

Optimalizace výrobního procesu vstřikovaného dílu

Bc. Eva Jermářová

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Eva Jermářová
Osobní číslo:	T18339
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Optimalizace výrobního procesu vstřikovaného dílu

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerži na dané téma.
2. Proveďte zhodnocení současného stavu.
3. Proveďte analýzy vstřikovacího procesu.
4. Vyhodnotte dosažené výsledky a navrhnete optimální varinatu.

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.

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

LAW, Averill M. *Simulation modeling and analysis*. Fifth edition. New York: McGraw-Hill Education, 2015, xviii, 776 s. McGraw-Hill international editions. ISBN 978-1-259-25438-3.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá procesem vstřikování a jeho optimalizací.

Teoretická část shrnuje problematiku vstřikovacího procesu, popisuje časté vady, které při tomto procesu vznikají a způsoby, jak se lze těchto vad vyvarovat.

Praktická část řeší optimalizaci procesu výroby konkrétního vstřikovaného dílu pro automobilový průmysl. Je zde navrženo několik variant uspořádání vstřikovací formy a jejich vhodnost je ověřena v simulačním programu Autodesk Moldflow Synergy 2016.

Klíčová slova:

Optimalizace, vstřikování, vstřikovací forma, Moldflow

ABSTRACT

Diploma thesis describes injection molding process and optimization of this process.

The theoretical part describes injection molding process, defects of injected part and possible ways of solving these problems.

The practical part describes optimization of injection molding process of the part that is made for automotive industry. There are described some variants of injection mold disposition. Function of that variants were analyzed by Autodesk Moldflow Synergy 2016 simulation software.

Keywords:

Optimization, injection molding, mold, Moldflow

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, cenné rady a připomínky, věnovaný čas a velkou trpělivost při řešení problémů.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERY	11
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	11
1.1.1 Termoplasty.....	11
1.1.2 Reaktoplasty.....	12
1.1.3 Elastomery.....	12
1.1.4 Termoplastické elastomery	13
1.2 MODERNÍ PLASTY.....	13
1.3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE	14
2 VSTŘIKOVÁNÍ	16
2.1 PRINCIP PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ.....	16
2.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	17
3 ČASTÉ VADY VÝROBKU	22
3.1 STUDENÉ SPOJE	25
3.2 PLYNOVÉ BUBLINY	28
3.3 VZDUCHOVÉ BUBLINY	28
3.4 STAŽENINY.....	29
3.5 DEFORMACE VZNIKLÉ PŘI ODFORMOVÁNÍ.....	30
3.6 DIESELŮV EFEKT (DIESELEFEKT).....	31
3.7 ČERNÉ TEČKY.....	32
3.8 PROPADLINY	34
3.9 VOLNÝ TOK TAVENINY (JETTING).....	35
3.10 ODLESKY/ RŮZNORODÉ ODLESKY.....	36
3.11 STŘÍBŘENÍ, STŘÍBRNÉ PRUHY, MAPY A STOPY NA POVRCHU VÝROBKU.....	37
3.12 VZHLED GRAMOFONOVÉ DESKY A POMERANČOVÉ KŮRY	39
3.13 NEÚPLNÝ VÝROBEK	39
3.14 PŘETOKY A OTŘEPY.....	40
3.15 TOKOVÉ ČÁRY	41
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	43
5 VSTŘIKOVANÝ DÍL	44
5.1 VÝCHOZÍ SIMULACE	46
5.1.1 Čas plnění (Fill time)	47
5.1.2 Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	47
5.1.3 Vzduchové kapsy (Air traps)	48
5.1.4 Studené spoje (Weld lines).....	49
5.1.5 Propadliny (Sink marks estimate)	49
5.1.6 Celková deformace (Deflection, all effects)	50
5.1.7 Rychlost smykové deformace (Shear rate)	51

5.2	VARIANTA 2	51
5.2.1	Čas plnění (Fill time)	52
5.2.2	Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	52
5.2.3	Vzduchové kapsy (Air traps)	52
5.2.4	Studené spoje (Weld lines).....	52
5.2.5	Propadliny (Sink marks estimate)	53
5.2.6	Celková deformace (Deflection, all effects)	54
5.2.7	Rychlost smykové deformace (Shear rate)	54
5.2.8	Efektivita odvodu tepla temperačním systémem (Circuit heat removal efficiency)	55
5.2.9	Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)	55
5.3	VARIANTA 3	56
5.3.1	Čas plnění (Fill time)	56
5.3.2	Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	57
5.3.3	Vzduchové kapsy (Air traps)	58
5.3.4	Studené spoje (Weld lines).....	58
5.3.5	Propadliny (Sink marks estimate)	59
5.3.6	Celková deformace (Deflection, all effects)	59
5.3.7	Rychlost smykové deformace (Shear rate)	60
5.4	VARIANTA 4	60
5.4.1	Čas plnění (Fill time)	61
5.4.2	Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	61
5.4.3	Vzduchové kapsy (Air traps)	62
5.4.4	Studené spoje (Weld lines).....	62
5.4.5	Propadliny (Sink marks estimate)	63
5.4.6	Celková deformace (Deflection, all effects)	63
5.4.7	Rychlost smykové deformace (Shear rate)	63
5.5	VARIANTA 5	64
5.5.1	Čas plnění (Fill time)	65
5.5.2	Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	65
5.5.3	Vzduchové kapsy (Air traps)	66
5.5.4	Studené spoje (Weld lines).....	66
5.5.5	Propadliny (Sink marks estimate)	67
5.5.6	Rychlost smykové deformace (Shear rate)	67
5.5.7	Efektivita odvodu tepla temperačním systémem (Circuit heat removal efficiency)	68
5.5.8	Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)	69
5.5.9	Celková deformace (Deflection, all effects)	69
5.5.10	Varianta 6	70
5.5.11	Čas plnění (Fill time)	70
5.5.12	Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	70
5.5.13	Vzduchové kapsy (Air traps)	71
5.5.14	Studené spoje (Weld lines).....	71
5.5.15	Propadliny (Sink marks estimate)	71

5.5.16	Celková deformace (Deflection, all effects)	72
5.5.17	Rychlost smykové deformace (Shear rate)	72
6	DISKUSE VÝSLEDKŮ	73
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK	83
	SEZNAM PŘÍLOH	84

ÚVOD

Proces vstřikování polymerů je dnes jedním z nejrozšířenějších způsobů výroby součástí pro prakticky kterýkoli průmysl. Jedná se o stabilní proces schopný vyrábět velké množství výrobků za krátký čas s přesnými rozměry, různým povrchem, různými vlastnostmi a různým tvarem.

Pořízení vstřikovacího stroje a nástroje, jejich provoz a údržba jsou však stále velmi ekonomicky nákladné, proto je třeba každý vstřikovací proces co nejvíce optimalizovat, aby vyráběl co možná největší množství za co nejmenší cenu. Do ceny výrobku se pak odráží právě i zmiňované náklady na pořízení a údržbu strojů a nástrojů.

Ve výsledku se každá ušetřená sekunda vstřikovacího cyklu může rovnat velkým finančním úsporám.

K předběžným analýzám vstřikovacího procesu lze využít simulační programy, které odhalí předpokládaný vznik vad na výrobku, dobu vstřikovacího cyklu, nebo třeba hmotnost vtokového zbytku, tedy odpadu.

Tato analýza může sama ušetřit velké množství nákladů tím, že předchází chybám, které by se při úpravě formy mohly zásadně prodražit.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Plasty neboli polymery jsou látky s makromolekulami v jejichž řetězci se mnohokrát opakuje základní konstituční jednotka – mer. Jsou to především látky organické povahy, přírodní nebo syntetické (dřevo, rostliny, ropa, zemní plyn), výjimkou však nejsou ani anorganické polymery, jako např. silikonový kaučuk. [1]

1.1 Rozdělení polymerů

Polymery dle jejich chování za zvýšených teplot děláme na termoplasty, reaktoplasty, elastomery a termoplastické elastomery. [1]

1.1.1 Termoplasty

Termoplasty jsou materiály, které mají lineární nebo rozvětvené makromolekulární řetězce.



Obr. 1. Lineární (vlevo) a rozvětvené řetězce (vpravo)

Tyto materiály jsou v tuhém stavu za standardní teploty okolí, se zvýšenou teplotou ale přechází do stavu plastického, a tedy snadno tvářitelného. Po tváření je lze pouhým ochlazením převést zpět do tuhého stavu, přičemž si zachovávají svůj tvar. Během tohoto procesu neprobíhá chemická reakce, nemění se tedy ani jejich chemická struktura a jedná se čistě o fyzikální děj. Proces převedení do plastického stavu a zpět do pevného lze teoreticky do nekonečna opakovat, avšak opakovaným zahříváním se mohou vlastnosti polymeru zhoršovat důsledkem štěpení molekul, degradace materiálu. Mezi nejznámější a nejvíce využívané materiály této skupiny polymerů patří např. polypropylen (PP), polyetylen (PE), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyoxymetylen (POM) nebo polyethyltereftalát (PET). [1]



Obr. 2. Trubka z PP (vlevo), trubka z PE (uprostřed), trubka z PVC (vpravo)
[8][9][10]

1.1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou materiály, jež se zvýšenou teplotou přechází do plastického stavu, ve kterém je lze velmi snadno tvářet. Při zahřívání těchto látek dochází k síťování makromolekul, díky kterému si zachovávají tvar. Síťování je nevratná chemická reakce, kvůli které reaktoplasty opakovaným zahříváním nepřejdou znovu do plastického stavu a zůstávají netavitelné, nerozpustné a nelze je svařovat. K vytvrzení reaktoplastů může docházet nejen působením tepla, ale také působením síťovacích činidel, nebo kombinací obou těchto faktorů. Přestože nejsou reaktoplasty schopny opakovaného tváření, jsou to kvůli jejich vysoké pevnosti hojně využívané materiály. Mezi nejznámější zástupce reaktoplastů patří převážně pryskyřice jako např. fenolformaldehydová pryskyřice (PF) známá pod názvem bakelit, epoxidová pryskyřice (EP), močovinoformaldehydová pryskyřice (UF), melamin-formaldehydová pryskyřice (MF), nebo nenasycené polyesterové pryskyřice (UP). [1]

1.1.3 Elastomery

Elastomery jsou materiály s nízkou tuhostí, které jsou za běžných podmínek vysoce elastické a jdou tedy velmi malou silnou výrazně deformovat, aniž by se porušily – deformace je převážně vratná. Elastomery vznikají z kaučuku, který se za pomoci zvýšené teploty a síťovacích činidel z vulkanizuje (řídce síťování nejčastěji za pomoci síry) a stává se z něj pryž. Pryž je tedy vulkanizovaný elastomer charakteristický chemickými příčnými vazbami mezi makromolekulami díky čemuž je vysoce pružná a odolná vůči trvalé deformaci. Nejznámějšími kaučuky používanými pro výrobu pryží jsou např. izoprenový kaučuk (IR), butadienstyrenový kaučuk (SBR), nitril butadien kaučuk (NBR) nebo etylen-propylen-dienový kaučuk (EPDM). [1]

1.1.4 Termoplastické elastomery

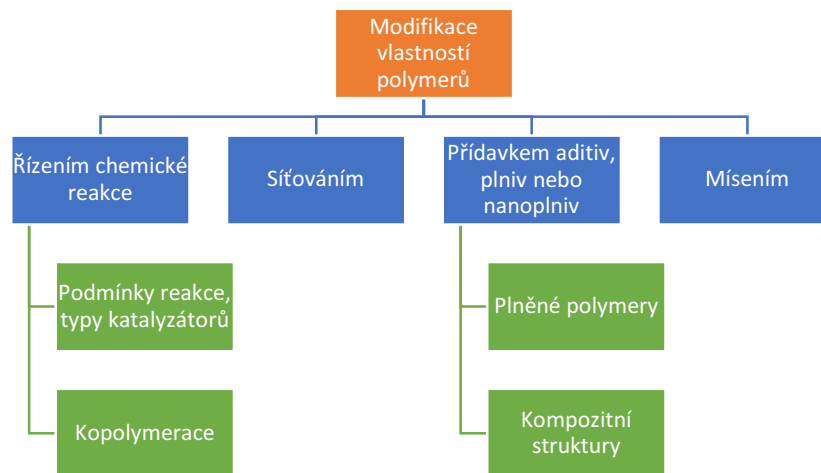
Termoplastické elastomery jsou materiály, které jsou vysoce elastické (mají tedy některé vlastnosti elastomerů), ale vlivem zvýšené teploty mohou opakovaně přecházet do plastického stavu a zpět do pevného elastického (mají tedy i některé vlastnosti termoplastů). Struktura těchto polymerů je tvořena dvěma druhy segmentů – tvrdými segmenty (termoplastické), které tvoří uzly sítě a zajišťují opakovatelnou tvářitelnost termoplastů, a měkkými segmenty (elastomery) tvořícími spojnice uzlů a dodávajícími polymeru elastické vlastnosti. Hlavní rozdíl mezi elastomery a termoplastickými elastomery je tedy především ve vlastnostech uzlů sítě, které jsou u elastomerů čistě chemické povahy, a naopak u termoplastů povahy fyzikální. Termoplastické elastomery sice nejsou schopny tak velkým vratných deformací jako elastomery, jejich velkou výhodou je ale možnost zpracování běžnými zpracovatelskými postupy určenými pro termoplasty a též možnost jejich opakovaného zpracování, a tedy i recyklace. [1]

1.2 Moderní plasty

Polymerní materiály a kompozity z nich vytvořené nahrazují v rámci moderního strojírenství v mnoha případech materiály kovové. Z hlediska postavení na trhu se rozlišují tři hlavní velké třídy plastů. Konkrétně komoditní plasty, které jsou určené pro velmi široké použití a také představují největší objem výroby i spotřeby, dále konstrukční neboli inženýrské plasty, které nabízejí mnohem lepší užitné vlastnosti, a nakonec vysoce odolné (high-tech) polymery, nabízející jedinečné vlastnosti užitečné pro specifické aplikace. Stále více se ve výrobě využívá nejen vlastností běžných polymerních materiálů, ale i inženýrských plastů nebo vysoce výkonných konstrukčních plastů, a to i přesto, že ceny těchto vysoce výkonných materiálů jsou stále poměrně vysoké. Mezi takové polymery patří např. polysulfony (PSU), polyfenylsulfidy (PPS), Polyetheretherketony (PEEK), polyimidy (PI) nebo polybenzimidazoly (PBI). Naopak do skupiny těchto materiálů nepatří např. reaktoplasty, které mají teplotní odolnost do 150 °C. Tyto materiály jsou využívány především kvůli jejich chemické odolnosti, dlouhé životnosti, nebo vynikající teplotní odolnosti, se kterou souvisí i teplotní stabilita díky které mají polymery lepší mechanické vlastnosti. [1] [2]

Stále více se také v praxi využívají různé modifikace plastů a jejich směsi, přizpůsobené tak, aby na míru odpovídaly požadovaným vlastnostem výrobku, nebo mající specifické zpracovatelské vlastnosti a lze je tedy jednodušeji zpracovávat, čímž se snižují náklady na výrobu výrobků z plastů. Vyvíjeny jsou různé nové typy aditiv a plnivy, elektrovedivé pasty

či přímo elektrovedivé polymery, biopolymery, nebo polymery s tvarovou pamětí. Možnosti, jak se v současné technické praxi nejčastěji modifikují polymery, jsou uvedeny na Obr. 3. [2]



Obr. 3. Možnosti modifikace vlastností polymerů v současné technické praxi[2]

1.3 Zpracovatelské technologie

Plasty jsou makromolekulární látky, které se snadno tváří, tvarují, nebo jinak zpracovávají na hotové výrobky nebo polotovary určené k dalšímu zpracování. Výroba a využití plastů v běžném lidském životě velkou mírou přispěla ke zvýšení kvality života. Dnes je však vytvářen velký tlak na nalezení výrobních postupů a zpracovatelských technologií šetrnějších k životnímu prostředí, aniž by byl zastaven nebo zpomalen vývoj společnosti. I to je jedním z úkolů zpracovatelských technologií zabývajících se plasty jejich výrobou tak, aby měly výrobky více vlastností vyhovujících dnešním environmentálním požadavkům. [1][3]

Zpracovatelské technologie plastů se dají rozdělit na několik kategorií dle jejich funkce v procesu výroby, nebo typu požadovaného výrobku. Jako první jsou v procesu zpracování plastů přípravné operace jako míchání a hnětení, granulace, tabletování, sušení, nebo barvení. Po těchto přípravných operacích následují hlavní zpracovatelské technologie – přetlačování, válcování a kalandrování, přímé lisování, vytlačování, vyfukování dutých těles, vstřikování, tvarování polotovarů za tepla nebo za pomoci vakua. Kapalné systémy se zpracovávají odléváním, litím, máčením, natíráním, reakčním vstřikováním, nebo zvlákňováním. Speciální skupinou zpracování plastů je zpracování za pomoci laseru jako je řezání nebo strukturované vrtání, ale i spojování – svařování a navařování, nebo další technologie – spo-

jování plastu s kovem, laserové leštění plastů, odstraňování přetoků, odjehlování, nebo laserové značení. Po těchto hlavních zpracovatelských technologiích mohou následovat technologie dokončovací a povrchové úpravy. K těmto technologiím se řadí lakování, kaširování, dezénování, leštění, pokovování, potiskování, nebo nanášení povrchové ochrany povlakováním. [1][3]

2 VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování je jednou z nejpoužívanějších zpracovatelských technologií pro termoplasty, termoplastické elastomery, polymerní směs, kompozity, méně často pak reaktoplasty, kaučuky a pryže. Tato technologie v podstatě vychází z technologie tlakového lití, využívá však odlišných teplot a jiných tokových vlastností tavenin. [1]

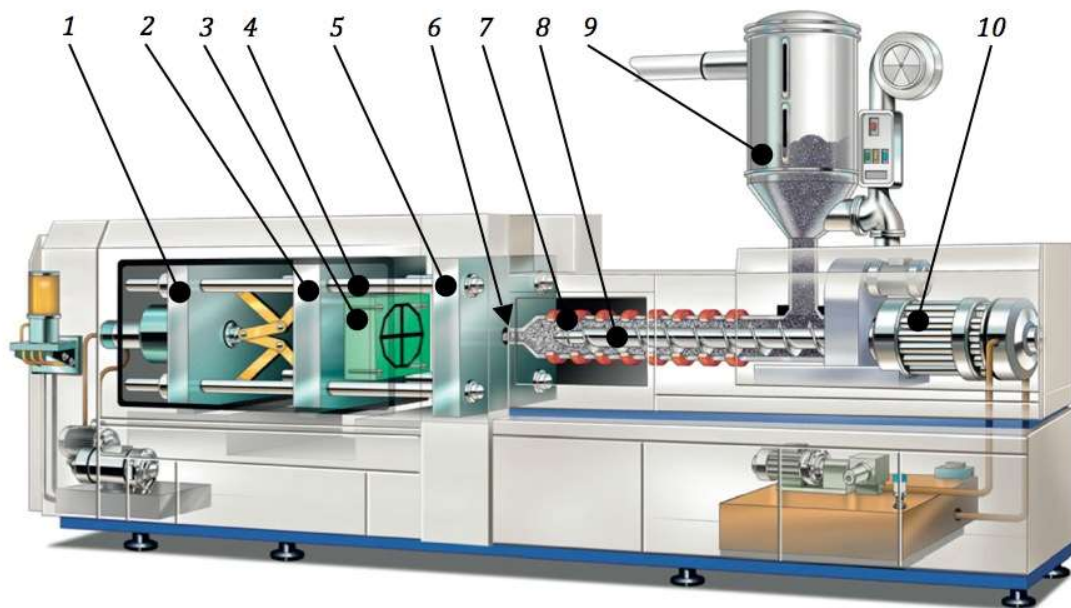
Vstřikováním lze vyrábět velkou skupinu výrobků. Je možné vyrábět buď polotovary určené k dalšímu zpracování, nebo přímo konečný výrobek jako např. nárazníky, hračky, krabice, nebo květináče. Vstřikováním lze vyrobit velmi rozmanité tvary, velikosti i hmotnosti výrobků. [1]

Velkou výhodou technologie vstřikování je vysoká rozměrová i tvarová přesnost výrobku a také sériová opakovatelnost procesu. Dokončením pouhého jednoho vstřikovacího cyklu, který se časově pohybuje pouze v řádech několika sekund) lze díky několikanásobným formám získat velké množství konečných dílů s výbornou kvalitou povrchu, rozměrově přesných a často i bez potřeby jakéhokoli dalšího opracování. [1]

Naopak nevýhodou této technologie jsou poměrně vysoké pořizovací náklady na nákup strojů a nástrojů vzhledem k velikosti a ceně samotného výrobku. [1]

2.1 Princip procesu vstřikování

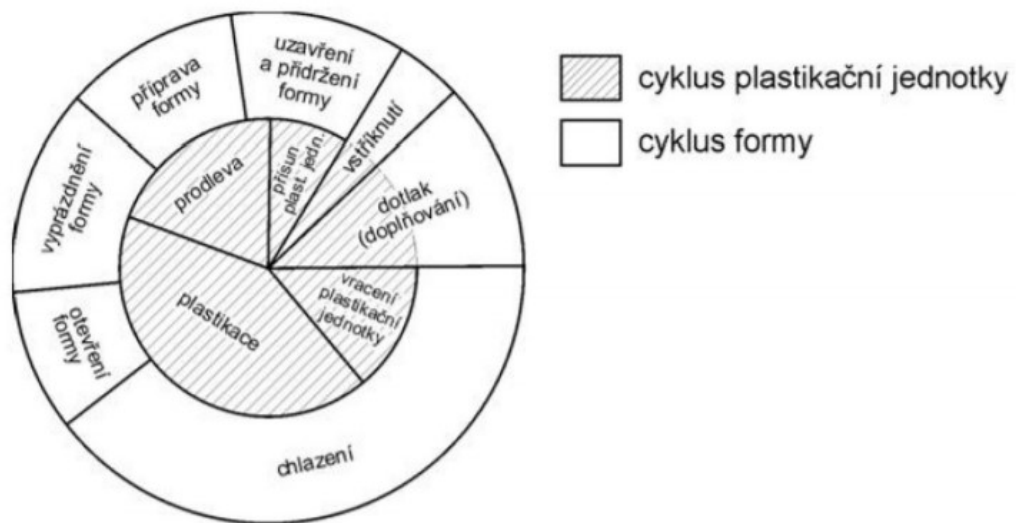
Princip vstřikování spočívá ve vstříknutí přesné dávky roztaveného materiálu do dutiny vstřikovací formy, která udává tvar finálnímu výrobku. Materiál (nejčastěji granulát, recyklát nebo regranulát) do vstřikovacího stroje vstupuje násypkou. Pod násypkou si materiál odebírá rotující šnek, který materiál dopravuje až ke trysce vstřikovacího stroje. V průběhu dopravy materiál prochází vyhřívanou částí vstřikovacího válce, kde za pomoci zvýšené teploty a tření taje a homogenizuje. Na konci válce je již zhomogenizovaný materiál ve formě taveniny ohřáté na požadovanou vstřikovací teplotu. Tavenina je následně pístovým pohybem šneku vstříknuta do dutiny formy, kterou zcela zaplní. Následuje chlazení vstříknuté taveniny odvodem tepla kovovými součástmi formy a chladícím systémem formy. Jakmile je výrobek ochlazen na vyhazovací teplotu, forma se otevře a výrobek je vyhozen z dutiny formy ven, čímž může započít další vstřikovací cyklus. [5]



