Optimalizace nástroje pro vstřikování plastového dílu části motoru

Bc. Dominik Slováček

Diplomová práce
2021

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Dominik Slováček**
Osobní číslo:	**T19514**
Studijní program:	**N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Studijní obor:	**Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia:	**Prezenční**
Téma práce:	**Optimalizace nástroje pro vstřikování plastového dílu části motoru.**

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Provést 3D konstrukci modelu vstřikované součásti.
3. Navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobitelnost.
4. Navrhnout optimalizace vstřikování a provést analýzy.
5. Nakreslit 2D řez vstřikovací formou spolu s výkresy a kusovníkem.

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

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 978-80-271-0614-1.
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: **Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

L.S.

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

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací nástroje pro vstřikování plastového dílu části motoru. Teoretická část se zaobírá základními informacemi o polymerních materiálech a jejich zpracovatelskými vlastnostmi, technologií vstřikování a problematikou vad, které mohou vzniknout při vstřikování, dále konstrukcí vstřikovacích strojů, vstřikovacích forem a simulací procesu vstřikování. Praktická část je věnována konstrukci 3D modelu zadaného plastového dílu, pro který je zkonstruována a zoptimalizována vstřikovací forma s výběrem vhodného vstřikovacího stroje a materiálu. Optimalizace vstřikovací formy je provedena za pomocí programu Autodesk Moldflow Synergy a je zkonstruována za pomocí programu SolidWorks a normalizovaných dílů od firem Meusburger, Hasco a Thermoplay. Všechny provedené analýzy jsou podloženy výsledky a zkonstruované součásti výkresovou dokumentací.

Klíčová slova: polymery, vstřikování, vstřikovací forma, optimalizace, konstrukce, Autodesk Moldflow, SolidWorks.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the optimization of a tool for injection molding of a plastic part of an engine. The theoretical part deals with basic information about polymeric materials and their processing properties, injection molding technology and the issue of defects that may occur during injection molding, as well as the construction of injection molding machines, injection molds and simulation of the injection molding process. The practical part is devoted to the construction of a 3D model of a given plastic part, for which an injection mold is designed and optimized with the selection of a suitable injection molding machine and material. Injection mold optimization is performed using Autodesk Moldflow Synergy software and is constructed using SolidWorks software and standard parts from Meusburger, Hasco and Thermoplay. All performed analyzes are substantiate on the results and the constructed components by drawing documentation.

Keywords: polymers, injection molding, injection mold, optimization, construction, Autodesk Moldflow, SolidWorks.

Mé poděkování patří vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval během vypracování celé této práce. Dále děkuji panu Ing. Janu Svobodovi ml. ze společnosti Jan Svoboda s.r.o. za jeho cenné rady a poskytnutí studijních materiálů.

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

OBSAH

ÚVOD **11**
I TEORETICKÁ ČÁST **12**
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY **13**
1.1 PLASTY 13
1.1.1 Termoplasty 14
1.1.2 Reaktoplasty 15
1.2 ELASTOMERY 15
1.2.1 Kaučuky 15
1.3 TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY 16
1.4 CHARAKTERISTICKÉ TEPLOTY POLYMERŮ 16
1.5 SMRŠTĚNÍ POLYMERŮ 18
1.6 TOK POLYMERNÍ TAVENINY 19
1.7 VYUŽITÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU 21
1.8 RECYKLACE PLASTŮ 22
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ **23**
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS 23
2.1.1 Časový průběh vstřikovacího cyklu 25
2.1.2 Tlak, měrný objem a teplota v průběhu vstřikovacího cyklu 26
2.2 PROCESNÍ OKNO 28
2.3 VADY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ 28
2.3.1 Studené spoje (Weld lines) 29
2.3.2 Propadliny (Sink marks) 30
2.3.3 Deformace (Warpage) 30
2.3.4 Delaminace (Delamination) 31
2.3.5 Spálená místa (Burn marks) 31
2.3.6 Bubliny (Void marks) 32
2.3.7 Vzduchové kapsy (Air traps) 32
2.3.8 Stříbrné, bílé pruhy (Silver, white streak marks) 33
2.3.9 Černé skvrny (Black specks) 34
2.3.10 Přetoky (Flashes) 34
2.3.11 Neúplný výstřik (Short shot) 35
2.3.12 Tokové čáry (Flow mark) 35
2.3.13 Tryskový tok (Jetting) 36
3 VSTŘIKOVACÍ STROJ **37**
3.1 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA 38
3.1.1 Šnekové vstřikovací jednotky 39
3.1.2 Vstřikovací trysky, zpětné uzávěry 39
3.2 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA 40

3.3 OVLÁDÁNÍ A ŘÍZENÍ VSTŘIKOVACÍ STROJE 40
4 VSTŘIKOVACÍ FORMA 41
4.1 POPIS VSTŘIKOVACÍ FORMY 41
4.2 NÁSOBNOST FORMY 43
4.3 VTOKOVÝ SYSTÉM 43
4.3.1 Studené vtokové systémy 43
4.3.2 Vyhřívané vtokové systémy 45
4.4 VYHAZOVACÍ SYSTÉM 47
4.4.1 Mechanické vyhazování 47
4.4.2 Pneumatické vyhazování 48
4.4.3 Hydraulické vyhazování 49
4.4.4 Vyhazování vtokového zbytku 49
4.5 TEMPERAČNÍ SYSTÉM 49
5 SIMULACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ 52
5.1 CAD/CAM/CAE SYSTÉMY 52
5.2 AUTODESK MOLDFLOW SYNERGY 53
II PRAKTICKÁ ČÁST 54
6 CÍLE PRÁCE 55
7 VSTŘIKOVANÝ DÍL 56
7.1 ANALÝZA ÚKOSU 57
8 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY 58
8.1 NÁSOBNOST FORMY 59
8.2 RÁM FORMY 60
8.3 ZAFORMOVÁNÍ VÝROBKU 62
8.4 TVAROVÉ ČÁSTI 63
8.4.1 Tvárník a tvárnice 64
8.4.2 Posuvná tvarová jádra a tvarové čelisti 65
8.5 VTOKOVÝ SYSTÉM 67
8.6 TEMPERAČNÍ SYSTÉM 70
8.7 VYHAZOVACÍ SYSTÉM 74
8.8 ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉM 75
8.9 TRANSPORTNÍ SYSTÉM 75
9 ANALÝZA PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ 77
9.1 VOLBA MATERIÁLU VÝROBKU 77
9.1.1 Materiál PA66-GF30 77
9.1.2 Materiál PA6-GF25 78
9.2 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE 79

9.3 TVORBA SÍTĚ VÝROBKU 81
9.4 ANALÝZA UMÍSTĚNÍ VTOKU (GATE LOCATION) 81
9.5 NÁVRH VTOKOVÉHO SYSTÉMU 83
9.5.1 Studený vtokový systém 83
9.5.2 Vyhřívaný vtokový systém 84
9.6 NÁVRH TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU 85
9.6.1 Konvenční temperační systém 85
9.6.2 Konformní temperační systém 86
9.7 PROCESNÍ PARAMETRY 87
9.8 VYHODNOCOVANÉ PARAMETRY 87
9.9 ANALÝZA 1 88
9.9.1 Čas plnění, střední teplota taveniny 88
9.9.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty 89
9.9.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí 90
9.9.4 Propadliny 91
9.9.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty 91
9.9.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla 92
9.10 ANALÝZA 2 93
9.10.1 Čas plnění, smyková rychlost, střední teplota taveniny 93
9.10.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty 95
9.10.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí 96
9.10.4 Uzavírací síla 96
9.10.5 Studené spoje, vzduchové kapsy a propadliny 97
9.10.6 Celkové deformace způsobené všemi efekty 99
9.10.7 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla 99
9.11 ANALÝZA 3 100
9.11.1 Čas plnění, střední teplota taveniny 100
9.11.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty 102
9.11.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí 102
9.11.4 Propadliny 103
9.11.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty 103
9.11.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla 103
9.12 ANALÝZA 4 105
9.12.1 Čas plnění, střední teplota taveniny 105
9.12.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty 106
9.12.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí, uzavírací síla 107
9.12.4 Propadliny 107
9.12.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty 108
9.12.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla 109
9.13 ANALÝZA 5 110
9.13.1 Čas plnění, střední teplota taveniny 110
9.13.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty 111
9.13.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí 111

9.13.4 Propadliny 112
9.13.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty 113
9.13.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla 113
9.14 ANALÝZA 6 114
9.14.1 Čas plnění, střední teplota taveniny 114
9.14.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty 116
9.14.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí 116
9.14.4 Propadliny 117
9.14.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty 117
9.14.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla 118
DISKUZE VÝSLEDKŮ 119
ZÁVĚR 122
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 128
SEZNAM PŘÍLOH 136

ÚVOD

Polymerní materiály a technologie zpracování polymerních materiálů v posledních desetiletích zaujímají obrovský rozvoj, jejichž použití nacházejí téměř ve všech průmyslových aplikacích. Výhodou polymerních materiálů je obrovská variabilita jejich vlastností, snadná zpracovatelnost a nízká hustota. Tyto vlastnosti předčí před ostatními tzv. klasickými materiály, jako je kov, sklo, dřevo nebo keramika, které jsou v mnoha aplikacích polymerními materiály nahrazovány.

Nejpoužívanější technologií zpracování polymerních materiálů, především plastů je technologie vstřikování. Jedná se o vysoce produktivní proces, schopný ekonomicky vyrábět složité součásti v úzkých rozměrových tolerancích. Před vstřikováním jakýchkoliv dílců však musí být navržena, vyrobena a uvedena do provozu vhodná vstřikovací forma. Na konstrukci formy závisí kvalita vyráběného dílu (výstřiku) a také produktivita výroby.

Vývoj technologie vstřikování začal rokem 1870, kdy bratři Hyattovi vyrobili první pístový vstřikovací stroj na obstřikování kovových a dřevěných dílců směsí nitrocelulózy a kafru, kterou nechali patentovat pod názvem celuloid. Od této doby technologie urazila značný vývoj, kdy největší vzrůst přišel v padesátých letech minulého století s patentováním šnekové vstřikovací jednotky a rozšířením používání normalizovaných dílců pro výrobu forem. Další pokrok nastal použitím regulačních a řídících systémů, odkud se technologie dopracovala až po dnes plně automatizované vstřikovací stroje.

Ani dnes se vývoj technologie vstřikování stále nezastavil. Se vzrůstající spotřebou plastových výrobků ve všech odvětvích průmyslu se stále více vyvíjí tlak na výrobce a apeluje se na zkracování dodání výrobku na trh, zkracování výrobních časů, snižování energetické náročnosti, výrobních nákladů a materiálového odpadu a dalších. Pro urychlení vývoje a zkvalitnění výroby se dnes využívá počítačových systémů, které napomáhají analyzovat a řídit celý výrobní proces od samotného návrhu výrobku a vstřikovací formy až po jeho výrobu.

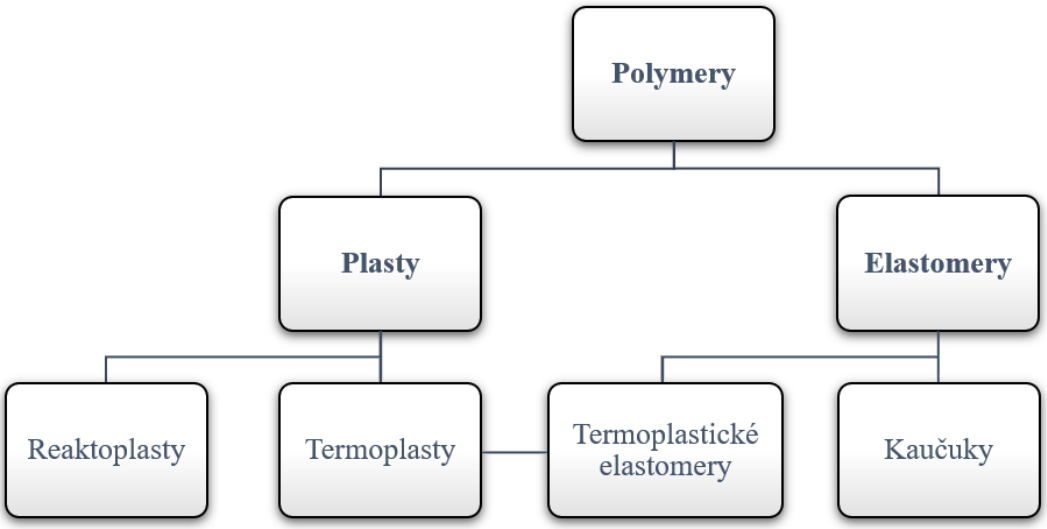
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymerní materiály jsou z chemického hlediska organické látky přírodního nebo syntetického původu, v jejichž veliké molekule, tzv. makromolekule se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní monomerní jednotka zvaná mer. Mer vzniká zapojením monomeru, tedy sloučeniny schopné minimálně dvou vazeb. Délka makromolekul se vyjadřuje molární (relativní molekulovou) hmotností. Makromolekuly mohou být lineární, rozvětvené a síťované.

Vlastnosti polymeru jsou dány dle chemické, molekulové struktury (tvaru a délky makromolekul i velikosti sil, které mezi nimi působí) a nadmolekulární struktury. Polymery tedy představují chemickou stavebnici, která umožňuje mimořádnou proměnlivost struktur i vlastností výsledných látek.

Polymery se z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty dělí na plasty, kde spadají termoplasty, reaktoplasty, a na elastomery, kde se řadí kaučuky. Další skupinou polymerů jsou termoplastické elastomery, jejichž struktura je tvořena jak elastickou částí, tak částí termoplastickou. Schéma rozdělení polymerů je na obr. 1. [1], [2]



Obr. 1: Rozdělení polymerů. (dle [1])

1.1 Plasty

Plasty tvoří látky polymerní povahy a navíc přísady (aditiva), jejichž účelem je specifická úprava vlastností. U plastů nastávají při působením vnějšího namáhání deformace převážně nevratného charakteru. Za klasických podmínek jsou zpravidla tvrdé, často i křehké. Plasty podle chování při zahřívání dělíme na termoplasty a reaktoplasty. [1], [2]

1.1.1 Termoplasty

Termoplasty jsou materiály, u kterých dochází při zahřívání k měknutí, tzn. k přechodu do plastického stavu, kde jsou tvářitelné. Do oblasti taveniny přechází zahřátím nad teplotu tání. Zpětným ochlazením pod teplotu tání přechází opět do tuhého stavu. Při ohřevu nedochází k chemické reakci a během zpracování nedochází ani ke změně chemické struktury. Materiál prochází pouze změnami fyzikálního charakteru a proces měknutí a tuhnutí je vratný, materiál lze opakovatelně tvářet. Typickými termoplastickými materiály jsou PS, PP, PE, PVC, POM a další. [1]

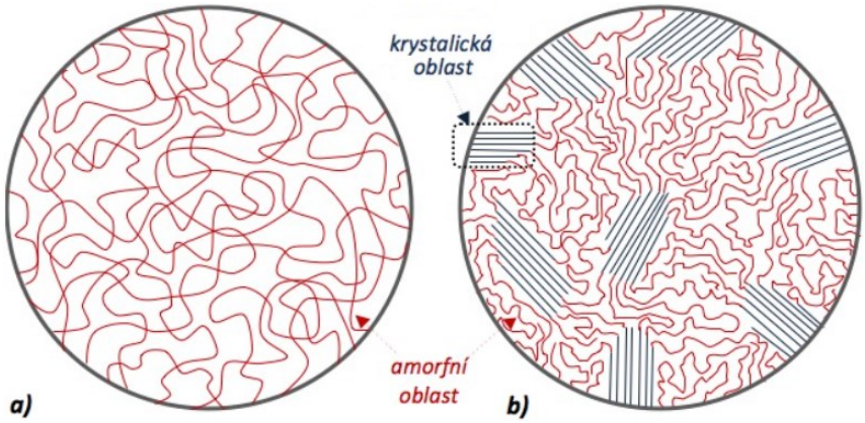
Termoplasty jsou rozděleny dle nadmolekulární struktury na amorfní a semikrystalické.

a) Amorfní termoplasty

Amorfní termoplasty mají neuspořádanou strukturu. Makromolekula zaujímá tvar klubíčka, tzv. globuly (obr. 2 a, str. 15). Jsou charakterizovány tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností a vysokým modulem pružnosti. V důsledku neuspořádané struktury mají bez plniv relativně malé smrštění, obvykle pod 1 %. Díky nízkému indexu lomu a propustnosti světla jsou zpravidla transparentní. Jsou použitelné až do teploty zeskelnění neboli teploty skelného přechodu T_g, kde je polymer v pevném stavu. Mezi amorfní termoplasty patří PS, PC, PMMA, ABS a další. [3], [4]

b) Semikrystalické termoplasty

Semikrystalické termoplasty mají částečně uspořádanou krystalickou strukturu, která je charakterizována určitým stupněm krystalinity (od 40 % do 90 %). Mezi krystalickou fází se nachází fáze amorfní (viz. obr. 2 b, str. 15), jejíž obsah dává termoplastu ohebnost a houževnatost. Obsah krystalické fáze dává pevnost a tuhost. Makromolekuly se ve struktuře semikrystalických termoplastů seskupují do destičkovitých útvarů (lamel) a vytvářejí kulovité útvary nazývané sférolity. Obsah krystalické fáze, velikost i rozložení sférolitů jsou závislé na chemické struktuře polymeru, délce a větvení řetězce. Větší obsah krystalické fáze dodává větší pevnost a modul pružnosti, ale zvyšuje se smrštění materiálu. Oproti amorfním plastům jsou mléčně zakalené. Jsou použitelné až do teploty tání T_m. Mezi semikrystalické termoplasty patří PP, PE, PA, POM, PTFE a další. [3], [4]



Obr. 2: Schematické znázornění molekulární struktury polymerů a) amorfní, b) semikrystalické. [1]

1.1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou materiály, které jsou tavitelné a tvarovatelné jen určitou dobu po zahřátí. Během dalšího tepelného působení nebo za pomocí katalyzátorů dochází k chemické změně, která způsobí zesíťování původních molekul (vytvrzení), čímž se materiál od tohoto okamžiku stává netavitelným a nerozpustným. Vytvrzování je nevratný proces, po kterém materiál není možno znovu tvarovat a ani převést do taveniny. Reaktoplasty jsou amorfní polymery. Jsou vysoce chemicky a tepelně odolné, tvrdé a tuhé. Nevytvrzený reaktoplast se nazývá pryskyřice, která může být např. epoxidová pryskyřice (EP), fenol-formaldehydová pryskyřice (PF), polyesterová pryskyřice (UP) atd. [1]

1.2 Elastomery

Elastomery jsou polymery s výraznou pružností a nízkou tuhostí. Typickým představitelem jsou kaučuky. Po vytvoření chemických příčných vazeb mezi makromolekulami (vulkanizací) dochází k potlačení plastického toku materiálu, polymer se stává vysoce elastický a značně odolný vůči plastické deformaci. Vzniká materiál, který je všeobecně označovaný jako pryž (guma). [1], [6]

1.2.1 Kaučuky

Kaučuky jsou polymery, které lze řídkým zesíťováním (vulkanizací) převést na elastomer neboli pryž. Nejběžnější vulkanizace je sírou (případně peroxidy aj.) probíhající při teplotách (140–160) °C. Pryže se vyznačují převážně amorfní strukturou, nízkou teplotou skelného přechodu a vysokou pružností.

Kaučuky jsou přírodní a syntetické, např. SBR, BR, NBR a další. Ty se v průmyslových aplikacích dále dělí na kaučuky pro všeobecné použití, z nichž se vyrábí většina běžně používaných pryžových výrobků a na kaučuky speciální, které jsou olejovzdorné a teplovzdorné. [1], [6]

1.3 Termoplastické elastomery

U elastomerů na bázi termoplastů (TPE) nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj. Jejich struktura je tvořena tvrdými a měkkými segmenty. Měkké segmenty jsou tvořeny elastomery, tvrdé segmenty termoplasty, které vytváří uzly sítě. Termoplastické elastomery nedosahují tak vysokých elastických vlastností jako pryže, ale jejich výhodou oproti pryžím je možnost vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty. [1]

1.4 Charakteristické teploty polymerů

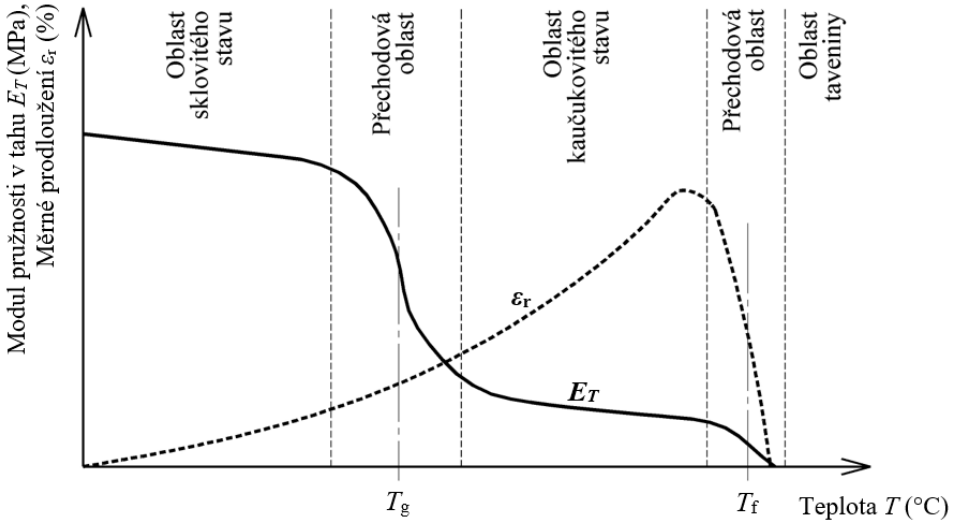
U polymerů se při zvyšování teploty rozvolňují pohyby části řetězců (segmentů), které konají tzv. „mikrobrownův pohyb“. To vede k výrazné změně vlastností, které jsou vázány na určité oblasti teplot, kde se vlastnosti mění rychleji anebo se mění skokově. Tyto oblasti jsou nazývány přechodové a v těchto oblastech existují přechodové teploty: T_g – teplota zeskelnění nebo teplota skelného přechodu, nebo také bod zvratu 2. řádu, T_f – teplota viskózního toku, také teplota tečení (pro amorfní plasty, obr. 3 na str. 17), T_m – teplota tání krystalické fáze (pro semikrystalické plasty, obr. 4 na str. 17).

Teplota skelného přechodu T_g je teplota, při níž dochází ke změně z křehkého sklovitého chování na chování viskoelastické. Teplotu zeskelnění je možno ovlivnit např. přídavkem změkčovadel, které sníží mezimolekulární soudružnost a tím i teplotu T_g. Nejnižší hodnoty teploty zeskelnění T_g vykazují kaučuky (–100 °C až –120 °C) a semikrystalické plasty (např. PP: –10 °C, PE: –120 °C). Amorfní termoplasty mají hodnotu teploty T_g výrazně nad okolní teplotou (PS: 85 °C až 100 °C). V oblasti teploty T_g u amorfních polymerů se hodnota meze pevnosti v tahu mění skokově, modul pružnosti asi o tři řády, koeficient teplotní roztažnosti o 100 % (viz. obr. 3, str. 17).

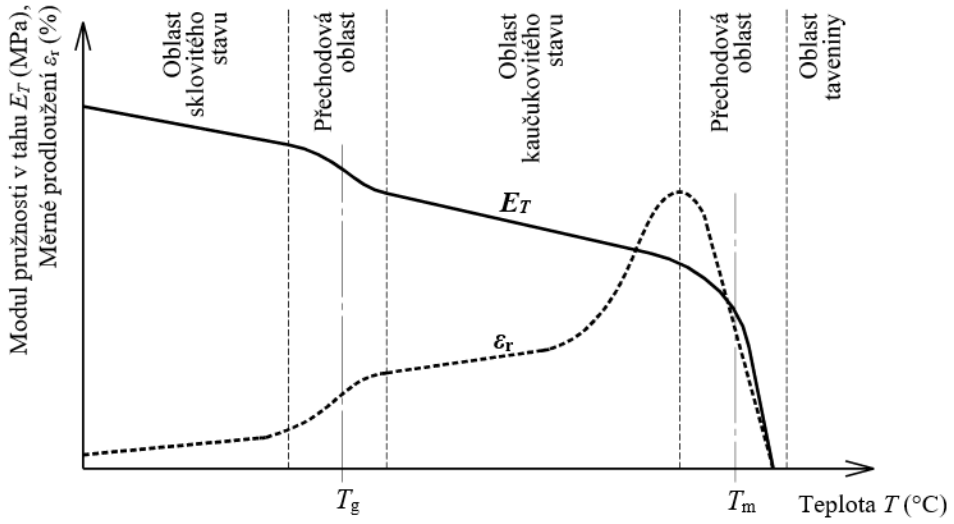
Při teplotě viskózního toku T_f vzrůstá intenzita změn vlastností polymeru, hmota ztrácí své kaučukovité vlastnosti a mění se ve vysoce viskózní kapalinu. Nad touto teplotou leží oblast zpracovatelnosti materiálu. Zvyšováním teploty nastává pokles mezimolekulárních sil

a tím se snižuje i viskozita taveniny. Teplota T_f se nachází pouze u amorfních polymerů. Při dalším zvyšování teploty začne probíhat tepelná degradace polymeru (teplota T_c).

Při teplotě tání T_m dochází k rozpadu a tání krystalického podílu, což je provázeno změnou fáze hmoty, která přechází z tuhého do kapalného stavu. Žádný reálný polymer nekrystalizuje na 100 %, ale jen částečně, proto se tyto polymery nazývají semikrystalické. Množstvím amorfních podílů, lze u semikrystalických polymerů stanovit teplotu zeskelnění T_g, která charakterizuje výrazné změny vlastností polymeru. Semikrystalické polymery jsou nad teplotou T_m zpracovatelné vstřikováním, vytlačováním apod. [8], [11], [14], [17]



Obr. 3: Závislost měrného prodloužení ε_r, *modulu pružnosti* E_T *na teplotě T u amorfního polymerního materiálu.* (dle [15])



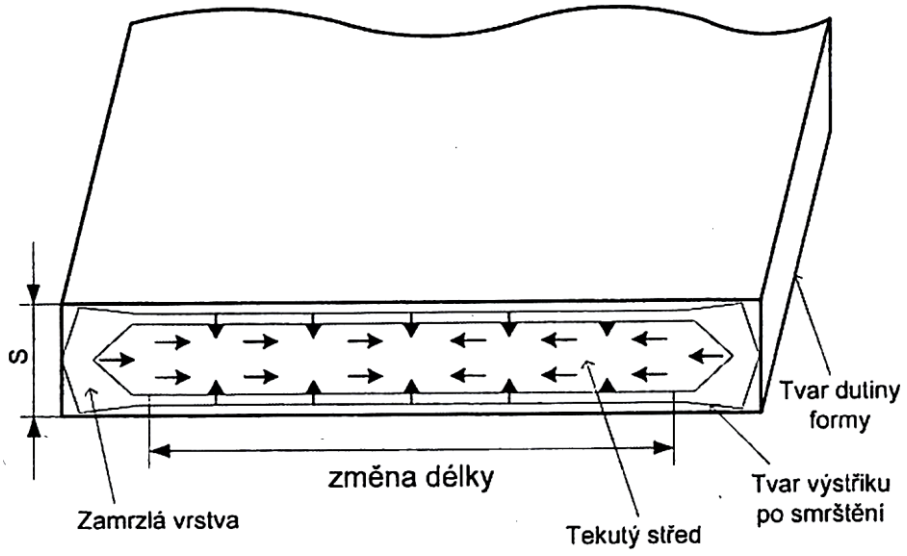
Obr. 4: Závislost měrného prodloužení ε_r, *modulu pružnosti* E_T *na teplotě T u semikrystalického polymerního materiálu.* (dle [15])

1.5 Smrštění polymerů

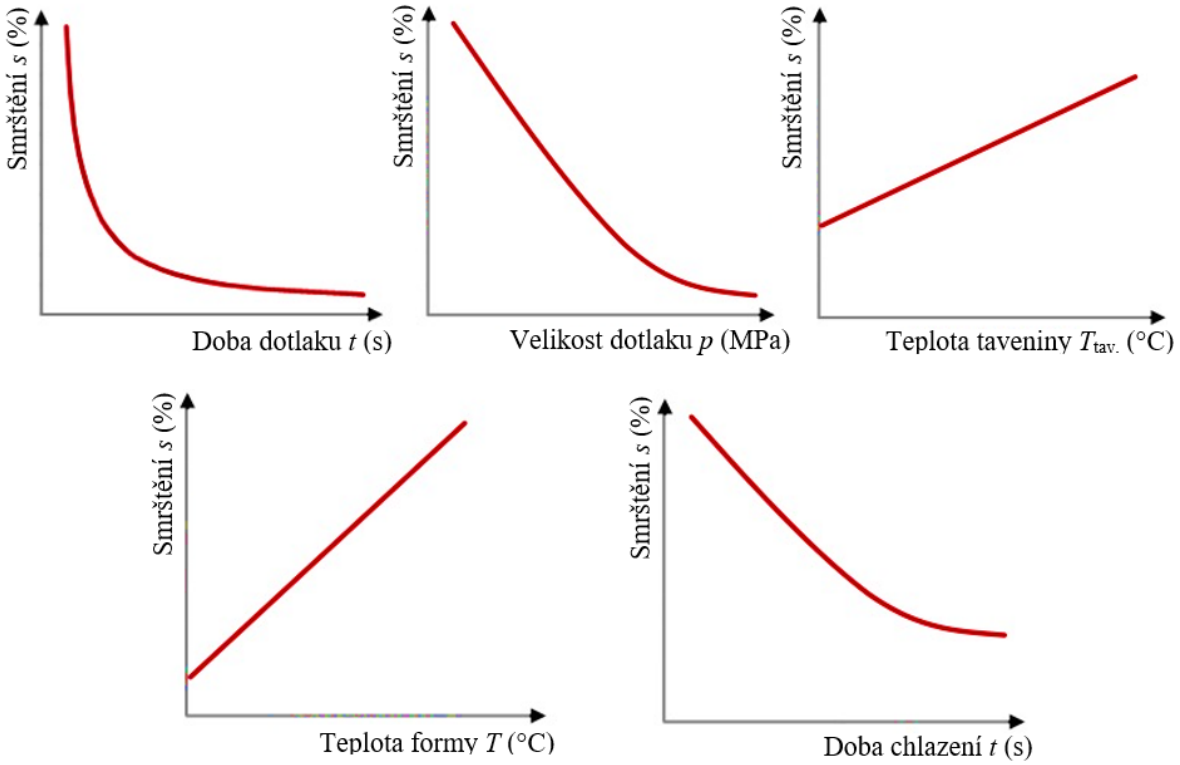
Smrštění a deformace plastických hmot ovlivňují rozměry plastových dílů vyráběných vstřikováním. Smrštění je definované jako objemová změna při tuhnutí polymerních tavenin, která je způsobena stlačitelností, tepelnou roztažností, tepelnou kontrakcí plastů a také krystalizačními změnami u semikrystalických polymerů. Smrštění je tedy rozdíl mezi rozměry formy a výstřiku, vyjadřujeme jej v procentech vztažených na rozměr formy. Tvarová dutina formy musí být o dané smrštění zvětšena. Deformace je definována jako změna tvaru při zachování konstantního objemu výstřiku a může být způsobena smrštěním.

Smrštění je rozdělováno na výrobní (objemové) a dodatečné (lineární) smrštění. Výrobní smrštění je měřené po 24 nebo 48 hodinách po vyrobení při standardních normovaných podmínkách (teplota 23 °C, relativní vlhkost vzduchu 50 %), vzniká převážně v průběhu tuhnutí taveniny a bezprostředně po odformování výstřiku z formy. Výrobní smrštění má význam hlavně pro praxi. Dodatečné smrštění je měřené po temperování nebo po delším časovém odstupu od výroby, vzniká důsledkem relaxace napětí nebo sekundární krystalizace u semikrystalických plastů, kdy rozměry po uplynutí 24 hodin nejsou stále stabilizované. Dodatečné smrštění má význam především pro konstrukci vstřikovacích forem.

Smrštění je časově závislé a není ve všech směrech stejné (viz. obr. 5). Na jeho velikost má vliv také geometrie výlisku, tloušťka stěny, umístění vtoku, obsah plniv, roztažnost polymerů, vstřikovací tlak, doba plnění, teplota taveniny a formy. Vliv určitých parametrů na velikost smrštění při vstřikování je znázorněn na obr. 6**.** [4], [11], [16]



Obr. 5: Průběh smrštění v chladnoucí plastové desce. [14]



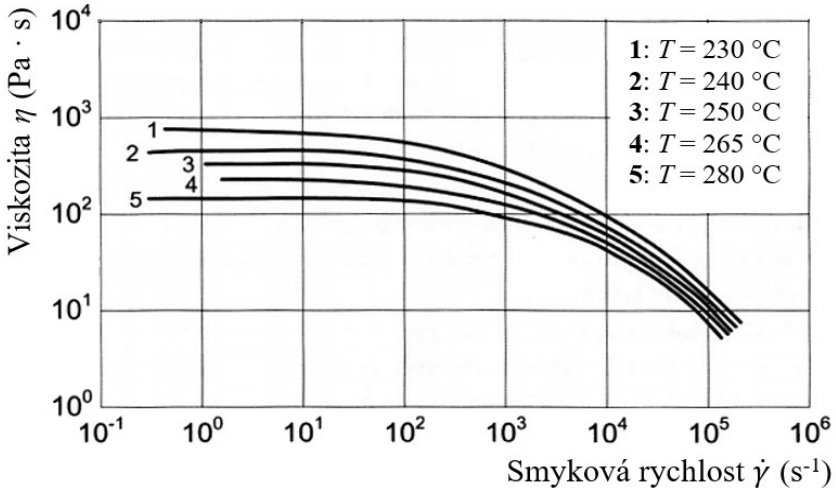
Obr. 6: Vliv technologických parametrů na smrštění vstřikovaných termoplastů. (dle [18])

1.6 Tok polymerní taveniny

Tok polymerních tavenin je na rozdíl od toku nízkomolekulárních látek nenewtonský, pseudoplastický. Tavenina termoplastu se chová viskózně (jako kapalina), ale také zároveň elasticky (jako pružná látka), toto chování je označováno jako viskoelastické. Viskoelasticita popisuje mechanické chování těles při dynamickém zatěžování.

Viskózní (tokové) vlastnosti kapalin mohou být charakterizovány viskozitou η, která je mírou vnitřního tření a závisí na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny, které mají větší viskozitu způsobují větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině (kapalina hůře teče), a naopak kapalina s nízkou viskozitou lépe teče.

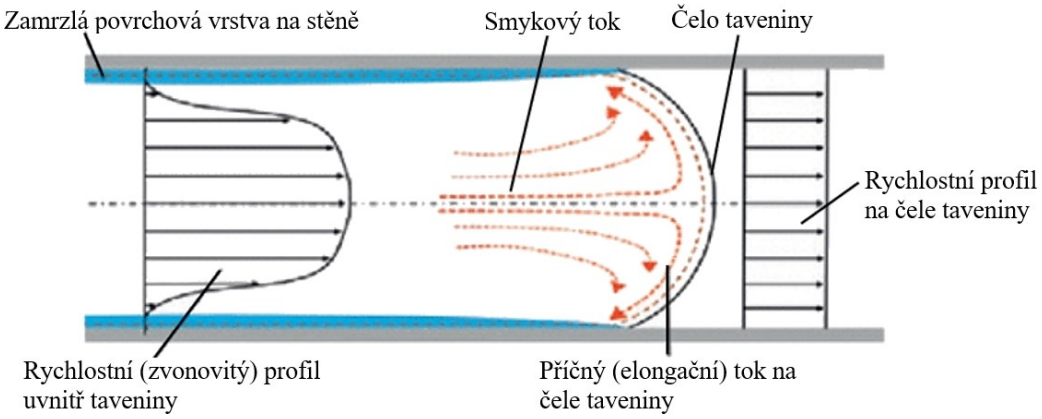
Tokové vlastnosti daných polymerů se vyjadřují ve zpracovatelském rozsahu smykových napětí pomocí tokových (viskozitních) křivek, které se experimentálně měří jako závislost smykových napětí na rychlosti smykové deformace v měřeném místě. Příklad tokových křivek je znázorněn na obr. 7, str. 20, kde jsou stanovené křivky pro pět různých teplot, zasahující oblast smykových rychlostí (10^2–10^5) s^{-1}, které charakterizují proces vstřikování termoplastů. Z obr. 7 je patrné, že větší smyková rychlost a zvýšená teplota taveniny snižují viskozitu, čímž se zároveň při vstřikování zvyšuje vstřikovací rychlost a tavenina lépe zatéká (využití v praxi). [4], [11], [14], [19]



Obr. 7: Graf závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace taveniny PA6 pro různé teploty. (dle [14])

Polymerní taveniny lze také charakterizovat pomocí indexu toku taveniny (*ITT*), který je definován jako hmotnost materiálu v gramech, jenž se vytlačí tryskou za 10 minut při přesně definovaných podmínkách (tvar a rozměr trysky, zatížení pístu, teplota). *ITT* představuje jeden bod na tokové křivce. S rostoucí *ITT* roste i tekutost polymerní taveniny, čímž tavenina je schopna lépe zaplnit tvarovou dutinu formy. [14], [20]

Při toku polymerní taveniny dochází také k disipaci (přeměně mechanické energie na tepelnou energii), a následnému zvýšení teploty. K ohřevu taveniny při toku dochází především v místech nejrychlejšího proudění (zúžených místech tokové dráhy), kde ohřev může zapříčinit až dosažení teploty degradace materiálu T_c. Při vstřikování je teplota stěny tokového kanálu nižší než teplota T_m (T_f). Z tohoto důvodu při toku polymerních tavenin dohází k časově neustálenému toku, kdy na studené stěně tokového kanálu tavenina tuhne v rostoucí vrstvě. Pod tuhnoucí vrstvou směrem ke středu kanálu tavenina stále teče, přičemž ale na povrchu chladnoucí vrstvy rychlost toku taveniny není nulová. Jedná se o fontánový tok (obr. 8, str. 21), který je nejvhodnější pro plnění tvarových dutin formy. Fontánový tok je způsoben absencí skluzu mezi taveninou a stěnou. [14], [20]

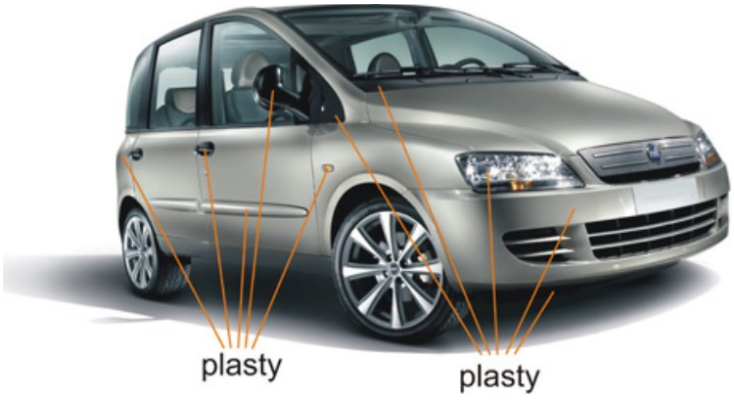


Obr. 8: Schéma fontánového toku. (dle [9])

1.7 Využití polymerních materiálů v automobilovém průmyslu

V současnosti jsou pro konstrukce dopravních prostředků používány lehké plastické materiály vyznačující se specifickými užitkovými a zpracovatelskými vlastnostmi, které nahrazují kovy (obr. 9). Využitím plastových materiálů se dociluje snížení hmotnosti automobilu, díky kterému se snižují náklady, spotřeba paliva a emise škodlivin. Výběr materiálu se sleduje především z hlediska ceny, hmotnosti, vyrobitelnosti, smontovatelnosti a také míry recyklovatelnosti.

Podíl termoplastů na materiálovém složení osobního automobilu je přibližně 8,5 %. Dle konstrukce a velikosti automobilu se v případě střední třídy na výrobu jednoho automobilu použije přibližně 130 až 145 kg plastů. Největší podíl plastových dílců obsahuje karosérie, nejméně podvozek. Nejvíce využívané plasty jsou na bázi polypropylenu (35 %), dále různé druhy polyamidů (14 %), polyetylén (10 %) a polymery ABS (7 %). Vývoj směřuje ke stále širšímu využívání materiálů založených na polypropylénu (PP), především směsi polypropylénu s elastomery a vyztužujícími plnivy, nebo také polyamidy. V tab. 1 na str. 22 je znázorněn přehled používaných plastů pro vybrané aplikace v automobilech. [19], [21]



Obr. 9: Použití plastových komponent na automobilu. [21]

Tab. 1: Volba druhu plastu pro vybrané aplikace v automobilech. (dle [16])

Materiál	Aplikace																																
	Držáky, kličky	Kostra palubní desky	Palubní deska	Součásti brzd	Náraznik	Systém chlazení	Součásti karburátoru	Přístrojová deska, prvky	Vnější kliky	Elektrické komponenty	Palivová nádrž	Přední maska	Držák palivové nádrže	Palivové potrubí	Řadicí páka	Mřížka	Výplň sedaček	Součásti zapalování	Části potrubí	Kryty přístrojů	Vnitřní vybavení	Světla a jeho součásti	Okolí volantu	Zpětná zrcátka	Přístrojová deska	Sedadla	Zvuková izolace	Volant	Prvky pod kapotou	Těsnění	Části vodního čerpadla	Podběhy, blatníky	Ovládání oken
ASA								✓								✓																	
ABS			✓					✓								✓					✓		✓										✓
PA		✓				✓				✓	✓		✓	✓	✓				✓				✓		✓			✓		✓			
PVC								✓													✓								✓				
EP, PF				✓																									✓				
POM	✓						✓		✓	✓				✓	✓														✓				✓
PBT	✓								✓	✓						✓		✓				✓							✓				
PC					✓					✓										✓		✓		✓		✓							
PEI							✓											✓															
PET										✓																			✓				
PE										✓	✓																					✓	
PMMA								✓												✓		✓			✓								
PPS							✓			✓									✓										✓				
PPO								✓								✓																	
PPA						✓				✓			✓																✓				
PP		✓	✓		✓			✓				✓				✓					✓	✓	✓									✓	
PTFE	✓																																
PUR		✓	✓		✓	✓		✓									✓									✓	✓	✓					
UP		✓	✓		✓							✓					✓												✓				

1.8 Recyklace plastů

Recyklace plastů je proces znovuzpracování zbytkových nebo odpadních plastů. Snahou recyklace je uzavření životního cyklu materiálu, tím že odpady od určité fáze životního cyklu nahrazují nový materiál nebo surovinu. V současné době existuje mnoho zařízení (mlýny, regranulační linky aj.), které jsou schopny zpracovat odpad na recyklát (rozdrcený, rozemletý odpad) nebo regenerát (rozdrcený, roztavený a následně granulovaný odpad s přídavkem aditiv), za přijatelné náklady a v dobré kvalitě. Při recyklaci se zpracovává technologický odpad (vtokové systémy, odstřiky, vadné výrobky…) a užitný odpad (tříděný odpad, obaly, části spotřebičů, automobilů…). Technologický odpad se může vracet přímo do výroby, protože je v podstatě totožný s originálem, také snižuje energetickou náročnost výroby. Užitný odpad je zapotřebí odseparovat, roztřídit a poté přepracovat do formy regranulátu nebo recyklátu. Recyklát se nepřidává do transparentních a silně namáhaných plastů. [8], [17], [19]

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování plastů patří mezi hlavní technologie zpracování polymerů. Vstřikováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů, ale také i některé reaktoplasty a kaučuky. Výrobky zpracované vstřikováním mají buď charakter konečného výrobku anebo jsou polotovary nebo díly pro další zkompletování samotného celku. Vstřikování hraje důležitou roli v plastikářském průmyslu díky vysoké rychlosti výroby, nákladové efektivitě a schopnosti vyrábět složité předměty.

Vstřikování je cyklický tvářecí proces, při kterém je dávka zpracovávaného materiálu z pomocné tlakové komory vstříknuta vysokou rychlostí do uzavřené dutiny kovové formy, kde ztuhne nebo zesíťuje v hotový výrobek. Tlaková komora je součástí vstřikovacího stroje a během vstřikovacího cyklu je doplňována zásobou vstřikovaného materiálu.

Výhodou vstřikování je krátký čas cyklu, schopnost vyrábět složité součásti s dobrými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou, ale i konstrukční flexibilita umožňující odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. Nevýhodou vstřikování, v porovnání s jinými metodami zpracování plastů, jsou vysoké investiční náklady, dlouhé časy pro výrobu forem a potřeba strojních zařízení, které jsou neúměrně velké v porovnání s vyráběným dílem. [7], [8]

2.1 Vstřikovací cyklus

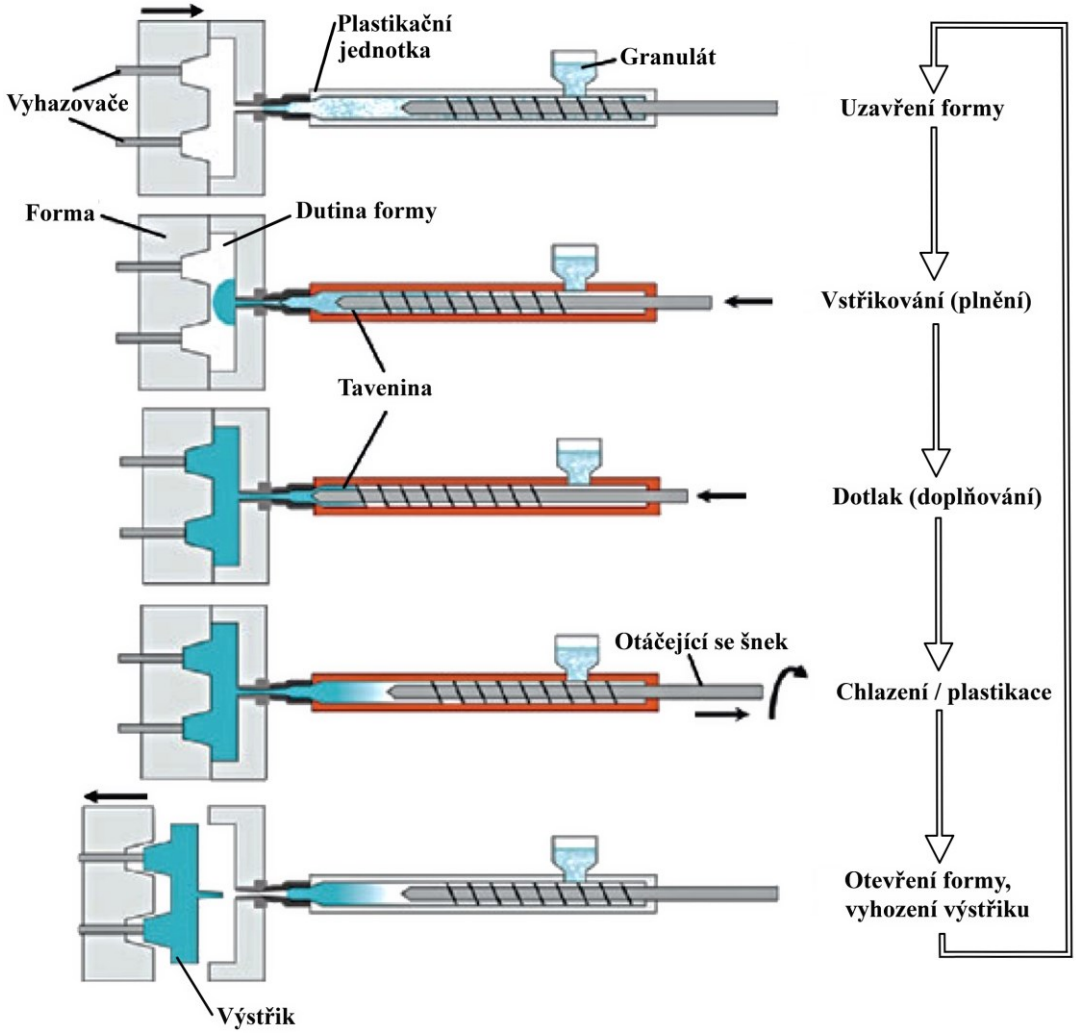
Vstřikovací cyklus je tvořen sledem přesně specifikovaných úkonů. Tento cyklus je neizotermickým procesem, během něhož plast prochází teplotním cyklem. Za počátek vstřikovacího cyklu lze považovat okamžik příslušný impulsu pro uzavření formy.

Kompletní provoz vstřikování vyžaduje vstřikovací stroj s řídicí jednotkou, řádně upnutou formu s dutinou nebo dutinami, které definují geometrii dílu, a jednotku pro regulaci teploty formy.

Proces začíná přiváděním plastového materiálu většinou v podobě granulí do násypky vstřikovacího stroje. Před zpracováním se obvykle plastový materiál suší a čistí, aby se zajistil nízký obsah vlhkosti a nečistot. Do materiálu lze přidávat další přísady za účelem úpravy jeho vlastností a zlepšení zpracovatelnosti. Z násypky je plast odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem, pístem), která hmotu dopravuje do tavící komory, kde za současného účinku tření a tepla plastový materiál taje a vzniká tavenina. Tavenina je po uzavření formy dopravována do dutiny vstřikovací formy. Doprava taveniny do dutiny

formy je zajištěna pohybem šneku v axiálním směru, kdy se šnek neotáčí a plní funkci pístu. Po naplnění dutiny formy je tavenina ještě stlačena a tlak dosáhne maximální hodnoty, čímž se sníží smrštění a rozměrové změny budoucího výrobku. Po ukončení dotlakové fáze odjede plastikační jednotka od vstřikovací formy a začne tavení granulátu pro další dávky vstřikovacího cyklu. Tavenina předává vstřikovací formě teplo a ochlazováním ztuhne ve finální výrobek. Poté se forma otevře, výrobek (výstřik) je za pomocí vyhazovacího systému odformován a celý cyklus se opakuje. [8], [10]

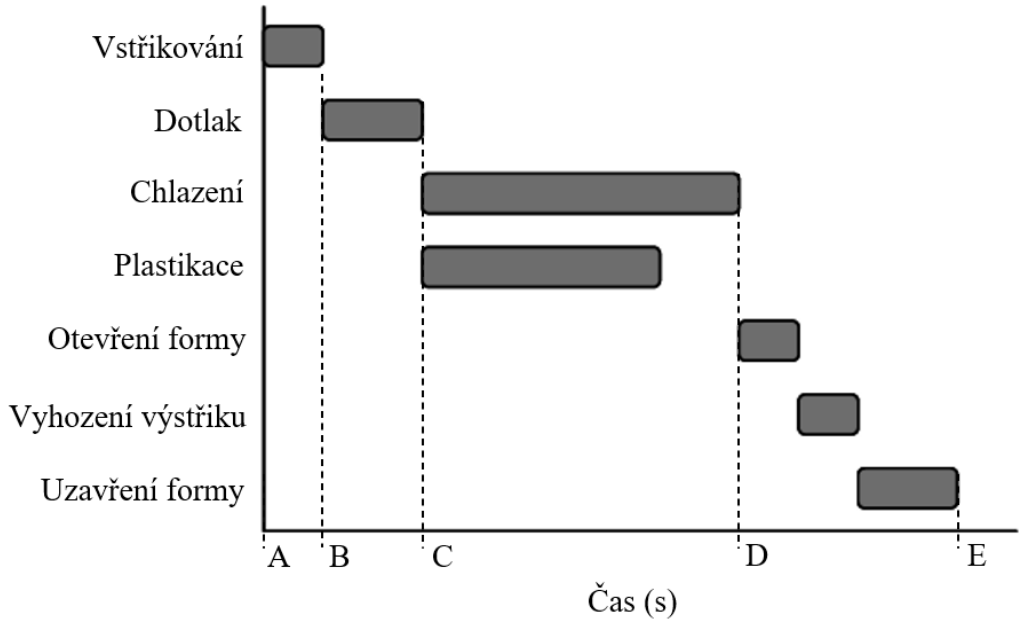
Jeden vstřikovací cyklus (obr. 10) tedy zahrnuje uzavírání formy, vstřikování (plnění) formy, dotlak (doplňování), chlazení formy, otevírání formy a odformování výrobku. Plastikace začíná během fáze ochlazování formy a může trvat až do otevření formy nebo až po konec uzavření formy dalšího cyklu. Fáze chlazení u standartních dílů trvá přibližně dvě třetiny celkové doby cyklu. Při vstřikování kaučukových směsí probíhá na místo chlazení vulkanizace. [9], [11]



Obr. 10: Schéma vstřikovacího procesu. (dle [9])

2.1.1 Časový průběh vstřikovacího cyklu

Časový průběh vstřikovacího cyklu je zobrazen na obr. 11. Vstřikovací čas A–B je poměrně krátký a jen u velkých výstřiků dosahuje několika sekund. Doba plnění by měla být co nejkratší, protože se vstřikována tavenina v důsledku styku s chlazenou formou ochlazuje a ztrácí tekutost, čímž by při dlouhé době nezaplnila celou dutinu a vznikl by tak nedostříknutý zmetek. V intervalu B–C dochází k dotlačování, kdy tlak prudce stoupne a rychlost náhle klesne. Čas dotlaku se pohybuje od několika sekund až po desítky sekund. Mezi body C–D dochází k chlazení, kde čas bývá nejdelší, u velkých výstřiků až několik minut. Doba chlazení je závislá především na tloušťce stěny výstřiku, druhu plastu, teplotě taveniny a teplotě formy. Chladnutí začíná již během fáze vstřikování a pokračuje i během dotlaku. V bodě C nastává zatuhnutí vtoku (konec dotlakové fáze), šnek začne otáčením plastikovat další dávku materiálu a v případě uzavíratelných trysek se plastikační jednotka odsune od formy. Doba plastikace je čas potřebný pro zplastikování dávky plastu, k její rovnoměrné homogenizaci a umístění dávky před čelo šneku. Mezi body D–E dochází k otevření formy, vyjmutí výstřiku a opětovnému uzavření formy. Čas potřebný k těmto úkonům se nazývá jako strojní doba a je závislá především na rychlosti pohybující se formy a na dráze, kterou forma musí urazit. Po uzavření formy, plastikační jednotka opět dosedá na formu, čímž je zahájen další cyklus vstřikování. [8], [12]



Obr. 11: Časový průběh vstřikovacího cyklu. (dle [13])

2.1.2 Tlak, měrný objem a teplota v průběhu vstřikovacího cyklu

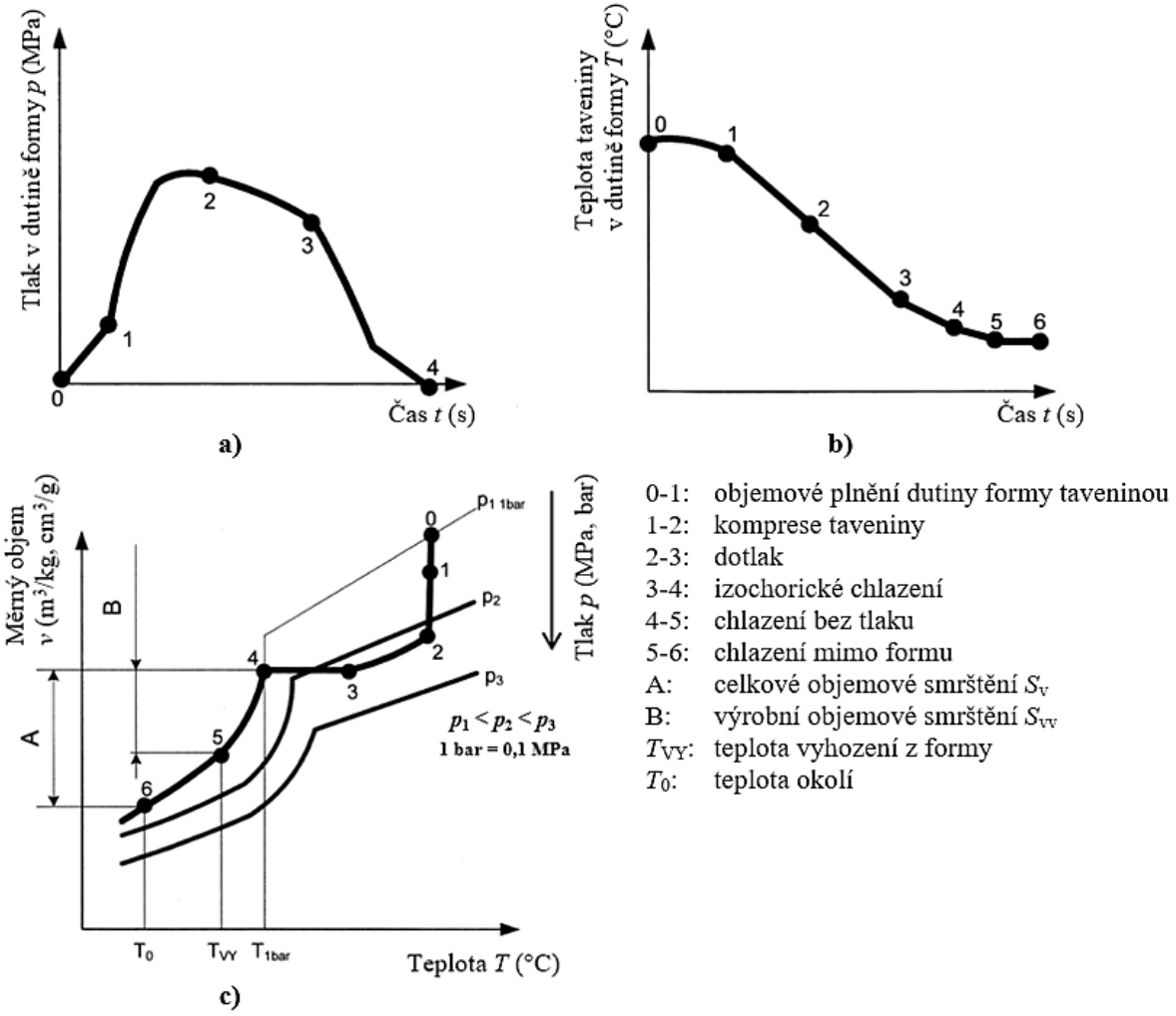
Diagramy *p*-*v*-*T* (*p* – tlak, *v* – měrný objem, *T* – teplota) umožňují popsat fyzikální procesy probíhající v tvarové dutině vstřikovací formy. Diagramy *p*-*v*-*T* také přispívají ke stanovení změny měrného objemu v průběhu vstřikování, což dává možnost určit smrštění a deformace při simulačních výpočtech, upřesnit nastavení technologického procesu vstřikování s jejich následnou optimalizací. [4]

Průběh stavových veličin je v různých místech výstřiku rozdílný a je ovlivněn plastem, tvarem výrobku a tloušťkou stěn, vstřikovací rychlostí vstřikovacím tlakem a dotlakem, teplotou taveniny a teplotou formy. Změny stavových veličin poté přímo určují vznik struktury a mají vliv na hmotnost a rozměry výstřiku. [16]

Diagram *p*-*v*-*T* (obr. 12-c, str. 27) se využívá pro regulaci procesu dotlačování a chlazení. Vstřikovací stroje jsou v těchto případech řízeny mikroprocesorovým systémem, který nastavuje průběh dotlaku a chlazení výstřiku tak, aby nejlépe probíhaly za konstantního měrného objemu. Díky této úpravě se výrazně zvýší kvalita výstřiku a také se dosáhne optimálního a reprodukovatelného smrštění. [12]

Na obr. 12-a na str. 27 je znázorněn diagram průběhu tlaku v dutině formy během procesu vstřikování, kde v intervalu plnění (0–2) vzrůstá prudce tlak, v další dotlakové fázi (2–3) je do formy doplňována tavenina, čímž se kompenzuje objemové smrštění tuhnoucího výstřiku, tlak mírně klesá až do okamžiku zatuhnutí vtoku (bod 3). V dalším intervalu (3–6) je výstřik ochlazen a tlak postupně klesá v důsledku smršťování výstřiku až na zbytkový tlak, který je v optimálním případě shodný s tlakem okolí. Zbytkový tlak je závislý především na velikosti dotlačovacího tlaku. [12]

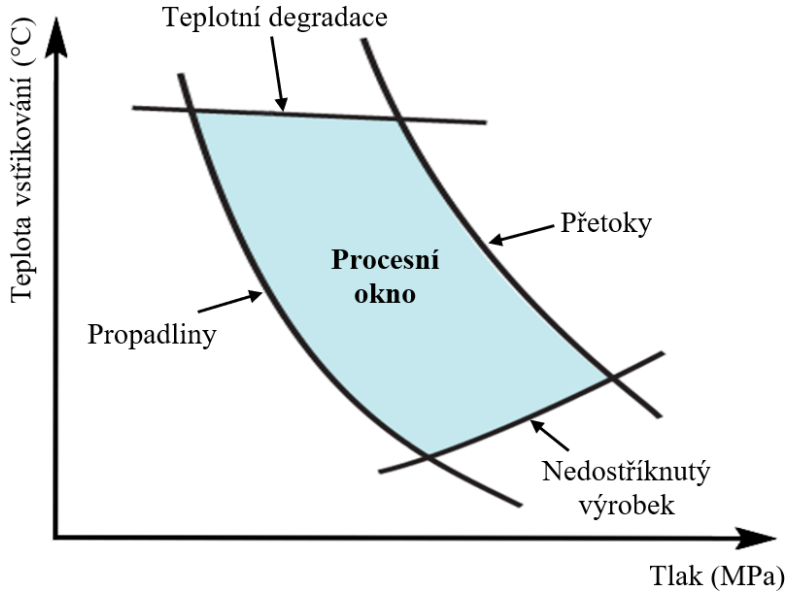
Průběh ochlazování taveniny ve formě je znázorněn na obr. 12-b na str. 27. Chlazení výstřiku ve formě probíhá od počátku vstřikování, ale zejména souběžně s dotlačováním. Jak již bylo psáno v kapitole 2.1.1, rychlost ochlazování je dána především tvarem výstřiku, tloušťkou stěn, druhem plastu, teplotou taveniny, teplotou formy a také její konstrukcí. [12]



Obr. 12: a) Průběh tlaku v dutině formy během procesu vstřikování, b) Průběh teploty taveniny v dutině formy během procesu vstřikování, c) p-v-T diagram pro amorfní plasty. (dle [14])

2.2 Procesní okno

Procesní okno (obr. 13) charakterizuje oblast vstřikování, ve které je možné při správném nastavení technologických parametrů teploty a tlaku vyrobit kvalitní výrobky. Při překročení hraničních parametrů teploty a tlaku procesního okna dochází k výrobě výstřiku s defekty, jako jsou propadliny, přetoky, nedotečená a spálená místa. [16]



Obr. 13: Procesní (zpracovatelské) okno. (dle [10], [16])

2.3 Vady při vstřikování

Vada výstřiku je defekt, kterým se výstřik odlišuje od předem dohodnutého normálu (odlišný vzhled a povrch, rozdílný tvar a rozměry aj.). Vady, které mohou při vstřikování vzniknout lze rozdělit do dvou skupin, a to na vady zjevné a skryté.

