení byla navržena spolu s hlavní dělicí rovinou ještě jedna vedlejší dělicí rovina tak, aby bylo možné odformovat postranní prvky společně s pružným háčkem.



Obrázek 29 Rozvržení dělicích rovin



Obrázek 30 Barevné rozvržení dělicích ploch na výrobku

7.3 Volba násobnosti

Násobnost vstřikovací formy je podmíněna požadovanou přesností výrobku, efektivitou výroby a také finančními náklady. Čím vyšší je násobnost formy, tím je dosaženo větší efektivity, současně však klesá přesnost jednotlivých dílců. Vzhledem k rozměrům vyráběného dílce, uspořádání formy a uvažované velikosti série byla forma zadána jako čtyřnásobná. Na jeden vstřikovací cyklus se tak zhotoví čtyři kusy daného výrobku.

8 OPTIMÁLNÍ ŘEŠENÍ VTOKOVÉHO A TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU

Před samostatnou konstrukcí vstřikovací formy byly provedeny simulace procesu vstřikování v softwaru Autodesk MoldFlow 2023, které sloužily jako podklad pro návrh formy. Na základě získaných výsledků byly rozhodující tyto aspekty:

- umístění vtokového ústí,
- geometrie a rozměry vtokového systému,
- temperační systém formy.

Vstřikovaný díl byl naimportován do prostředí programu a vysítován metodou Dual-Domain (2,5D), která je vhodná pro tenkostěnné dílce. Povrch sítě tvoří trojúhelníkové elementy, jejichž délka hrany byla nastavena na 0,3 mm.

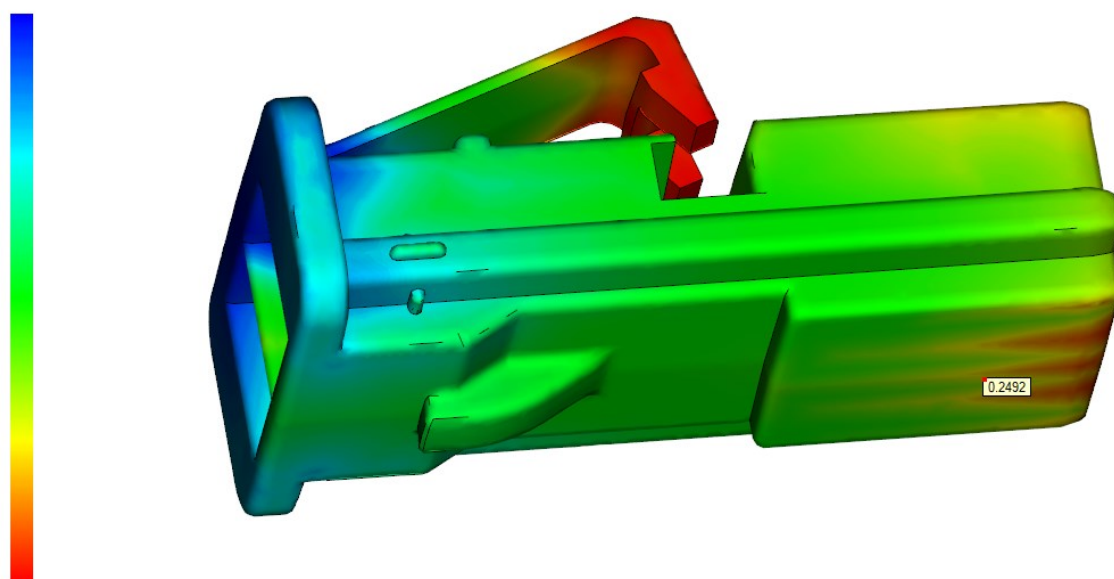


Obrázek 31 Sít' výrobku

Po vygenerování sítě byla provedena její kontrola. Hlavním zkoumaným parametrem byla hodnota Aspect Ratio, která značí poměr velikosti hran elementů, jenž tvoří síť. Zde byla shledána hodnota odpovídající 13,6, což je bráno jako vyhovující. Maximální hodnota by neměla převyšovat hodnotu 20. Dále nebyly nalezeny žádné závady bránící spuštění simulací.

8.1 Umístění vtokového ústí

Prvotní provedenou analýzou byla simulace umístění vtokového ústí, jejíž výsledek byl pak stěžejní pro návrh vtokového systému. Zde byl získán graficky zpracovaný výsledek v podobě barevné škály, která začíná nejméně vhodným místem (červená barva) až po nejvhodnější (modrá barva). Simulace však neberou v úvahu zaformování výrobku, proto bylo vybráno jako nejvíce vhodné místo pro umístění vtokového bodu ležící na spodní straně výrobku, jenž je zároveň součástí vedlejší dělicí roviny. Toto místo bylo programem vyhodnoceno jako vhodné z 25 %.



Obrázek 32 Výsledek simulace vhodného umístění vtokového ústí

8.2 Volba vtokového systému

Pro vyhodnocení funkčnosti a volbě optimálního navrženého vtokového systému, jenž se stará o dopravu taveniny z trysky stroje do dutin formy, byla použita simulace plnění (Fill), jejíž procesní podmínky byly uvedeny v Tabulce 4. Ze získaných výsledků byl zkoumán především:

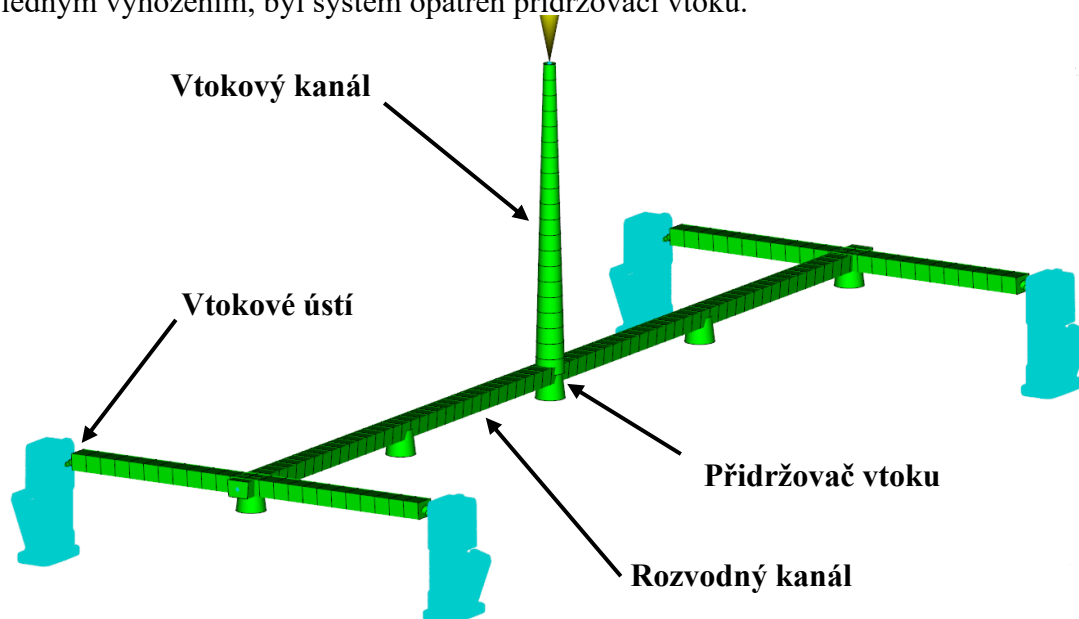
- čas plnění,
- tlak při přepnutí na dotlak,
- teplota na čele taveniny.

Tabulka 4 Nastavení procesních podmínek simulace plnění

| | |
|--|-------------|
| Teplota taveniny [°C] | 260 |
| Teplota formy [°C] | 60 |
| Čas plnění | Automatický |
| Bod přepnutí na dotlak při procentuálním zaplnění dutiny [%] | 97 |
| Hodnota dotlaku [%] | 80 |
| Čas chlazení [s] | 20 |
| Čas působení dotlaku [s] | 10 |

8.2.1 Návrh studeného vtokového systému

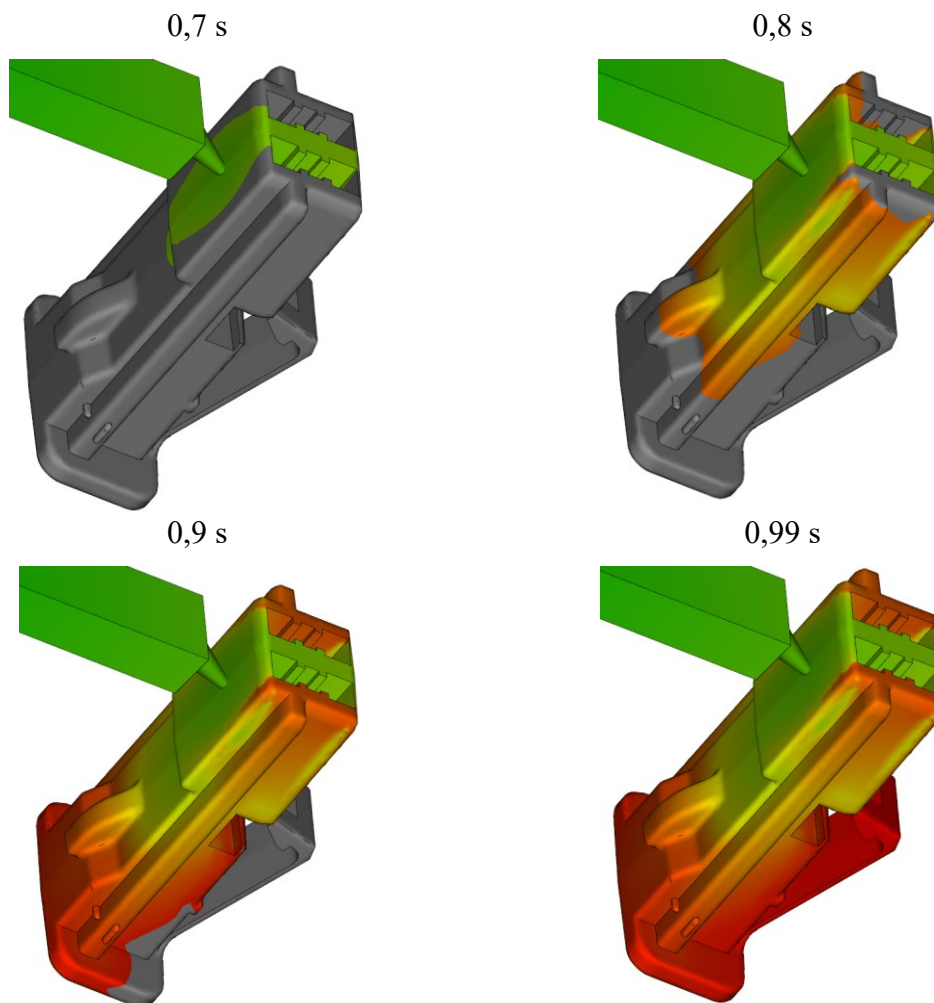
Při návrhu studeného vtokového rozvodu byl brán zřetel na rychlé a rovnoměrné zaplnění tvarové dutiny s minimálními vadami na vstříkovaném díle s ohledem na rozložení dílů a umístění bočních posuvných jednotek. Rovněž byl kladen důraz, aby docházelo k vyváženému plnění jednotlivých dutin, nevznikal nadměrný odpad a snadno se odformovával vtok. Z těchto důvodů byl navržen systém skládající se z vtokového kanálu, jehož tvar a rozměr je dán vtokovou vložkou, hlavní a vedlejší rozvodný kanál lichoběžníkového průřezu zakončený tunelovým vtokovým ústím. Předností zvoleného tunelového ústí je umožnění separace vtokového systému od výrobku během vyhazování. Aby výrobek po otevření formy zůstal na levé straně a mohlo dojít k jeho separaci s následným vyhozením, byl systém opatřen přídržovači vtoku.



Obrázek 33 Navržený studený vtokový systém

- **Čas plnění**

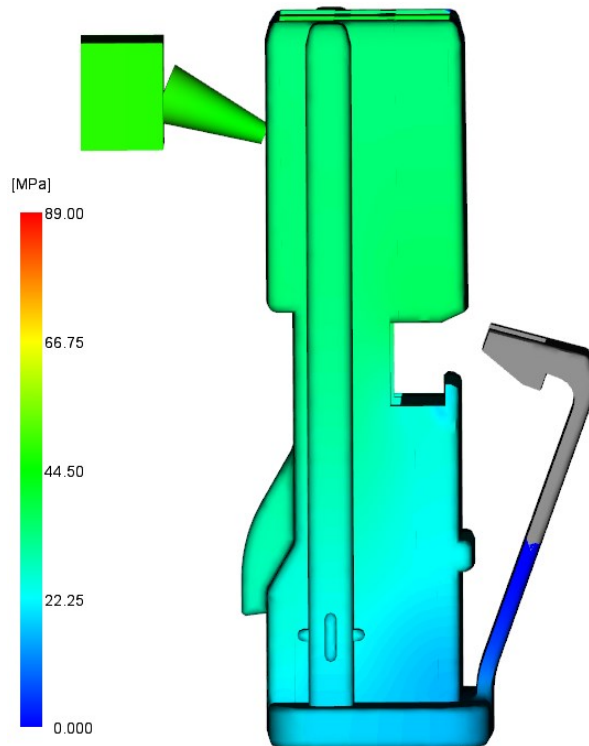
Výsledek reprezentuje plnění tvarové dutiny polymerní taveninou. Zelená barva značí místa, která jsou zaplněna nejdříve a červená barva pak místa, která jsou zaplněna nejpozději. Z výsledků lze konstatovat, že k počátku plnění jednotlivých dutin nastává v čase 0,7 s, kdy tavenina musí nejprve zaplnit vtokový systém a končí v čase 0,99 s naplněním pružného háčku. Plnění všech dutin probíhá rovnoměrně a dochází k požadovanému fontánovému toku. Navržený vtokový systém se tak jeví jako vhodný.



Obrázek 34 Průběh plnění dutiny při použití studeného vtokového systému

- **Tlak při přepnutí na dotlak**

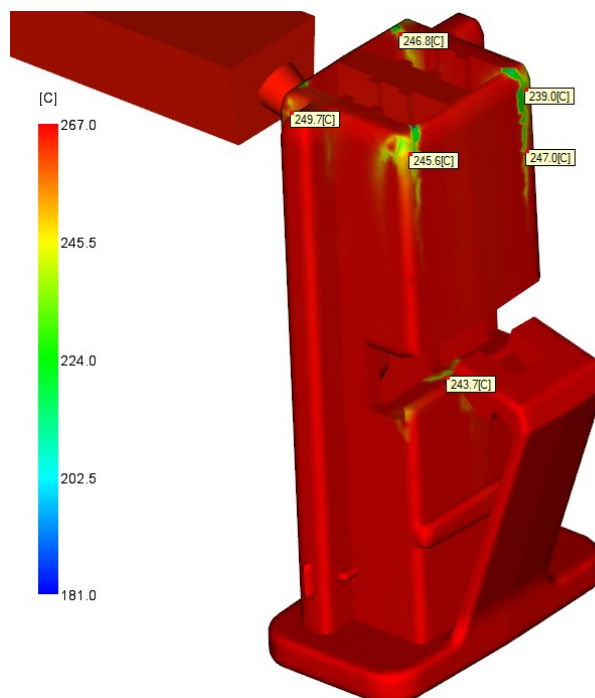
Výsledek znázorňuje tlak v systému v bodě přepnutí na dotlak. V tomto konstrukčním řešení se predikuje na hodnotu 89 MPa.



Obrázek 35 Tlak při přepnutí na dotlak

- **Teplota na čele taveniny**

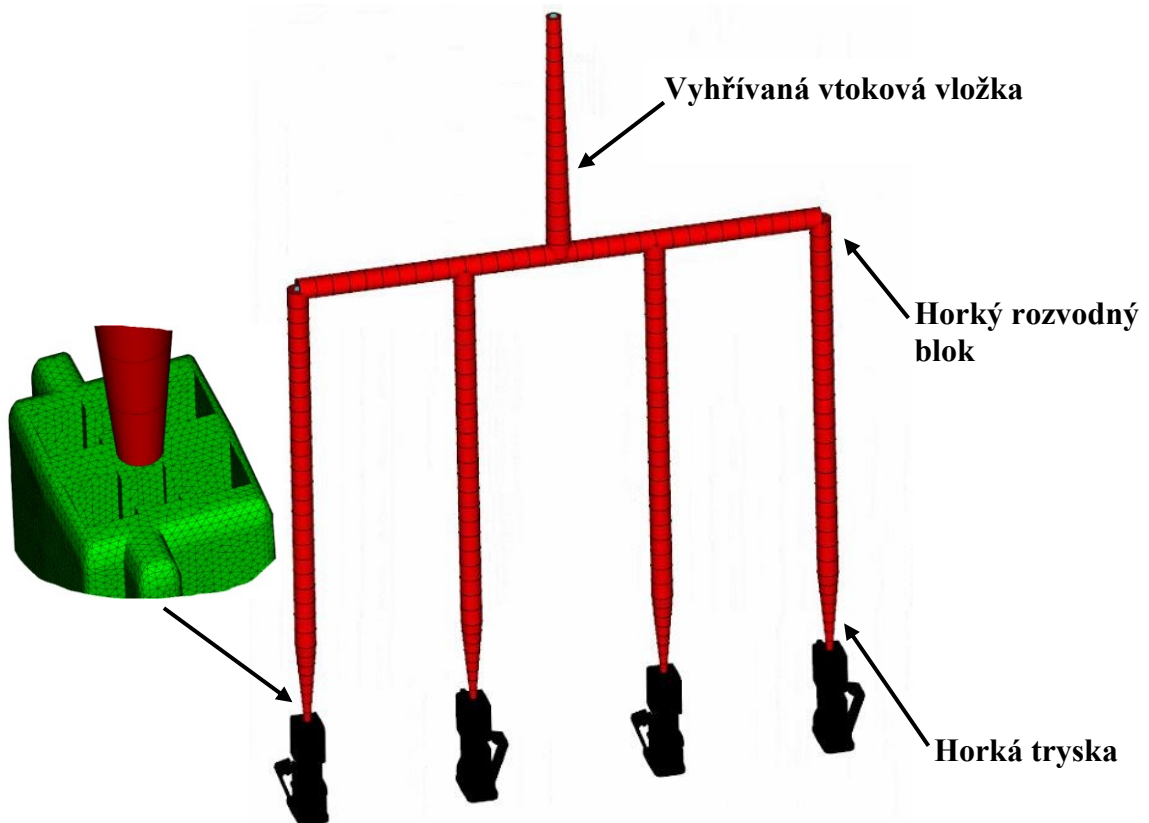
Výsledek představuje teplotu čela taveniny během plnění dutiny formy. Teplota čela taveniny se odkloňuje od nominální hodnoty v intervalu $+7\text{ °C}$ a -21 °C , přičemž nejnižší teplota čela se nachází v místech studených spojů.



Obrázek 36 Teplota čela taveniny

8.2.2 Návrh horkého vtokového systému

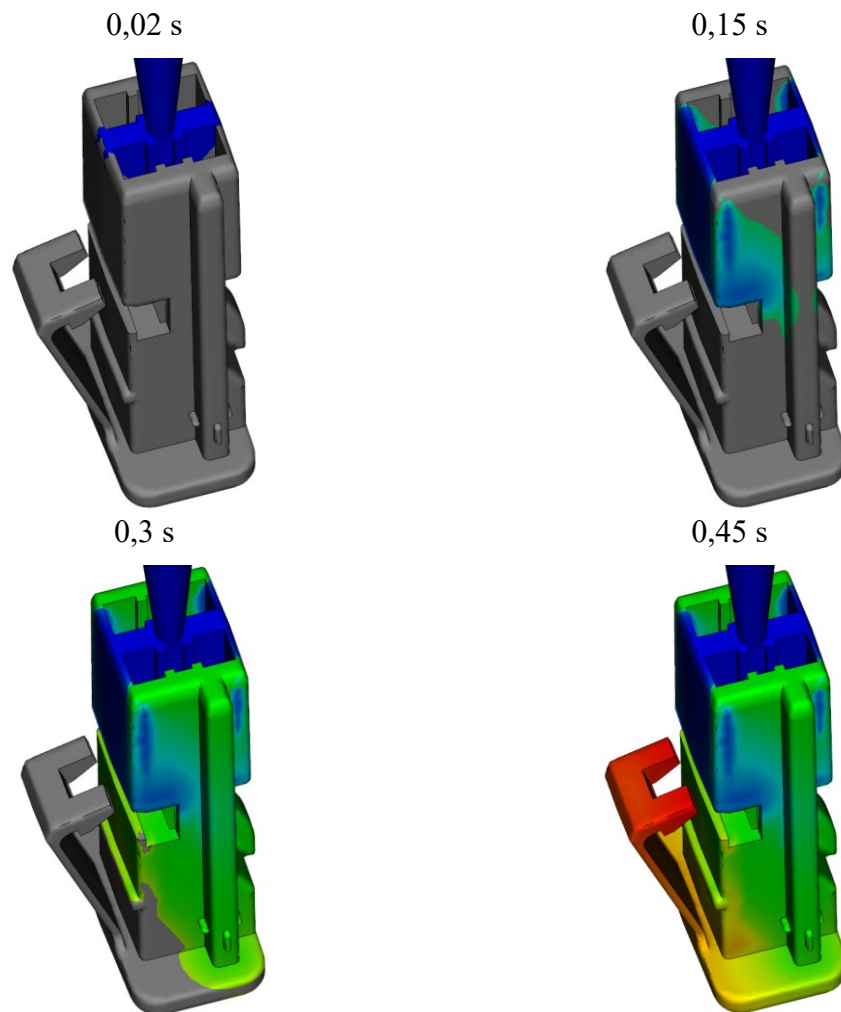
Další modifikace vtokového systému spočívala v použití horkého rozvodu. Zde však muselo dojít ke změně vtokového ústí z důvodu konstrukčního řešení samotného bloku. Vhodným místem k umístění vtoku tak připadla plocha na čele výrobku v bodě ležícím uprostřed. Horký vtokový systém se skládá z vyhřívané vtokové vložky, horkého rozvodného bloku a horké trysky. Průřez a trajektorie je pak udána výrobcem, jenž dodává danou normálii.



Obrázek 37 Navržený horký vtokový systém

- Čas plnění

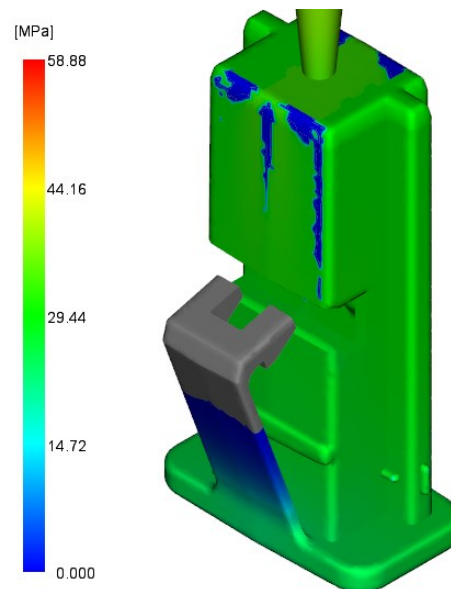
Výsledek představuje čas plnění pro horký vtokový systém, kdy v čase 0,01 s tavenina vstupuje do tvarové dutiny (modrá barva) až po úplné naplnění (červená barva) končí pružným háčkem v čase 0,45 s. Při použití horkého rozvodného systému probíhá rovnoměrné plnění všech dutin.



Obrázek 38 Průběh plnění při použití horkého vtokového systému

- **Tlak při přepnutí na dotlak**

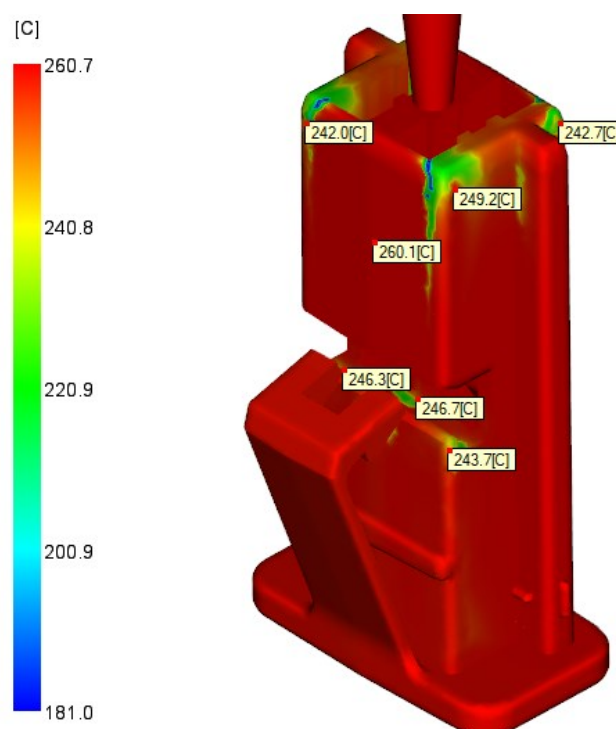
Výsledek znázorňuje tlak v systému v bodě přepnutí na dotlak. V tomto konstrukčním řešení se predikuje na hodnotu 59 MPa.