Obr. 4. Vstřikovací stroj - 1 – uzavírací jednotka, 2 – pohyblivá upínací deska, 3 – pohyblivá část vstřikovací formy, 4 – vodící sloupy, 5 – pevná upínací deska, 6 – čelo špičky vstřikovací trysky, 7 – tavící komora, 8 – šnek, 9 – násypka pro plastový polotovar, 10 – pohonná jednotka šneku [11]

2.2 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus je přesně definovaný postup fází, které jsou potřebné pro přetvoření vstupního materiálu v konečný výrobek. Některé fáze cyklu jsou společné pro stroj i nástroj, tedy vstřikovací formu, některé fáze vykonává každá tato součást zvlášť viz obr vstřikovacího cyklu. Vzhledem k tomu, že je proces cyklický, musí se zvolit počátek tohoto cyklu. [5]



Obr. 5. Vstřikovací cyklus pro termoplasty [12]

Často se za počátek považuje vstříknutí taveniny do dutiny formy. Na počátku (Obr. 6 bod A) šnek čistě axiálním pístovým pohybem (v této fázi nevykonává šnek žádný rotační pohyb) směrem k formě vstříkne taveninu do dutiny formy. Doba, po kterou šnek tento pohyb vykonává, a tedy i po kterou se plní forma, se nazývá doba vstřikování, nebo doba plnění (značí se t_v). Na konci této fáze (Obr. 6 bod B) je v dutině formy nejvyšší tlak a tavenina zaplňuje 95-97 % objemu dutiny. Dá se říci, že již v této fázi cyklu začíná chlazení výrobku, protože tavenina již při prvním kontaktu s formou odevzdává teplo, a tedy se začíná ochlázovat. [5]

Po vstřikovací fázi následuje fáze dotlaku. V této fázi se dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy kompenzuje zmenšování objemu. Po dotlaku je menší pravděpodobnost vzniku staženin nebo propadlin způsobených právě smětšením taveniny po schlédnutí do tuhého stavu. Čas, po který trvá tato fáze se nazývá doba dotlaku (značí se t_d). Rozlišují se dva druhy dotlaku – izobarický, kdy je dotlak po celou dobu stejně vysoký jako maximální vstřikovací tlak (plná modrá křivka na Obr. 6), a dotlak izochorický, kdy se tlak po krátké době sníží, ale zachovává se konstantní objem taveniny. Tato fáze končí v bodě D na Obr. 6. [5]

V bodě C již tuhle tavenina ve vtokovém kanálu (v případě využití studeného vtokového systému). [5]

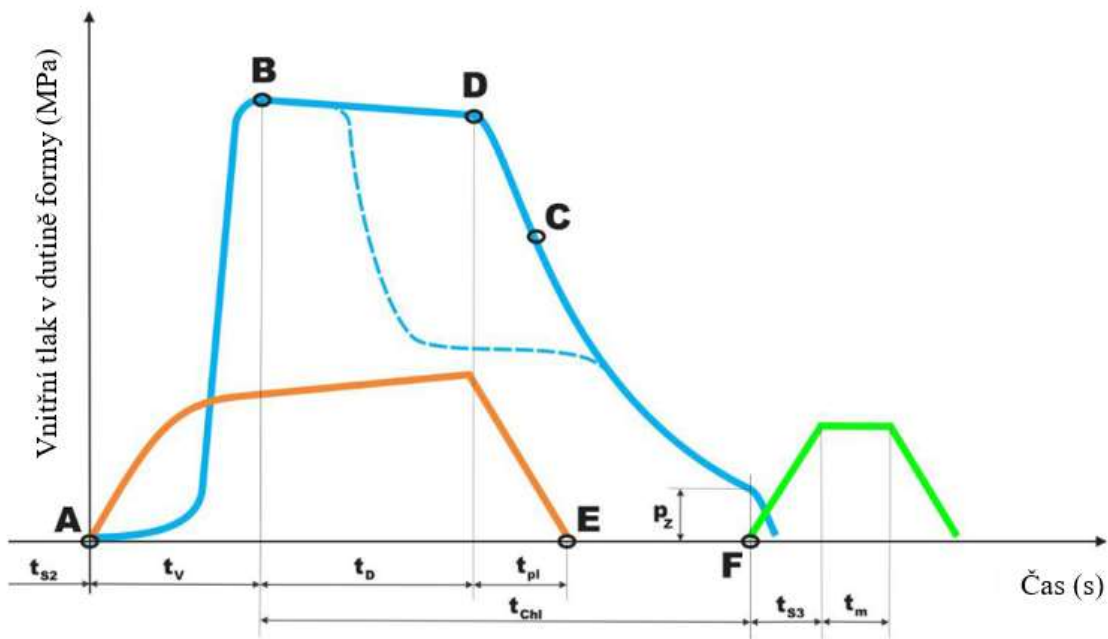
Po dotlaku se již musí rozlišit další fáze podle toho, jestli je vykonává forma nebo vstřikovací stroj. Z hlediska cyklu formy následuje fáze chlazení. Tato fáze sice začíná již v okamžiku vstříknutí taveniny do formy, nicméně až po dotlaku se snižuje tlak ve formě a tavenina již

nepřijímá žádné teplo od vstřikovacího stroje. V této fázi forma nevykonává žádné pohyby. Tato fáze bývá nejdelší fází vstřikovacího cyklu, je zde tedy snaha vyházovat výrobek z formy co nejdříve a tím zkrátit dobu cyklu. Vždy je však nutné vyčkat na vyhazovací teplotu, při které již výrobek nemění svůj tvar. [5]

Z hlediska vstřikovacího stroje se odsune vstřikovací jednotka a začíná plastikace nové dávky materiálu. Materiál je ohříván nejen teplem přijatým z vyhřívacích pásů, ale i frikčním teplem vzniklým třením částeczek plastu o stěny komory a povrch šneku. V této fázi se šnek začíná otáčet a zároveň ustupovat dozadu, vykonává tedy radiální i axiální pohyb. V průběhu tohoto pohybu nabírá granulovaný materiál, který je plastikován a vtlačován do prostoru před čelem šneku. Šnek při svém axiálním pohybu musí překonávat tzv. zpětný tlak, jehož velikost ovlivňuje kvalitu prohnětení plastifikovaného materiálu i dobu plastikace. Příliš vysoký zpětný tlak může způsobit degradaci materiálu, a tedy sníženou kvalitu výrobku. Čas, po který probíhá tato fáze cyklu, se označuje t_{pl} . Tlak v této fázi klesá až na hodnotu zbytkového tlaku (p_z), tedy tlaku, který je ve formě těsně před otevřením. Zbytkový tlak by neměl být příliš vysoký, jelikož je příčinou vysokých vnitřních pnutí ve výrobku a tato pnutí mohou způsobit deformace nebo zhoršené mechanické vlastnosti výrobku. [5]

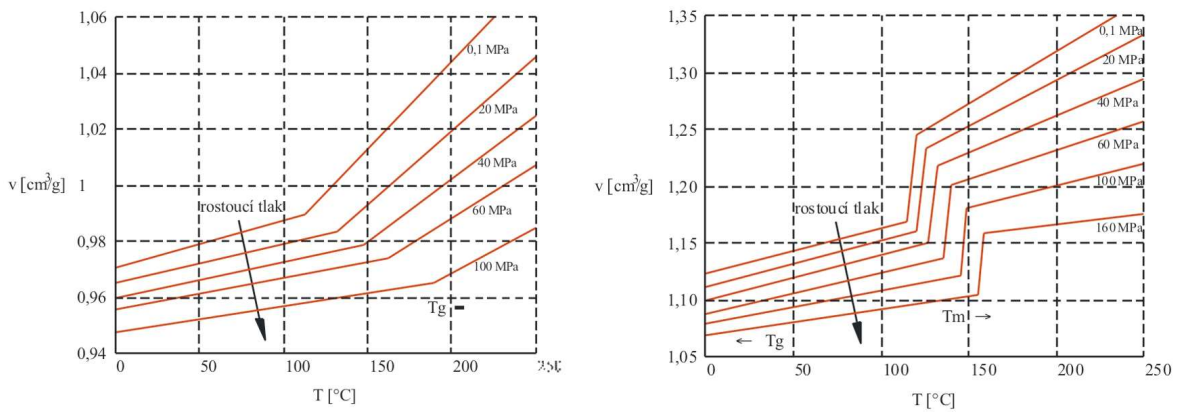
Po zchlazení výrobku následuje otevření formy a vyhození výrobku (bod F *Obr. 6*) Čas, kdy se forma otevírá je čas strojní (t_{s3}), následuje čas vyhození a manipulace s výrobkem (t_m) a čas zavření formy (t_{s2}). Před uzavřením formy je možné vložit inserty, nanést preparační prostředky, nebo očistit formu. [5]

Na konci vstřikovacího cyklu je tedy forma zavřena a materiál naplastikovaný, stroj je tedy připraven k započetí dalšího vstřikovacího cyklu. Celý vstřikovací cyklus často trvá i méně než 30 s. [5]

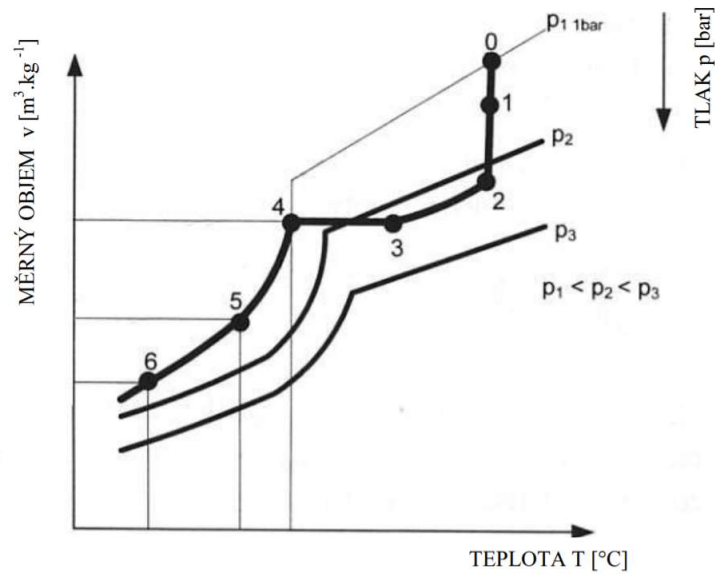


Obr. 6. Průběh vnitřního tlaku v dutině formy [5]

Tyto fáze vstřikovacího cyklu se často vyjadřují pomocí stavových termodynamických veličin (tlaku p , měrného objemu v a teploty hmoty T) v tzv. p - v - T diagramu. Tento diagram je amorfní a semikrystalické termoplasty odlišný (Obr. 8).



Obr. 7. p - v - T diagram pro amorfní (vlevo) a semikrystalické polymery [5]



Obr. 8. Vstříkovací cyklus v p - v - T diagramu [13]

Fáze p - v - T diagramu:

- 0 – 1 plnění objemu formy polymerní taveninou
- 1 – 2 komprese taveniny ve formě
- 2 – 3 dotlak
- 3 – 4 izochorické snižování tlaku
- 4 – 5 chlazení bez tlaku
- 5 – 6 chlazení po vyhození z formy

3 ČASTÉ VADY VÝROBKU

Během procesu vstřikování může dojít k velkému množství vad na výrobku. Vada výrobku je určitý defekt, rozdíl vystříknutého kusu oproti navrženému tvaru (specifikovanému např. výkresem nebo referenčním vzorkem), požadovaných vlastností mechanických, optických, nebo jiných vlastností, nebo např. vzhledu. Některé z těchto vad jsou tedy pouze kosmetického charakteru, některé však výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti výrobku. Některým vadám se lze vyvarovat optimalizací vstřikovacího procesu, některé lze touto optimalizací odsunout do míst, kde například výrobek není výrazně mechanicky namáhán, a tak zde mohou být slabá místa. Zdroje těchto vad lze hledat ve všech částech vstřikovacího procesu, od samotného vstupního materiálu (nevhodná volba materiálu, špatné sušení, nehomogenní materiál), přes konstrukci formy a samotného výrobku (velké rozdíly v tloušťce stěn, ostré hrany apod.) až ke vstřikovacímu stroji a technologickým podmínkám. [3][7]

Vady vstřikovaných výrobků lze rozdělit na dva základní typy, a to vady zjevné a vady skryté. [7]

Zjevné vady jsou zjistitelné pouhým vizuálním porovnáním výrobku s referenčním vzorkem, návrhem, výkresem, nebo specifikací. Takto lze snadno odhalit především dvě skupiny vad, a to vady povrchu a tvaru. [7]

Vady tvaru jsou často vidět již na první pohled. Patří mezi ně např. nedostříknuté výrobky, nebo naopak přetoky a ořepy, propadliny, vrásnění a zvlnění, delaminace, stopy po vyhazovačích a deformace rozměrové, vzniklé např. zvolením nevhodných technologických parametrů, či špatnou konstrukcí formy (nevhodná vtoková soustava, špatné odvodušnění, malé úkosy). [7]

Vady povrchové jsou také velmi dobře zjistitelné pouhým okem. Patří sem stříbření, nerovnoměrný lesk, matná místa, nedokonalé povrchy jako povrch gramofonové desky nebo pomerančové kůry, stopy po studených spojích, tokové čáry, změna barvy či dokonce žloutnutí, nebo jinak zdegradovaný materiál (šmouhy, černé tečky a spálená místa). [7]

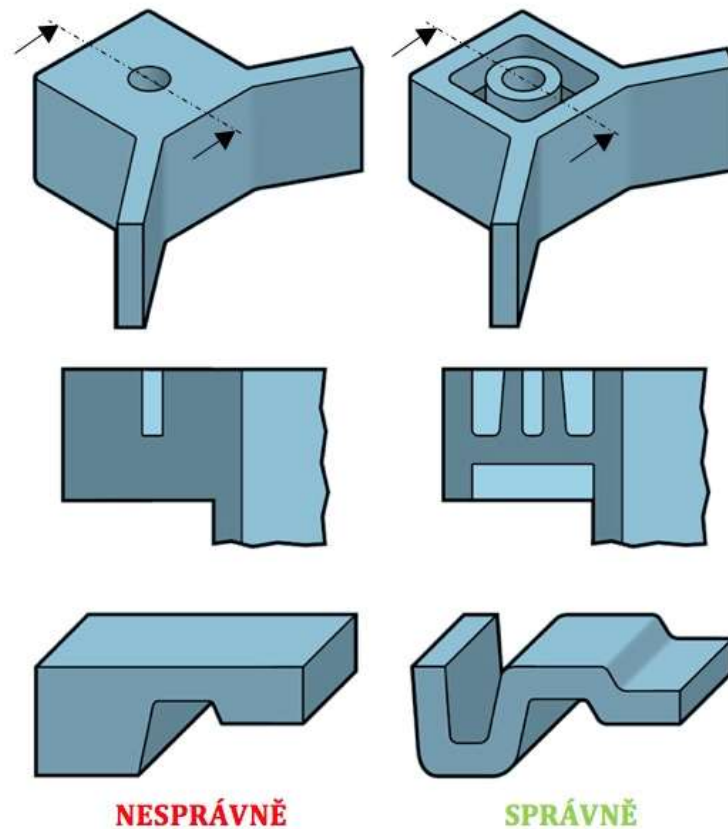
Skryté vady naopak většinou nelze odhalit pouhou vizuální kontrolou, jsou ale často mnohem závažnější než vady zjevné, protože často negativně ovlivňují vlastnosti výrobku. Jelikož tyto vady nelze odhalit pouhým okem, jsou z aplikačního hlediska potenciálně velmi nebezpečné a je tedy snaha je předvídat, popř. alespoň odhalit a následně eliminovat. Tyto vady vznikají nejčastěji v důsledku jedné (nebo více) z těchto příčin:

- u vyztužených typů polymerů – nerovnoměrná orientace makromolekul nebo vláken
- vnitřní pnutí materiálu,
- u semikrystalických plastů dochází k nerovnoměrné krystalizaci polymeru,
- degradace materiálu,
- vnitřní defekty (uzavřený vzduch, lunkry, uzavřené plyny).

K identifikaci a predikci těchto vad lze využít simulační programy, či informace od výrobců polymerních materiálů a vstřikovacích strojů, nicméně pro praktické využití v sériové výrobě jsou stále velmi důležité odborné znalosti a zkušenosti seřizovačů a technologů, o vstřikovaném materiálu, stroji, konstrukci formy a vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu finálního výrobku. [7]

Odstranění vad je nejjednodušší a také nejméně nákladné změnou některého (nebo více) technologického parametru. Pokud vadu tímto způsobem však odstranit nelze, přistupuje se k nákladnějším řešením, jako je úprava vstřikovací formy, stroje, nebo samotného vstřikovaného polymeru. Některé vady je však možné eliminovat již při konstrukci výrobku a formy. [7]

Při konstrukci vstřikovaného dílu je nutné brát v potaz chování konkrétního polymeru, ze kterého má být díl vyroben. Obecně je při návrhu vstřikovaného dílu nutné vyvarovat se velkých změn v tloušťkách stěn a velkých rovných ploch. S ohledem např. na smrštění polymeru je nutné volit správnou geometrii otvorů a výřezů, využívat dostatečné úkosy dle povrchu formy (leštěný nebo strukturovaný povrch) a myslet na dostatečně velké rádiusy v rozích a na hranách. [7] [4]

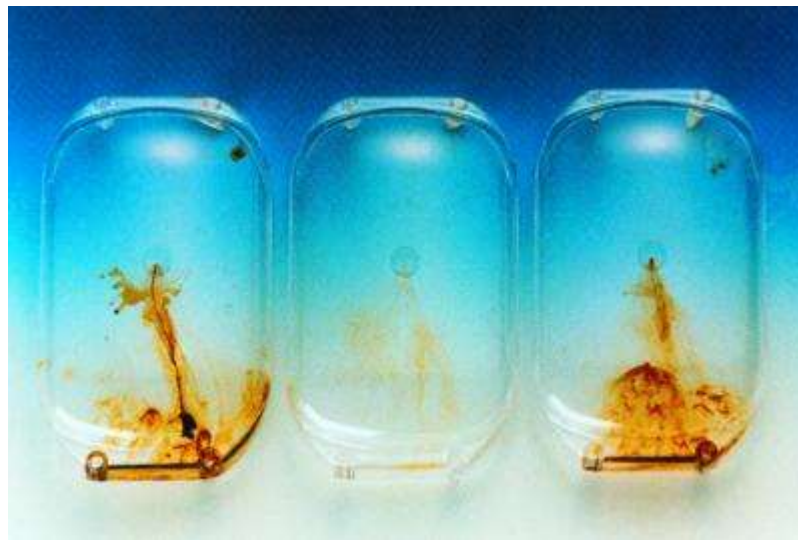


Obr. 9. Řešení tlouštěk stěn při konstrukci výrobku [11]

V konstrukci a výrobě vstřikovací formy může taktéž vzniknout celá řada problémů ovlivňujících výsledné vlastnosti hotového výrobku. Častým případem je např. nedostatečná tuhost formy, která bývá způsobena poddimenzováním některé části formy, chybným výběrem materiálu formy s ohledem na vstřikovaný polymer, špatným nebo nedostatečným tepelným opracováním, nebo nevhodně umístěné vtokové ústí. Při návrhu formu musí konstruktér často volit kompromis mezi ideálními reologickými požadavky pro zvolenou taveninu a výrobními požadavky (nepřerušovaný chod stroje, zkrácení pracovního cyklu). Často s tlakem na co nejkratší vstřikovací cyklus vznikají vady, které by u delšího cyklu nenastaly, a i s těmi je pak nutné se vyrovnat. Zdrojem vad způsobených vstřikovací formou je např. i nedostatečné odvzdušnění, nesprávně zvolený vyhazovací systém, či poddimenzovaný (v horším případě naprosto nevhodný) temperační systém, který může způsobovat vnitřní pnutí v materiálu a anizotropii rozměrů konečného výrobku i jeho vlastností. [7][4]

Z hlediska vstřikovacího stroje bývá nejčastější příčinou vzniku vad na výrobku opotřebení funkčních částí vstřikovací jednotky. V případě, že jsou jednotlivé součásti opotřebené, vznikají mezi nimi větší vůle, a tím pádem i tzv. mrtvé kouty, v nichž dochází k degradaci

polymeru a ten je v některé z dalších dávek vstříknut do formy. Může se také stát, že v důsledku opotřebení není dokonalý ani dosed trysky k formě, polymer tedy vytéká i mimo formu a výrobek je po vstříknutí obtížné vyhodit z formy. Problémem také může být poruchové topení v jednotlivých pásmech, což má za následek nehomogenní taveniny a následné vady ve výrobku. [3][7]



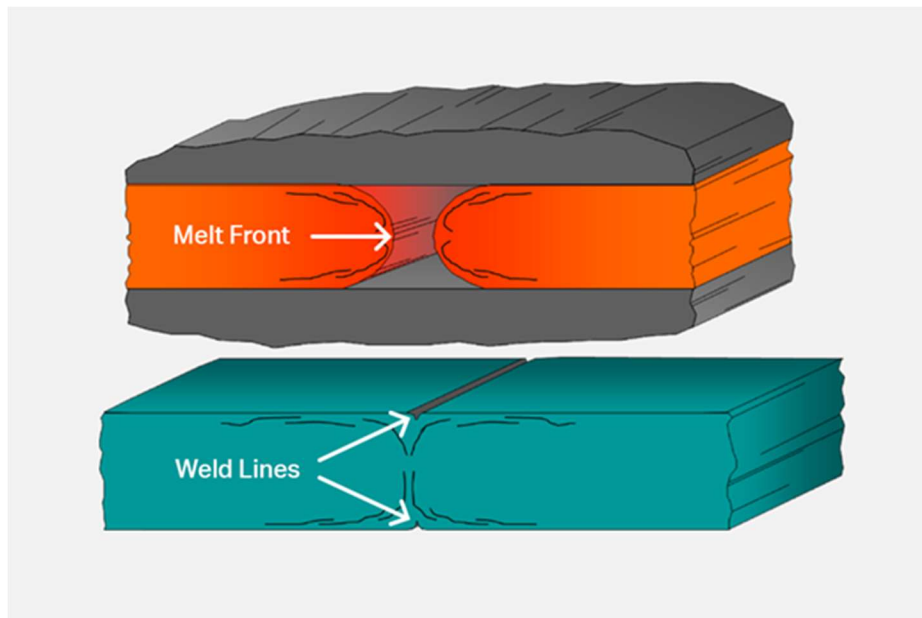
Obr. 10. Příklad znečištění výrobku zdegradovaným polymerem [7]

Špatná volba polymeru, nebo nepřizpůsobení technologických parametrů a konstrukce formy vybranému polymeru má často za následek celou škálu vzhledových vad a ovlivňuje také mechanické vlastnosti výrobku. Tyto vady jsou způsobeny např. špatnou tepelnou stabilitou polymeru (často mají velký vliv např. retardéry hoření) nebo velkým obsahem těkavých látek v tavenině. Vliv na vzhledové vlastnosti může mít také tvar granulí vstupujících do plastikační jednotky, nebo přidávaných aditiv (špatná homogenizace např. s barvivou). [7]

3.1 Studené spoje

Studené spoje jsou vady, kterým se často nejde úplně vyvarovat, a kromě vzhledové vady na povrchu jsou i zdrojem pevnostního oslabení místa, kde vznikly. Studený spoj vzniká, když se setkají dvě nebo více čel taveniny. Toto bývá problém především součástí s dírami, nebo s takovým tvarem, který nutí taveninu se rozdělit (např. jádry) a následně v jiném místě zase spojit. Ve chvíli, kdy se tato (doposud zaoblená) čela střetnou, jsou nucena se srovnat proti sobě, čímž vytvoří studený spoj, tedy místo se sníženými mechanickými vlastnostmi. Čela taveniny se mohou střetnout buď čelně, a tedy vytvořit primární studený spoj (je více viditelný a méně pevný), nebo bokem či tangenciálně, z čehož vzniká sekundární studený