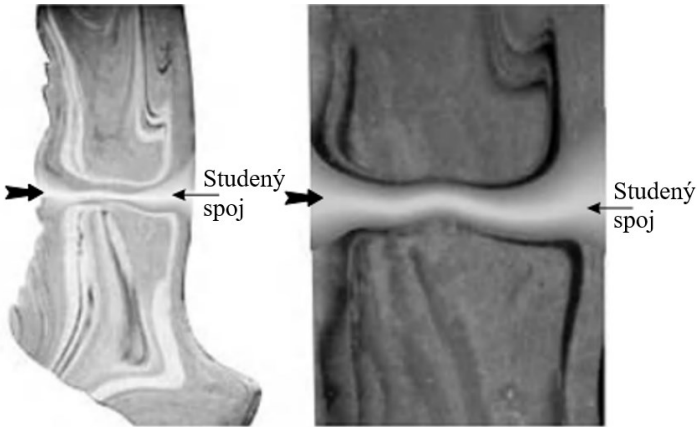
Skryté vady jsou obvykle vizuální kontrolou nezjistitelné, patří sem vnitřní pnutí, studené spoje, vakuové bubliny (lunkry), uzavřený vzduch a anizotropie fyzikálně-mechanických vlastností.

Zjevné vady je možné vizuálně identifikovat, patří sem vady tvaru (propadliny, zvlnění, zborcení, přetoky, otřepy, rozměrové vady…) a vady povrchu (matná místa, tokové čáry, delaminace, spálená místa…).

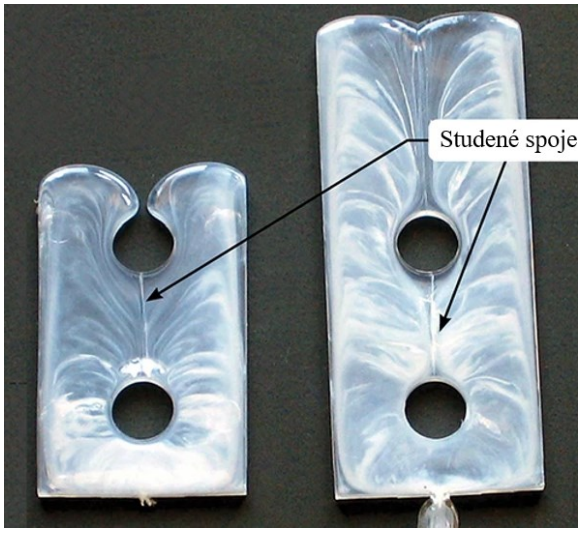
Závady mohou být vzniklé vlivem vstřikovaného materiálu, technologických parametrů vstřikování, vstřikovacího stroje, formy nebo konstrukce výstřiku. Nejjednodušší odstranění vad je změnou jednoho nebo více technologických parametrů. [14]

2.3.1 Studené spoje (Weld lines)

Studené spoje vznikají v místech výstřiku, kde dochází při plnění tvarové dutiny formy ke spojení dvou nebo více proudů taveniny (obr. 14, obr. 15). K rozdělení proudů může docházek při obtékání překážky (jádra) nebo při plnění tvarové dutiny několika ústí vtoku. Teplota taveniny, která se v průběhu plnění dutiny formy snižuje má vliv na kvalitu studeného spoje, pokud tedy vzniká studený spoj za vyšších teplot, jeho kvalita je také vyšší. Místo vzniku studeného spoje je doprovázeno viditelnou povrchovou vadou (spojnicí) a horšími mechanickými vlastnostmi.



Obr. 14: Mikrostrukturní analýza studeného spoje. [26]



Obr. 15: Studené spoje na výstřiku. [24]

Příčinou studeného spoje může být nízká teplota formy nebo taveniny, nízká vstřikovací rychlost, nehomogenita materiálu a špatné umístění vtoku. Změnou těchto parametrů je možné eliminovat studené spoje. [4], [22], [23]

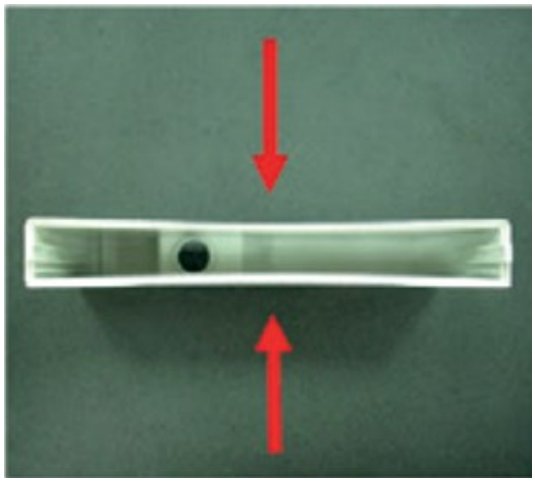
2.3.2 Propadliny (Sink marks)

Propadliny jsou otevřené dutiny ve stěně výstřiku zapříčiněné smršťováním hmoty při jejím tuhnutí (obr. 16). Způsobeny mohou být nevhodnou konstrukcí výstřiku (nerovnoměrnou tloušťkou stěn), vysokou teplotou formy, vysokou nebo nízkou teplotou taveniny, nízkým nebo brzkým dotlakem, malým průřezem ústí vtoku. [4]

Obr. 16: Propadlina na výstřiku. [23]

2.3.3 Deformace (Warpage)

Za deformaci výstřiku jsou považovány změny tvaru a rozměrů výrobku vůči výkresu. Deformace mohou být způsobeny prakticky všemi negativními vlivy, jako je nesprávná konstrukce výstřiku (velké podkosy), špatně zvolený materiál, špatná konstrukce formy (zejména vtokový, vyhazovací a temperační systém), nedostatečná doba chlazení a vysoký obsah vnitřního pnutí (obr. 17). [4]



Obr. 17: Deformovaný výstřik vlivem nevhodně navržené temperace. [10]

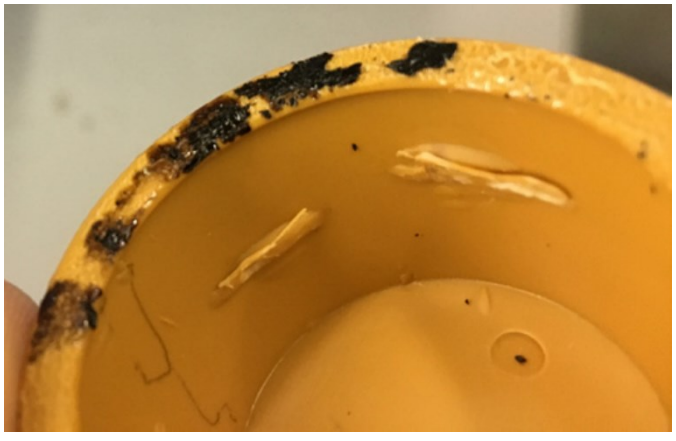
2.3.4 Delaminace (Delamination)

Delaminace vzniká v důsledku nedostatečné soudržnosti jednotlivých vrstev materiálu a jejich oddělováním, zejména při namáhání výstřiku ohybovým napětím (obr. 18). Na delaminaci může mít vliv smíchání dvou nekompatibilních materiálů, znečištění stroje, nízká rychlost vstřikování nebo nízká teplota taveniny. [4], [10], [22]

Obr. 18: Delaminace na výstřicích. [25]

2.3.5 Spálená místa (Burn marks)

Spálená místa na výstřiku (obr. 19) jsou příčinou zachycení vzduchu nebo plynů v dutině formy, které jsou stlačeny taveninou a nemají kam uniknout (slabé odvzdušnění), čímž dochází k prudkému nárůstu tlaku a teploty a následného spálení plastu, tzv. „diesel efektu“. Spálení se projevuje jako černá nebo lesklá skvrna nepravidelného tvaru. Vliv může mít také vysoká teplota taveniny a formy, vysoká vstřikovací rychlost a tlak. [4], [10], [26]

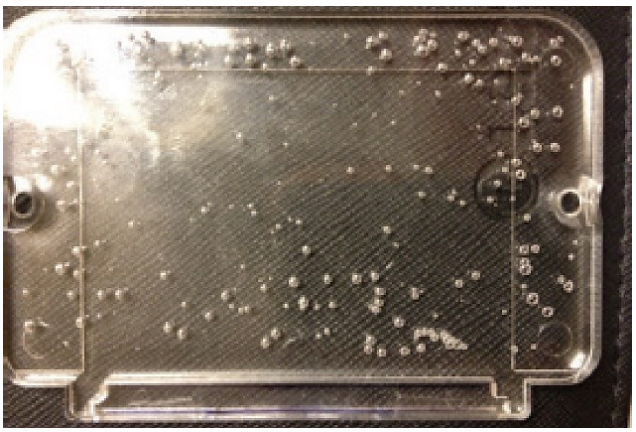


Obr. 19: Spálená místa na výstřiku. [25]

2.3.6 Bubliny (Void marks)

Vakuové bubliny (staženiny, lunkry) jsou uzavřené duté prostory uvnitř průřezu stěnou výstřiku, jenž jsou původně vzduchoprázdné. U průhledných materiálů jsou bubliny dobře viditelné (obr. 20), za to u neprůhledných jsou identifikovatelné pouze po rozříznutí výstřiku nebo pomocí ultrazvuku (obr. 21).

K jejich vzniku dochází převážně v místech s větší tloušťkou, v důsledku nerovnoměrného smrštění mezi vnitřní a vnější části stěny výstřiku, ale také mohou vznikat při malém vstřikovacím tlaku, proniknutí těkavých složek nebo plynu (špatném odvzdušnění), příliš nízké teplotě formy nebo vlivem přehřátí materiálu. [4], [10], [22]



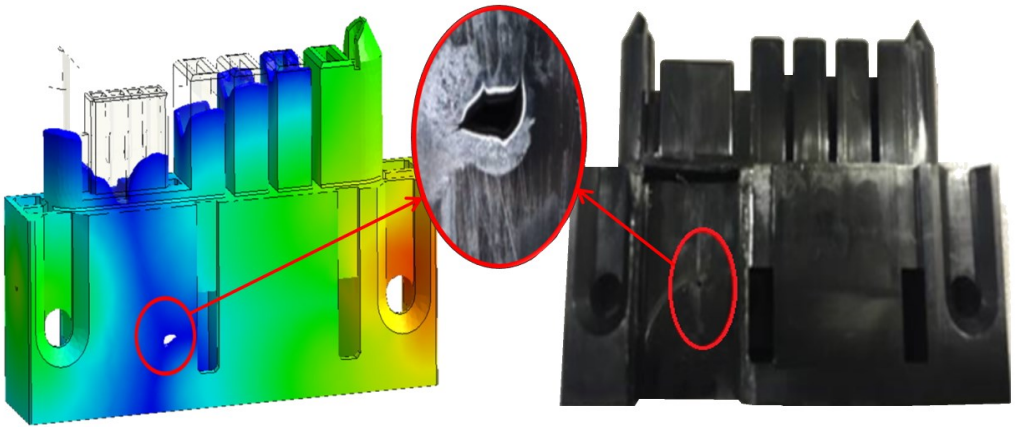
Obr. 20: Bubliny v průhledném výstřiku. [27]

Obr. 21: Bubliny v rozříznutém neprůhledném výstřiku. [23]

2.3.7 Vzduchové kapsy (Air traps)

Vzduchová kapsa (obr. 22, str. 33) je zapouzdřený (uzavřený) vzduch nebo plyn ve výstřiku. K zapouzdření dochází stykem dvou nebo více proudů taveniny, které před sebou tlačí vzduch nebo plyn, který nemá kam uniknout. Vzduchové kapsy mohou mít vliv na mechanické vlastnosti, u transparentních výrobků jsou viditelné a nežádoucí. Mohou být způsobeny také malým dotlakem (nevytlačí se vzduch z taveniny), vlhkým materiálem,

vysokou teplotou taveniny, nedostatečným odvzdušněním nebo nízkým odporem na šneku při plastikaci taveniny. [4], [10]



Obr. 22: Vzduchová kapsa predikovaná v simulaci a na výstřiku. [29]

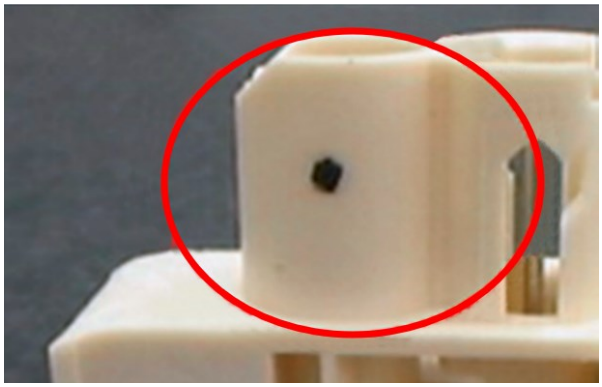
2.3.8 Stříbrné, bílé pruhy (Silver, white streak marks)

Stříbrné, bílé, popřípadě světlé pruhy (obr. 23) jsou způsobeny nejčastěji vlhkostí v materiálu, obsahem těkavých plynů, špatným odvzdušněním, vysokou teplotou taveniny, a také špatnou konstrukcí formy (poddimenzované rozvodné kanály a ústí vtoku, ostré přechody v kanálech), která má vliv na zvýšené smykové namáhání taveniny. Tato vada může vznikat i v důsledku anizotropie smrštění materiálu vznikající u kompozitů s vláknitým plnivem. [4], [10]

Obr. 23: Stříbrné pruhy na výstřiku. [23]

2.3.9 Černé skvrny (Black specks)

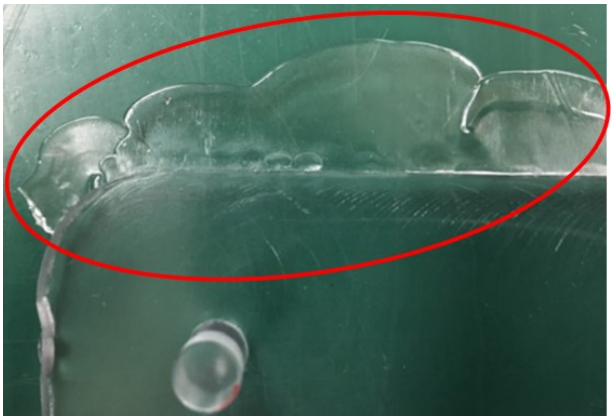
Černé body nebo skvrny (obr. 24) jsou vměstky, částice cizorodého materiálu, které mohou být jak na povrchu, tak uvnitř stěny výstřiku. Může se jednat o stržený, přepálený, zdegradovaný nebo naopak málo roztavený materiál, cizí materiál, prach a nečistoty, které se dostaly do procesu např. vlivem znečištěné plastikační jednotky nebo tvarových dutin formy. Vliv může mít také příliš nízká teplota taveniny, špatně nastavený teplotní profil v plastikační komoře, nízký zpětný odpor na šneku, kontaminace vstřikového materiálu materiálem o vyšší nebo nižší teplotě zpracování. Vada je viditelná hlavně na světlých a transparentních výstřicích. [4], [23], [25]



Obr. 24: Černá skvrna na výstřiku v důsledku kontaminace materiálu. [23]

2.3.10 Přetoky (Flashes)

Přetoky, popřípadě otřepy vznikají, v důsledku zatečení taveniny do špatně slícovaných spár (čelisti, vyhazovače atd.) nebo opotřebovaných dělících rovin formy. Otřepy na přetoku vypadají jako filmová blána nepravidelného tvaru (obr. 25).



Obr. 25: Přetok na výstřiku v důsledku vysokého vstřikovacího tlaku. [25]

Příčinou tvorby přetoků a otřepů může být nedostatečná uzavírací síla stroje, opotřebení nebo znečištění dělících rovin, velký průměr odvzdušňovacích kanálů, vysoká tekutost nebo teplota taveniny, vysoký vstřikovací tlak a vysoká teplota formy. [4]

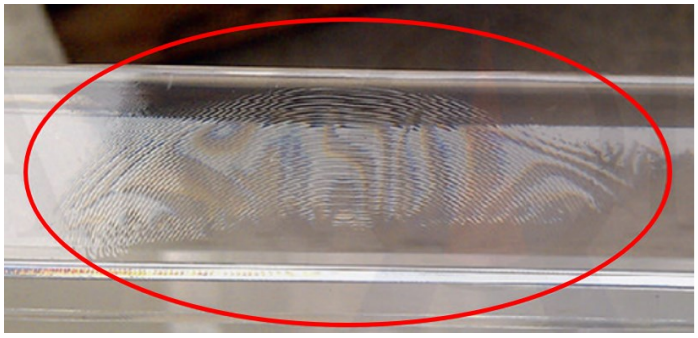
2.3.11 Neúplný výstřik (Short shot)

Neúplný výstřik (obr. 26) vzniká při nedostatečném vyplnění dutiny formy taveninou. Nevyplněný prostor se nachází obvykle na nejvzdálenějším místě od vtokového ústí, nebo v místech s malým průřezem tloušťky stěny. Vada může vzniknout v důsledku nízké tekutosti a zabíhavosti taveniny, malé vstřikovací dávky, špatně navrženého ústí vtoku, nízké teploty taveniny a formy, nízkého dotlaku, malé rychlosti vstřikování nebo v důsledku špatného odvzdušnění tvarové dutiny formy. [4], [10]

Obr. 26: Neúplný výstřik. [30]

2.3.12 Tokové čáry (Flow mark)

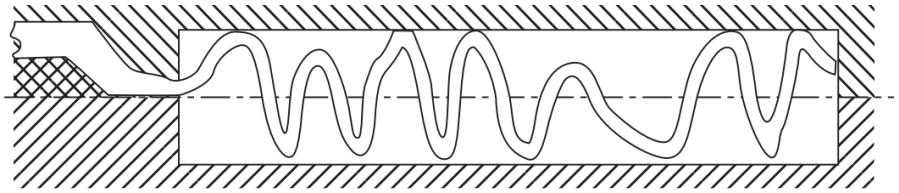
Tokové čáry (obr. 27) jsou soustavy stop na povrchu výstřiku sledující směr toku polymerní taveniny, odlišují se od okolí výstřiku barevným odstínem. Příčinou vzniku může být nerovnoměrně rozložená teplota ve formě, nízká teplota taveniny a špatně navržený vtokový systém. [4], [10]



Obr. 27: Tokové čáry na výstřiku. [10]

2.3.13 Tryskový tok (Jetting)

Tryskový tok (obr. 28, obr. 29) je způsoben tím, že namísto vývinu postupujícího čela taveniny po celém tokovém průřezu se vyvine pramenec taveniny, který vstupuje ústím vtoku do dutiny formy vysokou rychlostí volným pohybem až narazí na stěnu, kde se ochladí a není schopen se homogenně spojit se zbytkem polymerní taveniny, který vstupuje dále do dutiny formy. Spojení, které vzniká je obdobou studených spojů, na výstřiku vznikají švy a stopy po spojích, čímž se snižuje kvalita výstřiku.



Obr. 28: Tryskový tok taveniny v dutině formy. [28]

Obr. 29: Tryskový tok na výstřiku z materiálu PC. [25]

Tryskový tok je způsoben vysokou rychlostí vstřikování, malým nebo špatným umístěním vtokového ústí, příliš dlouhým vtokem, nízkou teplotou formy nebo nízkou zpracovací teplotou materiálu. Odstranění této vady si vyžaduje změnu technologických parametrů, případně zásah do formy, kde je nutné změnit směr zaústění nebo místa ústí vtoku, tak aby tavenina narazila co nejdříve po opuštění ústí vtoku na překážku (stěnu, kolík). [4], [22], [28]

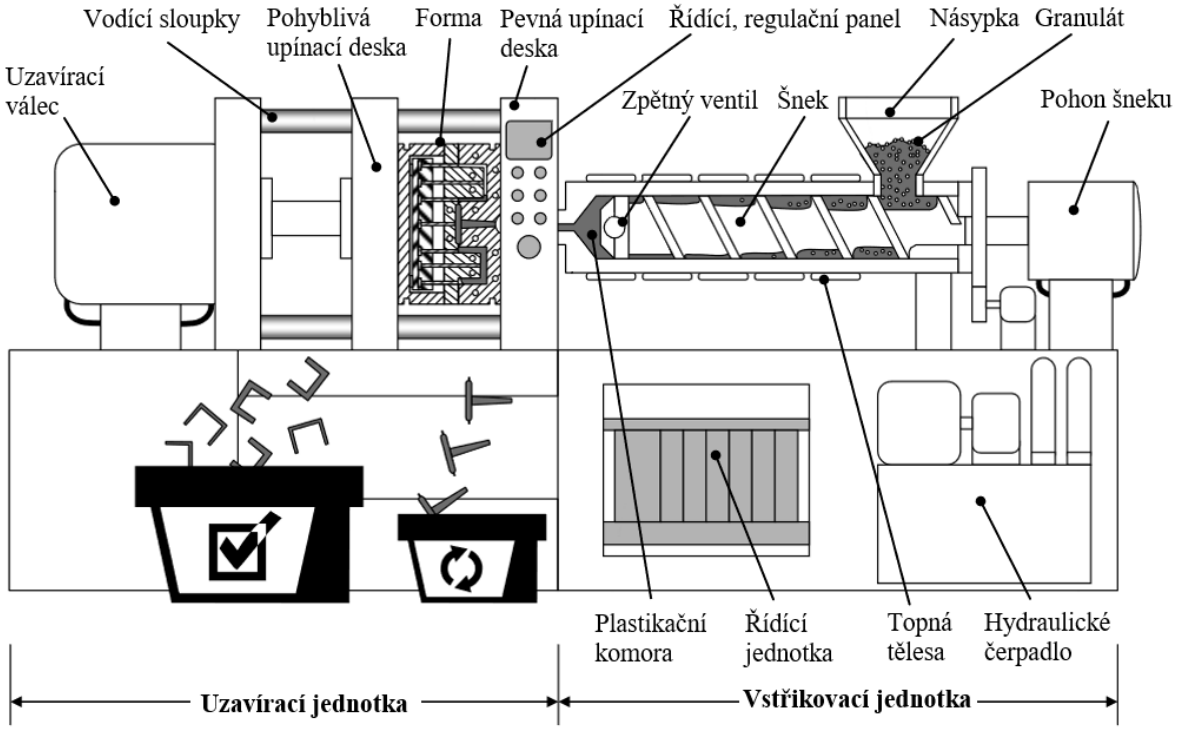
3 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Vstřikovací stroj je tvářecí mechanický stroj, který se používá pro zpracování plastových výrobků, kde v průběhu procesu je plast roztaven a dopraven do dutiny formy. Pořizovací cena vstřikovacího stroje je značně vysoká, proto je technologie vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu.

Vstřikovací stroj (viz. obr. 30) se skládá ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky, řídícího a regulačního systému. Stroje bývají dále vybaveny roboty, manipulátory, temperačním a dávkovacím zařízením, dopravníky a dalšími prvky, čímž se stroje stávají částečně nebo plně automatizovanými. [8], [31]

Vstřikovací stroje mohou být rozděleny dle pohonného systému na hydraulické (ovládání zajištěno pomocí hydraulického systému), mechanické (řízení pohyblivých částí pomocí mechanických převodů), elektrické (stroj řízený regulovatelnými elektromotory) a hybridní (kombinace elektrického a hydraulického pohonu). [31]

Základními parametry pro výběr vstřikovacího stroje je kapacita plastikační jednotky, uzavírací síla, vzdálenost mezi vodícími sloupky, pracovní zdvih vstřikovacího stroje a také požadovaná přesnost a kvalita výrobků. [22]



Obr. 30: Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací. (dle [13])

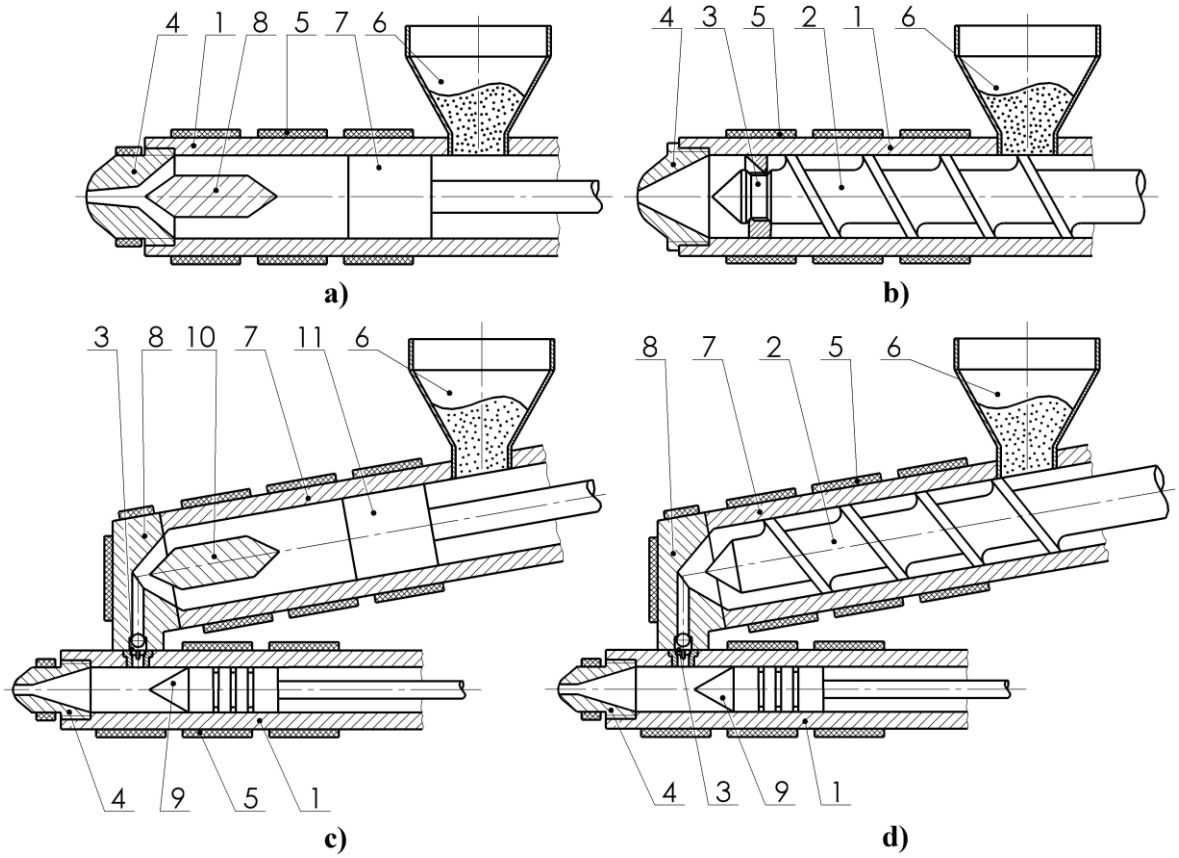
3.1 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka přeměňuje přiváděný plast obvykle v podobě granulí na materiálově a teplotně homogenní taveninu o dané viskozitě, a dále tuto taveninu dopravuje vysokou rychlostí a pod vysokým tlakem do tvarové dutiny formy.

Vstřikovací jednotky se dělí na jednotky bez předplastikace nebo s předplastikací.

U jednotek bez předplastikace probíhá plastikace v tavící komoře (pístová plastikace, viz. obr. 31-a) nebo v pracovním válci (šneková plastikace, obr. 31-b), kde se materiál roztaví a tavenina se pomocí pístu nebo šneku vstříkne do dutiny formy.

U jednotek s předplastikací se zpracovávaný materiál plastikuje v oddělené plastikační komoře (pístová plastikace, obr. 31-c) nebo v pracovním válci (šnek. plastikace, obr. 31-d), a takto připravená tavenina je dopravována do vstřikovacího válce, odkud se pak vstříkne pístem do dutiny formy. Tyto jednotky se využívají při mikrovstřikování. [11], [12], [32]



Obr. 31: Vstřikovací jednotka a) pístová, b) šneková, c) s pístovou předplastikací, d) se šnekovou předplastikací. (dle [11], [31])

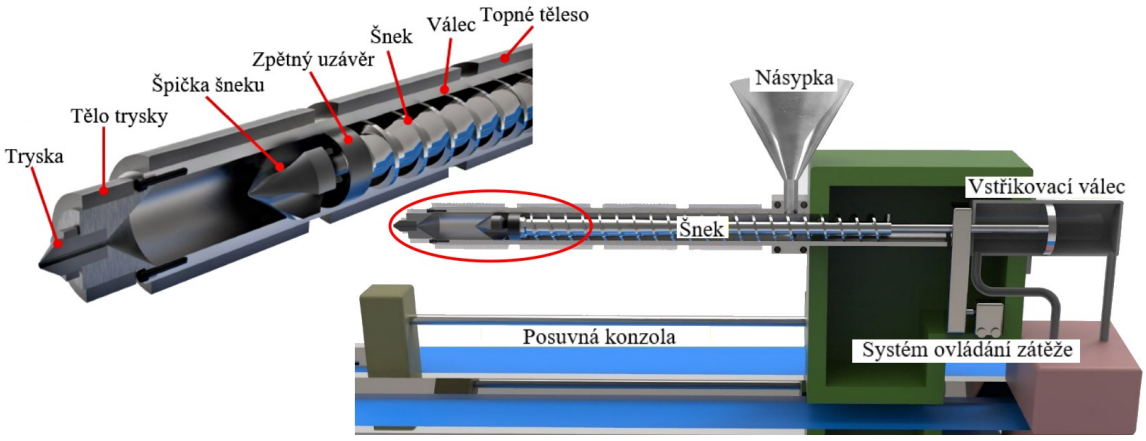
1 – pracovní válec, 2 – šnek, 3 – zpětný uzávěr (ventil), 4 – vstřikovací tryska, 5 – topné těleso, 6 – násypka, 7 – tavící komora, 8 – hlava tavící komory, 9,11 – píst, 10 – torpédo.

3.1.1 Šnekové vstřikovací jednotky

Šnekové vstřikovací jednotky jsou nejpoužívanější jednotky pro vstřikování plastů a elastomerů, které přišly po jednotkách pístových a v současnosti je plně nahrazují.

U vstřikovací jednotky se šnekovou plastikací (viz. obr. 32) vstupuje zpracovávaný plast z násypky do pracovního válce, kde se za pomocí otáčejícího šneku, topných pásů a vznikajícího tření materiál plastikuje, homogenizuje a dopravuje před špici šneku. Šnek se během otáčení posouvá dozadu a vytváří prostor pro taveninu. Po plastikaci potřebné dávky se materiál axiálním pohybem šneku vstříkne přes vstřikovací trysku do dutiny formy.

Šneky vstřikovacích strojů plní funkci dávkování, dopravy materiálu, plastikace, hnětení a vstříknutí do formy. Profil standardních šneků není jednotný po celé délce a dle procesů v plastikačním válci lze rozdělit jeho činnou délku na dopravní, kompresní a homogenizační. [8], [11], [32]



Obr. 32: Šneková vstřikovací jednotka. (dle [30])

3.1.2 Vstřikovací trysky, zpětné uzávěry

Vstřikovací jednotky jsou opatřeny vstřikovacími tryskami a zpětnými uzávěry (ventily).

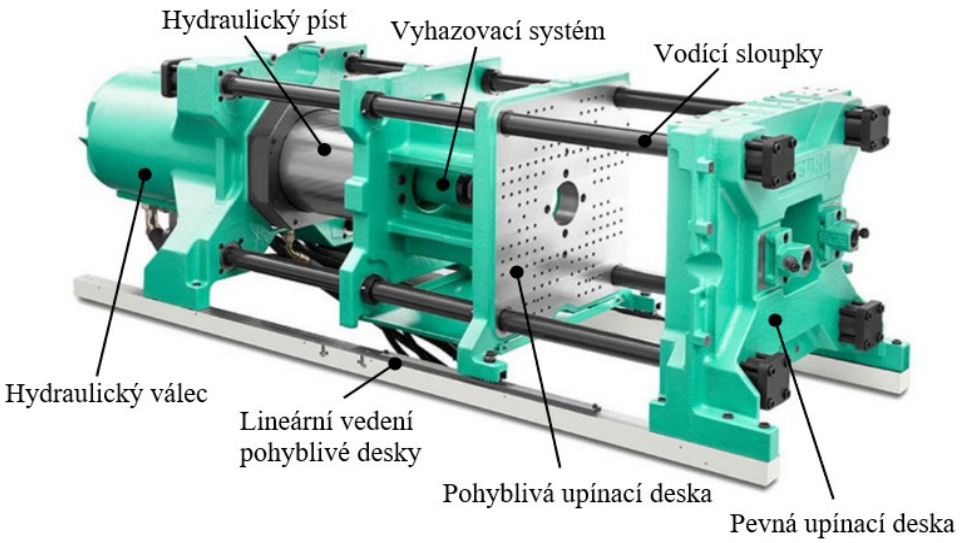
Vstřikovací tryska zajišťuje dočasné spojení vstřikovací jednotky se vstřikovací formou. Jejich konstrukce se odvíjí od použitého materiálu, pro materiály s vyšší viskozitou se používají volně průtočné trysky a pro materiály s nižší viskozitou se používají uzavíratelné trysky.

Zpětné uzávěry zabraňují zpětnému vrácení taveniny do prostoru šneku nebo do tavící komory, a také umožňují regulovat objem taveniny ve vstřikovací fázi a dosáhnout vysokých vstřikovacích tlaků. Zpětné uzávěry mají různé typy konstrukcí, nejvíce používanou konstrukcí u šnekových strojů je konstrukce typu posuvný kroužek – sedlo. [11], [14]

3.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka je část stroje, která otevírá a zavírá formu, a dále přidržuje uzavřenou formu silou větší, než je síla vyvozená tlakem taveniny na stěny dutiny formy. Jednotka (viz. obr. 33) se skládá z vodících sloupků, pevné a pohyblivé upínací desky, uzavíracího (otevíracího) a přidržovacího mechanismu a lineárního vedení. Přidržení formy během fáze vstřikování může být provedeno mechanicky (mechanickým zapříčením) nebo hydraulicky (hydraulickým pístem), popřípadě kombinací předešlých systémů. Pohyb pohyblivé upínací desky je lineární a vratný, její síla a rychlost se v průběhu času a její polohy mění.

Provedení uzavíracích jednotek zajišťující posuvy pohyblivé desky lze rozdělit dle druhu pohonu na hydraulickou, hydraulicko-mechanickou a elektro-mechanickou. [8], [11], [31]



Obr. 33: Hydraulická uzavírací jednotka. (dle [30])

3.3 Ovládání a řízení vstřikovací stroje

Systém řízení a regulace zajišťuje snímání a sledování strojních a technologických parametrů včetně jejich následné regulace, v případě, že překročí některá z naměřených hodnot přípustnou toleranci. Systémy jsou v současnosti řízeny mikroprocesory a jsou vybaveny komunikačním rozhraním, na kterém lze nastavovat a sledovat technologické parametry (vstřikovací tlak, dotlak, vstřikovací rychlost aj.). Výhodou těchto systémů je kontrola funkce stroje a hlášení poruch, optimalizace procesu, rychlá změna nastavených parametrů, sledování a vyhodnocování provozních dat (využití stroje, produkce, zmetkovitost, délka cyklu…). Využitím těchto systémů se dosahuje stejnoměrné a vysoké kvality výstřiků, menší zmetkovitosti a vysoké produktivity. [11], [32]

4 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je komplexní systém, který musí současně splňovat mnoho požadavků kladených procesem vstřikování. Primární funkcí formy je dopravit taveninu do dutiny formy a zde dát tavenině výsledný tvar výrobku a ten zachovat až do ztuhnutí a ochlazení na teplotu, při které nedochází k deformacím. Forma musí být také schopna efektivního odvodu tepla přivedeného taveninou a bezpečného a rychlého odformování výstřiku. Tyto funkce jsou doprovázeny dalšími požadavky na formu jako je maximální tuhost a pevnost dílčích částí formy i celků zajišťující odolnost vůči vysokým tlakům, vhodná volba materiálu formy, vysoká přesnost a jakost funkčních ploch dutiny formy a dalších prvků, dále vhodný vtokový systém, temperace, odvzdušnění, optimální životnost a další.

Na konstrukci a výrobní přesnosti formy závisí rozměrové tolerance výrobků, jejich užitkové vlastnosti a také ekonomika výroby. Při návrhu konstrukce formy se vychází z tvaru výrobku, typu stroje, druhu zpracovávaného materiálu a požadovaného počtu vyráběných kusů výstřiků. [12], [13], [17]

Vstřikovací formy lze rozdělit:

- dle násobnosti na jednonásobné a vícenásobné,
- dle způsobu zaformování a konstrukce na dvoudeskové, třídeskové, etážové, vytáčecí, čelisťové aj.,
- dle konstrukce vstřikovacího stroje na formy se vstřikováním kolmo na dělící rovinu a na formy se vstřikováním do dělící roviny. [33]

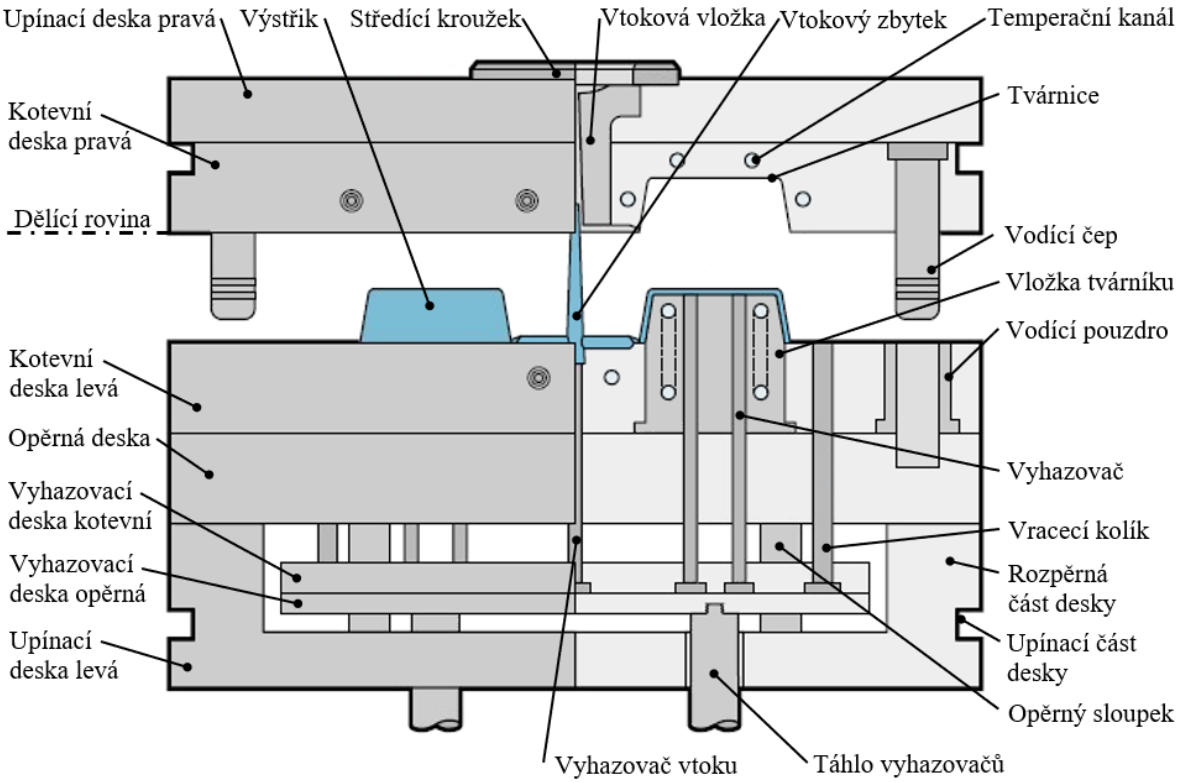
4.1 Popis vstřikovací formy

Vstřikovací forma je složena z komponent, která vymezují tvarovou dutinu formy, jedná se o temperační systém, vtokový systém, vyhazovací systém, a upínací a vodící elementy.

Jednotlivé části vstřikovacích forem je možné rozdělit do dvou skupin, a to na části konstrukční, které zajišťují správnou činnost nástroje a na části funkční, které se stýkají se zpracovávaným materiálem a udělují mu požadovaný tvar. [33]

Schéma konstrukce dvoudeskové vstřikovací formy je na obr. 34 na str. 42. Dvoudesková forma je složena z několika desek (opěrných, kotevních, upínacích a vyhazovacích) vzájemně spojených pomocí šroubů. Forma je rozdělena na dvě strany, a to na pevnou stranu (strana tvárnice) a pohyblivou stranu (strana tvárníku). Hranice mezi pohyblivou částí a

pevnou částí se nazývá dělící rovina. Vystředění pevné a pohyblivé částí formy a také vyhazovacích desek zajišťují vodící součásti (vodící čepy a kolíky, vodící pouzdra aj.). Upnutí formy na stroj se provádí pomocí upínacích desek, které se obvykle podkládají izolačními deskami pro zmenšení tepelných ztrát. Zajištění přesné polohy vstřikovací formy na vstřikovacím stroji je zajištěno pomocí středících kroužků. Dopravu taveniny ve formě do požadované hloubky (obvykle do dělící roviny) formy zajišťuje vtoková vložka.



Obr. 34: Schéma vícenásobné dvoudeskové vstřikovací formy. (dle [35])

V kotevních deskách jsou vyrobeny tvarové dutiny nebo mohou zde být ukotveny tvarové vložky. Tvarové části vstřikovací formy tvoří tvárník a tvárnice. Tyto tvarové části vytváří dutinu formy, která odpovídá tvaru negativu vstřikovaného dílu před smrštěním. Tvarové dutiny jsou vyráběny z mechanicky a abrazivně odolnějších materiálů, které jsou finančně nákladné. Použitím tvarových vložek mohou být kotevní desky vyrobeny z méně mechanicky odolných materiálů, čímž se patřičně sníží finanční náklady na výrobu formy.

Opěrné desky slouží k podložení kotevních desek a zabraňují zamačkávání tvárníků a tvárnic do upínacích desek. Další částí formy jsou rozpěrné desky zajišťující patřičnou mezeru mezi upínací deskou a ostatními díly, čímž také zajišťují tepelnou izolaci mezi tvarovými částmi a upínacími deskami a vytváří prostor pro pohyb vyhazovacího systému. [12], [18], [34]

4.2 Násobnost formy

Násobnost formy udává počet tvarových dutin ve formě. Formy s jednou tvarovou dutinou se nazývají jednonásobné, pokud má forma dvě nebo více tvarových dutin jedná se o formy vícenásobné. Pro dosažení kvality a přesnosti výstřiku je žádoucí, aby násobnost formy byla co nejmenší. Vícenásobné formy jsou náročnější na výrobu, na přesnost tvarových dutin, vtokovou soustavu, a také na podmínky plnění všech dutin formy (stejná dráha toku, stejný vstřikovací tlak aj.). Jednonásobné formy jsou využívány převážně pro tvarově složité a velkorozměrové díly.

Optimální násobnost formy se posuzuje z hlediska charakteru a přesnosti výrobku, celkového množství výrobků a jejich termínu dodání, velikosti a kapacitě vstřikovacího stroje a ekonomiky výroby. [11], [17]

4.3 Vtokový systém

Vtokový systém je systém kanálů a ústí vtoku, který musí zabezpečit správné naplnění dutiny formy, bezproblémové vyhození vtoku z formy, jeho odtržení od výstřiku, a snadné začištění stopy po vtoku na stěně výstřiku.

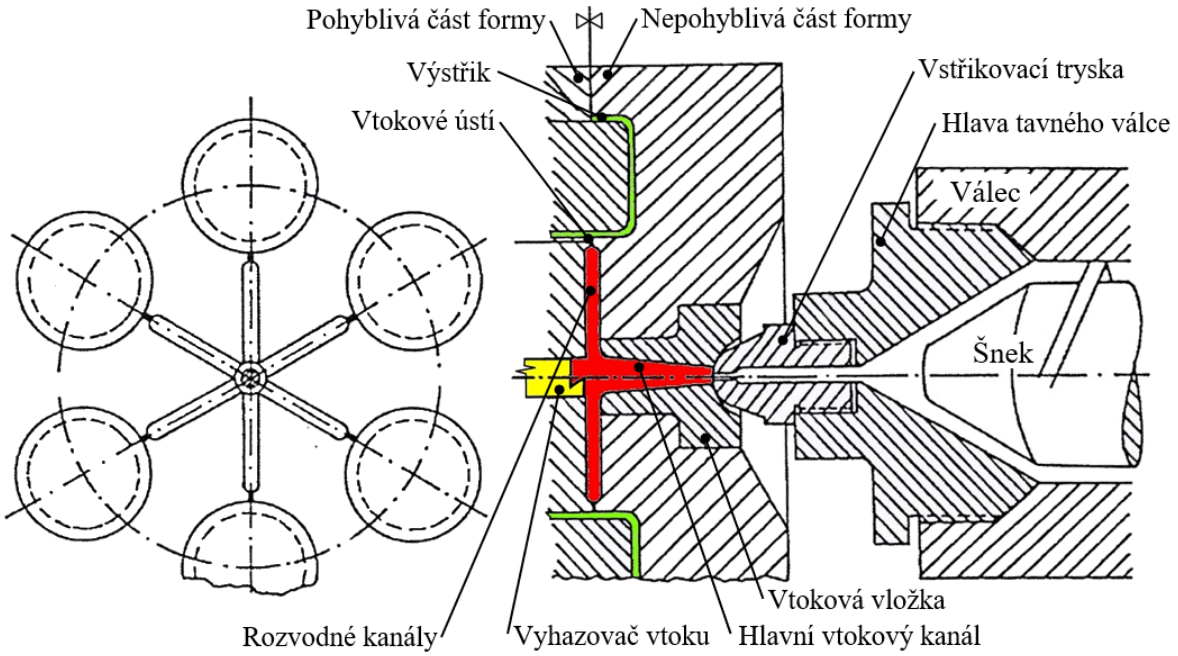
Vtokový systém je navrhován na základě počtu tvarových dutin, jejich rozmístění, konkrétním tvaru výstřiku a dle typu rozvodu, který může být zkonstruován jako horký nebo studený rozvod. Druh vtoku a jeho umístění má při vstřikování plastů vliv na proudění taveniny ve formě, a také na tvorbu vad (studených spojů, orientaci makromolekul, vzhled atd.). Vtok by měl být zkonstruovaný tak, aby tavenina naplnila formu co nejrychleji, nejkratší cestou s minimálními odpory, a pokud možno, aby zaplnění více tvarových dutin proběhlo současně a při stejných technologických podmínkách. [8], [12]

4.3.1 Studené vtokové systémy

Studené vtokové systémy (SVS) fungují tak, že při vstřikování taveniny plastu do studeného vtokového kanálu tavenina na jeho stěnách ihned začíná tuhnout a vytváří se izolační ztuhlá vrstva materiálu, díky čemuž tavenina může dále proudit horkým jádrem a zaplňovat dutinu formy. Při tuhnutí taveniny na stěně kanálu dochází také k prudkému zvyšování její viskozity, což vyžaduje v systému vysoké tlaky (40 až 200 MPa).

SVS je složen u vícenásobných forem z hlavního vtokového kanálu, rozváděcího kanálu a vtokového ústí (obr. 35, str. 44). Přes hlavní vtokový kanál, který bývá vyroben ve vtokové

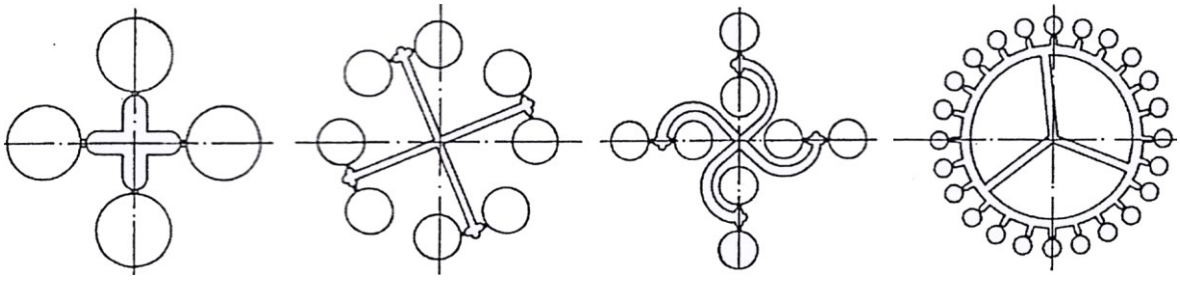
vložce je dopravována vstřikovaná tavenina z trysky vstřikovacího stroje, ta dále vstupuje do rozvodných kanálů a odtud pokračuje ústím vtoku do tvarové dutiny. Pro zachycení chladnějšího čela taveniny slouží komůrka u přidržovače vtoku nebo jímka. Hlavní kanál ve vtokové vložce může ústit i přímo do dutiny formy, čehož se využívá u jednonásobných forem.



Obr. 35: Schéma vícenásobné formy se studeným vtokovým systémem. (dle [12])

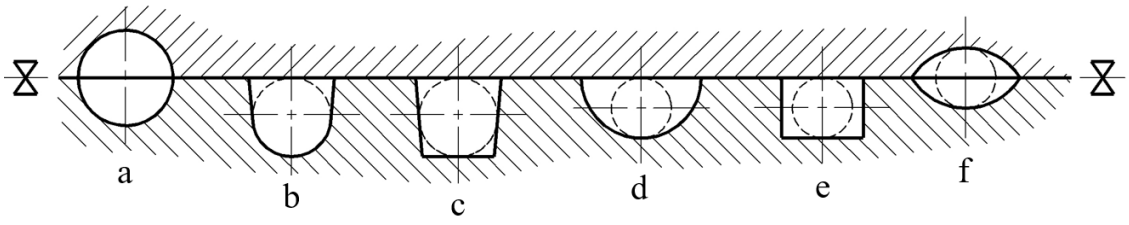
Celkové uspořádání SVS je dáno převážně konstrukcí formy a její násobností. Tvar a rozměry vtoku společně s polohou ústí vtoku ovlivňují rozměry, vzhled a vlastnosti výstřiku, spotřebu vstřikovaného materiálu, pracnost opracování a začištění výstřiku a také energetickou náročnost výroby.