Obrázek 39 Tlak při přepnutí na dotlak

- **Teplota na čele taveniny**

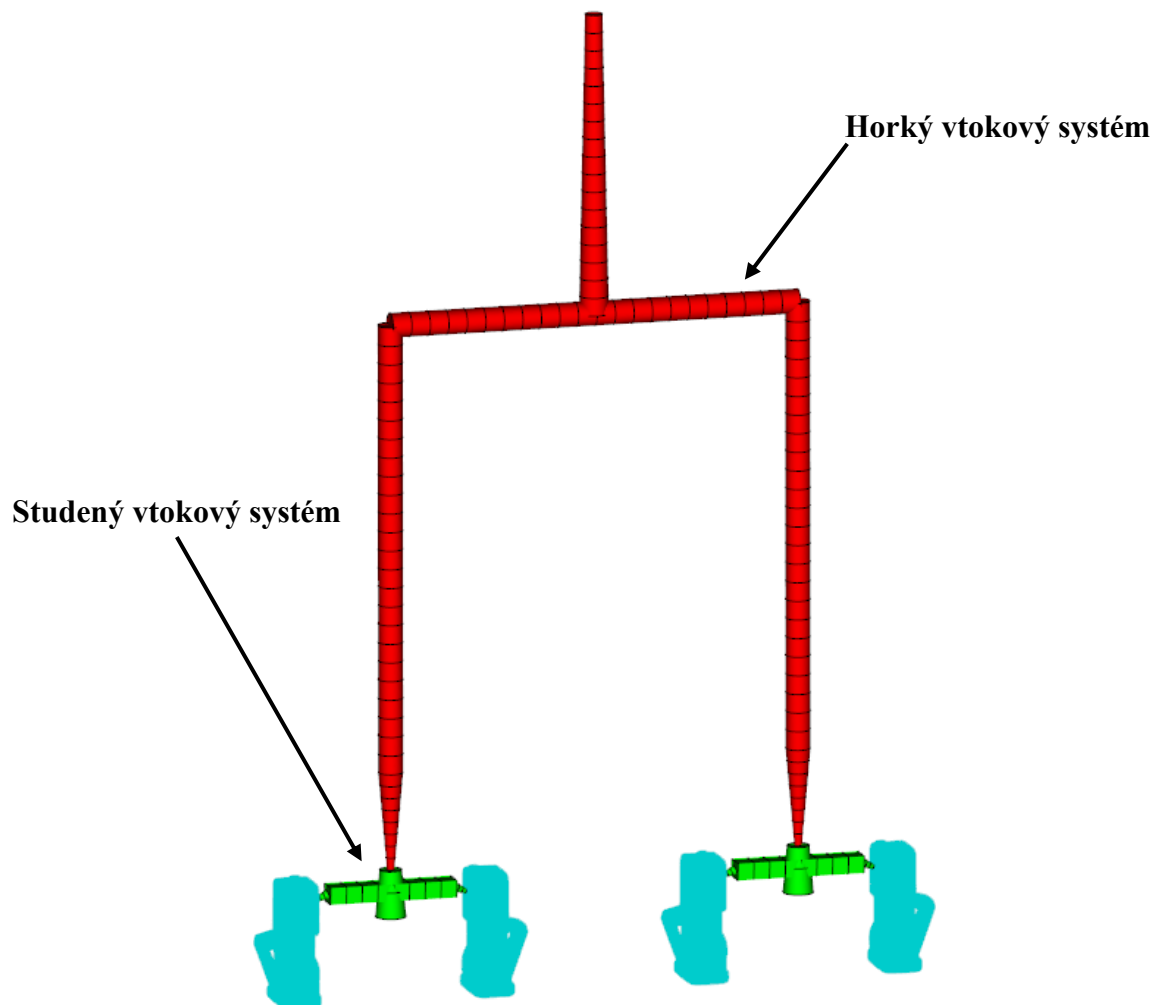
Výsledkem teploty na čele taveniny je interval od +0,7 °C až po -20 °C, jenž se odklání od nastavené hodnoty. K poklesu teploty nastává v místech studených spojů.



Obrázek 40 Teplota na čele taveniny

8.2.3 Návrh kombinace horkého a studeného systému

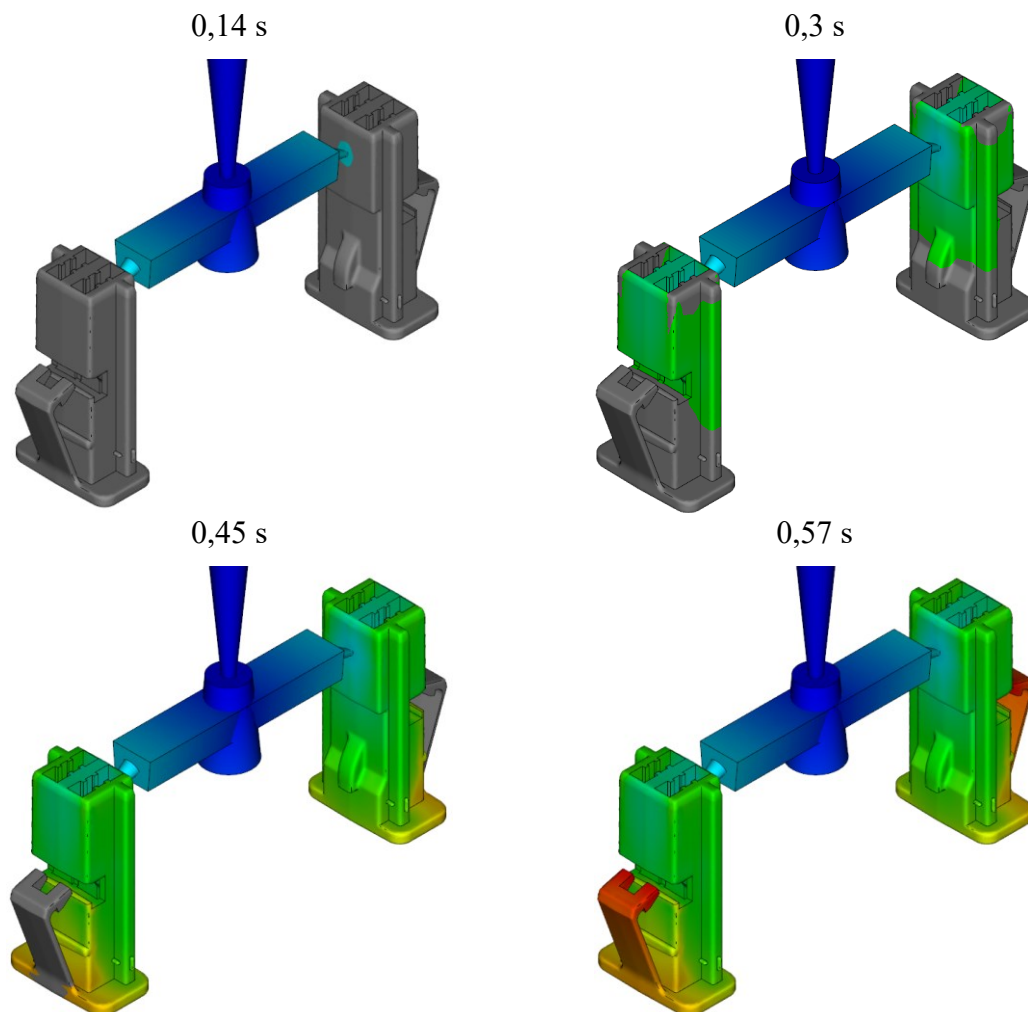
Třetí modifikací vtokového systému bylo použití kombinace studeného a horkého rozvodu. Horký rozvod je dán požadovanou konfigurací dle výrobce normálií. Studený systém tvoří lichoběžníkový rozvodný kanál a tunelové vtokové ústí, jenž se osvědčilo v případě prvního návrhu. Délka trajektorie rozvodného kanálu byla volena co nejmenší s ohledem na konstrukční proveditelnost všech komponent. K požadované separaci a přidržení vtokového systému s výrobky na správné straně během otevírání formy byl vytvořen přidržovač vtoku.



Obrázek 41 Navržený kombinovaný vtokový systém

- Čas plnění

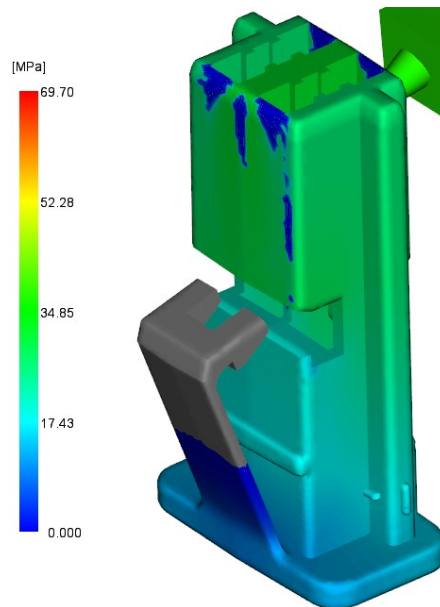
Průběh plnění nastává v čase 0,14 s (modrá barva), kdy tavenina vstupuje do tvarových vložek výrobku prostřednictvím tunelového ústí a rozvodného kanálu. K úplnému naplnění dutiny dochází v čase 0,57 s (červená barva). Díky symetrickému rozložení dutin a studenému rozvodu probíhá rovnoměrné plnění všech dutin.



Obrázek 42 Průběh plnění při použití kombinovaného vtokového systému

- **Tlak při přepnutí na dotlak**

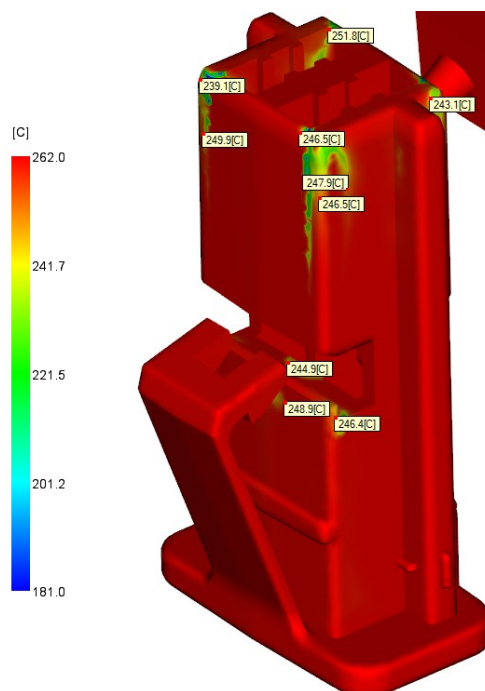
Výsledek znázorňuje tlak v systému v bodě přepnutí na dotlak. V případě kombinovaného konstrukčního řešení se predikuje na hodnotu 69,7 MPa.



Obrázek 43 Tlak při přepnutí na dotlak

- **Teplota na čele taveniny**

Teplota na čele taveniny se pohybuje v rozmezí od +2 °C do -20,9 °C od nastavené hodnoty. K největším poklesům dochází v místech vzniku studených spojů a nejmenších tloušťkách na díle.



Obrázek 44 Teplota na čele taveniny

8.2.4 Vyhodnocení navržených variant

Tabulka 5 Získané výsledky při řešení vtokového systému

| Výsledek | Způsob řešení vtokového systému | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| | SVS | HVS | Kombinovaný |
| Čas plnění [s] | 0,99 | 0,45 | 0,57 |
| Tlak při přepnutí na dotlak [MPa] | 89 | 59 | 69,7 |
| Teplota na čele taveniny [°C] | 260_{-21}^{+7} | $260_{-20}^{+0,7}$ | $260_{-20,9}^{+2}$ |

V případě konstrukčního řešení s využitím studeného vtokového systému byly trajektorie a průřezy jednotlivých kanálů voleny tak, aby došlo k úplnému a rovnoměrnému zaplnění všech dutin s umožněním separace vtoků od dílců v průběhu vstřikovacího cyklu. Z výsledků simulace bylo zjištěno, že k úplnému zaplnění dutiny dojde za 0,99 s. Tlak při přepnutí na dotlak byl predikován na 89 MPa. K výraznému poklesu teploty čela taveniny dochází v místech studených spojů a tenkých stěn. Nevýhodou navrženého systému je příliš dlouhá dráha rozvodných kanálů vlivem rozmístění bočních odformovacích jednotek. S tímto problémem nastává generace velkého odpadu v podobě vtokových zbytků, které v tomto případě tvoří 9,6 g v porovnání s výrobky (3,2 g). Dále vlivem malé výšky dílce vzniká nemožnost efektivní temperace bočních čelistí, čímž by došlo k prodlužování doby chlazení a rozdílného teplotního pole formy.

Při návrhu horkého rozvodného systému bylo nutné změnit polohu vtokového ústí. Zde přicházela v úvahu čelní plocha, kde byl nalezen vyhovující bod uprostřed. Trajektorie jednotlivých částí horkého systému byly nastaveny na základě konfigurátoru výrobce dané normálie. Z výsledků simulace byl odečten čas plnění, kdy ke kompletnímu zaplnění došlo za 0,45 s. Tlak v bodě přepnutí na dotlak odpovídal hodnotě 59 MPa. K poklesu teploty dochází na místech, kde se setkávají čela tavenin. Hlavním problémem takto navrženého systému pro zadaný díl je kolize horké trysky s vložkou formující vnitřní plochy vyráběného dílce.

Na základě předchozích výsledků byl nasimulován kombinovaný vtokový systém, kdy byl použit horký rozvod a studený vtokový systém. Trajektorie rozvodného kanálu byla zkrácena s ohledem na konstrukční realizovatelnost, vyrobiteľnosť a funkčnost celku. K plnění formy taveninou z rozvodného kanálu do místa na dílu bylo použito tunelové

vtokové ústí. K úplnému zaplnění dutiny došlo za 0,57 s. Tlak při přepnutí na dotlak byl predikován na 69,7 MPa. Pokles teploty na čele taveniny je v oblastech studených spojů, jenž jsou dány geometrií dílu. Na takto navrženém systému nebyly nalezeny komplikace bránící celkové realizovatelnosti, proto návrh sloužil jako podklad při konstrukci vstřikovací formy.

8.3 Volba temperačního systému

V průběhu konstrukce formy bylo potřeba zhotovit temperační systém určený k chlazení výrobků a udržení rovnoměrného teplotního pole během cyklu. Zde nastala možnost navrhnout jednoduché kanály vyráběné prostým vrtáním nebo konformní způsob temperace v podobě kanálů se sofistikovanou geometrií pomocí technologie DMLS. Pro vyhodnocení funkčnosti jednotlivých variant a volbě optimálního navrženého temperačního systému byla použita simulace chlazení (Cool), jejíž procesní podmínky byly uvedeny v Tabulce 5. Ze získaných výsledků byla zkoumána především:

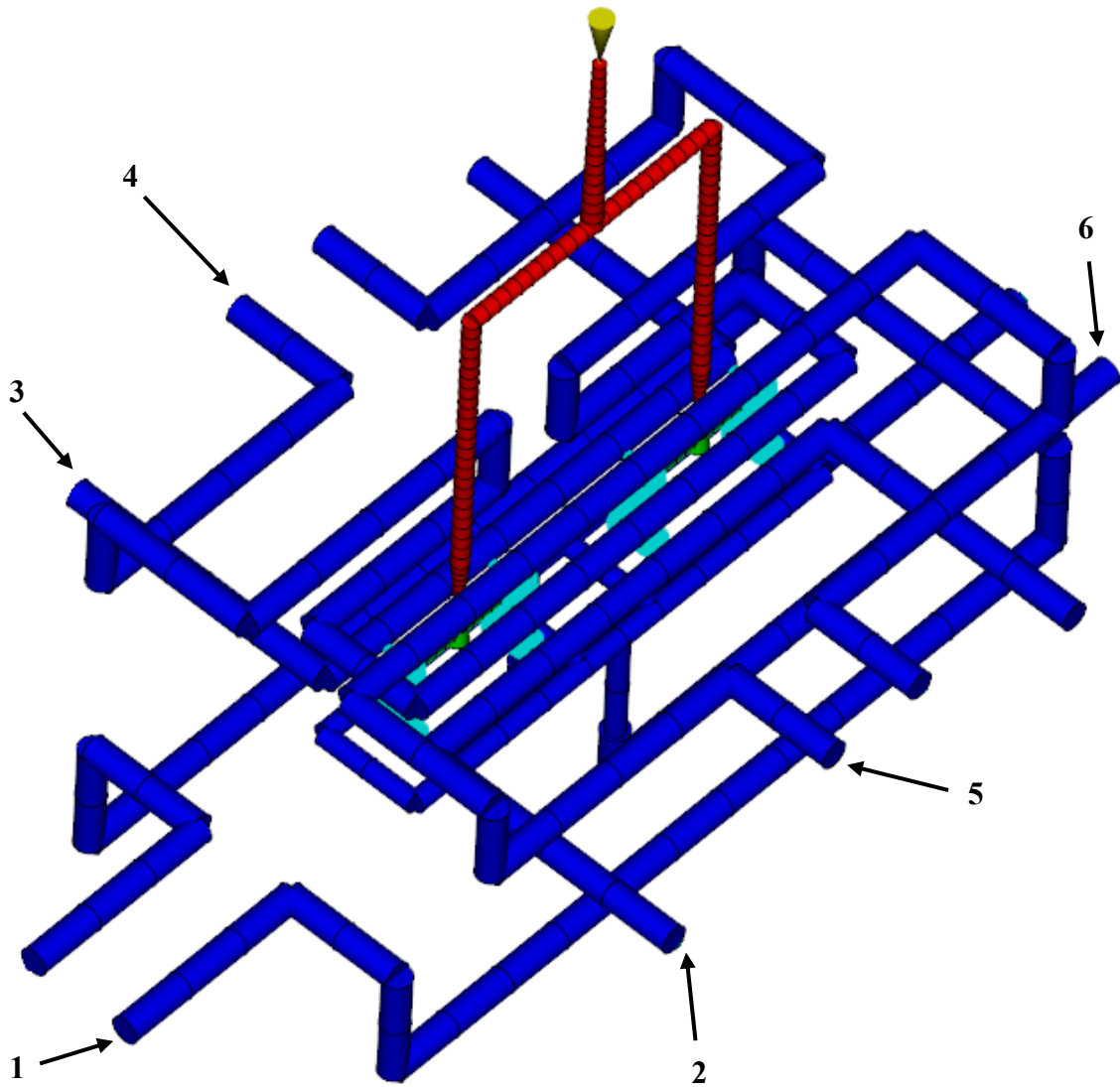
- teplota temperačního média,
- efektivita navržených kanálů,
- tlak média v okruzích,
- čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty.

Tabulka 6 Nastavení procesních podmínek simulace chlazení

| | |
|--|--------------------------------------|
| Teplota taveniny [°C] | 260 |
| Teplota formy [°C] | 60 |
| Čas plnění | Automatický |
| Bod přepnutí na dotlak při procentuálním zaplnění dutiny [%] | 97 |
| Hodnota dotlaku [%] | 80 |
| Čas chlazení [s] | 20 |
| Čas působení dotlaku [s] | 10 |
| Teplota okolí [°C] | 25 |
| Temperační médium | 10 % Ethylenglykol / 90 % voda |
| Objemový průtok média [l/min] | 10 |
| Vyhazovací teplota [°C] | 171,4 |

8.3.1 Návrh konvenčního způsobu chlazení

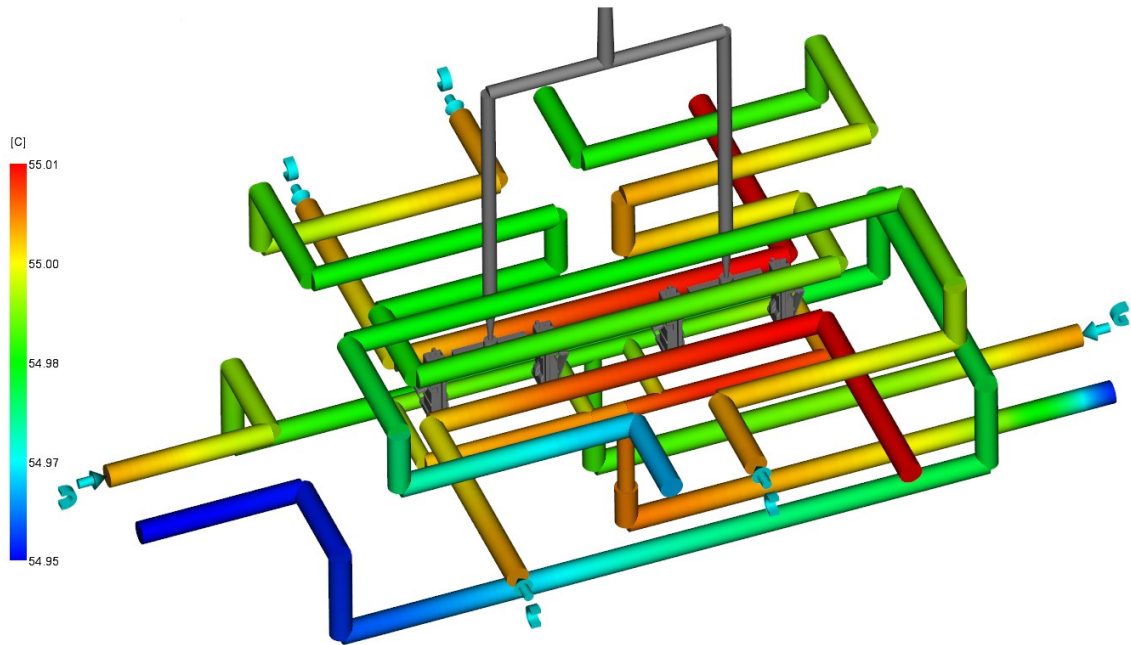
Při návrhu konvenčního způsobu chlazení byly využity kanály o průměru 6 a 8 mm, které se co nejvíce přiblíží tvarovým dutinám a zajistí tak účinný odvod tepla s ohledem na konstrukční a výrobní realizovatelnost. Tyto kanály byly rozděleny do šesti samostatných okruhů, z nichž dva jsou uvažovány na levé straně, dva na pravé straně formy a dva na čelistech, jež jsou součástí bočního odformování.



Obrázek 45 Navržený konvenční způsob chlazení

- **Teplota temperačního média**

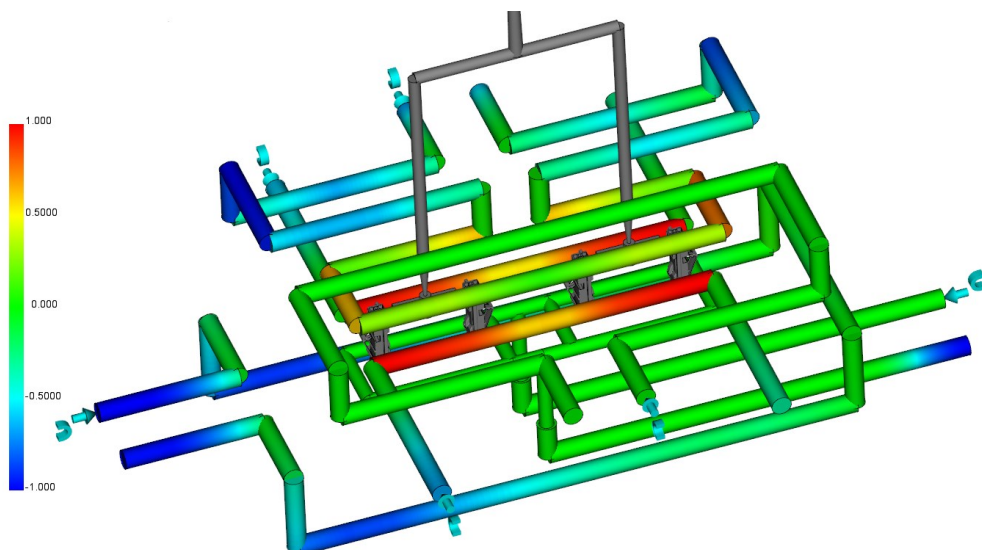
Výsledek představuje teplotu média při jeho průchodu skrze jednotlivé okruhy. V ideálním případě by neměl přesáhnout rozdíl mezi vstupem a výstupem teplotu vyšší než 3 °C. Zde se nachází teplota v intervalu od - 0,05 °C po + 0,01 °C od nominální teploty.



Obrázek 46 Teplota temperačního média

- **Efektivita navržených kanálů**

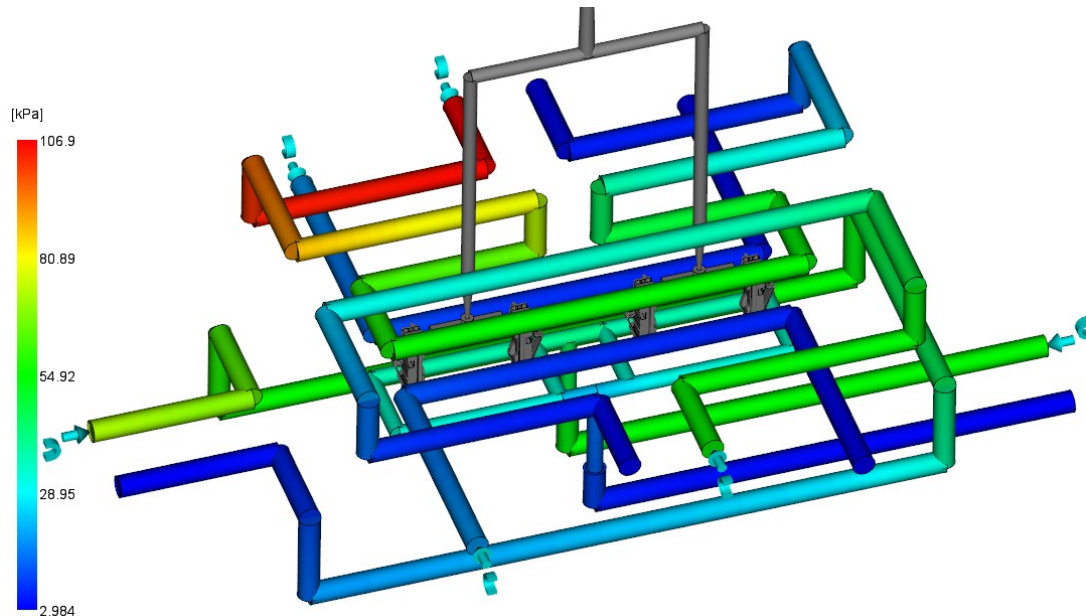
Výsledek reprezentuje efektivitu navržených kanálů, z nichž nejméně účinná jsou místa označená modrou barvou, naopak nejúčinnější jsou místa s barvou červenou. Nejvíce tepla odvádějí okruhy na straně bočního odformování.