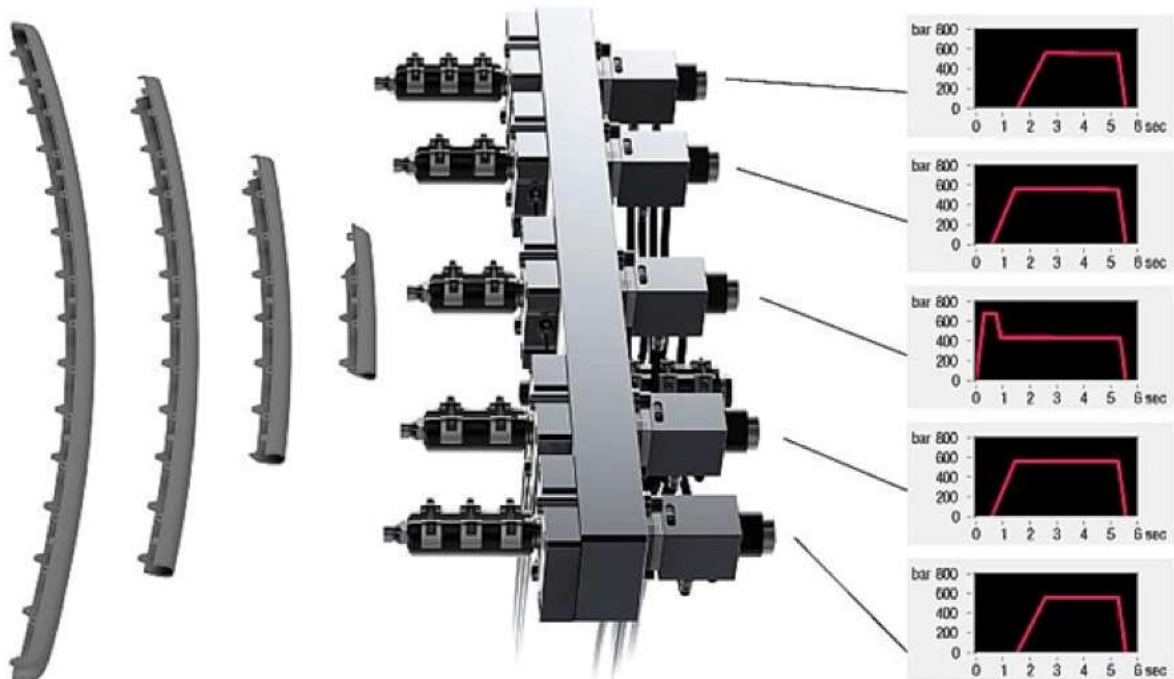
spoj. V případě, že se studený spoj vytvoří za nedostatečné teploty nebo tlaku, čela se u stěny formy nezarovnají, ale na jejich okrajích vznikne malé zaoblení, které na konečném výrobku vytvoří vrub jako je vidět na *Obr. 11.* [7][14]



Obr. 11. Vznik studeného spoje a vrubu v místě spoje [14]

Studené spoje jsou nebezpečnější u amorfních termoplastů. Tyto polymery vykazují v místě studeného spoje značné pevnostní zeslabení, které často přechází až do podoby velmi dobře viditelného vrubu. V tomto ohledu je výhodou sférolitická struktura semikrystalických polymerů, která studeným spojem prorůstá a pomáhá alespoň z části zachovat mechanické vlastnosti polymeru. [7][14]

Při vzniku studeného spoje také velmi záleží na způsobu, jakým je výrobek (a konkrétní místo) namáhán. V případě namáhání tahem není studený spoj výrazně kritickým místem, avšak v případě namáhání ohybem nebo rázem může studený spoj vést k lomu, a tedy destrukci výrobku. U amorfních polymerů dosahuje pokles houževnatosti při vzniku primárního studeného spoje až 50 %, u semikrystalických polymerů se pokles pohybuje do 20 %. Tento pokles je samozřejmě ovlivněn i tloušťkou stěny – užší stěny budou na lom náchylnější než stěny tlustší. Nepříznivě také na pevnost spoje působí některá aditiva (plniva, retardéry hoření) a separátory nanášené na povrch tvarové dutiny, zejména silikonové oleje. [7][14]

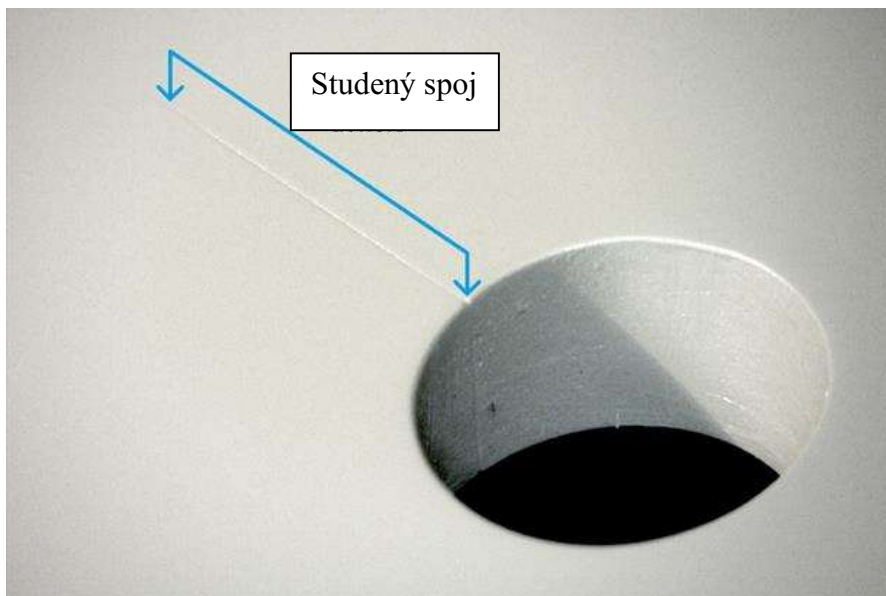


Obr. 12. Příklad kaskádové vtokové soustavy [5]

Místa, kde studené spoje vzniknou, jde již předvídat díky simulacím toku taveniny v dutině formy. V případě, že se touto simulací zjistí, že jsou studené spoje v namáhaných místech, lze je odsunout do míst, kde výrobek není výrazně namáhán, vhodným umístěním vtoků taveniny do formy. Problémem často bývá i vstřikování s využitím více trysek např. u rozměrnějších výrobků. Čela taveniny tvoří studené spoje i v tomto případě, což u některých výrobků není na obtíž, u některých ale by mohl mít takový studený spoj fatální důsledky, velmi tedy záleží na následné aplikaci výrobku. U obzvláště namáhaných rozměrných výrobků, lze k eliminaci studeného spoje využít kaskádového vstřikování. Při této technologii vstřikování vstřikuje nejprve jedna tryska, a až ve chvíli, kdy tavenina doteče až do místa vtoku druhé trysky, začne vstřikovat druhá atd. Tavenina má tedy stále pouze jedno čelo, které se nemusí spojovat s dalšími a vznik studeného spoje prakticky znemožňuje. [6] [7] [14]

Pokud však nelze studený spoj eliminovat, či konstrukčně odsunou do míst, kde jeho vliv není příliš velký, je třeba alespoň zmírnit jeho následky volbou správných technologických parametrů. Na spoj pozitivně působí vyšší teplota taveniny (což ale vede k delšímu chlazení na vyhazovací teplotu, a tedy delšímu vstřikovacímu cyklu). Je taktéž dobré optimalizovat vstřikovací rychlost. Při malé vstřikovací rychlosti se čelo taveniny velmi rychle ochlazuje, a spoj je nedokonalý, naopak při příliš velké vstřikovací rychlosti může dojít k uzavření

vzduchu mezi čela taveniny, což by mělo za následek termické narušení polymeru (dieselefekt) a opět nedokonalý a pevnostně zeslabený spoj. V ojedinělých případech, kdy nelze studený spoj eliminovat ani technologickými parametry se využívá lokálního ohřevu v místě spoje, kdy spoj sice vznikne, nicméně díky větší teplotě taveniny má lepší mechanické vlastnosti. [6][7][14][16]



Obr. 13. Studený spoj vzniklý obtékáním taveniny kolem jádra pro díru [14]

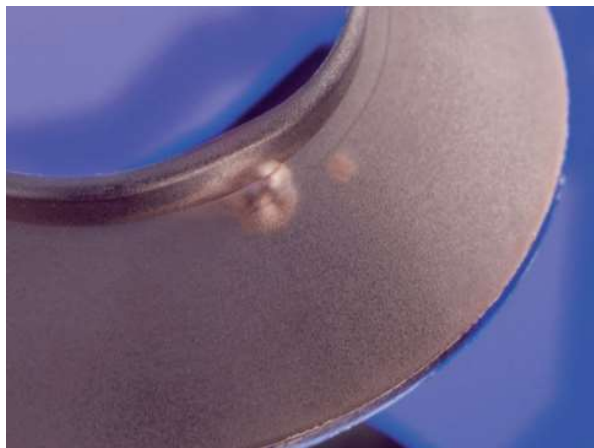
3.2 Plynové bubliny

Vznik plynových bublin může souviset s tepelnou degradací materiálu. Tepelná degradace způsobená nadměrnou teplotou taveniny nebo příliš dlouhým vstřikovacím procesem může vyústit až v degradaci molekulových řetězců nebo aditiv. Vzniklé produkty procesu degradace mohou být plynového charakteru a ve výrobku se tyto plyny objevují ve formě bublin nebo skvrn. U některých materiálů může být tento efekt způsoben také zvýšenou vlhkostí materiálu, tedy jeho nedostatečným vysušením před vstřikováním. [3]

3.3 Vzduchové bubliny

Dalším způsobem vzniku vzduchových bublin je uzavření vzduchu, který je v tavenině už před vstříknutím do formy. Vzduch se do taveniny dostává při její přípravě ve šnekové plastikační jednotce. K uzavření tohoto přimíchaného vzduchu dochází ve stěnách výrobku hlavně v místech, kde se potkává více proudů taveniny. Když se tyto proudy střetnou, tlačí před sebou vzduch, který pokud nemá kam unikát, zabraňuje tavenině dostat se do některých míst a tam pak vzniká díra ve výrobku. Tento jev bývá často doprovázen zčernáním nebo

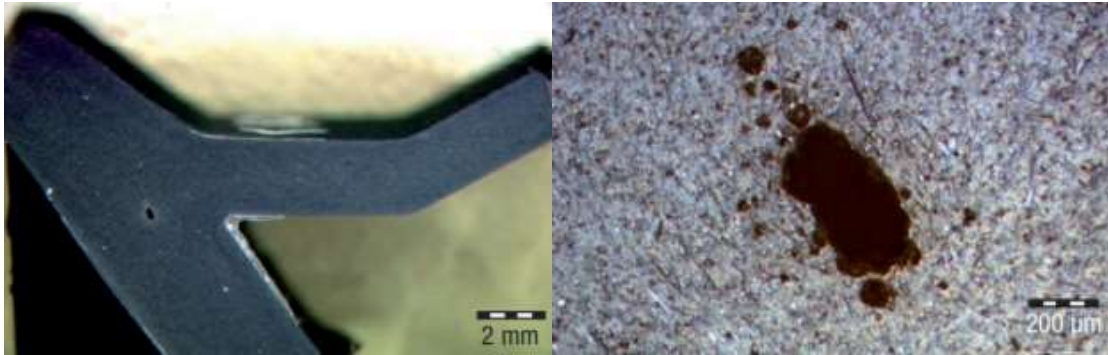
zuhelnatěním materiálu v daném místě. Tyto vzduchové bubliny jsou dobře viditelné u transparentních výrobků, u výrobků netransparentních se objevují ve formě puchýřů na povrchu, nebo slabých míst uvnitř výrobku. Jsou způsobeny především příliš rychlou dekompresí, nedostatečným tlakem, nebo nedostatečným odvzdušněním formy. K odstranění bublin lze využít stažení plastikačního šneku bez otáčení dozadu, čímž se omezí množství vzduchu zamíchané do vstřikované dávky polymeru a zvýšení tlaku při dotlakové fázi, kdy se v některých případech podaří vzduch taveninou vytlačit. [3][7][15][16]



Obr. 14. Bubliny na povrchu výrobku [15]

3.4 Staženiny

Staženiny (vakuové bubliny, lunkry) se objevují v průběhu chladnutí materiálu. Jsou to uzavřené prostory uvnitř stěn výrobku, které jsou vzduchoprázdné. Vznikají, když už nelze v některých oblastech kompenzovat smrštění materiálu při přechodu taveniny do tuhého stavu. Chladnoucí polymer při styku s povrchem dutiny formy ztuhne a vytvoří pevný obal, zatímco uvnitř výrobku je materiál stále roztavený a chladne pomaleji. Pokud jsou stěny výrobku již chladné a pevné kvůli rychlému odvodu tepla z taveniny do stěn formy, už nemohou být smrštěny vnitřními napětími dovnitř výrobku a materiál se smršťuje směrem ke stěnám, čímž vytvoří dutinu uvnitř stěny. Vnitřní napětí mohou být tak velká, že roztrhnou neúplně vychlazený střed výrobku. Tyto dutiny jsou velmi snadno viditelné u transparentních materiálů, u neprůhledných jsou již zjištělné hůře (zjišťují se rozřezáním vzorku, nebo využitím ultrazvuku). Staženiny mohou být eliminovány pomalejším chlazením, ideálnější konstrukcí výrobku (bez výrazně tlustějších míst), nebo vyšším dotlakem taveniny po vstříknutí (pevný obal zabraňuje polymerní tavenině dostat se do prázdných míst, proto se musí využít většího dotlaku a doby působení). [3][7][15][16]



Obr. 15. Staženiny v příliš tlusté stěně [15]

3.5 Deformace vzniklé při odformování

Deformace při odformování mohou vzniknout primárně z těchto příčin:

- vyhazovací systém není schopen vyvinout sílu potřebnou pro odformování bez poškození výrobku,
- vyhazovací systém způsobuje vychýlení výrobku.

Mimo další faktory má na odformovatelnost výrobku velký vliv smrštění materiálu po zchlazení. Toto smrštění je velký problém u výrobků, které se jednoduše smršťují na jádro a jsou poté hůře odformovatelné, jako např. krabice, kelímky, kbelíky apod. Tato skutečnost tedy musí být brána v potaz již při samotné konstrukci výrobku, a ne až při konstrukci vyhazovacího systému formy. V tomto ohledu mohou v odformování výrobku pomoci vyztužovací žebra, která se při smrštění odlepují od povrchu formy a redukují tedy sílu potřebnou k odformování výrobku. [7][15]

V průběhu vyhazování výrobku z formy je vnitřní část výrobku namáhána na tlak a povrch výrobku na tah, což může způsobit praskliny a jiné deformace. I na tyto deformace je nezbytné myslet již při konstrukci výrobku. [7][15]



Obr. 16. Deformace výrobku vzniklá při odformování [15]

3.6 Dieselův efekt (dieselefekt)

Tato vada se vyskytuje především u nových forem, které mají dobře slícované dělicí roviny a jednotlivé součásti jako tvarové prvky, čelisti, či vyhazovače, nebo u starších forem, které nebyly příliš dobře udržovány (špatná čistota odvzdušňovacích spár a vůlí pohyblivých částí formy). Dieslův efekt je problém špatného odvzdušnění formy a vyšší vstříkovací rychlosti. Objevuje se nejčastěji v blízkosti slepých děr, zkosení, konců vtokových drah a míst, kde se střetává několik čel taveniny. Tento efekt vzniká pokaždé, když vzduch nemůže uniknout (nebo nemůže unikat dostatečně rychle) skrz dělicí rovinu, odvzdušňovacími kanály, nebo mezerami okolo vyhazovačů. Ke konci vstříkování je vzduch stlačen a ohříván na vysokou teplotu, což může způsobit lokální degradaci materiálu, někdy až spáleniny na výrobku v místě uzavření vzduchu. Na výrobku v tomto místě vznikají nedostříknutá místa, v důsledku vyplnění dutiny stlačeným vzduchem, a tmavé, někdy až černé stopy po spáleném materiálu. Při pálení taveniny může docházet k uvolnění agresivních plynů, které mohou poškodit povrch formy. Dieselefekt se dá však dobře odstranit realizací odvzdušňovacích kanálů. [3][7][15][16]



Obr. 17. Dieselefekt – spálený polymer v důsledku komprese vzduchu [15]

3.7 Černé tečky

Občas se mohou na výrobku objevit tmavé až černé body. Tyto body jsou vměstky neboli částice cizího materiálu. Kvůli tomu mají tato místa odlišné vlastnosti, než by měl čistý základní vstřikovaný materiál. Nejčastěji si lze těchto teček všimnout na povrchu výrobku při vstřikování materiálů průhledných, nebo materiálů světlých odstínů, nicméně ve stejné míře se objevují i uvnitř stěn, jen nejsou tak snadno odhalitelné a v některých případech ani ničemu nevadí. Pokud se tyto černé tečky na výrobku nacházejí, jedná se o teplotně zdegradovaný, přepálený (zoxidovaný), nebo stržený materiál, částičky cizího materiálu, neroztavené nebo jen částečně roztavený granulát, oxidy kovů nebo obyčejný prach. [3][7][15]

Černé tečky mohou mít několik příčin vzniku:

- příčiny způsobené procesem – příliš vysoká teplota taveniny, příliš dlouhá plastikace materiálu v plastikační jednotce, příliš vysoká teplota horkého vtokového systému, ...,
- příčiny související s formou – nedokonale vyčištěný vtokový systém, mrtvá místa v horkém vtokovém systému,
- příčiny související se vstřikovacím strojem – nedostatečně vyčištěný plastikační systém,
- příčiny související s polymerem – nečistoty v granulátu, nevhodné barvivo.

Je tedy zřejmé, že černé tečky na výrobku souvisejí z velké části s čistotou materiálu po celou dobu vstřikovacího procesu, je tedy vhodné tuto čistotu zajistit po celou cestu práce

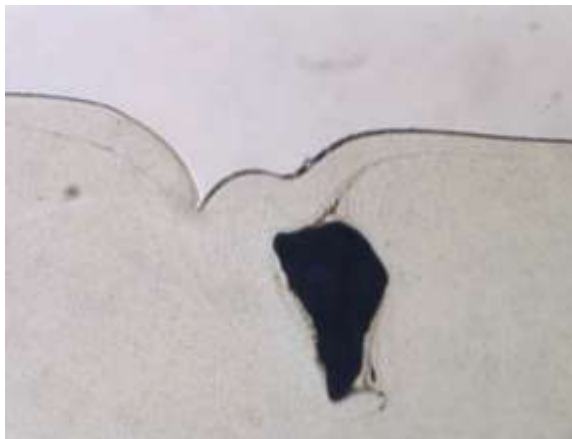
s materiálem – od sušení a dopravy materiálu ke vstřikovacímu stroji do násypky (při zpracování se mohou do granulátu nebo drtě dostat částice cizího materiálu nebo částice materiálu stejného, ale větší velikosti, které se nestihnou správně zprastifikovat), přes čistotu ve všech místech plastikační komory vstřikovacího stroje (šnek, zpětný uzávěr na šneku, doseďací plochy trysky vstřikovací komory a hlavy komory), až k čistotě tvarových dutin formy. [3][7][15]

Jestliže byly vyloučeny příčiny vzniku teček související s čistotou, je třeba hledat příčinu v procesu vstřikování a nastavených technologických parametrech. Příčinu lze hledat v příliš nízké teplotě taveniny, nesprávně nastaveném teplotním profilu v plastikační komoře vstřikovacího stroje, ve volbě vstřikovacího stroje (příliš malý zdvihový objem plastikační jednotky vzhledem k objemu vstřikované dávky – materiál se nestihne dostatečně zprastifikovat), ve vysoké obvodové rychlosti šneku. [3][7][15]

Možná řešení záleží na příčině vzniku teček. Nejjednodušší je však odstranění problému úpravou technologických parametrů jako je zvýšení teploty taveniny (následkem je ale delší chlazení), úprava teplotního profilu topných pásem plastikační komory, snížení obvodové rychlosti šneku (snížení otáček), nebo prodloužení doby, po kterou se materiál plastifikuje v plastikační komoře (docílí se tím lepšího prohrátí materiálu, ale prodlouží se vstřikovací cyklus). Mezi důležité možnosti řešení této vady patří také kontrola a zajištění čistoty vstřikovacího ústrojí. V některých případech lze tyto tečky odstranit použitím menších granulí/drtě. Menší částice se rychleji zplastifikují a vytvoří homogennější směs. Nejvíce nákladným řešením je pak změna vstřikovacího stroje (pokud nevyhovuje velikost dávky). [3][7][15][17]



Obr. 18. Černé tečky na výrobku [15]



Obr. 19. Zdegradovaný materiál pocházející z plastikační jednotky [15]

3.8 Propadliny

Vznik propadlin má čistě fyzikální příčinu. Objevují se v průběhu chlazení výrobku, v místech, kde nelze kompenzovat smrštění materiálu. Pokud nejsou vnější stěny již dostatečně pevné (vlivem nedostatečného chlazení), je vnější vrstva materiálu vnitřními napětími stahována dovnitř výrobku. [3][7][15][16]

Propadliny tedy vznikají ze tří základních příčin:

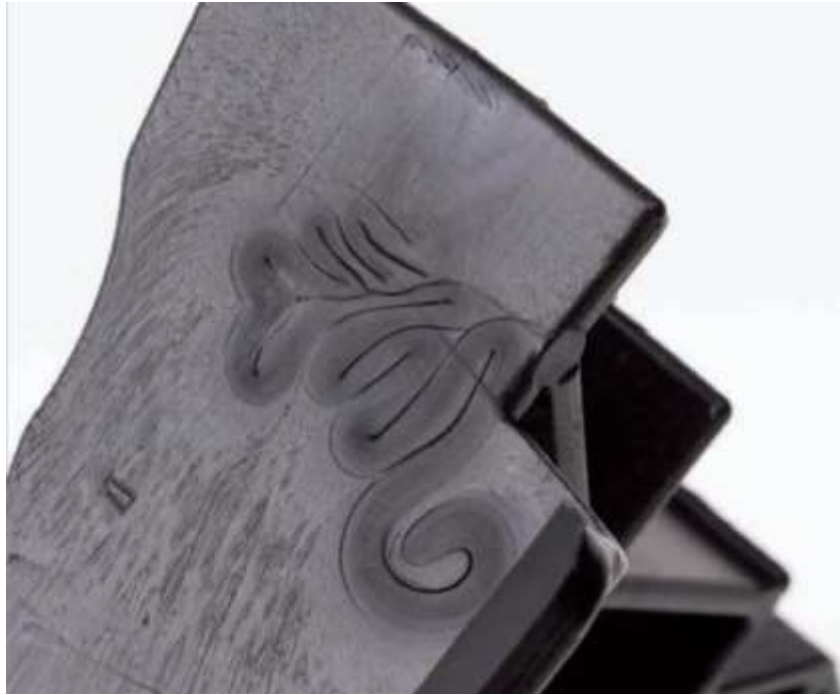
- tuhnutí taveniny je příliš pomalé,
- doba fáze chlazení je příliš krátká,
- špatná konstrukce výrobku nebo konstrukce formy (tlustostěnné výrobky, špatně umístěné vtokové ústí).