U vícenásobných forem je snahou, aby SVS byl vybalancovaný, tzn. aby dráha toku byla ke všem tvarovým dutinám stejně dlouhá a v každé z nich byly vytvořeny stejné tlakové podmínky. Příklady vybalancovaných vtokových systémů jsou na obr. 36. [17], [37], [38]



Obr. 36: Vybalancované vtokové systémy (hvězdicové a kruhové uspořádání). [12]

Rozvodné kanály, jejich průřezy by měly být dimenzovány dostatečně velké, aby bylo umožněno působit dotlakem po maximálně možnou dobu. Kanály mají mít při minimálním povrchu co největší průřez, čímž se dosáhne minimálních ztrát ochlazováním. Konstrukce rozvodných kanálů je na obr. 37. Kruhový průřez je ideální pro vysokou účinnost a příznivé proudění taveniny, ale je náročnější na výrobu, protože kanály musí být vyrobeny v obou polovinách formy. Z výrobních důvodů se proto volí nekruhové kanály, které jsou pouze v jedné polovině formy. [12], [17]



Obr. 37: Průřezy rozvodných kanálů. (dle [17])
a, f – výrobně nevýhodné, b, c, d, e – výrobně výhodné.

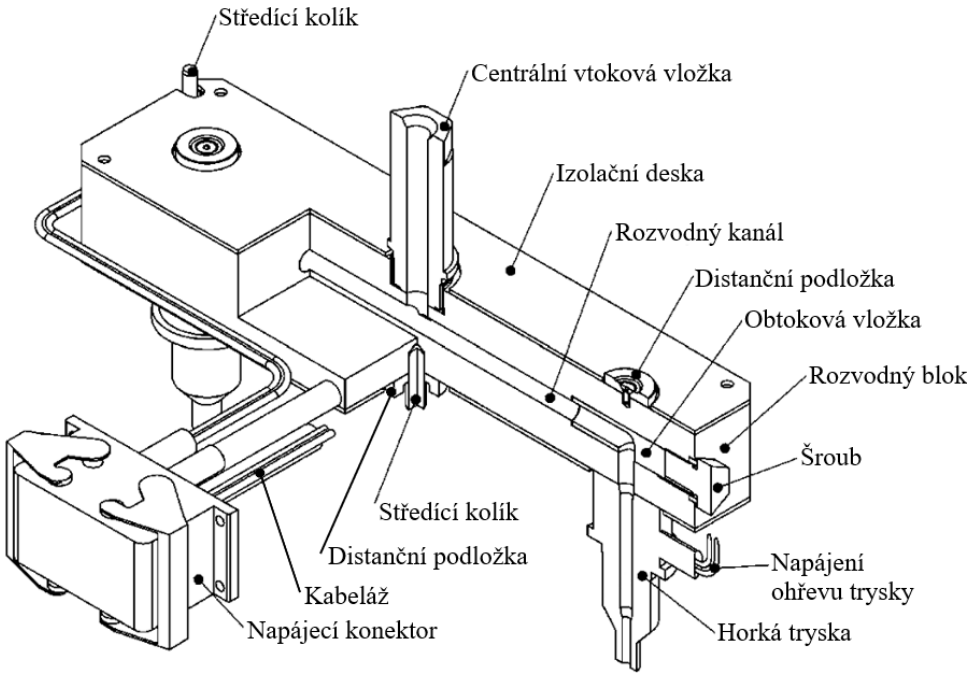
Ústí vtoku, jeho průřez, poloha a počet mají vliv na velikost pnutí a na vznik míst se sníženou pevností, především na studené spoje. Vtokové ústí se vytváří zúžením rozváděcího kanálu. Jeho účelem je zvýšit klesající teplotu taveniny před vstupem do tvarové dutiny, dále brání zpětnému pronikání materiálu do rozváděcího kanálu po fázi dotlaku a usnadňuje oddělení výstřiku od rozváděcích kanálů. [17], [36]

4.3.2 Vyhřívané vtokové systémy

Vyhřívaný vtokový systém (VVS) umožňuje po celou dobu vstřikovacího cyklu udržet vstřikovaný polymer v celé oblasti vtoku až do ústí formy v plastickém stavu, čímž odpadá tvorba vtokových zbytků. Vývin těchto systémů pokročil od jednodušších (zesílené vtoky, izolované vtokové soustavy aj.) až po dnes používané systémy s vyhřívanými tryskami.

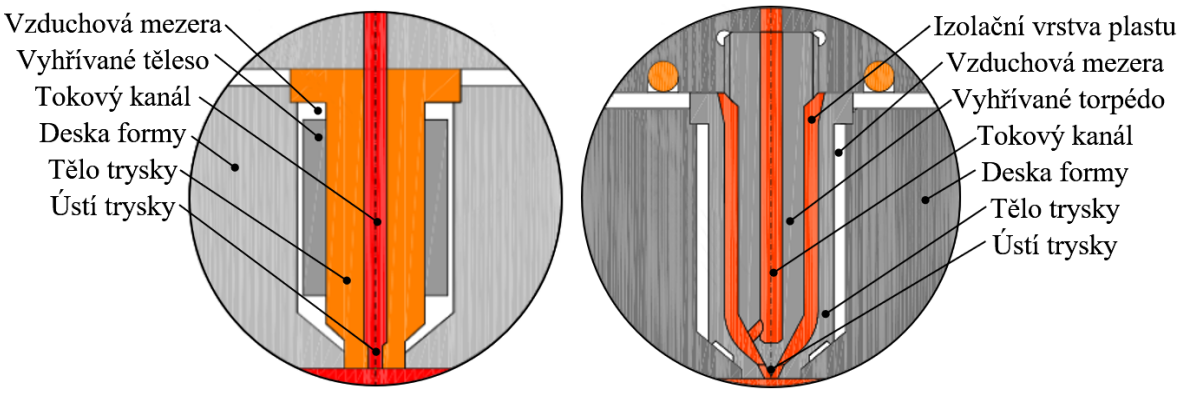
Hlavní výhodou VVS je, že se nevytváří vtokové zbytky a na výstřicích zůstává nepatrná stopa po vtoku, čímž odpadá potřeba dodatečných úprav (odstranění, začištění vtokového zbytku), a také se značně snižuje spotřeba vstřikovaného materiálu a náklady na dokončovací operace. Výrobní proces může být také automatizován a zkracuje se čas vstřikovacího cyklu. Nevýhodou VVS jsou vysoké pořizovací náklady, složitější konstrukce formy, větší nároky na obsluhu a vyšší energetická náročnost výroby. Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům jsou tyto systémy vhodné pro hromadnou a velkosériovou výrobu.

VVS se skládají z trysky, ústí trysky, rozvodného bloku, hlavního vtoku (centrální vtokové vložky) a kabeláže zajišťující vytápění celé soustavy (viz. obr. 38). Dále je zapotřebí pro řízení teploty taveniny systém doplnit snímači a regulátory teploty. [17], [18], [40]



Obr. 38: Schéma vyhřívaného rozvodného systému. (dle [13])

Tryska umožňuje propojení vstřikovacího stroje s dutinou formy. Trysky mohou být nepřímo vyhřívané nebo přímo vyhřívané. Nepřímo vyhřívané trysky jsou jednoduššího provedení, vytápění může probíhat miniaturním topným tělesem zabudovaným do ocelového pouzdra zasahujícího do vyústění vtoku, anebo přenosem tepla z vyhřívaného rozvodu vtoků na trysku. Přímo vyhřívané trysky jsou ohřívány pomocí elektrické kabeláže, a jejich vytápění může být vnější, kde tavenina proudí vnitřním otvorem tělesa trysky kolem, které je topení, anebo vnitřní, kde tavenina obtéká vyhřívací těleso (torpédo), (viz. obr. 39).



a) Tryska s vnějším vytápěním **b)** Tryska s vnitřním vytápěním

Obr. 39: Schéma vyhřívaných horkých trysek. (dle [41])

Ústí trysky do dutiny formy může být provedeno buď jedním vtokem, nebo více vtoky, u kterého nezůstává po vtoku výstupek na výstřiku, dále mohou být ústí uzavíratelné, která zanechávají po vtoku pouze nepatrné stopy. Tvar ústí trysky je buď bodový nebo otevřený.

Rozvodný blok je rozváděcí částí taveniny do tvarových dutin ve formě, je tepelně izolován od zbytku formy. Rovnoměrné vytápění je vytvořeno zpravidla zvenku elektrickým odporovým topením za pomocí měděných topných hadů nebo vnitřně vytápěnými topnými patronami. Používá se u vícenásobných forem, je umístěn mezi upínací a kotevní desku v pevné části formy. Bloky jsou vyrobeny v tvarech I, H, X, Y apod. [17], [38], [41]

4.4 Vyhazovací systém

Vyhazovací systémy forem zajišťují odformování (vyhození) výstřiku z dutiny nebo tvárníku otevřené formy. Krom výstřiků zajišťují také odformování vtokových zbytků. Vyhazovací zařízení plnící tyto funkce vykonává dva pohyby, a to dopředný pohyb při vyhazování výrobku a zpětný pohyb, při kterém se vrací vyhazovací zařízení do původní polohy.

Systémy vyhazování by měly být navrženy, tak aby nedocházelo při odformování k deformaci nebo poškození výstřiku. Správné funkce vyhazovacího systému se dosahuje vytvořením hladkého povrchu a úkosovitosti stěn na výstřiku ve směru vyhazování, z tohoto důvodu se povrch tvarových dutin formy brousí, leští případně lapuje nebo chromuje. Vyhazovací systém musí také zabezpečit dostatečnou sílu pro vyhození výstřiku, velikost síly se odvozuje od měrných tlaků mezi formou a výstřikem. V praxi se hodnota vyhazovací síly nezjišťuje, protože její velikost bývá značně předimenzovaná. [11], [16], [17]

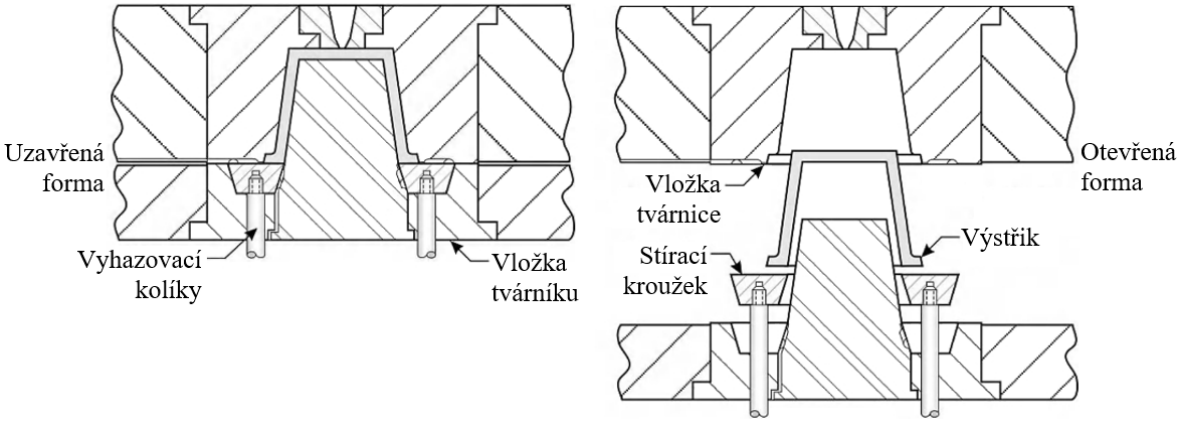
4.4.1 Mechanické vyhazování

Mechanické vyhazování se řadí mezi nejpoužívanější metodu vyhazování. Mechanické vyhazování výstřiku může být realizováno pomocí vyhazovacích kolíků, šikmých kolíků, trubkových vyhazovačů, stírací desky nebo systémem postupného vyhazování.

Vyhazování pomocí kolíků je nejběžnějším a zároveň nejlevnějším typem vyhazování. Lze je použít pro široký sortiment výstřiků, např. ploché, málo členité a nepříliš hluboké tvary. Kolíky by měly být skrze zanechávání stopy umístěny na nepohledovou stranu dílce, a také se opírat o stěnu nebo žebro výstřiku, tak aby nedocházelo k trvalým deformacím. Kolíky jsou obvykle válcového tvaru, uloženy v úzkých tolerancích (obr. 40, str. 48). [11], [39]

Obr. 40: Vyhazovací kolíky od firmy Meusburger. [46]

Stírací deska nebo kroužek slouží ke stahování výstřiku z tvárníku po celém jeho obvodu, tím vytváří velkou styčnou plochu a nezanechává po vyhazování stopy na výstřiku. Pohyb stírací desky bývá vyvozen přes vyhazovací desku, odpružený kolík, západky nebo pružiny. Použití nachází u tenkostěnných dílů náchylné k deformacím, nebo rozměrných dílů. Schéma funkce stírací desky je na obr. 41. [39]



Obr. 41: Schéma stírací desky (kroužku). (dle [26])

Trubkový vyhazovač je speciálním typem stírací desky. Skládá se z trubkové části a jádra, trubková část tlakem stírá výrobek a je upevněna ve vyhazovacích deskách, zatímco jádro je upevněno v upínací desce a nepohybuje se. Používá se u výstřiků s rozdílnou dělící rovinou.

Obr. 42: Trubkový vyhazovač od firmy Meusburger. [46]

4.4.2 Pneumatické vyhazování

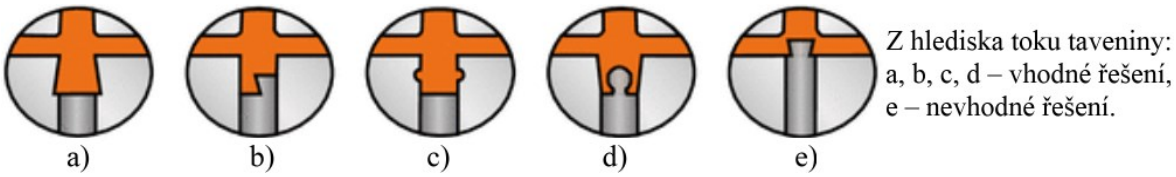
Při pneumatickém vyhazování se výstřik odformovává přiváděným stlačeným vzduchem mezi výstřik a líc formy. Vzduch je přiváděn přes talířový nebo jehlový ventil, případně přes zavzdušňovací kolík Výstřik je tak rovnoměrně odformován, není lokálně přetížen a nezůstávají na něm stopy po vyhazovačích. Používá se pro tenkostěnné výstřiky větších rozměrů ve tvaru nádob, např. kbelíky, kde by jiným způsobem vyhazování došlo ke vzniku deformací. [39]

4.4.3 Hydraulické vyhazování

Hydraulické vyhazování se používá k ovládání mechanických vyhazovačů. Hydraulická jednotka je vyráběna jako samostatný systém, vestavuje se do předchystaného místa ve vstřikovací formě, kde se obvykle používá pro ovládání bočních posuvných čelistí, ale také pro stírací desky apod. Jednotky jsou charakteristické pružným pohybem, flexibilitou, velkou vyhazovací silou a kratším a pomalejším zdvihem. [39]

4.4.4 Vyhazování vtokového zbytku

Bezpečné odformování vtokového zbytku se zajišťuje jeho přidržením na pohyblivé straně vstřikovací formy, odkud je následně po otevření formy vyhozen za pomocí stírací desky nebo vyhazovače. Přidržení vtokového zbytku na pohyblivé části formy se realizuje za pomocí různých druhů přidržovačů vtoku nebo vytvořeného podkosu. Aby nedocházelo k omezení toku taveniny doporučují se zapuštěné přidržovače, které zároveň vytváří komůrku pro zachycení studeného čela toku taveniny (viz. obr. 43). [39], [42]

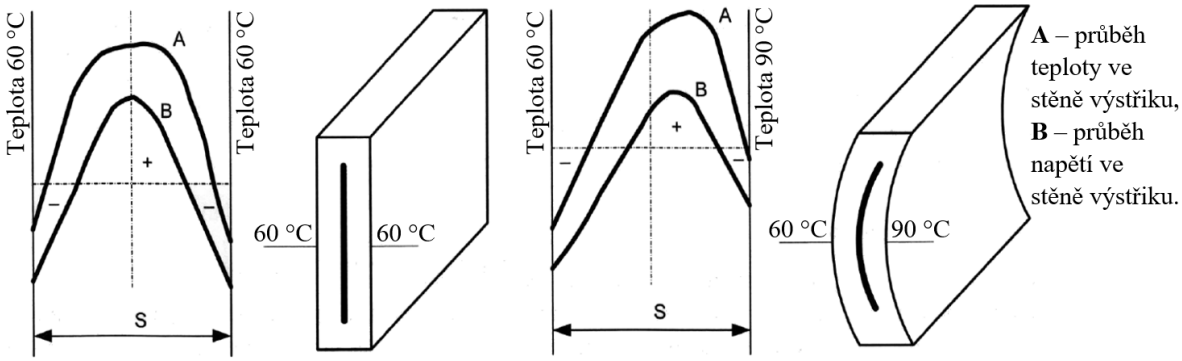


Obr. 43: Typy provedení přidržovačů vtoku. [42]

4.5 Temperační systém

Úkolem temperačního systému vstřikovací formy je ustavit dutinu vstřikovací formy na požadovanou teplotu v krátkém časovém okamžiku a tuto teplotu udržet v požadovaném tolerančním rozpětí. Temperace zahrnuje jak činnost odvodu tepla výstřiku na vyhazovací teplotu, tak ohřev dutiny formy na teplotu vhodnou pro vstříknutí zpracovávaného polymeru.

Dalším úkolem temperačního systému je zajistit rovnoměrné teplotní pole dutiny formy s ohledem na zpracovávaný materiál. Teplota i její časový průběh ovlivňuje chování taveniny, také smrštění výstřiku, jakost povrchu, mechanické vlastnosti výstřiku a celkovou dobu vstřikovacího cyklu, kde fáze chlazení zaujímá jeho převážnou část. Z ekonomického hlediska je žádoucí, aby ochlazování probíhalo co nejrychleji, ale z pohledu jakosti dílu by rychlost ochlazování měla být taková, aby zabránila rozměrovým a tvarovým změnám a také vadám výstřiku. Příklad vlivu rozdílu teplot při chlazení je ukázán na obr. 44 na str. 50. [4], [18], [36]



a) stejná teplota na stěnách formy, **b)** rozdílná teplota na stěnách formy.

Obr. 44: Průběh teploty a napětí ve stěně výstřiku při chlazení. [42]

Temperační systém bývá rozmístěn do dílčích okruhů, zpravidla do pevné a pohyblivé části formy.

Temperační kanály a jejich rozměry je nutno navrhnout vzhledem k celkové konstrukci formy, např. umístění vtokového a vyhazovacího systému a jiných dílů. Kanály by měly být také navrženy s ohledem na tuhost a pevnost formy. Zpravidla se volí větší počet menších kanálů než obráceně, protože intenzita odvodu tepla by se zvýšila minimálně. Kanály se kolem dutiny formy rozmísťují rovnoměrně a ve vzdálenostech přizpůsobených v závislosti na tvaru a tloušťce výrobku. Velikost průřezu kruhových kanálů se pohybuje v rozmezí od 6 mm do 20 mm a volí se na základě druhu zpracovávaného polymeru, velikosti výstřiku a velikosti formy. Rozdíl teplot temperační kapaliny na vstupu a na výstupu by měl být maximálně (3 až 5) °C. Při návrhu kanálů by neměly vznikat tzv. slepá místa, kde médium zateče a setrvává, což způsobuje usazování nečistot, vznik koroze aj. [16], [36], [43]

Regulace, utěsnění a připojení temperačního systému je další nedílnou součástí správné funkce celého zařízení. Regulace teploty temperačního média je řízena temperační jednotkou, která má vždy omezený počet cirkulačních okruhů, které může regulovat. Pro zamezení úniku médií (utěsnění) se používají různé druhy záslepek, o-kroužků a uzavíracích šroubů. K propojení temperačních kanálů formy s temperační jednotkou se používají hadice, které jsou připojeny k formě pomocí rychlospojek, nátrubků a přípojek. Toto příslušenství je na trhu dostupné jako standardizované díly (normálie). [32], [43]

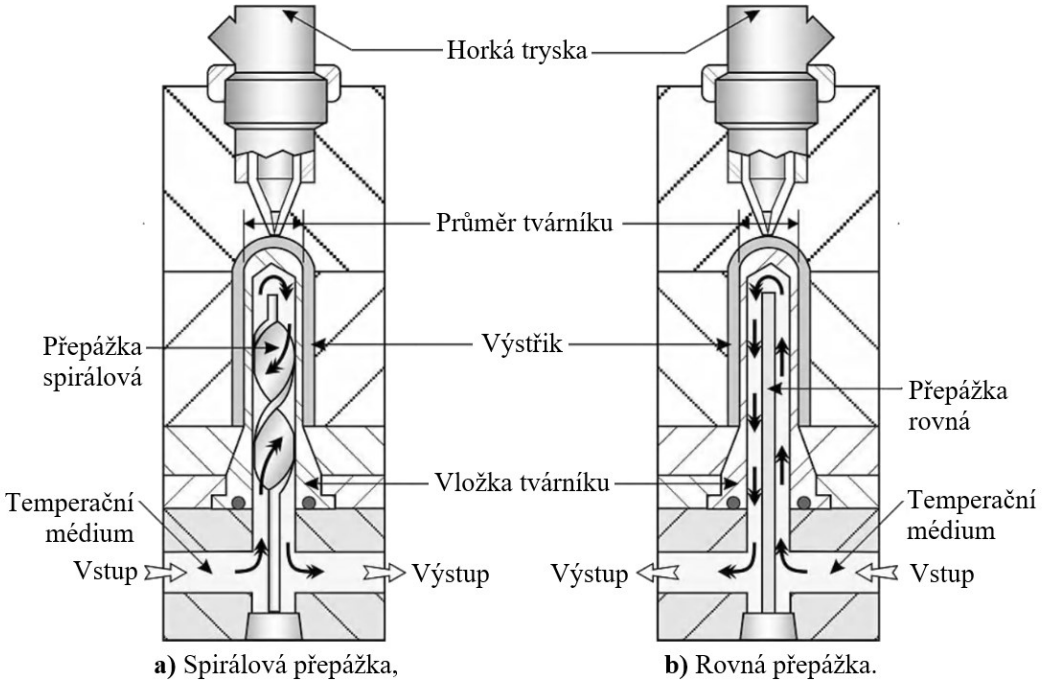
Temperování vstřikovací formy lze realizovat dvěma způsoby, a to aktivními nebo pasivními temperačními prostředky.

Aktivní temperační prostředky odvádí nebo přivádí teplo do formy za pomocí teplonosného média, které může tvořit voda, olej, glykol, vzduch nebo pára. Tato média proudí nuceným oběhem nejčastěji vrtanými kruhovými kanály ve formě. Kanály mohou

být i jiných tvarů vyrobené frézováním, ale je zapotřebí je po celé délce patřičně utěsnit, nebo do těchto otvorů mohou být uloženy např. topné elektrické články, které se používají převážně k temperaci forem s vyžadovanou vyšší teplotou, kdy ztráty tepla do okolí jsou větší než teplo dodané vstřikovaným polymerem. Nejčastěji jsou používané topné patrony a prstencová topná tělesa umožňující dodat v relativně malých objemech značné množství tepelné energie. [39], [43]

Pasivní temperační prostředky působí na formu fyzikálními vlastnostmi tepelně vodivých a izolačních materiálů. Tepelně izolační materiály jako je např. sklotextil se používají k redukci přestupu tepla z vysoce vyhřáté formy do upínacích desek vstřikovacího stroje. Tepelně vodivé materiály jako měď, hliník a jejich slitiny odvádějí nebo přivádějí teplo z obtížně temperovaných míst tvárníků, vtokových trysek apod. Účinným nástrojem jsou tzv. tepelné hubice využívající výparného tepla látky, která cirkuluje uvnitř hubice v důsledku teplotního spádu. [39], [43]

Temperace tvárníků především podlouhlých s malým průřezem lze realizovat pomocí temperačních přepážek, fontán a spirálových jader (viz. obr. 45). Ty umožňují vést temperační médium kolmo vzhledem k hlavnímu temperačnímu kanálu. Předpokladem správné funkce je přesné umístění přepážky, tak aby byla vystředěna v ose kanálu a docházelo ke stejným podmínkám toku a přenosu tepla na obou stranách přepážky. [18]



Obr. 45: Temperace tvárníku za pomocí temperačních přepážek. (dle [26])

5 SIMULACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

Počítačové simulace při zpracování polymerů umožňují konstruktérům a technologům zvážit jakýkoliv konstrukční nebo technologický návrh, aniž by vznikly náklady spojené s výrobou forem nebo s plýtváním materiálu při zkoušení přímo na stroji při výrobě. Odzkoušením nových návrhů nebo konceptů v simulačních softwarech dává příležitost detekovat a opravit problémy před zahájením samotné výroby a určit vhodné technologické podmínky pro vstřikovací proces s ohledem na kvalitu a vlastnosti finální součásti. [45]

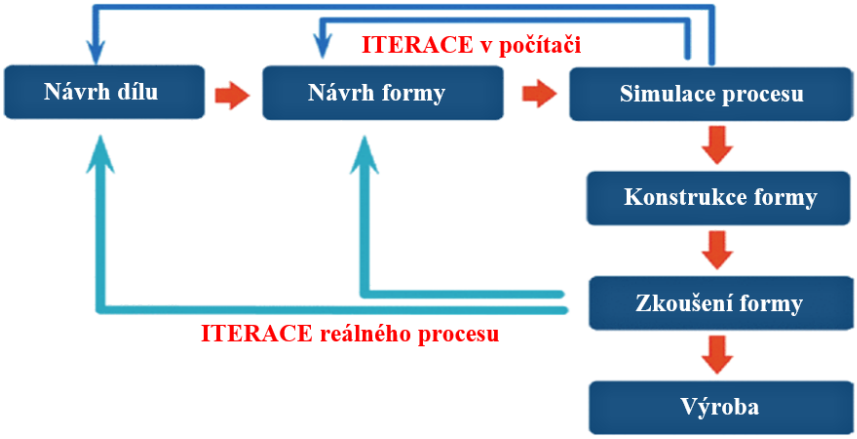
5.1 CAD/CAM/CAE systémy

CAD/CAM/CAE a další systémy jsou počítačové systémy, které patří do skupiny počítačem podporované výroby CIM. Aplikace těchto systémů umožňuje komplexní přístup konstruování při přípravě výroby výstřiku, kdy jeho výroba vyžaduje souhrn procesů od konstrukce dílu přes konstrukci formy, testování, simulační výpočty, korekci chyb, přizpůsobení výroby až po použití dat k samotné výrobě tvarových dílů a výstřiků (obr. 46).

CAD (*Computer Aided Design*) je počítačem podporované projektování. Jedná se o souhrn prostředků pro tvorbu geometrických modelů. Výsledkem tohoto systému jsou tedy modely, výkresy, sestavy, tzn. CAD data, která jsou potřebná pro další práci s CA systémy.

CAM (*Computer Aided Manufacturing*) je počítačem podporovaná výroba. Jedná se o systém připravující data a programy pro řízení číslicových strojů zajišťující automatizovanou výrobu součásti.

CAE (*Computer Aided Engineering*) je počítačem řízené inženýrství, systém zabývající se analýzou geometrických dat získaných v CAD návrhu. Umožnuje simulovat a zkoumat navržený objekt v pracovních podmínkách s možností následné eliminace chyb. [14], [44]



Obr. 46: Nové koncepty vývoje vstřikovacího procesu. (dle [10])

5.2 Autodesk Moldflow Synergy

Autodesk Moldflow Synergy je (CAE) simulační software pro vstřikování plastů, který pomáhá svými nástroji a funkcemi predikovat, vyhodnotit a optimalizovat technologický design plastových dílů a vstřikovacích forem. Software nabízí zpracování analýz optimální polohy vtoku, plnění a dotlaku, temperačního systému a analýzu smrštění a deformace, případně jiné. Součástí softwaru je také materiálová databáze, databáze vstřikovacích strojů, temperačních médií atd. Analýzy poskytují výsledky jako je např. čas plnění, smykové namáhání taveniny, teplota formy nebo temperačního média, celkové deformace dílu, místa s potencí vzniku studených spojů nebo vzduchových kapes a další. Poskytnutím široké škály výsledků z analýz lze předcházet chybám v konstrukci formy a výrobním procesu vstřikování, což vede ke snížení výrobních a provozních nákladů.

Software poskytuje generování a editaci sítě konečných prvků a množství řešičů. V softwaru jsou používány tři typy sítí, a to střednicová síť (Midplane), 2,5D síť (Dualdomain) nebo objemová 3D síť (Tetrahedral). Použitý typ sítě a její hustota výrazně ovlivňují přesnost výpočtu analýzy. S vyšší hustotou sítě roste přesnost výsledku, ale také náročnost na výpočetní techniku a čas, proto je dobré zvolit optimální síť s ohledem na přesnost a čas výpočtu. V místech, kde je kladen požadavek na vyšší přesnost výsledků lze provést lokální zhuštění sítě. [47]

V simulacích, kde jsou dobře nadefinované vlastnosti materiálu, spolu se správnou geometrií a podmínkami zpracování je přesnost výsledků poměrně vysoká. Příklad lze pozorovat na obr. 47, kde při porovnání experimentálního a predikovaného výsledku z analýzy plnění není téměř žádný rozdíl. [45]

a) Výsledek analýzy – nedostříknutý výstřik, plnění 92 %,

b) Výsledek experimentu – nedostříknutý výstřik, plnění 92 %.

Obr. 47: Výsledek analýzy a experimentu vstřikování držáku na nápoje. [45]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

Pro tuto diplomovou práci byly ustanoveny následující cíle:

- Vypracování literární studie pro dané téma.
- Provedení 3D konstrukce modelu vstřikované součásti.
- Navržení 3D konstrukce vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobitelnost.
- Navržení optimalizace vstřikování a provedení analýzy.
- Nakreslení 2D řezu vstřikovací formy spolu s výkresy a kusovníkem.

Literární studie uvádí základní poznatky týkající se polymerních materiálů, procesu vstřikování, vstřikovacích strojů, dále vstřikovacích forem a jejich konstrukcí a simulací procesu vstřikování.

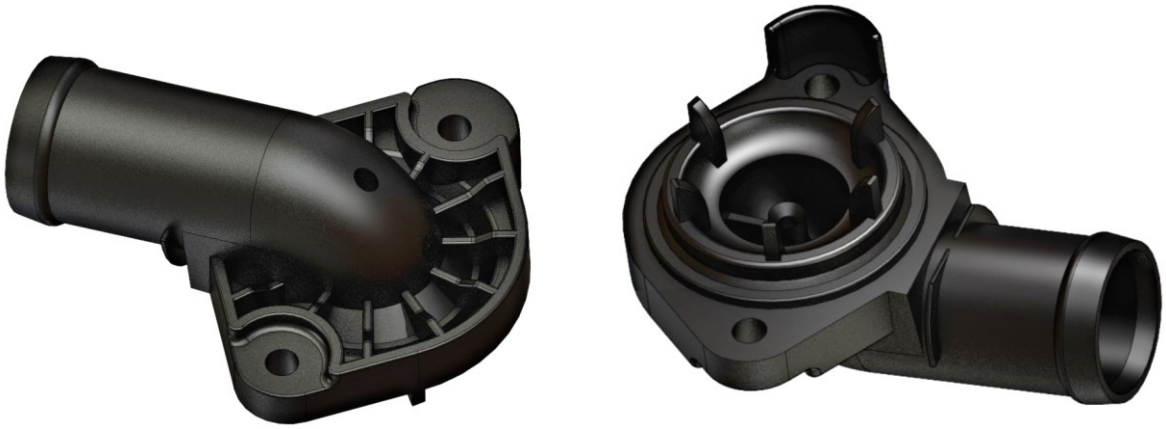
Praktická část diplomové práce se zabývá konstrukcí 3D modelu zadaného reálného plastového dílu, kterým je příruba chladiva. Na základě 3D modelu příruby chladiva, zvoleného typu materiálu a násobnosti formy je navržen 3D model vstřikovací formy složený převážně z normalizovaných dílů od firem Meusburger, Hasco, Svoboda a Thermoplay. Konstrukce formy je provedena za pomocí programu SolidWorks 2020, v kterém je taktéž vytvořena 2D výkresová dokumentace. Za pomocí programu Autodesk Simulation Moldflow 2016 je simulován proces vstřikování pro dva typy materiálů s variací dvou vtokových systémů a temperačních systémů. Na základě výsledků je vybrána z hlediska procesu vstřikování nejvhodnější varianta, dle které je dokončen finální 3D model vstřikovací formy.

7 VSTŘIKOVANÝ DÍL

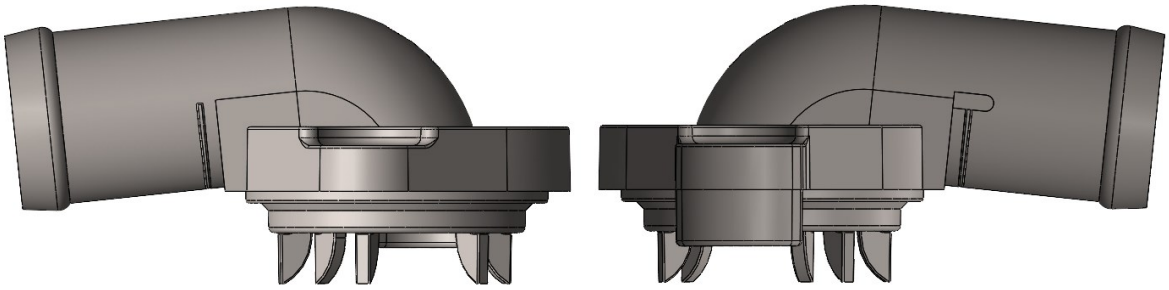
Vstřikovaným dílem je příruba chladiva, která se nachází v motorové části automobilu. V přírubě chladiva je při montáži usazen termostat, který řídí a reguluje teplotu temperačního média v motoru automobilu. Pracovní teplota motoru se pohybuje okolo (90–95) °C, tato teplota se pohybuje i na vnitřní straně příruby chladiva, a proto je velmi důležité vhodně zvolit materiál, který tuto teplotu zvládne přenést. Materiál by měl odolávat nejen vysokým teplotám, ale také rozpouštědlům a olejům.

Příruba chladiva je poměrně tvarově složitý díl. Jelikož se díl nachází v motorové části, jedná se o nepohledový díl, ale díl, který musí být mechanicky, chemicky a tepelně odolný. Díl by tedy neměl obsahovat vady, které by mohly způsobit kolizi při jeho používání.

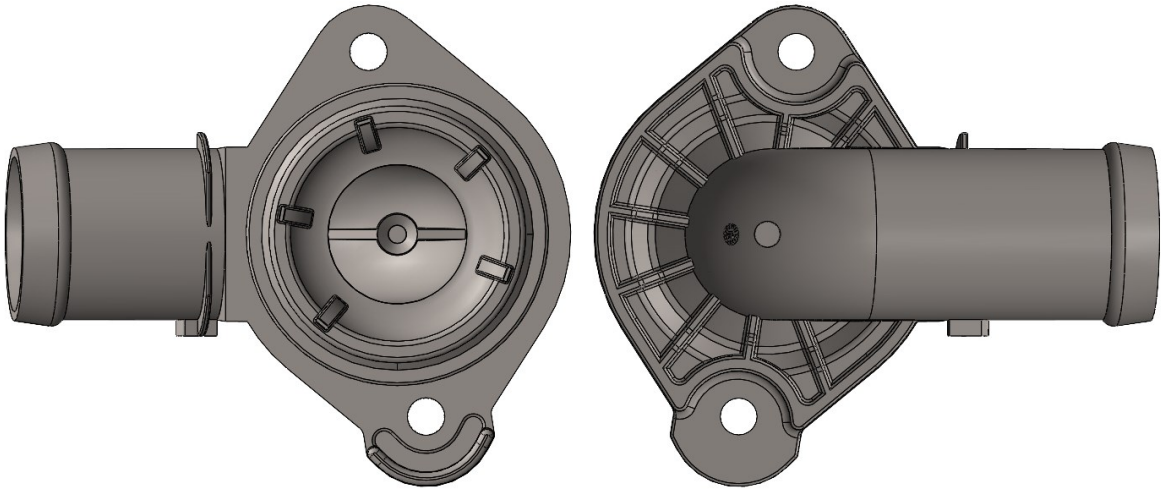
Konstrukce dílu byla provedena na základě reálného výrobku za pomocí softwaru SolidWorks 2020. Model dílu je znázorněn na obr. 48, kde byla zachována i reálná barva dílu, dále bude díl vyobrazen pro lepší viditelnost v barvě šedé (viz. obr. 49 a obr. 50, str. 57). Díl obsahuje dva otvory pro přívod a odvod kapaliny, dva otvory pro uchycení na bloku motoru, žebrování, části pro vystředění a uložení termostatu a osazené zakončení sloužící pro napojení hadice. Nominální tloušťka dílu získaná na základě softwaru Autodesk Moldflow je 5,5 mm, jeho základní rozměry jsou (107 x 91 x 52) mm a objem je 58,6 cm^3.



Obr. 48: 3D model výrobku – reálné vyobrazení (render).



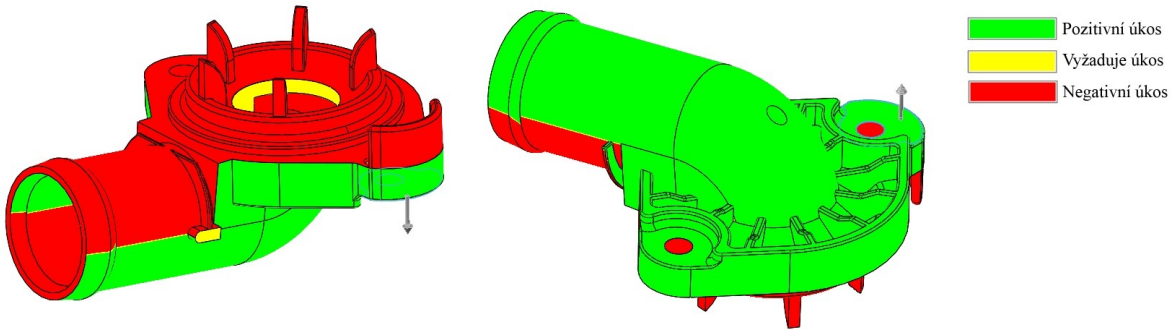
Obr. 49: 3D model výrobku – boční pohledy.



Obr. 50: 3D model výrobku – spodní a horní pohled.

7.1 Analýza úkosu

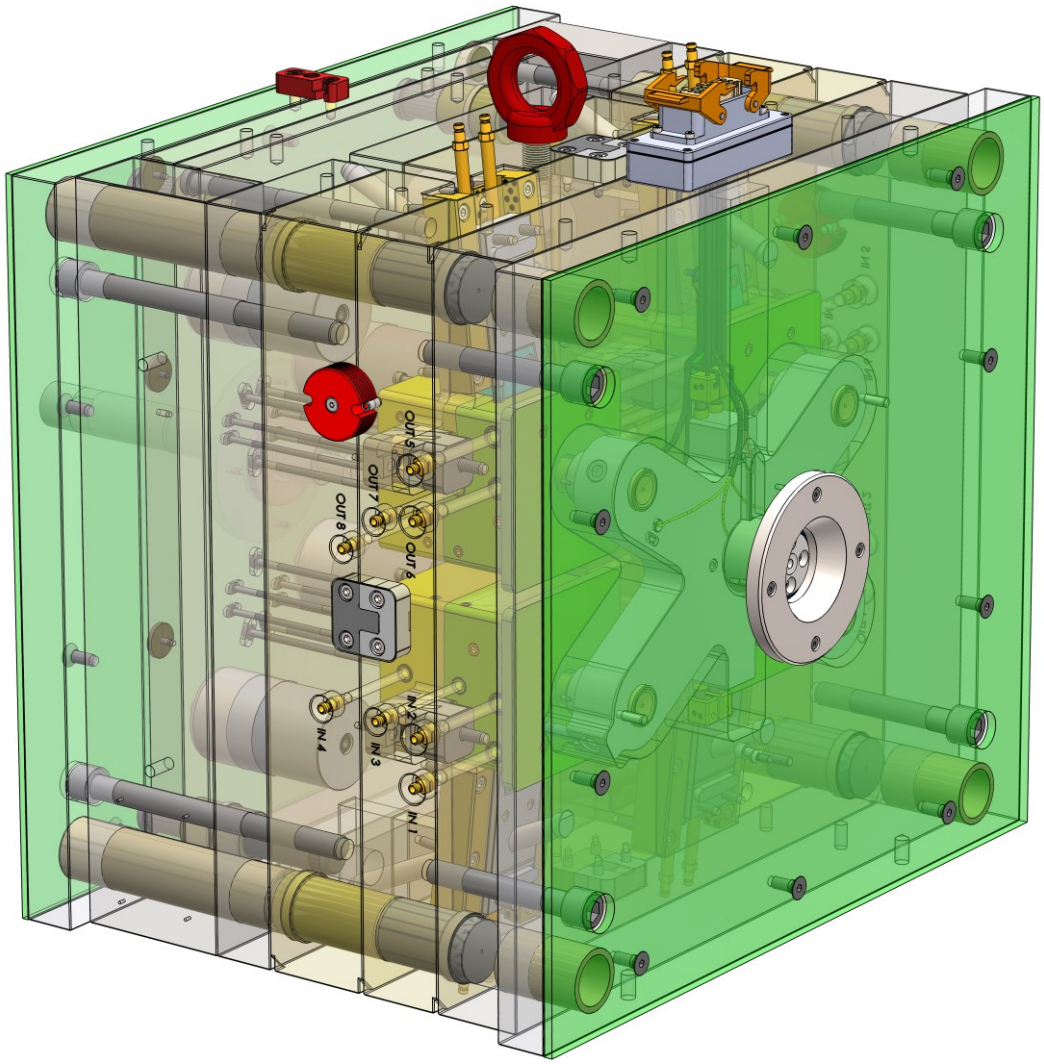
Pomocí funkce analýzy úkosu v softwaru SolidWorks byl výrobek upraven tak, aby měly stěny úkos minimálně 0,5°, které umožní snadnější odformování výrobku. Jak lze vidět na obr. 51, zelenou barvou jsou části s pozitivním úkosem, červenou barvou jsou části s opačným úkosem a žlutou barvou jsou části vyžadující úkos, ale vzhledem ke geometrii dané části nebo k poloze zaformování nebyly zde úkosy vytvořeny.



Obr. 51: Analýza úkosu 3D modelu výrobku.

8 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

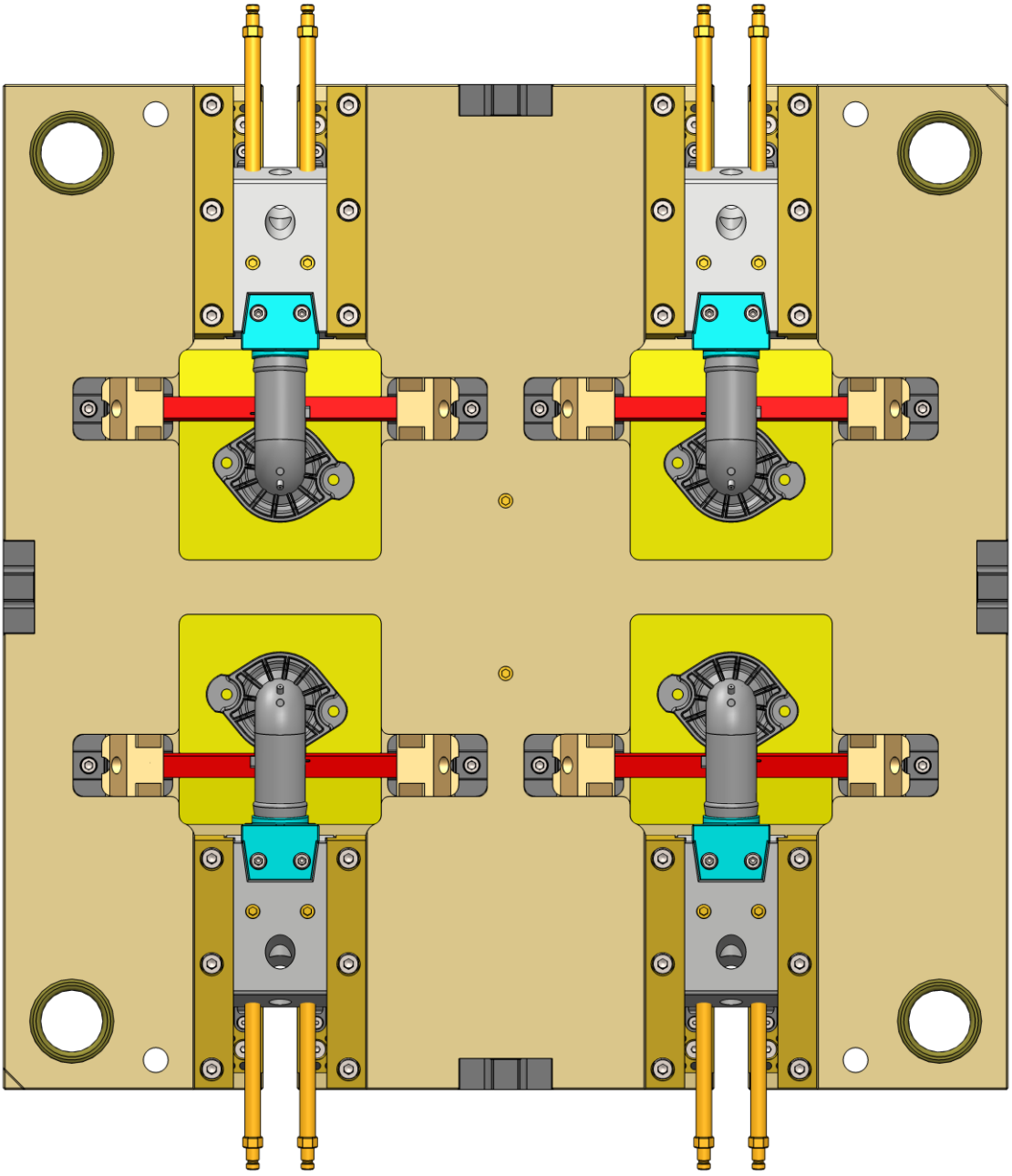
Vstřikovací forma byla navržena s ohledem na velikost a složitost výstřiku, násobnost, odformovatelnost a ekonomičnost. Pro dosažení vysokých sérií, které se u vyráběných automobilových dílů vyskytují, byla vstřikovací forma navržena jako čtyřnásobná s horkým vtokovým systémem. Vstřikovací forma je složena z normalizovaného rámu od firmy Meusburger o velikosti (646 x 646 x 551) mm s velikostí upínacích desek (646 x 696) mm. Pro snížení pořizovacích a výrobních nákladů formy byly použity především normalizované díly od firmy Meusburger.



Obr. 52: Zkonstruovaná vstřikovací forma.

8.1 Násobnost formy

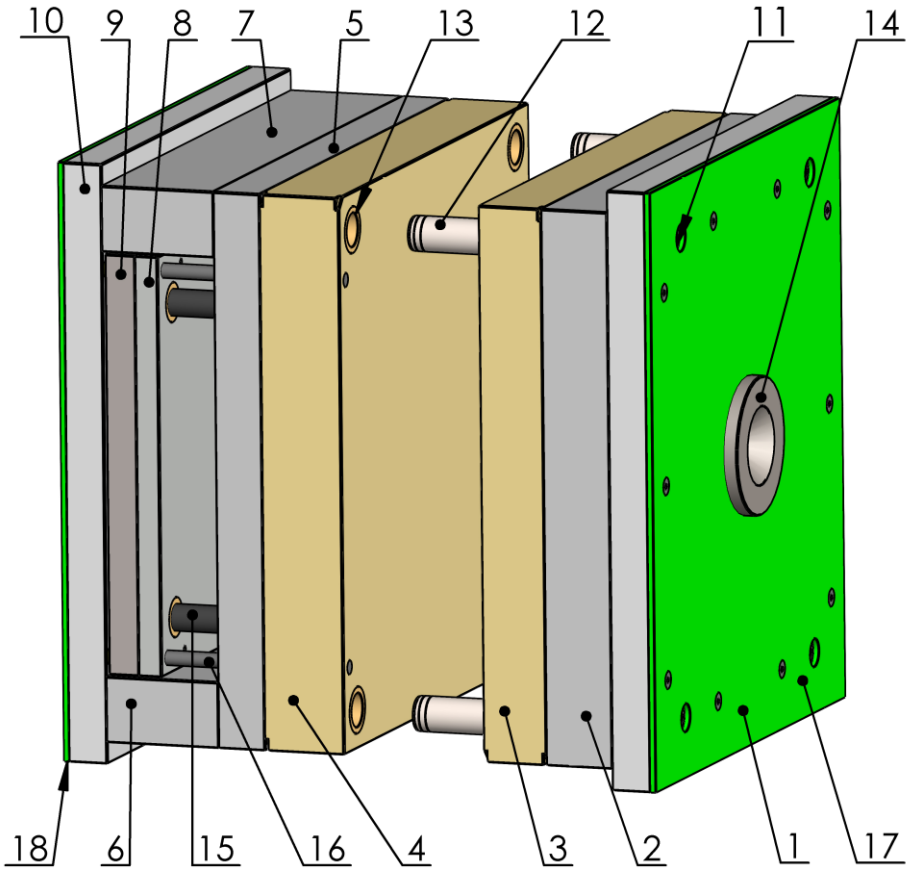
K násobnosti formy je nutno přistupovat s ohledem na kvalitu a přesnost vyráběných dílů, množství vyráběných dílů a na celkovou ekonomiku výroby. Pro dosažení vyšší kvality výstřiků je nutno volit násobnost nižší, a naopak pro dosažení vysoké ekonomičnosti volit násobnost co nejvyšší. Konstrukce této formy byla zvolena jako čtyřnásobná. Na základě násobnosti a místa potřebného pro zakomponování tvarových a posuvných částí byl zvolen vhodný rám vstřikovací formy. Příklad rozvržení tvarových a posuvných částí je znázorněn na obr. 53.



Obr. 53: Rozvržení tvarových dutin a posuvných systémů ve formě.

8.2 Rám formy

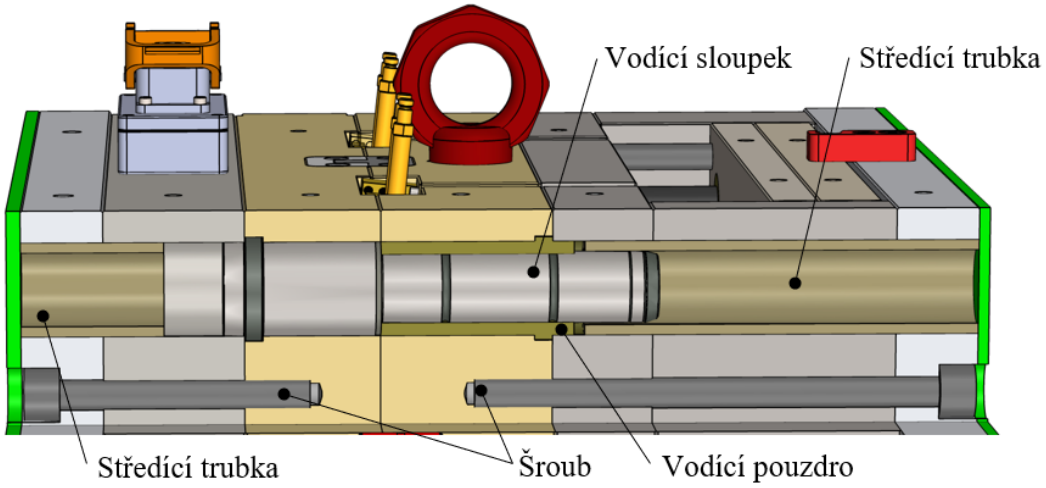
Rám formy je celek tvořený deskami, spojovacími prvky, vodícími a středícími částmi. Jsou v něm uloženy tvarové části formy, vtokový, temperační a vyhazovací systém. Rám se dělí na pevnou část (strana tvárnice) a pohyblivou část (strana tvárníku), kde se nachází i vyhazovací systém formy. Desky rámu jsou dodávány z materiálu 1.1730. Rám je tepelně odizolován pomocí izolačních desek ze sklotextilu. Navržený rám je znázorněn na obr. 54.



Obr. 54: Rám vstřikovací formy od firmy Meusburger.

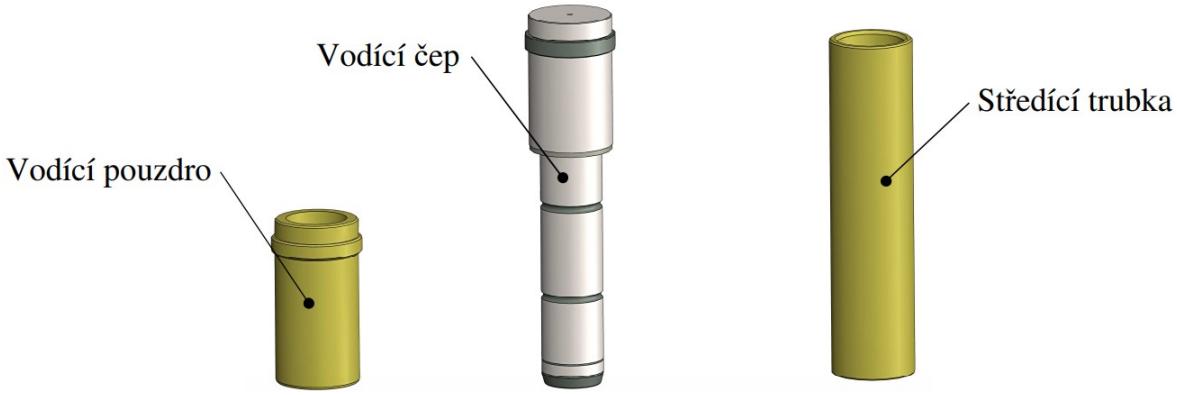
1, 10 – upínací desky, 2 – deska pro horký rozvod, 3, 4 – kotevní desky, 5 – opěrná deska, 6, 7 – rozpěrky, 8 – vyhazovací deska kotevní, 9 – vyhazovací deska opěrná, 11 – šroub, 12 – vodící sloupek, 13 – vodící pouzdro, 14 – středící kroužek, 15 – vodící čep, 16 – vracecí kolík, 17, 18 – izolační desky.

Desky rámu jsou vzájemně spojeny pomocí imbusových šroubů E1200. Správnou vzájemnou polohu mezi upínacími deskami, rozpěrkami a pomocnou deskou pro horký vtokový systém zajišťuje osm středících trubek s označením E1160 (viz. obr. 55, str. 61).

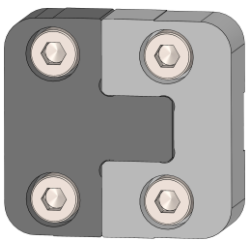


Obr. 55: Středící a spojovací prvky vstřikovací formy.

Hrubé vystředění a navedení do správné polohy při otevírání a uzavírání formy zabezpečují vodící sloupky vzájemně s vodícími pouzdry (obr. 56). Pro bezúdržbový provoz byla tato pouzdra zvolena z mosazi obsahující grafit, které mají samomazný účinek. Pro přesné vedení obou polovin formy byly použity čtyři středící zámky, které jsou uloženy po 90° na vnější straně formy (obr. 57).



Obr. 56: Vodící a středící prvky od firmy Meusburger.