Obrázek 47 Efektivita navržených kanálů

- **Tlak média v okruzích**

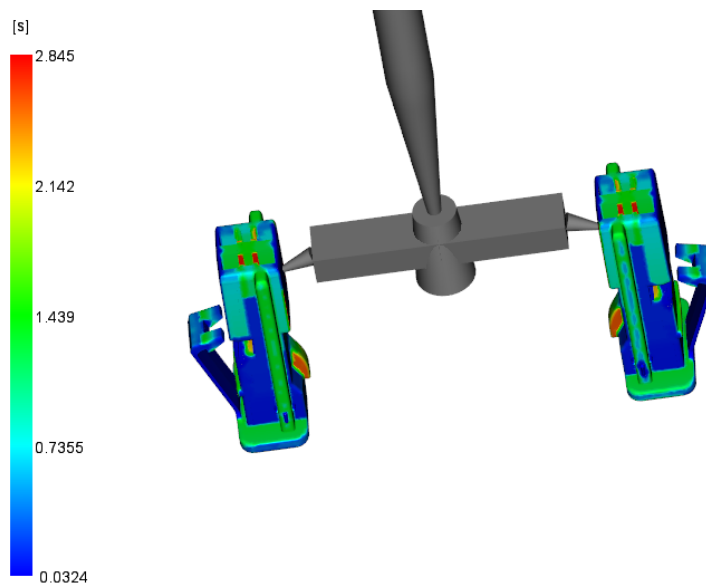
Výsledek charakterizuje tlakovou ztrátu temperačního média v závislosti na jeho průchodu kanály. Z výsledku je patrné, že médium ve všech místech proudí, jelikož v žádném místě není nulový tlak a odvod tepla je tak účinný.



Obrázek 48 Tlak média

- **Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty**

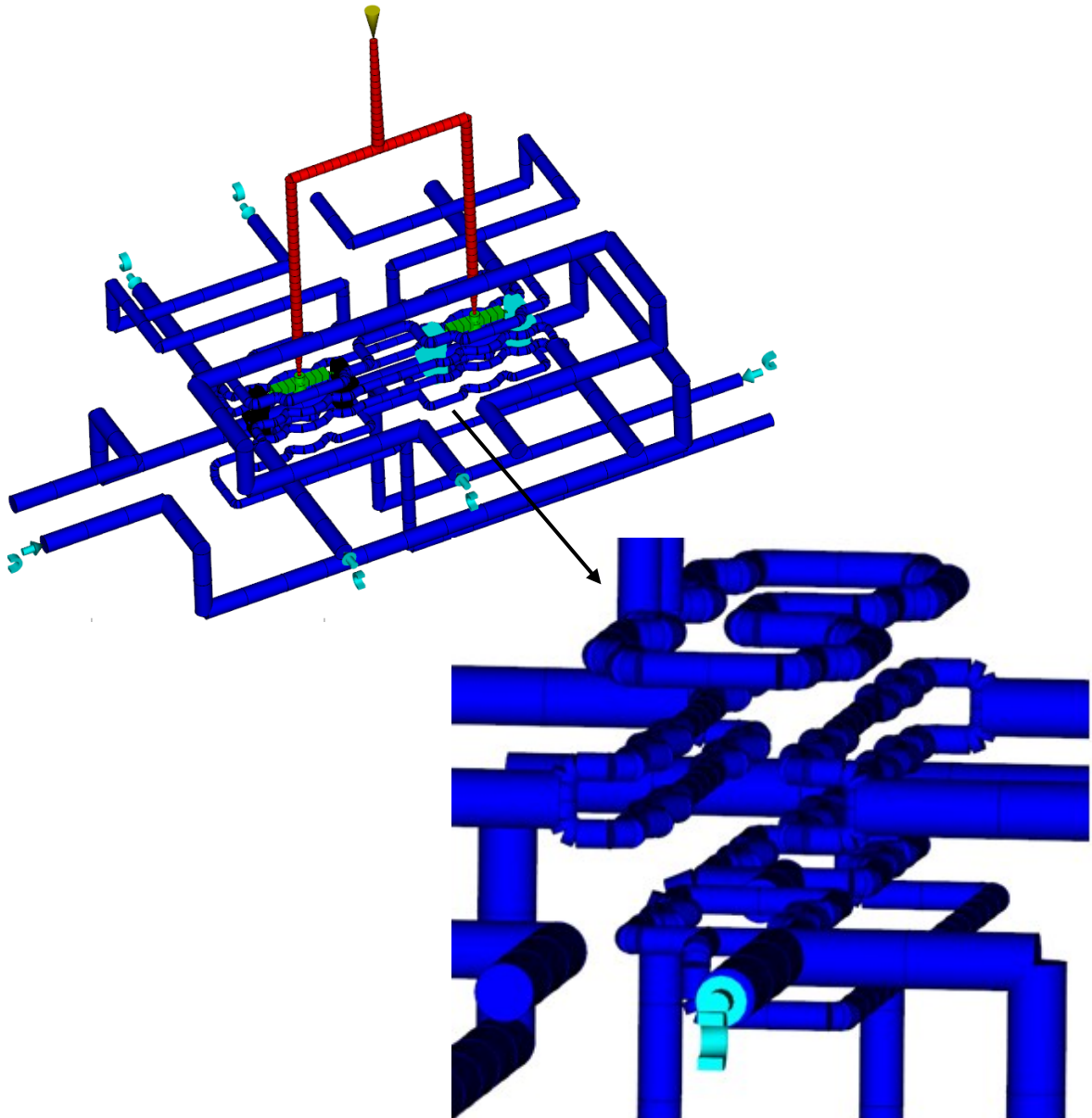
Barevné rozvržení míst značící čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty začíná modrými oblastmi, která zchladnou nejrychleji, až po místa červená, jenž zchladnou jako poslední. K celkovému ochlazení výrobku na vyhazovací teplotu dojde za 2,845 s.



Obrázek 49 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty

8.3.2 Návrh konformního způsobu chlazení

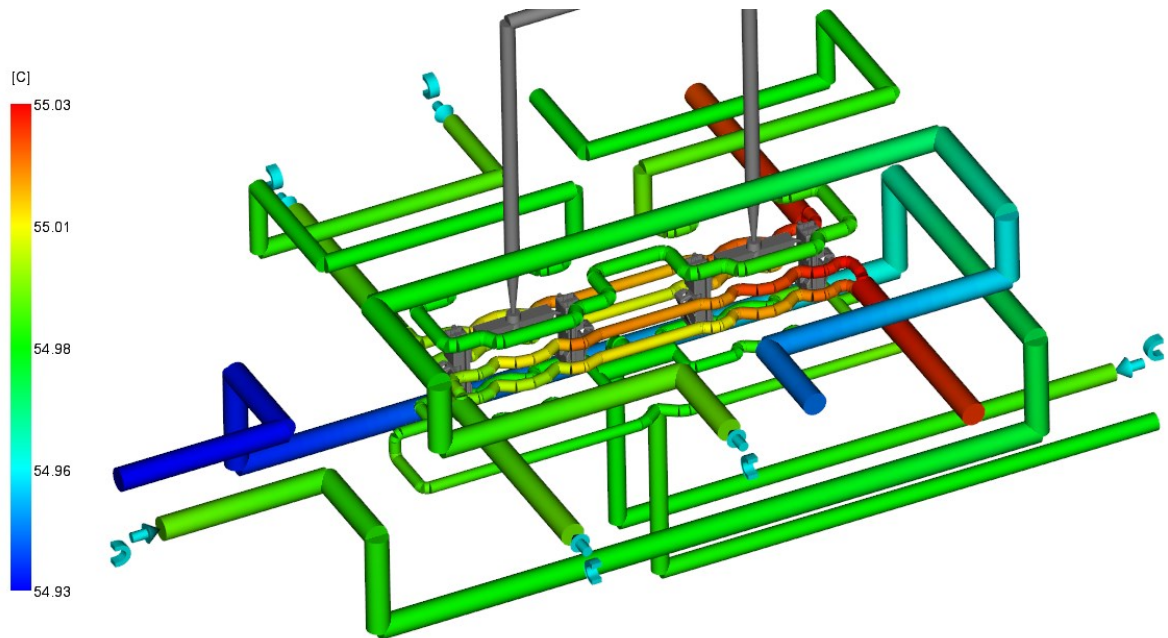
Při návrhu konformního způsobu chlazení bylo vycházeno z trajektorií konvenčního způsobu chlazení, pouze kanály v těsném kontaktu s výrobkem byly modifikovány. Dráha těchto kanálů co nejpřesněji kopíruje konturu výrobku s ohledem na limity technologie DMLS s cílem maximalizovat účinnost odvodu tepla, snížit velikost deformace a také čas cyklu.



Obrázek 50 Návrh konformního způsobu chlazení

- **Teplota temperačního média**

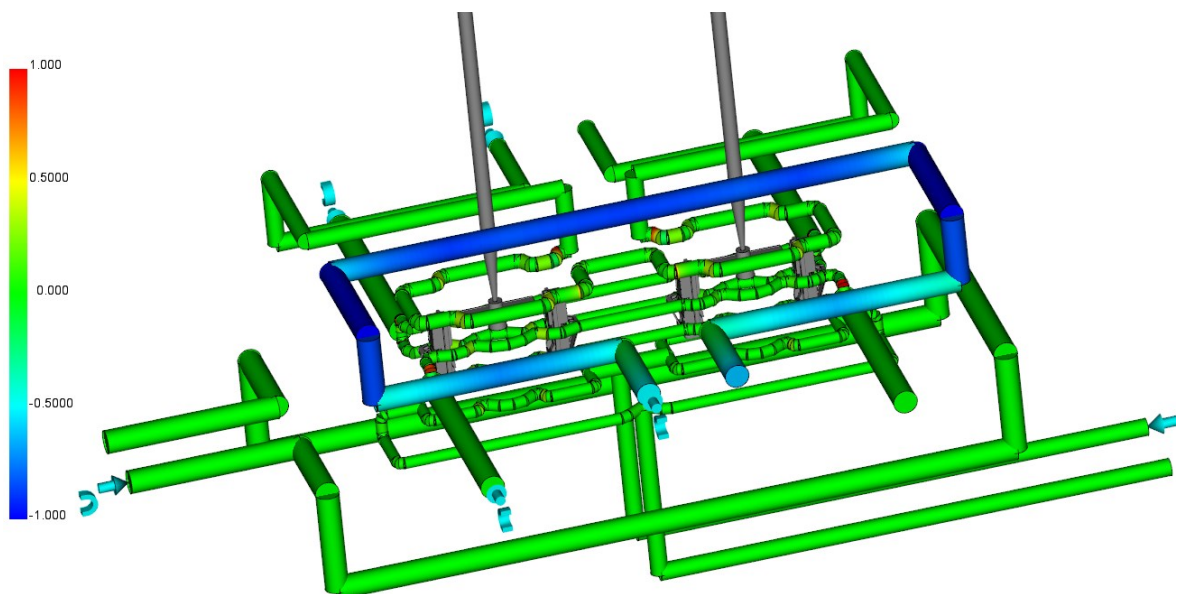
V případě konformního způsobu chlazení je teplota média v intervalu od - 0,07 do + 0,03 °C od nastavené vstupní teploty, čímž nepřesahuje kritický rozdíl 3 °C.



Obrázek 51 Teplota temperačního média

- **Efektivita navržených kanálů**

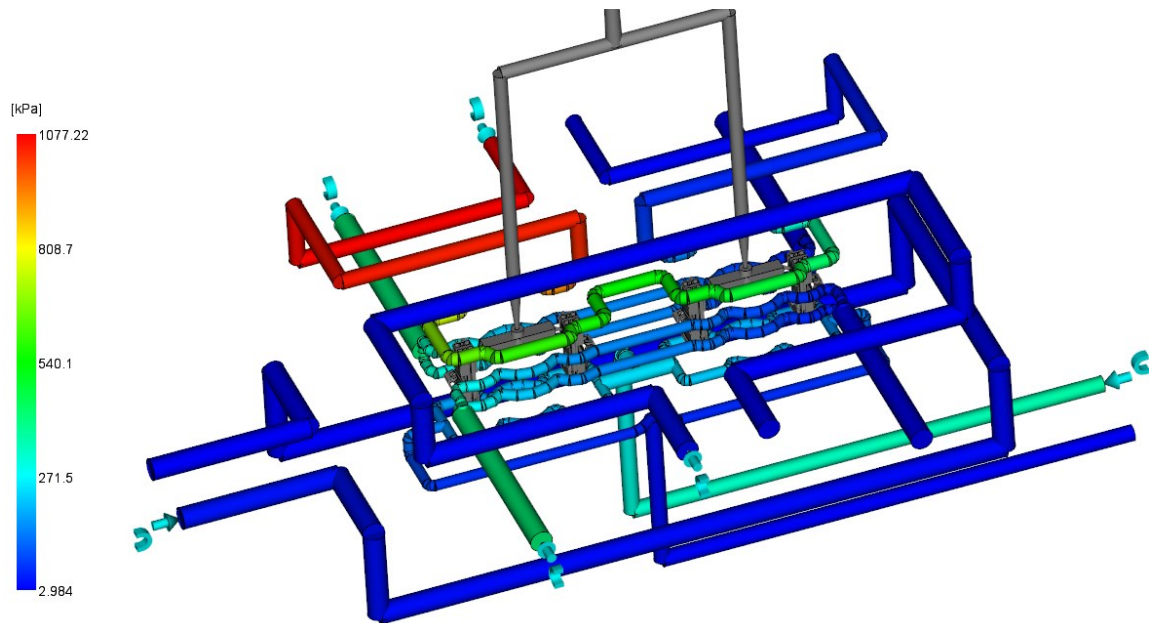
Nejméně efektivními jsou místa označená modrou barvou, jenž jsou nejvíce vzdálená od tvarových vložek, naproti tomu nejvíce efektivní jsou místa s červenou barvou, které tvoří kanály v oblastech bočního odformování.



Obrázek 52 Efektivita odvodu tepla navržených kanálů

- **Tlak média v okruzích**

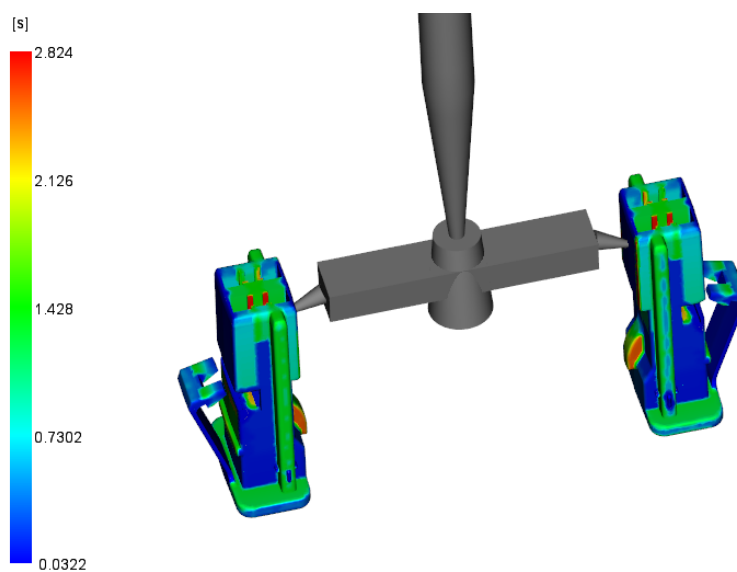
Tlak média v okruzích není v žádném místě nulový, dochází tak k proudění a účinnému odvodu tepla.



Obrázek 53 Tlak média

- **Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty**

Z výsledku lze charakterizovat, že místa označena modrou barvou jsou ochlazená nejrychleji, naproti tomu červená místa nejpomaleji. K úplnému zchlazení výrobku na vyhazovací teplotu dochází za 2,824 s.



Obrázek 54 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty

8.3.3 Vyhodnocení navržených variant

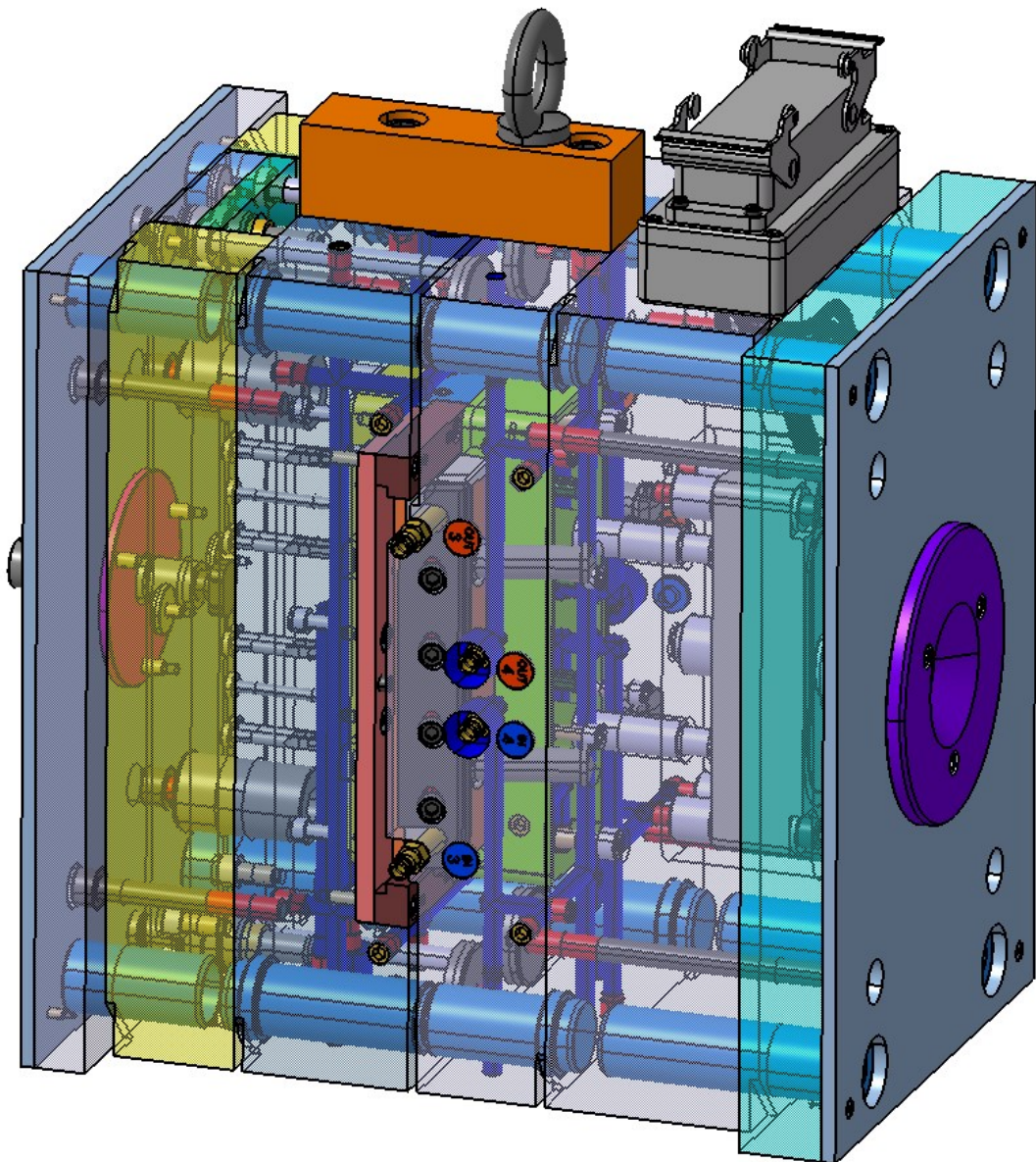
Tabulka 7 Získané výsledky při řešení temperačního systému

| Výsledek | Způsob řešení temperačního systému | |
|--|------------------------------------|----------------------|
| | Konvenční | Konformní |
| Teplota chladícího média [°C] | $55^{+0,01}_{-0,05}$ | $55^{+0,03}_{-0,07}$ |
| Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty [s] | 2,845 | 2,824 |

Ze získaných výsledků simulace chlazení je patrné, že navržený konvenční a konformní způsob temperace by byl v obou případech funkční a dostatečně účinný. Oba návrhy splňují podmínku rozdílu teplot a požadovaného tlaku. Rozhodujícím faktorem při výběru pak může být čas potřebný k dosažení teploty, který byl nižší o 0,021 s ve prospěch konformního řešení temperace. Vzhledem k velmi malému rozdílu nelze předpokládat, že by se vysoké náklady spojené se zhotovením tištěných vložek ekonomicky vyplatily, proto byl do konstrukce formy zvolen konvenční způsob temperace v podobě vrtaných kanálů.

9 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

Při konstrukčním návrhu vstřikovací formy byl kladen důraz na použití maximálního množství normalizovaných komponent od společnosti Meusburger s pomocí dostupného online katalogu. Používání normálií v konstrukci vede ke snížení nákladů na výrobu, dodacích lhůt a usnadnění konstrukce. K realizaci samotného návrhu byl využit software CATIA V5R20 s moduly Part Design a Assembly Design. Průběh konstrukčního řešení se odvíjel od prvotních analýz vstřikování a dle obecných zásad pro konstrukci forem.



Obrázek 55 Celková sestava vstřikovací formy

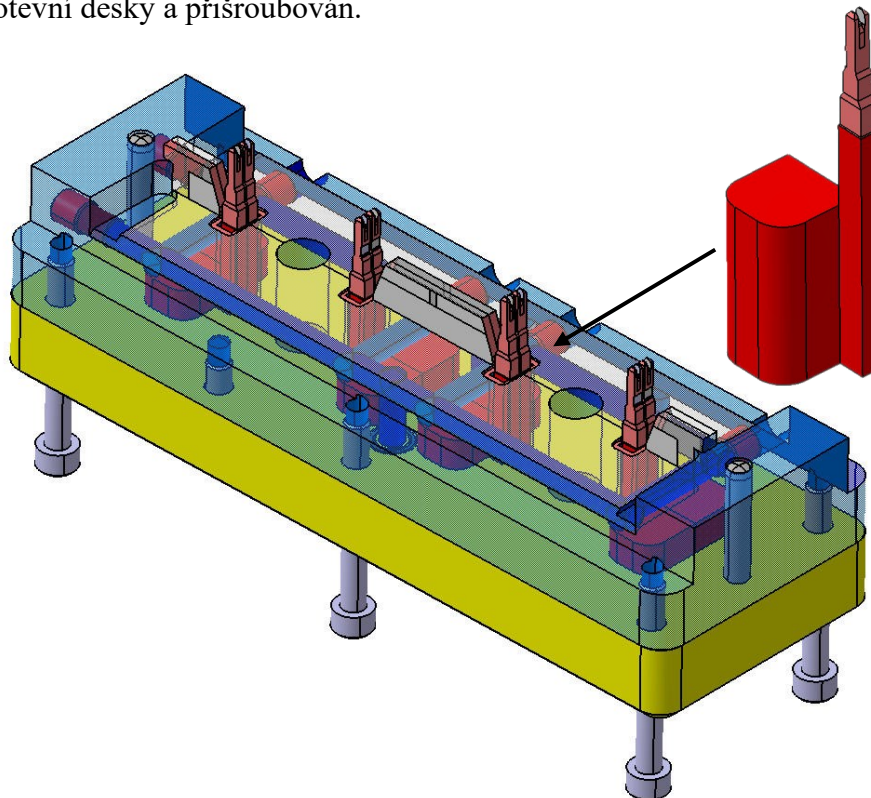
9.1 Rám formy

Na rám formy byla použita série normalizovaných desek o rozměrech 196 x 346 mm s ohledem na velikost vstříkovaného výrobku, požadovanou násobnost a prostor pro realizaci bočního odformování. Levou část formy tvoří čtveřice desek: kotevní deska, dvě rozpěrné desky a upínací deska. Pravá část se skládá z trojice desek, a to kotevní desky, desky horkého bloku a upínací desky. Obě strany pak byly doplněny o izolační desky tak, aby nedocházelo ke značným ztrátám tepla do rámu stroje.

9.2 Tvarové komponenty formy

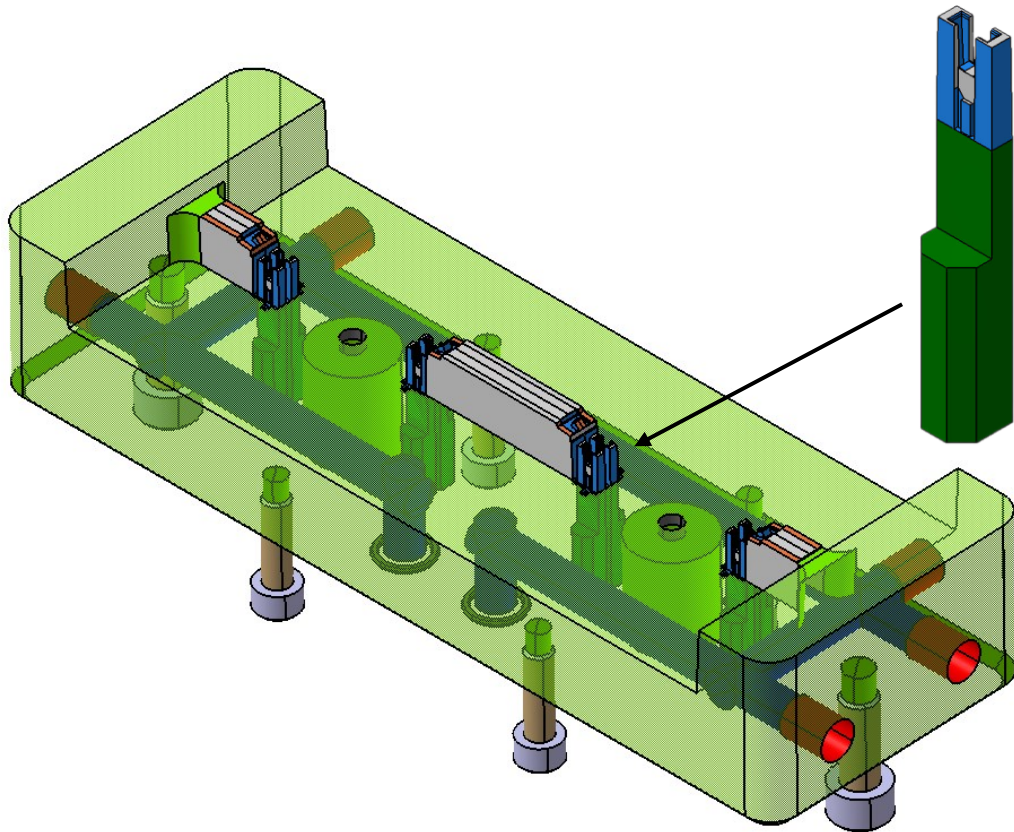
Tvaru požadovaného výrobku je dosaženo pomocí dutiny vzniklé mezi tvarovými vložkami nazývané jako tvárník a tvárnice. Tato dutina odpovídá negativu vyráběného dílu a při konstrukci musí být zvětšena o smrštění vstříkovaného materiálu, které v tomto případě odpovídá hodnotě 1,6 %.