Obr. 20. Propadliny na výrobku vzniklé nevhodnou konstrukcí žeber [15]

3.9 Volný tok taveniny (jetting)

Volný tok (meandrový tok, jetting) je nežádoucím opakem toku fontánového. Vzniká při nevhodné konstrukci a umístění vtoku, především u amorfních plastů jako např. ABS. Na výrobku se objevuje v případě, že plnění tvarové dutiny formy roztaveným materiálem neprobíhá postupně ve vlnoplochách od ústí vtoku (fontánový tok – tavenina narazila na stěnu/jádro/překážku, vytvořila čelo proudu taveniny, tento proud pak postupuje od ústí vtoku až do všech míst v dutině formy). Tato vada je převážně vzhledového charakteru, avšak působí nepříznivě i na pevnost výrobku, kvůli vzniku sekundárního studeného spoje. V místě vtoku taveniny do formy (nejčastěji v případě umístění vtoku do čelní plochy výrobku) formy se vytvoří volný proud taveniny, který se nekontrolovatelně pohybuje formou až dokud nenarazí na překážku a teprve potom dochází k zaplnění tvarové dutiny. Během plnění se ale okraje tohoto proudu zchladí natolik, že již není možné homogenní spojení taveniny uvnitř dutiny. V tomto případě není nežádoucí jen vzhled výrobku, kde je na povrchu jasně zřetelná cesta, kudy tavenina tekla, ale i jeho mechanické vlastnosti, které jsou ovlivněny právě nehomogenním spojením taveniny ve formě. Jetting vzniká především při příliš velkém nebo příliš malém vstřikovacím tlaku, nebo nevhodným umístěním vtokového ústí do místa s velkým prostorem, kde tavenina na nic nenarazí. V některých případech má na něj vliv i orientace formy. Aby bylo možné se jettingu co nejlépe vyvarovat, neměla by být dutina formy plněna z hora dolů. V případě vzniku jettingu jej lze odstranit zvýšením/snížením vstřikovací rychlosti, resp. tlaku, přizpůsobením vtokového ústí, nebo jeho přesunutím do vhodnějšího místa na výrobku. V případě, že vtokové ústí nelze přemístit, je vhodné vytvořit naproti vtoku umělou překážku, na kterou tavenina narazí a zruší se její volný proud. K tomuto účelu může posloužit např. kolík nebo jádro. [3][7][15][16]



Obr. 21. Stopy po volném proudu taveniny [15]

3.10 Odlesky/ různorodé odlesky

Odlesk na vstříkovaném výrobku vzniká odrazem světla od jeho povrchu. Když paprsek světla narazí na povrch dílu, odrazí se jiným směrem a rozptýlí. Čím hladší je povrch vstříknutého dílu, tím menší je rozptylový úhel odraženého světla a naopak, čím hrubější povrch, tím je rozptylový úhel větší. Nejlepších odlesků, a tedy i lepších optických vlastností lze tedy dosáhnout, pokud je vstříknutý díl tak hladký, jak je to možné. K dosažení maximálního lesku by tedy dutiny vstříkovací formy na tyto díly měly být ideálně leštěné.

Problém však nastává, pokud se každá část výrobku leskne jinak a není to záměrem. Rozdíly v odlesku povrchu jsou částečně způsobeny tím, že výrobek nekopíruje zcela přesně povrch dutiny formy. To může být způsobeno špatně navrženým chlazením formy (kdy vznikají rozdíly v teplotě povrchu dutiny a tavenina tedy chladne v každém místě jinak rychle), nebo smrštěním materiálu. Různé odlesky může způsobit také přílišné namáhání již ochlazených částí materiálu při nerovnoměrném chlazení, kdy se pak např. liší tloušťka stěn výrobku, nebo materiál u vyhazovače chladne příliš rychle atp. [3][15]



Obr. 22. Vliv teploty formy (TW) na lesk výrobku [15]

3.11 Stříbření, stříbrné pruhy, mapy a stopy na povrchu výrobku

Stříbření je vzhledová vada projevující se jako stříbřitě bílé nebo matně stříbřité pruhy na povrchu výrobku, omezené jen na některá místa. Lze je nalézt často ve tvaru vějíře tvořeného soustavou paprsků vycházejících z jednoho středu. Příčinou této vady jsou vzduchové bublinky vzniklé vlivem přílišné vlhkosti materiálu, nebo přítomností těkavých látek a degračních zplodin, které se při vysoké teplotě vstřikování mění na plyn. Ve chvíli, kdy vzduchová bublina praskne, je roztavený polymer rozstříknut ve směru proudu taveniny, což vytvoří právě zmiňované stříbrné pruhy. Odstranění této vady spočívá v řádném vysušení vstupního materiálu. [3][15]



Obr. 23. Stříbření v důsledky nevysušeného materiálu [15]

Stříbrné, bílé nebo světlé pruhy mohou také vznikat při vstřikování kompozitních materiálů, které mají termoplastickou matici plněnou skelným vláknem. Zde však příčinou vady není vlhkost nebo plyny v materiálu, ale chování skelných vláken při vstřikování. Skelná vlákna se při toku taveniny vlivem smykových sil orientují směrem k povrchu výrobku. Protože polymerní tavenina chladne v dutině formy s vysokým teplotním gradientem, stává se, že tavenina skelná vlákna kompletně neobalí, ale spíše je vytlačuje k povrchu výrobku. [3][15][16]



Obr. 24. Stříbření způsobené skelnými vlákny [15]

Tato vlákna na povrchu výrobku tvoří bílé až stříbrné pruhy, mapy, nebo stopy po toku taveniny. Tento jev může způsobovat i anizotropie smrštění vzniklé právě kvůli vláknům v kompozitu. [3]

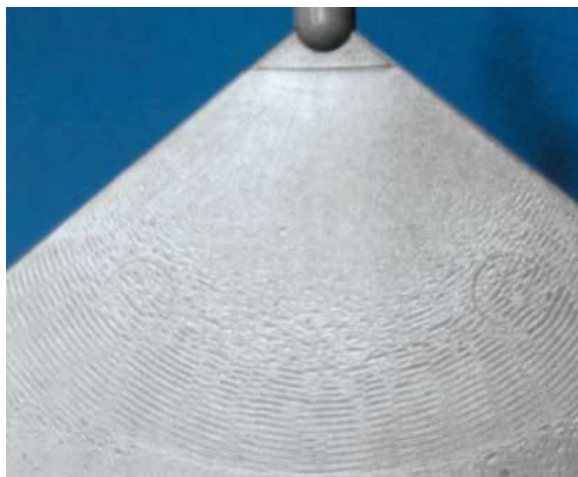
Příčinou takto vytvořených vad je především nevhodná konstrukce formy (malé rozvodné kanály, úzké ústí vtoku, ostré přechody v kanálech, malé poloměry rádiusů ve větvení kanálů) nebo výrobku. Takto nevhodná konstrukce zvyšuje smykové namáhání kompozitní

taveniny a nutí vlákna více vyplavávat k povrchu výrobků. Z tohoto důvodu je vhodné pamatovat už od začátku konstrukce na maximální možnou rovnoměrnost tloušťky stěn a správnost umístění žebér s ohledem na tok taveniny (žebra nesmí zpomalovat tok taveniny v dutině).[3]

Pokud nelze konstrukčně upravit vstřikovací formu, lze účinky smykových sil zmírnit změnou technologických parametrů. Lze zvýšit teplotu taveniny i formy, vstřikovat vysokou vstřikovací rychlostí nebo zvýšit tlak při dotlakové fázi a prodloužit dobu trvání této fáze. [3][16]

3.12 Vzhled gramofonové desky a pomerančové kůry

Povrch výrobku podobný povrchu gramofonové desky nebo povrchu pomerančové kůry, tedy povrch pórovitý, zvrásněný, rýhovaný až drsný má příčinu v příliš velkém odporu v dutině formy ve fázi plnění taveninou. Tok taveniny ve formě není plynulý, ale spíše pulzuje. Vada souvisí s viskoelastickými a reologickými vlastnostmi jednotlivých materiálů a lze ji tedy odstranit změnou technologických podmínek, konkrétně zvýšením teploty taveniny a formy, vyšším vstřikovacím tlakem a rychlostí vstřikování, nebo optimalizací času vstřikování a dotlakové fáze. [3][15]



Obr. 25. Povrch gramofonové desky [15]

3.13 Neúplný výrobek

Neúplný výrobek vznikne v případě, že polymerní tavenina není schopna vyplnit každé místo dutiny formy (zpravidla místo nejvzdálenější od vtokového ústí). Příčinu této vady lze hledat v nevhodném výběru polymerního materiálu (resp. nepřizpůsobení jeho vlastnostem), nebo nevhodné konstrukci výrobku nebo vstřikovací formy. Z hlediska materiálu nedotečení

způsobuje malá tekutost taveniny, její malá zabíhavost a nízký index toku taveniny. Z hlediska konstrukce pak vznik vady ovlivňuje především nevhodně umístěné vtokové ústí (např. do nejširšího místa dutiny) a špatné odvzdušnění dutiny formy. Technologické parametry související s nízkou hybností taveniny (nízká vstřikovací rychlost nebo tlak, nízká teplota taveniny nebo formy, krátká vstřikovací fáze a rychlé přepnutí na dotlak) mají na zatékavost taveniny taktéž velký vliv, a je třeba je optimalizovat, k čemuž se dnes dají velmi dobře využít simulace plnění dutiny formy. [3]



Obr. 26. Nedotečený výrobek [15]

3.14 Přetoky a otřepy

Přetoky jsou vady související především s dělicí rovinou, popřípadě se spárami v pohyblivých částech formy. Vznikají tak, že polymerní tavenina zateče do spáry vzniklé např. špatným slícováním dělicích rovin formy, opotřebením dělicích rovin, příliš velkými odvzdušňovacími kanály, nebo špatným slícováním spár u pohyblivých částí formy (vyhazovače, čelisti, jádra). Tavenina běžně zateče do spár o tloušťce 0,02 mm a větší (v závislosti na materiálu se tloušťka spáry může lišit). Přetok/otřep se pak projevuje viditelnou filmovou blánou o různé velikosti, nepravidelného tvaru. Některé otřepy jsou na první pohled nepatrné. Ve vzniku otřepů může hrát roli i nedostatečná uzavírací síla vstřikovacího stroje, nebo nevhodné nastavení vstřikovacího cyklu, kdy je příliš dlouhá vstřikovací nebo dotlaková fáze. [3][7][15]



Obr. 27. Přetok do dělicí roviny [15]

3.15 Tokové čáry

Viditelné tokové čáry nemají vliv na mechanické vlastnosti výrobku, jsou tedy pouze estetickou vadou, která je ale u některých výrobků (např. čočky do optických soustav, skla světlometů v automobilovém průmyslu) vadou zásadní. Tyto čáry jsou stopy, které sledují směr toku taveniny, což by problém nebyl, avšak často mívají odlišnou barvu oproti zbytku výrobku. Nejčastěji se objevují v okolí vtokového ústí. Častou příčinou vzniku čar bývá nevhodně navržené a dimenzované vtokové rozvod ve formě. V případě, kdy jsou vtokové kanály příliš dlouhé, nebo jsou délkou dostačující, avšak mají malý průřez, stihá tavenina částečně zchladnout a ztuhnout, a částičky této ztuhlé taveniny jsou pak strhávány taveninou do místa vtoku do dutiny formy. Ve formě jsou tyto částičky vlivem smykových sil uspořádány ve směru toku, a protože byly ztuhlé příliš brzy, mají na výsledném výrobku jinou barvu než okolní materiál. [3][15]



Obr. 28. Tokové čáry [15]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Stanovené cíle diplomové práce:

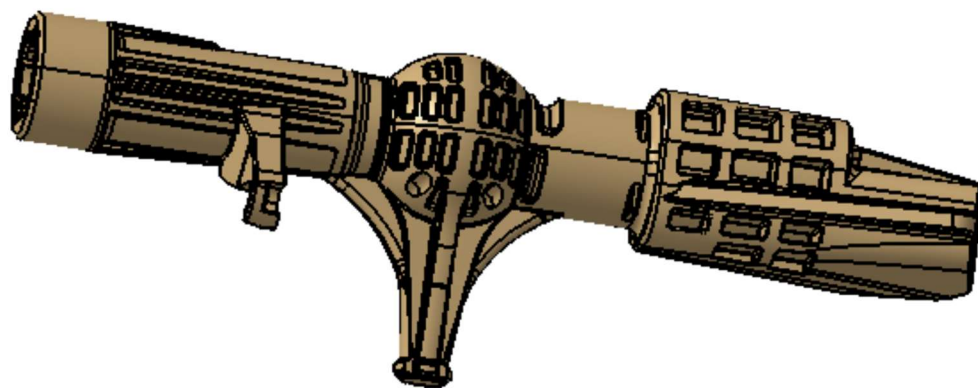
1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Proveďte zhodnocení současného stavu.
3. Proveďte analýzy vstřikovacího procesu.
4. Vyhodnoťte dosažené výsledky a navrhňte optimální úpravu.

Teoretická část diplomové práce se zabývá procesem vstřikování, vadami, které často v průběhu tohoto procesu vznikají, a možnostmi, jak lze tyto vady odstranit.

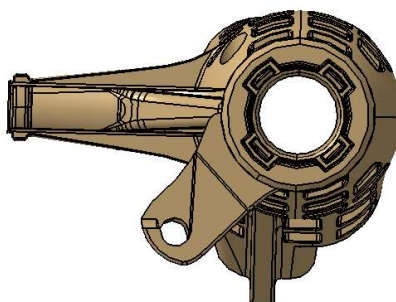
V praktické části je třeba zhodnotit aktuální stav vybraného vstřikovaného výrobku, provést analýzu procesu vstřikování a navrhnout optimální úpravu. K analýze a optimalizaci procesu je využít simulační software Autodesk Moldflow Synergy 2016. Pro návrh optimální úpravy je nutno navrhnout několik různých variant a vybrat tu nejvhodnější z hlediska sledovaných parametrů.

5 VSTŘIKOVANÝ DÍL

Pro analýzu procesu byl vybrán vstříkovaný díl, který je součástí řadicí páky osobního automobilu. Díl je vstříkován z materiálu Polyamid 66 s 50 % skelných vláken, druhým návrhem na materiál pro výrobu je Polyamid 66 se 30 % skelných vláken.



Obr. 29. Analyzovaný díl



Obr. 30. Analyzovaný díl – pohled shora

Díl se nachází ve vývojové fázi, kdy je třeba odstranit vady vzniklé při prvním vstříkování ve zkušební formě. Pro další vývoj dílu se počítá s výrobou vícenásobné formy s možností využití horkého vtokového systému a efektivnější temperací, tedy s co možná nejkratším vstříkovacím cyklem. Základní rozměry výrobku jsou 182 x 69 x 50 mm (délka x šířka x výška). V sestavě bude díl ze spodu i shora nasazen na protikus. Na centrální kouli, na výstupu z ní vycházející a na vystouplou „packu“ na horní polovině dílu bude nasazen další plastový díl.

Na díle nesmí být kruhové studené spoje, nebo bubliny, které by mohly zapříčinit zlomení dílu při namáhání ohybem. Díl musí být bez propadlin ve vnitřní dutině, bez přetoků a bez spálených míst. Tyto vady se aktuálně na díle nacházejí a je třeba je eliminovat.

Pro analýzu je použit materiál Akulon S223 – HG0 Natl (J-1/50/HS Natl) od výrobce DSM – tedy polyamid 66 s 50 % skelných vláken. Procesní parametry použité v analýzách vycházejí z doporučených hodnot v databázi programu Autodesk Moldflow Synergy 2016.

Tab. 1. Doporučené procesní parametry pro materiál Akulon S223 – HG0 Natl.

Parametr	Hodnota
Teplota povrchu formy	80 °C
Teplota taveniny	290 °C
Teplota formy (minimum - maximum)	60 - 100 °C
Teplota taveniny (minimum - maximum)	280 - 300 °C
Maximální teplota taveniny	344 °C
Vyhazovací teplota	158 °C
Maximální smykové napětí	0,31 MPa
Maximální rychlost smykové deformace	100000 s ⁻¹

Tab. 2. Procesní parametry nastavené při analýzách

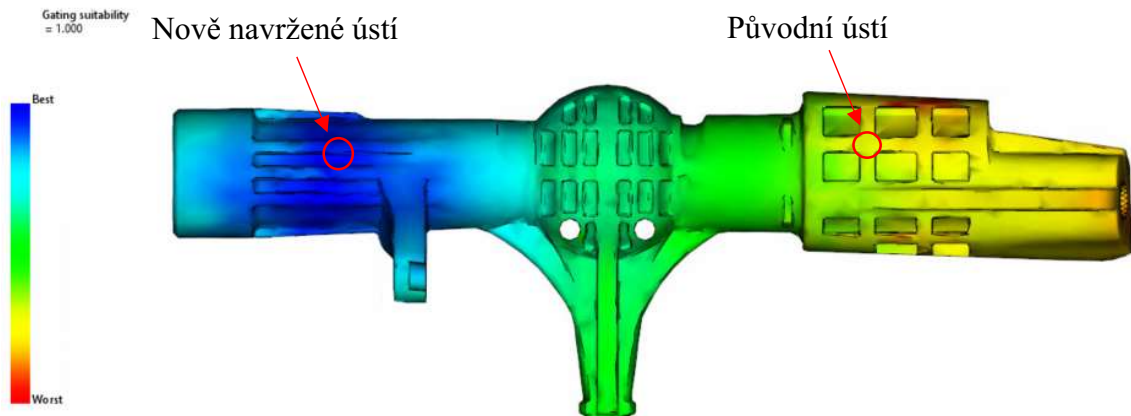
Teplota taveniny	290 °C
Teplota povrchu formy	80 °C
Teplota chladicího média (voda)	60 °C
Doba otevření formy	5 s
Doba vstřikování	Automaticky
Doba dotlaku	Automaticky
Doba chlazení	Automaticky

Tab. 3. Přehled navrhovaných variant

Číslo varianty	Vtokový systém	Vtokové ústí	Chlazení	Násobnost	Materiál
1	studený	1	2 okruhy	1	PA66 + 50 % skelných vláken
2	studený	1	3 okruhy s přepážkami	1	PA66 + 50 % skelných vláken
3	horký	1	3 okruhy s přepážkami	1	PA66 + 50 % skelných vláken
4	horký	2	3 okruhy s přepážkami	1	PA66 + 50 % skelných vláken
5	horký	1	4 okruhy s přepážkami	2	PA66 + 50 % skelných vláken
6	horký	1	4 okruhy s přepážkami	2	PA66 + 30 % skelných vláken

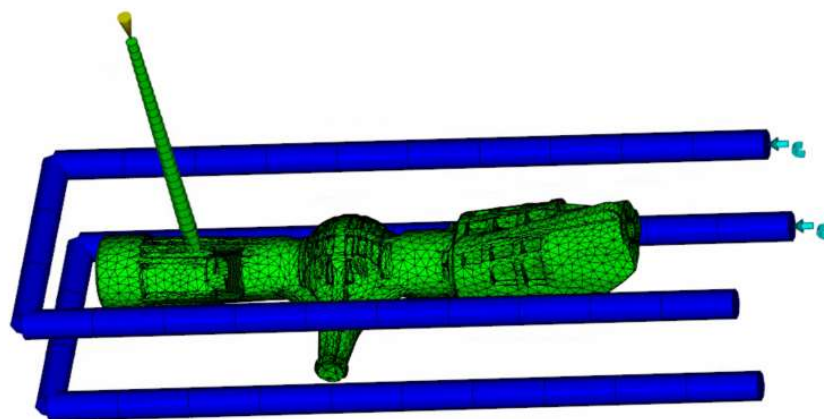
5.1 Výchozí simulace

Pro výrobu dílu byla navržena jednoduchá jednonásobná vstřikovací forma s jedním studeným vtokem a dvěma chladicími okruhy. Vtokové ústí při zkušebním vstřikování bylo umístěno na spodní straně dílu mezi žebry. Softwarovou analýzou dílu však bylo zjištěno, že by bylo vhodnější umístit vtokové ústí do vrchní části dílu. V dalších simulacích je proto vtokové ústí umístěno na horní části výrobku (na obrázku vlevo).



Obr. 31. Umístění vtokového ústí

Dutina formy je ve variantě č. 1 plněna jednoduchým studeným vtokem s jedním vtokovým ústím umístěným dle výsledku předchozí analýzy v horní části dílu. Studený vtokový systém je kuželového tvaru o největším průměru 6 mm, v místě vtokového ústí pak zúžen na 3 mm. Temperační systém je zde řešen dvěma temperačními kanály s kruhovým průřezem o průměru 8 mm, kterými proudí voda o teplotě 80 °C.

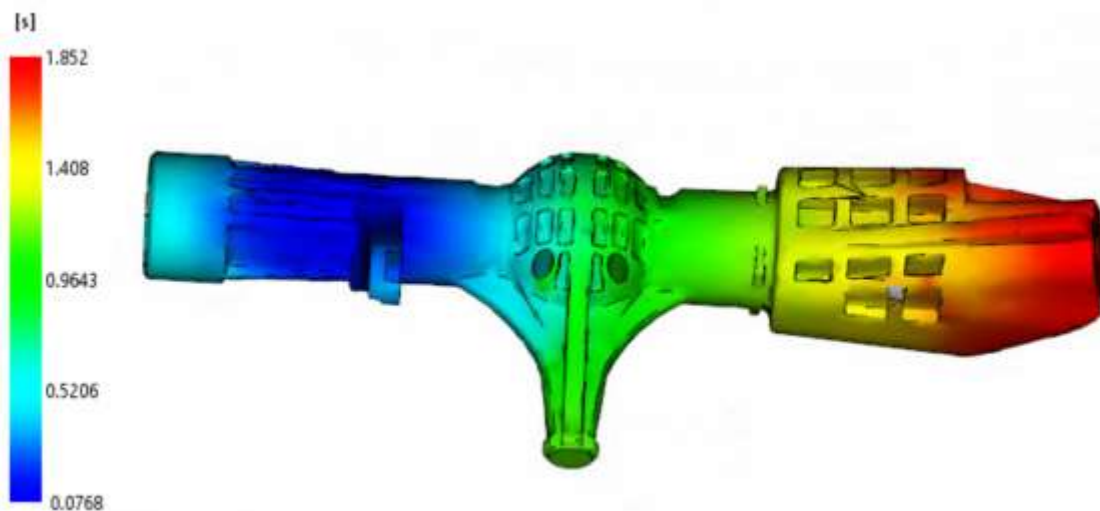


Obr. 32. Varianta č.1

5.1.1 Čas plnění (Fill time)

Čas plnění je spolu s časem potřebným pro vyhození součásti jedním ze základních parametrů určujících čas cyklu stroje, a proto je jedním ze sledovaných parametrů při optimalizaci procesu.

Čas plnění dílu je u 1. navržené varianty je 1,852 s. Tavenina za tento čas dotekla do všech částí dutiny formy. Čas, za který budou zaplněné jednotlivé části dutiny, je vidět na obr. 34. Nejdéle se bude plnit spodní část výrobku viditelná na obrázku jako červená oblast.