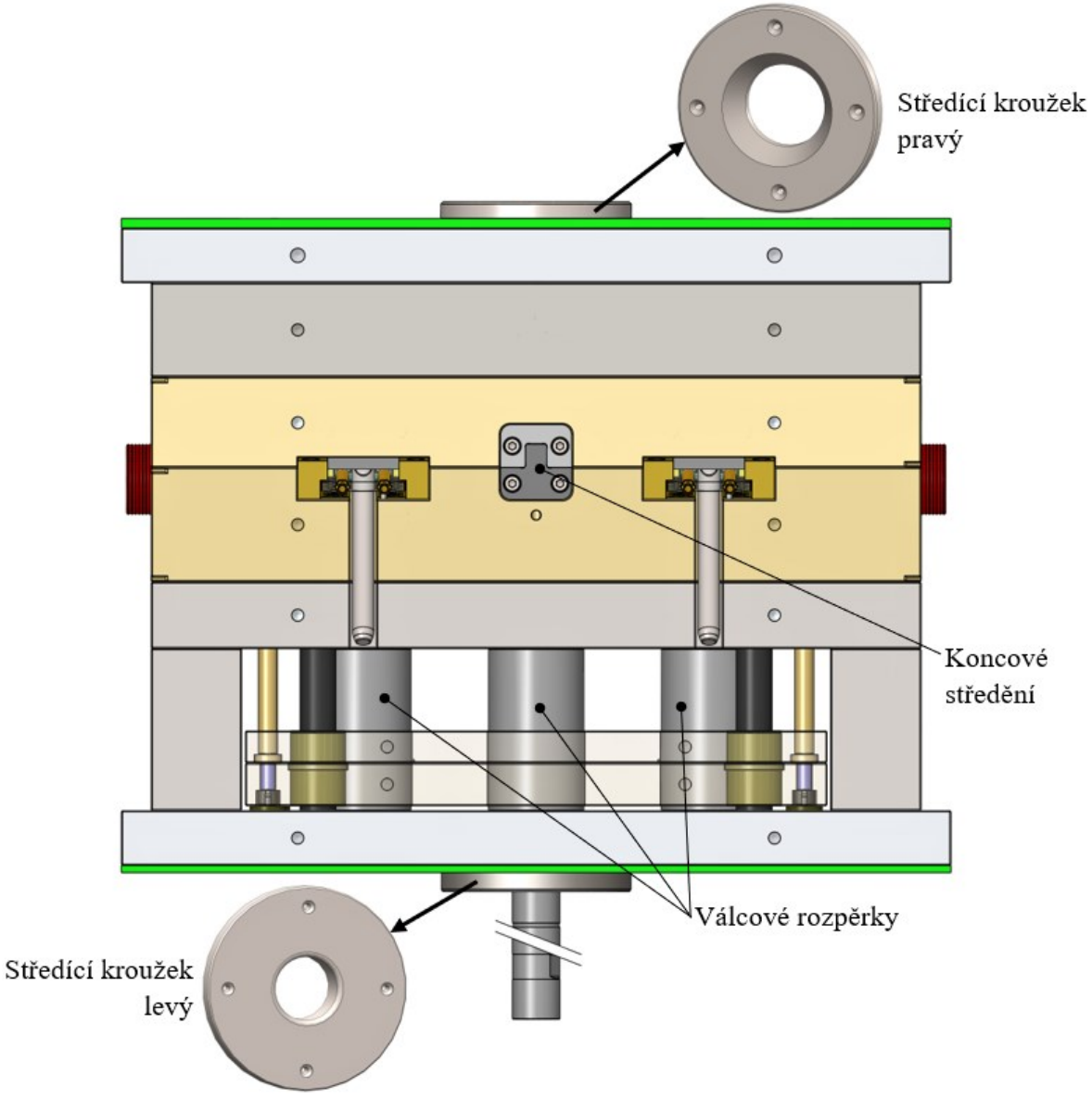


Obr. 57: Koncové středění Meusburger E1308.

Zajištění přesné polohy vstřikovací formy na vstřikovacím stroji je řešeno pomocí dvou středících kroužků o průměru 160 mm (viz. obr. 58 str. 62). Průměr středícího kroužku byl

zvolen na základě otvoru v upínacích deskách zvoleného stroje od firmy Arburg, viz. kapitola 9.2 na str. 79.

Navržený rám je doplněn o šest válcových rozpěrek pro zamezení průhybu desek. Průhyb desek je vyvolán vstřikovacím tlakem působícím na tvarové části. Pokud by hodnota průhybu vzrostla nad hodnotu zatékavosti polymeru, došlo by ke vzniku nežádoucích přetoků.

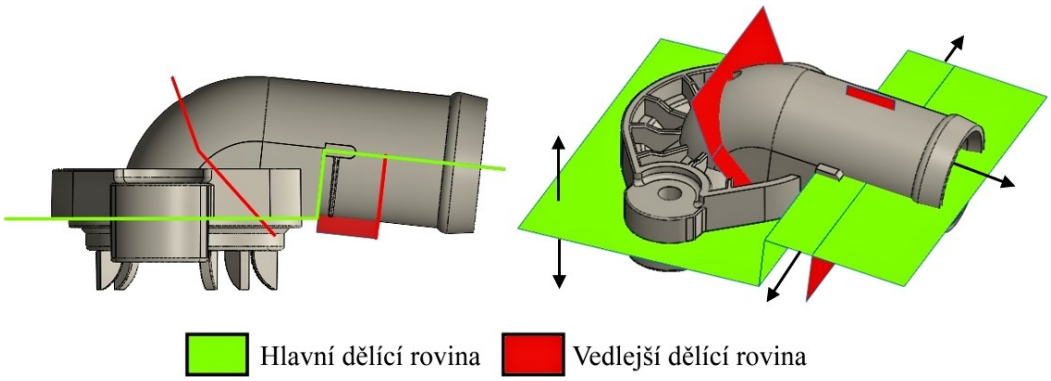


Obr. 58: Středící kroužky od firmy Meusburger.

8.3 Zaformování výrobku

Zaformování výrobku bylo provedeno za účelem vytvoření tvarových dutin formy, které odpovídají tvaru negativu vstřikovaného dílu před smrštěním. Tvarové části vstřikovací

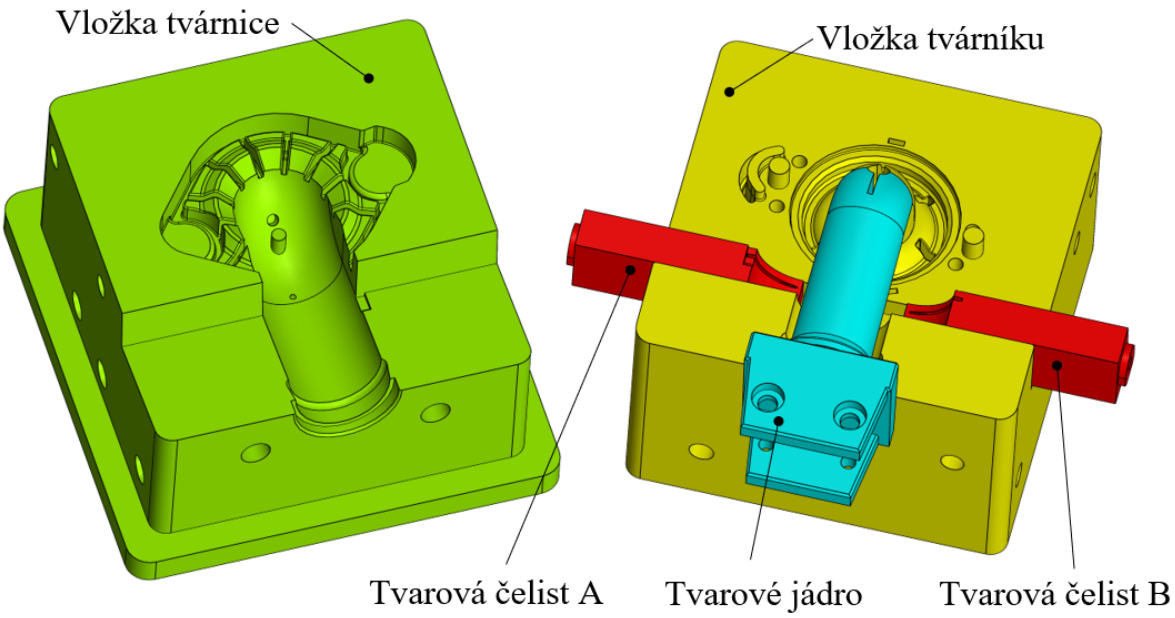
formy tvoří tvárník a tvárnice. Na přechodu tvarových ploch z dutiny tvárnice do dutiny tvárníku je hlavní dělící rovina. Dělící rovina by měla být geometricky jednoduchá a zvolena tak, aby výrobek šel snáze odformovat. V tomto případě byl výrobek zaformován pomocí jedné hlavní dělící roviny a tří vedlejších dělících rovin pro odformování vnitřního otvoru a dvou osazení pro uchycení (viz. obr. 59).



Obr. 59: Návrh dělících rovin pro tvorbu tvarových částí.

8.4 Tvarové části

Tvarové části vstřikovací formy, které udávají výsledný tvar výrobku, byly vytvořeny na základě výrobku zvětšeného o hodnotu smrštění zvoleného materiálu, vytvořených dělících rovin a dalších funkcí v softwaru SolidWorks na ořezání a odečtení objemu dílu z povrchu. Takto byly získány dvě tvarové vložky (tvárník, tvárnice), tvarové jádro a dvě tvarové čelisti.

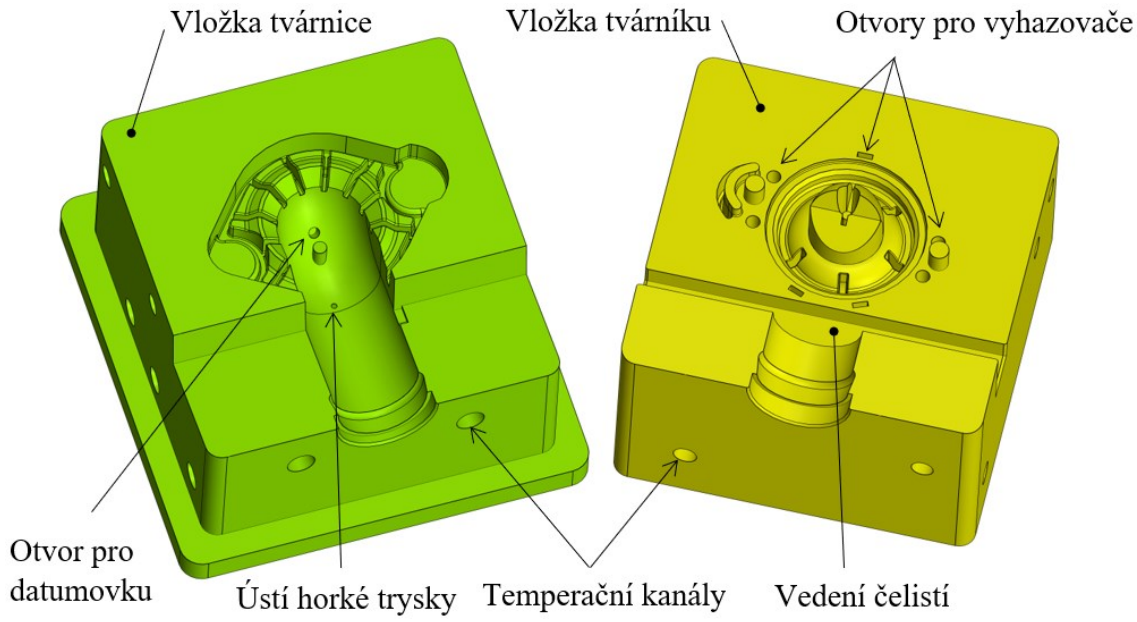


Obr. 60: Sestava tvarových částí.

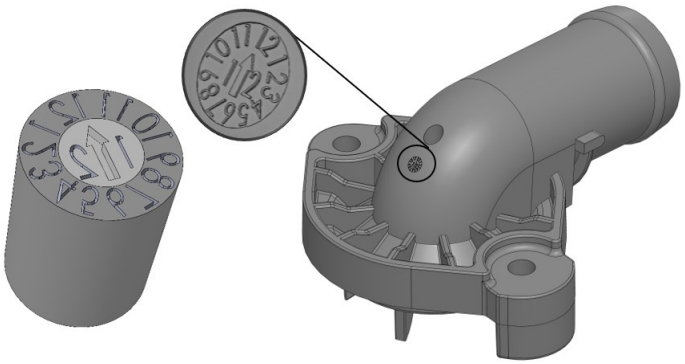
8.4.1 Tvárník a tvárnice

Tvarové vložky tvárníku a tvárnice (viz. obr. 61) byly navrženy z materiálu 1.2343 s chemicko-tepelnou úpravou na tvrdost 52 HRC tak, aby byly odolné vůči chemickému a mechanickému namáhání, především abrazivnímu namáhání způsobené plněnými materiály. Výhodou tvarových vložek je, že kotevní deska, v níž jsou tvarové vložky uloženy, může být vyrobena z méně mechanicky odolných materiálů. Zároveň při poškození nebo nadměrném opotřebení jsou vyměňovány pouze tvarové vložky nikoliv celá tvarová deska.

Vložky tvárníku i tvárnice jsou opatřeny vrtanými kruhovými otvory pro cirkulaci temperačního média. Ve tvárnici je dále vyroben otvor pro umístění datumové vložky, která slouží pro vytvoření popisu na výrobku (viz. obr. 62). Jedná se o datumovou vložku nesoucí popis roku a měsíce. Pro vedení vyhazovačů jsou v tvárníku otvory a také drážka pro vedení posuvných čelistí.



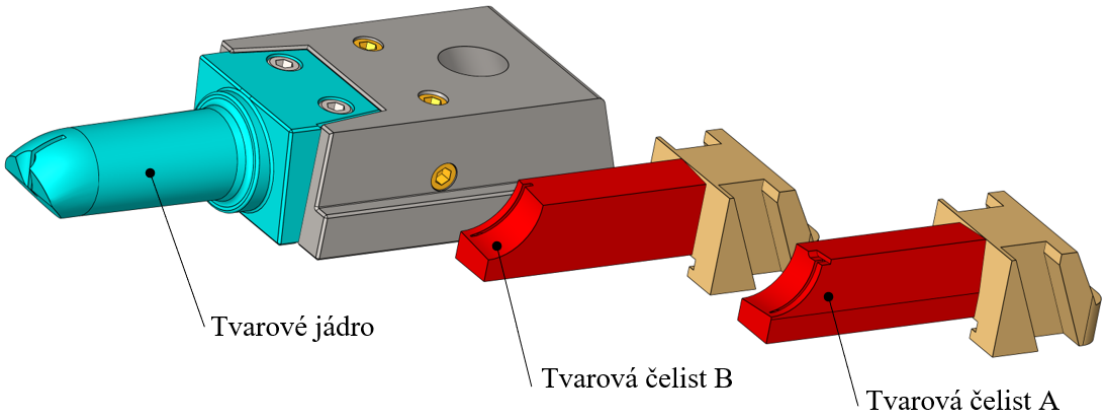
Obr. 61: Tvarové vložky tvárnice a tvárníku.



Obr. 62: Datumovka Meusburger E2420 a popis na výrobku.

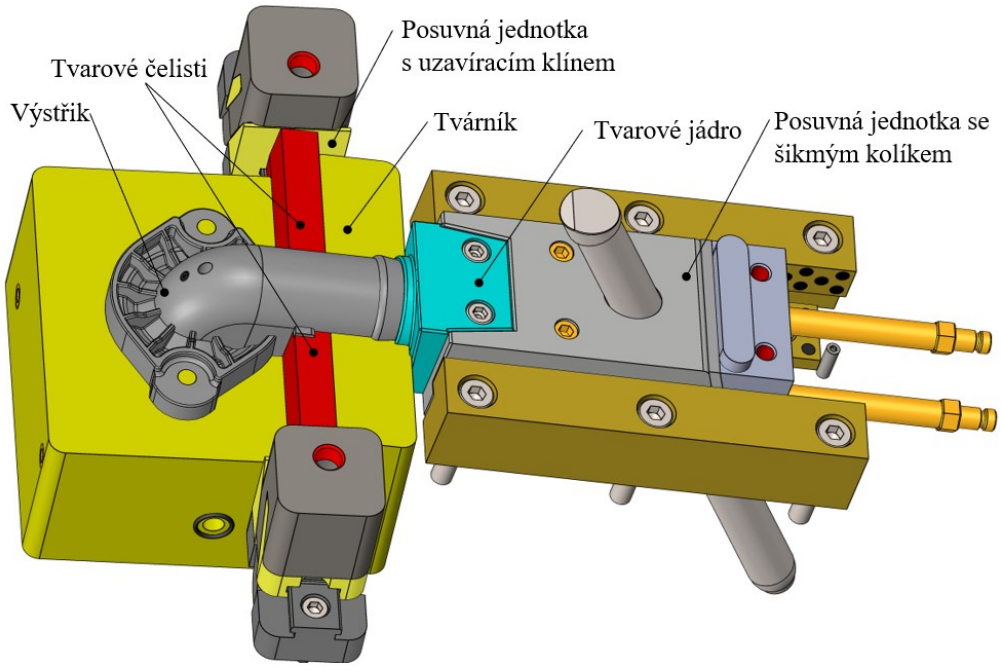
8.4.2 Posuvná tvarová jádra a tvarové čelisti

Pro výrobu vnitřního otvoru a dvou výstupků byla navržena posuvná tvarová jádra a čelisti (obr. 63). Pro odformování jsou tyto tvarové části ovládány mechanickým pohybem, který je na rozdíl od pohybů vyvozených pneumaticky, případně hydraulicky nejlevnějším způsobem provozu. Systémy vyvozující pohyb jsou voleny od firmy Meusburger.



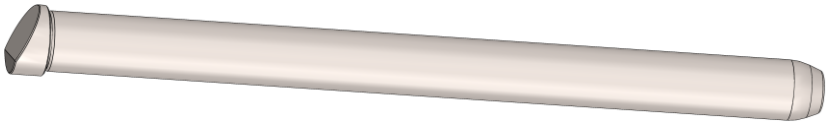
Obr. 63: Tvarové jádro a tvarové čelisti s posuvnými částmi.

Tvarové jádro je ovládáno systémem posuvné čelisti (šíbru) se šikmým válcovým kolíkem (viz. obr. 64). Jádro je vyrobeno jako samostatná součást, která je pomocí šroubů upevněna k posuvné čelisti. Pohyb čelisti (jádra) je odvozen při otevírání a zavírání formy, kdy dochází za pomocí kolíku k axiálnímu pohybu čelisti uložené v samomazných vodících lištách. Zdvih čelisti je závislý na délce kolíku, sklonu kolíku a sklonu vodící plochy.



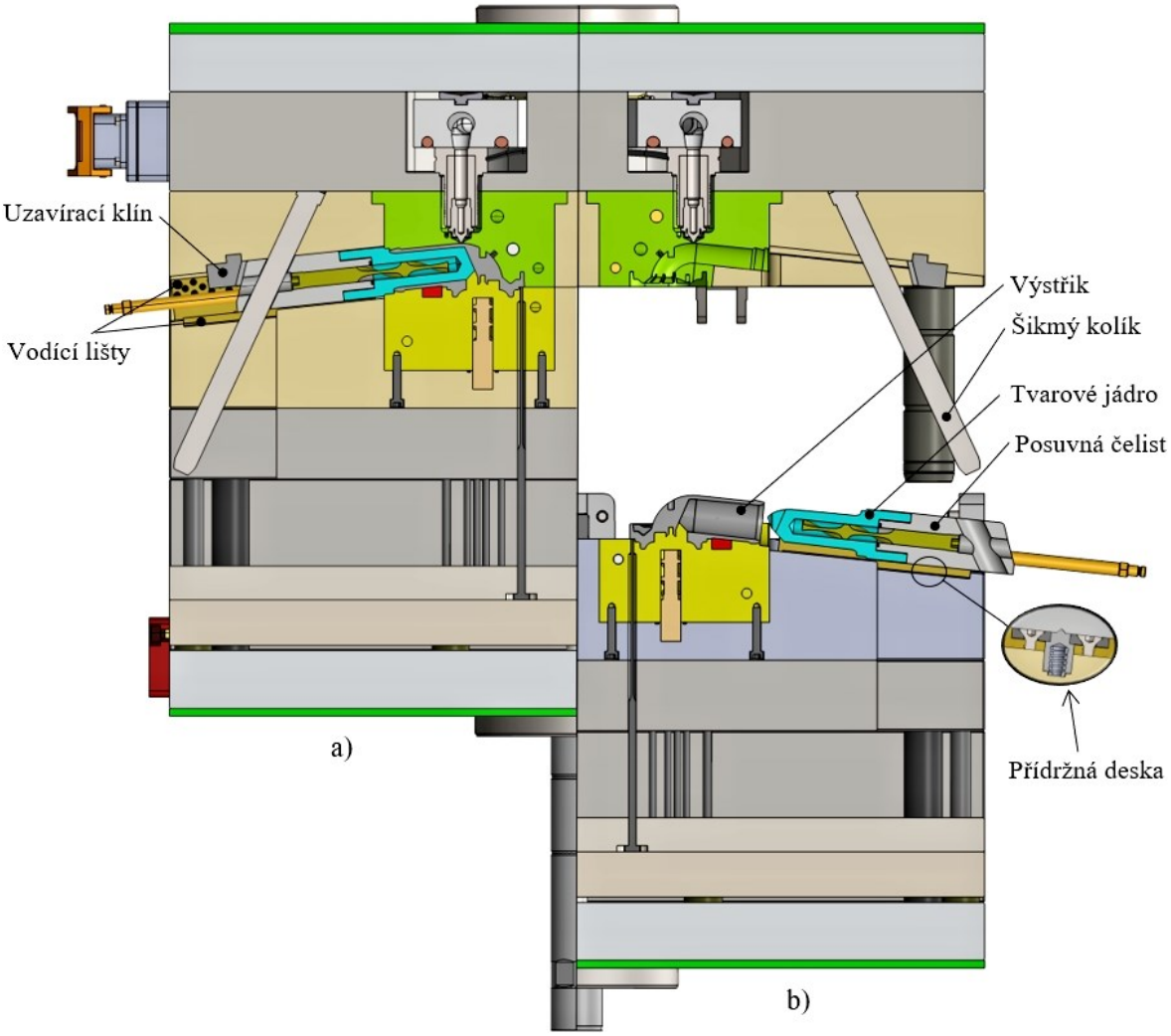
Obr. 64: Sestava posuvných částí a tvárníku.

Délka šikmého kolíku byla stanovena na základě pohybové analýzy v programu SolidWorks. Celková délka šikmého kolíku, který je uložen pod úhlem 25°, je 248 mm. Pracovní délka kolíku pro pohyb čelisti je 187 mm. Při této délce kolíku je zajištěn bezpečný odjezd posuvného jádra z tvarové dutiny. Hodnota posuvu je větší jako minimální hodnota zdvihu jádra 73,1 mm tak, aby při odformování nedošlo ke kolizi.



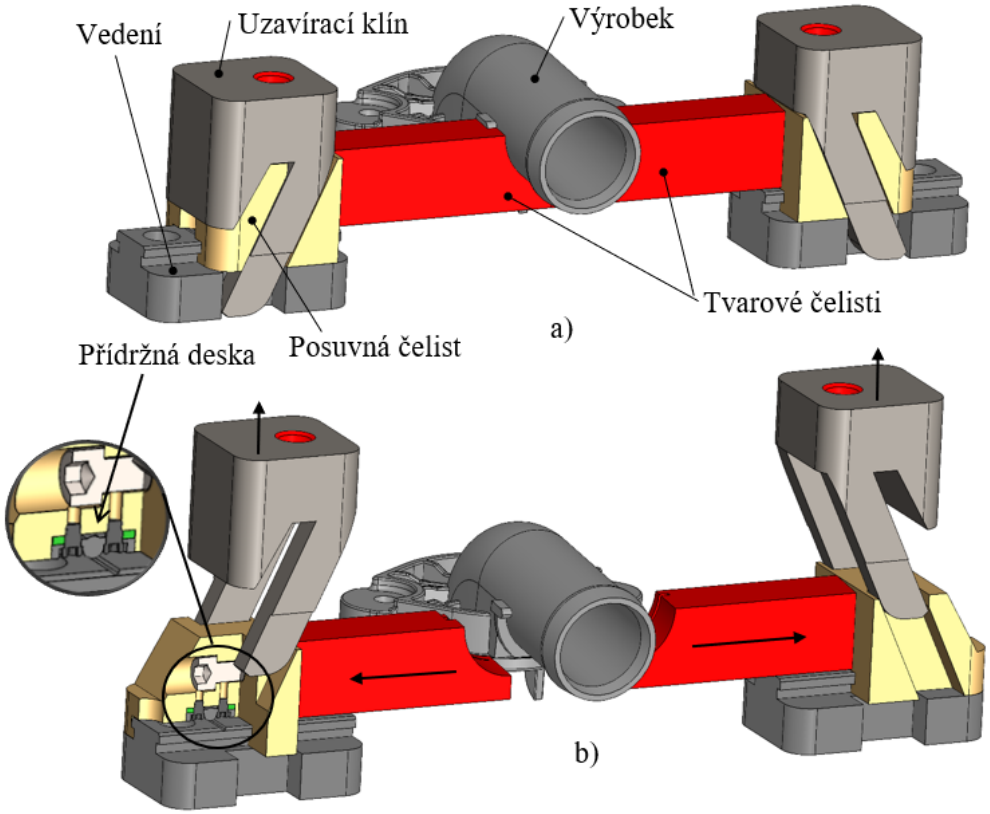
Obr. 65: Šikmý kolík.

Čelist je v uzavřené poloze formy zajištěna proti působícímu vstřikovacímu tlaku pomocí uzavíracího klínu s přídržnou deskou, které zabraňují případnému posunutí. V koncové poloze je čelist zajištěna dvěma přídržnými deskami ovládané pružinou. Pro případné selhání přídržných desek je v koncové poloze systém opatřen stavěcím šroubem (obr. 66).



Obr. 66: Vstřikovací forma v poloze a) uzavřené, b) otevřené.

Tvarové čelisti jsou ovládány posuvnou jednotkou s uzavíracím klínem s označením E3080. Zvolená jednotka má zdvih 18 mm, čímž je zaručeno bezproblémové odformování. Jednotka E3080 je zajištěna v pracovní poloze uzavíracím klínem a v koncové poloze přídržnou deskou. Výhodou této jednotky je úspora rozměrů pro zakomponování ve formě a tím zmenšení celkové velikosti formy.



Obr. 67: Posuvná jednotka E3080 v poloze a) uzavřené, b) otevřené.

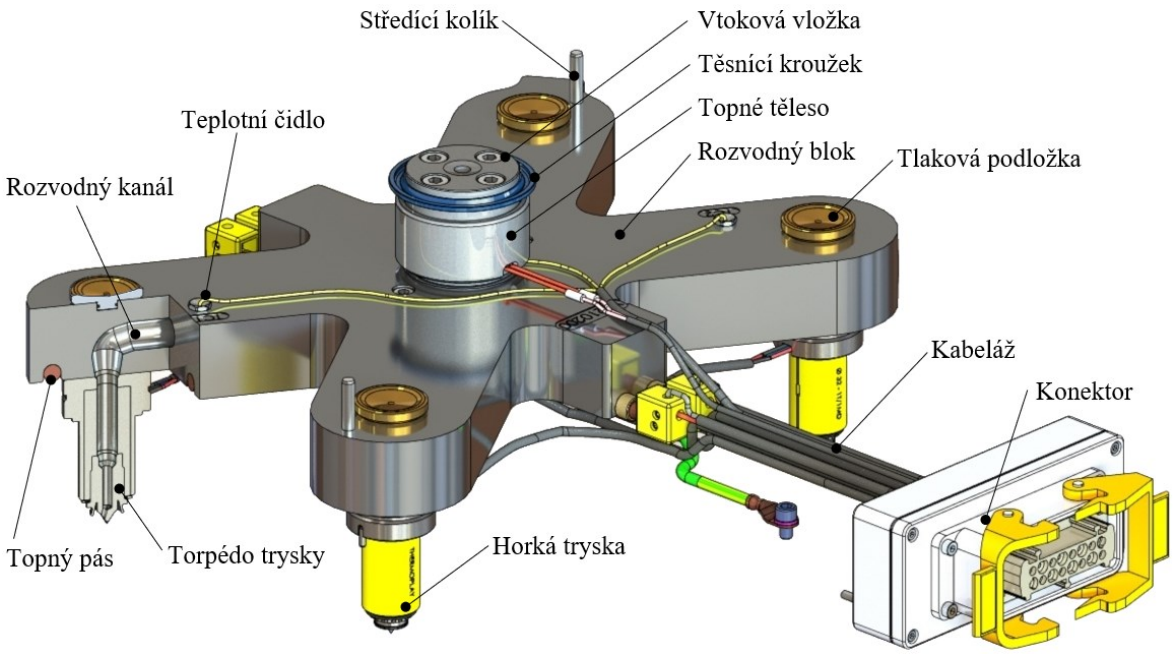
8.5 Vtokový systém

Na základě tokových analýz, které jsou řešeny v kapitole 9, byl vybrán vyhřívaný vtokový systém. Zvolený vyhřívaný vtokový systém s označením VS210200 byl vybrán od firmy Thermoplay na základě doporučení od firmy Svoboda s.r.o. Zvolený systém je znázorněný na obr. 68 na str. 68. Tento vtokový systém byl navržen dle druhu vstřikovaného materiálu, hmotnosti vstřikované dávky a dle umístění vtokového ústí. Vyhřívaný systém je složen z rozvodného bloku, vyhřívané vtokové vložky, čtyř vyhřívaných trysek s označením FT-1MDT, termočlánků, kabeláže, přípojky a středících a vymezovacích dílů.

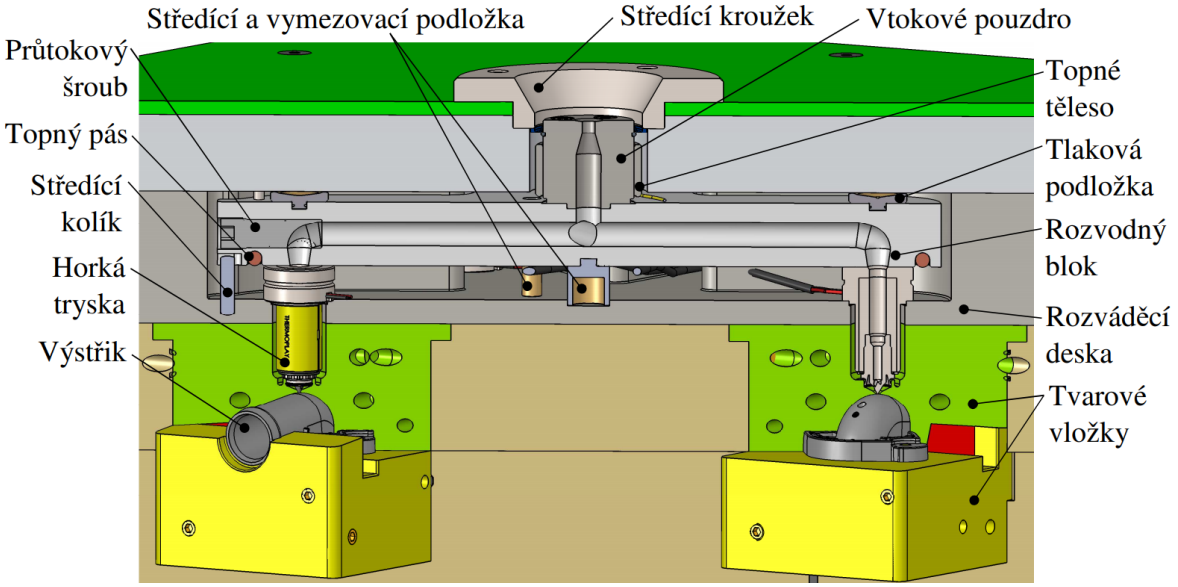
U vyhřívaného vtokového systému je polymerní tavenina dopravována téměř při konstantní teplotě, od ústí trysky vstřikovacího stroje přes centrální vtokovou vložku, rozváděcí kanály v rozvodném bloku až po samotné ústí trysky a dutinu vstřikovací formy.

Udržováním polymerní taveniny v roztavené fázi během celého vstřikovacího cyklu je snižována spotřeba polymeru, a na rozdíl od studených vtoků nevznikají vtokové zbytky (odpad), a není zapotřebí tak vysoký vstřikovací tlak. Naopak nevýhodou je vyšší pořizovací cena a vyšší spotřeba energie.

Horký rozvodný blok tvaru X je vyhříván pomocí topných pásů. Jeho výška je 38 mm, je uložen do drážky v rozváděcí desce a jeho poloha je zajištěna pomocí středících kolíků a vymezovacích kroužků. Blok je odizolován vzduchovou mezerou mezi tvarovou a kotevní deskou. Izolační deska zde není využita, protože výrobce ji nedoporučuje. Teplota v rozvodném systému a tryskách je řízena pomocí termočlánků a temperačních kanálů zajišťujících rovnoměrné teplotní pole okolo ústí trysky. Řízení teploty okolo ústí trysky umožňuje zamezit brzkému zamrznutí vtoku v případě nízkých teplot nebo v opačném případě při vysokých teplotách v ústí vtoku zamezit přehřátí polymerní taveniny a tím degradaci materiálu. Celý systém je připojen, řízen a napájen elektrickou energií pomocí kabeláže vyvedené do zásuvky na boku vstřikovací formy.

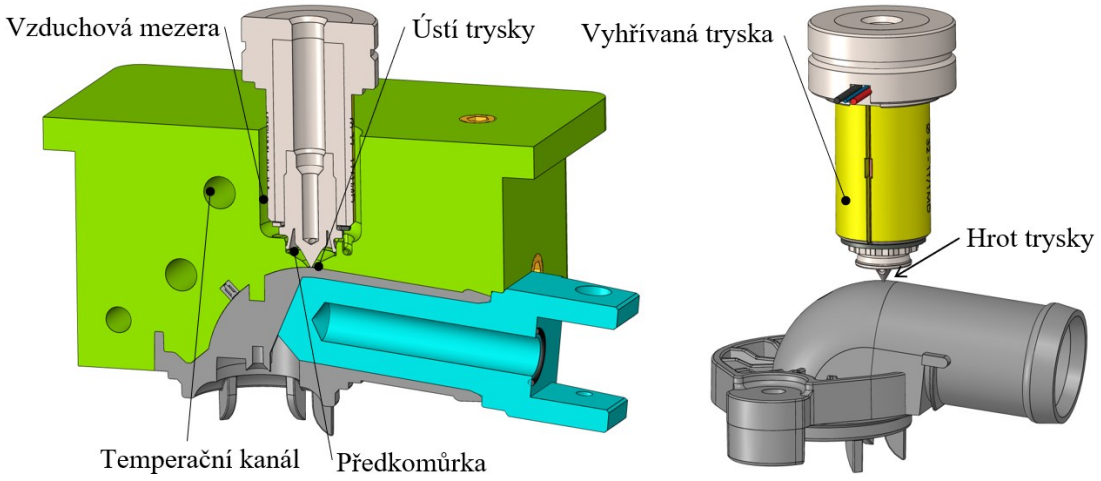


Obr. 68: Vyhřívaný vtokový systém od firmy Thermoplay (render).



Obr. 69: Vyhřívaný vtokový systém zakomponovaný ve formě.

Zvolené vyhřívané trysky s hrotem FT-1MDT umožňují přímé vstřikování na díl se zažehlením vtoku, tzn. že po vtoku zůstávají minimální stopy. Tryska obsahuje předkomůrku, odkud roztavený polymer vtéká přes ústí trysky o průměru 2 mm do dutiny formy. Předkomůrka napomáhá také efektivněji řídit teplotní pole kolem trysky. Tryska je odizolována pro snížení přenosu tepla do desek formy pomocí vzduchové mezery, která je vyrobena mezi tryskou a rozváděcí deskou.



Obr. 70: Zakomponování vyhřívané trysky.

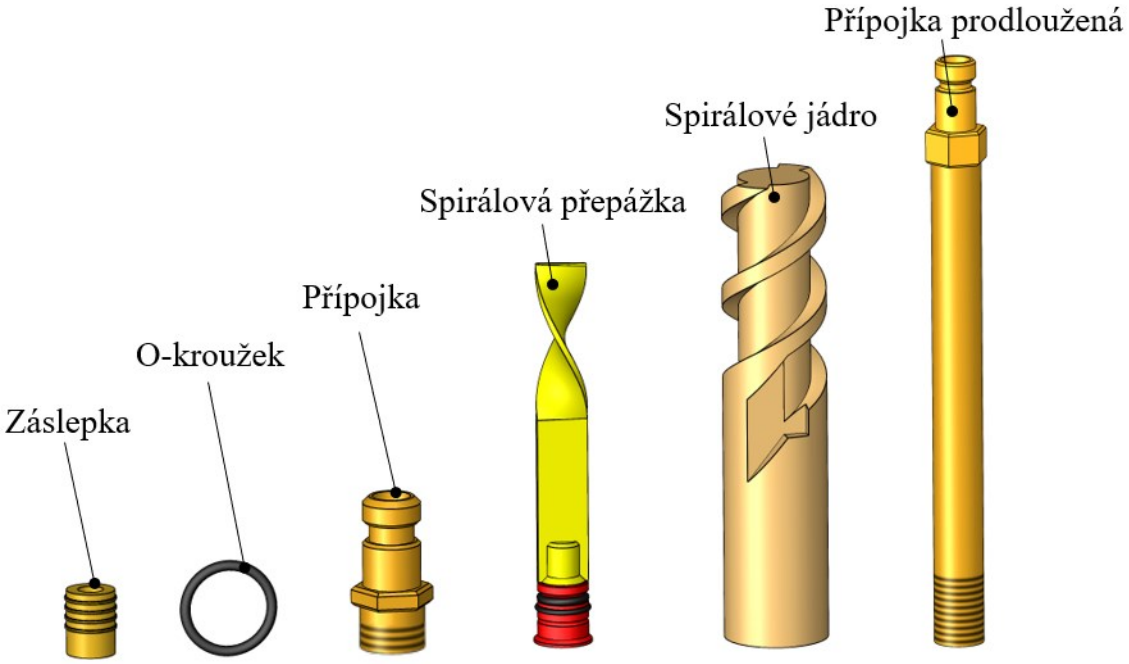
Tryska je uložena volně, jedná se o tzv. kluznou trysku. K utěsnění mezi tryskou a rozvodným blokem dochází při ohřátí horkého systému na provozní teplotu, kdy dojde díky tepelné roztažnosti materiálu k posunutí horkého systému a dosednutí tlakových podložek na desku formy. Z tohoto důvodu je možno začít proces vstřikování až při vyhřátém systému.

8.6 Temperační systém

Pro optimální temperaci dutiny vstřikovací formy byl zvolen na základě výsledků tokových analýz konvenčně vyráběný (vrtaný) temperační systém s osmi chladícími okruhy ve formě a čtyřmi okruhy vedenými v tvarových čelistech pro temperaci tvarového jádra.

Jako temperační médium v jednotlivých okruzích byla zvolena směs vody a glykolu v poměru 20/80 % o teplotě 65 °C a tlaku 250 kPa (2,5 bar). Výhodou tohoto média je snížení zanášení temperačních kanálů kotelním kamenem, který může snižovat časem průřez jednotlivých kanálů, tepelnou vodivost povrchu kanálů a tím celkovou efektivitu temperace formy.

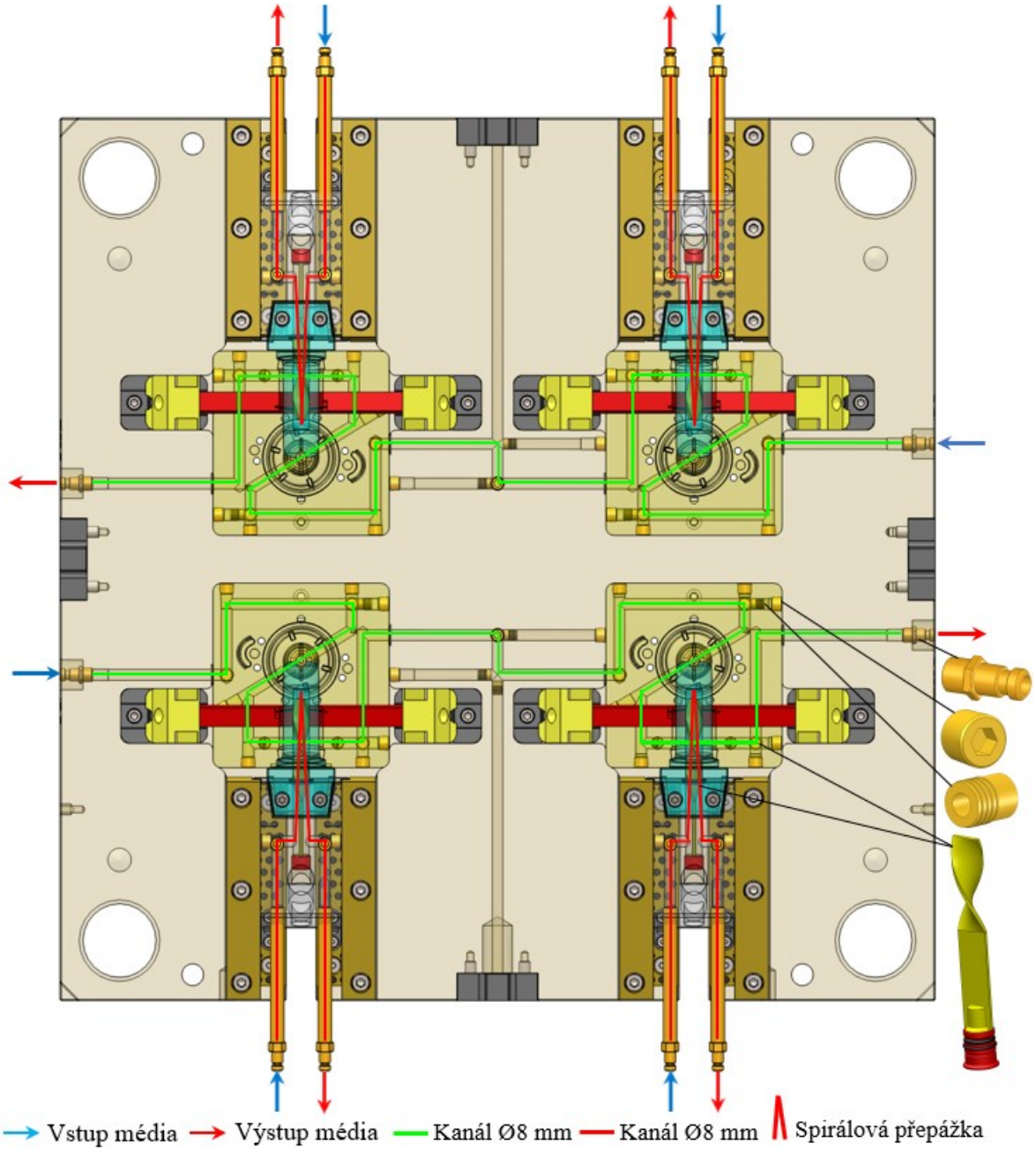
Pro návrh temperačních okruhů byly vybrány komponenty od firmy Meusburger. K napojení hadic pro přívod a odvod temperačního média byly zvoleny přípojky E2000, ke kterým lze hadice připojit za pomocí tzv. rychlospojek. Temperační okruhy jsou přivedeny vždy na jedné straně formy a vyvedeny na straně opačné. Pro přehlednost jsou kanály označeny na vstupu symboly „IN“ s modrou barvou a na výstupu „OUT“ s červenou barvou. Kanály jsou utěsněny na koncích uzavíracími šrouby E2074, pro usměrnění média v kanálech a zabránění vzniku slepých míst jsou použity záslepky E2078. Utěsnění kanálů mezi přechody tvarových vložek a desek zabezpečují těsnící O-kroužky.



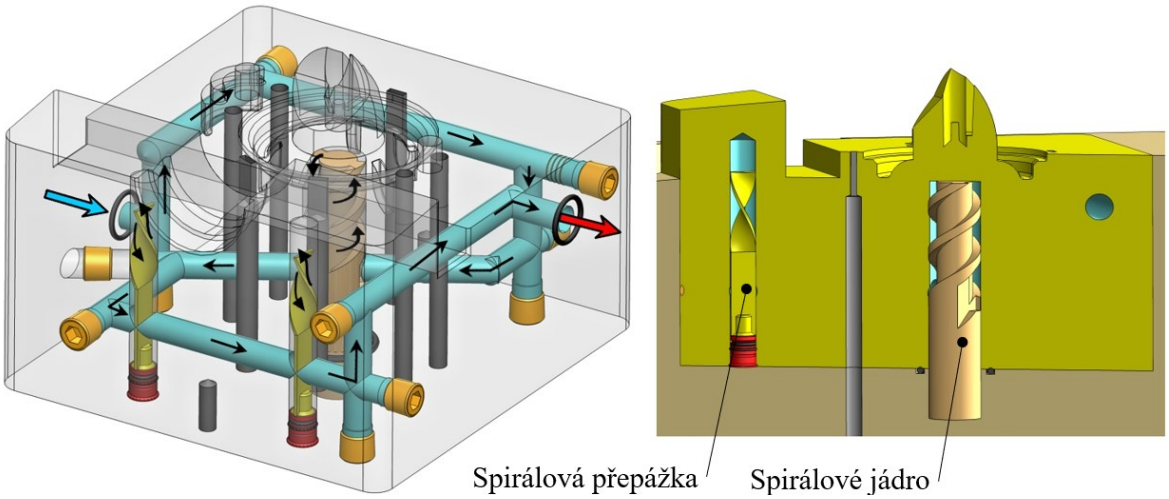
Obr. 71: Komponenty použité v temperačním systému.

Na obr. 72 je znázorněn temperační systém levé poloviny formy, kde byly navrženy dva vrtané temperační okruhy o průměru 8 mm přivádějící médium k tvarovým vložkám tvárníků (zelená barva). Okruhy byly umístěny v závislosti na poloze vyhazovačů a tvarových čelistí. Pro zvýšení účinnosti odvodu tepla a zpřístupnění hůře dostupných míst byly použity pro jeden okruh čtyři spirálové přepážky průměru 8 mm od firmy Svoboda a dvě dvouchodá měděná spirálová jádra E21228 o průměru 16 mm od firmy Meusburger.

Další kanály nacházející se na levé straně formy jsou v posuvných čelistech, na obr. 72 jsou znázorněny červenou barvou. Temperace čelisti je popsána na následující straně.

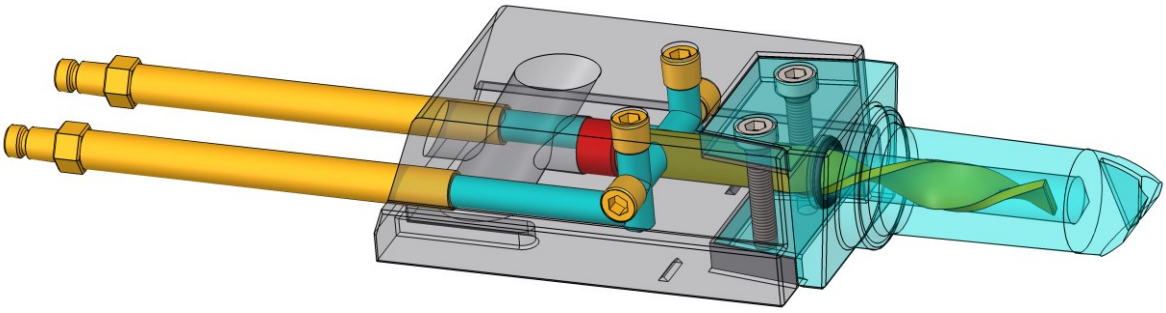


Obr. 72: Temperační systém levé poloviny formy.



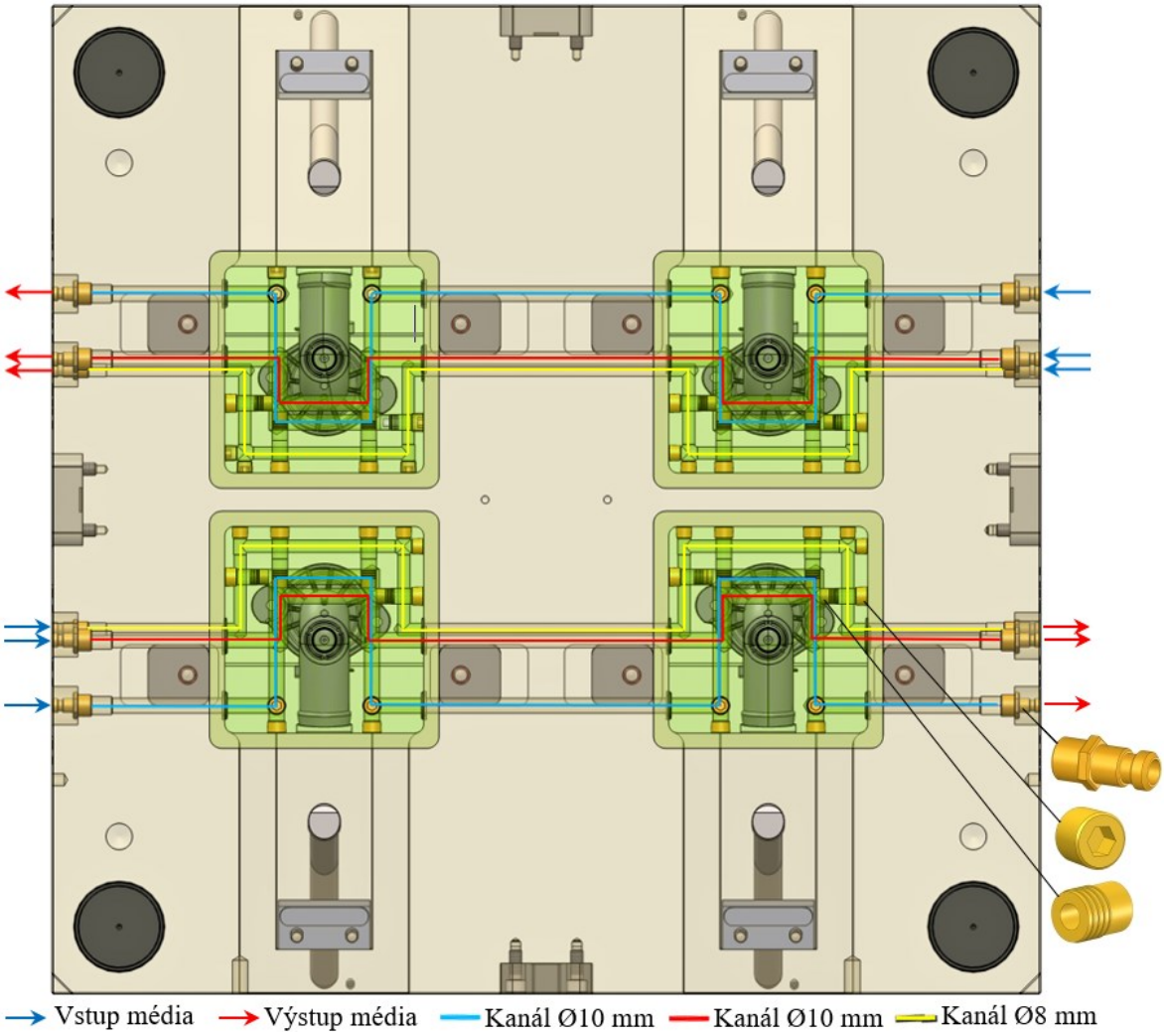
Obr. 73: Temperační okruh v tvarové vložce tvárníku (vlevo) a zakomponování spirálové přepážky a spirálového jádra v tvarové vložce tvárníku (vpravo).

Na levé polovině jsou další čtyři temperační okruhy vyrobeny v posuvných čelistech spojených s tvarovými jádry (viz. obr. 74). V jádře je vyvrtán otvor o průměru 12 mm, v kterém je usazena temperační spirálová přepážka E2102. Temperační médium k přepážce je přivedeno přes prodlouženou přípojku E2018 a dále přes okruh vrtaných kanálů o průměru 8 mm. Přechod mezi jádrem a čelistí je utěsněn O-kroužkem.

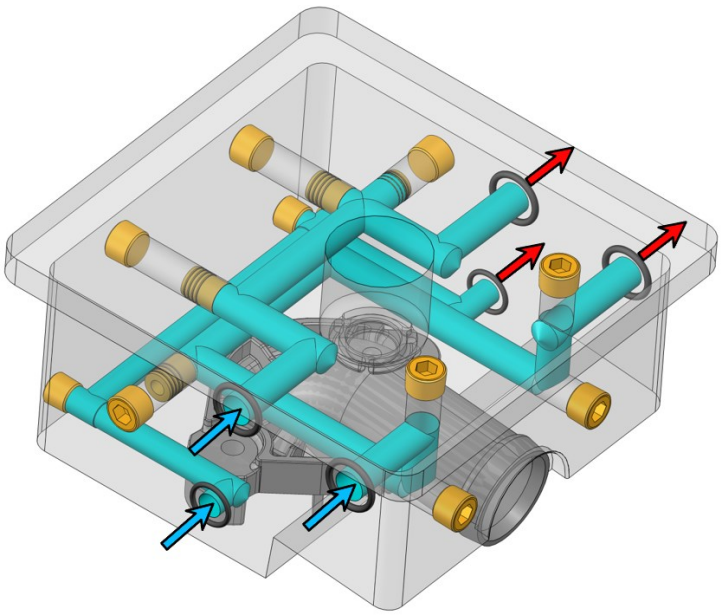


Obr. 74: Temperační systém posuvné čelisti a tvarového jádra.

Temperační systém pravé poloviny formy byl navržen z šesti vrtaných temperačních okruhů (viz. obr. 75 na str. 73). Čtyři temperační okruhy slouží pro ochlazení kolem výstřiku. Kanály byly navrženy o průměru 8 mm a 10 mm. Kanál o průměru 10 mm (modrý kanál) byl veden okolo výstřiku, jeho účel byl převážně na odvod tepla z míst s větší tloušťkou stěn. Kanál o průměru 8 mm (žlutý kanál) temperuje spodní část tvárnice, především boční stěny výstřiku. Třetí kanál (červený) o průměru 10 mm byl zakomponován v horní části tvárnice, který zajišťuje rovnoměrné teplotní pole okolo ústí trysky, vyrovnává energetickou bilanci mezi formou a horkým systémem a zároveň slouží pro řízení teploty okolí místa ústí horké trysky. Vrtané kanály v tvarové vložce tvárnice jsou znázorněny na obr. 76 na str. 73.



Obr. 75: Temperační systém pravé poloviny formy.

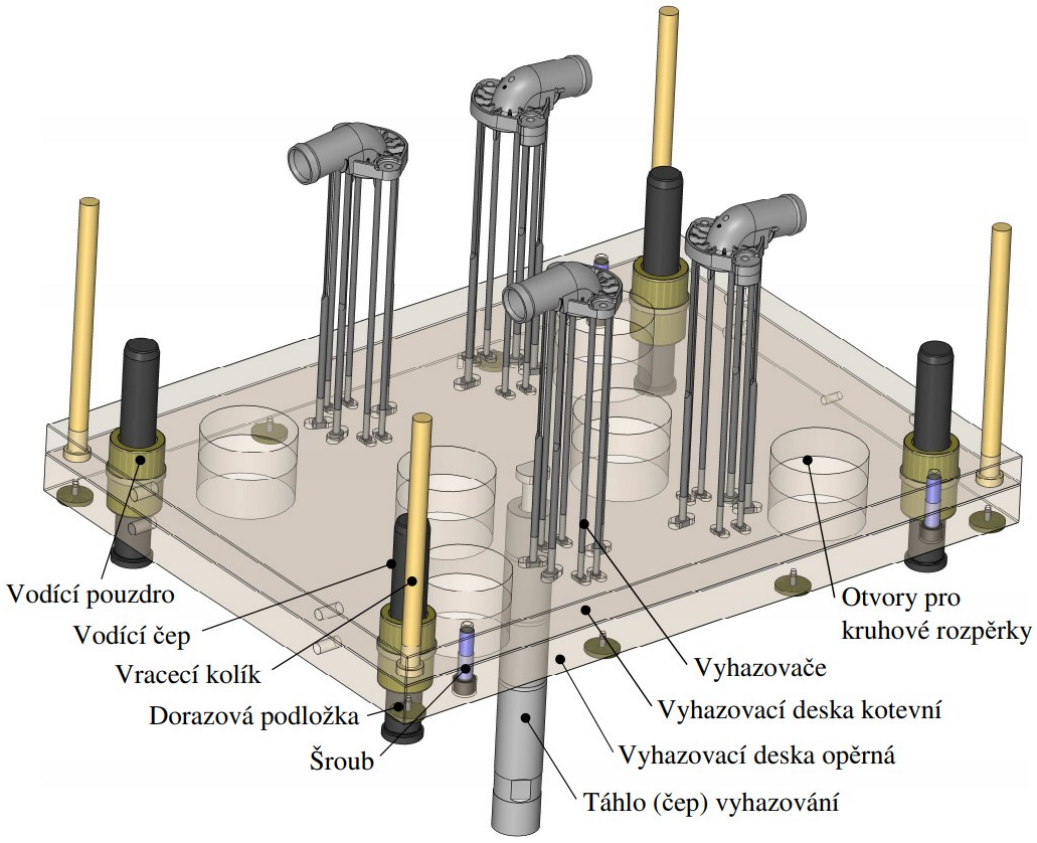


Obr. 76: Temperační kanály v tvarové vložce tvárnice.