Tvárník je umístěn na levé, tedy pohyblivé straně, na níž zůstává výrobek po otevření formy. V tomto konstrukčním řešení byl rozdělen na samotnou desku, jenž formuje vnější plochy a vložky formující dutinu, které byly do ní umístěny. Dále je opatřen otvory pro umístění vyhazovačů. Ze spodní strany se nachází přítlačná deska, se kterou je společně vsazen do kotevní desky a přišroubován.



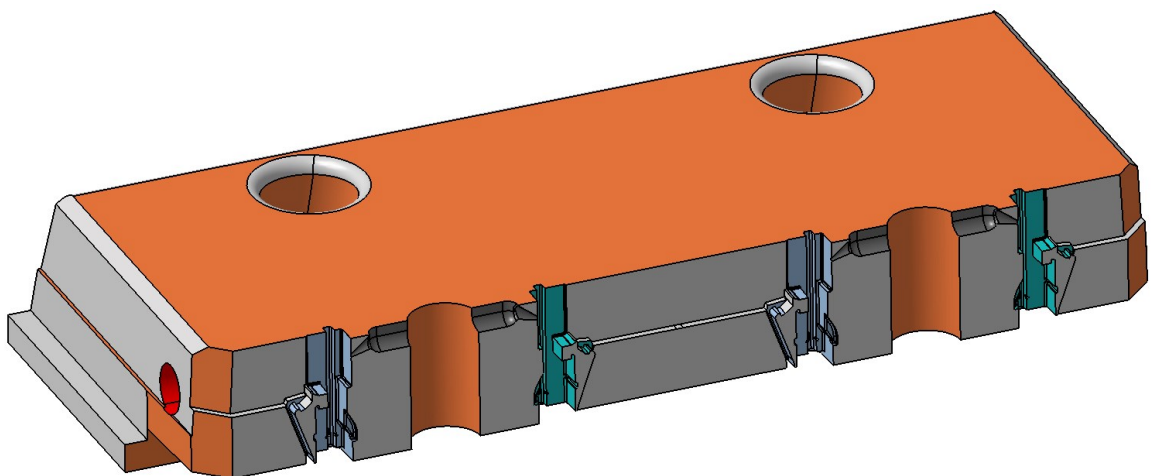
Obrázek 56 Tvárník

Tvárnice se nachází na pravé, tedy vstřikovací straně formy. Formuje část vnějších ploch a zbývající vnitřní plochy pomocí vložek v ní umístěných. Dále zde ústí tryska horkého vtoku. Celá deska spolu s vložkami je umístěna do kotevní desky, kde je přišroubována.



Obrázek 57 Tvárnice

Boční tvarová čelist, jež je součástí bočního odformování, formuje postranní vnější plochy spolu se studeným vtokovým rozvodem.

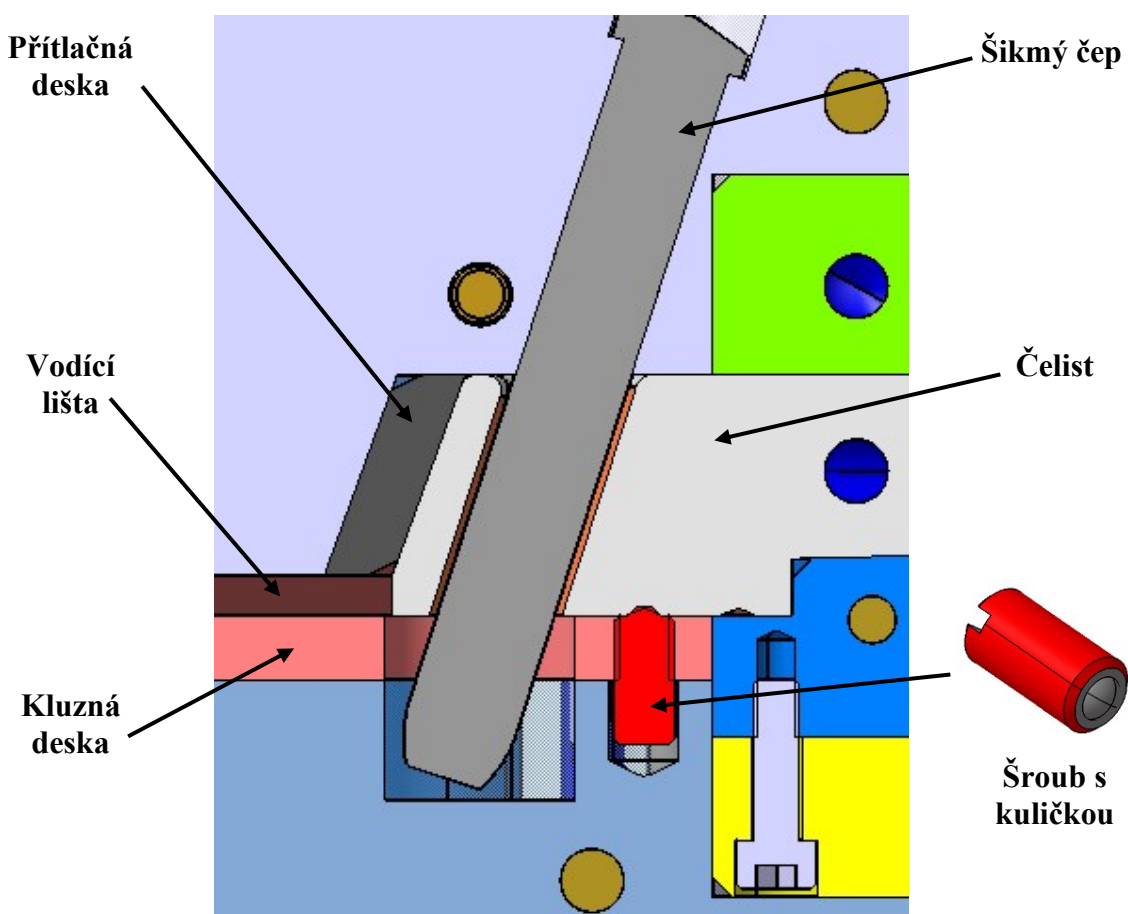


Obrázek 58 Boční tvarová čelist

Všechny tyto tvarové komponenty přicházející do styku s taveninou polymeru jsou vyrobeny z vysoce jakostní nástrojové oceli a podrobeny tepelnému zpracování – kalením a popouštění.

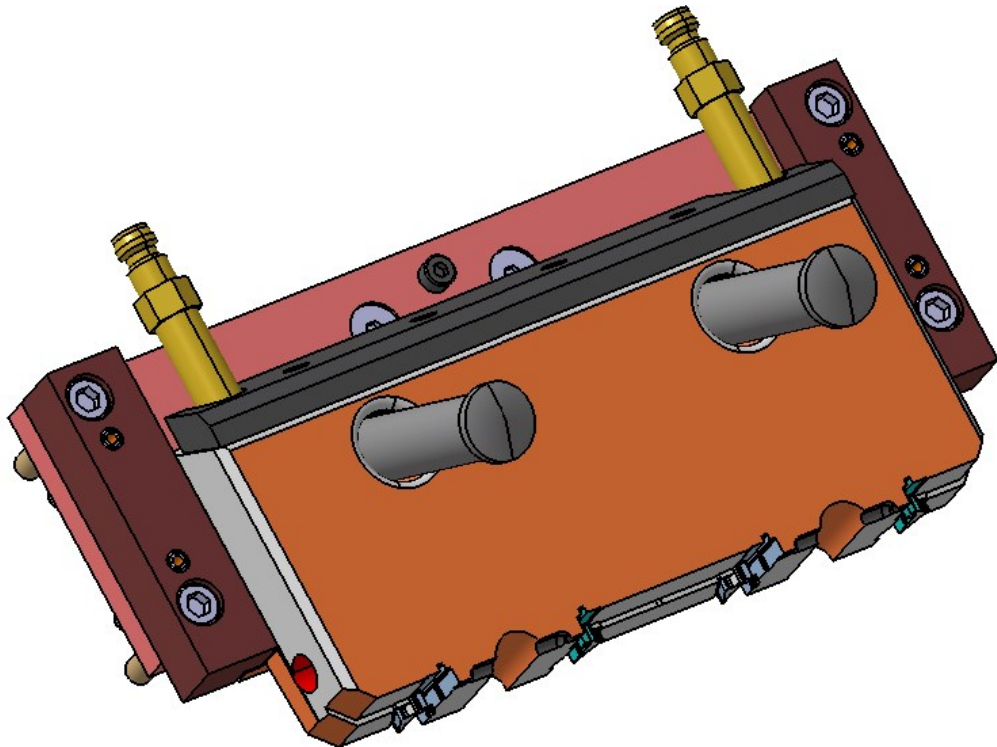
9.3 Boční odformování

Boční odformování je realizováno prostřednictvím boční posuvné jednotky, která umožňuje odformovat postranní vnější plochy spolu se studeným rozvodem. Během otevírání formy odjíždí boční tvarová čelist po šikmém vodícím čepu do stran, čímž dojde k odformování. Schéma celé jednotky je znázorněno na Obrázku 59.



Obrázek 59 Řez boční posuvnou jednotkou

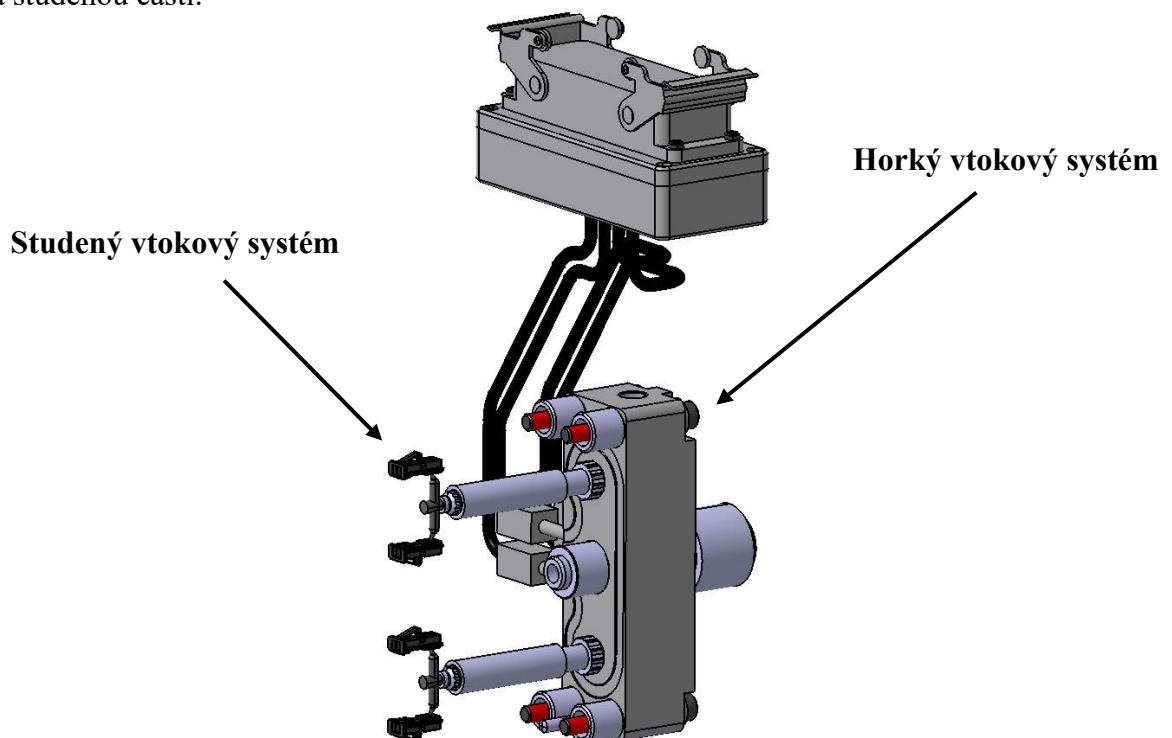
Přesné vedení čelisti po kluzné desce, která je mazána vlivem maziva v mazacích drážkách, zajišťují vodící lišty. K přidržení čelisti v krajních polohách slouží šroub s kuličkou, jenž přesně dosedá do otvoru na čelisti. Vzdálenost krajních poloh byla stanovena na 11,75 mm tak, aby bylo možné výrobek spolehlivě vyhodit a nedocházelo ke kolizím.



Obrázek 60 Sestava boční posuvné jednotky

9.4 Vtokový systém

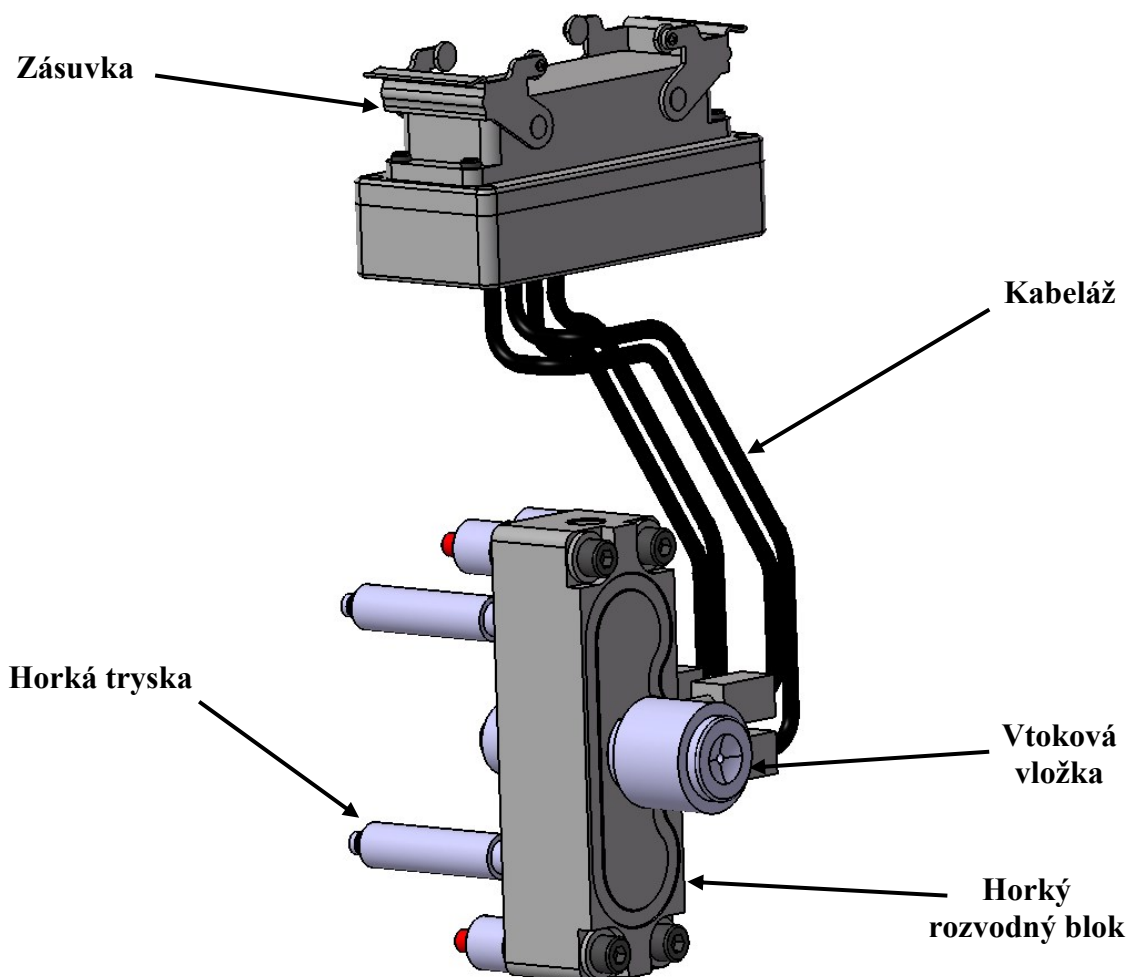
O dopravu taveniny polymeru do dutiny formy se stará vtokový systém, jenž byl v prvotních simulačních studiích navržen jako kombinovaný, takže je tvořen zvlášť horkou a studenou částí.



Obrázek 61 Vtokový systém formy

9.4.1 Horký vtok

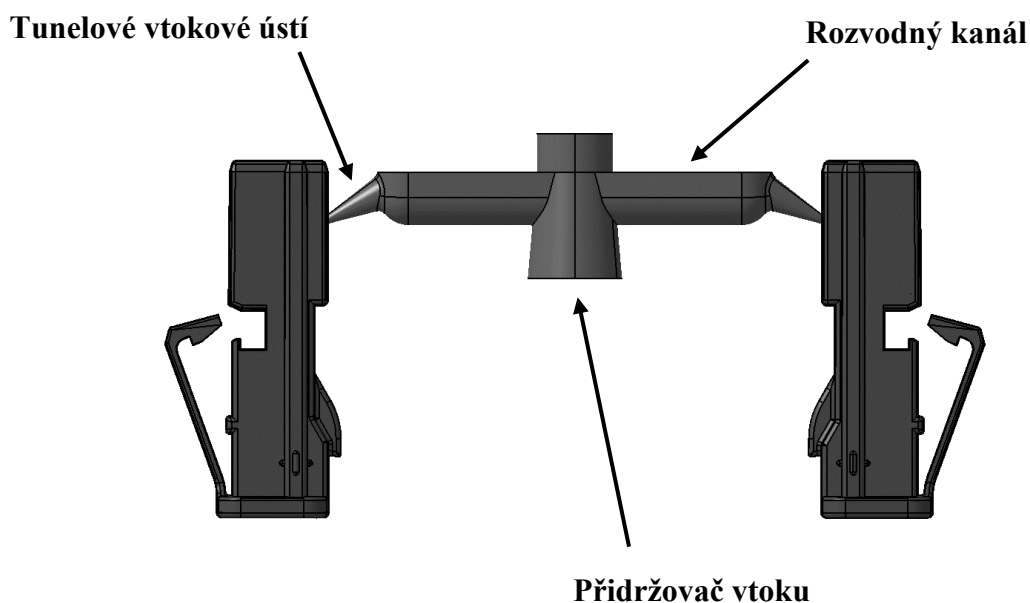
Samotná horká část vtokového systému vychází z komponentů společnosti Meusburger, která umožňuje nakonfigurovat celý systém v závislosti na konkrétním konstrukčním řešení. Systém se skládá z horké vtokové vložky, na níž dosedá na začátku výrobní série tryska stroje, dále z horkého rozvodného bloku, jenž umožňuje distribuci taveniny až ke dvojici horkých trysek, kde tavenina opouští horkou část. Funkčnost celého systému zajišťuje kabeláž s 24 pinovou zásuvkou. Aby byly kabely chráněny proti hrozícímu poškození v průběhu montáže, byly do desky vsazeny magnety.



Obrázek 62 Horká část vtokového systému

9.4.2 Studený vtok

Studená část vtokového systému vycházela z prvotních výsledků simulace. Skládá se z rozvodného kanálu parabolického průřezu, který je výrobně výhodný a tunelového vtokového ústí, jenž dovoluje separaci vtokového zbytku od výrobku v průběhu vstřikovacího cyklu. Hmotnost jednoho takového zbytku odpovídá 0,6 g, čímž vznikne na jeden cyklus 1,2 g materiálu v podobě odpadu, který může být předmětem recyklace a následného zpětného zařazení do výrobního programu.



Obrázek 63 Studená část vtokového systému

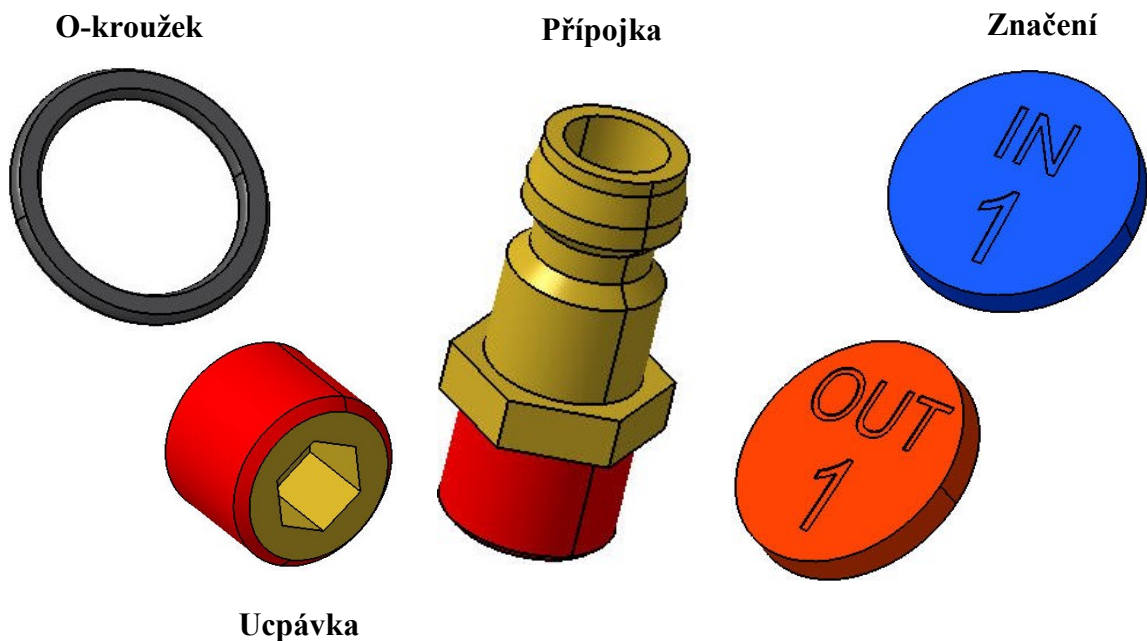
9.5 Odvzdušnění formy

V průběhu zavírání formy a následnému vstřikování dochází ke tlačení vzduchu uzavřeného v dutině prostřednictvím čela polymerní taveniny. Pokud vzduch z dutiny nemá kam uniknout, dochází k jeho stlačování, což se projevuje nedotečenými místy. Při velké vstřikovací rychlosti a tlaku může nastat tzv. Dieselův efekt, kdy dojde k zahoření uzavřeného vzduchu a lokálnímu spálení dílu. V tomto konstrukčním řešení je předpoklad úniku vzduchu skrze vůle v dělicí rovině, vůle v bočních tvarových čelistech a vůle mezi vyhazovači a tvárníkem.

V případě, že se navržené odvzdušnění ukáže jako neúčinné, bude muset být přistoupeno k vyfrézování odvzdušňovacích drážek do zjištěných kritických míst.

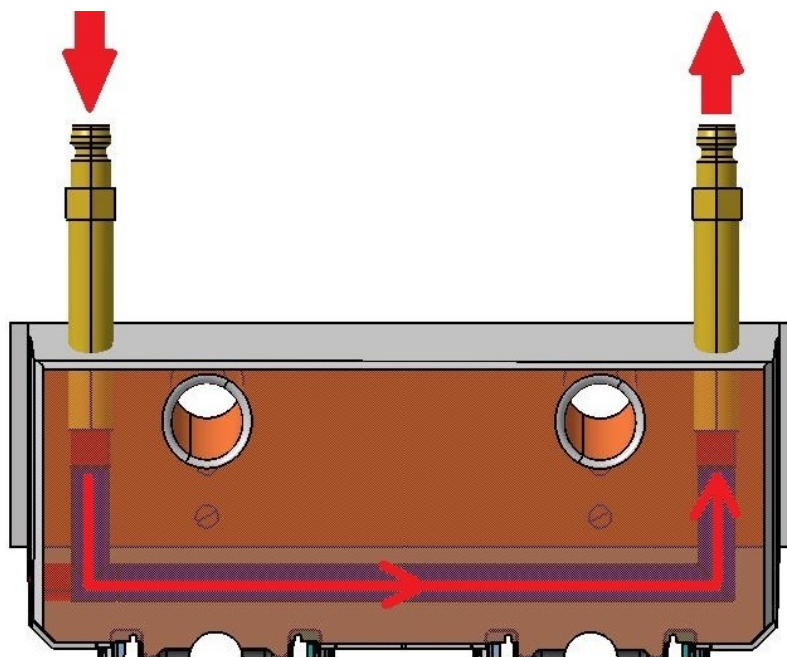
9.6 Temperační systém

Jelikož teplotní pole během vstřikovacího cyklu není rovnoměrné a zároveň je potřeba co nejintenzivněji chladit vstřikovaný díl, bylo potřeba přistoupit k zakomponování temperačního systému. K tomuto účelu posloužily výsledky analýz, kdy bylo srovnáno konvenční a konformní chlazení pro zadaný díl s ohledem na jeho realizovatelnost. Ze získaných výsledků bylo navrženo celkem šest separátních temperačních okruhů tvořených vrtanými kanály o průměru 6 a 8 mm v závislosti na konkrétních možnostech, které tvoří aktivní část temperace. V okruzích proudí médium ve složení 10 % Ethylenglykolu a 90 % vody s objemovým průtokem 10 l/min. Pro usměrnění toku a zamezení úniku média do okolí byly použity ucpávky. K utěsnění systému při přechodu kanálu z desky do tvarové části byly využity těsnící kroužky. Spojení okruhů s temperační jednotkou je zajištěno prostřednictvím přípojek. Z důvodu přehlednosti byl každý výstup a vstup opatřen značením v podobě barevných štítků. Všechny použité ucpávky, přípojky, těsnící kroužky, značení jsou nakupovanými díly z katalogu firmy Meusburger.