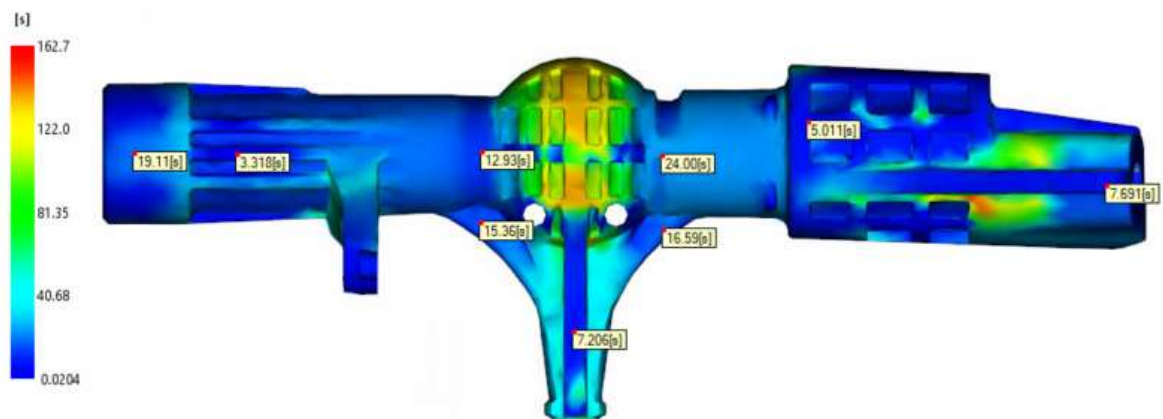


Obr. 33. Čas plnění – varianta č. 1

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

Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty je velmi důležitým faktorem ovlivňujícím ekonomičnost výroby dílu. Zpravidla bývá nejdelší částí vstříkovacího cyklu a z důvodu úspory finančních prostředků je snaha tento čas co nejvíce zkracovat. Zkracováním času chlazení ale ve výrobku často zůstává velké reziduální napětí, které může ohrozit funkčnost dílu. Proto je tento čas dalším hodnoceným kritériem při optimalizaci procesu.

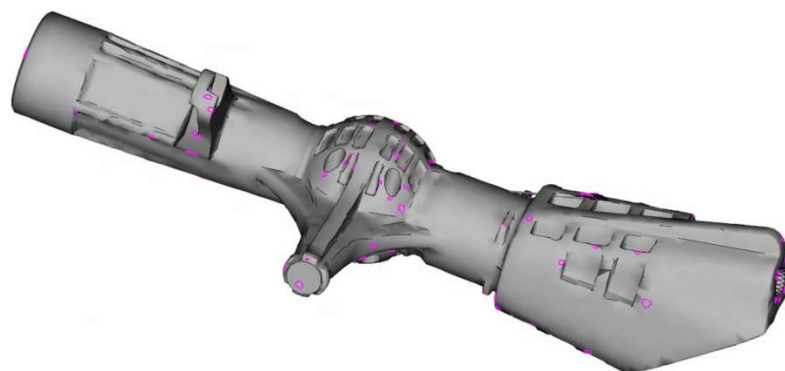
U 1. navržené varianty činí čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty (158 °C) ve všech místech dílu 162,7 s. Jak je však vidět na obr. 35, v místech, kde budou vyhazovače tento čas činí max. 24 s. Díl tedy bude možné vyhodit podstatně dříve.



Obr. 34. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta 1

5.1.3 Vzduchové kapsy (Air traps)

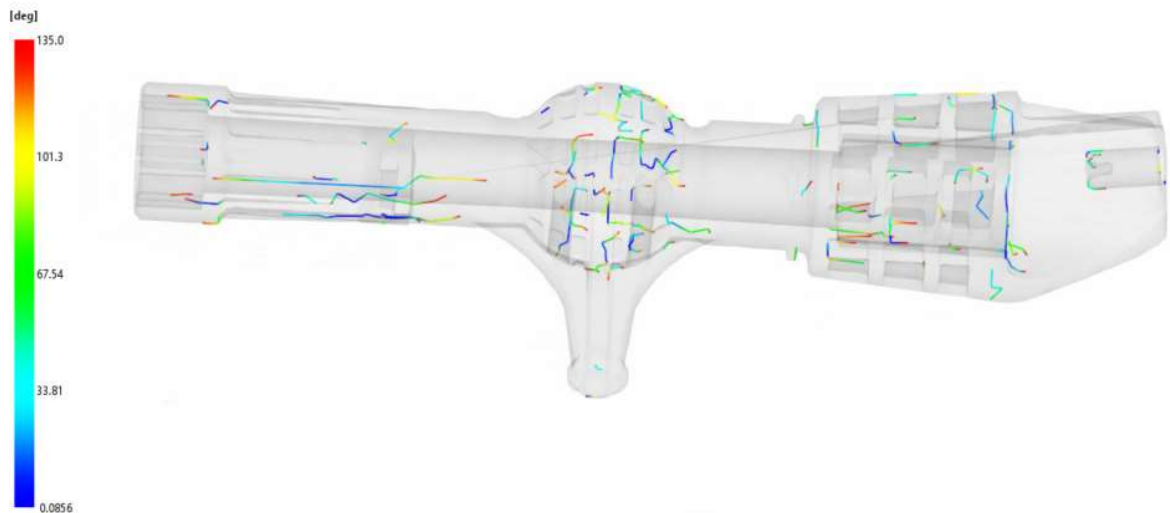
Vzduchové kapsy mohou způsobovat vady dílu jako např. spálená místa vlivem dieselova efektu, nebo nedotečení taveniny do některých míst dutiny formy. Předpokládaná místa, ve kterých se bude vzduch uzavírat jsou znázorněna na obrázku č. 36. Vzduch však může ve formě odcházet vřelymi v dělicí rovině, nebo kolem vyhazovačů díky čemuž nemusí problém s uzavřením vzduchu vůbec vzniknout. Vzduchové kapsy vzniklé na výčnělku z centrální koule pravděpodobně odejdou vřelymi v dělicí rovině, stejně jako kapsy vzniklé na části dílu určené k přišroubování do sestavy. Problémem by mohl být vzduch uzavřený na spodní části dílu. Zde nejsou plánovány vyhazovače, bude zde tedy pravděpodobně nezbytné vyřešit odvod vzduchu odvzdušňovacím kanálem. Vzduchové kapsy na centrální kouli by bylo možné vyřešit přidáním vyhazovačů do těchto částí.



Obr. 35. Vzduchové kapsy – varianta č. 1

5.1.4 Studené spoje (Weld lines)

Studený spoj vznikne tam, kde se setkají dvě nebo více čel taveniny. Odstranit je lze vhodnou konstrukcí dílu, v některých případech však taková konstrukce není možná, proto je snaha tyto spoje alespoň posunout do míst, která nejsou výrazně mechanicky namáhána. Na obr. 37 je vidět mnoho studených spojů, které vzniknou při vstřikování, nejsou však v kritických místech dílu, nebo nejsou orientovány tak, aby byly schopny způsobit větší deformace. Na spodním okraji dílu se vytvořil kruhový studený spoj. V tomto místě díl už nebude výrazně mechanicky namáhán, spoj tedy neohrožuje díl po mechanické stránce, nicméně studený spoj by mohl způsobit vadu vzhledu, která je taktéž nepřijatelná. V případě, že by byl studený spoj viditelný, je třeba jej odsunout například posunutím vtokového ústí či úpravou technologických podmínek výroby



Obr. 36. Studené spoje – varianta č. 1

5.1.5 Propadliny (Sink marks estimate)

Z analýzy dílu vyplynula místa, ve kterých se mohou vytvořit propadliny. Jsou to místa zpravidla s větší tloušťkou stěny. U žebra na spodní části dílu (na obrázku vpravo) se vyskytla největší propadlina. Žebro zde však plní pouze funkci výztuhy, propadlina zde tedy pravděpodobně nebude problémem. Propadliny u výstupku určeného pro příšroubování k další soustavě by problémem být mohly, tato část dílu by mohla být náchylnější na ulomení. V tomto místě ale hodnota propadu dosahuje jen 0,3 mm, což výsledné požadované parametry neohroží.

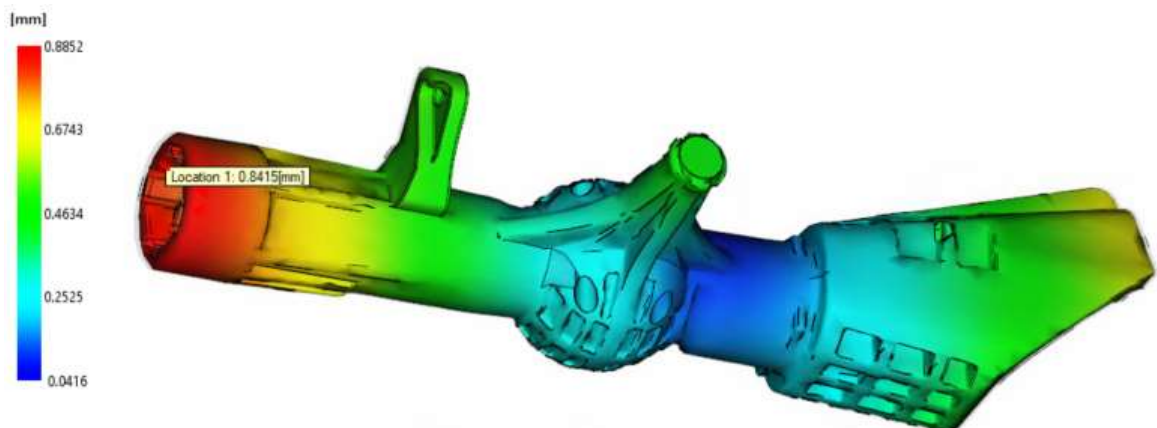


Obr. 37. Propadliny – varianta č. 1

5.1.6 Celková deformace (Deflection, all effects)

Tvarová deformace dílu může vzniknout z několika příčin, především vlivem smrštění materiálu, propadlin, nebo staženin. Se smrštěním materiálu je třeba počítat při konstrukci tvarové dutiny formy, která musí být o toto smrštění větší, aby díl po zatuhnutí materiálu dosahoval požadovaných rozměrů.

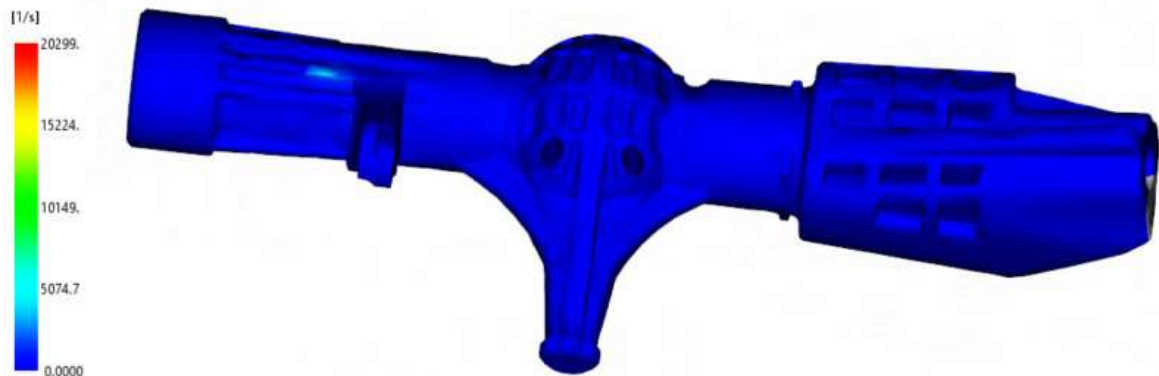
U varianty č. 1 je ve většině míst deformace do 0,89 mm. Tato hodnota je přijatelná na délce dílu, problémem je deformace na horním vnitřním průměru, který by nemusel pasovat na protikus. Hodnotu deformace v tomto místě by bylo vhodné co nejvíce snížit.



Obr. 38. Celková deformace – varianta č. 1

5.1.7 Rychlost smykové deformace (Shear rate)

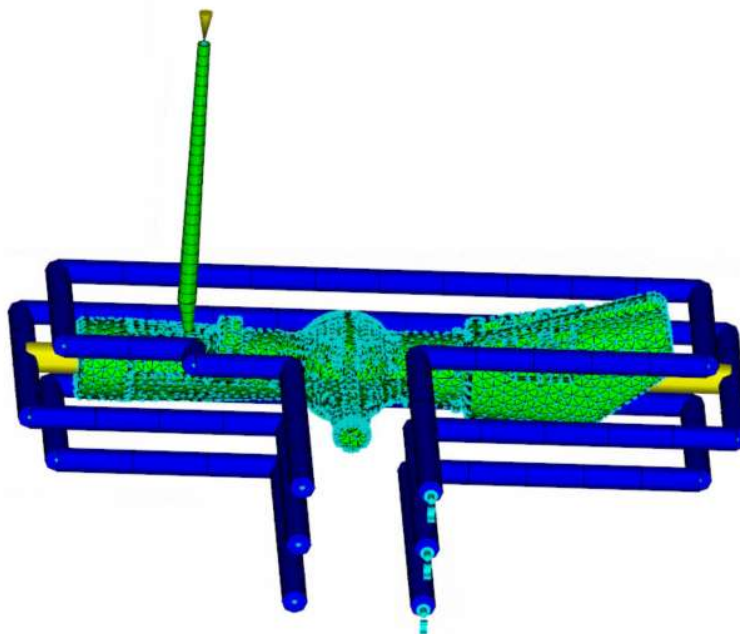
Maximální dovolená rychlost smykové deformace pro materiál Akulon S223 – HG0 Natl je 100000 s^{-1} . U varianty č. 1 je maximální dosažená rychlost smykové deformace 20299 s^{-1} (poblíž místa plnění), materiál tedy není ohrožen degradací z překročení maximální dovolené rychlosti smykové deformace.



Obr. 39. Rychlost smykové deformace – varianta č. 1

5.2 Varianta 2

Vzhledem k tomu, že varianta 1 nebyla příliš efektivní z hlediska chlazení, byl u varianty č. 2 přidán temperační okruh. Protože je díl dutý, nabízelo se přidat temperaci i dovnitř dílu, byly tedy na okruhu přidány přepážky chladící díl zevnitř.



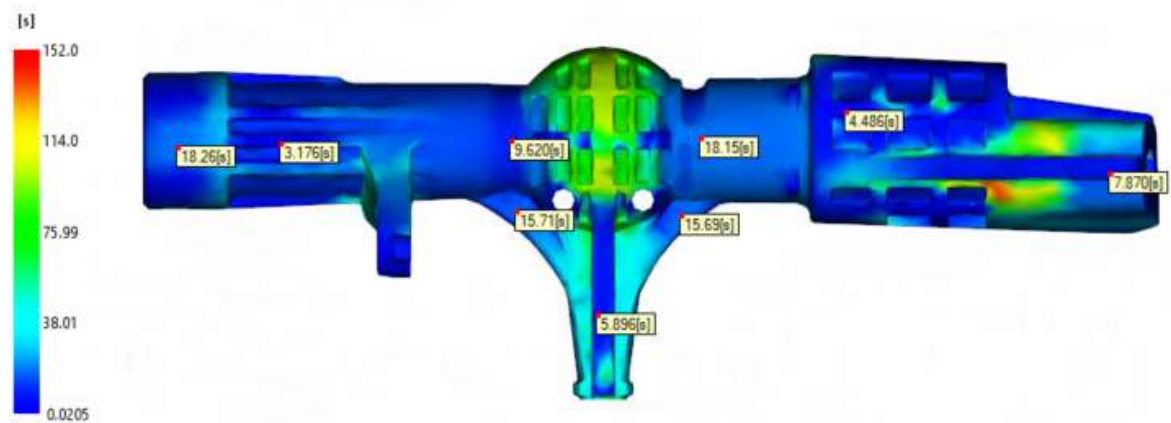
Obr. 40. Návrh varianty č. 2

5.2.1 Čas plnění (Fill time)

Díky tomu, že nebyl měněn vtokový systém, zůstal čas plnění stejný jako u varianty č. 1, tedy 1,854 s.

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

Jak je viditelné na obr. 42, změna temperační soustavy, především přidání přepážek zkrátilo dobu chlazení dílu na vyhazovací teplotu. Nejteplejší část dílu se na tuto teplotu ochladí za 152 s, nicméně díl bude možné vyhodit mnohem dříve, v místech vyhazovačů se díl ochladí na vyhazovací teplotu nejdéle za 18,3 s..



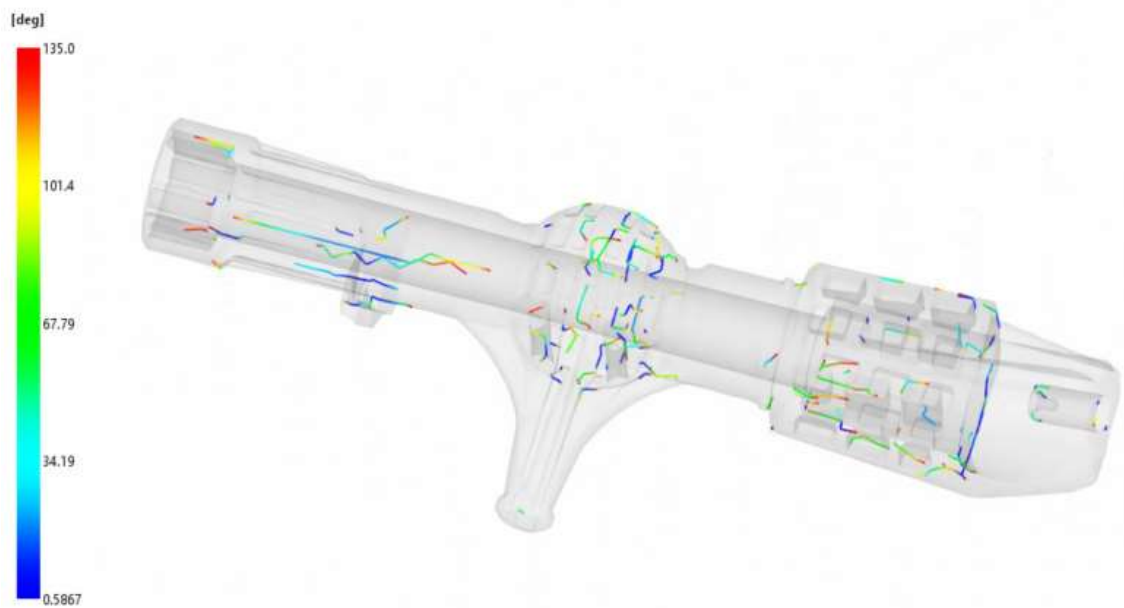
Obr. 41. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta č. 2

5.2.3 Vzduchové kapsy (Air traps)

Vzhledem k nezměněné koncepci vtokové soustavy zůstal počet a umístění vzduchových kapes stejný jako v předchozí variantě.

5.2.4 Studené spoje (Weld lines)

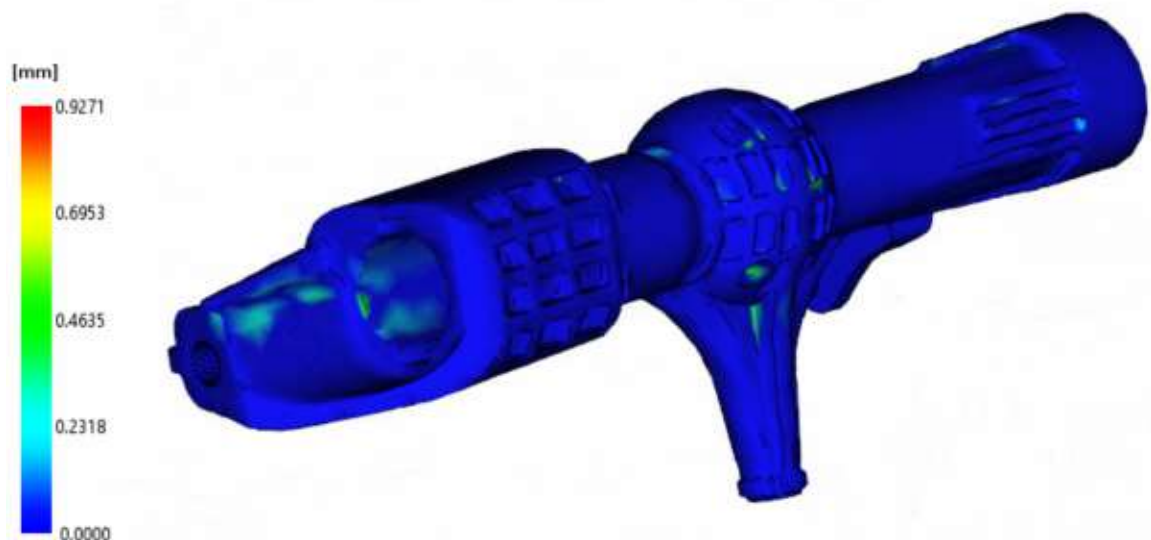
Studené spoje zůstaly na dílu v podobných místech i velkém počtu jako v předešlé variantě.



Obr. 42. Studené spoje – varianta č. 2

5.2.5 Propadliny (Sink marks estimate)

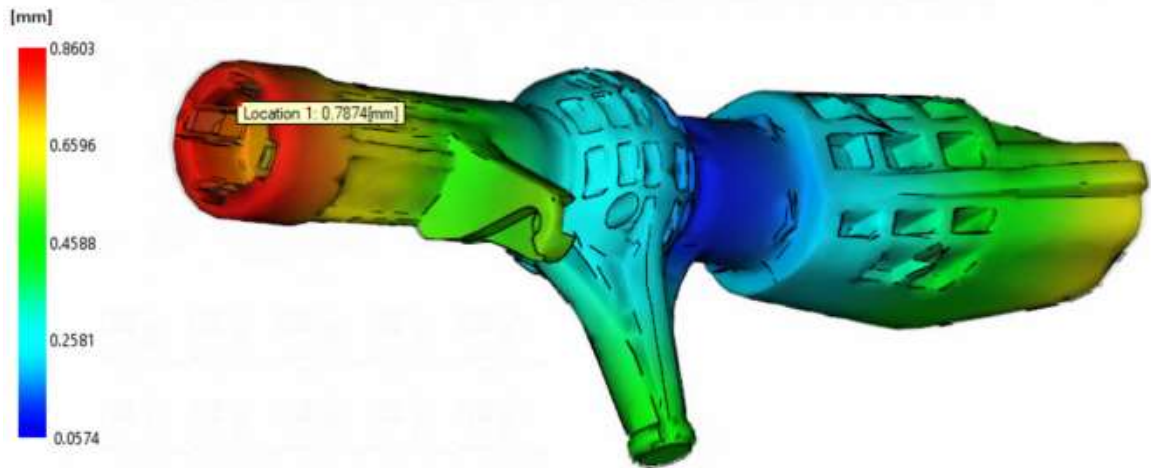
Vlivem rychlejšího zchlazení, se na díle objevilo více míst, kde se pravděpodobně budou tvořit propadliny. To by mohl být problém především na vnitřních plochách, které po následné montáži dosedají na protikus. V těchto místech se objevují propadliny o velikosti v průměru 0,25 mm.