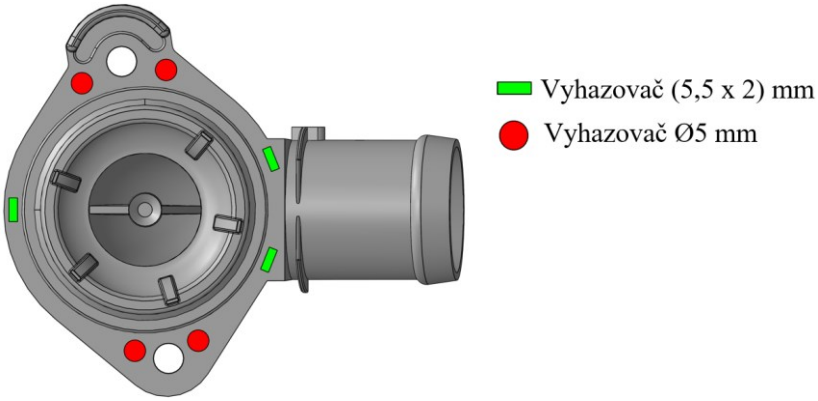
8.7 Vyhazovací systém

Pro odformování výrobku z dutiny formy byl navržen vyhazovací systém se 7 vyhazovacími kolíky na jeden výrobek (viz. obr. 77). Rozmístění vyhazovačů na výrobku je znázorněno na obr. 78 na str. 75. Ve formě se tedy celkově nachází 28 vyhazovačů, z toho 16 vyhazovačů je válcového tvaru o průměru 5 mm a zbylých 12 vyhazovačů je prizmatických (plochých) o rozměrech (5,5 x 2) mm. Všechny tyto vyhazovače byly zkráceny na potřebnou délku 248 mm. Vyhazovače jsou upevněny v kotevní vyhazovací desce a jsou zaaretovány proti pootočení pomocí seříznuté hlavy vyhazovače. Vyhazovací systém je složen ze dvou desek, a to kotevní a opěrné, které jsou k sobě spojeny za pomocí válcových šroubů. Přesné vedení vyhazovacích desek je zajištěno pomocí vodících čepů s kuličkovými vodícími pouzdry.

Dopředný pohyb vyhazovacích desek je zprostředkován hydraulickou uzavírací jednotkou vstřikovacího stroje za pomocí táhla. Návrat do počáteční polohy je zajištěn pomocí vracecích kolíků. Vyhazovací desky dosedají v koncové poloze na dorazové podložky. Maximální zdvih vyhazovacího systému je 89 mm, což je pro odformování výrobku naprosto dostačující. Zvolené díly jsou normalizované díly od firmy Meusburger.



Obr. 77: Vyhazovací systém vstřikovací formy.



Obr. 78: Rozmístění vyhazovačů na výrobku.

8.8 Odvzdušňovací systém

Vzduch uzavřený v dutině vstřikovací formy je při vstřikování stlačován, přičemž vzrůstá jeho tlak a teplota. Pokud hodnoty tlaku a teploty přesáhnou mezní hodnotu může zpracovávaný materiál vznítit a zanechat na výrobku stopy po spálení, přičemž mohou zůstat stopy i na povrchu tvarových částí. Při nedostatečném odvzdušnění nemusí vznikat jen spálená místa, ale také vzduchové kapsy při nedotečení materiálu a další druhy vad. Odvzdušnění má vliv na kvalitu výstřiku, ovlivňuje mechanické i vzhledové vlastnosti.

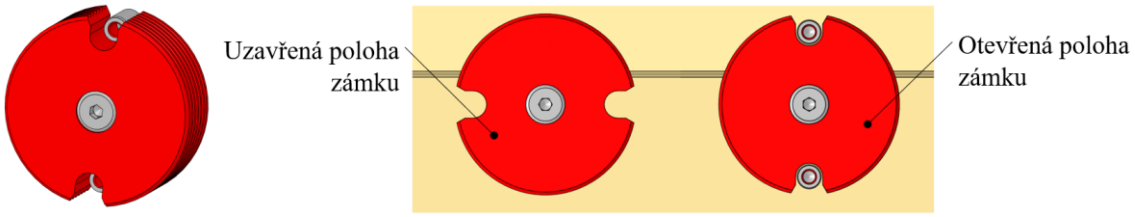
Z analýz v kapitole 9 jsou předikována určitá místa s možností uzavírání vzduchu. Část těchto míst se nachází v blízkosti dělící roviny, vyhazovačů, posuvných čelistí a jader, u kterých se předpokládá patrná vůle, kterou je vzduch schopen při vstřikování uniknout z tvarové dutiny formy. Pokud by se při záběhu vstřikovací formy ukázalo, že tento systém odvzdušnění je nedostatečný, je zapotřebí formu v místech s uzavíráním vzduchu odvzdušnit za pomocí kanálků, případně odvzdušňovacích ventilů. Pro plněné materiály se dle [38] pohybuje hloubka kanálu od 0,04 do 0,07 mm.

8.9 Transportní systém

Pro manipulaci s formou jak při jejím transportu, tak při její montáží je zapotřebí ji opatřit transportními a manipulačními prvky. Pro transport formy bylo zvoleno otočné závěsné oko Meusburger E1271/24 s nosností až 8 000 kg, které je umístěno v těžišti formy. Hmotnost formy získaná z programu Solidworks činí 1 530 kg, takže závěsné oko splňuje nosnost i s patřičnou bezpečností. Pro zajištění vyhazovacího paketu proti pohybu byl zvolen transportní zámek Hasco Z73/16x25x63 (viz. obr. 79 na str. 76).

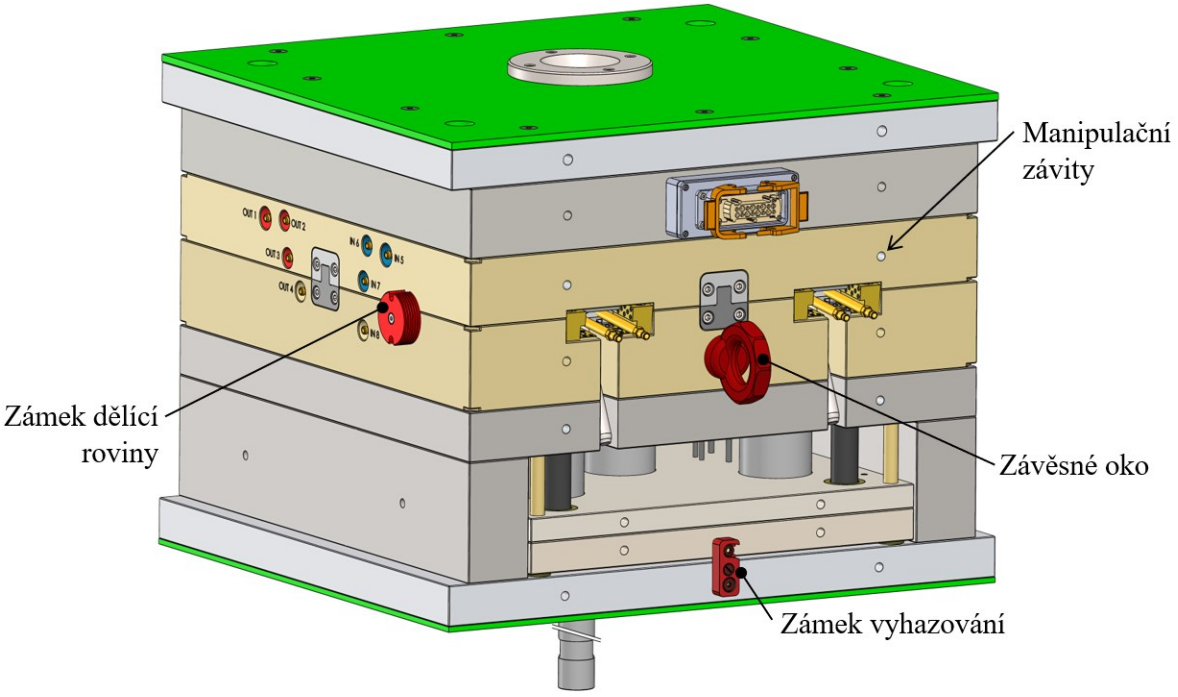
Obr. 79: Závěsné oko a transportní zámek.

Pro pevné uzavření obou polovin formy vůči sobě byl zvolen transportní zámek Meusburger E1936/60, který nemusí být při otevírání a uzavírání dělící roviny demontován (viz. obr. 80). Pootočení bez demontáže je umožněno za pomocí šroubu s pružinou.



Obr. 80: Transportní zámek Meusburger E1936.

K usnadnění montáže formy byly všechny desky opatřeny manipulačními závity, do kterých lze přidat další závěsná oka a manipulovat tak pouze s vybranými částmi formy.



Obr. 81: Transportní systémy na vstřikovací formě.

9 ANALÝZA PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

Analýza procesu vstřikování byla provedena za pomocí softwaru Autodesk Moldflow 2016. Vstupními daty pro simulaci byl 3D model výrobku, na kterém byla provedena síť Dual Domain (2,5D síť), dále vtokový a temperační systém. V analýze Moldflow jsou porovnány dva materiály, a to PA66 plněný 30 % skelnými vlákny a PA6 plněný 25 % skelnými vlákny. Dále je v analýze porovnán studený vtokový systém a horký vtokový systém v kombinaci s dvěma typy temperacemi, a to konvenčně vyráběným temperačním systémem a konformně vyráběným temperačním systémem (např. slinováním). Celkově bylo zpracováno a porovnáno šest jednotlivých analýz. Přehled zpracovaných analýz je vypsán níže v tab. 2.

Tab. 2: Přehled zpracovaných analýz v programu Autodesk Moldflow.

Analýza	Materiál	Vtokový systém	Temperační systém
1	PA66-G30	Studený	Konvenční
2		Horký	Konvenční
3		Horký	Konformní
4	PA6-GF25	Studený	Konvenční
5		Horký	Konvenční
6		Horký	Konformní

9.1 Volba materiálu výrobku

Pro návrh výrobku byly vybrány dva materiály s vhodnými vlastnostmi pro použití při stálých zvýšených teplotních podmínkách, a to PA66 plněný skelnými vlákny s obsahem 30 % (PA66-GF30) a PA6 taktéž plněný skelnými vlákny s obsahem 25 % (PA6-GF25). Konečným faktorem pro výběr materiálu pro konstrukci formy byly následné tokové analýzy, kde byly testovány a porovnány oba tyto materiály v různých návrzích simulačního procesu vstřikování.

9.1.1 Materiál PA66-GF30

Materiál PA66 plněný 30 % skelnými vlákny je konstrukční semikrystalický termoplast s vysokou rozměrovou stabilitou vykazující dobré mechanické vlastnosti, jako je pevnost a tuhost. Přidáním sklených vláken se zvyšuje jeho použitelnost pro dlouhodobé vystavování při zvýšených teplotách. PA66 je silně polární plast, díky čemuž je schopen odolávat

nepolárním rozpouštědlům. Polarita PA66 způsobuje jeho zvýšenou navlhavost a před samotným zpracováním je nutno jej předsoušet. Materiál byl vybrán od firmy Kingfa Science s obchodním názvem materiálu PA66-G30 HSBK 161. Základní vlastnosti zvoleného materiálu jsou uvedeny v tab. 3, podrobnější informace jsou uvedeny v materiálovém listu v příloze.

Tab. 3: Vlastnosti materiálu PA66-G30 HSBK 161.

Vlastnost materiálu	**Hodnota**	**Jednotka**
Modul pružnosti v ohybu	9500	MPa
Modul pružnosti v tahu	9500	MPa
Hustota	1,36	g/cm^3
Smrštění (příčné)	0,9	%
Rozsah teplot taveniny	270–290	°C
Rozsah teplot formy	40–100	°C
Maximální teplota taveniny	320	°C
Vyhazovací teplota	196	°C
Maximální smyková rychlost	60 000	s^{-1}
Maximální smykové napětí	0,5	MPa

9.1.2 Materiál PA6-GF25

Materiál PA6 plněný 25 % skelnými vlákny je konstrukční semikrystalický termoplast, kombinuje dobré mechanické vlastnosti, jako je tuhost, pevnost s odolností proti rázům a proti opotřebení. Oproti PA66 má nižší pevnost a je více navlhavý, takže před zpracováním je nutno jej vysoušet. Přidáním skelných vláken se jako u PA66 zvyšuje jeho použitelnost pro dlouhodobé vystavování při zvýšených teplotách, a zároveň se zvyšuje pevnost a tuhost. Zvoleným dodavatelem tohoto materiálu je firma BASF Engineering Plastics. Materiál nese obchodní název Ultramid® B3WG5. Základní vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tab. 4 na str. 79, podrobnější informace jsou uvedeny v materiálovém listu v příloze.

Tab. 4: Vlastnosti materiálu Ultramid® B3WG5 (PA6-GF25).

Vlastnost materiálu	**Hodnota**	**Jednotka**
Modul pružnosti v ohybu	7400	MPa
Modul pružnosti v tahu	8000	MPa
Hustota	1,32	g/cm^3
Index toku taveniny	63,8	g/10 min
Smrštění (příčné)	0,7	%
Rozsah teplot taveniny	270–290	°C
Rozsah teplot formy	80–90	°C
Maximální teplota taveniny	300	°C
Vyhazovací teplota	160	°C
Maximální smyková rychlost	60 000	s^{-1}
Maximální smykové napětí	0,5	MPa

9.2 Volba vstřikovacího stroje

Vstřikovací stroj byl zvolen od firmy Arburg s označením Allrounder 720S 320t 29,1 oz (60 mm). Jedná se o hydraulický vstřikovací stroj s maximální uzavírací silou 3200 kN (320 tun) a průměrem šneku 60 mm. Stroj byl zvolen na základě rozměrů vstřikovací formy, tzn. potřebné vzdálenosti mezi vodícími sloupy pro upnutí formy na stroj, velikosti uzavírací síly a kapacity plastikační jednotky. Velikost uzavírací síly (viz. kap. 9.10.4 na str. 96) a kapacita plastikační jednotky byly získány ze softwaru Moldflow. Hodnota uzavírací síly a plastikační kapacity byly z hlediska bezpečnosti zvětšeny o 20 %. Získané parametry potřebné pro volbu stroje i parametry zvoleného stroje jsou uvedeny v tab. 5 na str. 80.

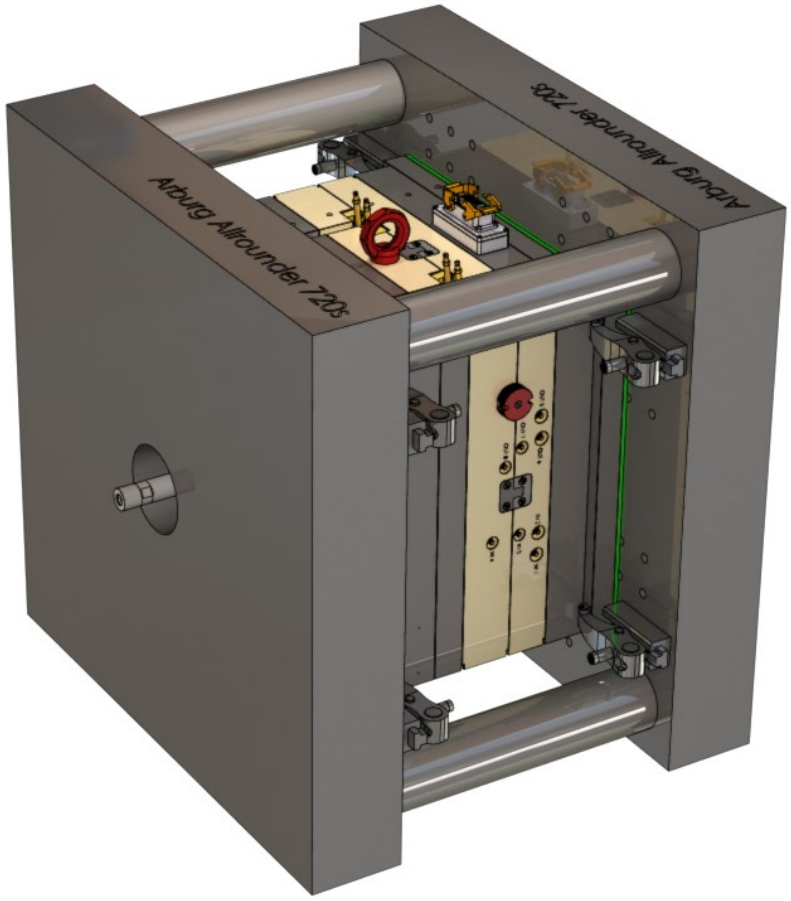
Obr. 82: Vstřikovací stroj Allrounder 720S 320t 29,1 oz (60 mm).

Tab. 5: Parametry vstřikovacího stroje Allrounder 720S 320t 29,1 oz (60 mm).

Parametr stroje	**Hodnota stroje**	**Hodnota požadovaná**	**Jednotka**
Uzavírací síla	3200	min. 410*	kN
Maximální vstřikovací tlak	200	28,5*	MPa
Rozsah výšky formy	300-700	min. 551	mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	720 x 720	min. 646 x 696	mm
Plastikační kapacita	664	min. 467*	cm^3
Průměr středícího kroužku	160	-	mm
Průměr šneku	60	-	mm

* hodnota zvětšena o bezpečnostní rezervu 20 %.

Na obr. 83 je znázorněna simulace nasazení formy na upínací desky stroje Arburg Allrounder 720S 320t. Upnutí na vstřikovací stroj je realizováno za pomocí upínek Meusburger HWS 100.

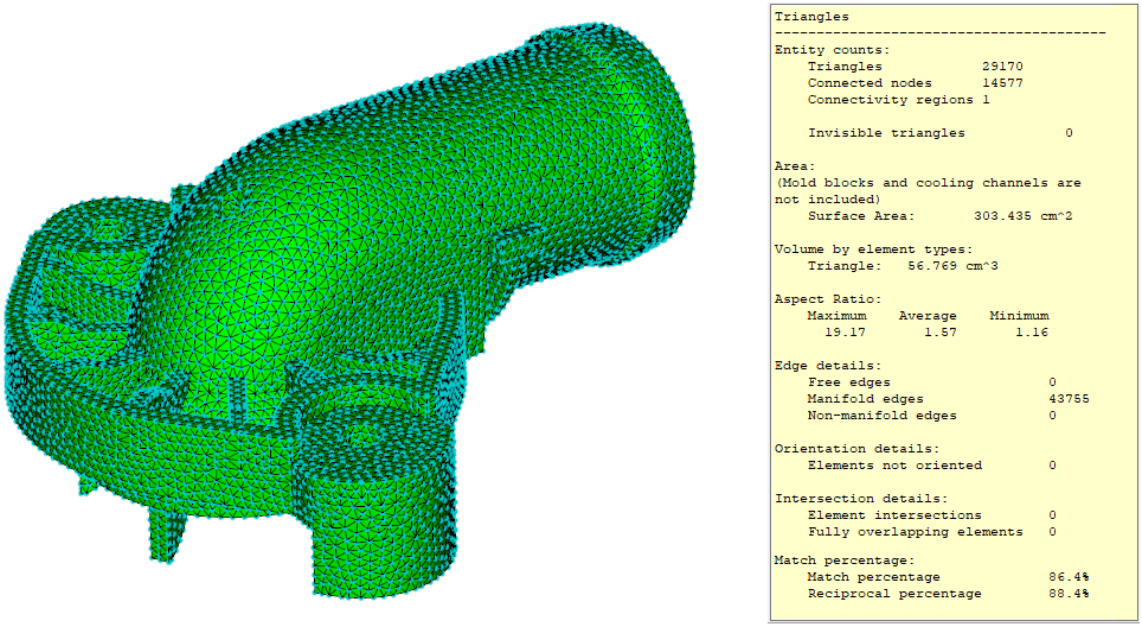


Obr. 83: Simulované upnutí formy na vstřikovací stroj Arburg (render).

9.3 Tvorba sítě výrobku

Síť byla provedena na upraveném výrobku, který byl naimportován z programu SolidWorks ve formátu *.stp. Z výrobku byly odstraněny zaoblení menší než R1,5 tak, aby se zvýšila kvalita sítě a tím přesnost výpočtu. Na výrobku byla vytvořena síť Dual Domain s délkou strany trojúhelníkové sítě 1,7 mm. Síťování Dual Domain je síťování trojrozměrných modelů pomocí rovnostranných trojúhelníků.

Za pomocí funkce Mesh Statistic byla zkontrolována kvalita sítě, která ovlivňuje výsledky i dobu nutnou na výpočet analýzy. Parametry sítě jsou znázorněny na obr. 84. Hodnota Aspect Ratio by neměla přesahovat u složitějších dílů hodnotu 20, síť na výrobku má hodnotu 19,17 tzn., že požadavek byl splněn. Procentuální shoda sítě by neměla klesat pod hodnotu 85 %, v případě sítě výrobku se jedná o hodnotu 86,4 %, čímž je podmínka splněna. U sítě dále nebyly nalezeny žádné volné hrany, neorientované nebo překrývající se elementy. Zvolená síť splňuje všechny požadavky a je z hlediska kvality optimální.



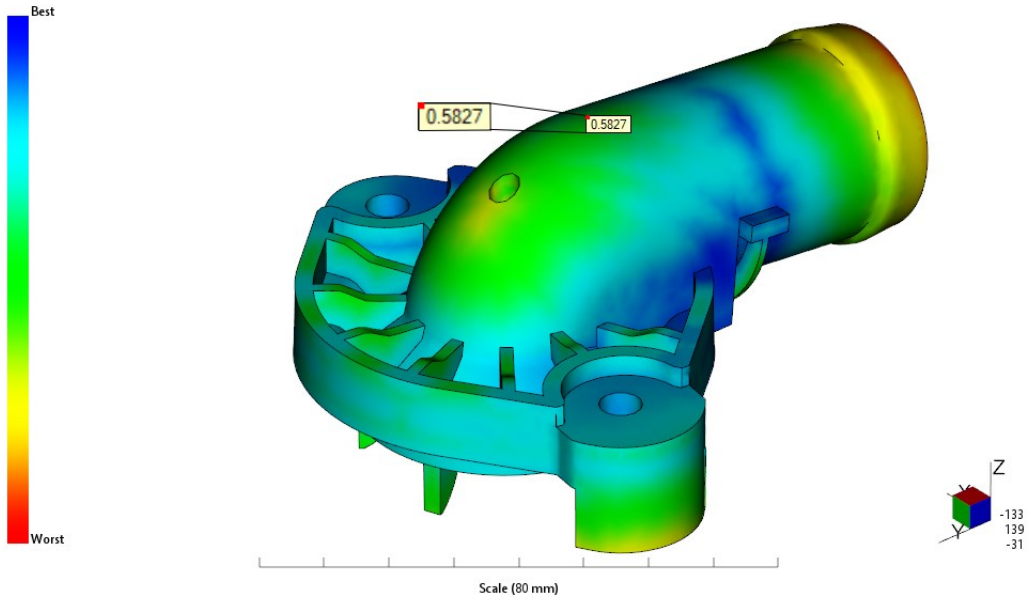
```
Triangles
----------------------------------------
Entity counts:
    Triangles             29170
    Connected nodes       14577
    Connectivity regions 1

    Invisible triangles           0

Area:
(Mold blocks and cooling channels are
not included)
    Surface Area:       303.435 cm^2

Volume by element types:
    Triangle:   56.769 cm^3

Aspect Ratio:
    Maximum    Average    Minimum
      19.17       1.57       1.16

Edge details:
    Free edges                    0
    Manifold edges                43755
    Non-manifold edges            0

Orientation details:
    Elements not oriented         0

Intersection details:
    Element intersections         0
    Fully overlapping elements    0

Match percentage:
    Match percentage              86.4%
    Reciprocal percentage         88.4%
```

Obr. 84: Vytvořená síť na 3D modelu a parametry vytvořené sítě.

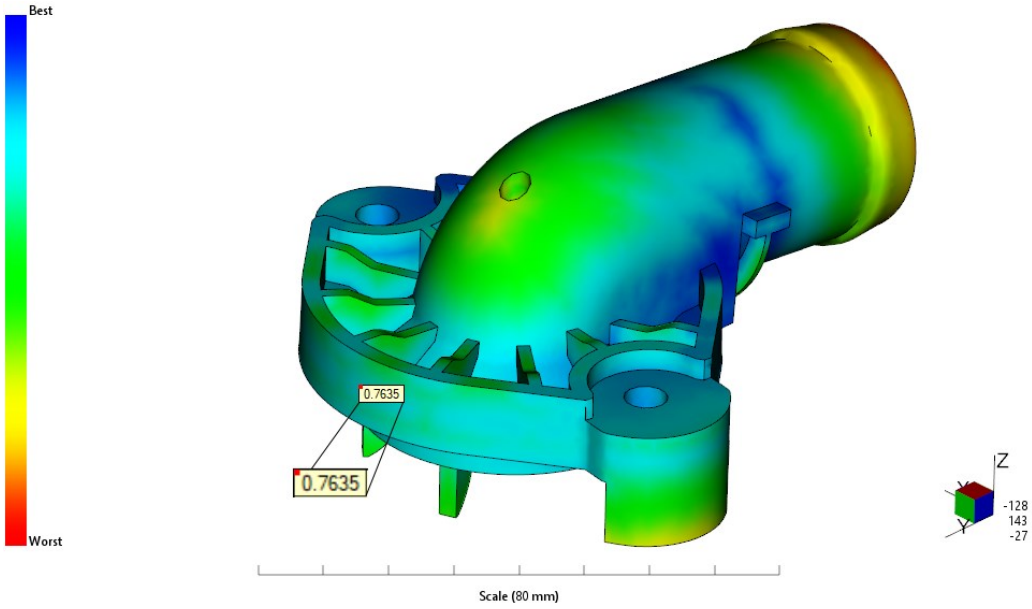
9.4 Analýza umístění vtoku (Gate location)

Pomocí analýzy umístění vtoku a také dle zaformování, bylo vybráno nejvhodnější místo pro vyústění vtokového kanálu do dutiny vstřikovací formy, a to jak pro studený, tak pro horký vtokový systém. Hodnoty jsou zastoupeny procentuálně, v místech modré barvy je procentuálně nejlepší umístění vtoku, a naopak místa červené barvy jsou nejméně vhodná.

U horkého vtokového systému bylo vybráno místo v horní části výrobku ležící přibližně ve středu dílce (viz. obr. 85). Vhodnost umístění pro horký vtok je 58 %. Místo je vhodné především z hlediska rovnoměrného plnění dutiny formy a zamezení propadlin stěny pomocí žebra, které se nachází v otvoru příruby pod ústím vtoku. Pro studený vtokový systém bylo vybráno místo v oblasti žebrování, které je z hlediska plnění dílce taktéž vyhovující. Vhodnost umístění pro studený vtok je 76 % (obr. 86).



Obr. 85: Vhodnost umístění pro horké vtokové ústí.



Obr. 86: Vhodnost umístění pro studené vtokové ústí.

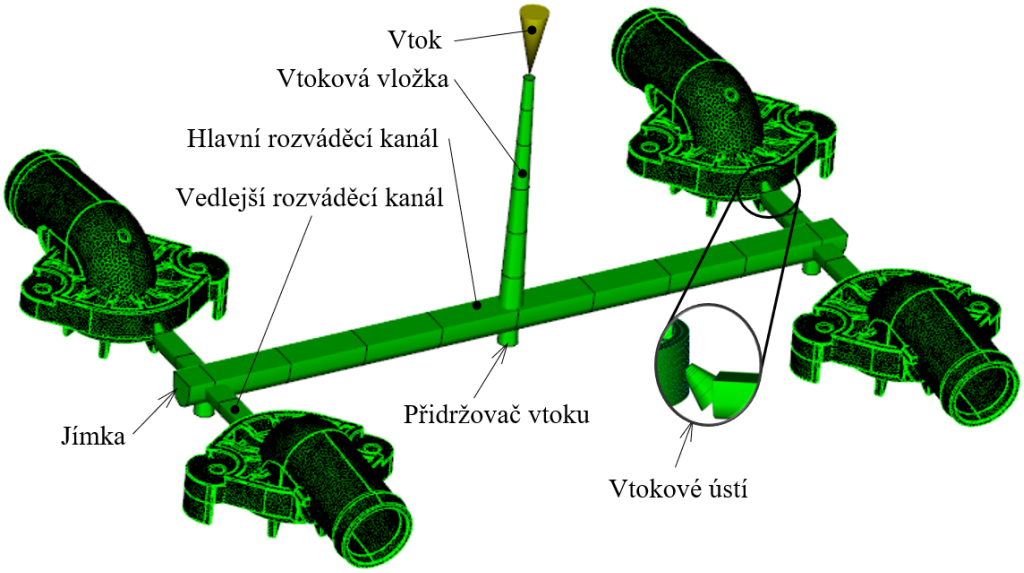
9.5 Návrh vtokového systému

Při návrhu procesu vstřikování byly zkonstruovány dvě varianty vtokových systémů, a to vyhřívaný (horký) vtokový systém a studený vtokový systém. Oba tyto systémy byly simulovány a porovnány pro dva typy materiálů a dva typy temperačních systémů při různých vstřikovacích podmínkách.

Trajektorie horkého a studeného vtokového systému byla zkonstruována pomocí os v programu Solidworks. Osy byly dále převedeny do formátu *.igs a exportovány do programu Moldflow, zde byly osám přiděleny potřebné parametry a následně vysíťovány.

9.5.1 Studený vtokový systém

Studený vtokový systém je složen z vtokové vložky, rozváděcích kanálů včetně jímky zachycující čelo taveniny, vtokového ústí a přidržovače vtoku. Vtoková vložka byla zvolena od firmy Meusburger E1600/24x116/5. Přidržovače vtoku byly zvoleny také od firmy Meusburger, a to typ E1660/24x96. Rozměry hlavního a vedlejších rozváděcích kanálů byly určeny dle [17]. Tvar kanálů je lichoběžníkového tvaru se zaoblením (tvar U). Hlavní rozváděcí kanál má rozměry (13 x 14) mm (výška = průměr x šířka) a vedlejší rozváděcí kanál má rozměry (8,5 x 9,5) mm. Studený vtokový systém je zakončen tunelovým ústím vtoku. Tunelové ústí bylo navrženo za pomocí vtokové vložky Meusburger E1696, která byla zvolena na základě vstřikované dávky, viskozity polymeru a procenta plnění materiálu. Průřez tunelového ústí je 6,23 mm^2, které odpovídá průměru 2,8 mm. Hmotnost studeného vtokového systému získána z programu Moldflow činí 81,4 g.



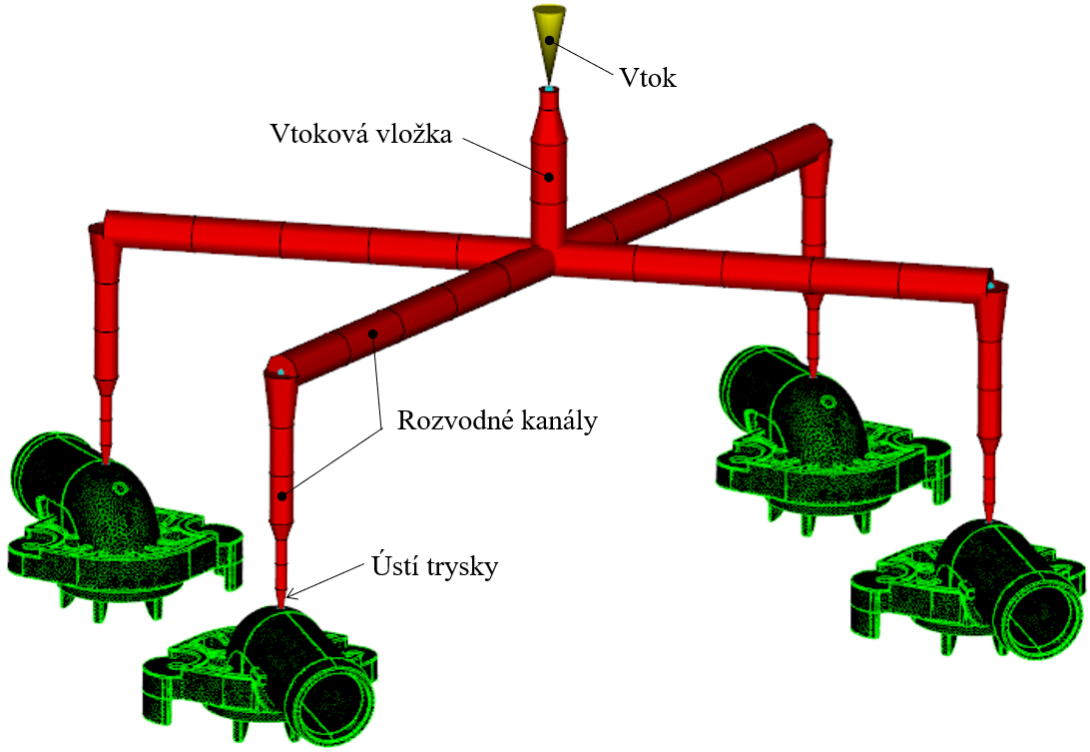
Obr. 87: Studený vtokový systém.

Výhodou studeného vtokového systému je poměrně snadná výroba, nižší pořizovací náklady a u zvoleného typu ústí vtoku automatické oddělení vtokového systému přímo ve formě bez použití třídeskové formy. Naopak nevýhodou je vznik vtokového zbytku (odpadu), který se musí dále zpracovat (zrecyklovat).

9.5.2 Vyhřívaný vtokový systém

Vyhřívaný vtokový systém je složen z trysky, ústí trysky, rozvodného bloku a hlavního vtoku, tzn. centrální vtokové vložky. V případě programu Moldflow jsou modelovány části vtokové vložky, rozvodných kanálů a ústí trysky dle vnitřních průměrů kanálů (viz. obr. 88). V případě zvoleného horkého systému Thermoplay byla zvolena centrální vtoková vložka IB54/08/15x40 R40, vyhřívané trysky FT-1MDT s ústím trysky o průměru 2 mm a rozvodným blokem VS210200/290x184/38. Rozvodné kanály mají v rozvodném bloku průměr 15 mm, v tryskách 10 mm a před ústím vtoku se zužují na průměr 5 mm. Průměr kanálů ve vtokové vložce je na vstupu 8 mm odtud se dále rozšiřuje na 15 mm.

Vyhřívaný vtokový systém se vyznačuje tím, že udržuje vstřikovaný polymer při konstantní teplotě po celou dobu vstřikovacího cyklu, čímž nevzniká vtokový zbytek, snižuje se spotřeba materiálu a zároveň i provozní náklady. Značnou nevýhodou tohoto systému je jeho vysoká pořizovací cena.



Obr. 88: Horký vtokový systém.

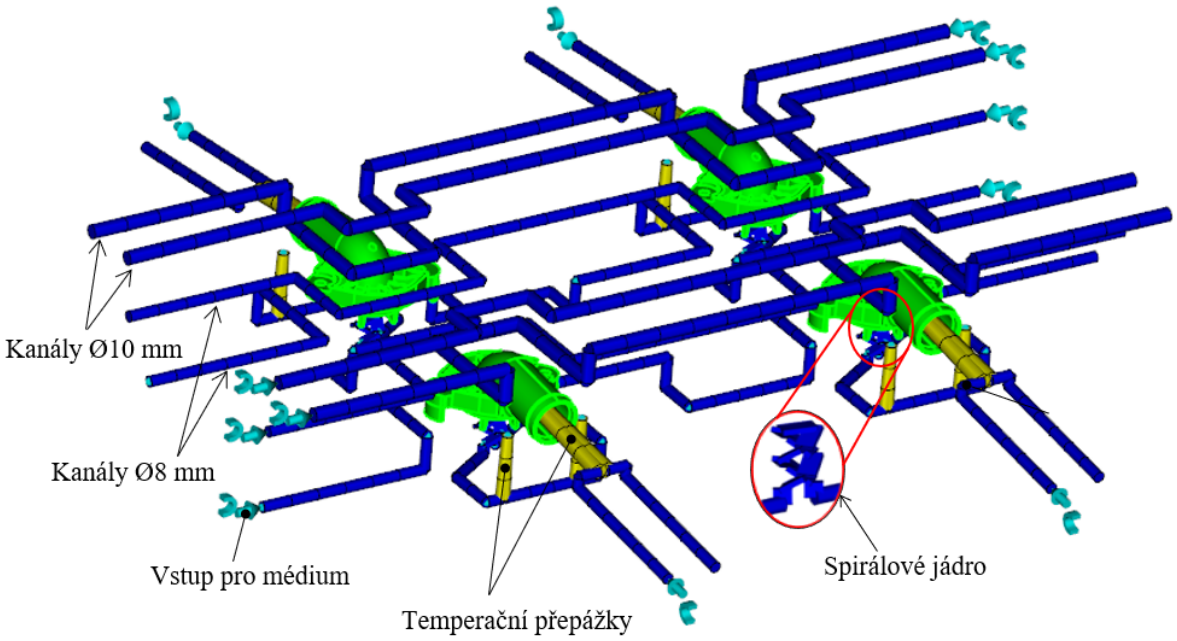
9.6 Návrh temperačního systému

Temperační systém byl navržen dvojího typu, a to temperační systém vyráběný standartními konvenčními nástroji (např. vrtáním) a temperační systém vyráběný konformně (např. slinováním). Pro obě metody bylo zvoleno temperační médium složené z vody a glykolu v poměru 20/80 % při nastaveném tlaku 250 kPa (2,5 bar) a teplotě 65 °C. Oba systémy byly zkonstruovány s ohledem na účinnost temperace formy, ale i na umístění vyhazovačů a dalších komponent vstřikovací formy.

Temperační systém byl do programu Moldflow naimportován z programu SolidWorks ve formátu *.igs tvořený křivkami, kterým po naimportováni byly přiděleny potřebné parametry a následně vysíťovány.

9.6.1 Konvenční temperační systém

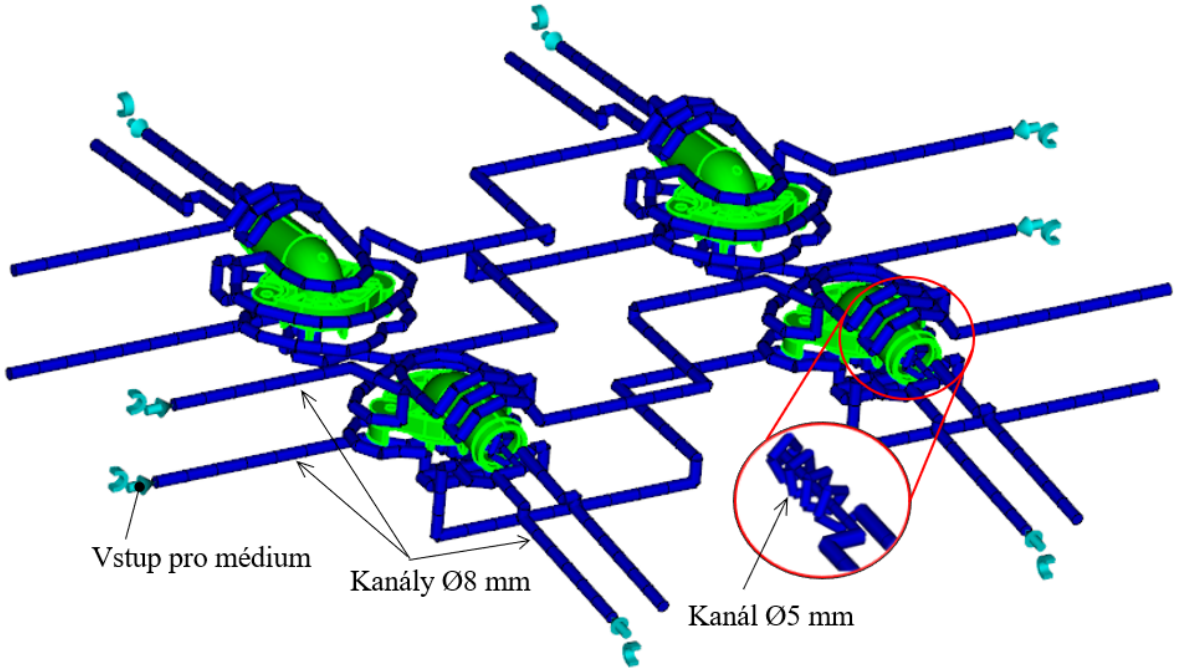
Konvenční temperační systém byl navržen jako soustava vrtaných kanálů o průměrech 8 mm a 10 mm, dále zde byly použity spirálové přepážky a spirálová jádra pro zvýšení efektivity odvodu tepla v obtížněji dostupných místech (obr. 89). Pro horký rozvodný systém byl navržen oproti studenému vtokovému systému o jeden okruh navíc, který se nachází v horní části tvarových částí z důvodu zajištění rovnoměrného teplotního pole okolo vyhřívaných trysek a snížení přenosu tepla do formy.



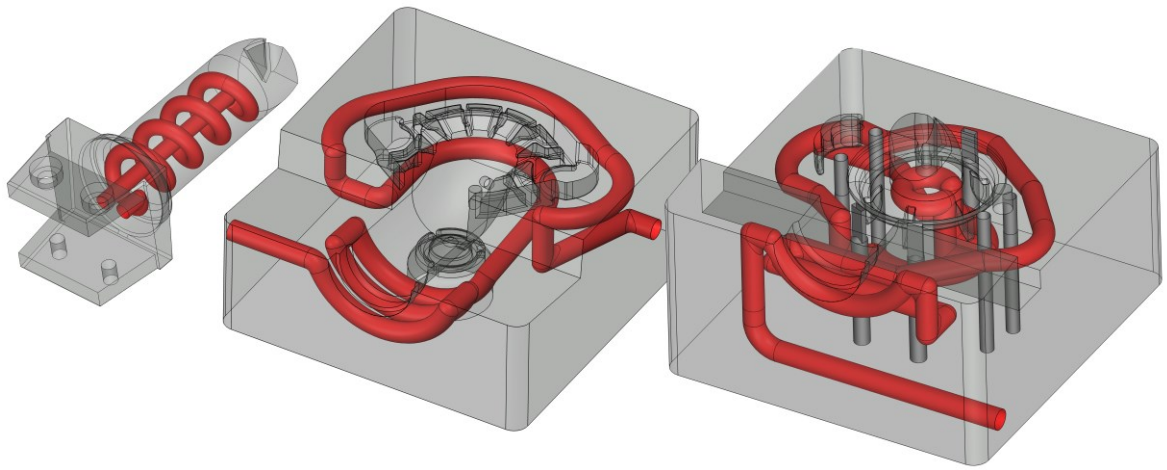
Obr. 89: Konvenční temperační systém.

9.6.2 Konformní temperační systém

Konformní temperační systém je navržen jako soustava kanálů o průměrech 8 mm a 5 mm. Konformní chlazení je navrženo pouze pro tvarové vložky a jádra, nikoliv pro kotevní desky a posuvné čelisti. V tvarových vložkách jsou navrženy kanály o průměru 8 mm a v tvarovém jádře jsou kanály o průměrech 5 mm ve tvaru spirály (obr. 90, obr. 91). Přívodní kanály k tvarovým vložkám i tvarovému jádru mají průměr 8 mm. Pro průměry 5 mm je zapotřebí používat upravené temperační médium kvůli větší tendenci zanášení. Značnou výhodou konformního chlazení je možnost navést kanály do míst, které by standartními konvenčními metodami byly nevyrobitelné. Nevýhodou je vysoká výrobní cena.



Obr. 90: Konformní temperační systém.



Obr. 91: Tvarové části s konformním chlazením.

9.7 Procesní parametry

V analýzách byly upravovány procesní parametry jako je teplota taveniny, teplota formy, čas plnění, doba dotlaku, bod přepnutí na dotlak a další nezbytně nutné parametry pro optimalizaci vstřikovacího procesu.

U všech šesti analýz byla před vlastním nastavením procesních parametrů spuštěna předběžná analýza s automaticky nastavenými parametry. Na základě získaných výsledků z automatické analýzy byly jednotlivé parametry upraveny a optimalizovány. U všech zpracovaných analýz byla pro přehlednost na začátku každé kapitoly uvedena tabulka s nastavenými a výslednými hodnotami.

9.8 Vyhodnocované parametry

Software Autodesk Moldflow při nastavení kompletní analýzy „Cool + Fill + Pack + Warp“ poskytuje mnoho výsledků, ale v této práci byly vybrány pouze určité parametry, které jsou nezbytné k návrhu a optimalizaci vstřikovacího procesu.

V následujících analýzách byly vyhodnocovány následující parametry:

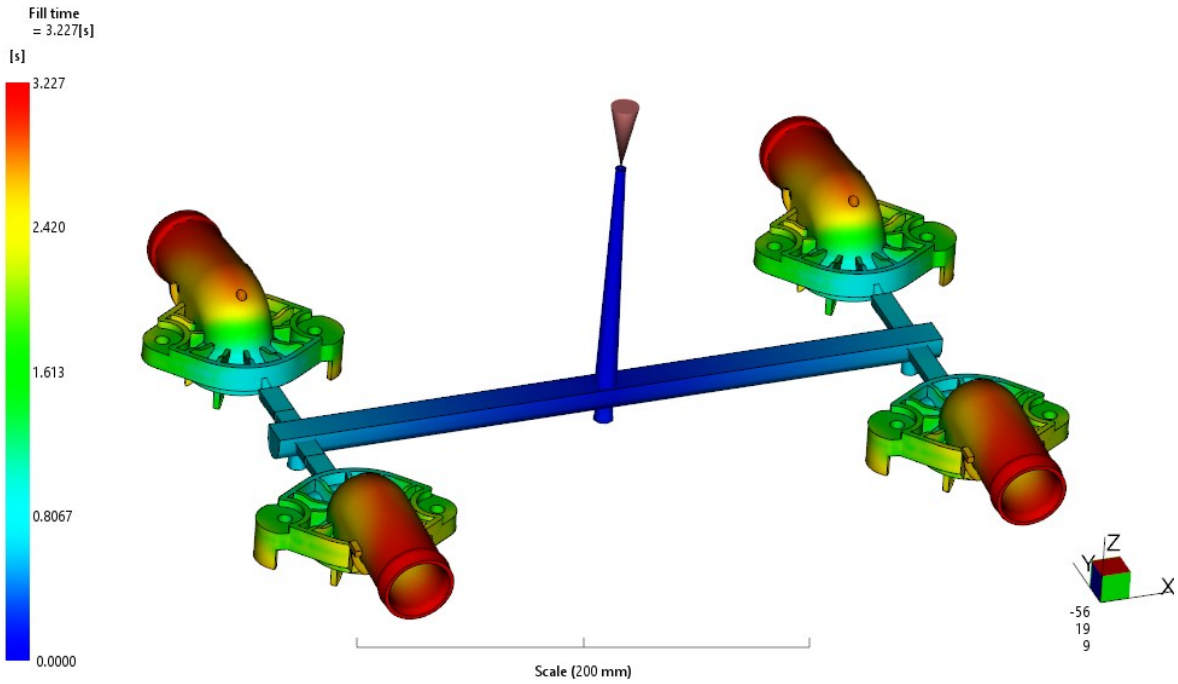
- Čas plnění (Fill time)
- Střední teplota taveniny (Bulk temperature)
- Čas k dosažení vyhazovací teploty (Time to each ejection temperature)
- Tlak taveniny ve vtokovém ústí (Preassure at injection location: XY Plot)
- Propadliny (Sink marks, estimate)
- Celková deformace způsobená všemi efekty (Deflection, all effects: Deflection)
- Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)
- Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency)

9.9 Analýza 1

Pro analýzu 1 byl použit materiál PA66-GF30 v kombinaci se studeným vtokovým systémem a konvenčním temperačním systémem. Teplota taveniny vstřikovaného materiálu byla nastavena na 285 °C, teplota formy na 75 °C, čas plnění 3 s, přepnutí na dotlak při 98 % zaplnění objemu dutiny formy, působení dotlaku po dobu 12 s při hodnotě 80 % z maximální hodnoty vstřikovacího tlaku.

9.9.1 Čas plnění, střední teplota taveniny

Čas plnění je čas, za který se naplní všechny dutiny vstřikovací formy vstřikovaným materiálem. Z ekonomického hlediska by čas vstřikování měl být co nejkratší, z technologického hlediska takový, aby nevznikaly vady na výrobku. Doba plnění dutin vstřikovací formy v případě analýzy 1 je 3,23 s (viz. obr. 92). Do míst, která se nachází v nejvzdálenějším místě od vtoku dotekla tavenina nejpozději (červená místa), naopak místa blízká ústí vtoku byla zaplněna nejdříve (modrá místa). Tavenina dotekla do všech míst ve stejný čas, jednotlivé vtoky jsou vybalancované a navržený vtokový systém je vyhovující.

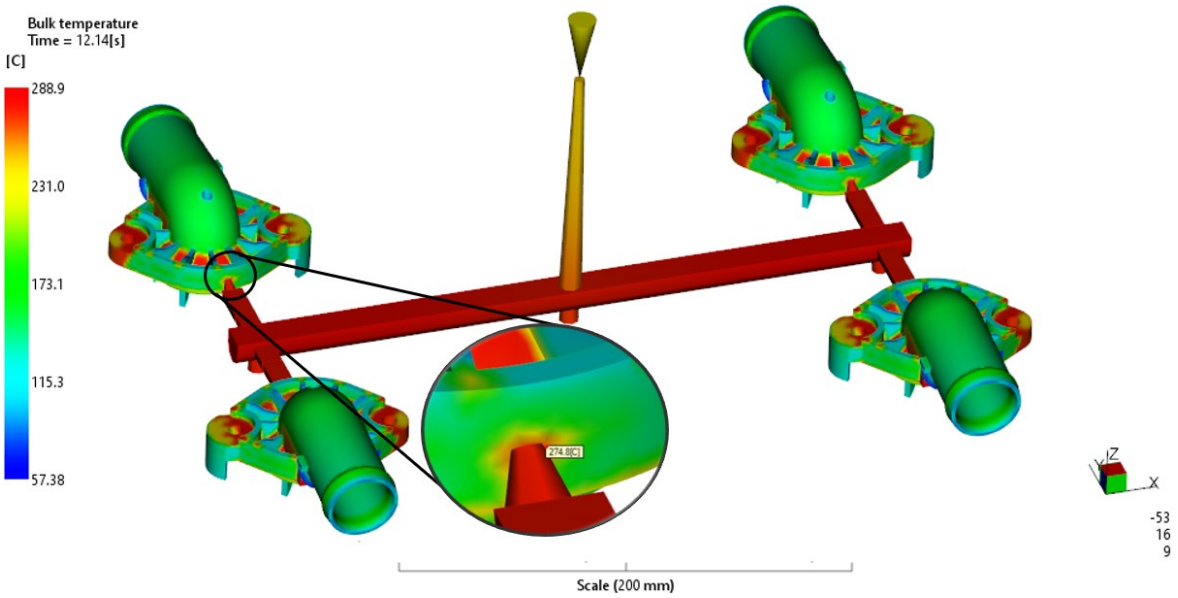


Obr. 92: Čas plnění – analýza 1.

Rychlost vstřikování, resp. čas plnění je limitován maximální teplotou taveniny, kterou je nutné hlídat z hlediska maximálních hodnot. K ověření, zda nedochází k překročení dovolené hodnoty taveniny materiálu byl použitý výsledek střední teploty taveniny.

Střední teplota taveniny udává výsledek střední teploty v daných místech dutiny formy a je důležitým parametrem z hlediska návrhu procesních parametrů. Jak už bylo psáno na str. 88, výsledek také slouží pro kontrolu, zda vstřikovaný materiál nepřekročil dovolené hodnoty teploty taveniny. K nárůstu teploty dochází v zúžených místech, zejména ve vtokovém ústí. Pokud by teplota materiálu vzrostla nad maximální dovolenou hodnotu, došlo by k degradaci materiálu, která by vedla ke zvýšení tvorby vad a snížení mechanických vlastností materiálu.

Výsledek této analýzy je znázorněn na obr. 93. Maximální hodnota střední teploty taveniny je 288,9 °C, tato hodnota nepřekračuje maximální dovolenou teplotu materiálu 290 °C, jejíž překročení by vedlo k degradaci materiálu. V čase přibližně 12 s dochází ke snížení teploty okolo ústí a materiál začíná zamrzat, čímž je tato hodnota maximální hodnotou pro působení dotlaku.



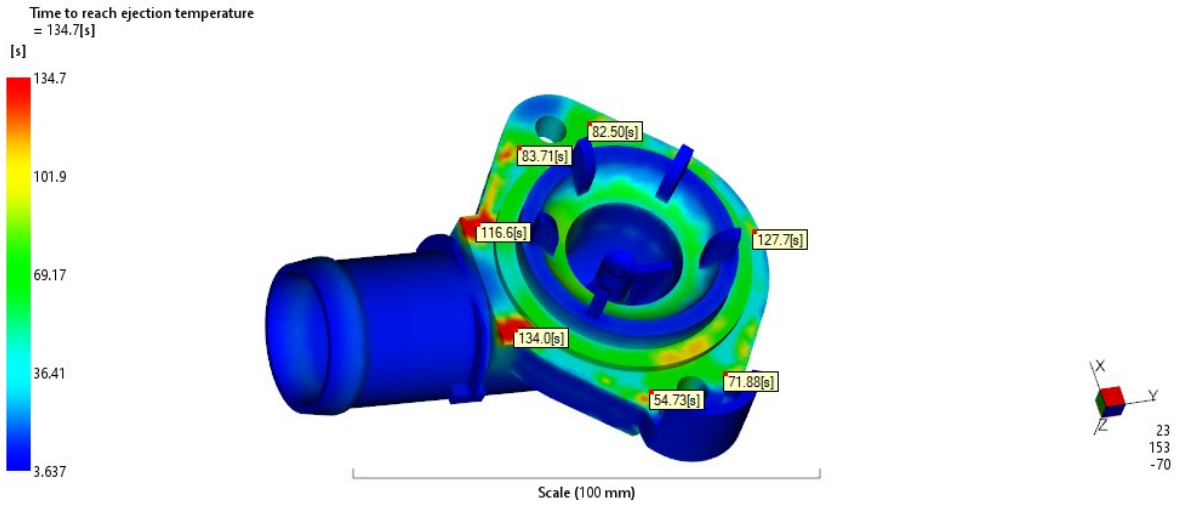
Obr. 93: Střední teplota taveniny – analýza 1.

9.9.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty

Čas pro ochlazení dílu na vyhazovací teplotu tvoří zpravidla největší část vstřikovacího cyklu, proto je snahou tento čas co nejvíce zkrátit. Nutné je však výstřik vyhodit až má dostatečnou tuhost a pevnost tak, aby nedošlo k jeho deformacím při odformování.

Čas potřebný pro odformování výstřiku v této analýze je 134,7 s. Při tomto čase je zamrzlých 90 % všech vrstev materiálu, přičemž je zaručená dostatečná tuhost materiálu pro odformování výrobku. Největší hodnoty času potřebného pro dosažení vyhazovací teploty

jsou v místech s největší tloušťkou stěn. V místech, kde leží vyhazovače, se časy pohybují od 54 s do 134 s. Časy jsou znázorněny na obr. 94.

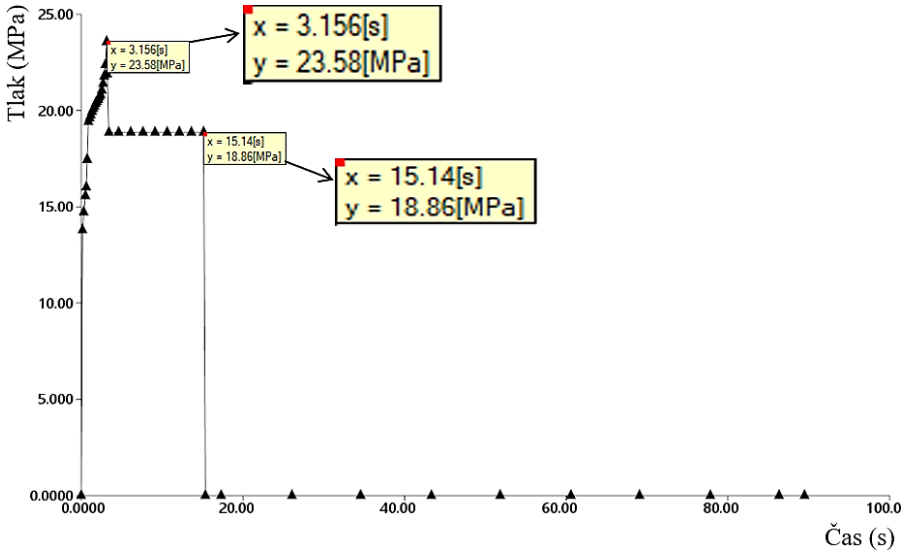


Obr. 94: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 1.

9.9.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí

Průběh tlaku ve vtokovém ústí je znázorněn na obr. 95. Maximální hodnota vstřikovacího tlaku dosažená v čase 3,16 s je 23,58 MPa. Při 98 % zaplnění dutiny formy taveninou dochází k přepnutí na dotlakovou fázi, tlak klesá na hodnotu 18,86 MPa, přičemž na této hodnotě setrvává po dobu 12 s. Po skončení dotlaku tlak klesá na původní hodnotu a setrvává na této hodnotě po dobu, než výrobek dosáhne vyhazovací teploty.