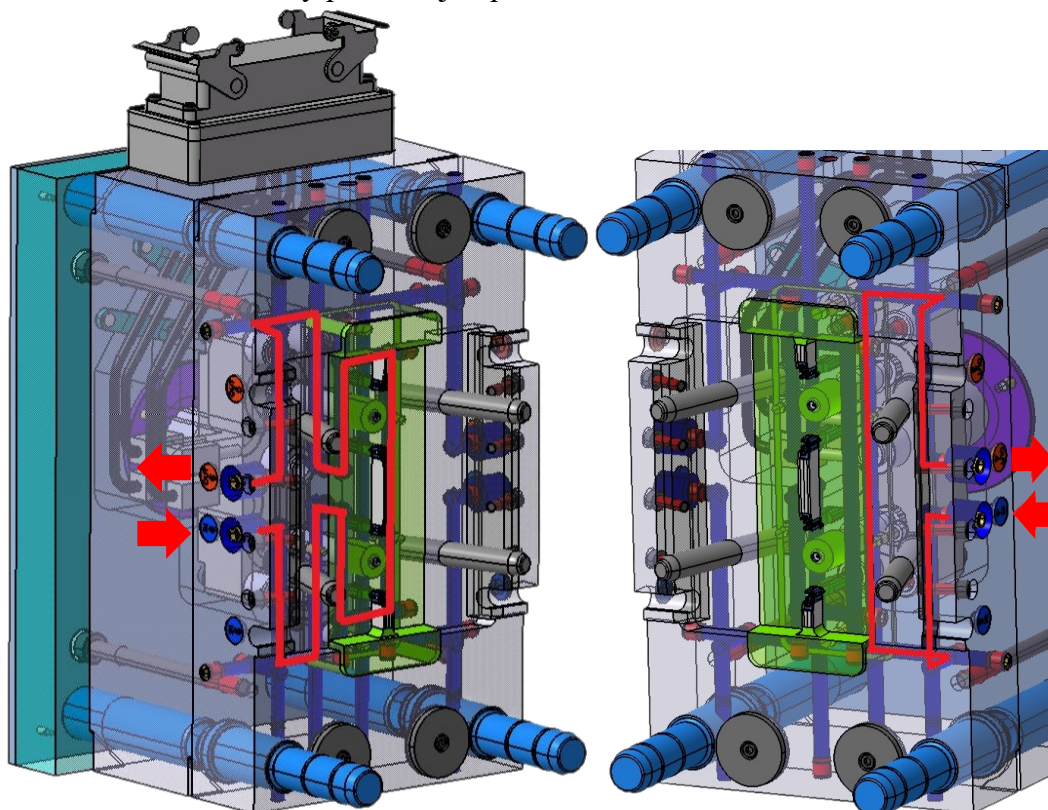
Obrázek 64 Normalizované díly využití při řešení temperačního systému

Temperaci boční tvarové čelisti tvoří samostatný okruh, jenž je detailně zobrazen na Obrázku 65.



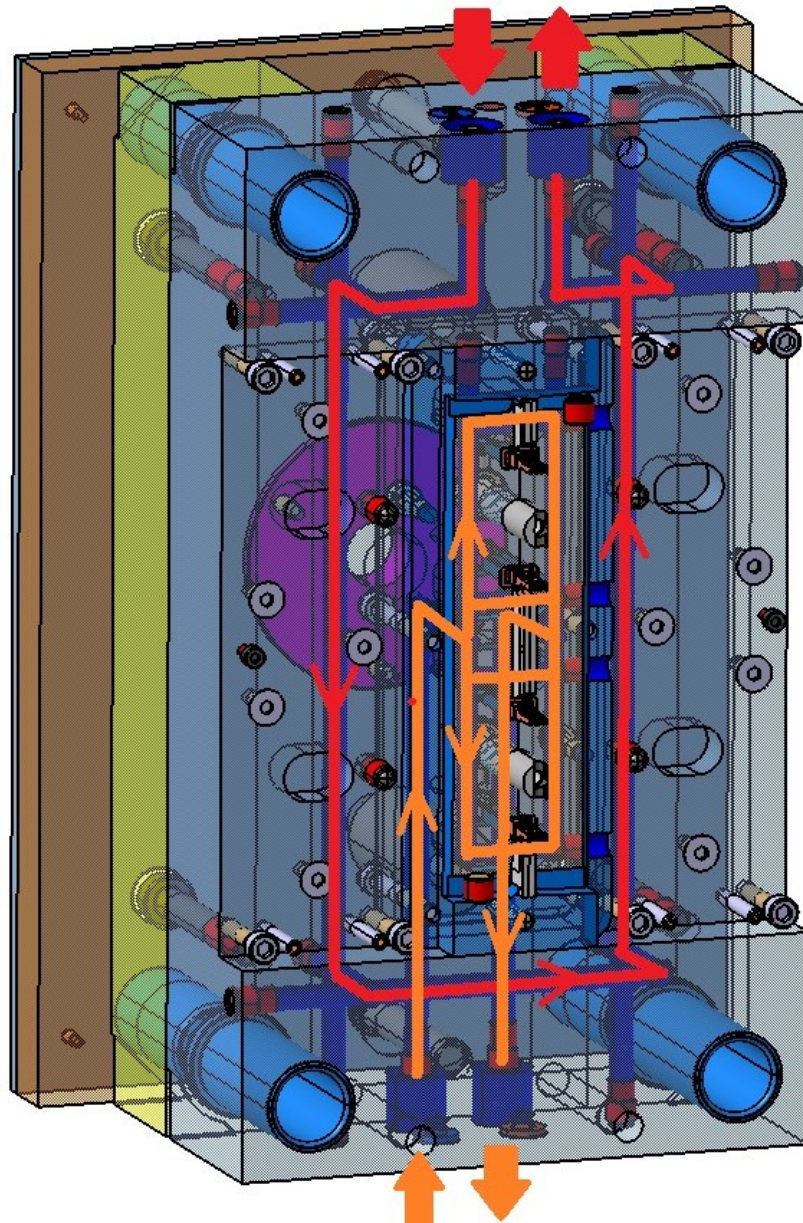
Obrázek 65 Temperace boční tvarové čelisti

Na temperaci pravé strany se podílí dva kanály, z nichž jeden prochází kotevní deskou a tvárnicí a druhý procházející pouze kotevní deskou viz schéma na Obrázku 66.



Obrázek 66 Temperace pravé strany formy

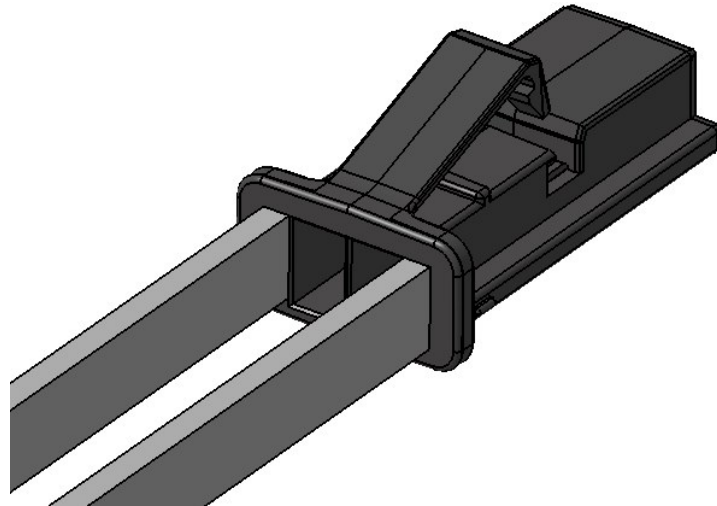
Temperaturi levé strany formy zajišťují dva okruhy, přičemž jeden prochází kotevní deskou, podpěrnou deskou a tvárníkem. Druhý okruh je veden skrze kotevní desku.



Obrázek 67 Temperace levé strany formy

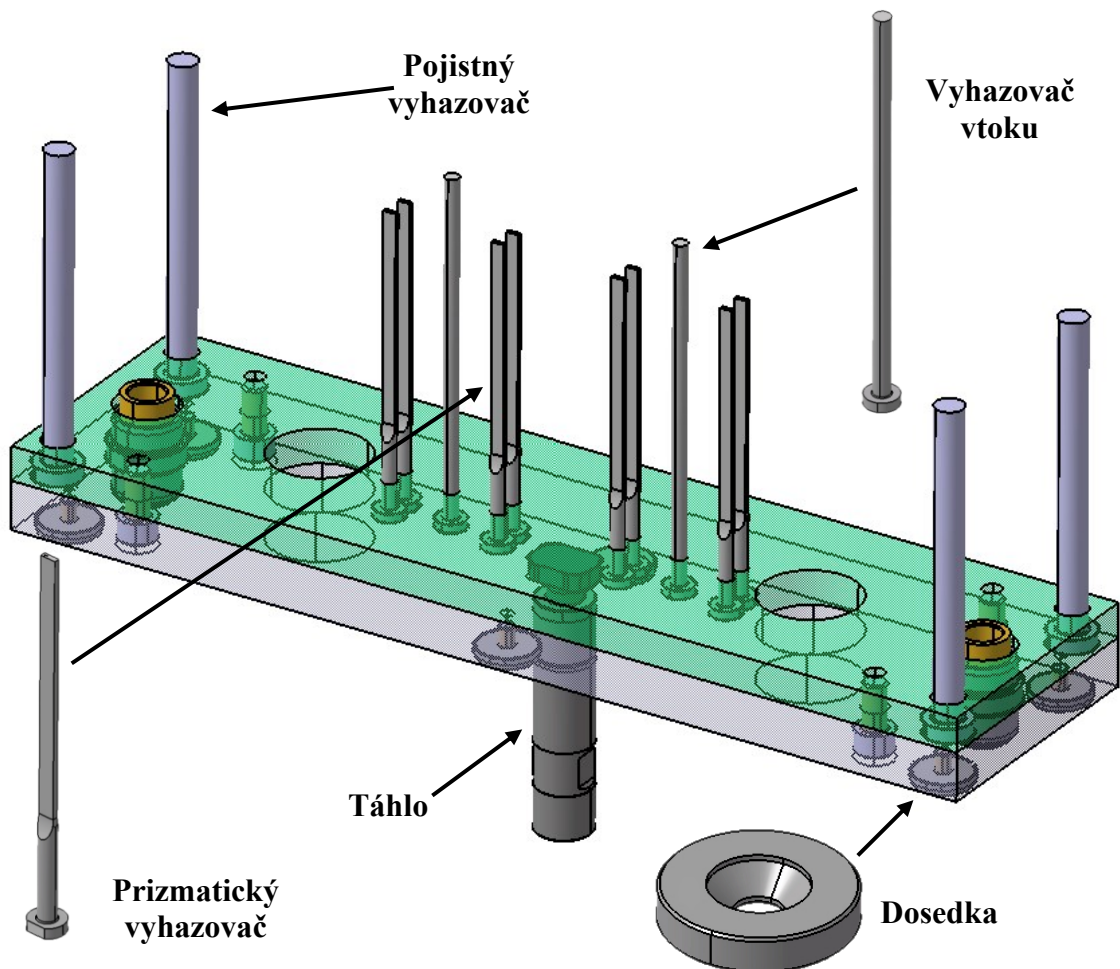
9.7 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém zajišťuje vyjmutí výrobku z formy po jeho dostatečném zchlazení tak, aby nedošlo k jeho poškození. V tomto případě je vyhození jednoho výrobku uskutečněno pomocí dvou prizmatických vyhazovačů o rozměrech 4,5x1,5 mm, které jsou orientovány do míst s největší tloušťkou stěny a kde nebude vzniklá stopa po vyhazovačích překážkou.



Obrázek 68 Rozmístění vyhazovačů na díle

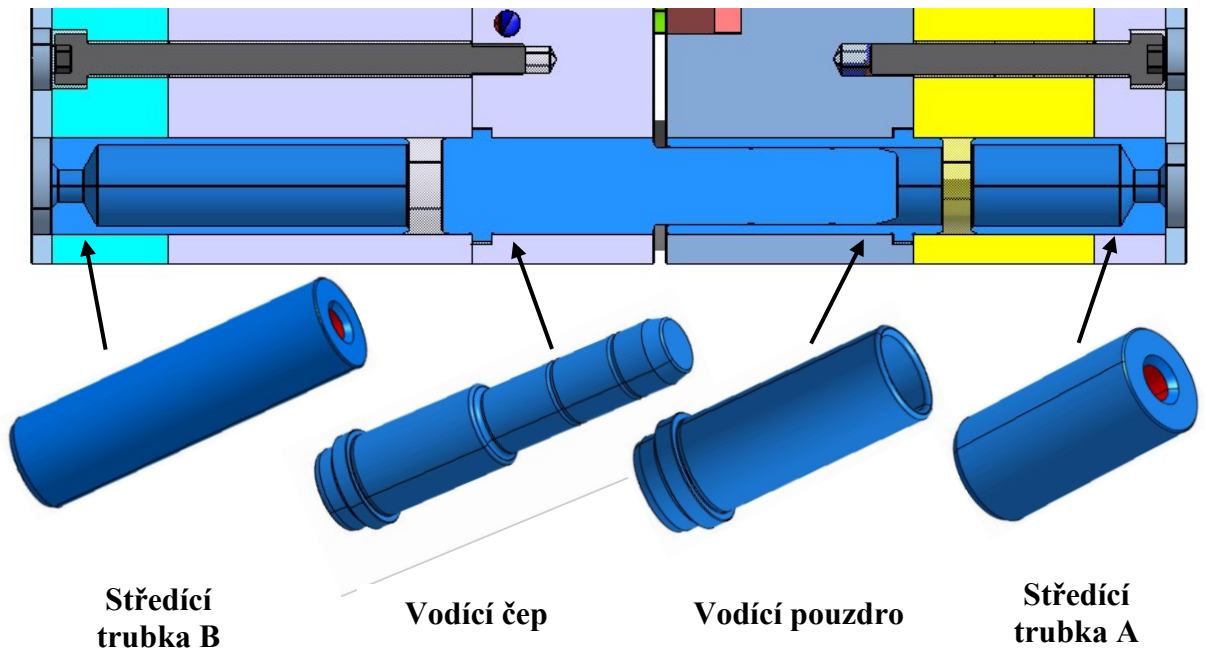
Vyhození vtokového zbytku je prováděno pomocí kruhového vyhazovače o průměru 5 mm. Vyhazovače jsou umístěny v kotevní desce, která je sešroubována s opěrnou deskou. Správnou polohu paketu v krajní poloze zabezpečují dosedky a pojistné vyhazovače. Pohyb celého systému je pak uskutečněn pomocí táhla připojenému ke stroji.



Obrázek 69 Sestava vyhazovacího paketu

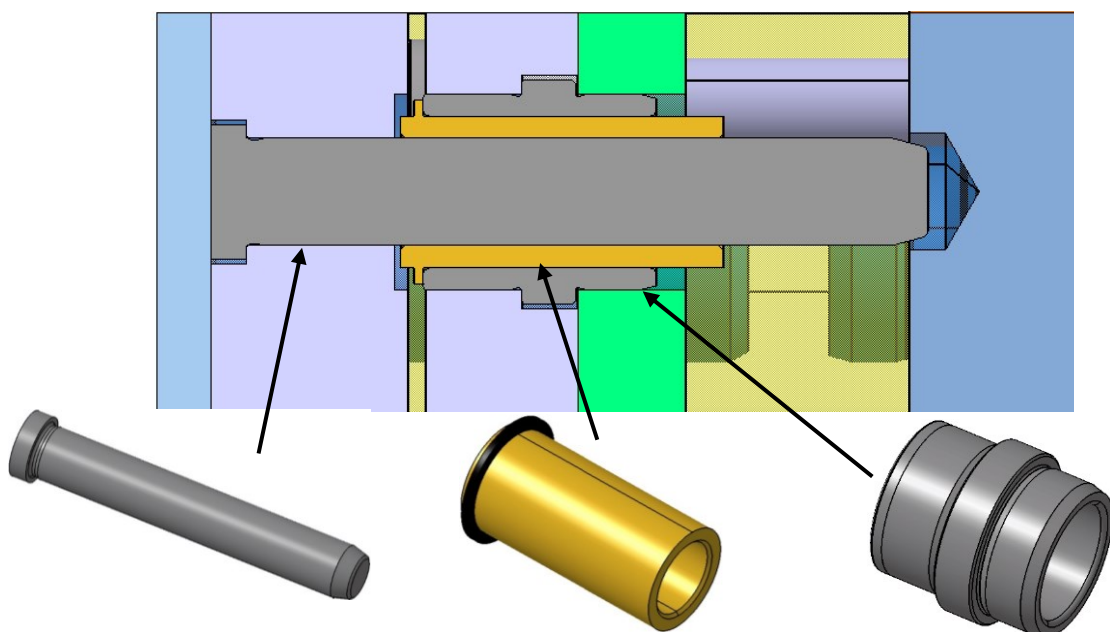
9.8 Vodící a středící komponenty formy

Při otevírání a zavírání formy je potřeba zajistit vzájemné vedení obou stran formy. K tomuto účelu byla forma opatřena vodícími čepy a pouzdry, které do sebe přesně zapadají. Vodící čepy jsou dále vystředěny středícími trubkami. Detailní zobrazení vedení formy je znázorněno na Obrázku 70.



Obrázek 70 Vedení formy

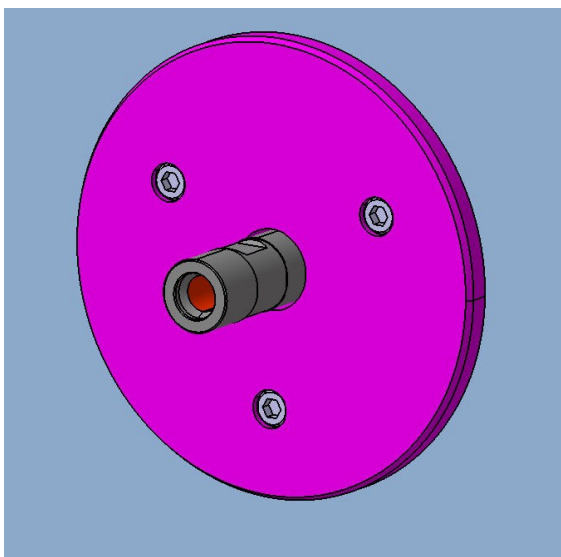
V případě vedení vyhazovacího systému byly použity vodící čepy, jenž přesně zapadají do vodících pouzder s kuličkovou klecí.



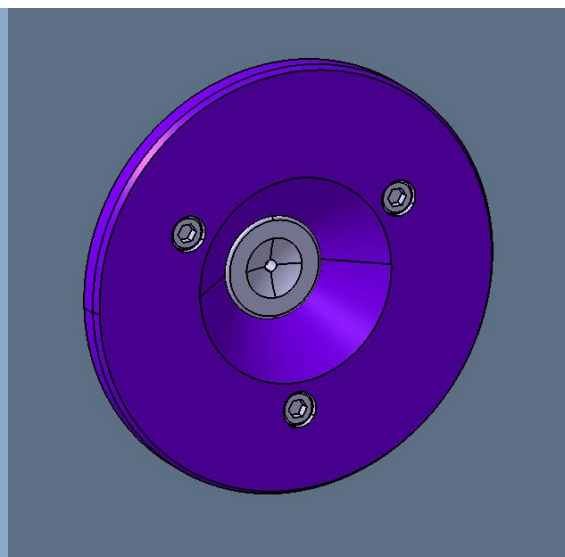
Obrázek 71 Vedení vyhazovacího systému

Vzájemné středění formy vůči vstřikovací stroji zajišťuje dvojice středících kroužků umístěných na obou stranách formy. Ty zabezpečují mimo jiné přesné dosednutí trysky stroje na vtokovou vložku spolu s umožněním připojení táhla.

Středící kroužek levý

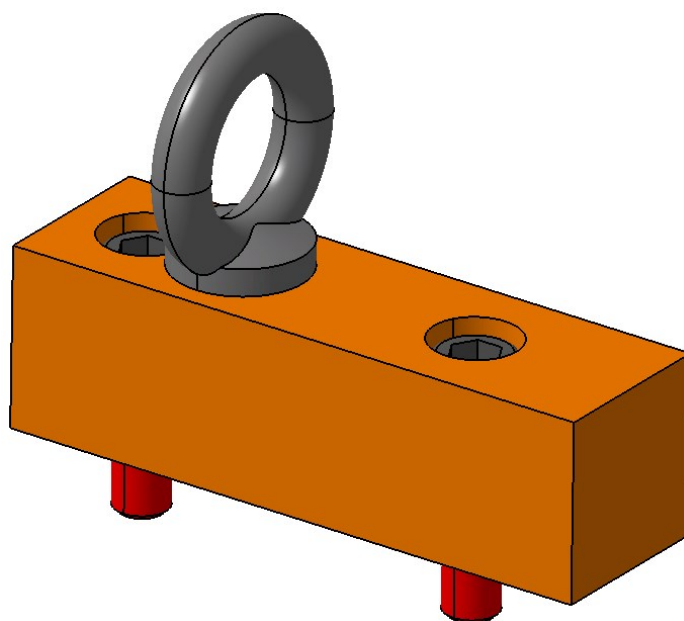


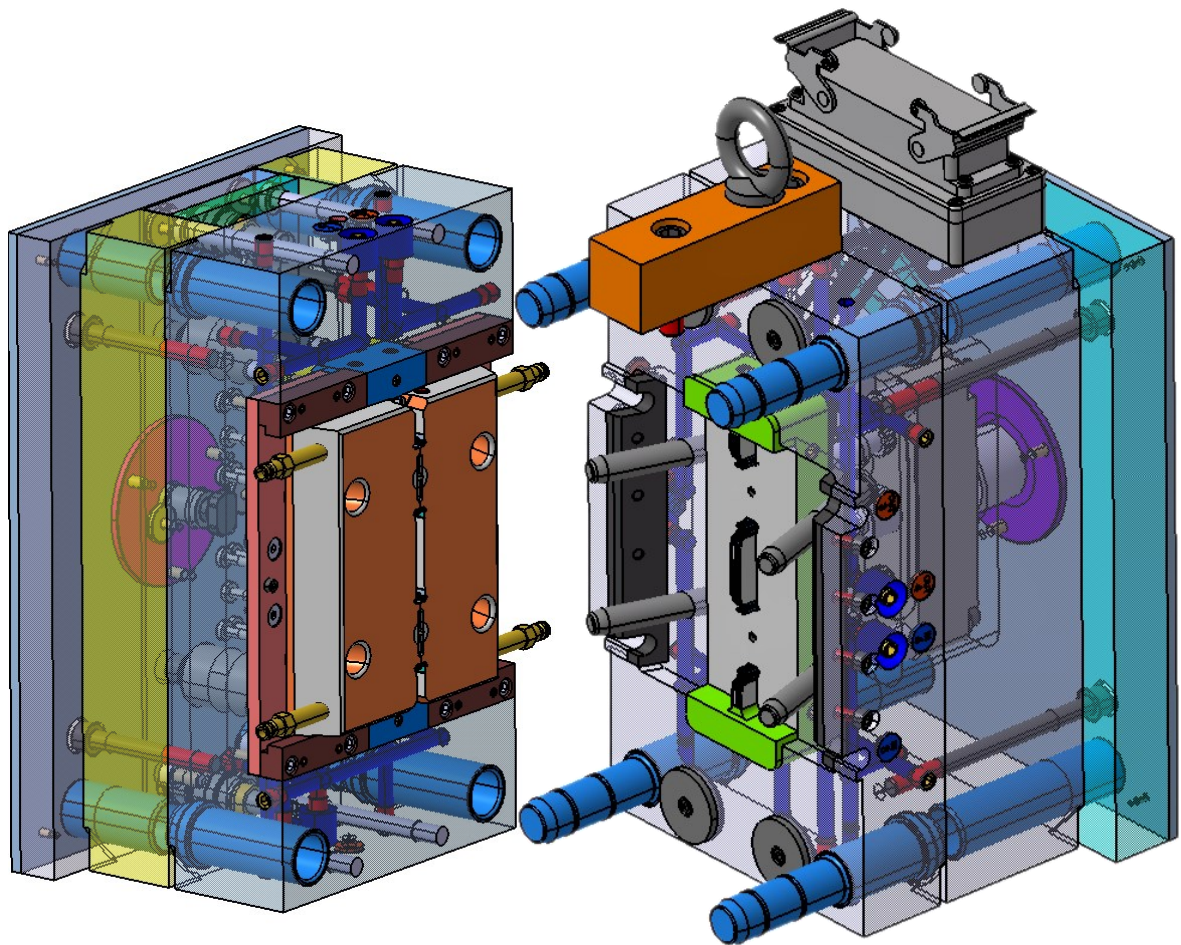
Středící kroužek pravý

*Obrázek 72 Středění formy vůči stroji*

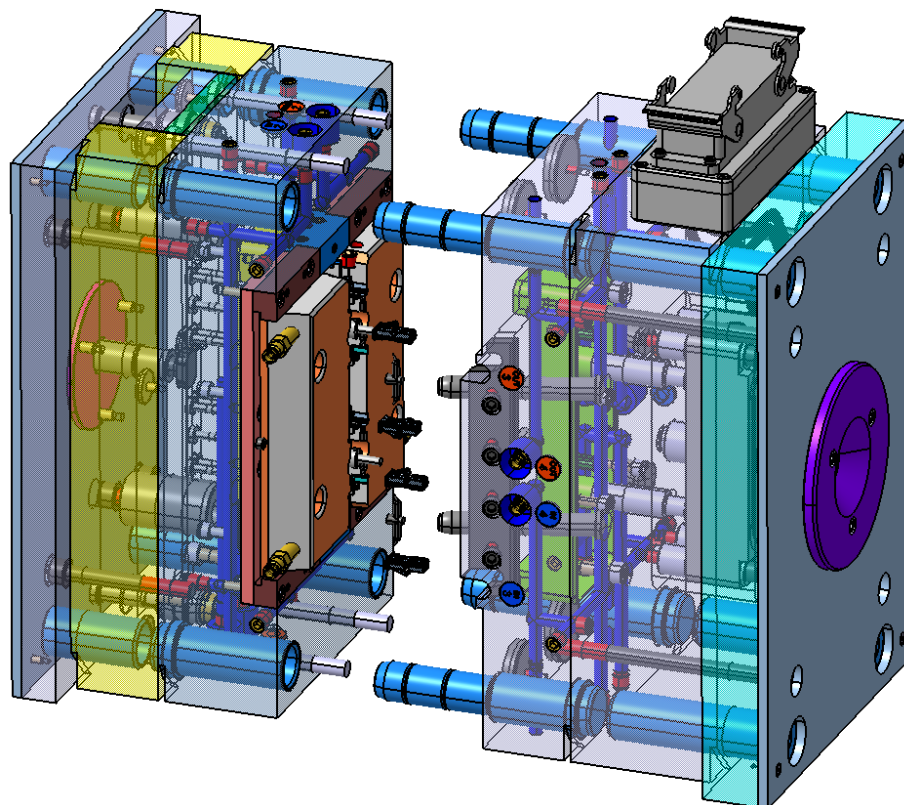
9.9 Manipulační zařízení

Ke snadnému transportu a manipulaci při usazování formy na stroj byla forma opatřena manipulačním zařízením, jenž je přišroubováno ke kotevním deskám formy. Skládá se z hranolu a manipulačního oka sloužícího k připojení jeřábového háku.