Obr. 43. Propadliny – varianta č. 2

5.2.6 Celková deformace (Deflection, all effects)

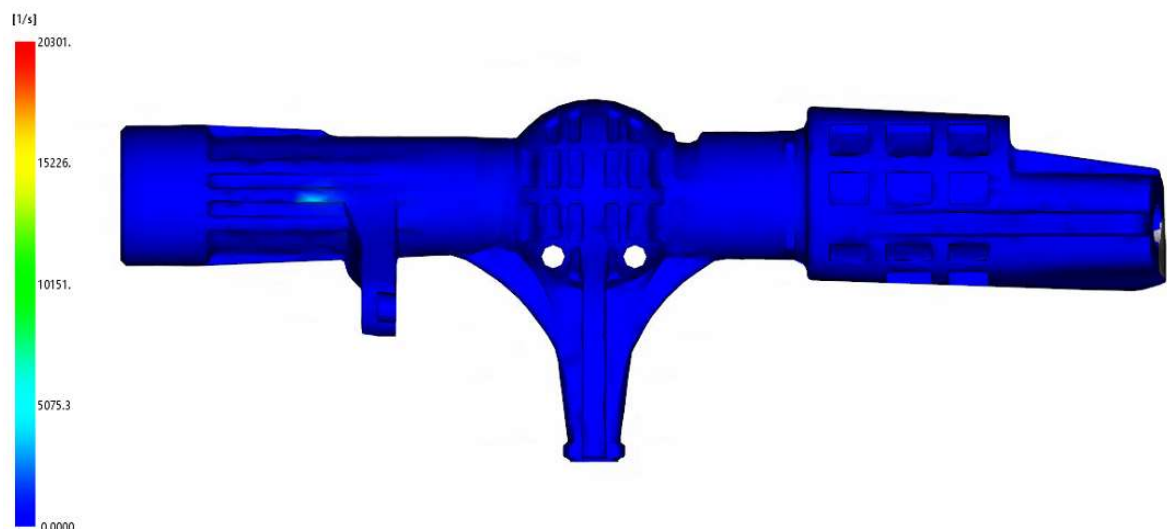
Celková deformace dílu se u varianty 2 oproti první variantě snížila. Na horním konci dílu se díl bude odchylovat od modelu o 0,086 mm. Stejně jako v předešlé variantě zůstává problémem vnitřní průměr dílu. I zde se však deformace snížila.



Obr. 44. Celková deformace – varianta č. 2

5.2.7 Rychlost smykové deformace (Shear rate)

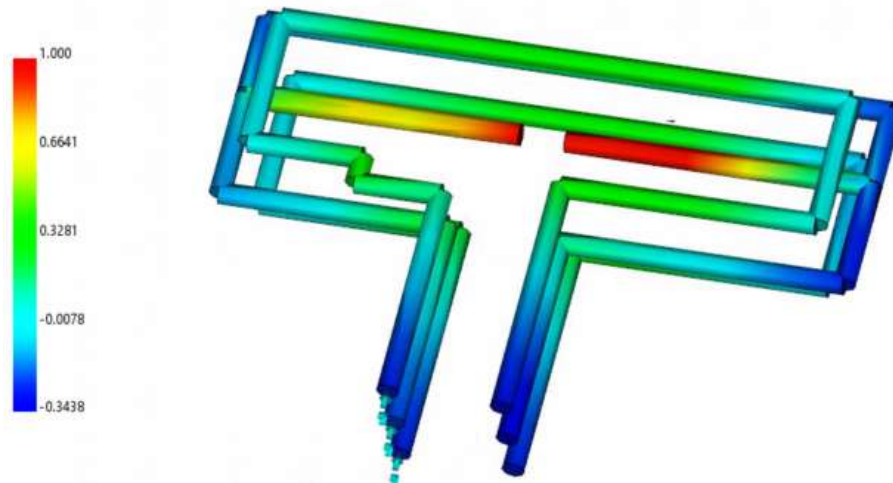
Maximální rychlost smykové deformace u varianty č. 2 činí 20301 s^{-1} . Maximální dovolená hodnota rychlosti smykové deformace materiálu tedy nebyla překročena



Obr. 45. Rychlost smykové deformace – varianta č. 2

5.2.8 Efektivita odvodu tepla temperačním systémem (Circuit heat removal efficiency)

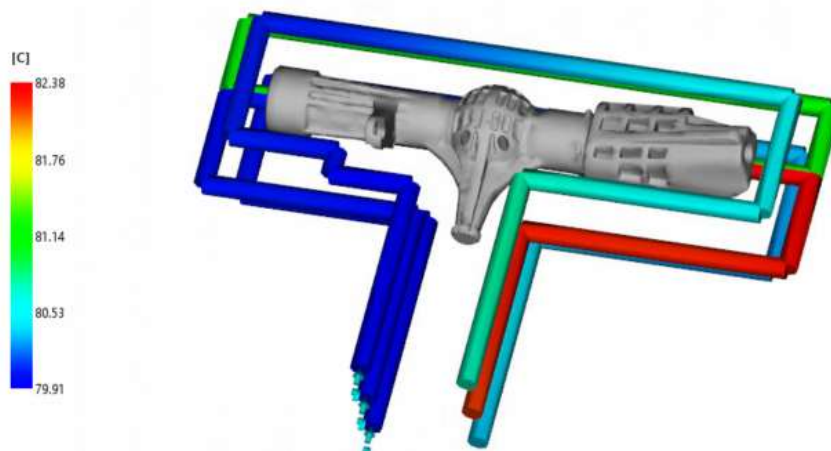
Z obr. 46 je patrné, že nejvíce tepla z dutiny formy odvádí právě přidané přepážky uvnitř dutiny dílu. To zapříčinilo kratší dobu chlazení.



Obr. 46. Efektivita odvodu tepla temperačním systémem

5.2.9 Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)

Na obr. 47 lze vidět, že voda proudící temperačním okruhem s přepážkami vedoucími dovnitř dutiny dílu je na výstupu o 2,5 °C teplejší než na vstupu. Tato hodnota není nijak velká, nicméně by bylo vhodnější, kdyby měla každá přepážka svůj temperační okruh.

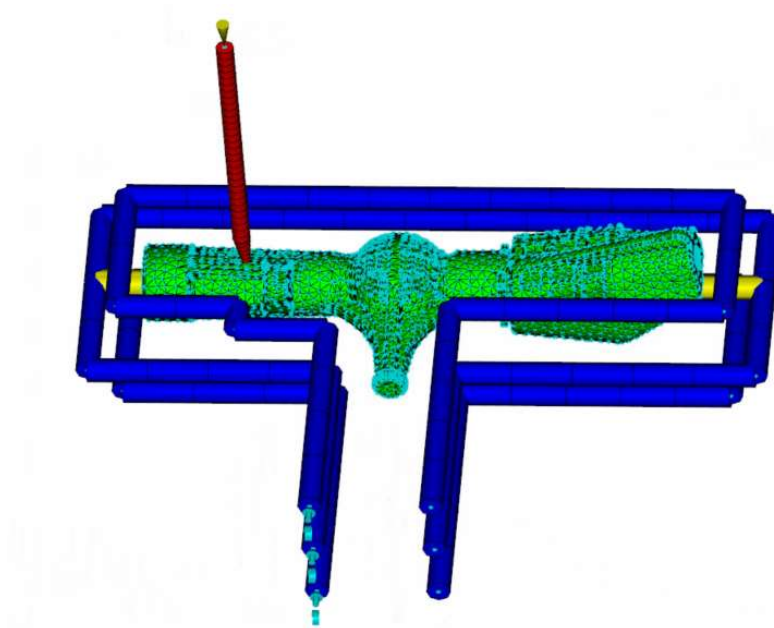


Obr. 47. Teplota temperačního média – varianta č. 2

5.3 Varianta 3

S ohledem na výsledky z předchozí analýzy prokazující efektivnější chlazení, byly ve třetím návrhu zachovány temperační okruhy s chladicími přepážkami uvnitř dílu.

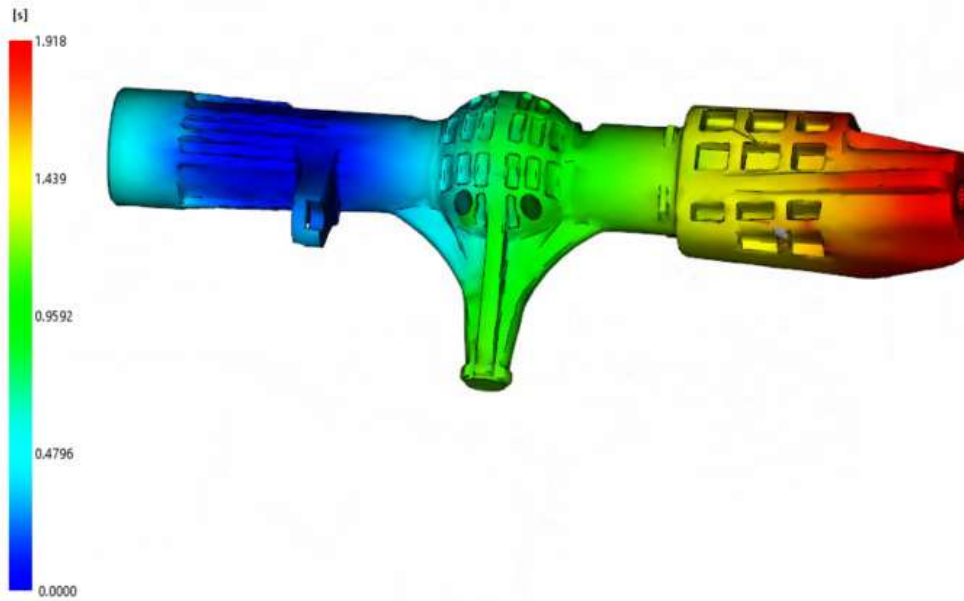
V tomto návrhu byl vyměněn studený vtokový systém za horký. S výměnou systému se zmenší množství spotřebovaného materiálu o 3,3 % a nebude třeba vtokový zbytek odřezávat, nebo díl jinak dodatečně upravovat. Horký vtokový systém je kruhového průřezu o průměru 6 mm, v místě vtokového ústí pak 3 mm.



Obr. 48. Varianta č.3

5.3.1 Čas plnění (Fill time)

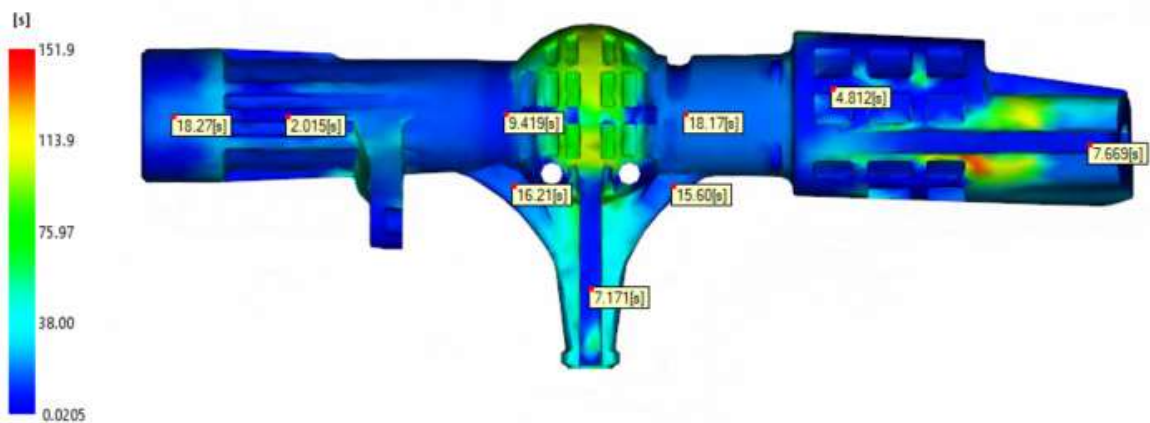
Dutina formy se u třetí varianty zaplní materiálem za 1,918 s. Čas plnění se tedy oproti minulé variantě zvýšil, avšak pouze o 0,064 s, což je zanedbatelná změna, pravděpodobně způsobená změnou tvaru vtokového ústí z kuželového na válcové. Tavenina ale přesto zatekla do všech částí dílu, a prodloužení času plnění tedy nemá velký vliv na zhoršení efektivity vstřikovacího procesu.



Obr. 49. Čas plnění – varianta č. 3

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

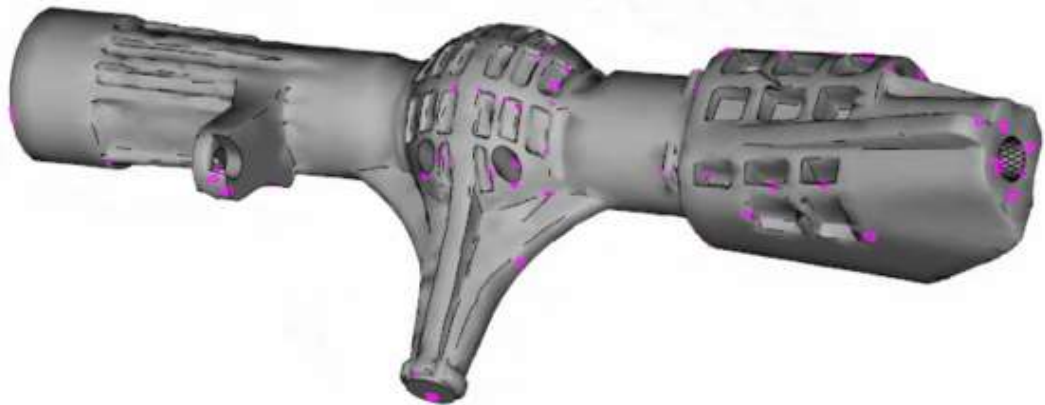
Celkový čas pro dosažení vyhazovací teploty součásti se oproti předchozí variantě zanedbatelně snížil na hodnotu 151,9 s v kritickém místě. Jak je ale patrné z obr. 50 díl bude možné vyhodit podstatně dříve. V místě vyhazovačů je čas pro potřebný pro ochlazení na vyhazovací teplotu 18,3 s. Oproti předchozí variantě tedy není patrné výrazné zkrácení cyklu.



Obr. 50. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta č. 3

5.3.3 Vzduchové kapsy (Air traps)

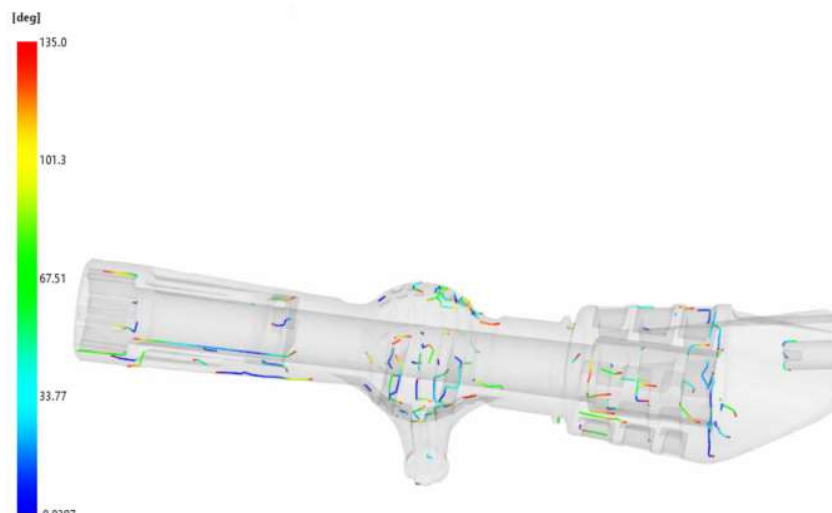
Vzduchové bubliny výměna vtokového systému za horký nijak neovlivnila. Vyskytují se na stejných místech ve stejném počtu. Stále však na místech, kde není díl výrazně mechanicky namáhán.



Obr. 51. Vzduchové kapsy – varianta č. 3

5.3.4 Studené spoje (Weld lines)

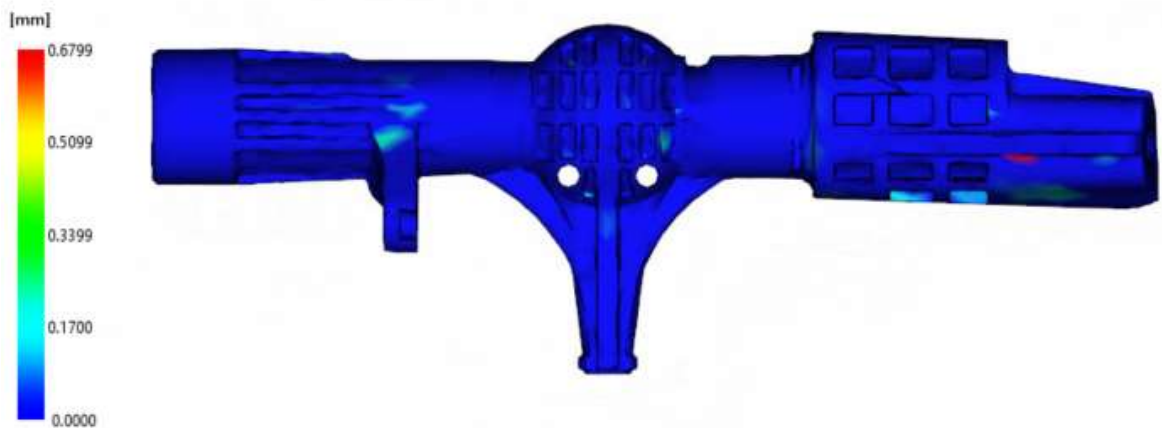
Výměna vtokového systému nijak výrazně neovlivní tečení taveniny, studené spoje v této variantě jsou tedy na stejných místech jako ve variantě předešlé.



Obr. 52. Studené spoje – varianta č. 3

5.3.5 Propadliny (Sink marks estimate)

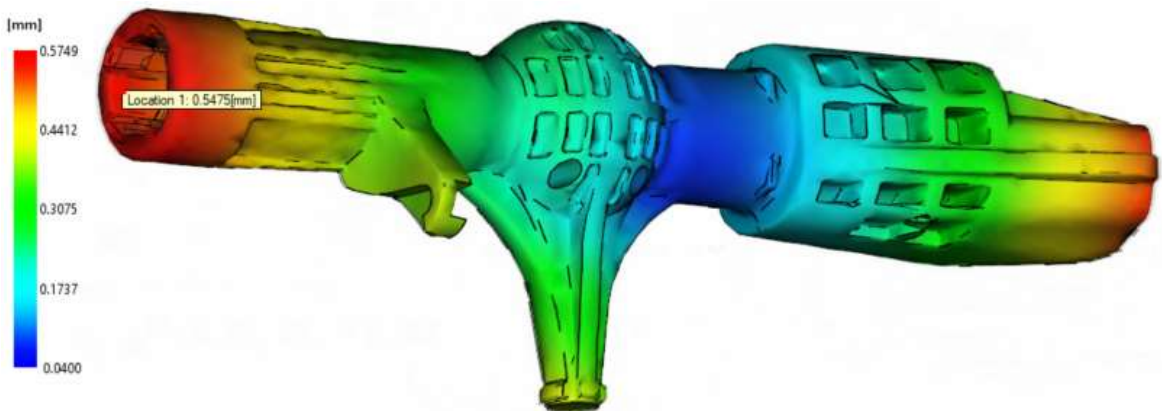
Předpokládané propadliny jsou v této variantě menší. Vznik největší propadliny je předpokládán u žebra na spodní straně dílu. Zde by však propadlina o velikosti 0,6799 mm neměla mít výrazný vliv na funkci dílu, proto lze usoudit, že výměna vtokového systému pomohla snížit množství vzniku propadlin na díle.



Obr. 53. Propadliny – varianta č. 3

5.3.6 Celková deformace (Deflection, all effects)

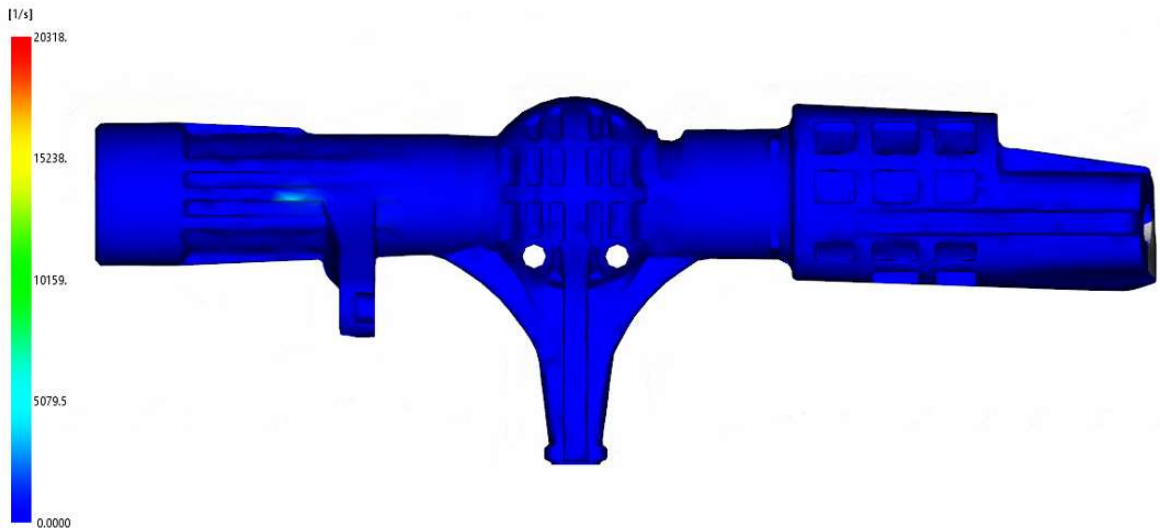
Hodnota celková deformace u této varianty vykazuje lepší výsledky než varianta předešlá. Maximální odchylka dílu od modelu je v tomto případě 0,5749 mm, zlepšení je i na vnitřním průměru dílu. Horký vtokový systém má tedy příznivější vliv na celkovou deformaci dílu, než systém studený.



Obr. 54. Celková deformace – varianta č. 3

5.3.7 Rychlost smykové deformace (Shear rate)

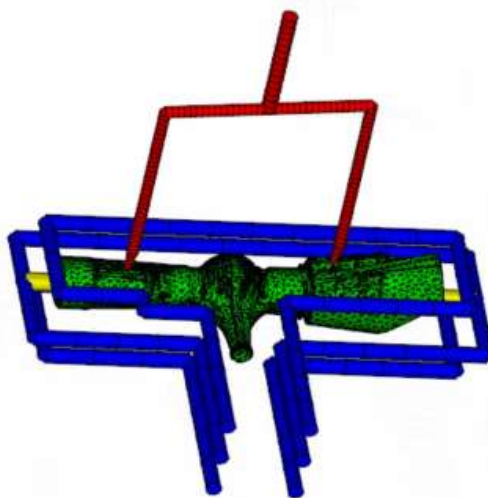
Maximální rychlost smykové deformace u varianty č. 3 činí 20301 s^{-1} . Maximální dovolená hodnota rychlosti smykové deformace materiálu tedy nebyla překročena



Obr. 55. Rychlost smykové deformace – varianta č. 3

5.4 Varianta 4

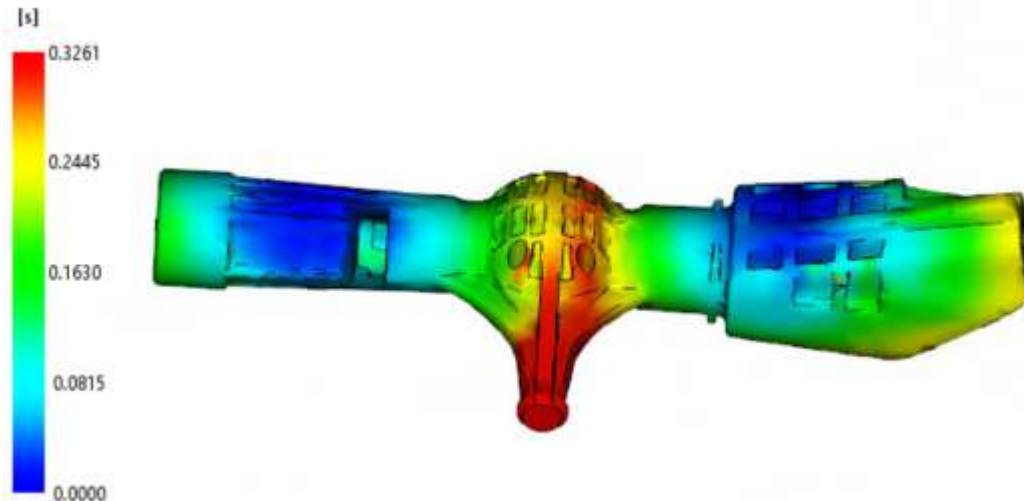
S ohledem na výsledky z analýzy varianty 3, ve které se osvědčil horký vtokový systém, byla navržena varianta 4 se dvěma vtokovými ústími a horkým vtokovým systémem. Vtokový systém je navržen s kruhovým průřezem o průměru 6 mm, ústí vtoku má průměr 3 mm. Tohle řešení by mohlo eliminovat některé bubliny a studené spoje a zároveň zkrátit dobu vstřikování dílu.