Vstřikovací tlak je nutné porovnávat s parametry vstřikovacího stroje, tak aby nedošlo k překročení maximálních hodnot. V této analýze maximální hodnota nebyla překročena.

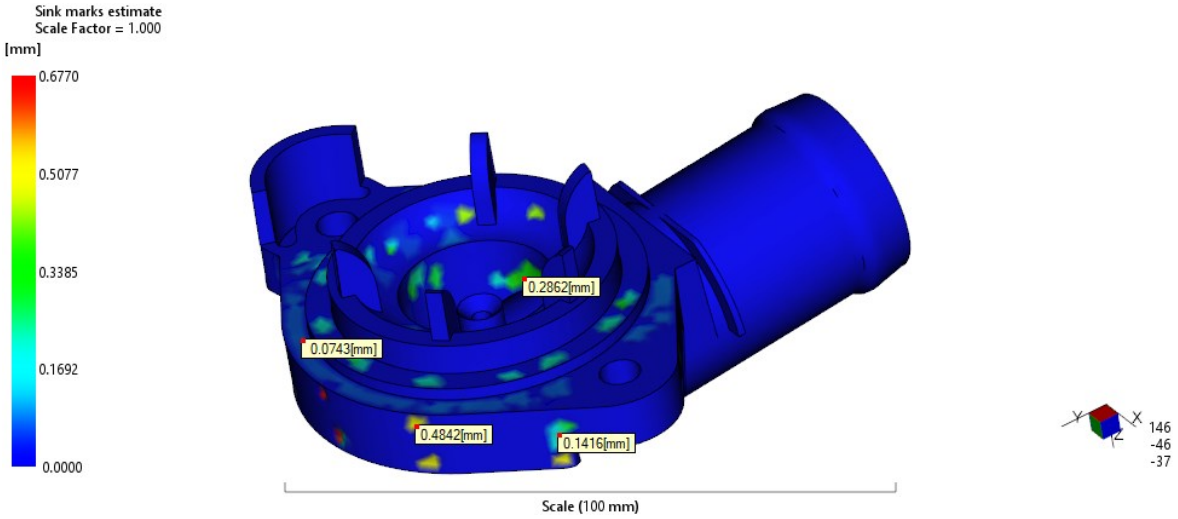


Obr. 95: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 1.

9.9.4 Propadliny

Propadliny vznikají především v důsledku smrštění při chladnutí výstřiku, v místech s větší tloušťkou stěn, v okolí žeber a ústí vtoku.

Propadliny predikované na výrobku dosahují nejvyšší hodnoty 0,68 mm (viz. obr. 96). Maximální hodnota propadlin se nachází v okolí místa ústí vtoku, tyto propadliny nemají vliv na funkci. V dosedacích plochách se vykytují propadliny maximálně do 0,1 mm, ve vnitřním prostoru výstřiku do 0,3 mm.

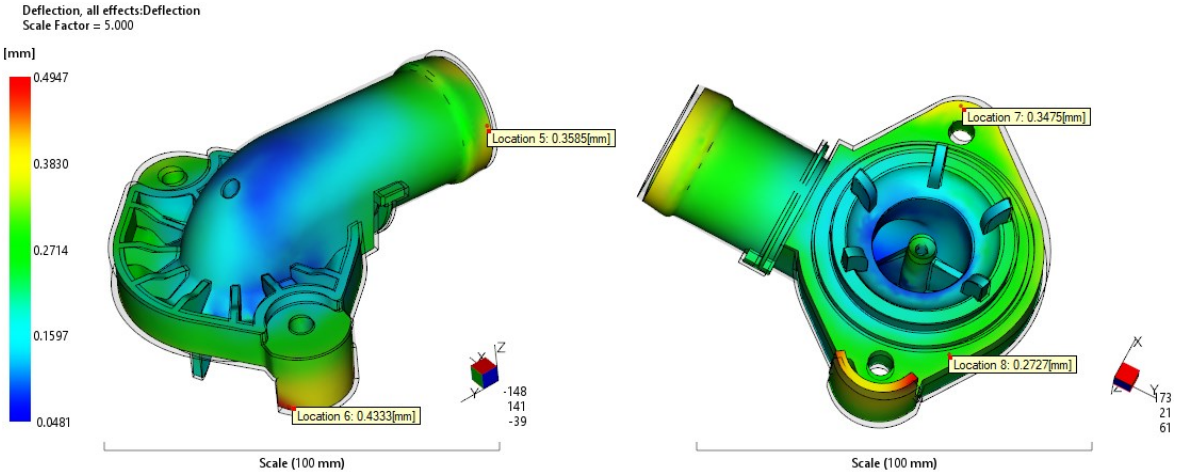


Obr. 96: Propadliny – analýza 1.

9.9.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty

Výsledek celkové deformace udává, jak se výrobek zdeformoval vůči dutině vstřikovací formy. Na celkových deformacích se podílí vlivy smrštění, chlazení a orientace vláken. Celková deformace je důležitá pro návrh rozměrů dutiny vstřikovací formy.

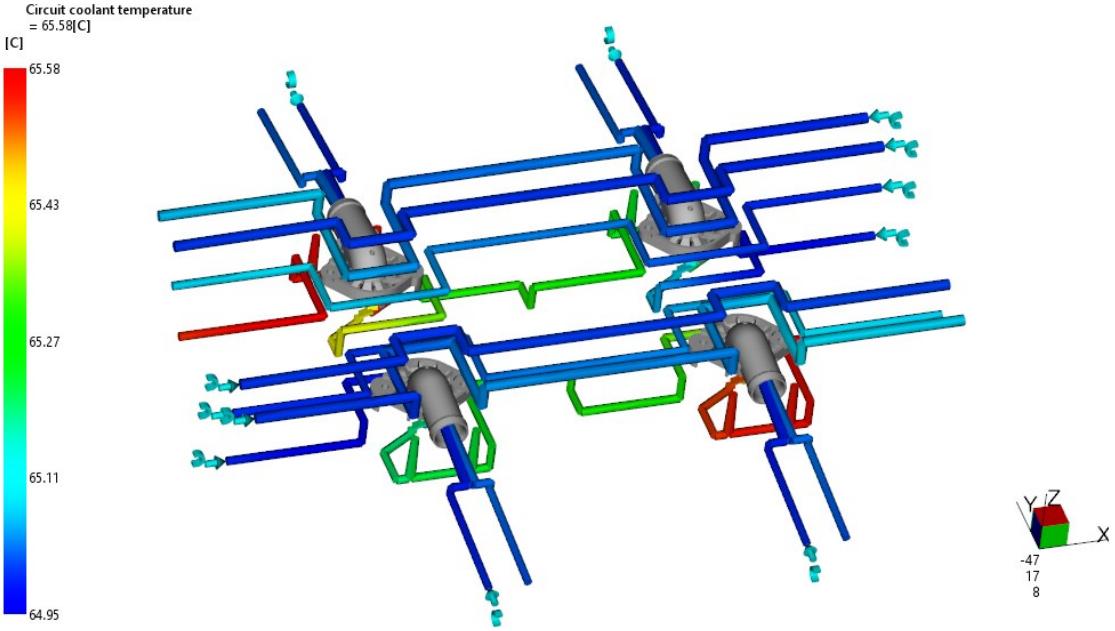
Deformace vzniklé všemi vlivy dosahují u této analýzy maximální hodnoty 0,49 mm. Deformace jsou vzniklé především vlivem smrštění materiálu a naorientování skleněných vláken. Skleněná vlákna mají vliv nejen na deformace výrobku, ale také na výsledné mechanické vlastnosti. Největší deformace jsou znázorněny na obr. 97 na str. 92 červenou barvou, jedná se o místa na konci výstřiku a v dolní rohové části výstřiku. Nejmenší deformace jsou znázorněny modrou barvou vyskytující se na horní části výstřiku.



Obr. 97: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 1.

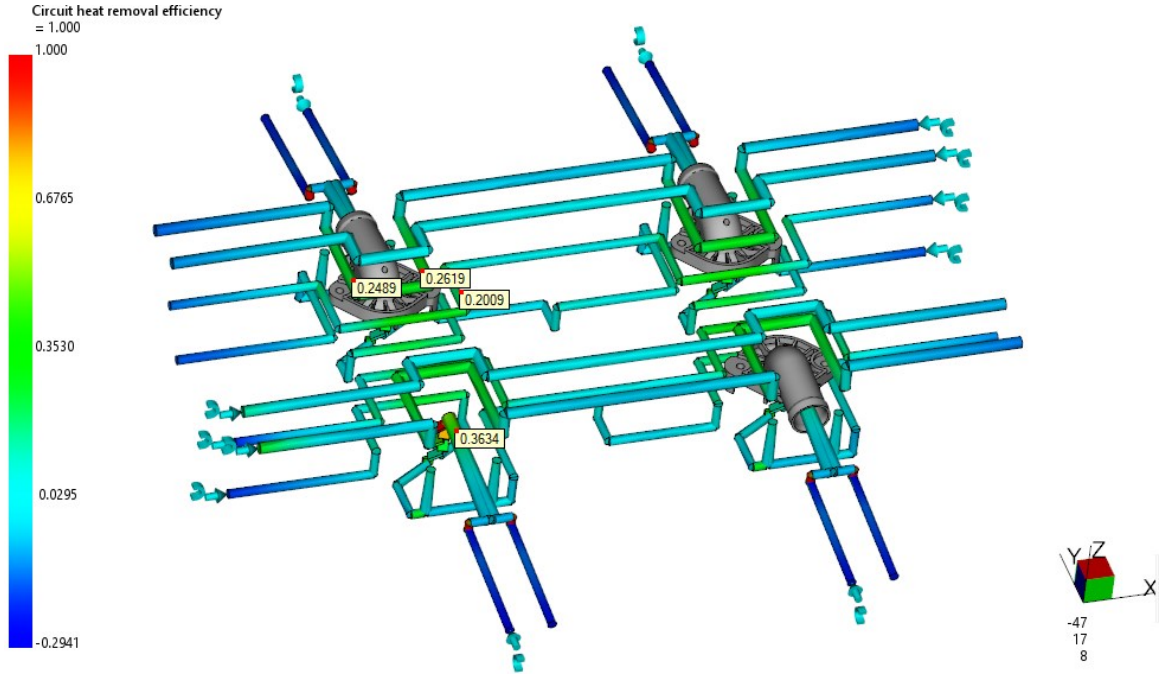
9.9.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla

Teplota temperačního média v okruzích by neměla překročit maximální dovolený rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem více jak o 3 °C. Dle výsledku analýzy 1 je maximální rozdíl teplot v okruzích 0,63 °C. Největší nárůst teplot je pozorovatelný z obr. 110 v temperačním systému pohyblivé části formy (spodní okruh), a to v části okolo přepážek (červená barva).



Obr. 98: Teplota temperačního média – analýza 1.

Efektivita odvodu tepla je ukazatelem účinnosti temperačního okruhu v daných místech. Výsledek je znázorněný na obr. 99 na str. 93. Maximální hodnoty jsou dosaženy ve spirálovém jádře, a to hodnoty blízké k 1 (červená místa), kde dochází k nejlepšímu odvodu tepla. V okolí kolem tvarových dutin se hodnoty pohybují od 0,1 do 0,25.



Obr. 99: Efektivita odvodu tepla – analýza 1.

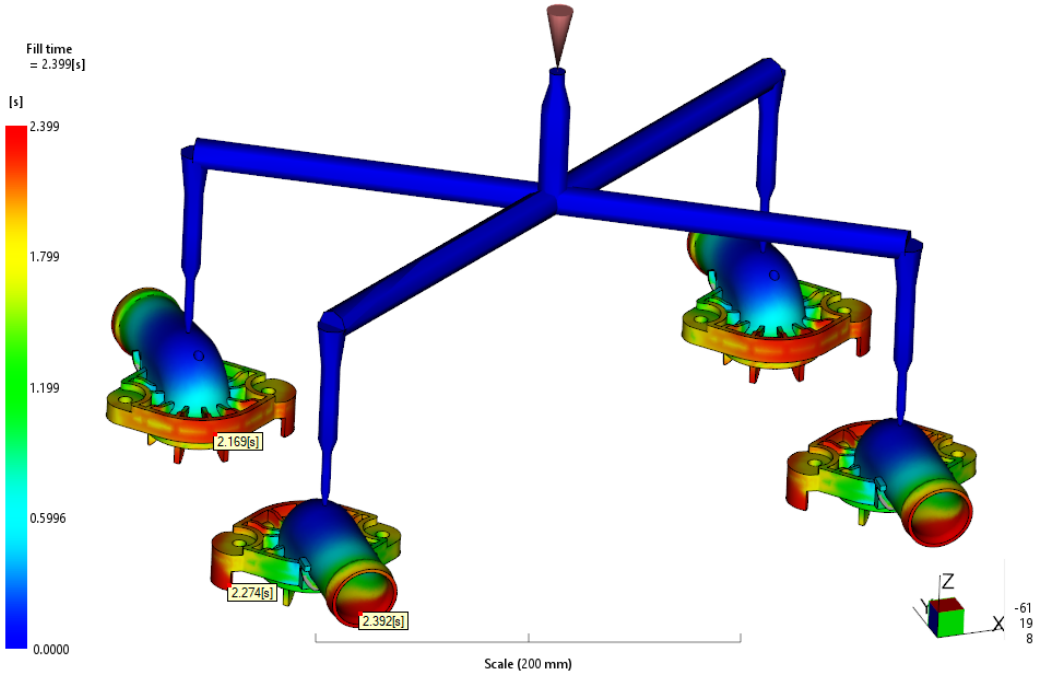
9.10 Analýza 2

Pro analýzu 2 byl použit opět materiál PA66-GF30 v kombinaci s horkým vtokovým systémem a konvenčním temperačním systémem. Teplota taveniny byla nastavena na 285 °C, teplota formy na 75 °C, čas plnění 2,2 s, přepnutí na dotlak při 98 % zaplnění objemu dutiny formy, působení dotlaku po dobu 12 s při hodnotě 80 % z maximální hodnoty vstřikovacího tlaku.

Tato analýza byla vyhodnocena jako nejvýhodnější z hlediska návrhu konstrukce formy a jejího provozu. Z hlediska dalších kritérií ovlivňující návrh formy byla tato analýza doplněna o výsledky smykové rychlosti, uzavírací síly, studených spojů a vzduchových kapes.

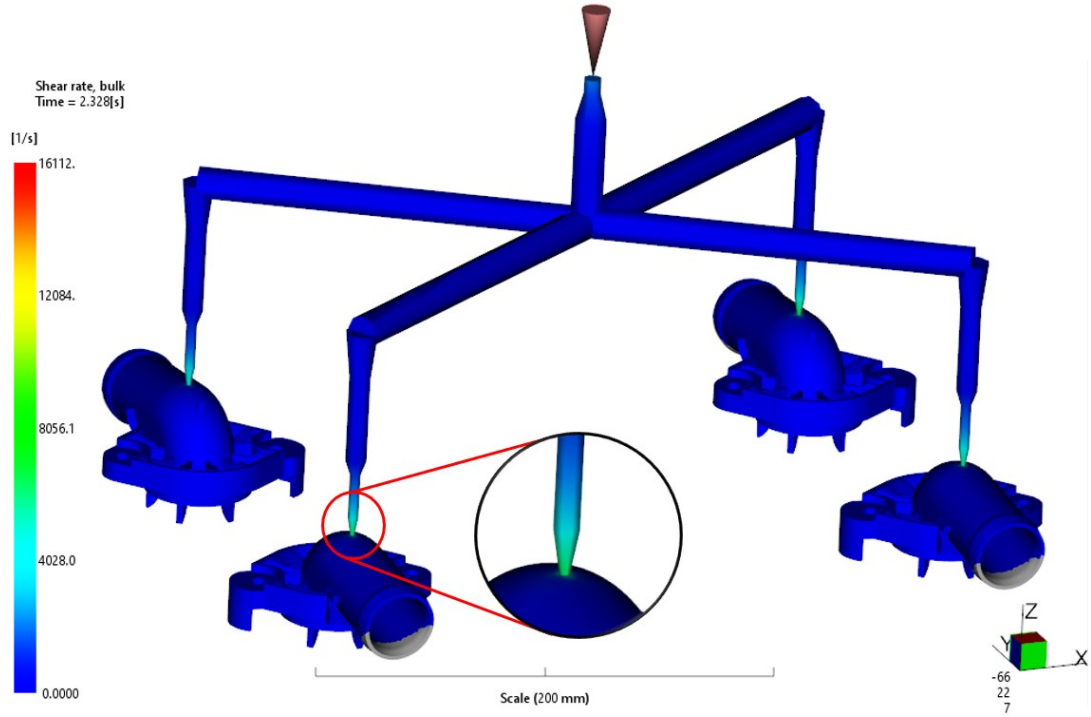
9.10.1 Čas plnění, smyková rychlost, střední teplota taveniny

Výsledný čas pro zaplnění celé dutiny formy je dle výsledků analýz 2,4 s (viz. obr. 100, str. 94). V porovnání s analýzou 1, kde byl použit studený vtokový systém, dojde k zaplnění o 0,83 s dříve.



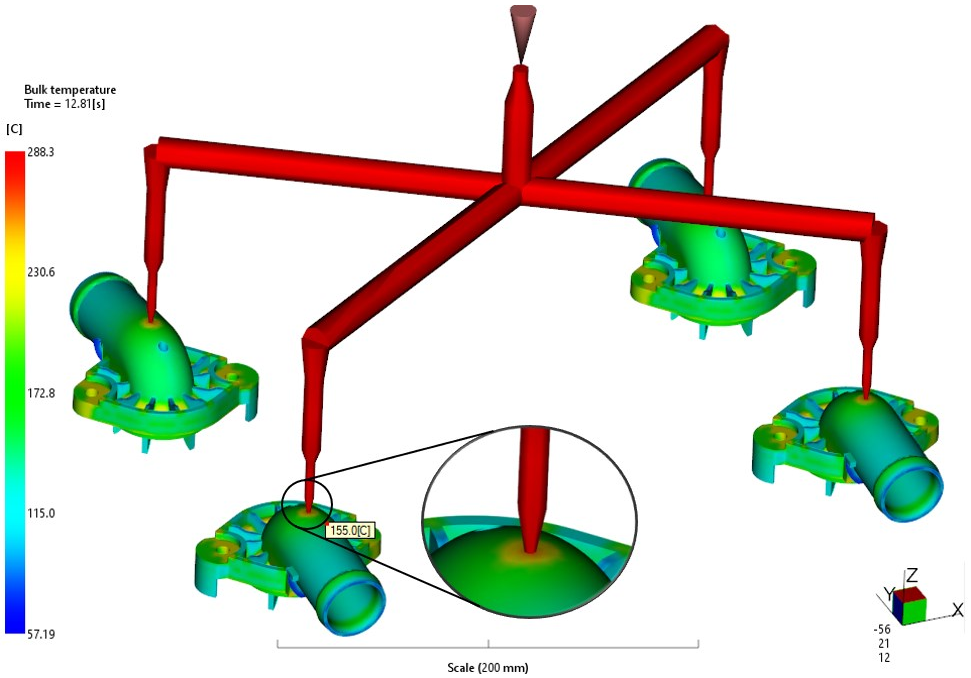
Obr. 100: Čas plnění – analýza 2.

Smyková rychlost je limitována maximální dovolenou hodnotou materiálu, která je pro PA66-GF30 60 000 s^{-1}. Překročení této hodnoty by způsobilo degradaci materiálu a tím vznik vad ve výstřiku. Z obr. 101 je patrné, že maximální hodnota smykové rychlosti dosahuje 16 112 s^{-1}, čímž dovolená hodnota nebyla překročena. K největšímu smykovému namáhání dochází ve vtokovém ústí.



Obr. 101: Smyková rychlost – analýza 2.

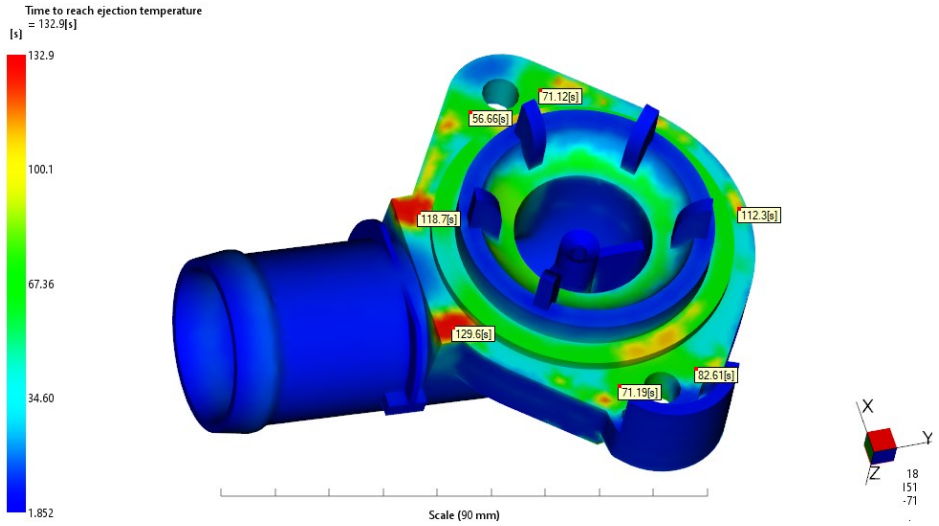
Střední teplota taveniny dosahuje nejvyšší hodnoty 288,3 °C a nepřekračuje maximální hodnotu materiálu 290 °C. Oproti nastavené hodnotě vzrostla teplota vlivem tření ve vtokovém ústí o 3,3 °C. Z obr. 113 je patrné, že okolí ústí vtoku zamrzá přibližně okolo 12 s. Na tuto hodnotu byla nastavena i doba dotlakové fáze.



Obr. 102: Střední teplota taveniny – analýza 2.

9.10.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty

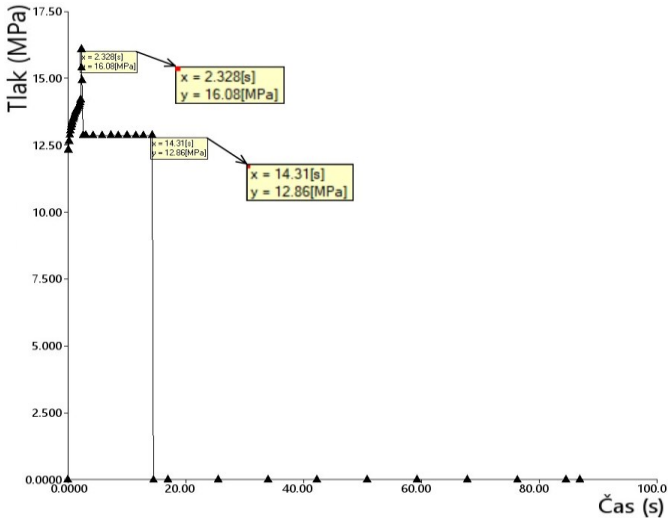
Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty v celém objemu výrobku je 132,9 s. Oproti předchozí variantě se studeným vtokovým systémem došlo ke zkrácení doby potřebné pro dosažení vyhazovací teploty o 1,8 s.



Obr. 103: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 2.

9.10.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí

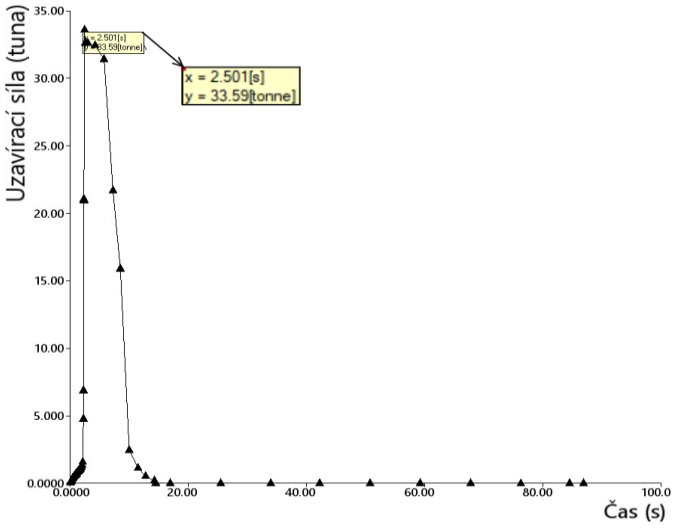
Maximální hodnota vstřikovacího tlaku dosažená v čase 2,33 s je 16,08 MPa (viz. obr. 104). Při 98 % zaplnění dutiny formy taveninou dochází k přepnutí na dotlakovou fázi, tlak klesá na hodnotu 12,86 MPa, přičemž na této hodnotě setrvává po dobu 12 s. V porovnání s analýzou 1 se studeným vtokovým systémem dochází u horkého vtokového systému k menším vstřikovacím tlakům i při použití vyšší vstřikovací rychlosti, a to o 7,5 MPa.



Obr. 104: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 2.

9.10.4 Uzavírací síla

Uzavírací síla je jedním ze základních parametrů pro volbu vstřikovacího stroje. Uzavírací síla dosahuje maximální hodnoty 33,6 tun (336 kPa) v čase 2,5 s (viz. obr. 105). K maximální hodnotě dochází na konci plnící fáze. Hodnota vstřikovacího tlaku byla použita pro návrh vstřikovacího stroje v kap. 9.2 na str. 79.

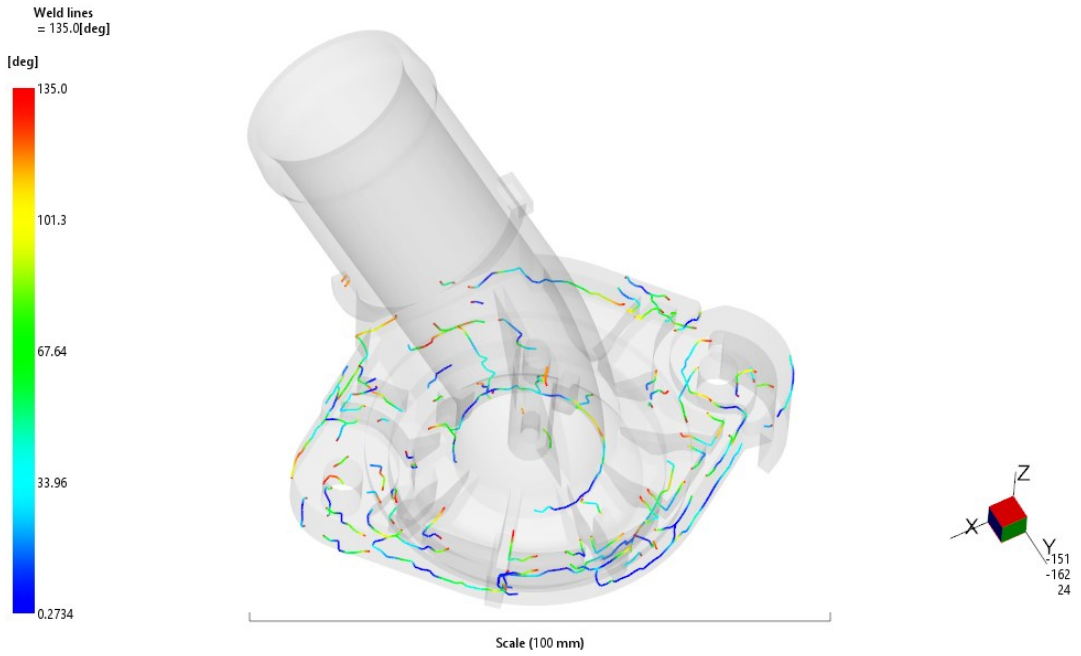


Obr. 105: Graf průběhu uzavírací síly v závislosti na čase.

9.10.5 Studené spoje, vzduchové kapsy a propadliny

Studený spoj vzniká spojením dvou čel nebo více čel taveniny. Způsobuje pohledovou vadu ve formě spojnice a zhoršuje mechanické vlastnosti. Snahou je tato místa odstranit vhodnou konstrukcí dílu, případně přesunout do míst, která nejsou mechanicky namáhána.

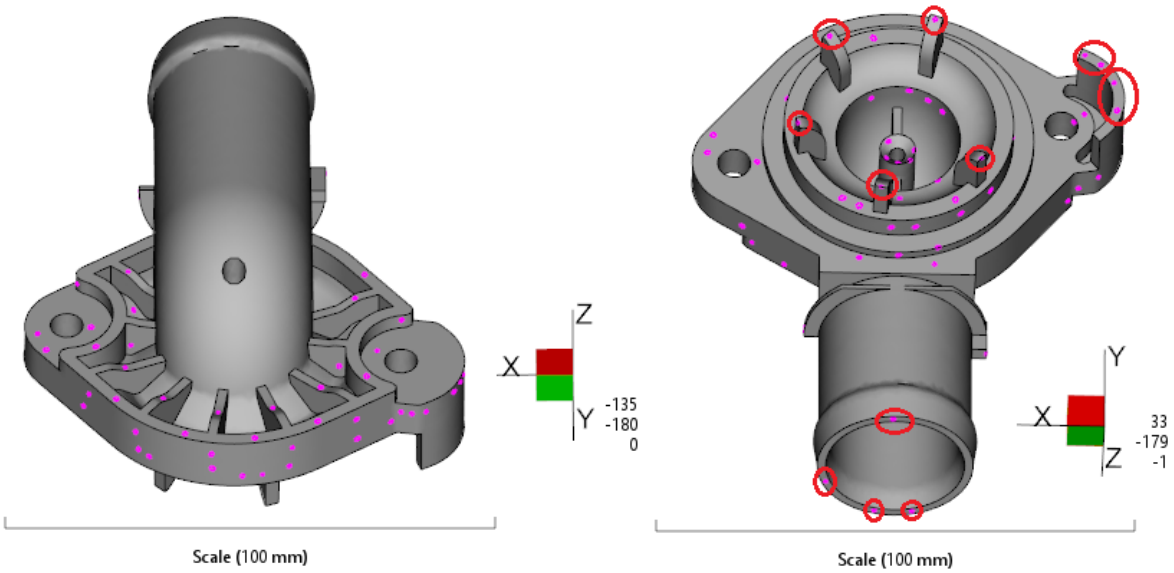
Studené spoje na výrobku se nachází převážně na straně pro uchycení na bloku motoru (viz. obr. 106). Většina těchto spojů leží na méně kritických místech, nebo jsou naorientovány tak, že nevykazují možnost vzniku větších deformací. Studené spoje s možností vzniku rizika deformací se nachází v místech kolem otvorů pro uchycení pomocí šroubů na bloku motoru. V tomto případě byly studené spoje eliminovány zvýšením teploty taveniny na 285 °C. Místa, kde se čela taveniny potkávají, dosahují okolo 284 °C, čímž se vytváří v místě styku čel tavenin homogennější spoje, schopné vykazovat lepší mechanické vlastnosti. V případě, že by spoj stále vykazoval zhoršení mechanických vlastností, bylo by nutné jej odsunout do jiných míst například změnou polohy ústí vtoku, případně úpravou dalších technologických podmínek výroby.



Obr. 106: Studené spoje – analýza 2.

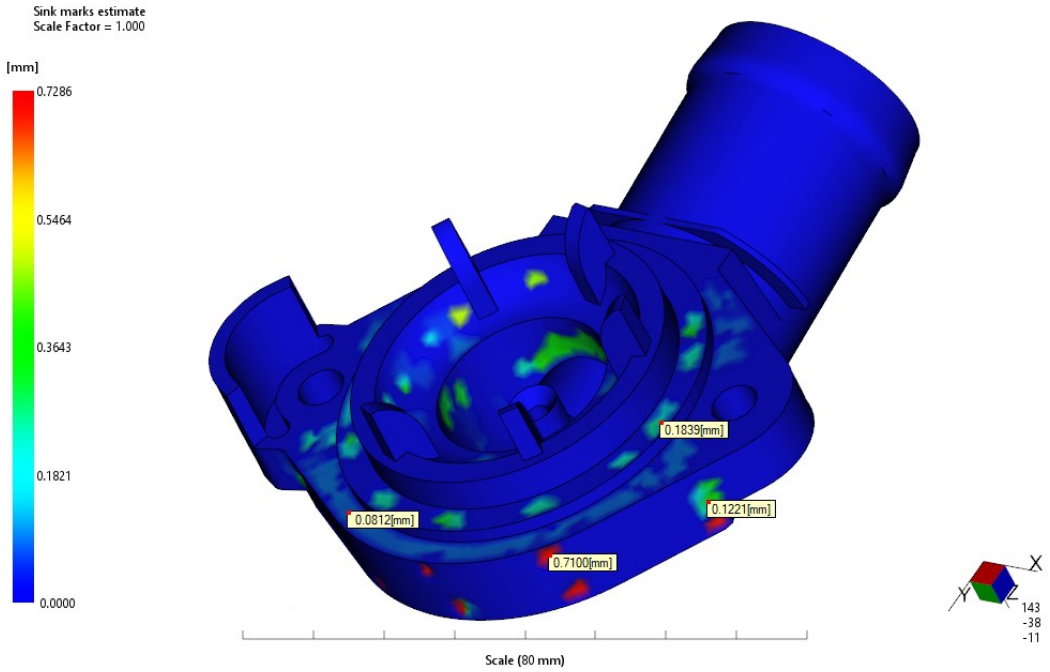
Vzduchové kapsy mohou způsobovat na výrobku vady, např. spálená místa, vznik bublin, nebo nedotečení taveniny do všech míst dutiny formy. Místa s možností uzavírání vzduchu jsou znázorněná na obr. 107 na str. 98. Vzduchové kapsy jsou predikovány z větší části v místech dělící roviny, vyhazovačů, posuvných čelistí a jader, odkud je předpokládán únik vzduchu vlivem vůlí mezi těmito částmi. K uzavření vzduchu by mohlo docházet

v zakroužkovaných místech. V případě potvrzení této skutečnosti záběhovými zkouškami formy by bylo nutné vyrobit odvzdušňovací kanál nebo využít normalizovaných odvzdušňovacích ventilů.



Obr. 107: Vzduchové kapsy – analýza 2.

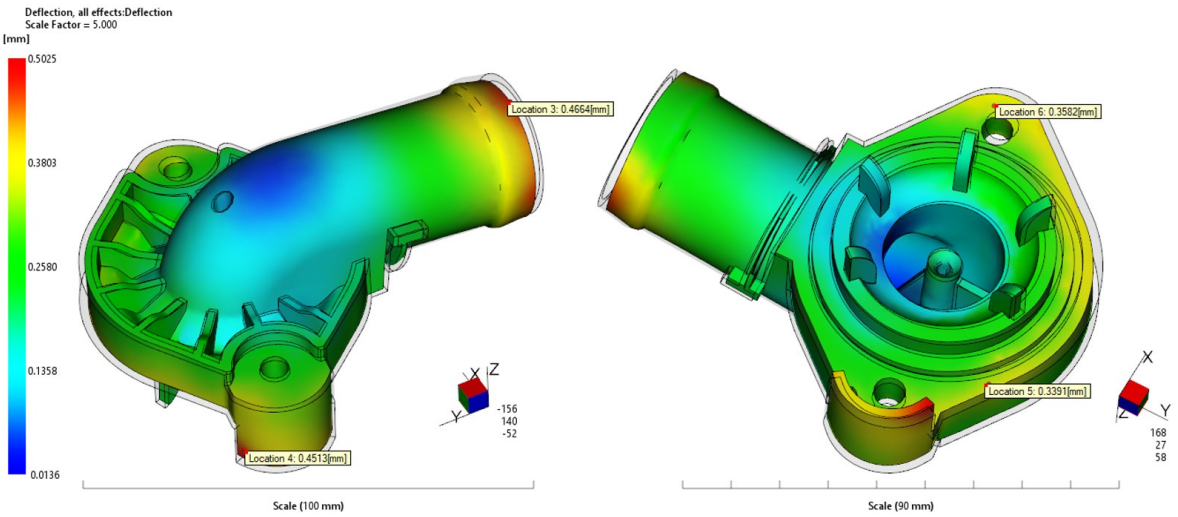
Propadliny predikované na výstřiku dosahují nejvyšší hodnoty 0,73 mm. Vůči předchozí variantě stoupla maximální hodnota o 0,05 mm, rozložení propadlin je podobné.



Obr. 108: Propadliny – analýza 2.

9.10.6 Celkové deformace způsobené všemi efekty

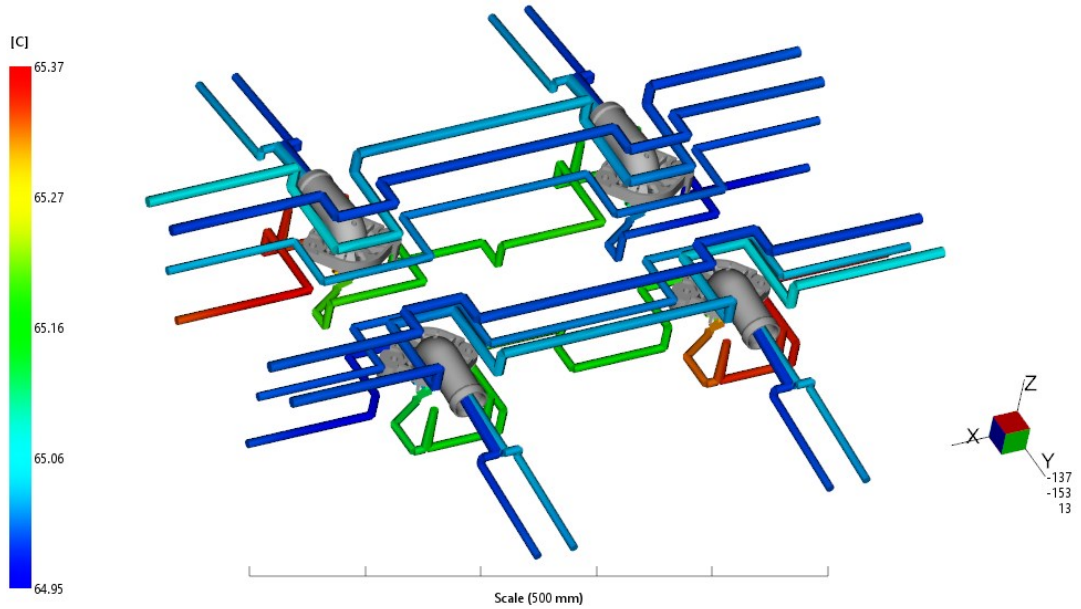
Celkové deformace vzniklé všemi efekty dosahují maximální hodnoty 0,50 mm. Nejméně deformovaná místa se nachází v okolí ústí vtoku, kde jsou deformace nejvíce eliminovány délkou působení dotlaku a žebrem, které se nachází pod ústím vtoku. Ostatní deformovaná místa jsou podobná s analýzou 1, kde byla deformace menší pouze na konci trubky příruby (místa pro napojení hadice).



Obr. 109: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 2.

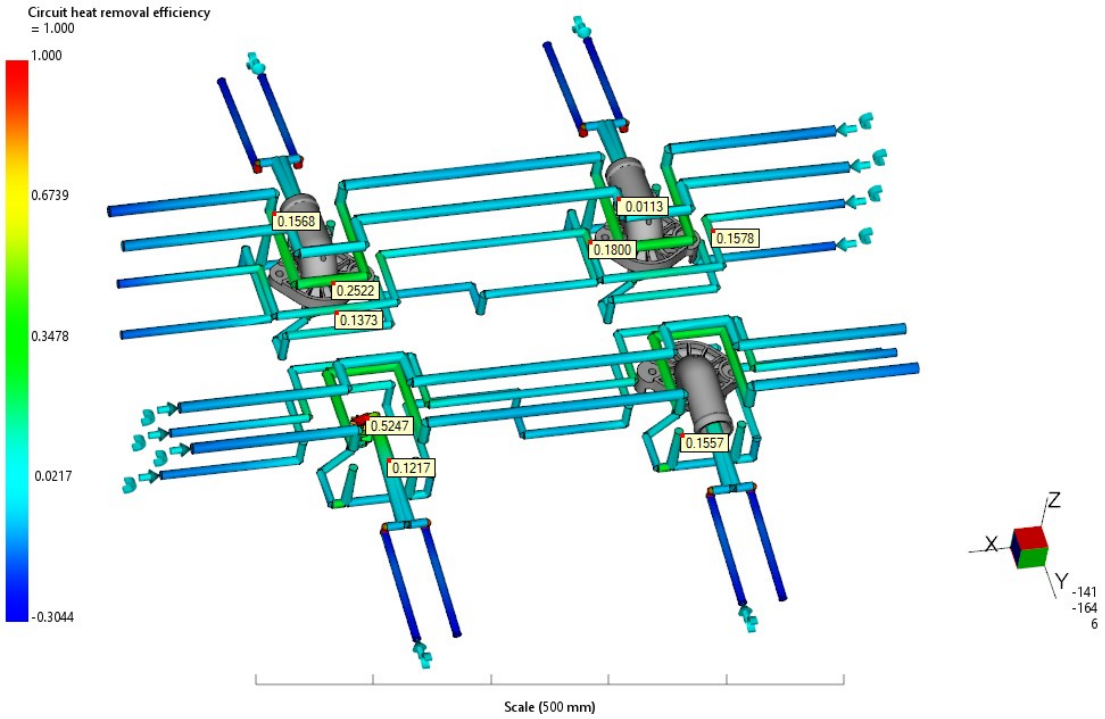
9.10.7 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla

Teplota temperačního média v okruzích dosahuje mezi vstupem a výstupem rozdílu teplot 0,42 °C. Teplota média nepřekračuje maximální dovolený rozdíl teplot 3 °C.



Obr. 110: Teplota temperačního média – analýza 2.

Efektivita odvodu tepla dosahuje maximální hodnoty ve spirálovém jádře, a to hodnoty blížící se k 1 zajišťující nejlepší odvod tepla. V okolí kolem tvarových dutin se hodnoty pohybují od 0,1 do 0,26.



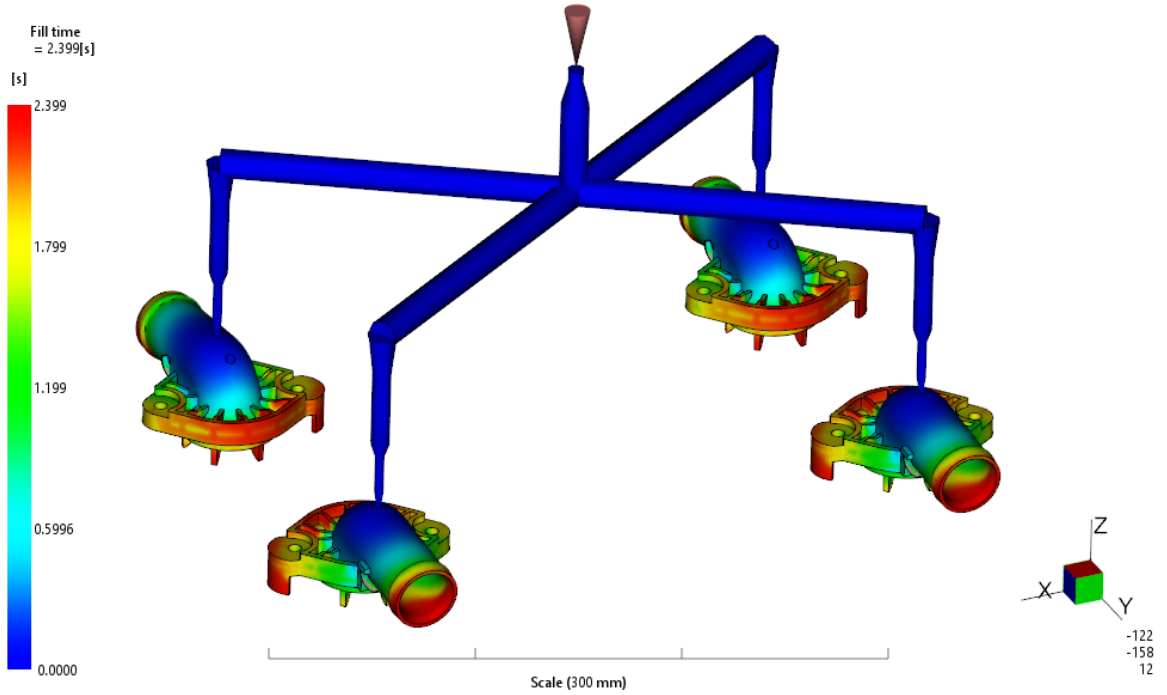
Obr. 111: Efektivita odvodu tepla – analýza 2.

9.11 Analýza 3

Pro analýzu 3 byl aplikován materiál PA66-GF30 v kombinaci s horkým vtokovým systémem a konformním temperačním systémem. Teplota taveniny byla nastavena na 285 °C, teplota formy na 75 °C, čas plnění 2,2 s, přepnutí na dotlak při 98 % zaplnění objemu dutiny formy, působení dotlaku po dobu 12 s při hodnotě 80 % z maximální hodnoty vstřikovacího tlaku.

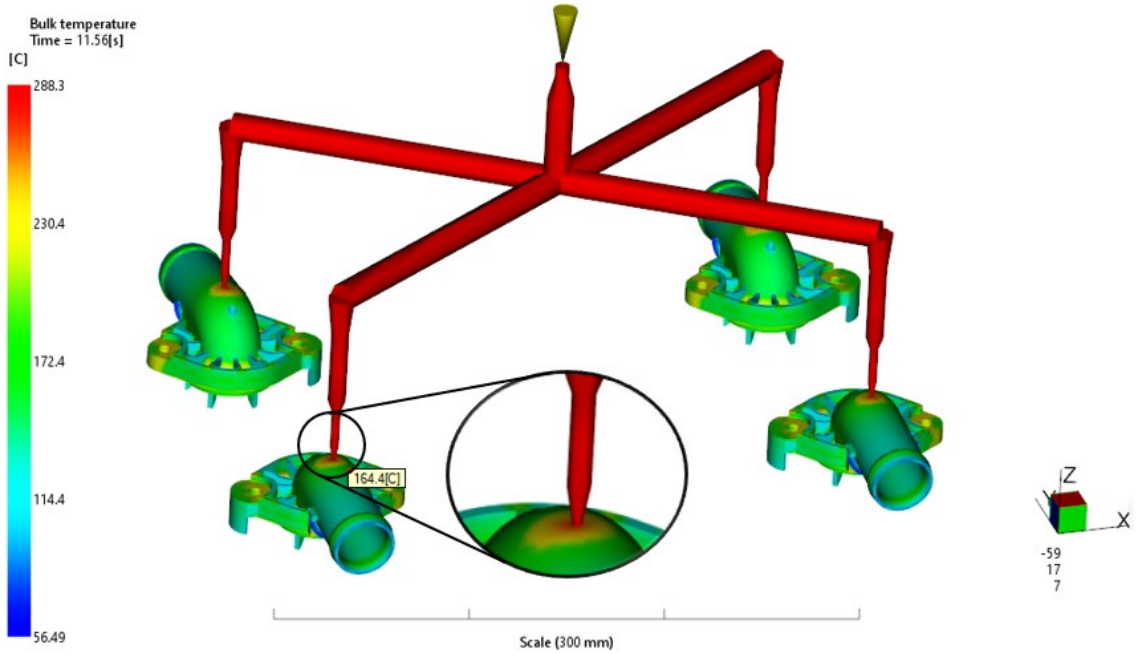
9.11.1 Čas plnění, střední teplota taveniny

Výsledný čas pro zaplnění celé dutiny formy je dle výsledků analýz 2,4 s (viz. obr. 112, str. 101. Výsledek je stejný jako u předešlé analýzy. Vtokový systém zaplnil dutinu rovnoměrně, tavenina zatekla do všech míst dutiny formy. Vtokový systém je z hlediska fáze plnění optimální.



Obr. 112: Čas plnění – analýza 3.

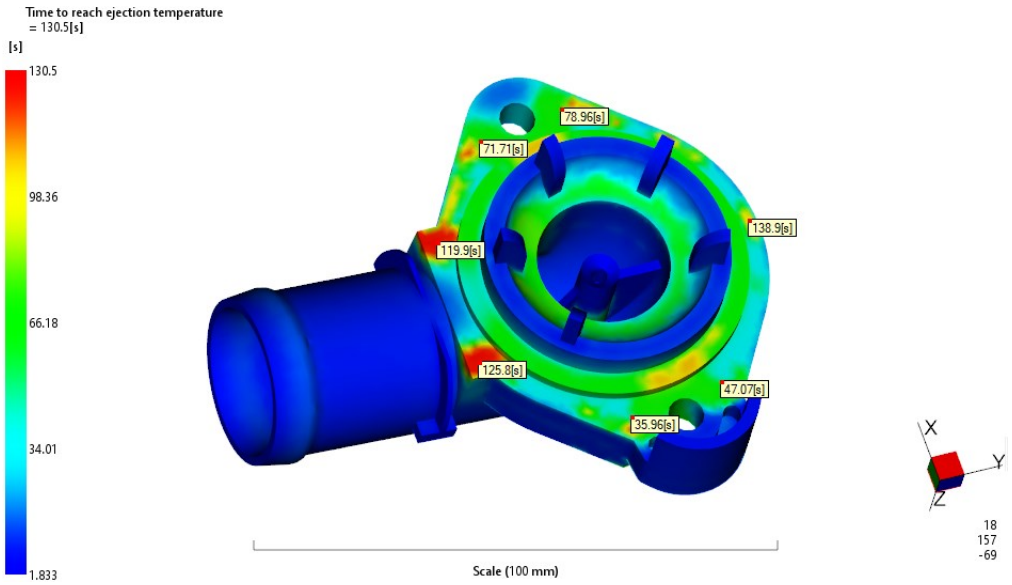
Střední teplota taveniny dosahuje nejvyšší hodnoty 288,3 °C a nepřekračuje maximální hodnotu materiálu 290 °C. Oproti nastavené hodnotě vzrostla teplota vlivem tření ve vtokovém ústí o 3,3 °C. Z obr. 113 je patrné, že okolí ústí vtoku zamrzá přibližně okolo 12 s. Na tuto hodnotu byla nastavena i doba dotlakové fáze.



Obr. 113: Střední teplota taveniny – analýza 3.

9.11.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty

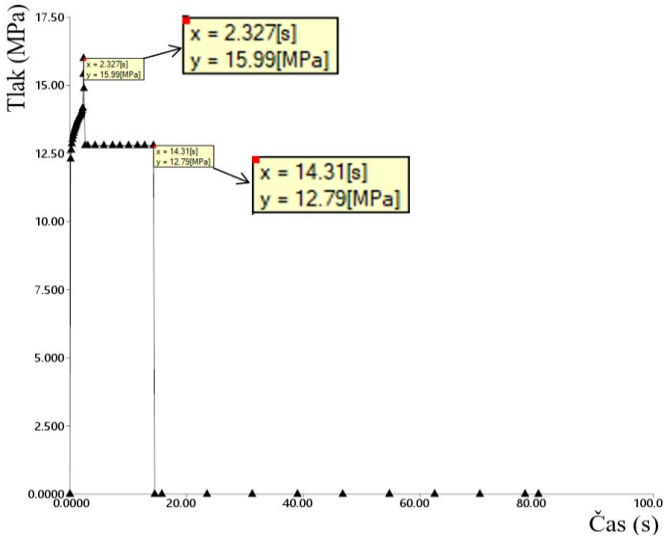
Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty v celém objemu výrobku je 130,5 s. Oproti předchozí variantě s konvenčním temperačním systémem v případě analýzy 1 došlo ke zkrácení času o 4,2 s, v případě analýzy 2 se zkrátil čas o 2,4 s.



Obr. 114: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 3.

9.11.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí

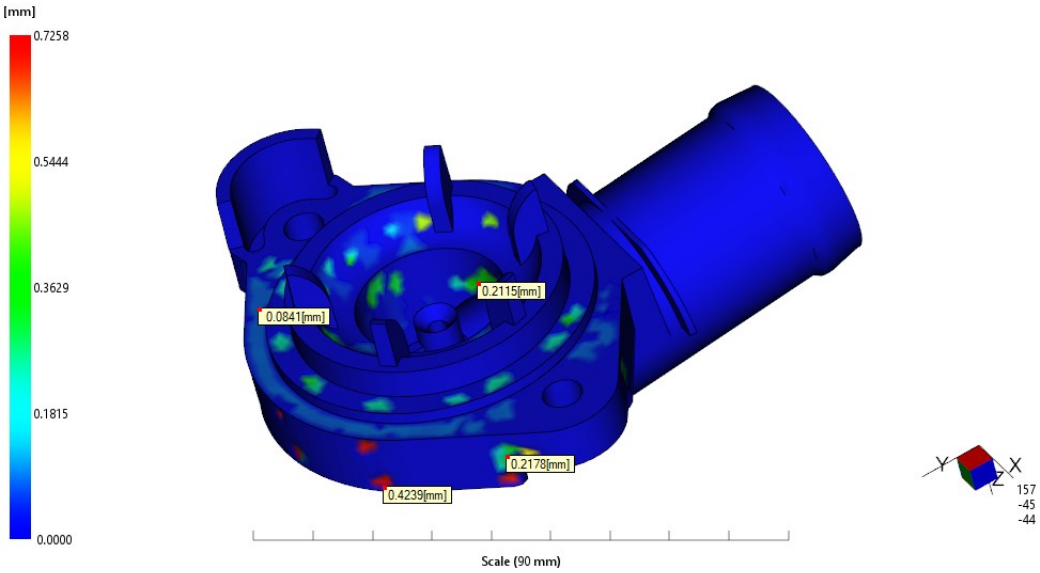
Průběh tlaku ve vtokovém ústí je znázorněn na obr. 115. Maximální vstřikovací tlak je 16 MPa. Hodnota dotlaku je 12,8 MPa. Doba dotlaku byla nastavena na 12 s. V porovnání s analýzou 1 a 2 je hodnota vstřikovacího tlaku nejnižší. Z hlediska vstřikovacího stroje vstřikovací tlak nebyl v tomto případě překročen. Hodnoty jsou obdobné jako u varianty 2.



Obr. 115: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 3.

9.11.4 Propadliny

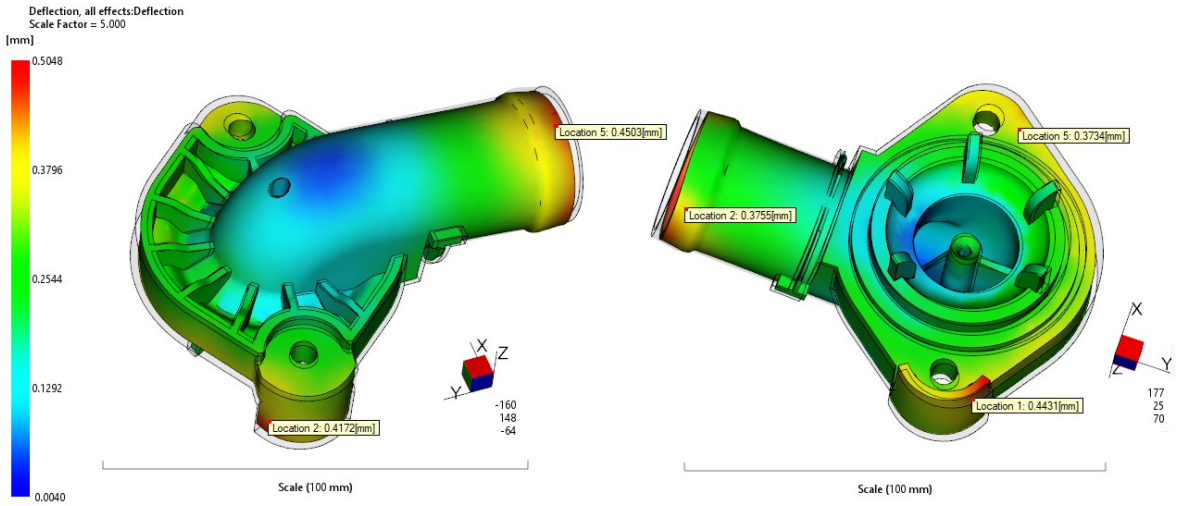
Propadliny predikované na výrobku dosahují nejvyšší hodnoty 0,73 mm. Hodnota je totožná s analýzou 2. Místa s nejvyšší hodnotou se nachází v nefunkčních částech výstřiku.



Obr. 116: Propadliny – analýza 3.

9.11.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty

Deformace vzniklé všemi vlivy dosahují maximální hodnoty 0,50 mm. Deformovaná místa jsou totožná s analýzou 2.