*Obrázek 73 Manipulační zařízení*



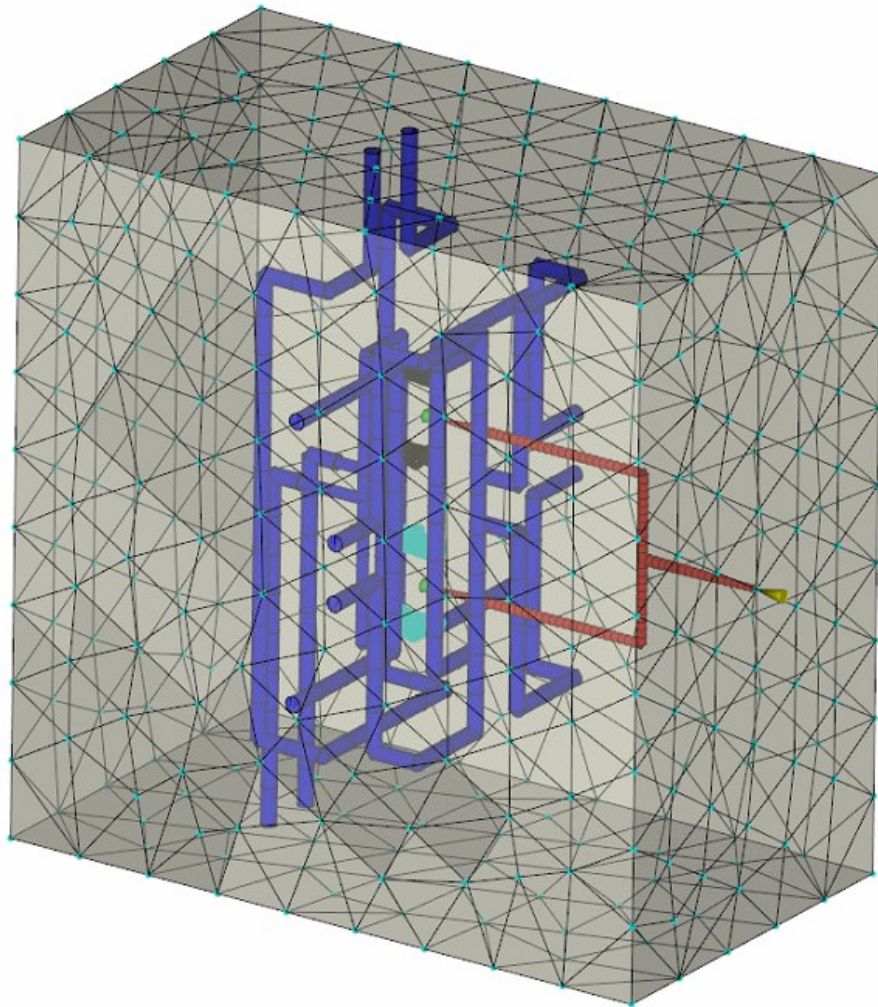
Obrázek 74 Pohled do levé a pravé strany formy



Obrázek 75 Vstřikovací forma v průběhu cyklu

10 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI VSTŘIKOVACÍ FORMY

Funkčnost navrženého konstrukčního řešení byla ověřena pomocí celkové analýzy (chlazení + vstřikování + dotlaku + deformace) za použití softwaru Autodesk MoldFlow 2023. Do celkové simulace bylo zaneseno reálné provedení formy spolu s vhodnými procesními podmínkami uvedenými v Tabulce 6. Po provedení simulace byly výsledky vyhodnoceny a okomentovány.



Obrázek 76 Síť formy včetně temperačního a vtokového systému

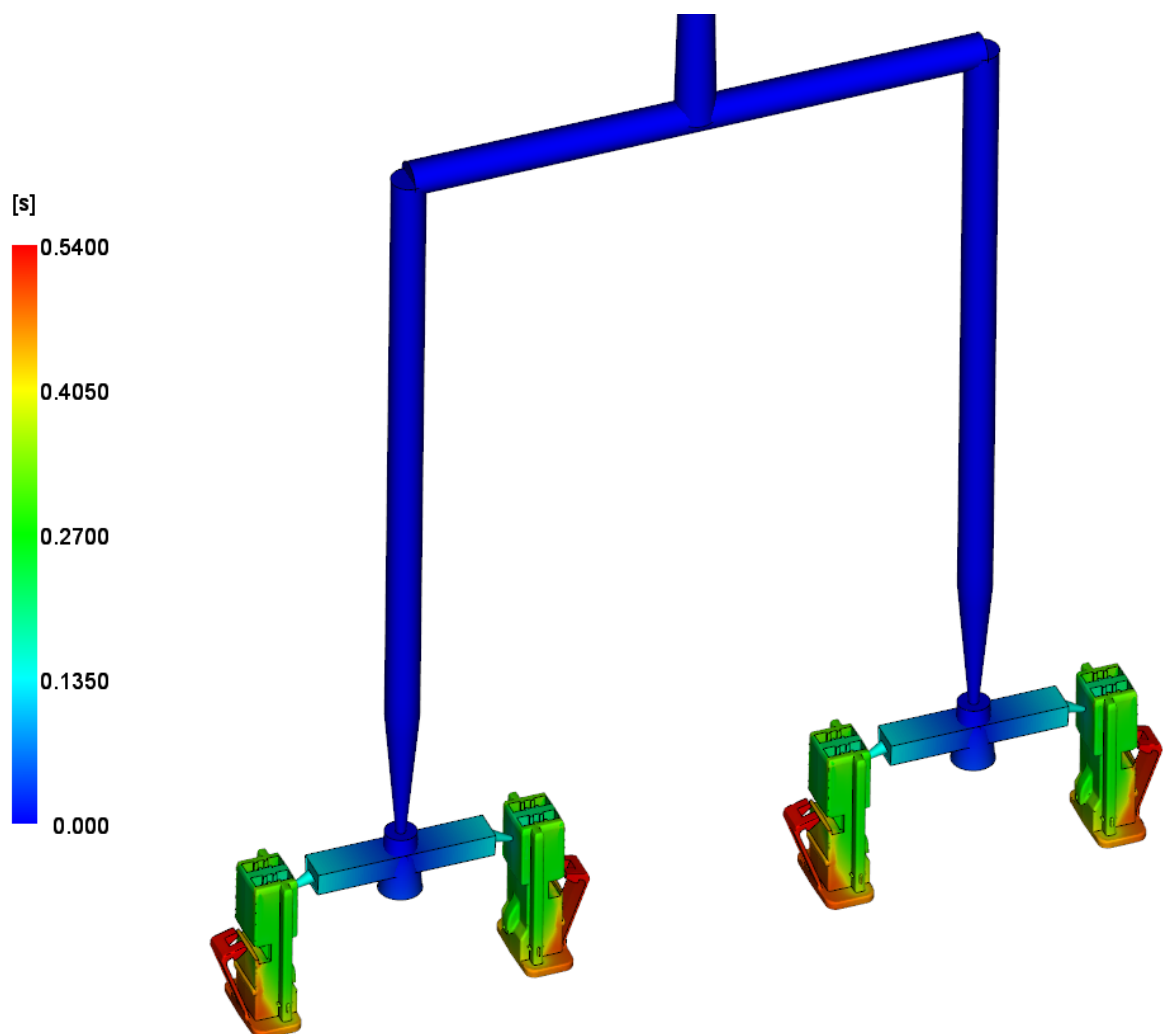
Tabulka 8 Procesní podmínky simulace

| Parametr | Nastavení |
|--|-------------------------------|
| Vstřikovaný materiál | Ultradur B 4520 |
| Teplota taveniny [°C] | 260 |
| Teplota formy [°C] | 60 |
| Vyhazovací teplota [°C] | 171,4 |
| Doba otevírání a zavírání formy [s] | 5 |
| Vstřikovací čas [s] | 0,4 |
| Doba působení dotlaku [s] | 5 |
| Hodnota dotlaku vůči vstřikovacímu tlaku [%] | 80 |
| Zaplnění dutiny při přepnutí na dotlak [%] | 97 |
| Zatuhlý objem výrobku při vyhazování [%] | 98 |
| Vstřikovací stroj | AllRounder 270 C |
| Materiál formy | Nástrojová ocel |
| Počítat s teplotní roztažností formy | Ano |
| Izolovat příčiny deformace | Ne |
| Teplota okolí [°C] | 25 |
| Temperační médium | Ethylenglykol 10 %/ Voda 90 % |
| Teplota média [°C] | 55 |
| Rychlost proudění média [l/min] | 10 |

10.1 Čas plnění

Výsledek reprezentuje průběh plnění dutin polymerní taveninou. Významově jej lze využít k ověření vtokového systému v kombinaci s nastavenými procesními podmínkami. Modrá barva představuje místa, která jsou zaplněna nejdříve a červená barva pak místa, kde se tavenina dostane jako poslední.

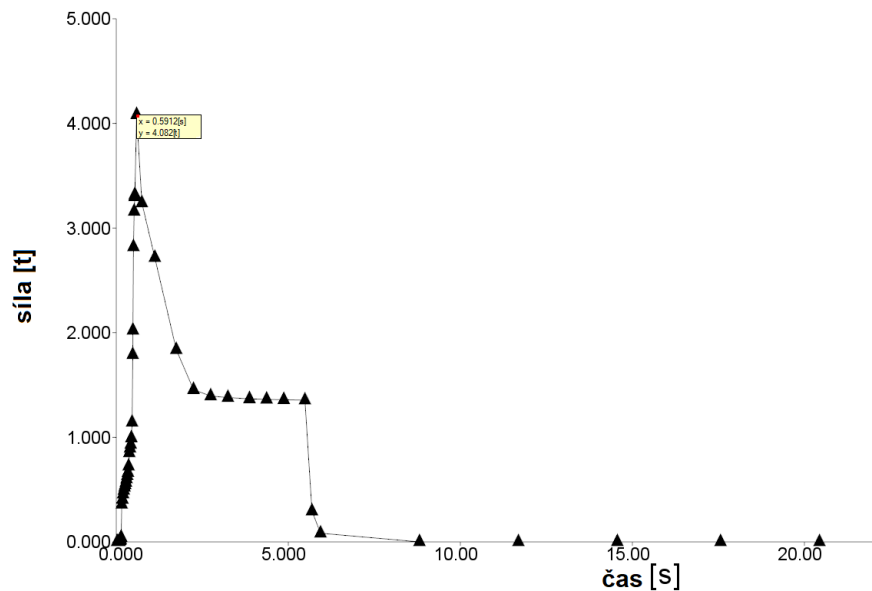
Z výsledku je patrné, že ke kompletnímu zaplnění formy dojde v čase 0,54 s a na žádných místech tak nevznikají nedostříknutá místa. Plnění formy probíhá rovnoměrně žádoucím fontánovým tokem.



Obrázek 77 Průběh plnění dutiny formy

10.2 Uzavírací síla

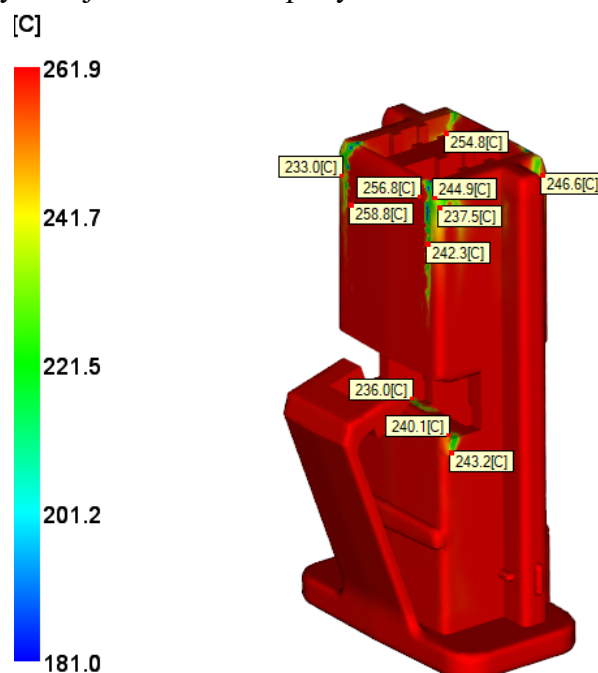
Výsledek představuje graf závislosti uzavírací síly na čase, kterou musí vstřikovací stroj vyvinout tak, aby nedošlo k pootevření formy během plnění a vzniku přetoků. Výsledek je tak stěžejní kritérium při volbě vstřikovacího stroje. Z grafu na Obrázku 78 je patrné, že maximální uzavírací síla odpovídá v tomto případě 4,1 t.



Obrázek 78 Graf závislosti velikosti uzavírací síly na čase

10.3 Teplota čela taveniny

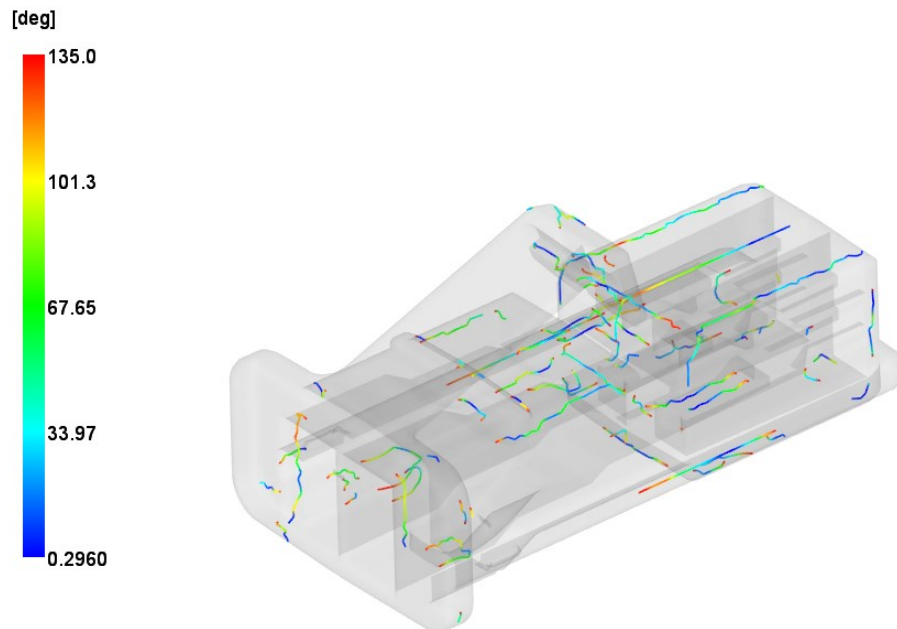
Výsledkem teploty čela taveniny je barevná škála míst s odlišnou teplotou. Z výsledku lze konstatovat, že k výraznějšímu snížení teploty dochází v místech studených spojů.



Obrázek 79 Teplota čele taveniny

10.4 Studené spoje

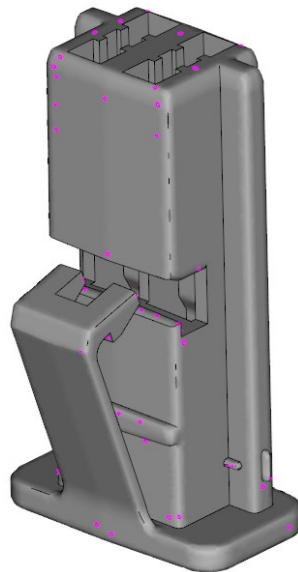
Výsledek zobrazuje oblasti, kde se setkávají čela taveniny a vznikají tak studené spoje. V porovnání s výsledkem teploty čel taveniny by mělo dojít na těchto místech ke spojení čel o dostatečně vysoké teplotě bez výrazného ovlivnění vlastností vstříkovaného dílu.



Obrázek 80 Studené spoje

10.5 Uzavřený vzduch

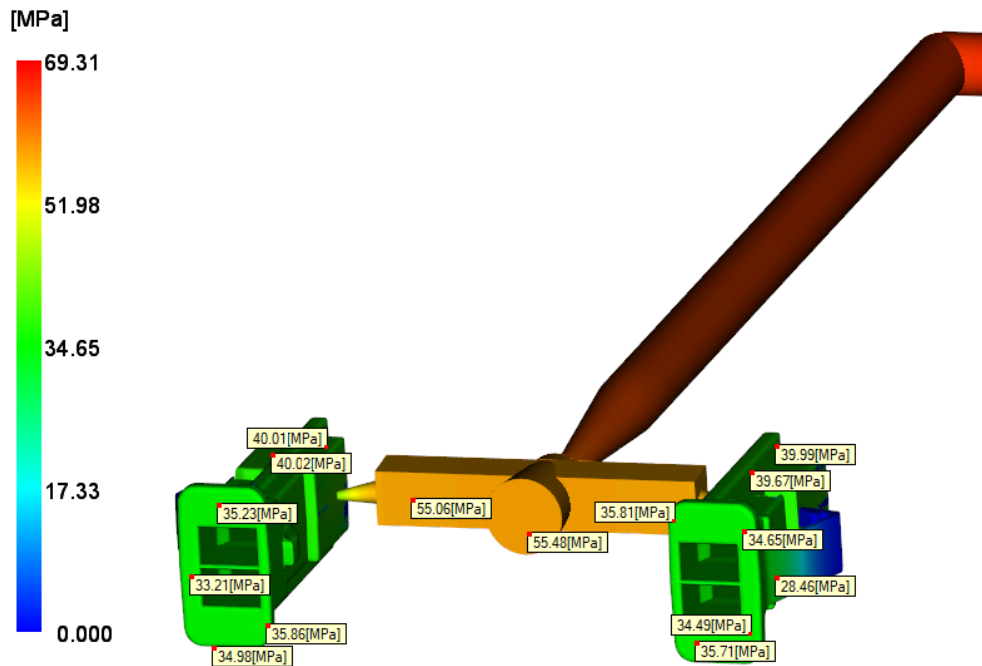
Výsledek reprezentuje lokality, kde hrozí uzavření vzduchu. V daném případě se jedná o místa na hranách dílu a ve studených spojích.



Obrázek 81 Místa s hrozbou uzavřeného vzduchu

10.6 Tlak

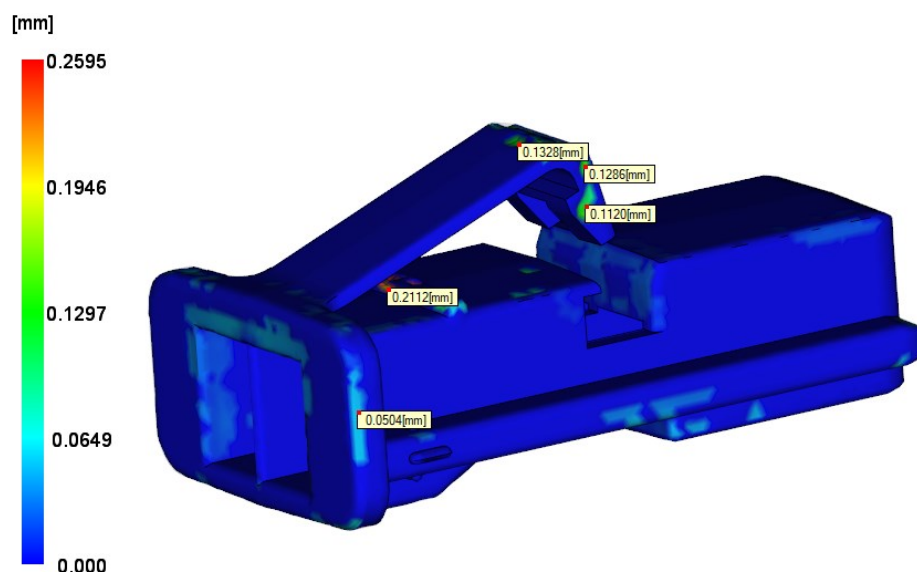
Daný výsledek analýzy zobrazuje rozložení tlaku v dutině. Nejvyšší hodnota tlaku byla zaznamenána v čase 0,54 s v místech horkého vtokového systému. V místě tvarové dutiny se pohybuje v rozmezí do 40 MPa.



Obrázek 82 Rozložení tlaku v dutině formy

10.7 Propadliny

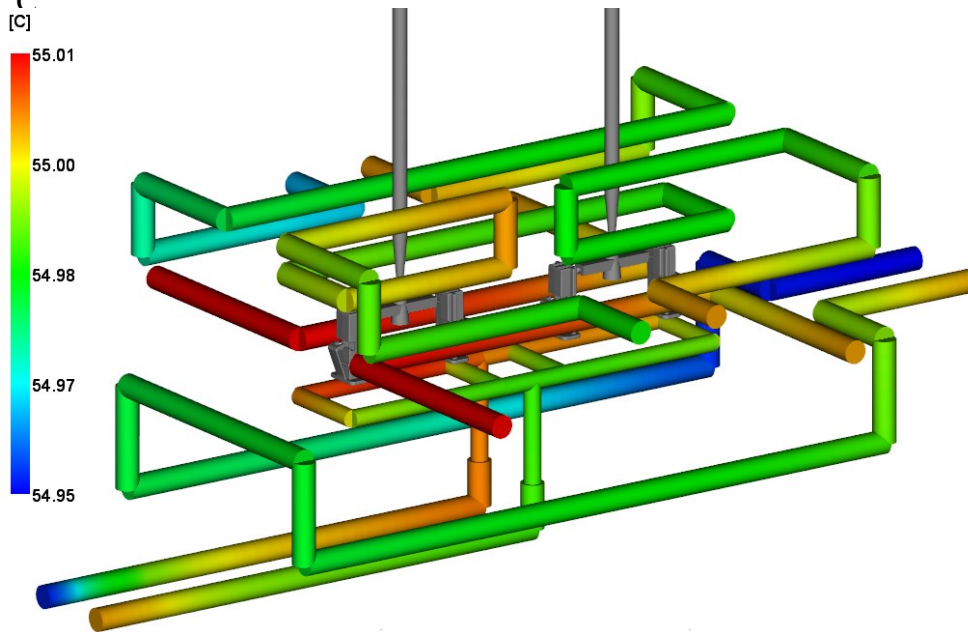
Z výsledku lze stanovit propadlá místa na dílci. Pro dané procesní parametry se predikuje maximální hodnota propadlin na 0,26 mm.



Obrázek 83 Propadlá místa na výrobku

10.8 Teplota temperačního média

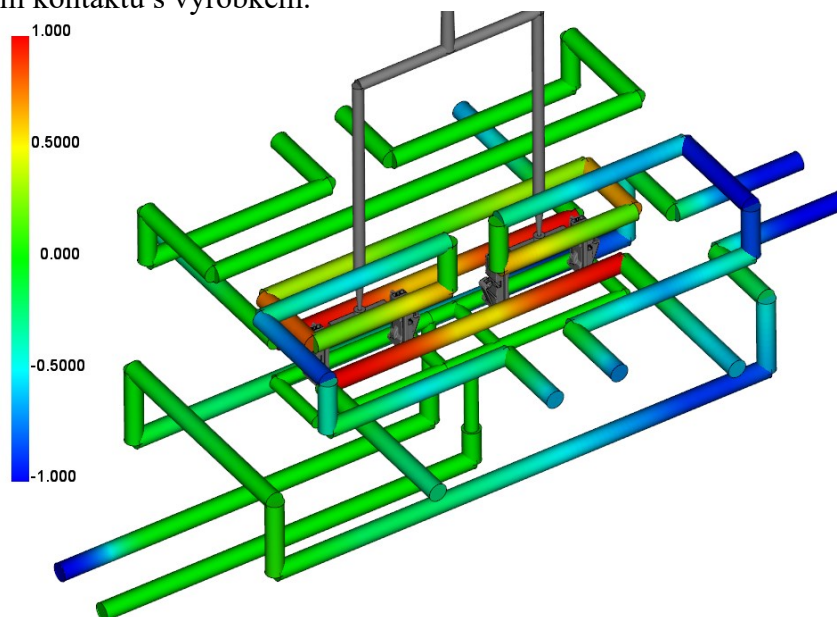
Optimálně navržený okruh temperačního systému by neměl překročit rozdíl teploty média na vstupu a výstupu $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z výsledku je patrné, že v daném případě nedochází k překročení onoho limitu. Největšího rozdílu je dosaženo na nejdelších okruzích a to $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 84 Teplota média v okruzích

10.9 Efektivita odvodu tepla temperačních okruhů

V navržené temperaci jsou nejvíce efektivní kanály, jež jsou součástí bočního odformování, kde dochází k největší kumulaci tepla. Dále pak jsou to kanály, které jsou v nejtěsnějším kontaktu s výrobkem.

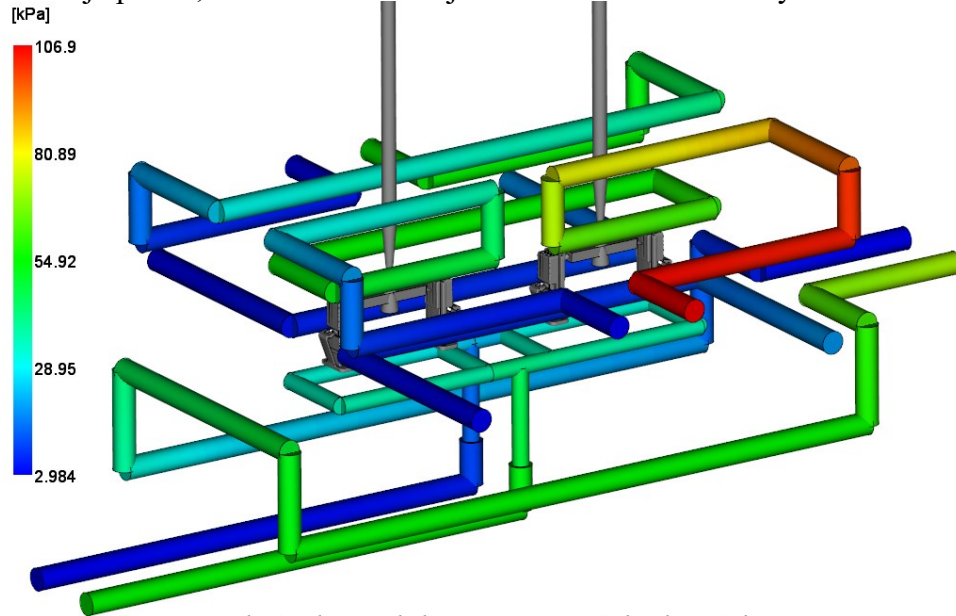


Obrázek 85 Efektivita temperačních kanálů

10.10 Tlak v temperačních okruzích

Tlak v temperačních okruzích by na žádném místě neměl být nulový, což by znamenalo oblast, kde temperační médium neproudí a odvod tepla je tedy neúčinný.