Obr. 56. Návrh varianty č. 4

5.4.1 Čas plnění (Fill time)

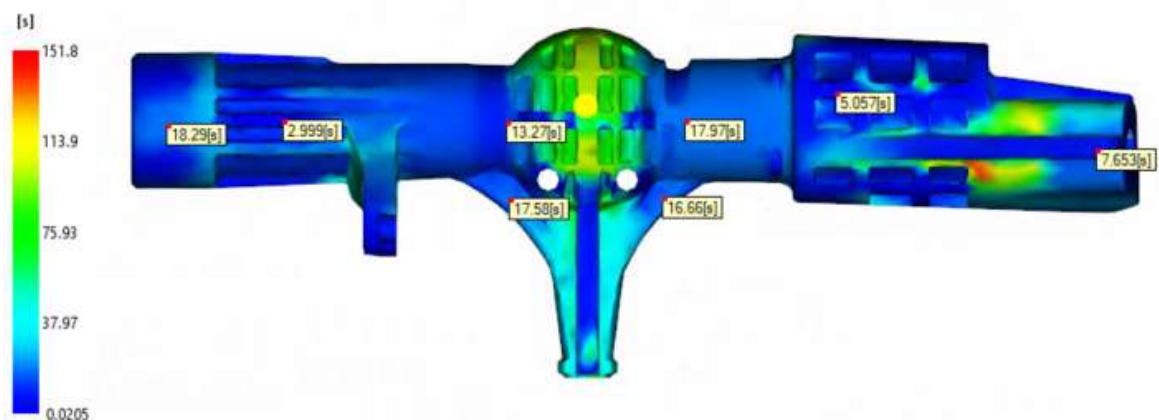
Čas plnění u varianty 4 díky dvěma vtokovým ústím výrazně nižší než u ostatních variant. Poslední místo dutiny formy je zaplněno za 0,3261 s, což je šestina času potřebného pro naplnění dutiny formy jedním vtokovým ústím.



Obr. 57. Čas plnění – varianta č. 4

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

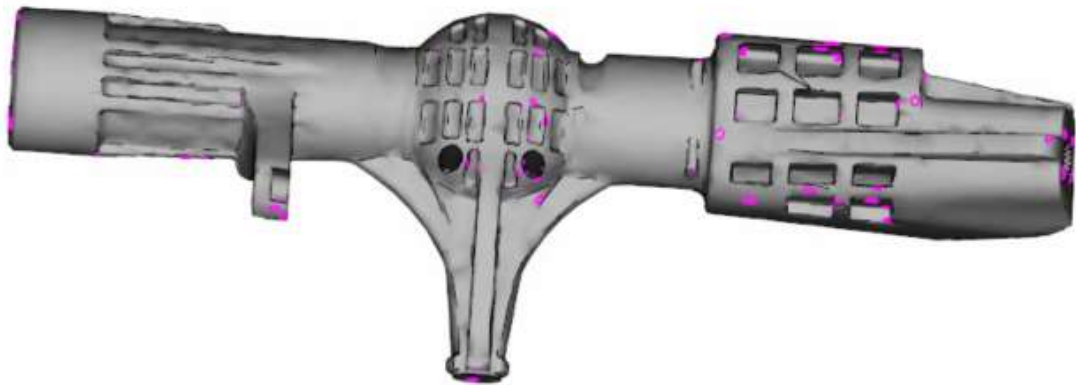
Čas potřebný pro schlazení dílu na vyhazovací teplotu se díky změně vtokového systému snížil jen nepatrně. Celá součást se ochladí za 151,8 s, časová úspora by tedy byla jen 0,1 s. V místě vyhazovačů se součást na vyhazovací teplotu ochladí za 18,3 s.



Obr. 58. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta č. 4

5.4.3 Vzduchové kapsy (Air traps)

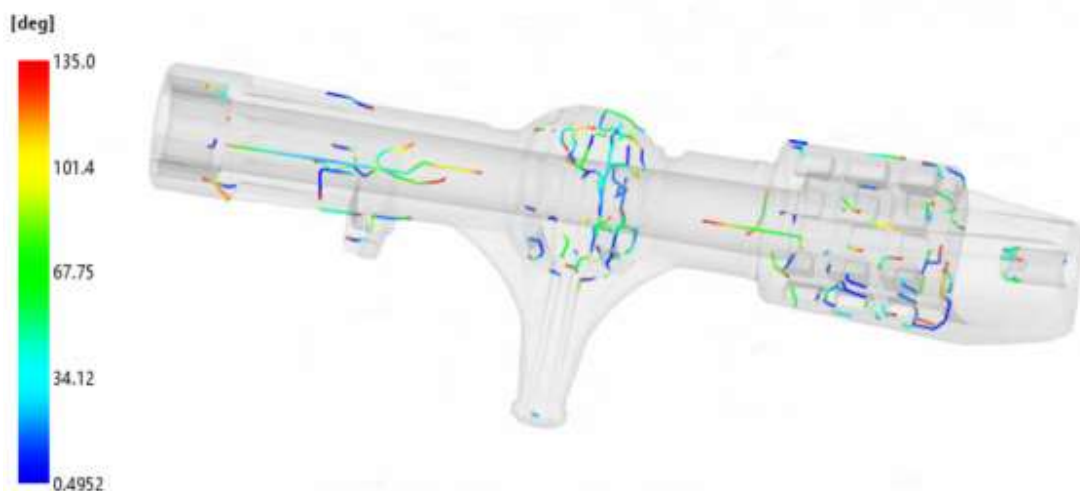
Velikost, ani četnost přidáním druhého vtokového ústí příliš nezměnily. Netvoří však nikde výraznější předěl (ten by se dal očekávat uprostřed dílu, kde se setkají dvě čela taveniny), který by mohl ohrozit mechanické vlastnosti výrobku, tedy nejsou významným problémem.



Obr. 59. Vzduchové kapsy – varianta č. 4

5.4.4 Studené spoje (Weld lines)

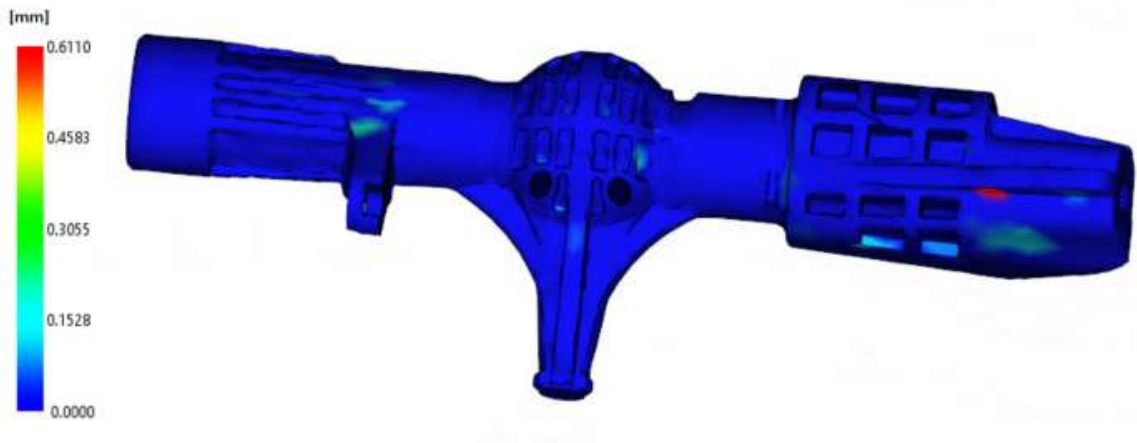
Studené spoje se přidáním druhého vtokového ústí výrazně posunuly a vytvořily prstencovec ve středu dílu. Bohužel se tímto nepodařilo odstranit dlouhý studený spoj vedoucí téměř po celé délce horní poloviny dílu, který by mohl mít vliv na mechanické vlastnosti dílu po nasazení na protikus. Díky horkému vtokovému systému ale bude materiál teplejší a dráha materiálu při vzniku spojů bude kratší. Takto vzniklý studený spoj tedy bude mít lepší parametry než studený spoj ve stejném místě při využití studeného vtokového systému.



Obr. 60. Studené spoje – varianta č. 4

5.4.5 Propadliny (Sink marks estimate)

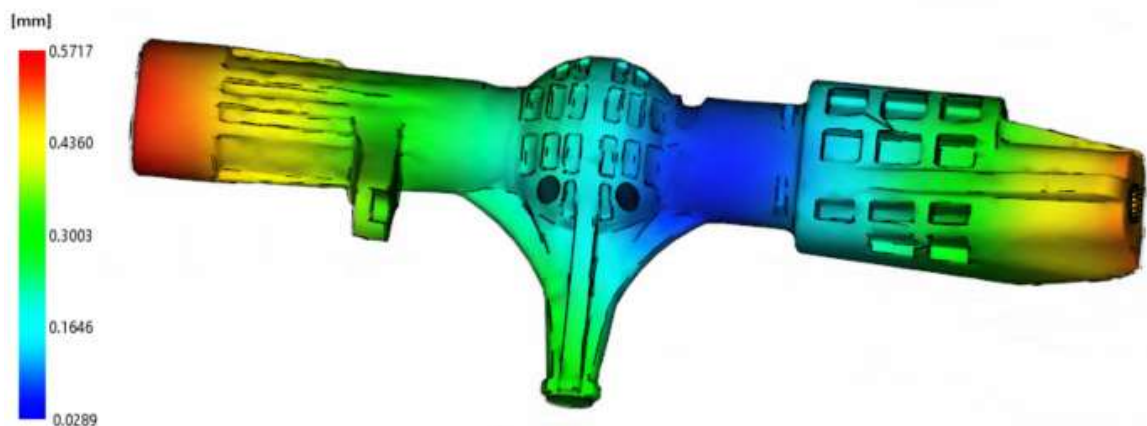
Všechny propadliny se v této variantě zlepšily jen minimálně – nejvyšší hodnota klesla na 0,6110 mm.



Obr. 61. Propadliny – varianta č. 4

5.4.6 Celková deformace (Deflection, all effects)

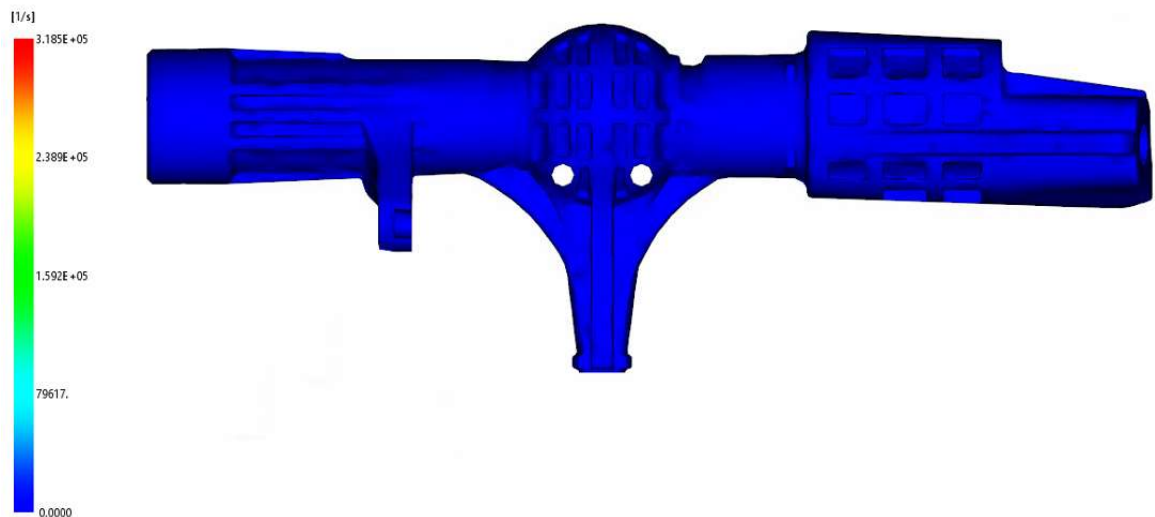
Celková deformace dílu se přidáním druhého vtokového ústí snížila na maximální odchylku od modelu 0,5717 mm. Tato hodnota již není vysoká, je třeba na ni ale pamatovat při konstrukci vstřikovací formy a o tuto hodnotu zvětšit dutinu formy.



Obr. 62. Celková deformace – varianta č. 4

5.4.7 Rychlost smykové deformace (Shear rate)

Maximální rychlost smykové deformace u varianty č. 4 dosahuje 328500 s^{-1} . Maximální dovolená hodnota rychlosti smykové deformace materiálu byla v tomto případě překročena, což by mohlo způsobit degradaci materiálu a zhoršení mechanických vlastností materiálu.

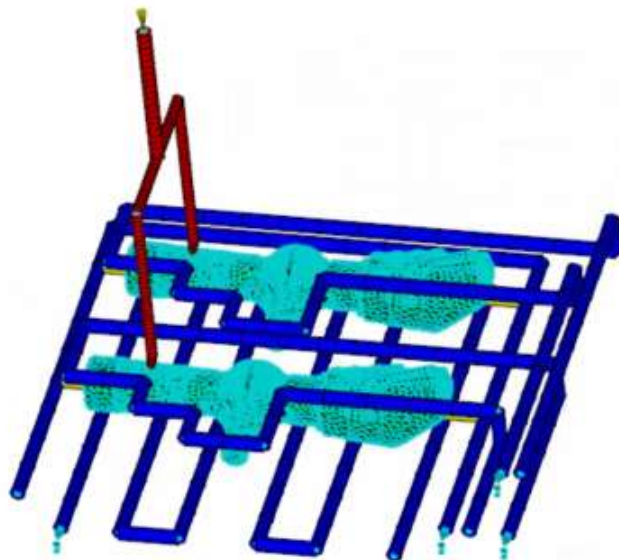


Obr. 63. Rychlost smykové deformace – varianta č. 4

5.5 Varianta 5

Z důvodu zlepšení efektivity procesu byla ve variantě č. 5 navržena dvojnásobná forma. Zůstal zachován horký vtokový systém, který se osvědčil v předchozích navrhovaných variantách.

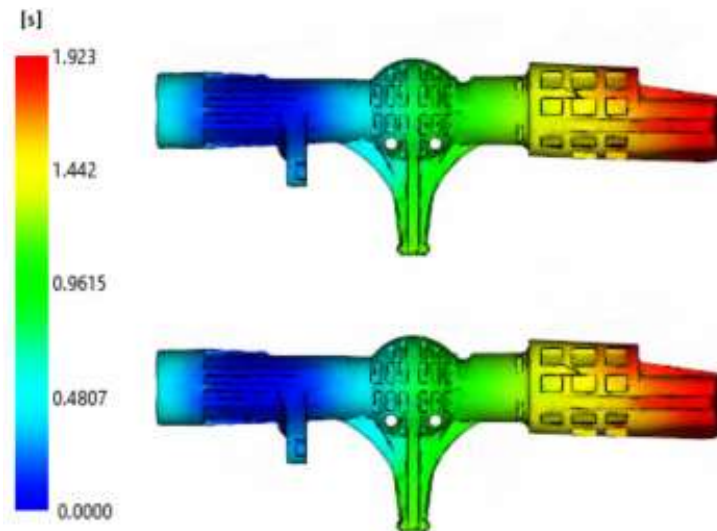
Byl přidán jeden chladicí okruh a upraven okruh na pohyblivé straně vstřikovací formy.



Obr. 64. Návrh varianty č. 5

5.5.1 Čas plnění (Fill time)

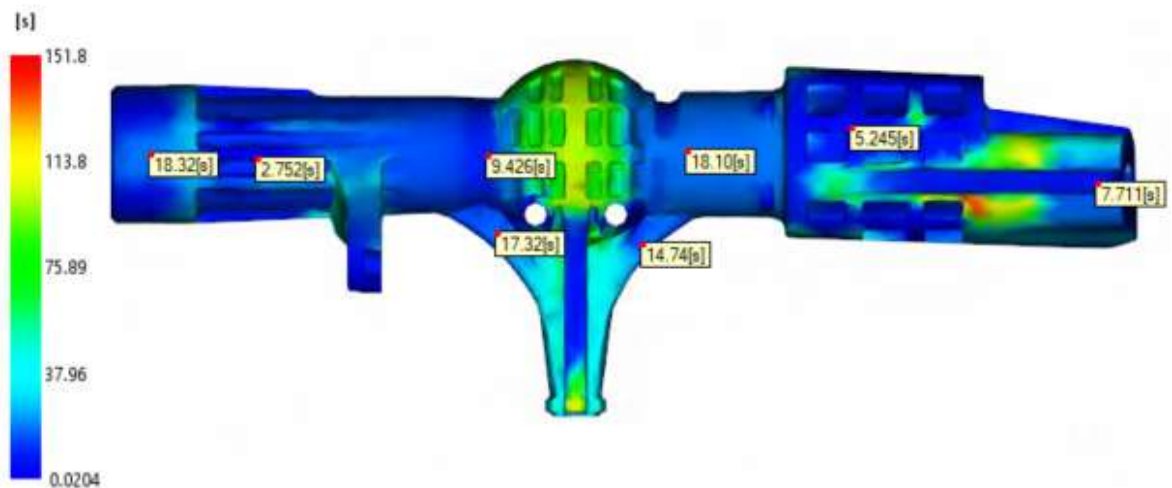
Čas plnění se v případě varianty 5 zvýšil na 1,923 s, tedy na téměř stejně dlouhou dobu jako u varianty č. 3. Vzhledem k tomu, že se plní dvě dutiny, není toto prodloužení času nijak ztrátové, naopak proces zefektivní. Pokud by bylo využito dvou vtokových ústí jako v předchozí variantě, čas by se ještě výrazně zkrátil, nicméně bude třeba zvážit investici do dražšího horkého vtokového systému.



Obr. 65. Čas plnění – varianta č. 5

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

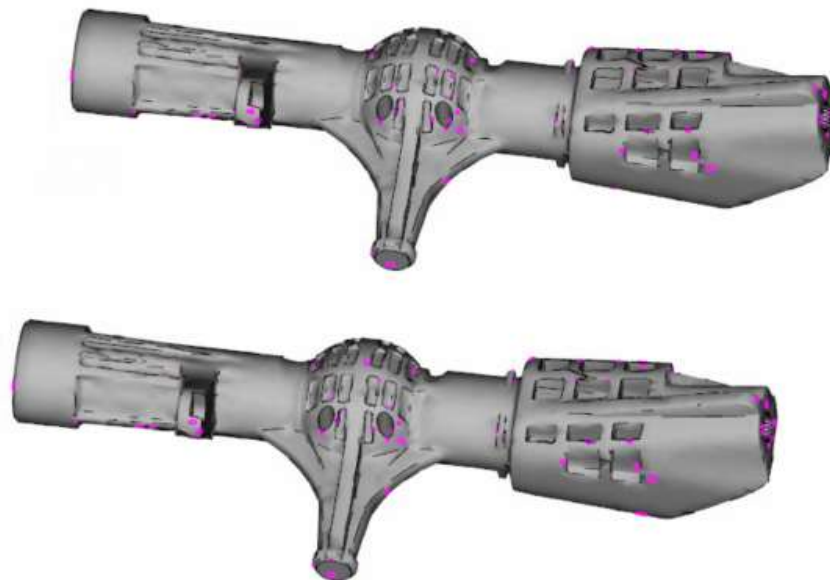
Čas pro vyhození součásti zůstal stejný jako v předchozí variantě, tedy 151,8 s. I zde je však z obrázku patrné, že součást bude možné vyhodit mnohem dříve, v místech vyhazovačů je čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty 18,3 s.. Na každý zdvih formy však vypadnou dva díly, čímž se efektivita procesu zdvojnásobí.



Obr. 66. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta č. 5

5.5.3 Vzduchové kapsy (Air traps)

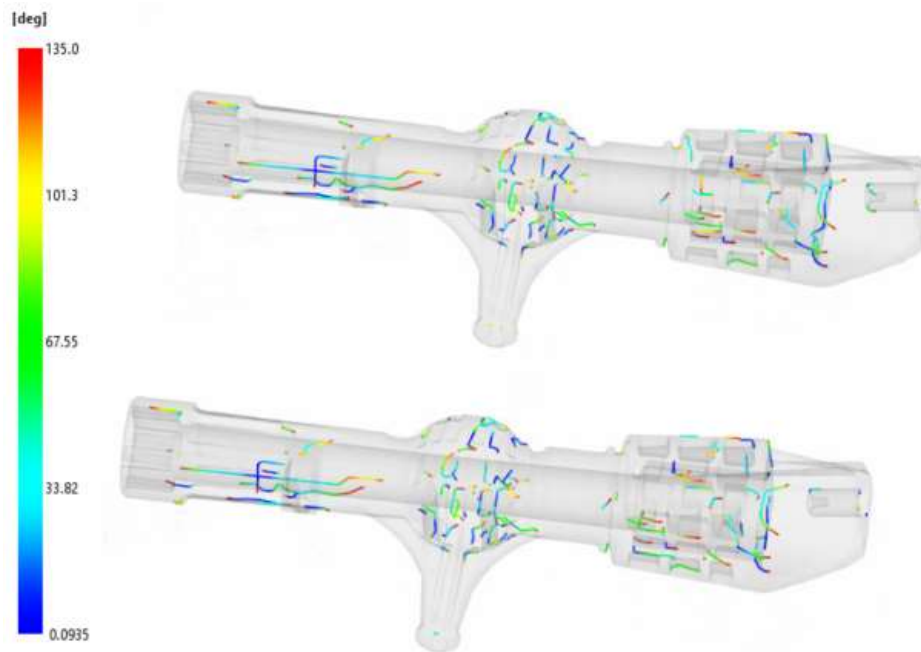
Analýza vzduchových bublin v tomto případě nezaznamenala změnu oproti předchozí variantě. Vzhledem k tomu, že bubliny nejsou na kritických místech a pravděpodobně uniknou vůlemi mezi jednotlivými komponenty vstřikovací formy, nebyly vyhodnoceny jako problémová místa.