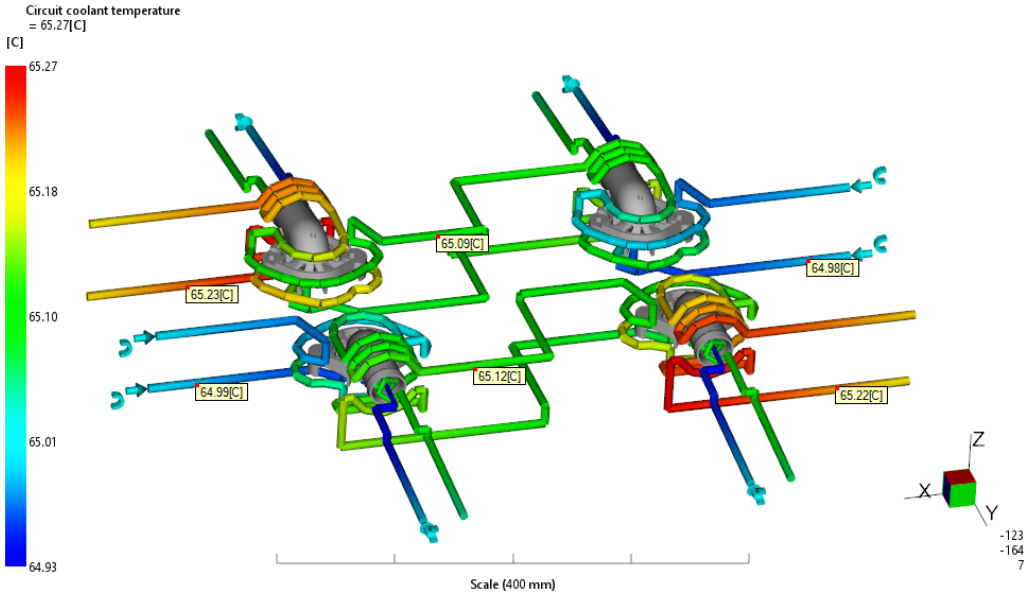


Obr. 117: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 3.

9.11.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla

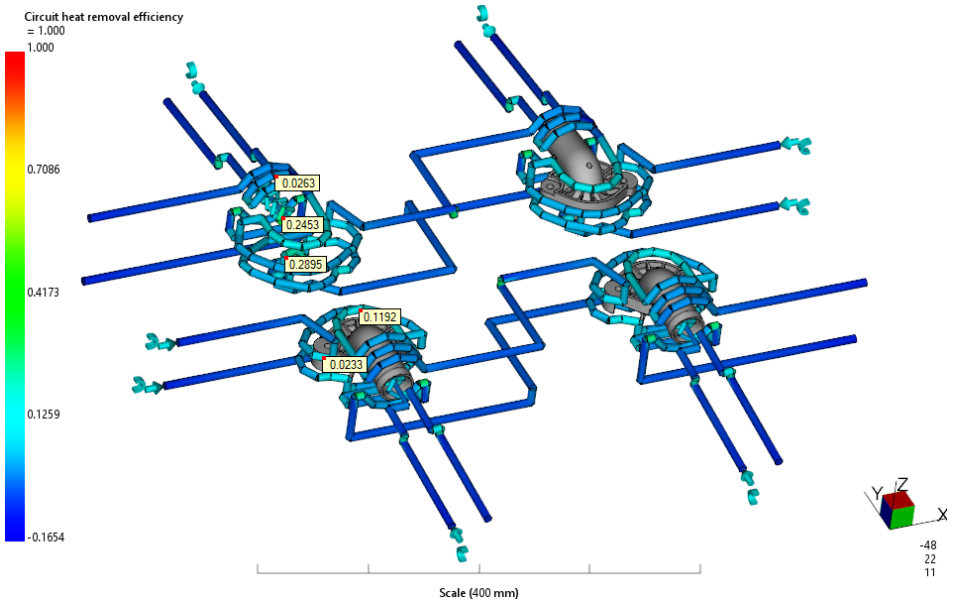
Teplota temperačního média v okruzích dosahuje mezi vstupem a výstupem rozdílu teplot 0,34 °C. Teplota temperačního média nepřekračuje maximální dovolený rozdíl teplot

3 °C. Oproti konvenčnímu temperačnímu systému aplikovaného v analýze 1 a 2 je rozdíl teplot menší.



Obr. 118: Teplota temperačního média – analýza 3.

Efektivita odvodu tepla dosahuje maximálních hodnot přibližně 0,3. Nejvyšší hodnoty se vyskytují v chlazení tvarového jádra a spodní části tvárníku, tak jako u předešlé analýzy, kde bylo umístěno spirálové jádro. V okolí tvarových dutin se hodnoty pohybují od 0,02 do 1,5.



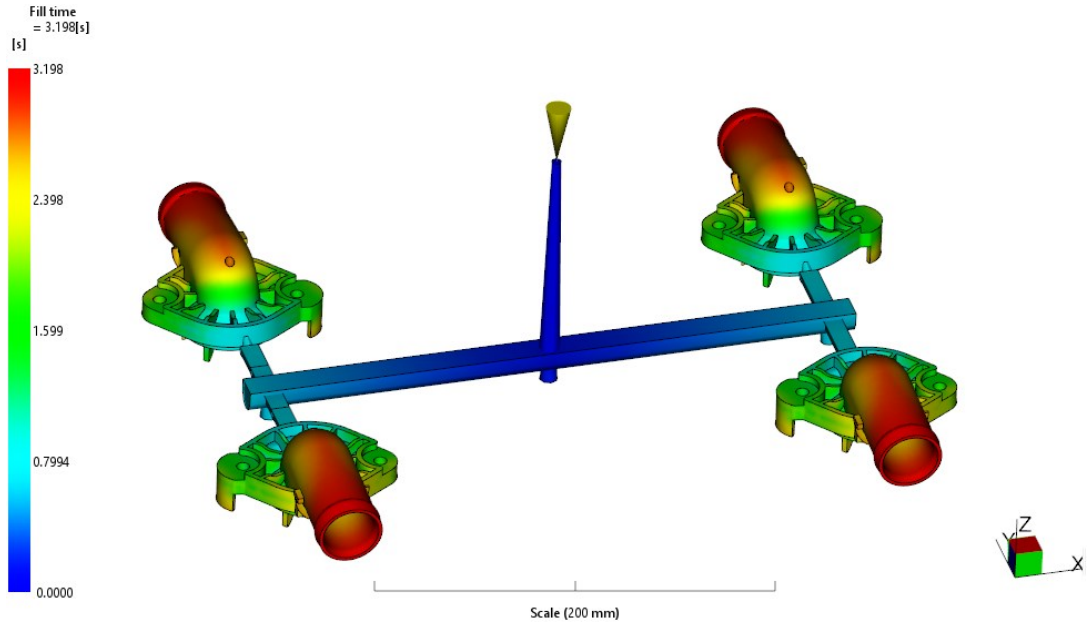
Obr. 119: Efektivita odvodu tepla – analýza 3.

9.12 Analýza 4

V analýze 4 byl použit materiál PA6-GF25, který je vstřikován studeným vtokovým systémem. Forma je v tomto případě temperována konvenčně vyráběnou soustavou kanálů s proudícím médiem. Teplota taveniny byla nastavena na 285 °C, teplota formy na 85 °C, čas plnění 3 s, přepnutí na dotlak při 98 % zaplnění objemu dutiny formy, působení dotlaku po dobu 14 s při hodnotě 80 % z maximální hodnoty vstřikovacího tlaku.

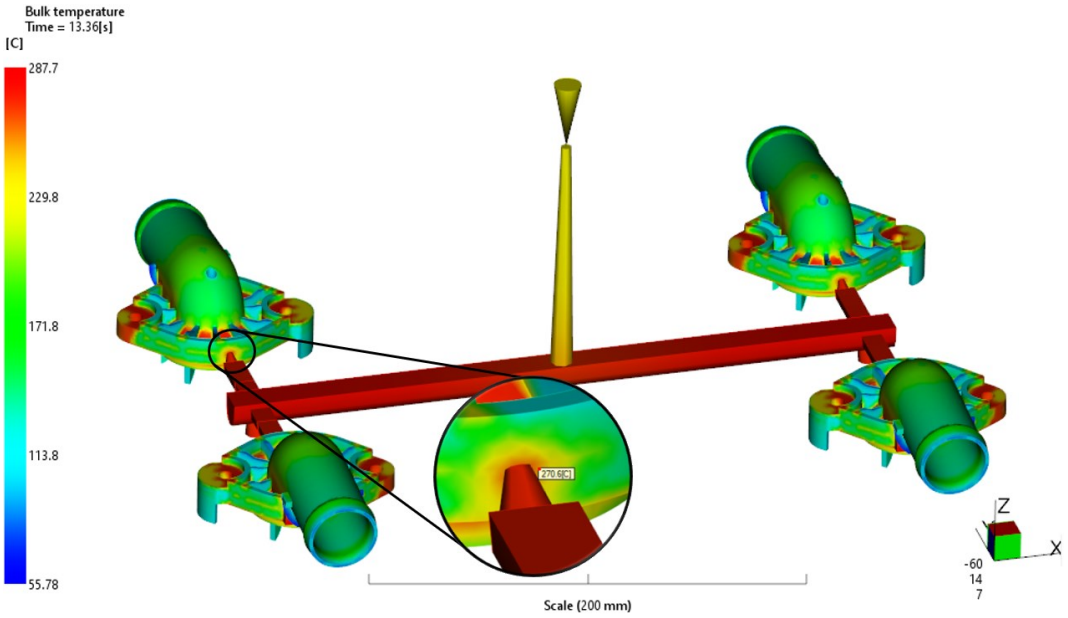
9.12.1 Čas plnění, střední teplota taveniny

Čas plnění pro analýzu 4, kde byl použit materiál PA6-GF25 je 3,2 s, za tento čas dojde k zaplnění celé dutiny vstřikovací formy. V porovnání s analýzou 1, kde byl použit materiál PA66-GF30 také se studeným vtokovým systémem, je fáze plnění nepatrně kratší o 0,03 s.



Obr. 120: Čas plnění – analýza 4.

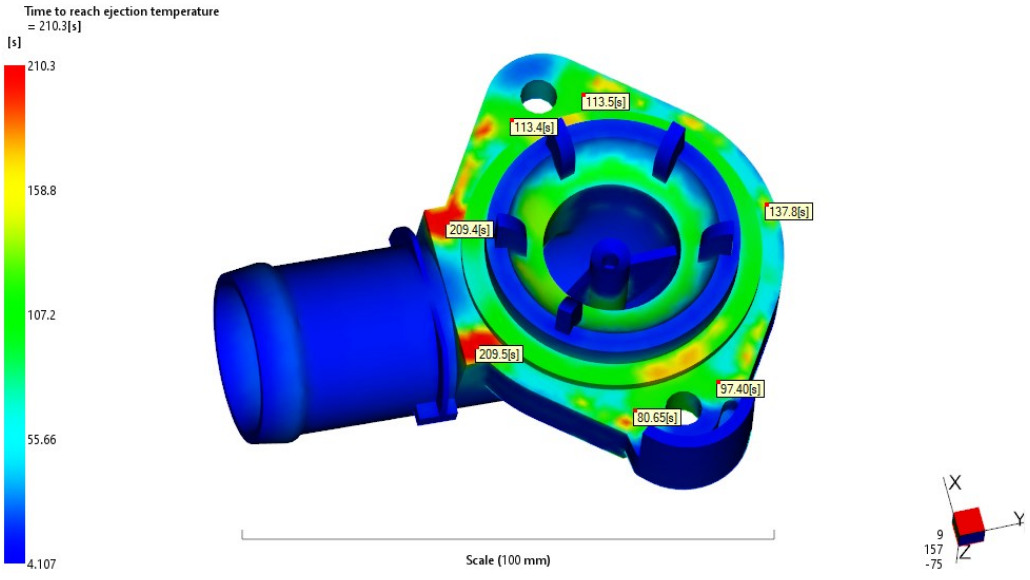
Střední teplota taveniny dosahuje nejvyšší hodnoty 287,7 °C a nepřekračuje maximální hodnotu materiálu 290 °C. Oproti nastavené hodnotě vzrostla teplota vlivem tření ve vtokovém ústí o 2,7 °C. Z obr. 121 na str. 106 je patrné, že okolí ústí vtoku zamrzá přibližně okolo 13,5 s, hodnota byla použita zároveň pro čas působení dotlaku.



Obr. 121: Střední teplota taveniny – analýza 4.

9.12.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty

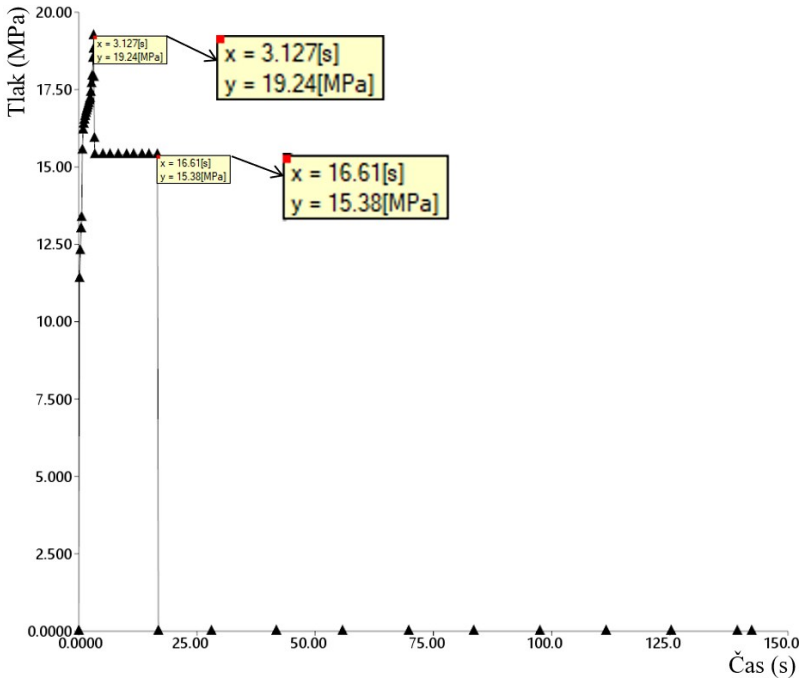
Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty v celém objemu výrobku je 210,3 s. Vůči analýzám 1, 2 a 3 s materiálem PA66-GF30 došlo k výraznému nárůstu času potřebného na vyhazovací teplotu, a to až o 80 s. Důvodem je nižší tepelná vodivost materiálu.



Obr. 122: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 4.

9.12.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí, uzavírací síla

Průběh tlaku ve vtokovém ústí je znázorněn na obr. 123 na str. 107. Maximální vstřikovací tlak je 19,2 MPa, který je dosažen v čase 3,13 s. Hodnota dotlaku je 15,4 MPa. Doba dotlaku byla nastavena na 13,5 s. Po dotlaku následuje fáze chlazení, a to do doby dosažení vyhazovací teploty.

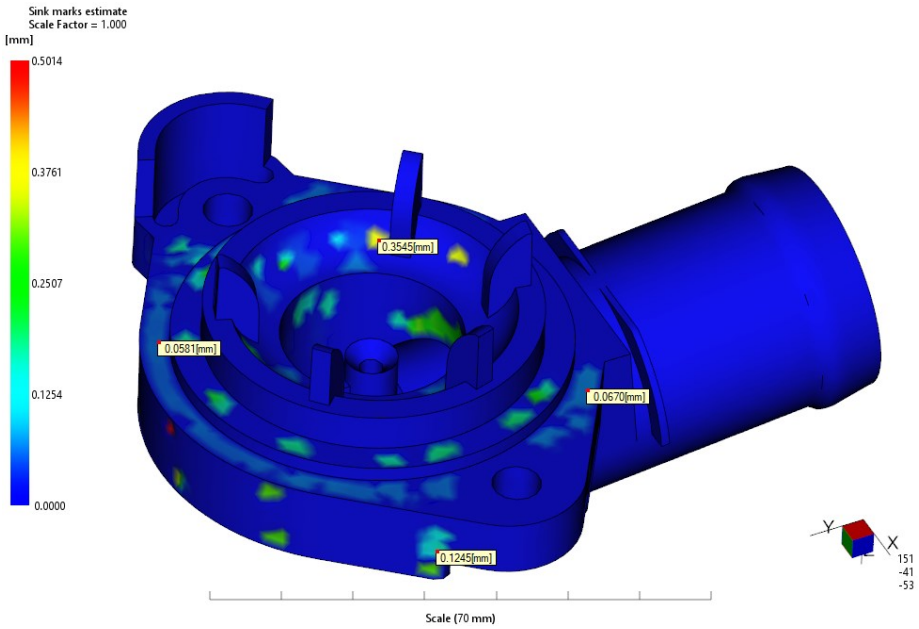


Obr. 123: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 4.

Vstřikovací tlak nepřesahuje maximální hodnotu vstřikovacího stroje. Při porovnání s analýzou 1, kde byl taktéž použit studený vtokový systém a čas plnění byl přibližně stejný, je zde vstřikovací tlak o 4,34 MPa nižší. Pokles tlaku je způsoben vstřikovaným materiálem vykazujícím lepší tokové vlastnosti. Pokles tlaků a sil potřebný při vstřikování přináší menší zatížení stroje a tím i menší náklady na provoz stroje.

9.12.4 Propadliny

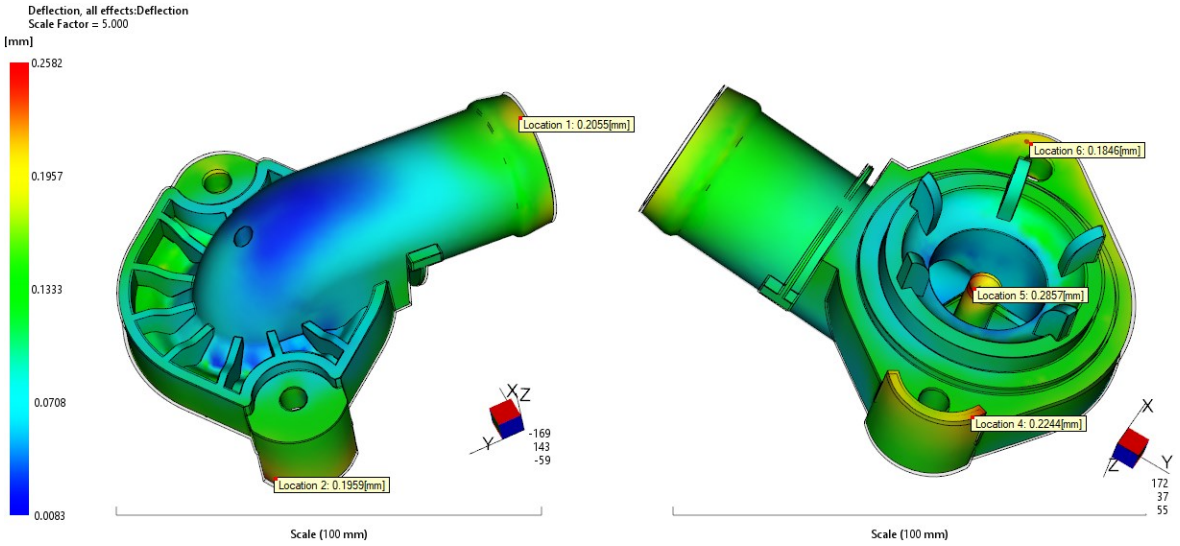
Propadliny predikované na výrobku dosahují maximální hodnoty 0,50 mm (viz. obr. 124 na str. 108). V předchozích variantách hodnoty propadlin dosahovaly hodnot od 0,68 do 0,73 mm, tzn. že došlo k výraznému zlepšení. Zlepšení je dáno menším smrštěním materiálu, které je jednak pro daný materiál menší a také je více eliminován dotlakovou fází, která je vlivem pomalejšího chladnutí materiálu prodloužena na hodnotu 13,5 s.



Obr. 124: Propadliny – analýza 4.

9.12.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty

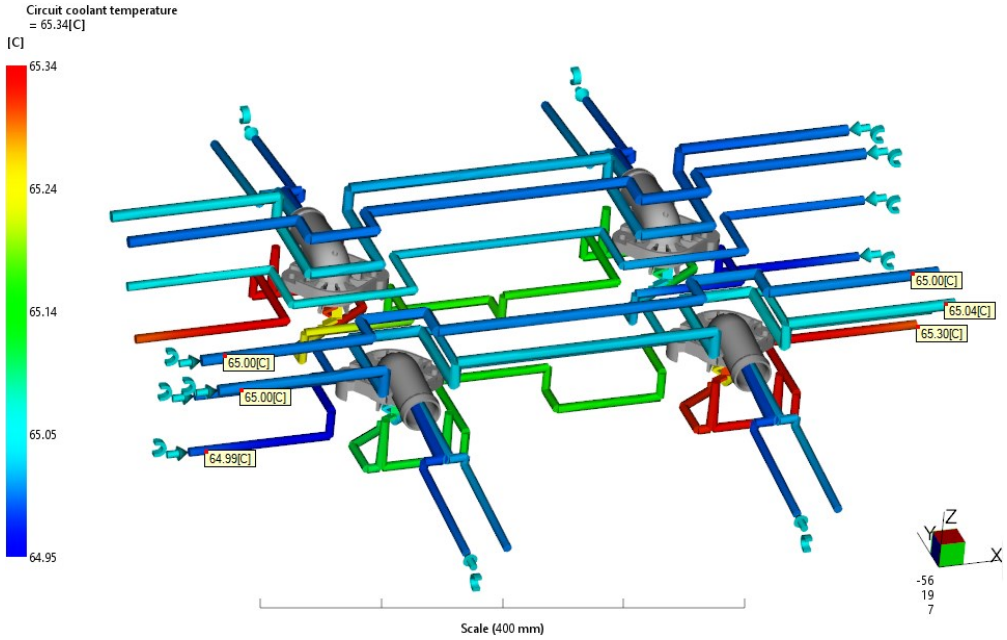
Deformace vzniklé všemi vlivy dosahují maximální hodnoty 0,26 mm. Deformace poklesly oproti analýzám 1, 2 a 3 na poloviční hodnotu. Vliv má, jak už bylo psáno výše nižší smrštění materiálu, delší doba dotlakové fáze a také nižší procento skleněných vláken.



Obr. 125: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 4.

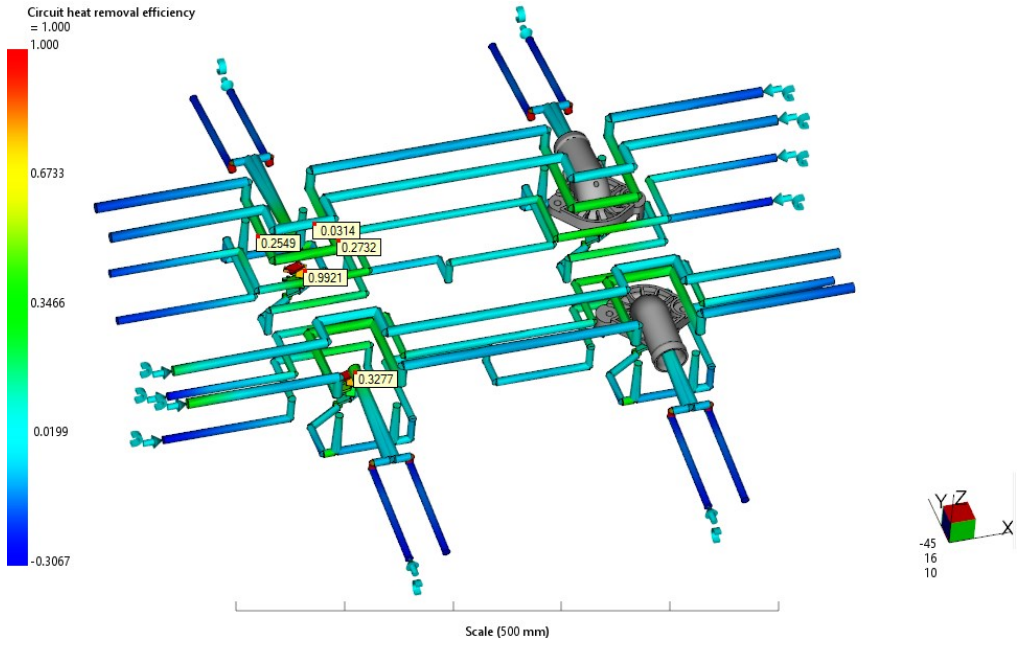
9.12.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla

Teplota temperačního média v okruzích dosahuje mezi vstupem a výstupem rozdílu teplot 0,39 °C, čímž hodnota nepřesahuje dovolený rozdíl teplot 3 °C. Z obr. 126 je patrné, že k největšímu nárůstu teplot dochází ve spodním kanálu s vyšší efektivitou odvodu tepla.



Obr. 126: Teplota temperačního média – analýza 4.

Efektivita odvodu tepla dosahuje maximálních hodnot blížících se k 1. Jako u přechozích analýz 1, 2 s konvenčním chlazením jsou nejvyšší hodnoty u spirálového jádra a také u spirálové přepážky sloužící k vytemperování tvarového jádra.



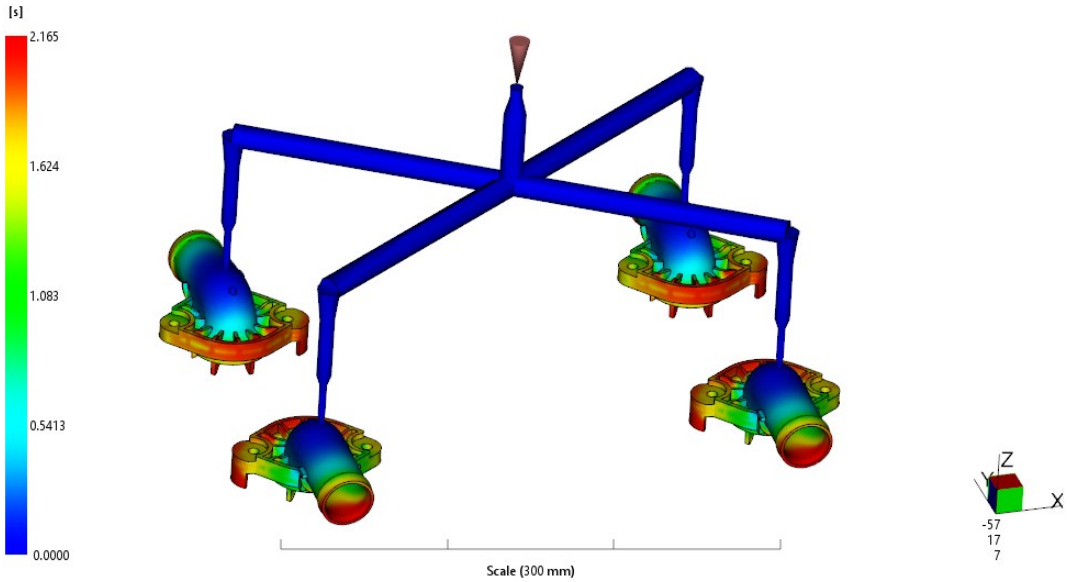
Obr. 127: Efektivita odvodu tepla – analýza 4.

9.13 Analýza 5

V analýze 5 byl použit materiál PA6-GF25, který je vstřikován vyhřívaným vtokovým systémem. Temperace formy probíhá za pomocí konvenční temperační soustavy s proudícím médiem. Teplota taveniny byla nastavena na 285 °C, teplota formy na 85 °C, čas plnění 2 s, přepnutí na dotlak při 98 % zaplnění objemu dutiny formy, působení dotlaku po dobu 14 s při hodnotě 80 % z maximální hodnoty vstřikovacího tlaku. Výsledné parametry jsou podrobněji popsány níže.

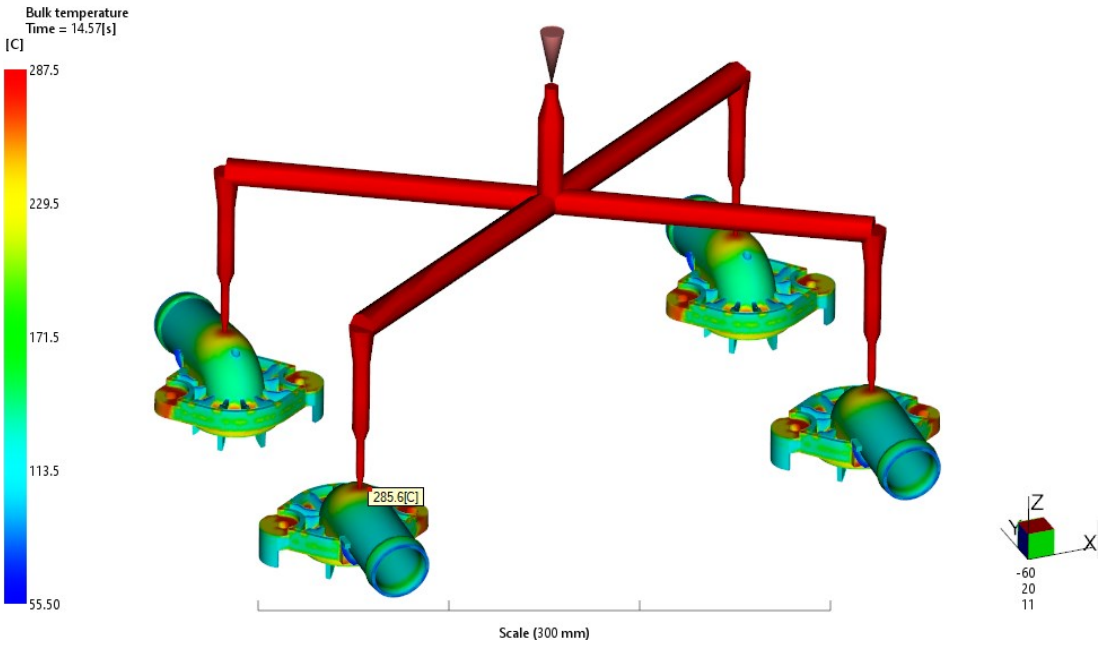
9.13.1 Čas plnění, střední teplota taveniny

Čas plnění pro analýzu 5 je 2,17 s, za tento čas dojde k zaplnění celé dutiny vstřikovací formy. Čas plnění je ze všech variant nejkratší, došlo ke zkrácení přibližně o 0,2 s.



Obr. 128: Čas plnění – analýza 5.

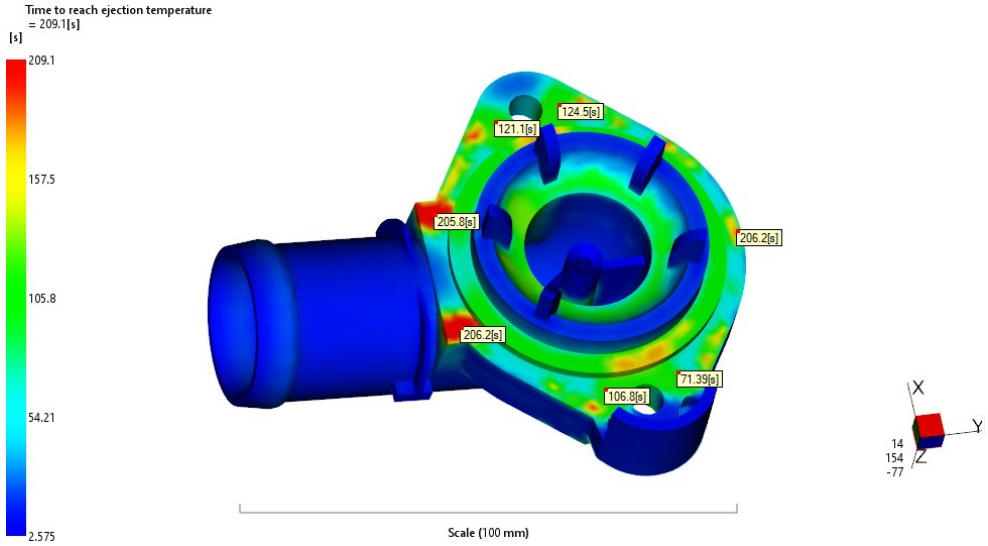
Střední teplota taveniny dosahuje maximální hodnoty 287,5 °C a nepřekračuje maximální hodnotu materiálu 290 °C. Oproti nastavené hodnotě vzrostla teplota vlivem tření ve vtokovém ústí o 2,5 °C. Z obr. 129 na str. 111 je patrné, že okolí ústí vtoku zamrzá přibližně okolo 14,5 s, dle tohoto času byla nastavena hodnota dotlaku na 14 s.



Obr. 129: Střední teplota taveniny – analýza 5.

9.13.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty

Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty v celém objemu výrobku je 209,1 s. Oproti předchozí variantě došlo ke zkrácení doby o 1,2 s, oproti analýzám s použitím materiálu PA66-GF30 je hodnota stále vyšší přibližně o 80 s.

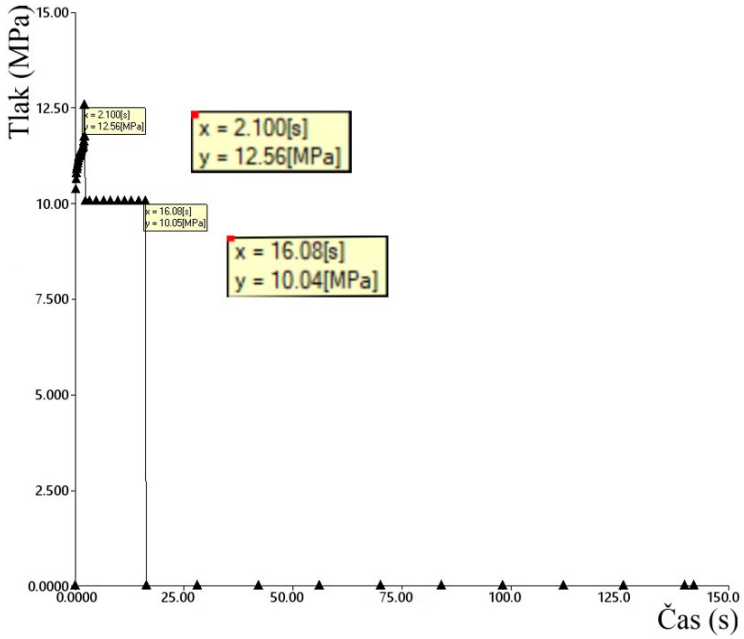


Obr. 130: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 5.

9.13.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí

Průběh tlaku ve vtokovém ústí je znázorněn na obr. 131 na str. 112. Maximální vstřikovací tlak je 12,56 MPa. Hodnota dotlaku je 10,04 MPa. Doba dotlaku byla nastavena

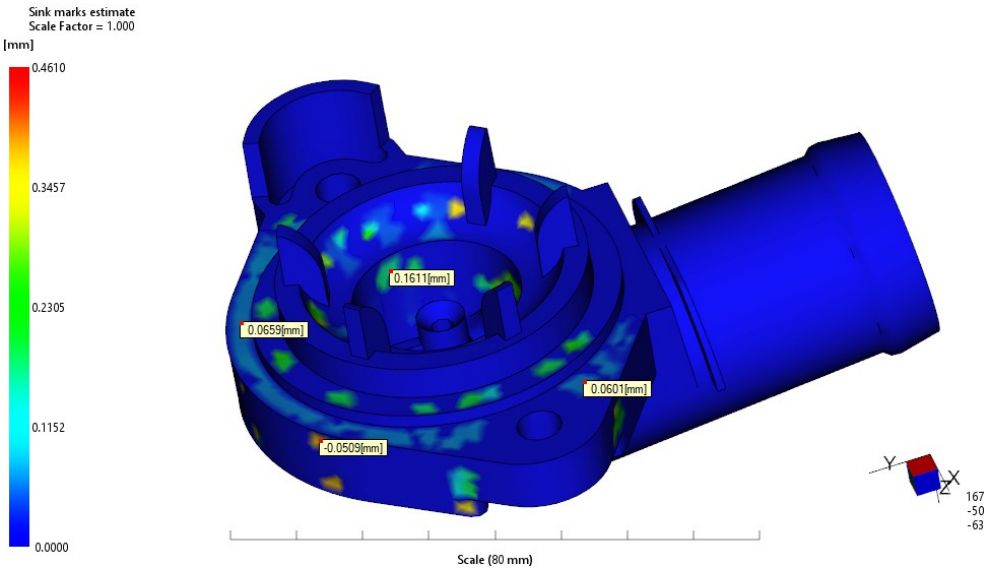
na 14 s. V porovnání s analýzou 4 se studeným vtokovým systémem dochází k poklesu vstřikovacího tlaku vlivem použití horkého vtokového systému o 6,64 MPa. Z hlediska vstřikovacího stroje maximální vstřikovací tlak nebyl překročen.



Obr. 131: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 5.

9.13.4 Propadliny

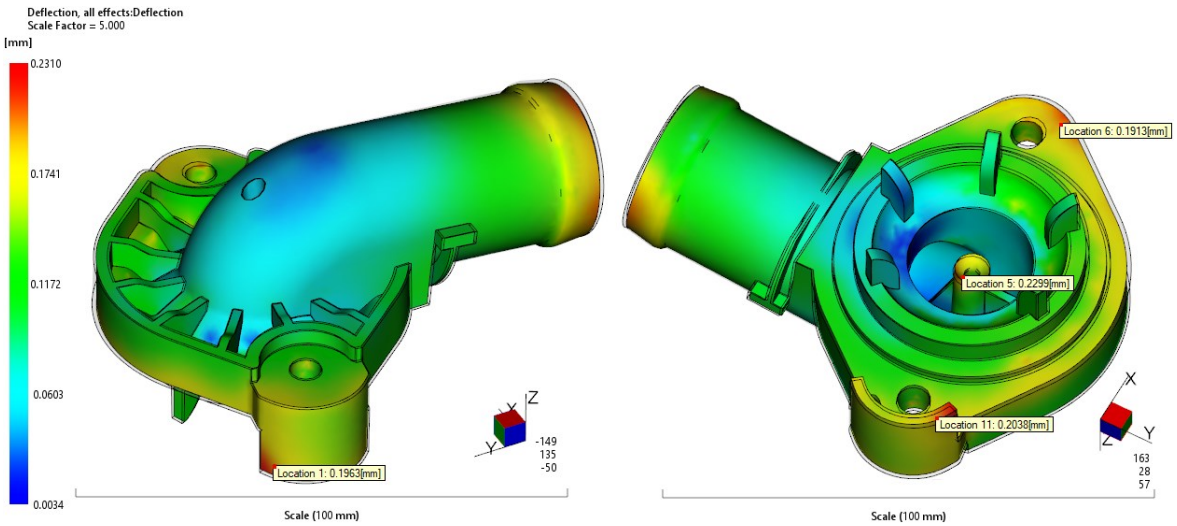
Propadliny predikované na výstřiku dosahují nejvyšší hodnoty 0,46 mm. Vůči přechozím variantám je tato hodnota nejnižší, jak už bylo popsáno v předchozí analýze v kap. 9.12.4, vliv na zlepšení má menší hodnota smrštění materiálu a delší doba dotlaku, která vlivem pomalejšího chladnutí materiálu a pomalejšího zamrzání ústí vtoku je prodloužena na 14 s.



Obr. 132: Propadliny – analýza 5.

9.13.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty

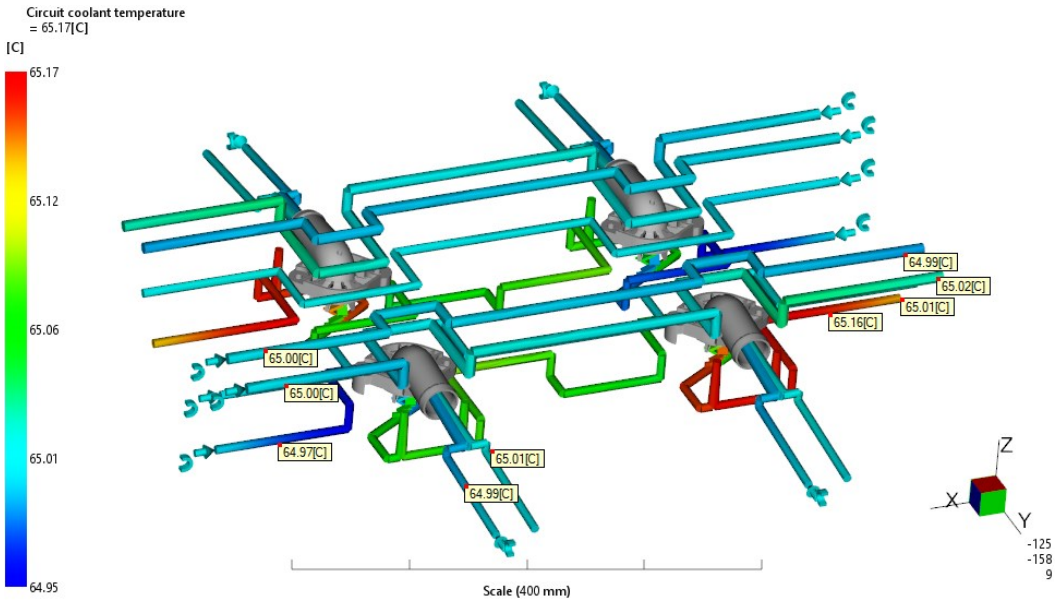
Deformace vzniklé všemi vlivy dosahují maximální hodnoty 0,23 mm. Deformovaná místa jsou totožná s analýzou 2 a 3 s rozdílem poklesu deformace vlivem změny materiálu o hodnotu 0,27 mm.



Obr. 133: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 5.

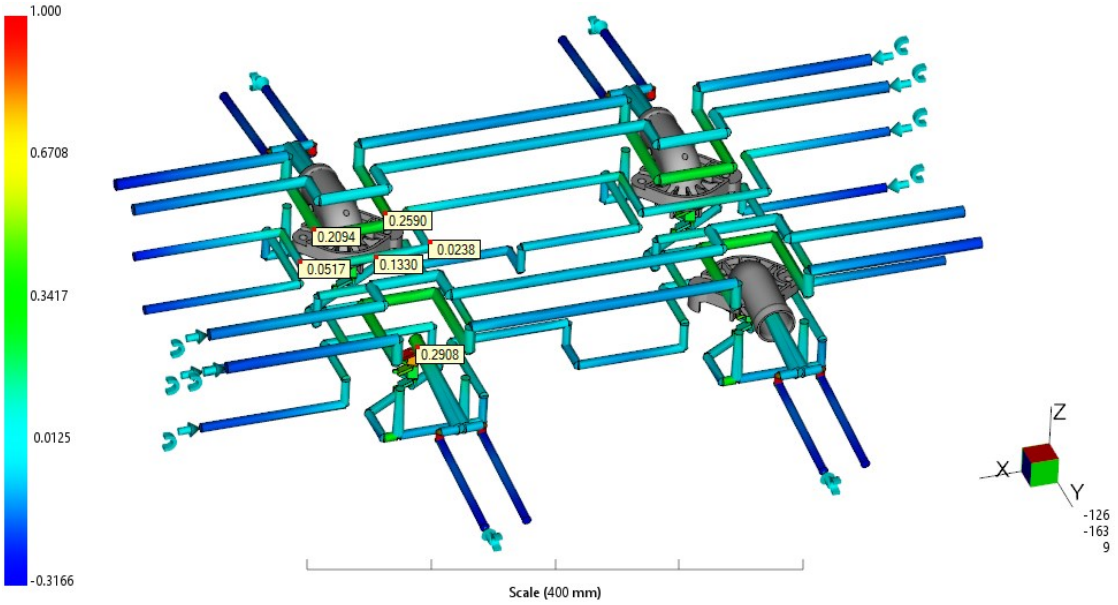
9.13.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla

Teplota temperačního média v okruzích dosahuje mezi vstupem a výstupem rozdílu teplot 0,22 °C. Teplota temperačního média nepřekračuje maximální dovolený rozdíl teplot 3 °C.



Obr. 134: Teplota temperačního média – analýza 5.

Efektivita odvodu tepla se oproti předchozím analýzám nijak výrazně nezměnila. Vysoká efektivita stále zůstává ve spirálovém jádře a spirálových přepážkách. V okolí tvarových částí se hodnoty efektivity odvodu tepla v kanálech pohybují od 0,05 do 0,3.



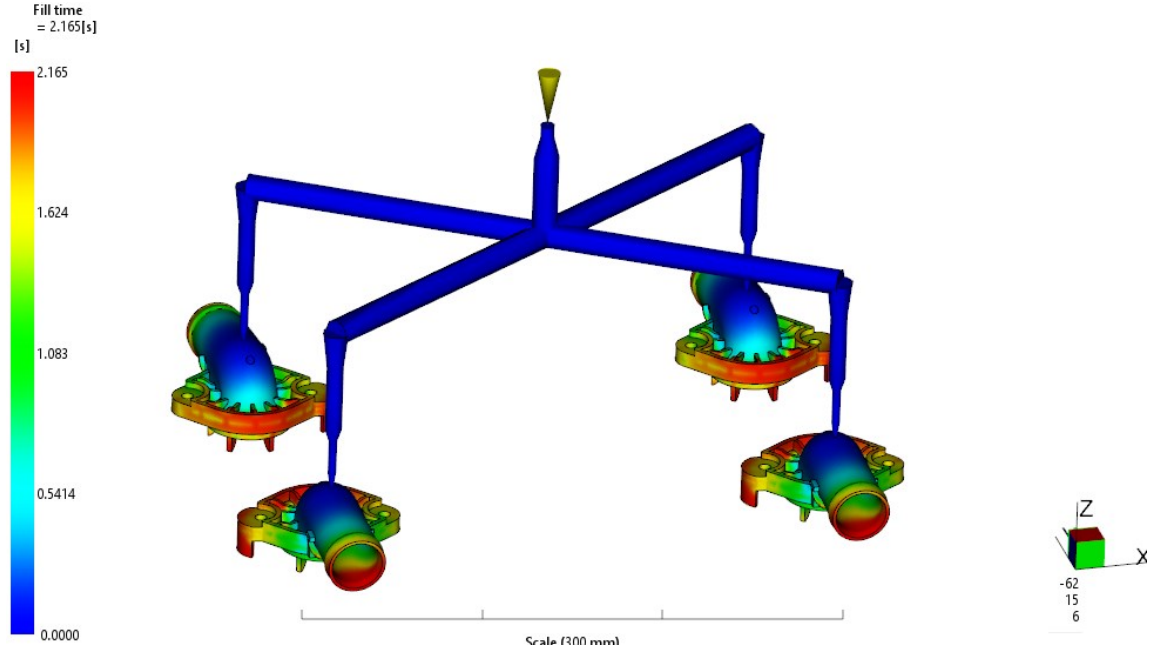
Obr. 135: Efektivita odvodu tepla – analýza 5.

9.14 Analýza 6

V analýze 6 byl použit materiál PA6-GF25, který je vstřikován vyhřívaným vtokovým systémem. Temperace formy probíhá za pomocí konformní temperační soustavy s proudícím médiem. Teplota taveniny byla nastavena na 280 °C, teplota formy na 85 °C, čas plnění 2 s, přepnutí na dotlak při 98 % zaplnění objemu dutiny formy, působení dotlaku po dobu 13 s při hodnotě 80 % z maximální hodnoty vstřikovacího tlaku.

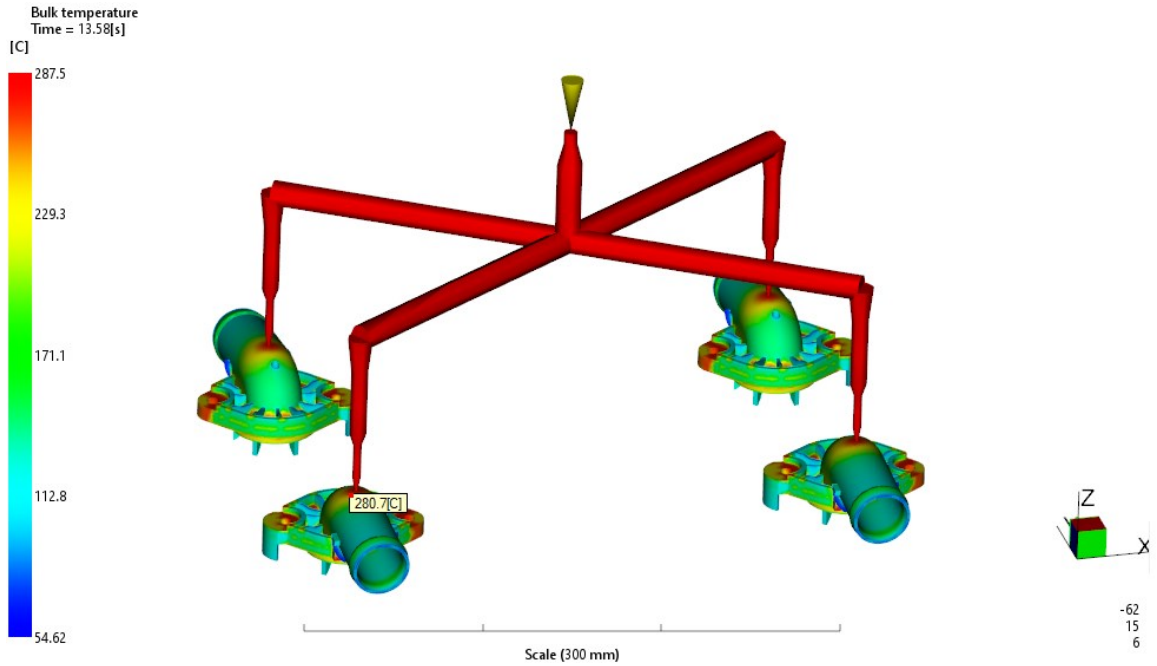
9.14.1 Čas plnění, střední teplota taveniny

Výsledný čas pro zaplnění celé dutiny formy je 2,7 s. Výsledek je znázorněn na obr. 136 na str. 115. Výsledek je shodný s předchozí analýzou 5.



Obr. 136: Čas plnění – analýza 6.

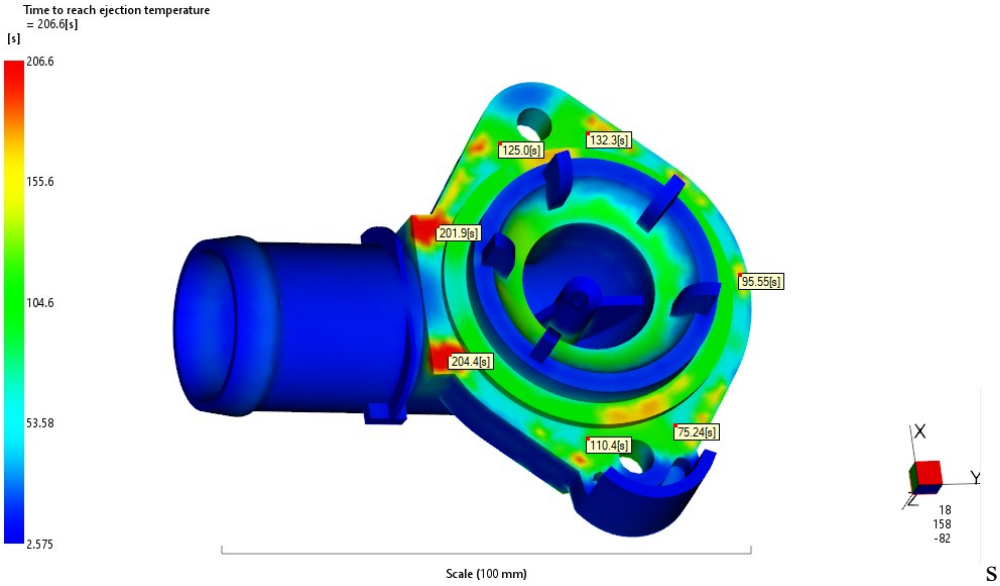
Střední teplota taveniny dosahuje nejvyšší hodnoty 287,5 °C a nepřekračuje maximální hodnotu materiálu 290 °C. Oproti nastavené hodnotě vzrostla teplota vlivem tření ve vtokovém ústí o 2,5 °C. Z obr. 137 je patrné, že okolí ústí vtoku zamrzá v čase více jako 13 s. Dotlak může být tedy prodloužen z hlediska větší eliminace deformací.



Obr. 137: Střední teplota taveniny – analýza 6.

9.14.2 Čas k dosažení vyhazovací teploty

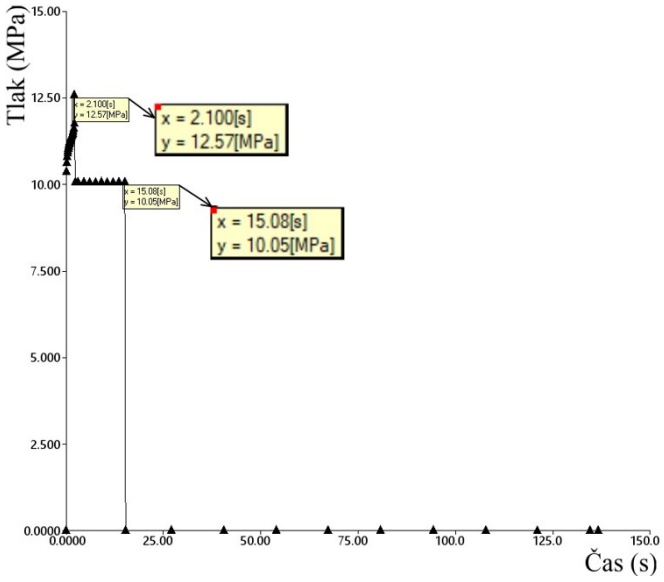
Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty v celém objemu výrobku je 206,6 s. Oproti předchozí variantě s konvenčním temperačním systémem došlo ke zkrácení doby potřebné pro dosažení vyhazovací teploty o 2,5 s.



Obr. 138: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 6.

9.14.3 Tlak taveniny ve vtokovém ústí

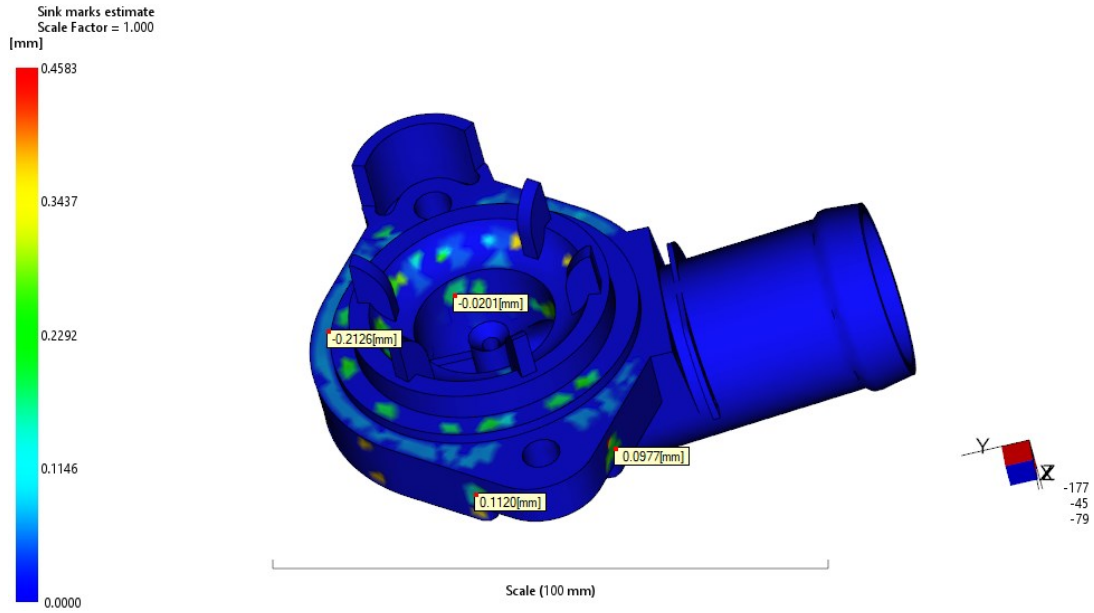
Průběh tlaku ve vtokovém ústí je znázorněn na obr. 139. Maximální vstřikovací tlak je 12,57 MPa. Hodnota dotlaku je 10,05 MPa. Doba dotlaku byla nastavena na 13 s. Vstřikovací tlak nebyl z hlediska maximálních hodnot vstřikovacího stroje překročen.



Obr. 139: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čas – analýza 6.