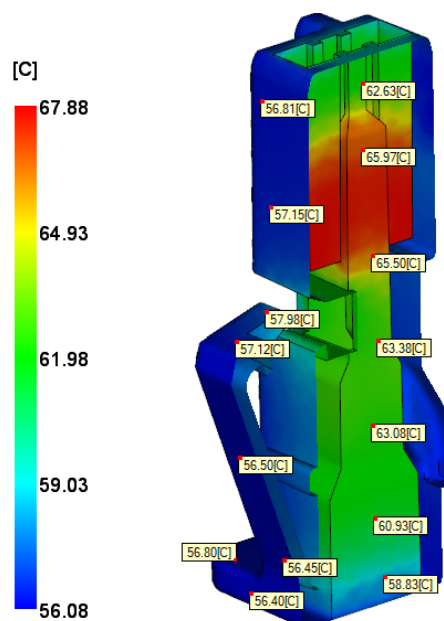
Z Obrázku 86 je patrné, že tlak v okruzích je ve všech místech kladný.



Obrázek 86 Tlak v temperačních okruzích

10.11 Teplota povrchu formy v oblasti dutiny

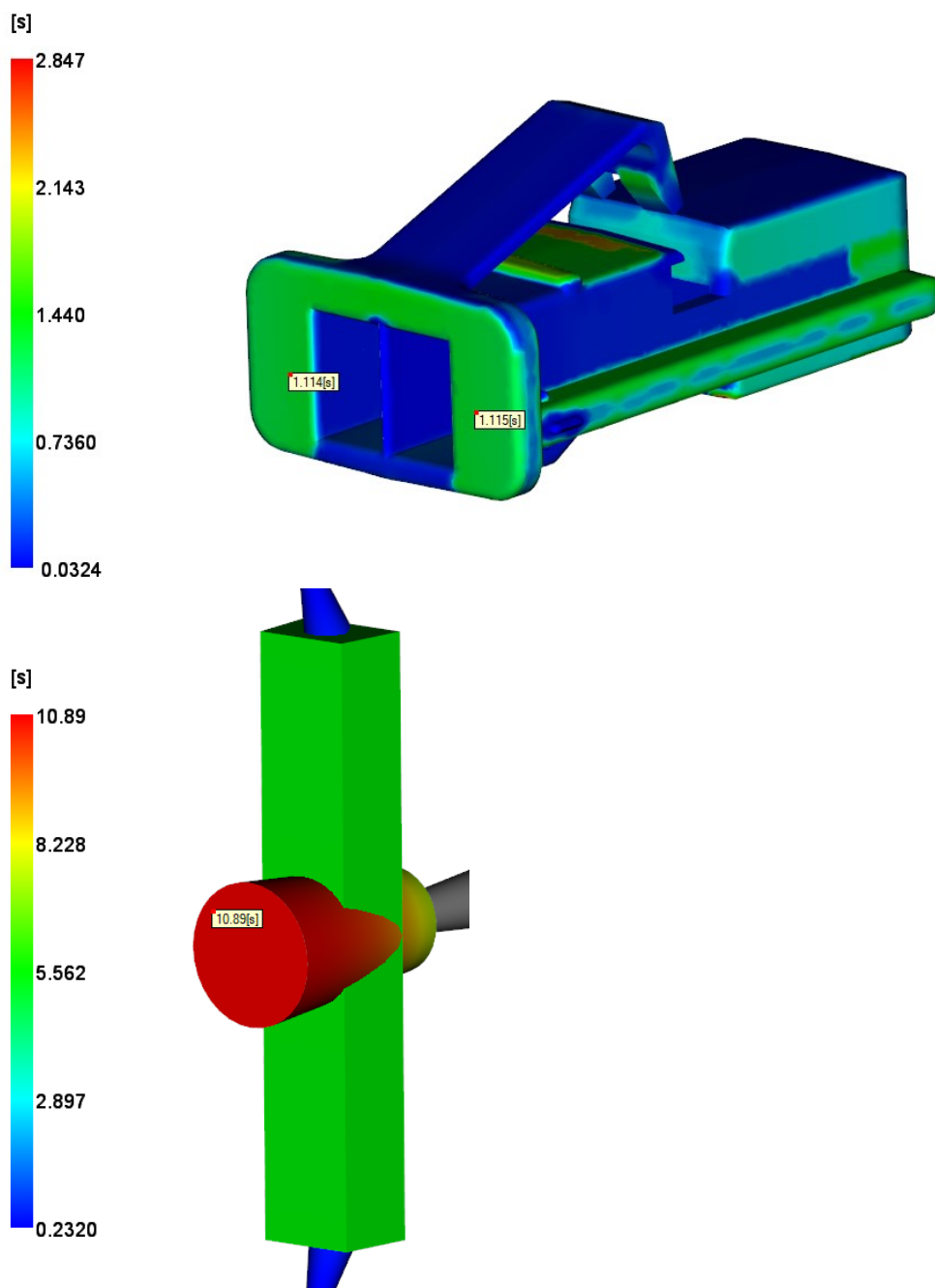
K zajištění rovnoměrných vlastností po celém dílu a minimálních deformací je důležité, aby byly teplotní rozdíly v místech dutiny co nejmenší. V tomto případě je nejvyšší teploty dosaženo na povrchu vložek, což je dáno nemožností jejich temperace vzhledem k povaze dílu.



Obrázek 87 Teplota povrchu dutiny formy

10.12 Čas pro dosažení vyhazovací teploty

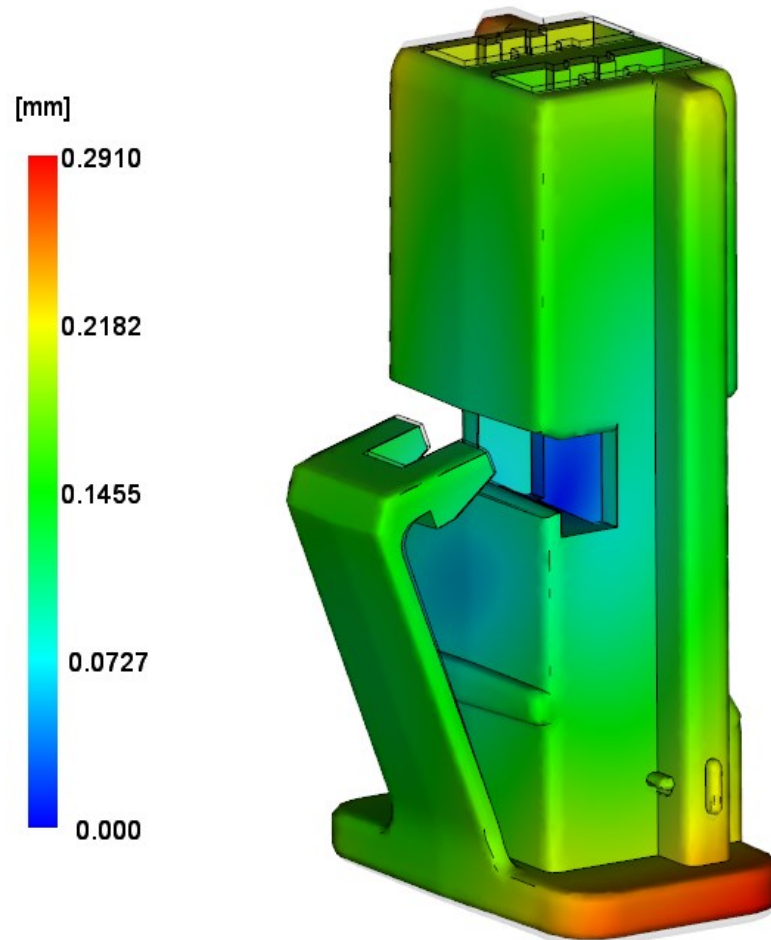
Na Obrázku 88 se nachází grafické znázornění míst s potřebným časem pro dosažení vyhazovací teploty, kdy modré oblasti jsou zchlazeny jako první a červené pak jako poslední. Speciálně vyznačená místa představují body, ve kterých jsou umístěny vyhazovače. V případě výrobku jsou oblasti s umístěním vyhazovačů ochlazeny za 1,1 s a celkový výrobek za 2,85 s. V případě vtoku dojde k úplnému zchlazení za 10,9 s. Výsledek lze využít při optimalizování doby cyklu během odladování formy na stroji.



Obrázek 88 Čas pro dosažení vyhazovací teploty

10.13 Celková deformace

Výsledek charakterizuje celkovou deformaci v konkrétních místech na díle. Na celkové deformaci se podílí vliv nerovnoměrného chlazení a také smrštění daného materiálu. Pro nastavené procesní podmínky se predikuje maximální deformace 0,29 mm.



Obrázek 89 Celková deformace výrobku

11 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Na základě požadovaných parametrů uvedených v Tabulce 9, jež jsou stěžejní pro volbu stroje, byl zvolen vstřikovací stroj od společnosti ARBURG s modelovým označením ALLROUNDER 270 C s průměrem šneku 18 mm. Navržený vstřikovací stroj je vyhovující z hlediska všech parametrů pro upnutí formy, parametrů sil a má dostatečnou plastikační kapacitu pro zaplnění všech dutin.

Tabulka 9 Srovnání parametrů zvoleného stroje s požadovanými parametry [37]

| Parametr | Hodnota stroje | Požadovaná hodnota |
|--|----------------|--------------------|
| Uzavírací síla [kN] | 400 | 41 |
| Vzdálenost mezi sloupky [mm] | 270x270 | - |
| Maximální dávka vstřikovaného materiálu [cm ³] | 23 | 4,1 |
| Rozměr upínacích desek [mm] | 466x466 | 346x196 |
| Maximální zdvih vyhazovačů [mm] | 125 | 25 |
| Minimální výška formy [mm] | 200 | 355,5 |
| Maximální hmotnost pohyblivé části formy [kg] | 180 | 94 |
| Průměr středícího kroužku [mm] | 125 | 125 |



Obrázek 90 Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 270 C [37]

12 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na základě zadaného vstřikovaného dílu, jímž se stal dvoucestný konektor, byl zhotoven 3D model v softwaru CATIA V5R20 opatřen o technologické úkosy a rádiusy. S ohledem na funkci výrobku a uvažované technologii výroby byl pro něj vybrán vhodný materiál semikrystalický termoplast PBT od výrobce BASF prodáváný pod obchodním názvem ULTRADUR B 4520. Vzhledem ke geometrii dílu byla stanovena jedna hlavní dělicí rovina a jedna vedlejší tak, aby bylo možné bezpečně odformovat všechny plochy.

Po kompletní identifikaci dílu bylo přistoupeno ke hledání optimálního řešení vtokového systému. K tomuto účelu byl použit simulační software Autodesk Moldflow 2023, kde byly sestrojeny tři typy vtokových systémů pro plnění výrobku zvláště studeným, horkým a kombinovaným systémem. Z obdržených výsledků byla vybrána kombinace, která vykazovala optimální výsledky a reálnou proveditelnost spolu s předpokládanou ekonomičností výroby. Po vyhodnocení započala konstrukce v průběhu níž bylo potřeba navrhnout aktivní část temperace. Z těchto důvodů bylo navrženo a odsimulováno konvenční a konformní řešení. Ze získaných výsledků bylo vybráno právě konvenční řešení, které bylo v tomto případě ekonomicky výhodnější a ve výsledku času pro dosažení teploty zaostávalo pouze o 0,021 s.

S ohledem na velikost vstřikovaného dílce a uspořádání potřebných prvků formy byla forma zadána jako čtyřnásobná. V průběhu konstrukce byl brán důraz na co nejvyšší použití normalizovaných dílů tak, aby byla usnadněna samotná konstrukce a sníženy celkové náklady na výrobu. Do formy byl zakomponován kombinovaný vtokový systém, jenž vycházel z prvotních simulací. Ten je tvořen horkou částí, která byla jako celek nakonfigurována dle požadovaných parametrů v online katalogu společnosti Meusburger. Horká část ústí do studené části, která se skládá z rozvodného kanálu parabolického průřezu a tunelového vtokového ústí. Forma byla dále opatřena temperačním systémem skládající se celkem z šesti samostatných okruhů tvořených vrtanými kanály o průměru 6 a 8 mm v závislosti na konkrétních možnostech v daném místě. Trajektorie systému a průřezy kanálů vycházely z výsledků prvotní simulace. Jakožto vhodným temperačním médiem byla vybrána směs tvořená z 10 % ethylenglykolu a 90 % vody, která vstupuje do systému s objemovým průtokem 10 l/min. Vyhazovací systém byl složen z prizmatických vyhazovačů, které byly umístěny do nejtlustšího místa na výrobku a kde je předpoklad, že nebude vzniklá stopa problémem. Dále zde byly umístěny válcové vyhazovače, které vyhazují vtok. O zajištění přesné polohy vyhazovacího systému v krajních polohách a

nemožnosti poškodit dutinu formy se starají pojistné vyhazovače spolu s dosedkami. Pohyb vyhazovacího systému je řízen skrze táhlo. K vedení vyhazovacích desek byla použita čtveřice vodících čepů spolu s vodícími pouzdry s kuličkovou klecí. Středění formy vůči stroji je zajištěno skrze dvojici středících kroužků. Vzájemné vedení stran formy je umožněno pomocí vodících čepů, vodících pouzder a středících trubek. Pro snadnou manipulaci s formou byla její vrchní část opatřena transportním zařízením skládající se z hranolu a manipulačního oka.

Z hlediska všech parametrů pro upnutí formy, parametrů sil a dostatečné plastikační kapacity byl zvolen vstříkovací stroj ARBURG ALLROUNDER 270 C s průměrem šneku 18 mm.

Na základě zhotoveného kompletního konstrukčního řešení formy byla provedena celková simulace, z jejichž výsledků lze konstatovat, že každý jednotlivý systém formy plní svou funkčnost a forma je tak schopna provozu.

ZÁVĚR

Za cíle diplomové práce, jež byly stanoveny na začátku práce, bylo vypracovat literární studii na téma vstřikování, zhotovit model plastového dílu, vytvořit simulace procesu vstřikování a navrhnout jejich optimalizace, navrhnout konstrukci vstřikovací formy pro plastový díl a ověřit její funkčnost pomocí analýz.

Teoretická část práce byla zaměřena na studii polymerních materiálů používaných ke vstřikování, jejich strukturu, reologické chování a přísady, jež zušlechťují jejich vlastnosti. Dále byl popsán vstřikovací cyklus spolu s modifikacemi vycházející ze standardního způsobu vstřikování. Poté byla věnována pozornost konstrukci forem a popisu vstřikovacího stroje. Poslední část rešerše byla orientována na simulace a vady, které doprovázejí proces vstřikování.

Praktická část se zabývala konstrukcí zadaného plastového dílu, kterým byl dvoucestný konektor užívaný v kabelových systémech, zvolením vhodného vstřikovaného materiálu a rozvržením dělicích rovin.

Následně byly pro tento díl vytvořeny prvotní simulace, které sloužily jako podklad pro budoucí konstrukci, kde bylo hledáno optimální řešení vtokového a temperačního systému. Ze získaných výsledků se jevil jako vhodný kombinovaný vtokový systém spolu s konvenčním způsobem temperace. Při vyhodnocování simulací byl brán zřetel na budoucí ekonomičnost výroby a konstrukční realizovatelnost samotného návrhu.

Po získání výsledků byla zkonstruována čtyřnásobná vstřikovací forma s ohledem na maximální využití normalizovaných dílů. Podle výsledků prvotních simulací byla forma opatřena kombinovaným vtokovým systémem skládající se zvlášť z horké a studené části. Pro horkou část systému byl zvolen horký rozvod od společnosti Meusburger, jehož horké trysky ústí do studené části. Tu tvoří rozvodný kanál parabolického průřezu zakončený tunelovým vtokovým ústím umožňujícím separaci výrobků od vtoku v průběhu cyklu. Pro zajištění rovnoměrného teplotního pole bylo zhotoveno celkem šest separátních temperačních okruhů tvořených vrtanými kanály. Tok média od temperační jednotky byl usměrněn sérií přípojek, ucpávek a těsnících kroužků, jež byly vybrány z online katalogu. Vyhození jednoho výrobku z dutiny formy bylo realizováno pomocí dvou prizmatických vyhazovačů, vyhození vtoku pak skrze jeden válcový vyhazovač. Odvzdušnění formy bylo umožněno prostřednictvím vŕl v dělicích rovinách, bočních čelistech a vŕl mezi tvárníkem

a vyhazovači. Snadná manipulace s formou byla zabezpečena transportním zařízením skládající se z hranolu a manipulačního oka.

Funkčnost navrženého konstrukčního řešení byla pak validována pomocí celkové analýzy. Na základě výsledků bylo zjištěno, že navržená forma je schopna provozu a všechny systémy plní svou funkčnost.

Poslední část práce byla věnována volbě odpovídajícího vstřikovacího stroje a zakončena zhotovením výkresové dokumentace skládající se z patřičných pohledů na jednotlivé strany formy spolu s výkresem sestavy. Součástí výkresu sestavy je také kusovník použitých součástí v průběhu konstrukce formy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery. [online]. 2015 [cit. 2024-2-2]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [2] YANG, Yi, Xi CHEN, Ningyun LU a Furong GAO. Injection molding process control, monitoring, and optimization. Munich: Hanser, 2016. ISBN 978-1-56990-592-0.
- [3] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů 2: simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk - teorie a praxe*. Grada, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4. Dostupné také z: <https://www.bookport.cz/AccountSaml/SignIn/?idp=https://shibboleth.utb.cz/idp/shibboleth&returnUrl=/kniha/vstrikovani-plastu-2-10379/>
- [4] VALERO, José R.. *Plastics Injection Molding - Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2020. ISBN 978-1-5231-2723-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPIMSMRB7/plasticsinjection-molding/plastics-injection-molding>
- [5] BEAUMONT, John P. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, [2019]. ISBN 978-1-56990-590-6.
- [6] ZHOU, Huamin (ed.). *Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control*. Hoboken: Wiley, [2013]. Dostupné z: <https://doi.org/9781118444887>.
- [7] OSSWALD, Tim A. a RUDOLPH, Natalie. *Polymer rheology: fundamentals and applications*. Munich: Hanser, c2015. ISBN 9781569905173.
- [8] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 9788073002503.
- [9] *Shrinkage*. Online. Omnexus – The material selection platform. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/shrinkage>. [cit. 2024-02-14].
- [10] WANG, Maw-Ling; CHANG, Rong-Yeu a HSU, Chia-Hsiang. *Molding simulation: theory and practice*. Cincinnati: Hanser Publications, [2018]. ISBN 9781569906194.
- [11] JASSO-GASTINEL, Carlos F. a KENNY, José M., 2017. *Modification of Polymer Properties*. ISBN 978-0-323-44353-1.

- [12] KOHLGRÜBER, Klemens; BIERDEL, Michael a RUST, Harald. *Plastics compounding and polymer processing: fundamentals, machines, equipment, application technology*. Munich: Hanser Publishers, 2022. ISBN 978-1-56990-837-2.
- [13] LENFELD, Petr, 2016. *Technologie vstřikování*. Online. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>. [cit. 2024-02-16].
- [14] HEIM, Hans-Peter (ed.). *Specialized injection molding techniques*. Plastics design Library. PDL handbook series. Amsterdam: Elsevier, WA, [2016]. ISBN 9780323341004.
- [15] CZEPIEL, Mateusz; BAŃKOSZ, Magdalena a SOBCZAK-KUPIEC, Agnieszka, 2023. Advanced Injection Molding Methods: Review. Online. *Materials*. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16175802>. [cit. 2024-02-22].
- [16] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 9788070807880.
- [17] FU, Hongbo a , et al, 2020. Overview of Injection Molding Technology for Processing Polymers and Their Composites. Online. *ES Materials & Manufacturing*. Č. 8, s. 3-23. Dostupné z: <https://doi.org/10.30919/esmm5f713>. [cit. 2024-02-23].
- [18] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 9788027106141.
- [19] SEIDL, Martin. STROJE PRO ZPRACOVÁNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ [online]. 2015 [cit. 2024-02-25]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Impresum.html>
- [20] Injection Molding Machines | Alvin Chan`s Personal Blog. Injection Molding Machines | Alvin Chan`s Personal Blog [online]. 2020 [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://plasticsformingtech.com>
- [21] KULKARNI, Suhas. *Robust process development and scientific molding: theory and practice*. Munich: Hanser Publications, c2010. ISBN 9781569905012.
- [22] Typical structure of injection moulds, E-MOLD 2020. Online. Dostupné z: <https://www.e-moldrapid.com/typical-structure-of-injection-moulds-a-40.html>. [cit. 2024-02-28].

- [23] BOBEK, Jiří. Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů. [online]. 2016 [cit. 2024-02-28]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Impresum.html>
- [24] AUTODESK: Gatesize Infographic Wireframe, [online]. 2017 [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/>
- [25] KAZMER, David. *Injection mold design engineering*. 2nd edition. Munich: Hanser, [2016]. ISBN 9781569905708.
- [26] DANGEL, Rainer. *Injection moulds for beginners*. Munich: Hanser, [2016]. ISBN 9781569906316.
- [27] EWIKON: Verteilertechnik – Optimale Systembalancierung und Temperaturregelung, 2021 [online]. [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://www.ewikon.com/produkte/>
- [28] UNGER, P. *Hot runner technology*. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications, c2006. ISBN 9781569903957.
- [29] GOODSHIP, Vanessa, 2017. *ARBURG Practical Guide to Injection Moulding*. 2nd edition. Smithers Rapra. ISBN 9781910242957.
- [30] KALE, P. D.; DARADE, P. D.; SAHU, A. R. A literature review on injection moulding process based on runner system and process variables. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. p. 012031. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1017/1/012031> [cit. 2024-02-29].
- [31] SCHILLER, Gary F. *A practical approach to scientific molding*. Munich: Hanser Publishers, [2018]. ISBN 9781569906866.
- [32] *Conformal Cooling vs. Conventional Cooling - Pros and Cons*, 2023. Online. Xometry WHERE BIG IDEAS ARE BUILT. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/injection-molding/conformal-cooling-vs-conventional-cooling/>. [cit. 2024-03-05].
- [33] MENNIG, Günter a STOECKHERT, Klaus. *Mold-making handbook*. 3rd edition. Cincinnati: Hanser Publications, 2013. ISBN 9781569905500.
- [34] AUTODESK: Moldflow Insight 2023. Autodesk 2023 [online]. [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: <https://help.autodesk.com/view/MFIA/2023/ENU/>