9.14.4 Propadliny

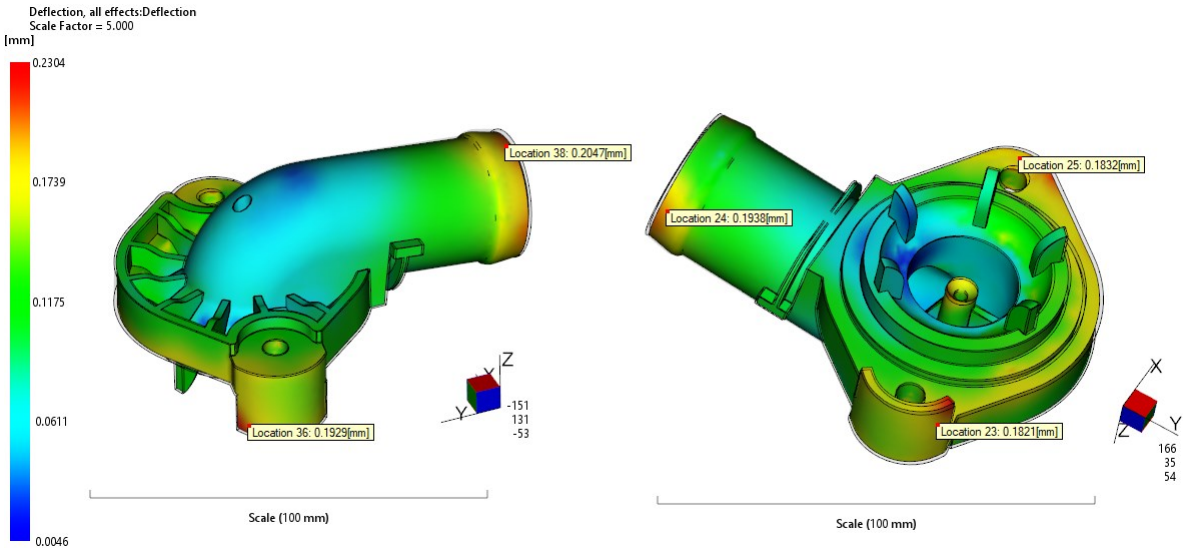
Propadliny predikované na výstřiku dosahují nejvyšší hodnoty 0,46 mm. Hodnota je totožná s analýzou 5.



Obr. 140: Propadliny – analýza 6.

9.14.5 Celkové deformace způsobené všemi efekty

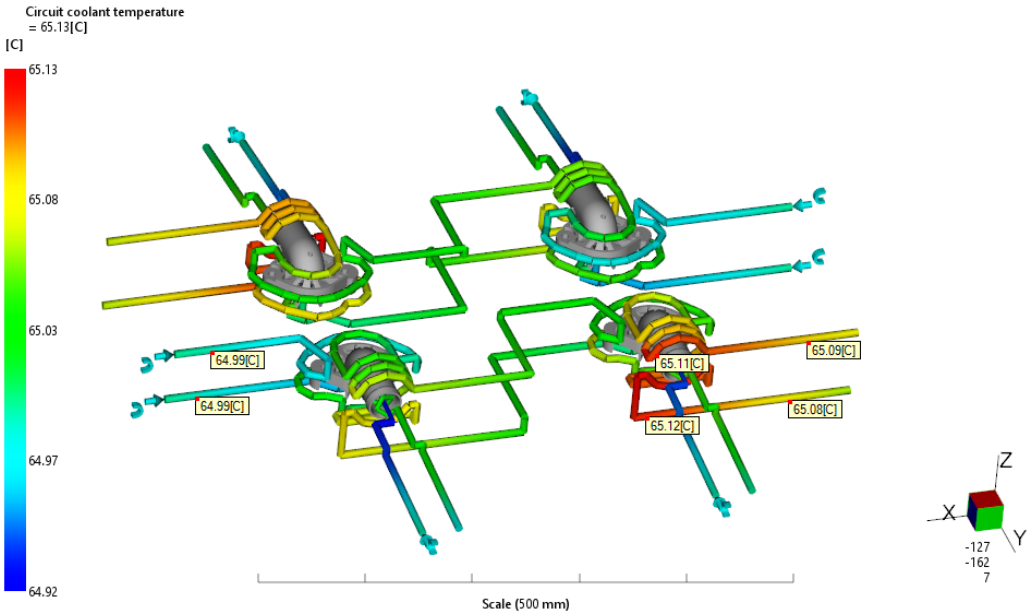
Deformace vzniklé všemi vlivy dosahují maximální hodnoty 0,23 mm. Deformovaná místa jsou totožná s analýzou 5. Oproti analýzám 1, 2 a 3 jsou deformace stále na polovičních hodnotách.



Obr. 141: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 6.

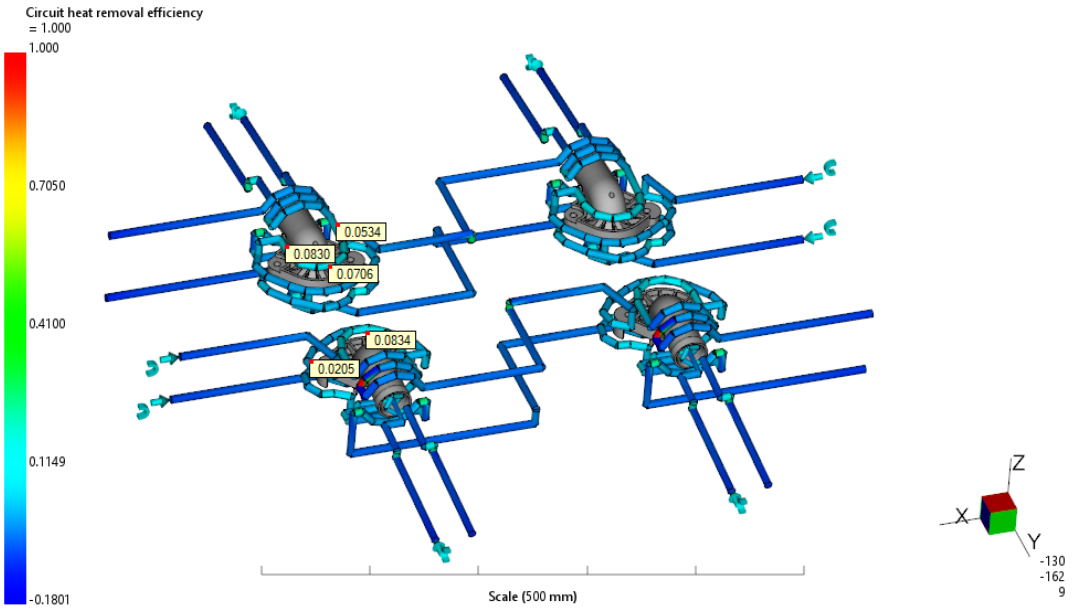
9.14.6 Teplota temperačního média, efektivita odvodu tepla

Teplota temperačního média v okruzích dosahuje mezi vstupem a výstupem rozdílu teplot 0,2 °C. Teplota temperačního média nepřekračuje maximální dovolený rozdíl teplot 3 °C. Oproti předešlým analýzám je tento rozdíl teplot nejmenší.



Obr. 142: Teplota temperačního média – analýza 6.

Efektivita odvodu tepla dosahuje maximálních hodnot přibližně 0,2. Vyšších hodnot je dosaženo v chlazení jádra a tvárníku. Oproti analýze 3, kde byl taktéž použit konformní systém, efektivita mírně poklesla.



Obr. 143: Efektivita odvodu tepla – analýza 6.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vypracování celé praktické části diplomové práce vycházelo z oficiálního zadání práce. Hlavní náplní práce byla optimalizace a návrh vstřikovací formy pro výrobu plastového dílu části motoru, kterým byla příruba chladiva. Jedná se o konstrukční součást sloužící k upevnění na bloku motoru, přívodu temperačního média do motoru a uložení termostatu pro řízení teploty v celé temperační soustavě. Návrh konstrukce vstřikovací formy byl realizován v programu SolidWorks s následnou optimalizací v programu Autodesk Moldflow.

Před samotným návrhem a optimalizací vstřikovací formy byl vypracován 3D model zpracovávaného dílu za pomocí programu SolidWorks. Tento model byl následně vložen do programu Autodesk Moldflow, kde byly provedeny tokové analýzy pro dva typy materiálů, a to PA66-GF30 a PA6-GF25 s variací dvou vtokových systémů a dvou temperačních systémů. Před samotným návrhem vtokového systému byla provedena analýza optimálního umístění vtoku, dle které byl následně navržen studený a vyhřívaný vtokový systém. Temperační systém byl navržen dvojího typu, a to konvenčně vyráběný a konformně vyráběný. Celkově bylo provedeno šest analýz, u kterých byly porovnány vybrané parametry. Výsledky vybraných parametrů těchto analýz jsou znázorněny v tab. 6.

Tab. 6: Výsledné parametry všech zpracovaných analýz.

Výsledný parametr	Analýza 1	Analýza 2	Analýza 3	Analýza 4	Analýza 5	Analýza 6
Čas plnění (s)	3,23	2,40	2,40	3,20	2,17	2,17
Čas k dosažení vyhazovací teploty (s)	134,7	132,9	130,5	210,3	209,1	206,6
Vstřikovací tlak max. (MPa)	23,58	16,08	16,00	19,24	12,56	12,57
Propadliny (mm)	0,68	0,73	0,73	0,50	0,46	0,46
Celkové deformace (mm)	0,49	0,51	0,50	0,26	0,23	0,23
Celkový čas cyklu (s)	143,93	141,30	138,90	219,50	217,27	214,77

První 3 analýzy byly testovány s materiálem PA66-GF30, který vykazoval při vstřikování dobré tokové vlastnosti v kombinaci s rychlým odvodem tepla při chladnutí dílů. V analýzách 4 až 6 s použitím materiálu PA6-GF25 došlo k razantnímu nárůstu doby chlazení dílů na vyhazovací teplotu, ale naopak došlo ke snížení propadlin, celkových deformací a také došlo k poklesu vstřikovacích tlaků. Snížení deformací bylo dáno jak

menším smrštěním materiálu, tak vlivem pomalejšího chladnutí materiálu při vstřikování, které umožnilo prodloužit dobu dotlaku a tím snížit celkové deformace dílu. Nárůst času potřebného pro vyhození výstřiků byl pravděpodobně způsoben nižší tepelnou vodivostí materiálu.

Při porovnání mezi studeným vtokovým systémem (analýzy 1, 4) a vyhřívaným vtokovým systémem (analýzy 2, 3, 5, 6) byl vyhodnocen z hlediska kratšího času plnění a nižších vstřikovacích tlaků vhodnější vyhřívaný vtokový systém. Při porovnání temperačních systémů, došlo u konformního systému (analýzy 3, 6) ke zkrácení času na vyhazovací teplotu o maximálně 4,2 s. Při přihlédnutí k výrobní náročnosti a pořizovacím nákladům je snížení času malé, z těchto důvodů je vhodnější pro konstrukci formy temperační systém vyráběný konvenčními způsoby.

Na základě těchto výsledků byla vybrána pro konstrukci vstřikovací formy analýza 2 s použitím materiálu PA66 plněný 35 % skelnými vlákny od firmy Kingfa, horkého vtokového systému a konvenčně vyráběného temperačního systému. Analýza 2 byla v kapitole 9.10 doplněna o další výsledné parametry důležité pro ověření tohoto návrhu a výběru vstřikovacího stroje.

Použitím materiálu PA66-GF30 se zkrátí doba vstřikovacího cyklu až o 76,2 s vůči druhému zkoušenému materiálu při stejném vtokovém systému a temperaci. Vyšší deformace oproti druhému materiálu jsou kompenzovány tvarovými vložkami zvětšené o hodnotu smrštění materiálu. Použitím horkého vtokového systému dojde k materiálové úspoře a nebudou v systému zapotřebí tak výrazné vstřikovací tlaky, čímž se sníží opotřebení nástrojů a také se sníží energie na provoz vstřikovacího stroje.

Při konstrukci formy byly využívány převážně normalizované díly od firmy Meusburger. Vstřikovací forma byla navržena jako čtyřnásobná. Tvarové části formy byly vytvořeny na základě výrobku zvětšeného o hodnotu smrštění materiálu, a to o 0,9 %. Tvarové části tvoří vložky tvárníku a tvárnice, tvarové jádro a dvě tvarové čelisti. Pohyb tvarového jádra a tvarových čelistí je při odformování realizován za pomocí mechanických posuvných jednotek se šikmým kolíkem a jednotek s uzavíracím klínem. Otevřená poloha u obou jednotek je zajištěna přídržnou deskou, uzavřená poloha je jištěna uzavíracím klínem.

Pro dopravu taveniny do dutiny formy byl zvolen vyhřívaný vtokový systém od firmy Thermoplay. Celý systém je složen z normalizovaných dílů této firmy. Výhodou použití tohoto systému je snížení spotřeby materiálu a zažehlení stop po vtoku.

Temperační systém vzhledem ke složitosti formy byl navržen z osmi chladících okruhů o průměrech 10 mm a 8 mm zakomponovaných přímo ve formě a čtyř okruhů o průměru 8 mm vedených v tvarových čelistech pro temperaci tvarového jádra. Pro zvýšení efektivity temperačního systému byly využívány normalizované spirálové přepážky a spirálová měděná jádra. Jako temperační médium byla zvolena směs vody a glykolu v poměru 20/80. Pro přívod temperačního média do okruhu slouží přípojky. Těsnost v přechodech mezi deskami je zajištěna pryžovými O-kroužky. Kanály jsou utěsněny na koncích uzavíracími šrouby a pro usměrnění média v kanálech jsou použity záslepky.

Vyhození výstřiků z formy je zajištěno 7 vyhazovacími kolíky na jeden výstřik. Celkově se ve formě nachází 28 vyhazovačů, z toho 16 vyhazovačů je válcového tvaru a zbylých 12 vyhazovačů je prizmatických. Vyhazovače jsou upevněny mezi vyhazovacími deskami a jejich pohyb je ovládán hydraulickou jednotkou vstřikovacího stroje za pomocí táhla. Návrat vyhazovačů spolu s vyhazovacími deskami do počáteční polohy zajišťují vracecí kolíky.

Pro transport formy byla forma opatřena transportním okem uloženým v těžišti formy a transportními zámky pro zajištění dělící roviny a vyhazovacích desek. Pro montáž samotné formy byly desky formy vzhledem k jejich hmotnosti opatřeny manipulačními závity, do kterých lze přidat další transportní oka a snadněji manipulovat s jednotlivými díly formy.

V rámci analýz v programu Moldflow a vzhledem k parametrům formy byl zvolen vstřikovací stroj od firmy Arburg s označením Allrounder 720S.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byla optimalizace nástroje pro vstřikování plastového dílu části motoru, kterým je příruba chladiva.

V úvodu praktické části práce byl vytvořen 3D model vstřikovaného dílu. Tento model byl dále použit pro tokové analýzy. V rámci analýz byly testovány dva typy materiálů. Jednalo se o materiály PA66-GF30 od firmy Kingfa a PA6-GF25 od firmy BASF. Tyto materiály byly kombinovány s dvěma vtokovými systémy (studený a vyhřívaný) a dvěma temperačními systémy (konvenční a konformní). Různou variací těchto systémů spolu s materiály bylo vytvořeno 6 typů analýz. Tyto analýzy byly nejdříve optimalizovány za pomocí změn technologických parametrů a následně dle získaných výsledků byly mezi sebou porovnány. Z výsledků analýz byly vybrány pouze nejdůležitější parametry pro ověření navržených systémů a materiálů. Na základě zhodnocení výsledků byla vybrána jako nejvhodnější varianta analýza s použitím materiálu PA66-GF30 v kombinaci s vyhřívaným vtokovým systémem a konvenčním temperačním systémem.

Na základě výběru nejvhodnější analýzy byla provedena konstrukce 3D modelu vstřikovací formy. Forma byla zkonstruována jako čtyřnásobná. Vyhřívaný vtokový systém byl navržen od firmy Thermoplay. Odformování výrobků bylo zajištěno mechanickými posuvnými jednotkami. Temperování formy bylo realizováno soustavou vrtaných temperačních okruhů. Vyhození výstřiků z formy bylo zajištěno 28 vyhazovacími kolíky.

Na konstrukci vstřikovací formy byly převážně použity normalizované díly od firem Meusburger, Hasco, Svoboda a Thermoplay. Konstrukce 3D modelu výrobku a vstřikovací formy byla provedena za pomocí programu SolidWorks, kde byla dále zhotovena 2D výkresová dokumentace. Tokové analýzy byly realizovány s využitím programu Autodesk Simulation Moldflow 2016.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] DUCHÁČEK, Vratislav *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 3. přepracované vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.

[2] KRATOCHVÍL, B., V. VOJTĚCH, V. ŠVORČÍK. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 190 s. ISBN 8070805684. Dostupné také z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pages-img/

[3] LENFELD, Petr. Zpracování plastů: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. In: *Technická univerzita Liberec: Fakulta strojní* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm

[4] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 978-80-271-0614-1.

[5] LIPTÁKOVÁ, T., P. ALEXY, E. GONDÁR, V. KHUNOVÁ. *Polymérne konštrukčné materiály: Odborná publikácia* [online]. ©2012 [cit. 2020-12-22]. Dostupné z: http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf

[6] DUCHÁČEK, V., Z. HRDLIČKA. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. 4. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2009, 199 s. ISBN 9788070807132. Dostupné také z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/uid_isbn-978-80-7080-713-2/anotace/

[7] 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.

[8] LENFELD, Petr. *Technologie II*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-305-8.

[9] CHEN, Shia-Chung a Lih-Sheng TURNG, *Advanced injection molding technologies*. Munich: Hanser Publishers, 2019, 426 s. Progress in polymer processing (PPP) series. ISBN 978-1-56990-603-3. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAIMT0003/advanced-injection-molding/advanced-injection-molding

[10] 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. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMSTP0001/molding-simulation-theory/molding-simulation-theory

[11] RAGAN, Emil. *Vstrekovanie a spracovanie plastických hmôt*. 1. vyd. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity, 2008, 549 s. ISBN 978-50-5530-102-0.

[12] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015 dotisk, 203 s. ISBN 978-80-7080-367-7.

[13] KAZMER, David. *Injection mold design engineering*. Munich: Hanser Publishers, 2007, 423 s. ISBN 978-3-446-41266-8. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIMDE0007/injection-mold-design/injection-mold-design

[14] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN – technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.

[15] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. [online]. ©2015 [cit. 2021-01-10]. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné také z: https://publi.cz/books/180/Cover.html

[16] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování*. Verze knihy: 18. [online]. ©2015 [cit. 2021-01-10]. ISBN 978-80-88058-72-4. Dostupné také z: https://publi.cz/books/184/Cover.html

[17] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů*. I. díl, Vstřikování termoplastů. 2. vydání. Brno: Uniplast Brno, 1999, 133 s.

[18] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů.* Verze knihy: 12. [online]. ©2015 [cit. 2021-01-10]. ISBN 978-80-88058-63-2. Dostupné také z: https://publi.cz/books/179/Cover.html

[19] KREBS, S., L. KOLAŘÍK a B. BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2020, 161 s. ISBN 978-80-01-06722-2.

[20] ZATLOUKAL, Martin. *Aplikovaná makromolekulární fyzika* [přednášky]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2019.

[21] POKROČILÉ KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY – Kapitola I. [online]. Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, ©2009 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: http://projekt150.ha-vel.cz/node/133

[22] STANĚK, Michal. *Navrhování nástrojů pro zpracování polymerů: Analýzy procesu vstřikování plastových dílů* [přednášky]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2020.

[23] KULKARNI, Suhas. *Robust process development and scientific molding: theory and practice.* 2nd Edition. Munich: Hanser Publications, 2010, 256 s. ISBN 978-1-56990-586-6. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMSTP0001/molding-simulation-theory/molding-simulation-theory

[24] PLASTICS TECHNOLOGY. *Coping with Weak Weld Lines* [online]. ©2019 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: https://www.ptonline.com/articles/coping-with-weak-weld-lines

[25] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. Munich: Hanser Publishers, 2018, 491 s. ISBN 978-1-56990-646-0.

[26] CAMPO, E. Alfredo. The complete part design handbook: for injection molding of thermoplastics. Munich: Hanser Publishers, 2006, 870 s. ISBN 978-1-56990-375-9. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCPDHFIM1/complete-part-design/complete-part-design

[27] LERMA VALERO, José R. *Plastics injection molding: scientific molding, recommendations, and best practices*. Munich: Hanser publications, 2020, 400 s. ISBN 978-1-56990-689-7. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPIMSMRB7/plastics-injection-molding/plastics-injection-molding

[28] GOODSHIP, Vannessa. *ARBURG Practical Guide to Injection Moulding.* 2nd Edition. Shrewsbury: Smithers Rapra, 2017, 402 s. ISBN: 978-1-91024-295-7.

[29] MOLDEX3D. *Audix Ensures Connector Size Accuracy and Eliminates Appearance Defects through Moldex3D* [online]. ©2020 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: https://www.moldex3d.com/en/blog/customer_success/audix-ensures-connector-size-accuracy-and-eliminates-appearance-defects-through-moldex3d/

[30] ROMERO, Josep. *The definitive guide to plastics injection molding*. Independently published, 2020, 236 s. ISBN 979-8675257898.

[31] HYNEK, Martin a kolektiv. *Vstřikovací lisy*. [online]. Západočeská univerzita v Plzni: Katedra konstruování strojů, ©2013 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Vstrikovaci_lisy.pdf

[32] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. Verze knihy: 17. [online]. ©2015 [cit. 2021-01-15]. ISBN 978-80-88058-69-4. Dostupné také z: https://publi.cz/books/181/Cover.html

[33] LENFELD, Petr. Zpracování plastů: Vstřikování plastů. In: *Technická univerzita Liberec: Fakulta strojní* [online]. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm

[34] KAZMER, David. *Injection mold design engineering*. 2nd edition. Munich: Hanser, 2016, 529 s. ISBN 978-1-56990-571-5. Dostupné také z: https://www.app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIMDEE002/injection-mold-design/injection-mold-design

[35] ZHILIAN MOULD. *Mold design* [online]. ©2012 [cit. 2021-01-21]. Dostupné z: http://www.zhilianmould.com/blog/mold-design/

[36] STANĚK, Michal. *Konstrukce forem* [přednášky]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2018.

[37] HYNEK, Martin a kolektiv. *Studené a živé vtokové systémy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni: Katedra konstruování strojů, ©2013 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: http://www.kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Vstrikovaci_lisy.pdf

[38] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015, 260 s. ISBN 978-80-7204-919-6.

[39] BOBČÍK, Ladislav. Formy pro zpracování plastů. II. díl, *Vstřikování termoplastů*. Brno: Uniplast Brno, 1999, 214 s.

[40] HYNEK, Martin a kolektiv. *Horké vtoky* [online]. Západočeská univerzita v Plzni: Katedra konstruování strojů, ©2013 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Horke_vtoky.pdf

[41] PRUNER, Harry a Wolfgang NESCH. *Understanding injection molds*. Munich: Hanser, 2013, 145 s. ISBN 978-1-56990-535-7. Dostupné také z: http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpUIM00002/viewerType:toc//root_slug:understanding_injection_molds

[42] BEAUMONT, John P. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, 2019, 450 s. ISBN 978-1-56990-591-3. Dostupné také z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpRGDHTSI1

[43] HYNEK, Martin a kolektiv. *Temperace vstřikovacích forem* [online]. Západočeská univerzita v Plzni: Katedra konstruování strojů, ©2013 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf

[44] SADÍLEK, Marek a Zuzana SADÍLKOVÁ. *Počítačová podpora procesu* [online]. Vysoká škola Báňská Ostrava: Technická univerzita, ©2012 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf

[45] OSSWALD, Tim A. a Georg MENGES. *Material science of polymers for engineers.* 3rd edition. Cincinnati: Hanser Publications, 2012, 595 s. ISBN 978-1-56990-524-1. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00C1W624/material-science-polymers/mold-filling-simulation/

[46] MEUSBURGER. *Normálie, formařina, nástrojařina, strojírenství*. ©2021 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: https://www.meusburger.com/

[47] SMARTPLAST. *Snižování výrobních nákladů pomocí simulační analýzy* [online]. ©2010 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: http://www.smartplast.cz/snizovani-vyrobnich-nakladu-pomoci-simulacni-analyzy/

[48] SVOBODA. *Normálie*. [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: https://www.jansvoboda.cz/

[49] THERMOPLAY S.p.A. [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: https://www.thermoplay.it/cz

[50] ARBURG. *Injection moulding machines* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: https://www.arburg.com/

[51] PROSPECTOR. *Materials database* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: https://www.ulprospector.com/

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Význam symbolu
ABS	(-)	Akrylonitrilbutadienstyren
BR	(-)	Butadienový kaučuk
CAD	(-)	Počítačem podporované projektování (Computer Aided Design)
CAE	(-)	Počítačem řízené inženýrství (Computer Aided Engineering)
CAM	(-)	Počítačem podporovaná výroba (Computer Aided Manufacturing)
CIM	(-)	Počítačem integrovaná výroba (Computer Integrated Manufacturing)
EP	(-)	Epoxidová pryskyřice
E_T	(MPa)	Modul pružnosti v tahu
NBR	(-)	Butadien-akrylonitrilový kaučuk
p	(Pa)	Tlak
PA	(-)	Polyamid
PC	(-)	Polykarbonát
PE	(-)	Polyethylen
PF	(-)	Fenol-formaldehydová pryskyřice
PMMA	(-)	Polymethylmethakrylát
POM	(-)	Polyoxymethylen
PP	(-)	Polypropylen
PS	(-)	Polystyren
PTFE	(-)	Polytetrafluorethylen
PVC	(-)	Polyvinylchlorid
s	(%)	Smrštění
SBR	(-)	Styren-butadienoný kaučuk
SVS	(-)	Studený vtokový systém
T	(°C)	Teplota
t	(s)	Čas
T_f	(°C)	Teplota viskózního toku
T_g	(°C)	Teplota skelného přechodu

T_m	(°C)	Teplota tání
TPE	(-)	Termoplastický elastomer
$T_{tav.}$	(°C)	Teplota taveniny
UP	(-)	Polyesterová pryskyřice
v	(m^3/kg)	Měrný objem
VVS	(-)	Vyhřívaný vtokový systém
ε_r	(-)	Měrné prodloužení
η	(Pa · s)	Viskozita
$\dot{\gamma}$	(s^{-1})	Smyková rychlost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Rozdělení polymerů. (dle [1])....13

Obr. 2: Schematické znázornění molekulární struktury polymerů a) amorfní, b) semikrystalické. [1]....15

Obr. 3: Závislost měrného prodloužení ε_r, modulu pružnosti E_T na teplotě T u amorfního polymerního materiálu. (dle [15])....17

Obr. 4: Závislost měrného prodloužení ε_r, modulu pružnosti E_T na teplotě T u semikrystalického polymerního materiálu. (dle [15])....17

Obr. 5: Průběh smrštění v chladnoucí plastové desce. [14]....18

Obr. 6: Vliv technologických parametrů na smrštění vstřikovaných termoplastů. (dle [18])....19

Obr. 7: Graf závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace taveniny PA6 pro různé teploty. (dle [14])....20

Obr. 8: Schéma fontánového toku. (dle [9])....21

Obr. 9: Použití plastových komponent na automobilu. [21]....21

Obr. 10: Schéma vstřikovacího procesu. (dle [9])....24

Obr. 11: Časový průběh vstřikovacího cyklu. (dle [13])....25

Obr. 12: a) Průběh tlaku v dutině formy během procesu vstřikování, b) Průběh teploty taveniny v dutině formy během procesu vstřikování, c) p-v-T diagram pro amorfní plasty. (dle [14])....27

Obr. 13: Procesní (zpracovatelské) okno. (dle [10], [16])....28

Obr. 14: Mikrostrukturní analýza studeného spoje. [26]....29

Obr. 15: Studené spoje na výstřiku. [24]....29

Obr. 16: Propadlina na výstřiku. [23]....30

Obr. 17: Deformovaný výstřik vlivem nevhodně navržené temperace. [10]....30

Obr. 18: Delaminace na výstřicích. [25]....31

Obr. 19: Spálená místa na výstřiku. [25]....31

Obr. 20: Bubliny v průhledném výstřiku. [27]....32

Obr. 21: Bubliny v rozříznutém neprůhledném výstřiku. [23]....32

Obr. 22: Vzduchová kapsa predikovaná v simulaci a na výstřiku. [29]....33

Obr. 23: Stříbrné pruhy na výstřiku. [23]....33

Obr. 24: Černá skvrna na výstřiku v důsledku kontaminace materiálu. [23]....34

Obr. 25: Přetok na výstřiku v důsledku vysokého vstřikovacího tlaku. [25]....34

Obr. 26: Neúplný výstřik. [30]....35

Obr. 27: Tokové čáry na výstřiku. [10]....35

Obr. 28: Tryskový tok taveniny v dutině formy. [28]....36

Obr. 29: Tryskový tok na výstřiku z materiálu PC. [25]....36

Obr. 30: Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací. (dle [13])..... 37

Obr. 31: Vstřikovací jednotka a) pístová, b) šneková, c) s pístovou předplastikací, d) se šnekovou předplastikací. (dle [11], [31])..... 38

Obr. 32: Šneková vstřikovací jednotka. (dle [30])..... 39

Obr. 33: Hydraulická uzavírací jednotka. (dle [30])..... 40

Obr. 34: Schéma vícenásobné dvoudeskové vstřikovací formy. (dle [35])..... 42

Obr. 35: Schéma vícenásobné formy se studeným vtokovým systémem. (dle [12])..... 44

Obr. 36: Vybalancované vtokové systémy (hvězdicové a kruhové uspořádání). [12] 44

Obr. 37: Průřezy rozvodných kanálů. (dle [17]) 45

Obr. 38: Schéma vyhřívaného rozvodného systému. (dle [13])..... 46

Obr. 39: Schéma vyhřívaných horkých trysek. (dle [41])..... 46

Obr. 40: Vyhazovací kolíky od firmy Meusburger. [46]..... 48

Obr. 41: Schéma stírací desky (kroužku). (dle [26])..... 48

Obr. 42: Trubkový vyhazovač od firmy Meusburger. [46] 48

Obr. 43: Typy provedení přidržovačů vtoku. [42] 49

Obr. 44: Průběh teploty a napětí ve stěně výstřiku při chlazení. [42]..... 50

Obr. 45: Temperace tvárníku za pomocí temperačních přepážek. (dle [26])..... 51

Obr. 46: Nové koncepty vývoje vstřikovacího procesu. (dle [10])..... 52

Obr. 47: Výsledek analýzy a experimentu vstřikování držáku na nápoje. [45] 53

Obr. 48: 3D model výrobku – reálné vyobrazení (render). 56

Obr. 49: 3D model výrobku – boční pohledy...... 57

Obr. 50: 3D model výrobku – spodní a horní pohled. 57

Obr. 51: Analýza úkosu 3D modelu výrobku. 57

Obr. 52: Zkonstruovaná vstřikovací forma...... 58

Obr. 53: Rozvržení tvarových dutin a posuvných systémů ve formě. 59

Obr. 54: Rám vstřikovací formy od firmy Meusburger. 60

Obr. 55: Středící a spojovací prvky vstřikovací formy. 61

Obr. 56: Vodící a středící prvky od firmy Meusburger. 61

Obr. 57: Koncové středění Meusburger E1308...... 61

Obr. 58: Středící kroužky od firmy Meusburger...... 62

Obr. 59: Návrh dělících rovin pro tvorbu tvarových částí. 63

Obr. 60: Sestava tvarových částí. 63

Obr. 61: Tvarové vložky tvárnice a tvárníku. 64

Obr. 62: Datumovka Meusburger E2420 a popis na výrobku...... 64

Obr. 63: Tvarové jádro a tvarové čelisti s posuvnými částmi. 65

Obr. 64: Sestava posuvných částí a tvárníku. 65
Obr. 65: Šikmý kolík. 66
Obr. 66: Vstřikovací forma v poloze a) uzavřené, b) otevřené. 66
Obr. 67: Posuvná jednotka E3080 v poloze a) uzavřené, b) otevřené. 67
Obr. 68: Vyhřívaný vtokový systém od firmy Thermoplay (render). 68
Obr. 69: Vyhřívaný vtokový systém zakomponovaný ve formě. 69
Obr. 70: Zakomponování vyhřívané trysky. 69
Obr. 71: Komponenty použité v temperačním systému. 70
Obr. 72: Temperační systém levé poloviny formy. 71
Obr. 73: Temperační okruh v tvarové vložce tvárníku (vlevo) a zakomponování spirálové přepážky a spirálového jádra v tvarové vložce tvárníku (vpravo). 72
Obr. 74: Temperační systém posuvné čelisti a tvarového jádra. 72
Obr. 75: Temperační systém pravé poloviny formy. 73
Obr. 76: Temperační kanály v tvarové vložce tvárnice. 73
Obr. 77: Vyhazovací systém vstřikovací formy. 74
Obr. 78: Rozmístění vyhazovačů na výrobku. 75
Obr. 79: Závěsné oko a transportní zámek. 76
Obr. 80: Transportní zámek Meusburger E1936. 76
Obr. 81: Transportní systémy na vstřikovací formě. 76
Obr. 82: Vstřikovací stroj Allrounder 720S 320t 29,1 oz (60 mm). 79
Obr. 83: Simulované upnutí formy na vstřikovací stroj Arburg (render). 80
Obr. 84: Vytvořená síť na 3D modelu a parametry vytvořené sítě. 81
Obr. 85: Vhodnost umístění pro horké vtokové ústí. 82
Obr. 86: Vhodnost umístění pro studené vtokové ústí. 82
Obr. 87: Studený vtokový systém. 83
Obr. 88: Horký vtokový systém. 84
Obr. 89: Konvenční temperační systém. 85
Obr. 90: Konformní temperační systém. 86
Obr. 91: Tvarové části s konformním chlazením. 86
Obr. 92: Čas plnění – analýza 1. 88
Obr. 93: Střední teplota taveniny – analýza 1. 89
Obr. 94: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 1. 90
Obr. 95: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 1… 90
Obr. 96: Propadliny – analýza 1. 91
Obr. 97: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 1. 92

Obr. 98: Teplota temperačního média – analýza 1. 92
Obr. 99: Efektivita odvodu tepla – analýza 1. 93
Obr. 100: Čas plnění – analýza 2. 94
Obr. 101: Smyková rychlost – analýza 2. 94
Obr. 102: Střední teplota taveniny – analýza 2. 95
Obr. 103: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 2. 95
Obr. 104: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 2. 96
Obr. 105: Graf průběhu uzavírací síly v závislosti na čase. 96
Obr. 106: Studené spoje – analýza 2. 97
Obr. 107: Vzduchové kapsy – analýza 2. 98
Obr. 108: Propadliny – analýza 2. 98
Obr. 109: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 2. 99
Obr. 110: Teplota temperačního média – analýza 2. 99
Obr. 111: Efektivita odvodu tepla – analýza 2. 100
Obr. 112: Čas plnění – analýza 3. 101
Obr. 113: Střední teplota taveniny – analýza 3. 101
Obr. 114: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 3. 102
Obr. 115: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 3. 102
Obr. 116: Propadliny – analýza 3. 103
Obr. 117: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 3. 103
Obr. 118: Teplota temperačního média – analýza 3. 104
Obr. 119: Efektivita odvodu tepla – analýza 3. 104
Obr. 120: Čas plnění – analýza 4. 105
Obr. 121: Střední teplota taveniny – analýza 4. 106
Obr. 122: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 4. 106
Obr. 123: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 4. 107
Obr. 124: Propadliny – analýza 4. 108
Obr. 125: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 4. 108
Obr. 126: Teplota temperačního média – analýza 4. 109
Obr. 127: Efektivita odvodu tepla – analýza 4. 109
Obr. 128: Čas plnění – analýza 5. 110
Obr. 129: Střední teplota taveniny – analýza 5. 111
Obr. 130: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 5. 111

Obr. 131: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čase – analýza 5. 112
Obr. 132: Propadliny – analýza 5. 112
Obr. 133: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 5. 113
Obr. 134: Teplota temperačního média – analýza 5. 113
Obr. 135: Efektivita odvodu tepla – analýza 5. 114
Obr. 136: Čas plnění – analýza 6. 115
Obr. 137: Střední teplota taveniny – analýza 6. 115
Obr. 138: Čas k dosažení vyhazovací teploty – analýza 6. 116
Obr. 139: Graf průběhu tlaku taveniny ve vtokovém ústí v závislosti na čas – analýza 6. 116
Obr. 140: Propadliny – analýza 6. 117
Obr. 141: Deformace způsobené všemi vlivy – analýza 6. 117
Obr. 142: Teplota temperačního média – analýza 6. 118
Obr. 143: Efektivita odvodu tepla – analýza 6. 118

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Volba druhu plastu pro vybrané aplikace v automobilech. (dle [16]) 22
Tab. 2: Přehled zpracovaných analýz v programu Autodesk Moldflow. 77
Tab. 3: Vlastnosti materiálu PA66-G30 HSBK 161. 78
Tab. 4: Vlastnosti materiálu Ultramid® B3WG5 (PA6-GF25). 79
Tab. 5: Parametry vstřikovacího stroje Allrounder 720S 320t 29,1 oz (60 mm). 80
Tab. 6: Výsledné parametry všech zpracovaných analýz. 119

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list PA66-GF30

Příloha P II: Materiálový list Ultramid B3WG5

Příloha P III: Technická data vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 720S

Příloha P IV: Výkresová dokumentace (výkres sestavy vstřikovací formy, kusovník, pohled do pravé strany formy, pohled do levé strany formy)

Seznam elektronických příloh uložených na DVD:

Příloha P IV:

- Diplomová práce (*.pdf)
- 3D model vstřikovací formy
- Výkresová dokumentace
- Tokové analýzy

PŘÍLOHA PI: MATERIÁLOVÝ LIST PA66-G30 HSBK 161

Product Information

PA66-G30 HSBK161

KINGFA® 金发

Glass Fiber Reinforced PA66

FEATURES	APPLICATIONS
• High strength • Heat stability • Good dimensional stability • Good surface appearance	• Injection molding • Auto's parts • Under hood

Properties[1]	Test Standard	Test Condition	S.I. Unit	S.I. Typical Value[1] DAM/50%R.H.
Mechanical				
Tensile Modulus	ISO 527-2	1mm/min	MPa	9500/7200
Tensile Strength	ISO 527-2	5mm/min	MPa	190/130
Tensile Strain at Break	ISO 527-2	5mm/min	%	3.0/5.0
Flexural Strength	ISO 178	2mm/min	MPa	270/205
Flexural Modulus	ISO 178	2mm/min	MPa	8800/6000
Charpy notched Impact Strength	ISO 179/1eA	23℃	kJ/m^2	12/22
Ball indentation hardness	ISO 2039-1	23℃	N/mm^2	240/190
Thermal				
Temperature of Deflection Under Load	ISO 75-2	0.45MPa	℃	255
		1.80MPa	℃	250
Electrical				
Volume Resistivity	IEC 60093	--	Ω·cm	10^{15}
Dielectric Strength	IEC 60243-1	--	kV/mm	--
Others				
Density	ISO 1183-1	--	g/cm^3	1.36
Ash Content	ISO 3451-1	--	%	30
Moisture Absorption	ISO 62	Equilibrium 23℃/50% r.h.	%	1.6
Molding Shrinkage	ISO 2577	Flow	%	0.3
		Transverse	%	0.9
Flammability	UL 94	1.6mm	/	HB

[1] These are typical values of the product's properties, and these values alone do not represent a sufficient basis for any part design and are not intended for use in establishing maximum, minimum, or ranges of values for specification purposes.

NOTICE: The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. This information may be subject to revision without informing in advance as new knowledge and experience become available. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Seller assumes no obligation or liability for the information in this document. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR USE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.

Product Information

PA66-G30 HSBK161

KINGFA® 金发

Typical Processing Conditions

		Optimum	Range
Melt Temp.		280℃	270~290℃
Barrel Zone Temp.	Rear	275℃	270~285℃
	Center	285℃	280~290℃
	Front	295℃	290~300℃
Mold Temp.		65℃	40~100℃
Processing Temp. Upper Limit		320℃	
Injection Speed		Moderate to high	
Pre-dry Requirements		100~130℃, 4~6hr	

The parameter is just for referential purpose only. In actual processing, the parameter should be adjusted by construction of mold, shape and size of product, and so on.

SAFETY AND HANDLING CONSIDERATIONS

Material safety data sheets (MSDS) for resins are available from Kingfa Sci. & Tech. Co. Ltd. and its subsidiaries. MSDS sheets are provided to help customers satisfy their own handling, safety, disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations.

The following comments are general and applied only to resins as supplied. Various additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe use profile and must be investigated separately.

These resins have a very low degree of toxicity under normal conditions of use and should pose no unusual problems from ingestion, eye, or skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins. Good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of plastic resins can result in the generation of vapors and dusts. Dusts resulting from sawing, filing, and sanding of plastic parts in post-molding operations may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, using an approved dust respirator is recommended

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. Processing may release fumes which may include polymer fragments and other decomposition products. Fumes can be irritating. At temperatures exceeding melt temperature, polymer fragments can occur. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation may be necessary for some operations.

Use chemical splash goggles if there is a potential for exposure to particles which could cause injury to the eye. Use gloves with insulation for thermal protection.

Color change of the product may be caused by UV exposure in general. So it is recommended that storage should keep in dry, cool place and avoid direct sunlight

We encourage customers and potential users of our products to review their applications for such products from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure that our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts.

NOTICE: The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. This information may be subject to revision without informing in advance as new knowledge and experience become available. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Seller assumes no obligation or liability for the information in this document. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR USE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.

PŘÍLOHA PII: MATERIÁLOVÝ LIST ULTRAMID B3WG5

Product Information
Oct 2016

Ultramid® B3WG5
Polyamide 6

BASF
We create chemistry

Email PDF Datasheet | Print/Save Version

Product Description

Ultramid B3WG5 is a 25% glass fiber reinforced injection molding PA6 grade with heat aging resistance.

Applications

Typical applications include fan wheels.

PHYSICAL	ISO Test Method	Property Value	
Density, g/cm³	1183	1.32	
Moisture, %	62		
(50% RH)		2.3	
(Saturation)		7.1	
RHEOLOGICAL	**ISO Test Method**	**Dry**	**Conditioned**
Melt Volume Rate (275 °C/5 Kg), cc/10min.	1133	55	-
MECHANICAL	**ISO Test Method**	**Dry**	**Conditioned**
Tensile Modulus, MPa	527		
23°C		8,000	5,500
Tensile stress at break, MPa	527		
23°C		160	105
Tensile strain at break, %	527		
23°C		3.5	8.5
Flexural Modulus, MPa	178		
23°C		7,400	-
IMPACT	**ISO Test Method**	**Dry**	**Conditioned**
Charpy Notched, kJ/m²	179		
-30°C		10	-
23°C		12	25
Charpy Unnotched, kJ/m²	179		
-30°C		75	-
23°C		80	105
THERMAL	**ISO Test Method**	**Dry**	**Conditioned**
Melting Point, °C	3146	220	-
HDT A, ° C	75	210	-
HDT B, ° C	75	220	-
Coef. of Linear Thermal Expansion, Parallel, mm/mm °C		0.23 X10-4	-
Coef. of Linear Thermal Expansion, Normal, mm/mm °C		0.65 X10-4	-
ELECTRICAL	**ISO Test Method**	**Dry**	**Conditioned**
Comparative Tracking Index	IEC 60112	450	450
Volume Resistivity (Ohm)	IEC 60093	1E13	1E10
Dielectric Constant (1 MHz)	IEC 60250	3.8	7
Dissipation Factor (100 Hz)	IEC 60250	250	2,400
Dissipation Factor (1 MHz)	IEC 60250	250	2,400
UL RATINGS	**UL Test Method**	**Property Value**	
Relative Temperature Index, 0.75mm	UL746B		
Electrical, °C		130	
Flammability Rating, 1.5mm	UL94	HB	
Relative Temperature Index, 1.5mm	UL746B		
Mechanical w/o Impact, °C		130	
Mechanical w/ Impact, °C		95	
Electrical, °C		130	
Flammability Rating, 3.0mm	UL94	HB	
Relative Temperature Index, 3.0mm	UL746B		
Mechanical w/o Impact, °C		130	
Mechanical w/ Impact, °C		95	
Electrical, °C		130	

Processing Guidelines

Material Handling
Max. Water content: 0.15%
Material is supplied in sealed containers and drying prior to molding in a dehumidifying or desiccant dryer is recommended. Drying parameters are dependent upon the actual percentage of moisture in the pellets and typical pre-drying conditions are 2-4 hours at 180F (83C).
Recommended moisture levels for achieving optimum surface qualities and mechanical properties is 0.05% - 0.12%. Further information concerning safe handling procedures can be obtained from the Safety Data Sheet (MSDS), or by contacting your BASF representative.

Typical Profile
Melt Temperature 270-295°C (518-563°F)
Mold Temperature 80-95°C (176-203°F)

Injection and Packing Pressure 35-125 bar (500-1500 psi)

Mold Temperatures
This product can be processed over a wide range of mold temperatures; however, for applications where aesthetics are critical, a mold surface temperature of 80-95°C (176-203°F) is recommended.

Pressures
Injection pressure controls the filling of the part and should be applied for 90% of ram travel. Packing pressure affects the final part and can be used effectively in controlling sink marks and shrinkage. It should be applied and maintained until the gate area is completely frozen off.

Back pressure can be utilized to provide uniform melt consistency and reduce trapped air and gas. Minimal back pressure should be utilized to prevent glass breakage.

Fill Rate
Fast fill rates are recommended to ensure uniform melt delivery to the cavity and prevent premature freezing. Surface appearance is directly affected by injection rate.

Note

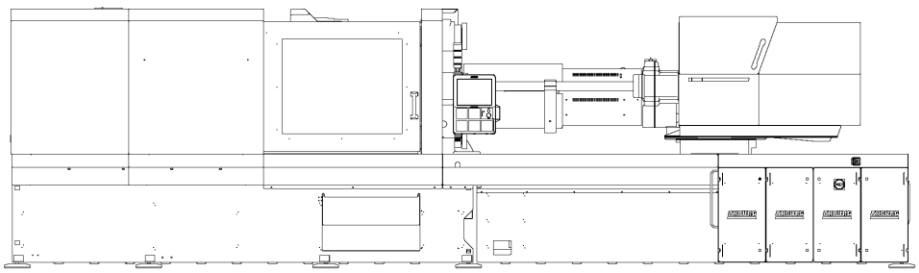
Although all statements and information in this publication are believed to be accurate and reliable, they are presented gratis and for guidance only, and risks and liability for results obtained by use of the products or application of the suggestions described are assumed by the user. NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, DATA OR INFORMATION SET FORTH. Statements or suggestions concerning possible use of the products are made without representation or warranty that any such use is free of patent infringement and are not recommendations to infringe any patent. The user should not assume that toxicity data and safety measures are indicated or that other measures may not be required.

BASF Corporation
Engineering Plastics
1609 Biddle Avenue
Wyandotte, MI 48192

General Information: 800-BC-RESIN
Technical Assistance: 800-527-TECH (734-324-5150)
Web address: http://www.plasticsportal.com/usa

BASF
We create chemistry

PŘÍLOHA PIII: TECHNICKÁ DATA VSTŘIKOVACÍHO STROJE ARBURG ALLROUNDER 720S

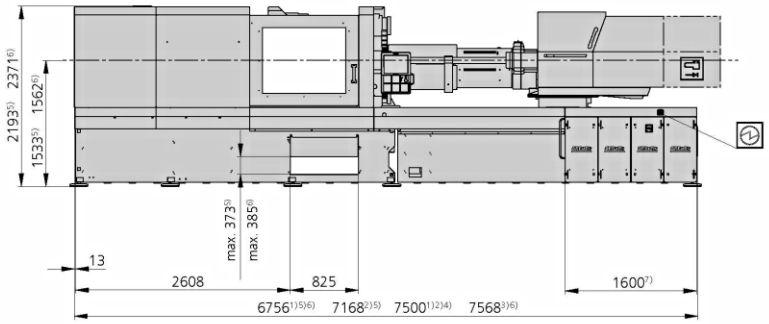


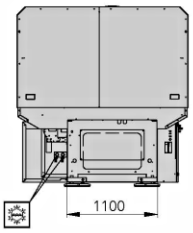
ALLROUNDER 720 S

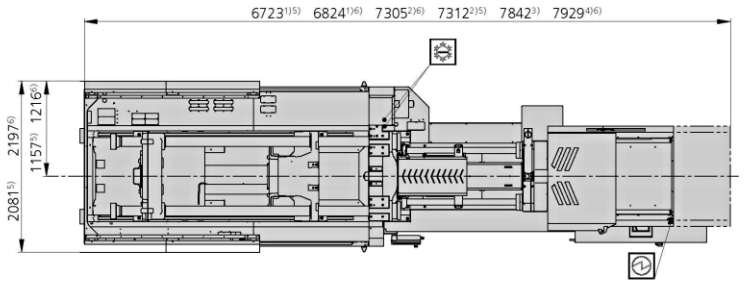
Distance between tie bars: 720 x 720 mm
Clamping force: 3200 kN
Injection unit (acc. to EUROMAP): 1300, 2100, 3200

ARBURG

MACHINE DIMENSIONS | 720 S







Electrical connection

Cooling water connection

1) Injection unit 1300
2) Injection unit 2100
3) Injection unit 3200 + 2 pumps
4) Injection unit 3200
5) Machine model with 1 pump or 2 pumps
6) Machine model with hydraulic accumulator
7) Subject to performance variant and injection unit size

TECHNICAL DATA | 720 S

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

Injection unit				1300			2100			3200		
with screw diameter			mm	55	60	70	60	70	80	70	80	90
Effective screw length			L/D	22	20	17	23	20	17,5	23	20	18
Screw stroke		max.	mm		235			280			320	
Calculated stroke volume		max.	cm³	558	664	904	792	1078	1407	1232	1608	2036
Shot weight		max.	g PS	510	607	826	723	984	1286	1125	1469	1860
Material throughput		max.	kg/h PS	86	96	115	125	145	175	185	215	250
		max.	kg/h PA6.6	43	48	58	62	74	88	93	110	125
Injection pressure		max.	bar	2380	2000	1470	2500	2000	1530	2500	2000	1580
Holding pressure		max.	bar	2380	2000	1470	2500	2000	1530	2500	2000	1580
Injection flow [2]	1 pump	max.	cm³/s	238	284	388	224	306	400		---	
	2 pumps	max.	cm³/s	238	284	388	224	306	400	290	380	482
	Accum.	max.	cm³/s	714	848	1156	1132	1540	2012	1188	1552	1964
Screw circumferential	1 pump	max.	m/min	40	43	51	43	51	58		---	
speed [2]	2 pumps	max.	m/min	40	43	51	43	51	58	47	54	61
	Accum.	max.	m/min	19	21	25	21	25	28	23	26	29
Screw torque		max.	Nm	1510	1640	1920	2140	2500	2550	3140	3510	3510
Nozzle contact force | retraction stroke		max.	kN | mm		90 | 550			110 | 600			110 | 600	
Heating capacity | zones			kW		22,9 | 8			31,4 | 8			38,4 | 8	

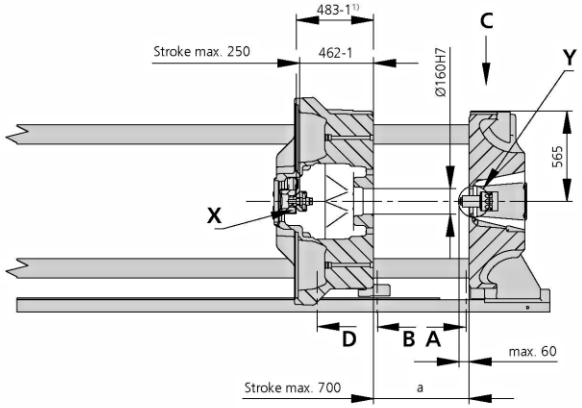
Drive and connection			1 pump (servo)		2 pumps			Accum.		
with injection unit			1300	2100	1300	2100	3200	1300	2100	3200
Net weight of machine		kg	17000	17700	17000	17700	19200		---	
Sound press. level | Insecurity [4]		dB(A)		< 65		73 | 3			< 70	
Oil filling		l		360	300	380	460		460	
Drive power [2]		max. kW	45	55	45	55	55	37	37	45
Electrical connection [3]		kW	71	76	71	89	96	63	71	86
	Total	A		---		---			---	
	Machine	A	100	125	125	125	125	100	100	125
	Heating	A	35	50	35	50	63	35	50	63
Cooling water connection		max. °C		30		30			30	
		min. Δp bar		1,5 | DN 25		1,5 | G 2"			1,5 | G 2"	

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

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

1) Clamping force (kN) - size of injection unit = max. stroke volume (cm³) x max. injection pressure (kbar)
2) Specifications depend on the drive variant / drive configuration.
3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.
4) Detailed info in the operating instr.
[ ] Specifications apply to alternative equipment.

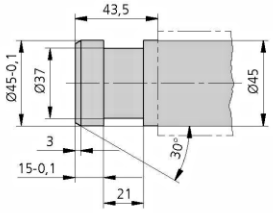
MOULD INSTALLATION DIMENSIONS | 720 S



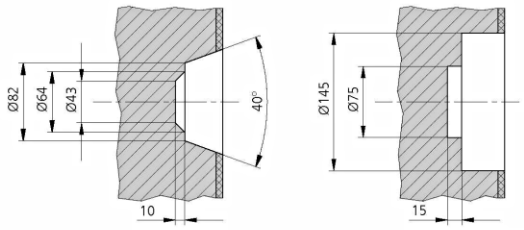
a max.	Mould installation height
Fixed	700
variable, manually	[400, 500, 600]
variable, automatically	[300-700]

[ ] Specifications apply to alternative equipment
* Variable installation height as standard in accumulator version

Ejector bolt | X

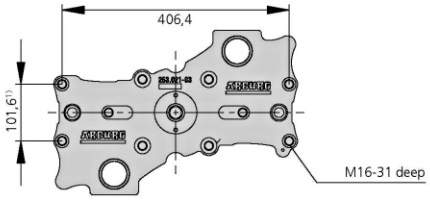


Bore in mould (if required) | Y

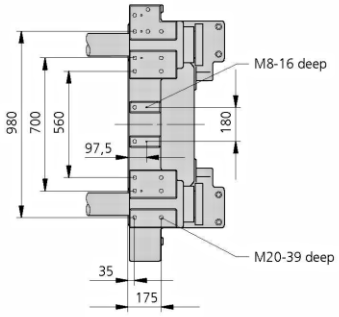


thermoset version -
Injection units 2100 and 3200
available upon request

Ejector plate | D



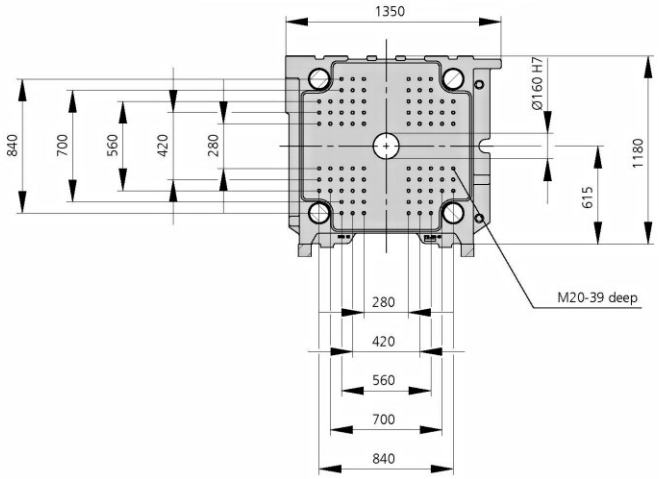
Robotic system mounting | C



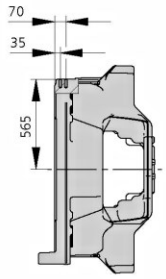
1) Positions of ejector plate

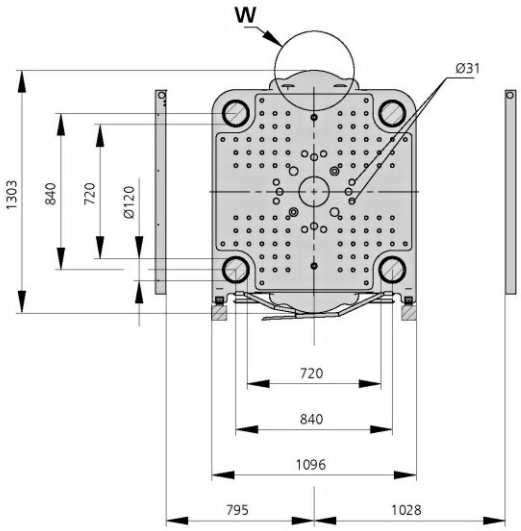
MOULD INSTALLATION DIMENSIONS | 720 S

Fixed mould mounting platen | A

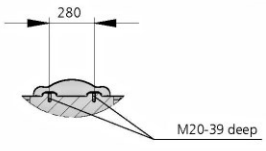


Moving mould mounting platen | B





Robotic system mounting | W



SHOT WEIGHTS | 720 S

Theoretical shot weights for the most important injection moulding materials

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

1) average value

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

524325_EN_GB_032021 · Subject to alterations

© 2021 ARBURG GmbH + Co KG | All data and technical information have been compiled with great care. However we accept no responsibility for 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.