- [35] KERKSTRA, Randy a BRAMMER, Steve. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. 2nd edition. Munich: Hanser publishers, [2021]. ISBN 978-1-56990-834-1.
- [36] MatWeb. Materiálové listy [online]. [cit. 2024-05-01] Dostupné z: <https://www.matweb.com/>
- [37] ARBURG [online]. [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/en/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| % | procento |
| °C | stupeň Celsia |
| 2D | dvourozměrný |
| 3D | trojrozměrný |
| ABS | akrylonitrilbutadienstyren |
| C | chemická značka uhlíku |
| CAD | počítačem podporované konstruování |
| CAE | počítačem podporované inženýrství |
| CAM | počítačem podporované obrábění |
| cm ³ | jednotka objemu, centimetr krychlový |
| CNC | číslicově řízené stroje |
| DMLS | technologie spékání kovového prášku |
| g | gram |
| H | chemická značka vodíku |
| HCl | kyselina chlorovodíková |
| HDPE | vysokohustotní polyethylen |
| HVS | horký vtokový systém |
| l/min | litrů za minutu |
| LDPE | nízkohustotní polyethylen |
| min | jednotka času, minuta |
| mm | jednotka délky, milimetr |
| mm/s | milimetr za sekundu |
| MPa | jednotka tlaku, megapascal |
| NH ₃ | amoniak |
| p | tlak |

| | |
|------|--------------------------------|
| PA | polyamid |
| PAM | polyakrylamid |
| PBT | polybutylentereftalát |
| PC | polykarbonát |
| PE | polyethylen |
| PET | polyethylentereftalát |
| PLM | řízení životního cyklu výrobku |
| PMMA | Polymethylmethakrylát |
| POM | polyoxymetylen |
| PP | polypropylen |
| PPA | Polyftalamid |
| PS | polystyren |
| PTFE | polytetrafluorethylen |
| PVC | polyvinylchlorid |
| s | sekunda |
| SB | styrenbutadien |
| SVS | studený vtokový systém |
| T | teplota |
| t | jednotka hmotnosti, tuna |
| UV | ultrafialové záření |
| v | měrný objem |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| <i>Obrázek 1</i> Struktura PE [2] | 12 |
| <i>Obrázek 2</i> Různé struktury polymerních materiálů [2] | 13 |
| <i>Obrázek 3</i> Schéma uspořádání makromolekul polymeru [1] | 15 |
| <i>Obrázek 4</i> Vliv viskozity na rychlosti smykové deformace různých skupin látek [6] | 17 |
| <i>Obrázek 5</i> Průběh smrštění u chladnoucí plastové desky [8] | 18 |
| <i>Obrázek 6</i> Fontánový tok při plnění dutiny [10] | 19 |
| <i>Obrázek 7</i> Schéma vstřikovacího cyklu [10] | 24 |
| <i>Obrázek 8</i> Průběh teploty a tlaku v dutině formy v závislosti na čase [8] | 26 |
| <i>Obrázek 9</i> p - v - T diagram pro vstřikování termoplastů [8] | 27 |
| <i>Obrázek 10</i> Procesní okno technologie vstřikování [10] | 28 |
| <i>Obrázek 11</i> Průběh vícemateriálového sendvičového vstřikování [3] | 29 |
| <i>Obrázek 12</i> Proces vstřikování prášku [3] | 31 |
| <i>Obrázek 13</i> Popis vstřikovacího stroje [10] | 32 |
| <i>Obrázek 14</i> Plastikační jednotka [19] | 33 |
| <i>Obrázek 15</i> Pásma šneku [21] | 34 |
| <i>Obrázek 16</i> Hydraulická uzavírací jednotka s kloubovým mechanismem [20] | 35 |
| <i>Obrázek 17</i> Funkce vstřikovací formy [23] | 37 |
| <i>Obrázek 18</i> Základní koncepce vstřikovací formy [22] | 38 |
| <i>Obrázek 19</i> Studený vtokový systém [26] | 40 |
| <i>Obrázek 20</i> Varianty průřezů rozvodných kanálů [5] | 40 |
| <i>Obrázek 21</i> Vybraná vtoková ústí [24] | 41 |
| <i>Obrázek 22</i> Řez horkým rozvodným blokem [27] | 42 |
| <i>Obrázek 23</i> Porovnání výsledků teplotního pole tvarové vložky [32] | 43 |
| <i>Obrázek 24</i> Sestava vyhazovacího systému | 44 |
| <i>Obrázek 25</i> Volný proud taveniny – jetting [35] | 49 |
| <i>Obrázek 26</i> Spálená místa [35] | 50 |
| <i>Obrázek 27</i> 3D Model vstřikované součásti | 53 |
| <i>Obrázek 28</i> Řez součástí | 53 |
| <i>Obrázek 29</i> Rozvržení dělicích rovin | 55 |
| <i>Obrázek 30</i> Barevné rozvržení dělicích ploch na výrobku | 56 |
| <i>Obrázek 31</i> Síť výrobku | 57 |
| <i>Obrázek 32</i> Výsledek simulace vhodného umístění vtoku | 58 |
| <i>Obrázek 33</i> Navržený studený vtokový systém | 59 |
| <i>Obrázek 34</i> Průběh plnění dutiny při použití studeného vtokového systému | 60 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Obrázek 35 Tlak při přepnutí na dotlak.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Obrázek 36 Teplota čela taveniny</i> | <i>61</i> |
| <i>Obrázek 37 Navržený horký vtokový systém.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Obrázek 38 Průběh plnění při použití horkého vtokového systému.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Obrázek 39 Tlak při přepnutí na dotlak.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Obrázek 40 Teplota na čele taveniny.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Obrázek 41 Navržený kombinovaný vtokový systém.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Obrázek 42 Průběh plnění při použití kombinovaného vtokového systému</i> | <i>66</i> |
| <i>Obrázek 43 Tlak při přepnutí na dotlak.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Obrázek 44 Teplota na čele taveniny.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Obrázek 45 Navržený konvenční způsob chlazení</i> | <i>71</i> |
| <i>Obrázek 46 Teplota temperačního média</i> | <i>72</i> |
| <i>Obrázek 47 Efektivita navržených kanálů</i> | <i>72</i> |
| <i>Obrázek 48 Tlak média</i> | <i>73</i> |
| <i>Obrázek 49 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty</i> | <i>73</i> |
| <i>Obrázek 50 Návrh konformního způsobu chlazení</i> | <i>74</i> |
| <i>Obrázek 51 Teplota temperačního média</i> | <i>75</i> |
| <i>Obrázek 52 Efektivita odvodu tepla navržených kanálů.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Obrázek 53 Tlak média</i> | <i>76</i> |
| <i>Obrázek 54 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Obrázek 55 Celková sestava vstřikovací formy</i> | <i>78</i> |
| <i>Obrázek 56 Tvárník</i> | <i>79</i> |
| <i>Obrázek 57 Tvárnice.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Obrázek 58 Boční tvarová čelist.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Obrázek 59 Řez boční posuvnou jednotkou</i> | <i>81</i> |
| <i>Obrázek 60 Sestava boční posuvné jednotky</i> | <i>82</i> |
| <i>Obrázek 61 Vtokový systém formy</i> | <i>82</i> |
| <i>Obrázek 62 Horká část vtokového systému</i> | <i>83</i> |
| <i>Obrázek 63 Studená část vtokového systému.....</i> | <i>84</i> |
| <i>Obrázek 64 Normalizované díly využité při řešení temperačního systému</i> | <i>85</i> |
| <i>Obrázek 65 Temperace boční tvarové čelisti.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Obrázek 66 Temperace pravé strany formy.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Obrázek 67 Temperace levé strany formy</i> | <i>87</i> |
| <i>Obrázek 68 Rozmístění vyhazovačů na díle.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Obrázek 69 Sestava vyhazovacího paketu</i> | <i>88</i> |

| | |
|---|-----|
| <i>Obrázek 70 Vedení formy</i> | 89 |
| <i>Obrázek 71 Vedení vyhazovacího systému</i> | 89 |
| <i>Obrázek 72 Středění formy vůči stroji</i> | 90 |
| <i>Obrázek 73 Manipulační zařízení</i> | 90 |
| <i>Obrázek 74 Pohled do levé a pravé strany formy</i> | 91 |
| <i>Obrázek 75 Vstřikovací forma v průběhu cyklu</i> | 91 |
| <i>Obrázek 76 Síť formy včetně temperačního a vtokového systému</i> | 92 |
| <i>Obrázek 77 Průběh plnění dutiny formy</i> | 94 |
| <i>Obrázek 78 Graf závislosti velikosti uzavírací síly na čase</i> | 95 |
| <i>Obrázek 79 Teplota čele taveniny</i> | 95 |
| <i>Obrázek 80 Studené spoje</i> | 96 |
| <i>Obrázek 81 Místa s hrozbou uzavřeného vzduchu</i> | 96 |
| <i>Obrázek 82 Rozložení tlaku v dutině formy</i> | 97 |
| <i>Obrázek 83 Propadlá místa na výrobku</i> | 97 |
| <i>Obrázek 84 Teplota média v okruzích</i> | 98 |
| <i>Obrázek 85 Efektivita temperačních kanálů</i> | 98 |
| <i>Obrázek 86 Tlak v temperačních okruzích</i> | 99 |
| <i>Obrázek 87 Teplota povrchu dutiny formy</i> | 99 |
| <i>Obrázek 88 Čas pro dosažení vyhazovací teploty</i> | 100 |
| <i>Obrázek 89 Celková deformace výrobku</i> | 101 |
| <i>Obrázek 90 Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 270 C [37]</i> | 102 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|-----|
| Tabulka 1 Vliv plniv na vlastnosti PTFE [12] | 21 |
| Tabulka 2 Vybrané druhy ocelí užívaných k výrobě forem [23]..... | 45 |
| Tabulka 3 Specifika vstřikovaného materiálu [34,36]..... | 54 |
| Tabulka 4 Nastavení procesních podmínek simulace plnění..... | 59 |
| Tabulka 5 Získané výsledky při řešení vtokového systému | 68 |
| Tabulka 6 Nastavení procesních podmínek simulace chlazení | 70 |
| Tabulka 7 Získané výsledky při řešení temperačního systému | 77 |
| Tabulka 8 Procesní podmínky simulace | 93 |
| Tabulka 9 Srovnání parametrů zvoleného stroje s požadovanými parametry [37] | 102 |

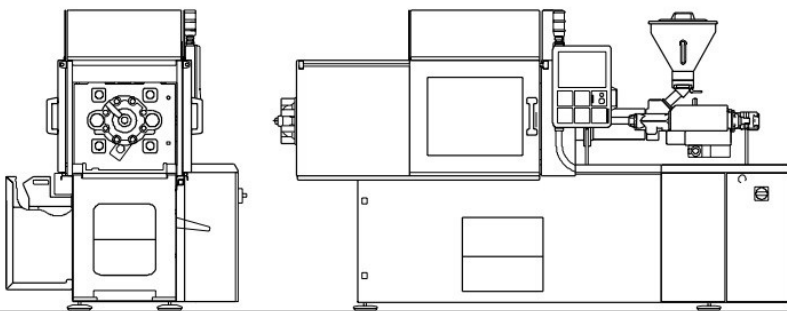
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technický list vstřikovacího stroje ARBURG ALLROUNDER 270 C

Příloha P II: Výkresová dokumentace:

- Pohled do levé a pravé strany formy,
- Řez formou A-A, B-B, C-C
- Kusovník

**PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST VSTŘIKOVACÍHO STROJE
ARBURG ALLROUNDER 270 C**



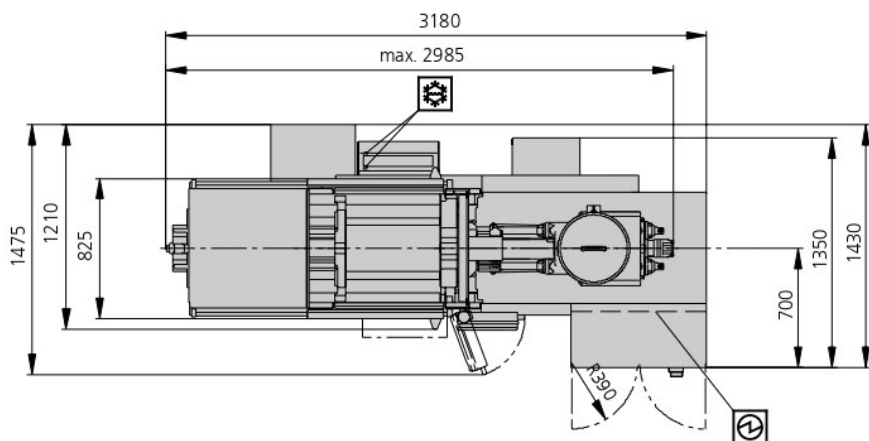
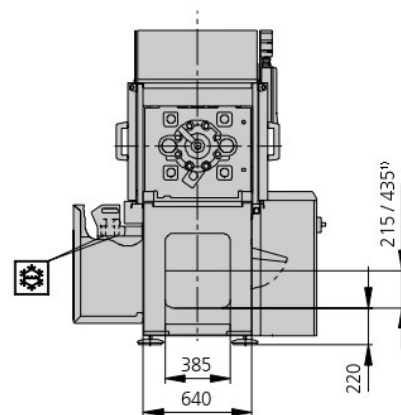
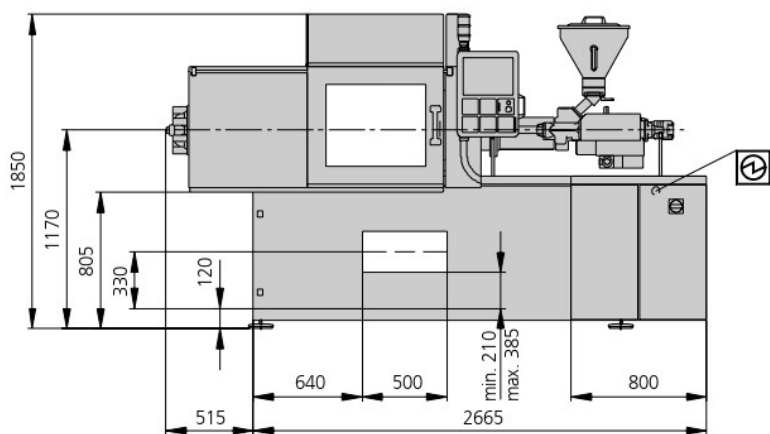
ALLROUNDER 270 C GOLDEN EDITION

Tie bar distance: 270 x 270 mm

Clamping force: 400 kN

Injection unit (according to EUROMAP): 70

ARBURG



Electrical connection



Cooling water connections

Cooling water supply line DN 25
max. 30°C min. Δ 1,5 bar
Cooling water return line DN 25

1) Dimension only valid in conjunction with conveyor belt

| | | |
|---|-------------------------|-----------------------------|
| Machine model | | 270 C GOLDEN EDITION |
| EUROMAP size indication ¹⁾ | | 400-70 |
| Clamping unit | | |
| Clamping force | max. kN | 400 |
| Closing force | max. kN | 35 |
| Opening force / increased | max. kN | 25 / 130 |
| Opening stroke | max. mm | 350 |
| Mould height | min. mm | 200 |
| Daylight | max. mm | 550 |
| Distance between tie bars | mm | 270 x 270 |
| Platen size (hor. x vert.) | mm | 446 x 446 |
| Weight of mov. mould half | max. kg | 180 |
| Ejector force | max. kN | 30 |
| Ejector stroke | max. mm | 125 |
| Hydraulics, drive, general | | |
| Drive power of the hydraulic pump | kW | 7,5 |
| Dry cycle time for opening stroke ²⁾ | s-mm | 1,2-189 |
| Total connected load ²⁾ | kW | 13,9 |
| Colour: plastic coated, structure light grey / mint green / canary yellow | | |
| Control cabinet | | |
| Safety standard according to | | DIN EN 60204 |
| Socket combination (1 single phase, 1 three-phase) | | 1 x 16 A |
| Injection unit | | |
| | | 70 |
| Screw diameter | mm | 18 / 22 / 25 |
| Effective screw length | L/D | 24,5 / 20 / 17,5 |
| Screw stroke | max. mm | 90 |
| Calculated injection volume | max. cm ³ | 23 / 34 / 44 |
| Shot weight | max. g PS | 21 / 31 / 40 |
| Material throughput ⁴⁾ | max. kg/h PS | 4,1 / 5,5 / 6,5 |
| | max. kg/h PA 6.6 | 2,1 / 2,8 / 3,3 |
| Injection pressure ³⁾ | max. bar | 2500 / 2000 / 1550 |
| Injection flow ³⁾ | max. cm ³ /s | 68 / 100 / 130 |
| Back pressure positive / negative | max. bar | 350 / 200 |
| Circumferential screw speed | max. m/min | 39 / 48 / 55 |
| Screw torque | max. Nm | 90 / 110 / 120 |
| Nozzle contact force | max. kN | 50 |
| Nozzle retraction stroke | max. mm | 150 |
| Installed cylinder heating power / heating zones | kW | 3,75 / 3 |
| Installed nozzle heating power | kW | 0,3 |
| Material hopper capacity | l | 25 |
| Machine dimensions and weights of the basic machine | | |
| Oil capacity | l | 165 |
| Net weight | kg | 2150 |
| Electrical connection (pre-fused) ⁵⁾ | A | 50 |

1) 1st figure: clamping force (kN), 2nd figure: max. dosage volume (cm³) x max. injection pressure (kbar)

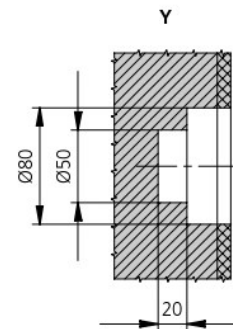
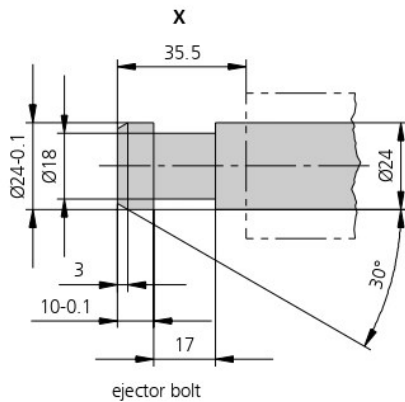
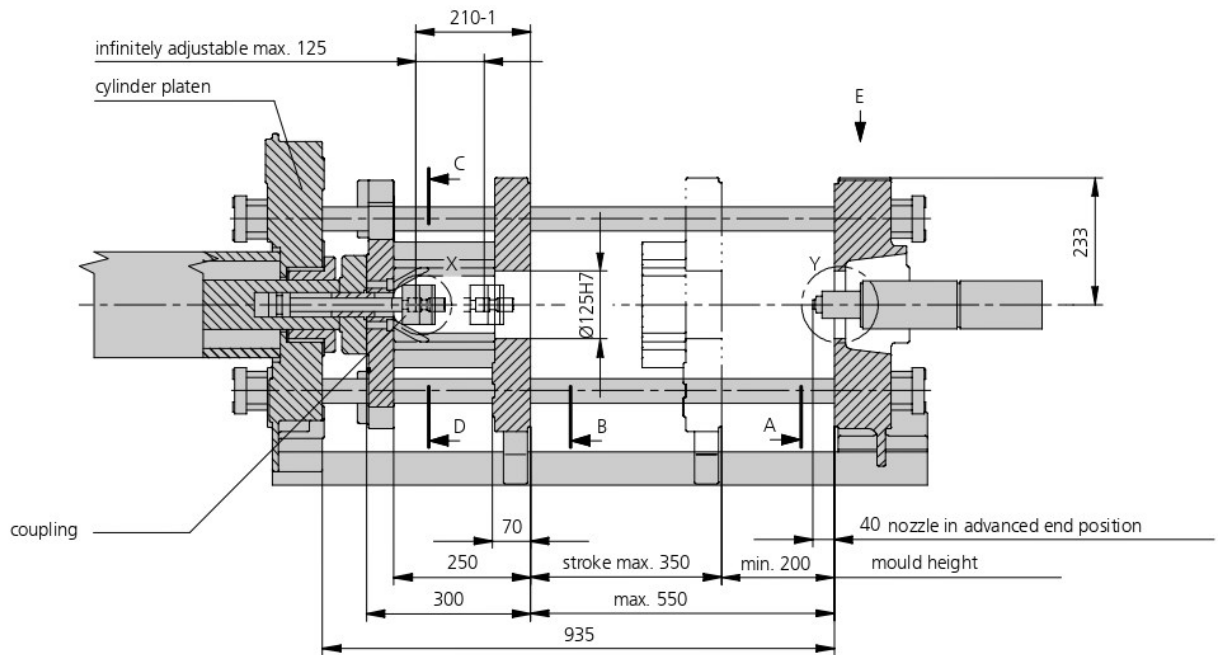
2) Values refer to 400 V/50 Hz. The load is symmetrically distributed on three phases (observe phase loading when installing new equipment)

3) A combination of max. injection pressure and max injection flow (max. injection capacity) can be mutually exclusive, depending on the equipment-related motor output

4) Deviations are possible depending upon process settings and material type

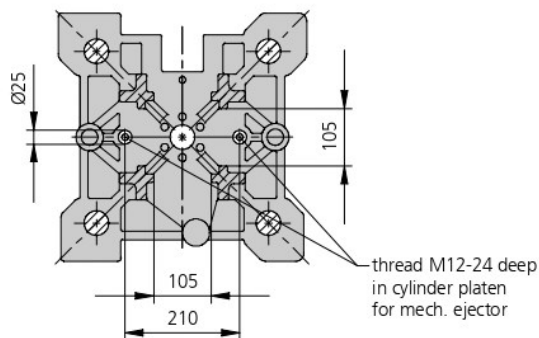
5) According to EUROMAP

These technical data specifications refer to the state at the time of printing. We reserve the right to modify specifications in the interest of a continuous program of further development.

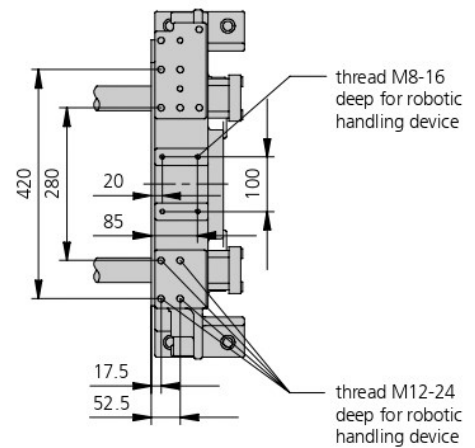


counter bore in the mould
required only for short sprue

View C-D



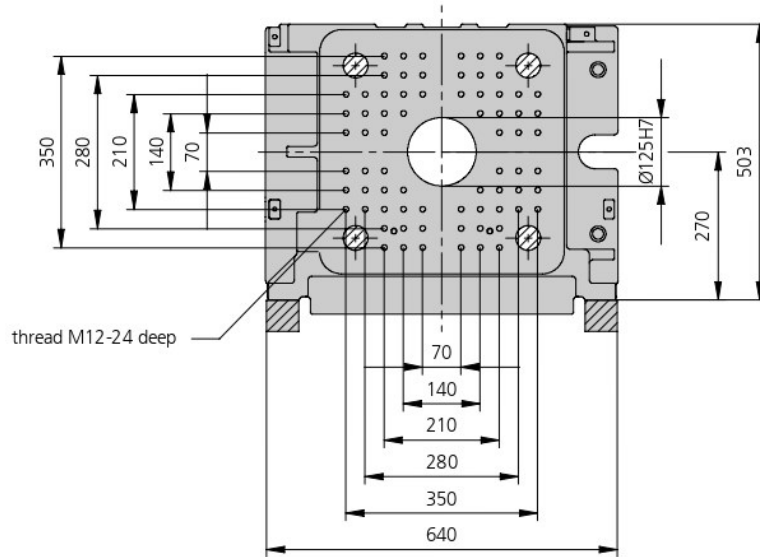
View E



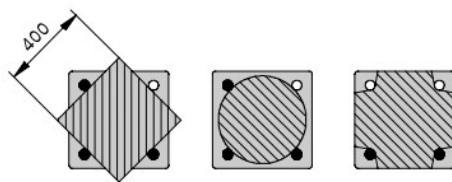
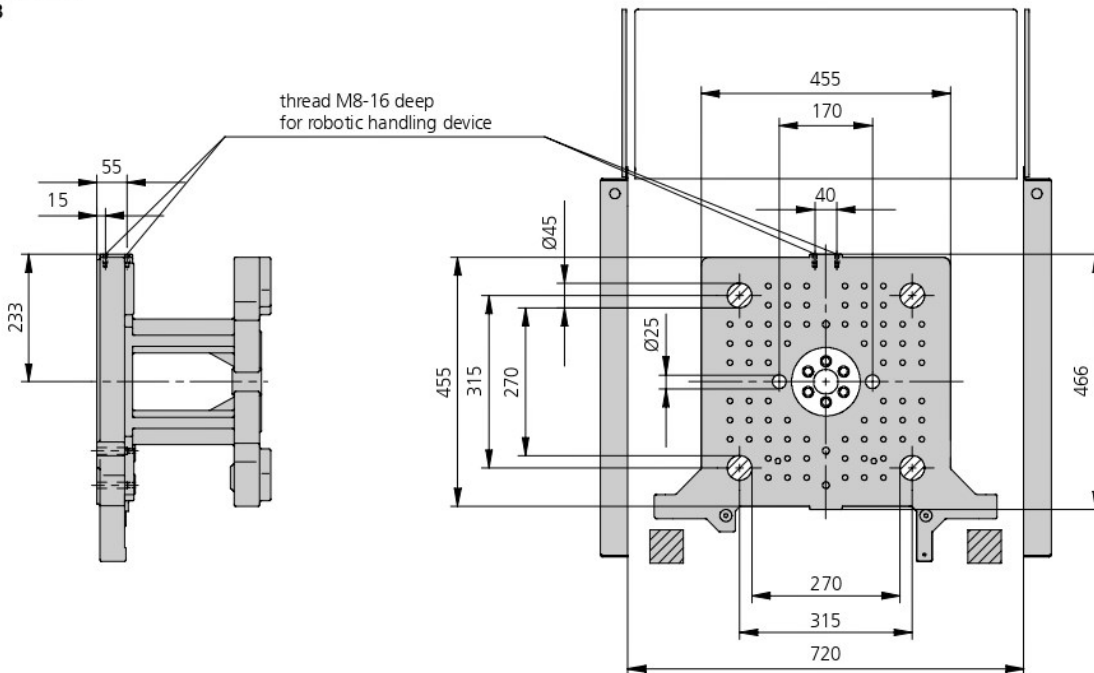
Mould and platen layout

270 C GOLDEN EDITION

Fixed platen
View A



Movable platen
View B



Useable mounting surface with tie bars removed

Maximum theoretical shot weights for the most important injection moulding materials (in grams)

| Injection units according to EUROMAP | | 70 | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|----|----|----|
| Screw diameter | mm | 18 | 22 | 25 |
| Polystyrene | PS | 21 | 31 | 40 |
| Styrene heteropolymerizates | SB | 20 | 31 | 39 |
| | SAN, ABS ¹⁾ | 20 | 30 | 39 |
| Cellulose acetate | CA ¹⁾ | 24 | 35 | 45 |
| Celluloseacetobutyrate | CAB ¹⁾ | 22 | 33 | 42 |
| Polymethyl methacrylate | PMMA | 22 | 32 | 42 |
| Polyphenylene ether, mod. | PPE | 19 | 29 | 37 |
| Polycarbonate | PC | 22 | 33 | 42 |
| Polysulphone | PSU | 23 | 34 | 44 |
| Polyamides | PA 6.6, PA 6 ¹⁾ | 21 | 31 | 40 |
| | PA 6.10, PA 11 ¹⁾ | 19 | 29 | 37 |
| Polyoximethylene (Polyacetal) | POM | 26 | 39 | 50 |
| Polyethylene terephthalate | PET | 25 | 37 | 48 |
| Polyethylene | PE-LD | 16 | 24 | 30 |
| | PE-HD | 16 | 24 | 31 |
| Polypropylene | PP | 17 | 25 | 32 |
| Fluoropolymerides | FEP, PFA, PCTFE ¹⁾ | 33 | 50 | 65 |
| | ETFE | 29 | 44 | 57 |
| Polyvinyl chloride | PVC-U | 25 | 38 | 49 |
| | PVC-P ¹⁾ | 23 | 35 | 45 |

1) average value

ARBURG GmbH + Co KG

Postfach 11 09 · 72286 Lossburg · Tel.: +49(0)7446 33-0 · Fax: +49(0)7446 33-3365 · www.arburg.com · e-mail: contact@arburg.com

With locations in Europe: Germany, Belgium, Denmark, France, United Kingdom, Italy, Netherlands, Austria, Poland, Switzerland, Slovakia,

Spain, Czech Republic, Turkey, Hungary | **Asia:** People's Republic of China, Indonesia, Malaysia, Singapore, Thailand, United Arab Emirates | **America:** Brazil, Mexico, USA

For more information, please go to www.arburg.com.

© 2013 ARBURG GmbH + Co KG

The brochure is protected by copyright. Any utilisation, which is not expressly permitted under copyright legislation, requires the previous approval of ARBURG.

All data and technical information have been compiled with great care. However, we are unable to guarantee its correctness. Individual illustrations and information may deviate from the actual delivery condition of the machine. The relevant valid operating instructions are applicable for the installation and operation of the machine.



ARBURG GmbH + Co KG

DIN EN ISO 9001 + 14001 + 50001 certified