Obr. 67. Vzduchové kapsy – varianta č. 5

5.5.4 Studené spoje (Weld lines)

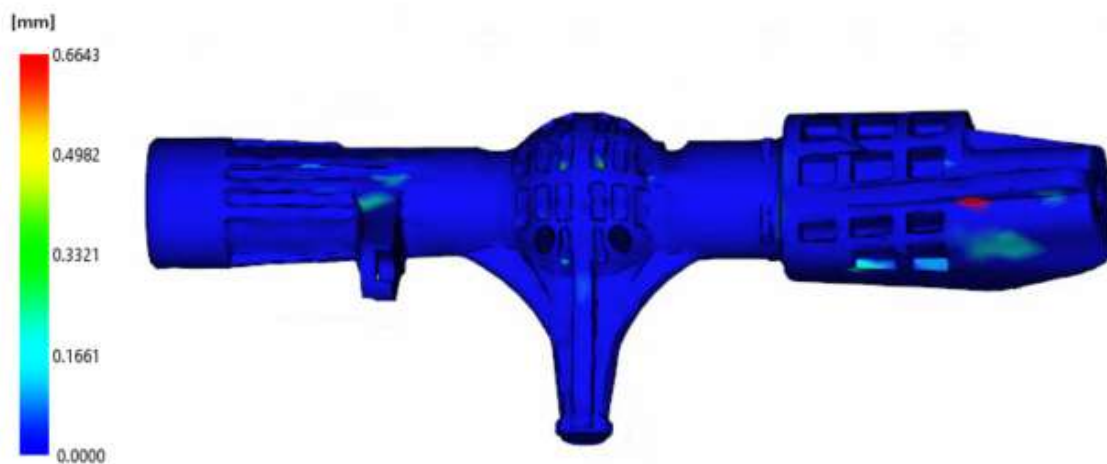
Studené spoje oproti předchozí navrhované variantě taktéž nezaznamenaly větší změnu.



Obr. 68. Studené spoje – varianta č. 5

5.5.5 Propadliny (Sink marks estimate)

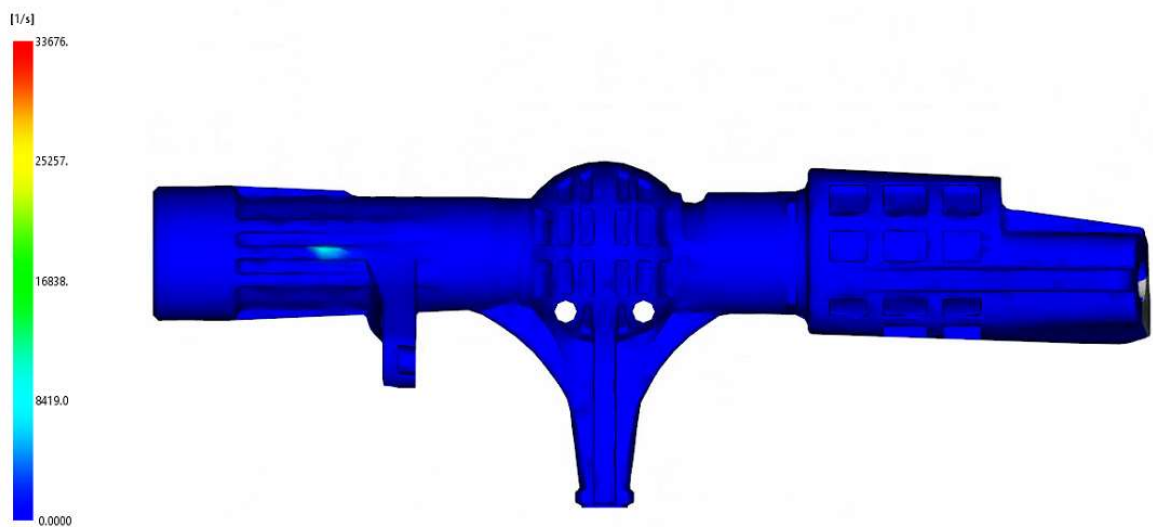
Propadliny v této variantě zůstávají na hodnotě maximálně 0,6643 mm v místech, která nejsou kritická.



Obr. 69. Propadliny – varianta č. 5

5.5.6 Rychlost smykové deformace (Shear rate)

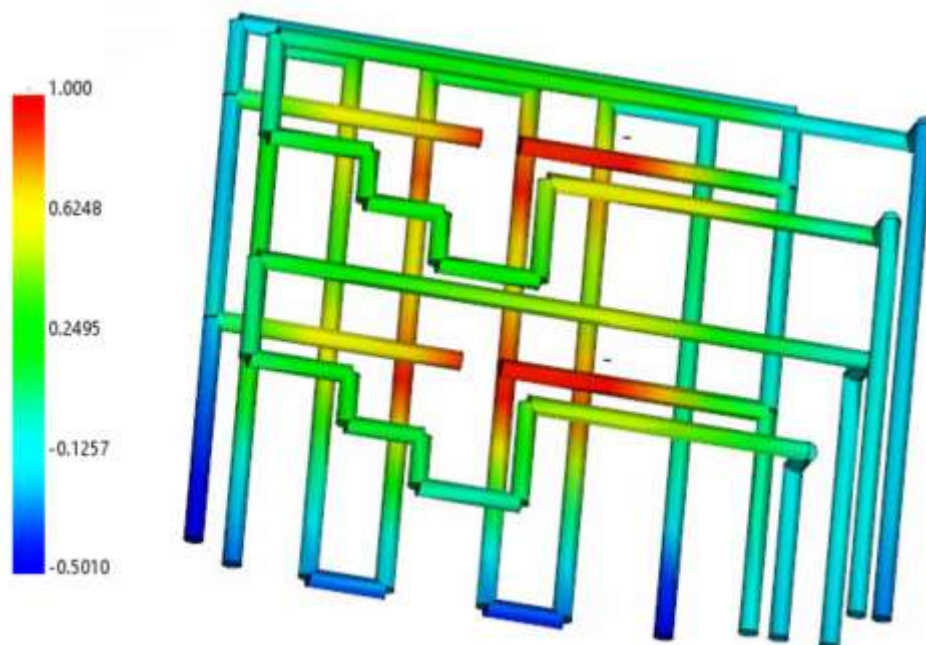
Maximální rychlost smykové deformace u varianty č. 4 dosahuje 33676 s^{-1} . Maximální dovolená hodnota rychlosti smykové deformace materiálu nebyla překročena.



Obr. 70. Rychlost smykové deformace – varianta č. 5

5.5.7 Efektivita odvodu tepla temperačním systémem (Circuit heat removal efficiency)

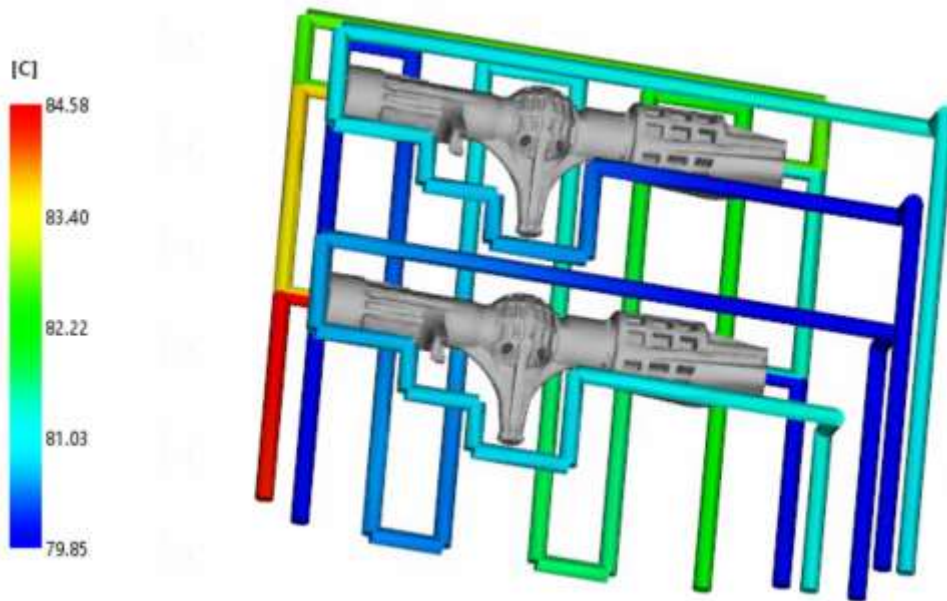
Z obrázku je patrné, že nejvíce tepla z dutiny formy odvádí přepážky v jádrech tvořících vnitřní průměr dílu a dále nově vytvořený okruh pod dutinou formy (červené oblasti nejlépe odvádějí teplo).



Obr. 71. Efektivita chladicího okruhu – varianta č. 5

5.5.8 Teplota temperačního média (Circuit coolant temperature)

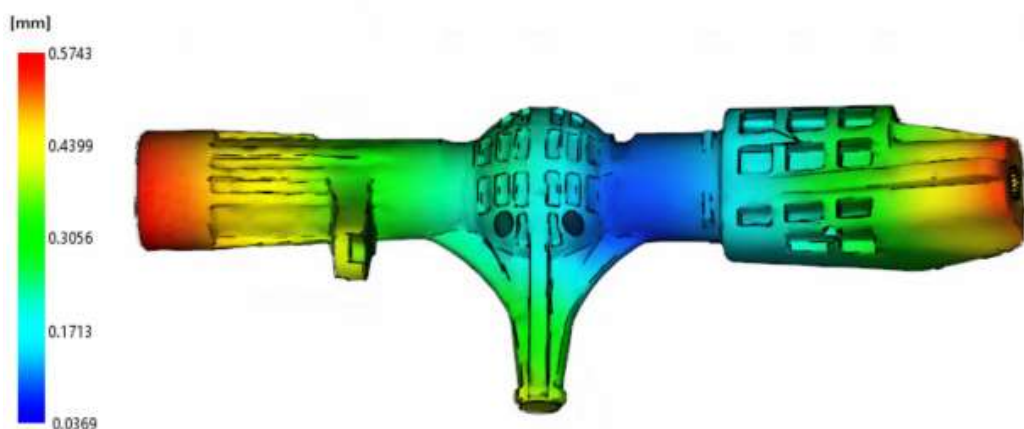
Z obrázku je patrné, že voda proudící okruhem s přepážkami v jádrech je na výstupu téměř o 5 °C vyšší než teplota na vstupu, což je na hranici doporučeného rozdílu. Tento okruh odvádí nejvíce tepla, bylo by tedy vhodné jej rozdělit na více okruhů a tím zvýšit efektivitu chlazení, a tedy i zkrátit dobu potřebnou pro ochlazení výrobku na vyhazovací teplotu.



Obr. 72. Teplota temperačního média – varianta č. 5

5.5.9 Celková deformace (Deflection, all effects)

Celková deformace dílu se snížila na hodnotu 0,574 mm. Jak je patrné z obrázku, nejvíce deformovaným rozměrem je délka výrobku, což je dáno především smrštěním materiálu.



Obr. 73. Celková deformace – varianta č. 5

5.5.10 Varianta 6

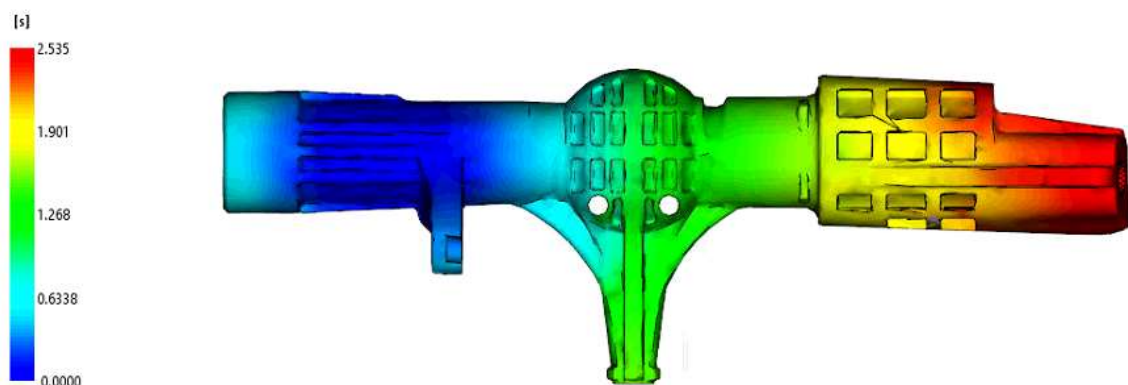
Pro případ, že by se zákazník rozhodl použít pro výrobu méně plněný materiál, byl vytvořen návrh č. 6. Poslední návrh vychází z varianty č. 5. V této variantě je místo materiálu Akulon S223 – HG0 Natl (PA66 + 50GF) použit materiál J66GF6 od výrobce BIP Chemicals Ltd. Jedná se o Polyamid 66 plněný 30 % skelných vláken.

Tab. 4. Doporučené procesní parametry pro materiál J66GF6.

Parametr	Hodnota
Teplota povrchu formy	90 °C
Teplota taveniny	290 C
Teplota formy (minimum - maximum)	70 - 110 °C
Teplota taveniny (minimum - maximum)	260 - 320°C
Maximální teplota taveniny	360 °C
Vyhazovací teplota	158 °C
Maximální smykové napětí	0,31 MPa
Maximální rychlost smykové deformace	100000 s ⁻¹

5.5.11 Čas plnění (Fill time)

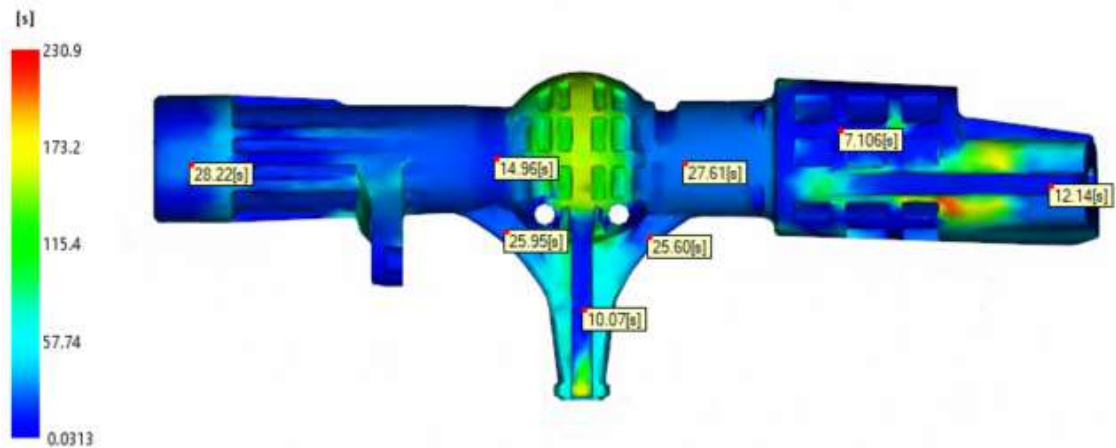
Čas, za který se dutina formy zaplní tímto materiálem je 2,535 s, tedy o 0,5 s delší než při použití materiálu s větším obsahem skelných vláken.



Obr. 74. Čas plnění – varianta č. 6

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

Čas potřebný pro vyhození dílu je opět delší než při použití více plněného materiálu. Zde se celá součást ochladí na vyhazovací teplotu až za 230,9 s, což je podstatně déle než je čas potřebný pro vyhození součásti z předešlého materiálu. I zde by však bylo možné díl vyhodit mnohem dříve, hlavní části budou ochlazeny již za 28,2 s.



Obr. 75. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta 6

5.5.13 Vzduchové kapsy (Air traps)

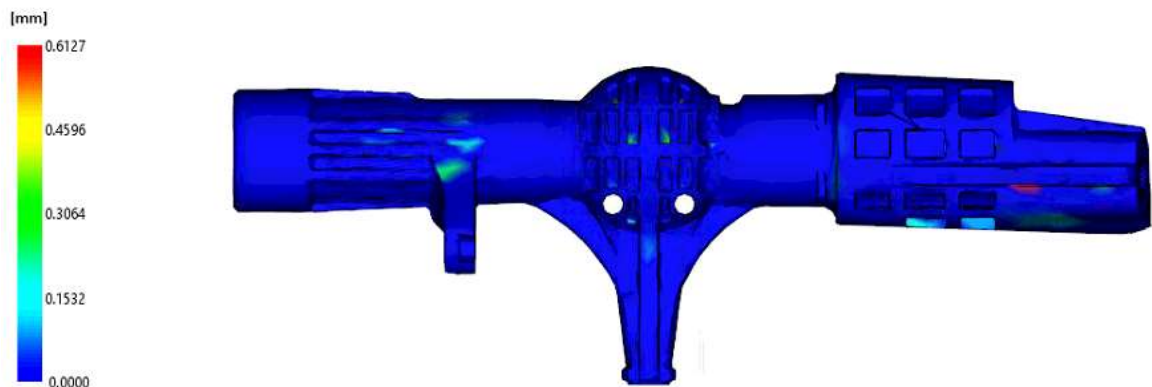
Analýza vzduchových bublin v tomto případě nezaznamenala změnu oproti předchozí variantě. Poloha ani počet bublin není ovlivněn změnou množství plniva v polymeru.

5.5.14 Studené spoje (Weld lines)

Stejně jako vzduchové bubliny, ani studené spoje nebyly změnou materiálu ovlivněny. Zůstaly na stejných místech a ve stejném počtu.

5.5.15 Propadliny (Sink marks estimate)

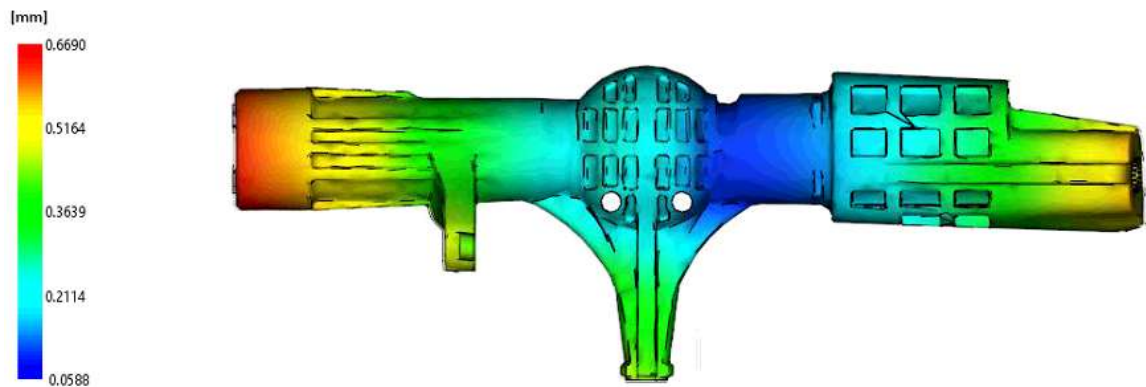
Propadliny taktéž nebyly výrazně ovlivněny změnou množství plniva v materiálu. Největší propadlina zůstala u žebra na spodní straně dílu s hodnotou propadu 0,6127 mm.



Obr. 76. Propadliny – varianta č. 6

5.5.16 Celková deformace (Deflection, all effects)

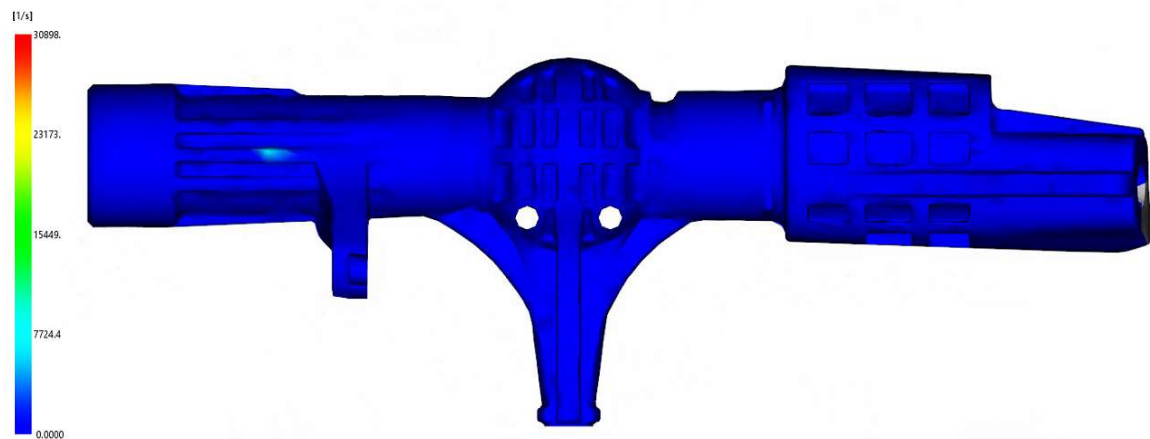
Celková deformace dílu je 0,669 mm. Z hlediska deformace je tedy vhodnější využití více plněného materiálu.



Obr. 77. Celková deformace – varianta č. 6

5.5.17 Rychlost smykové deformace (Shear rate)

Maximální rychlost smykové deformace u varianty č. 4 dosahuje 30998 s^{-1} . Maximální dovolená hodnota rychlosti smykové deformace materiálu nebyla překročena.



Obr. 78. Rychlost smykové deformace – varianta č. 6

6 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Varianta č. 1 byla původním návrhem uspořádání formy. Tato varianta se však ukázala ve všech ohledech jako nevhodná. V této variantě byl použit nevhodný temperační systém, což způsobilo dlouhý cyklus stroje kvůli dlouhému času potřebnému pro vyhození součásti, a také velkou celkovou deformaci dílu.

Varianta č. 2 napravila některé chyby varianty č. 1. Zkrátila se doba chlazení dílu na vyhazovací teplotu, a snížila se hodnota celkové deformace. Tento návrh však stále využíval studený vtokový systém, který je sice levný, nicméně zde pak vzniká odpad, který je ztrátou materiálovou i finanční.

Varianta č. 3 proto využívá horkého vtokového systému, čímž se odstranil odpad a výroba je ekonomicky výhodnější. Využitím horkého vtokového systému se také zmenšily propadliny vzniklé na díle a výrazně se snížila celková deformace dílu.

Varianta č. 4 zkusila využít druhého vtokového ústí ve snaze zkrátit délku vstřikovacího cyklu. Toto se povedlo především výrazným zkrácením doby plnění dutiny formy, avšak objevily se propadliny v místech, kde se díl po montáži stýká s protikusem a v těchto místech by mohl vzniknout problém.

Jako alternativní řešení v podobě dvojnásobné formy byla navržena varianta 5 vycházející z předešlých výsledků.

U varianty č. 5 bylo upuštěno od druhého vtokového ústí.. Opět se tedy vrátila delší doba plnění, ale přidáním druhé kavity do návrhu se výroba výrazně zefektivnila, protože za stejnou dobu, jakou by trval cyklus ve variantě 3, u této varianty vypadnou dva výrobky bez odpadu.

Další alternativou pro výrobu dílu z méně plněného materiálu byla vytvořena varianta č. 6. V poslední variantě návrhu byl změněn obsah plniva (skelných vláken) v Polyamidu 66. Tato varianta však ukázala výrazně delší čas plnění i čas potřebný pro ochlazení dílu na vyhazovací teplotu. Stejně tak se zvětšila celková deformace dílu.

Jednotlivé sledované parametry z Moldflow analýzy jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5. Vybrané parametry z Moldflow analýzy jednotlivých variant návrhu optimalizace

Varianta návrhu	Výpady [ks]	Čas plnění [s]	Čas pro vyhození [s]	Propadliny [mm]	Celková deformace [mm]
1	1	1,85	162,7	0,92	0,89
2	1	1,85	152	0,93	0,86
3	1	1,92	151,9	0,68	0,57
4	1	0,33	151,8	0,61	0,57
5	2	1,92	151,8	0,66	0,57
6	2	2,54	230,9	0,61	0,67

Na základě těchto výsledků byla nejvhodnějším návrhem pro jednonásobnou formu zvolena varianta č. 3 – tedy návrh s horkým vtokovým systémem, třemi temperačními okruhy a vstříkovaným materiálem Polyamidem 66 s 50 % skelných vláken.

V případě potřeby větší efektivity výroby by byla nejvhodnější varianta č. 5, ve které je navržena dvojnásobná forma. Nicméně je nutné u této varianty s ohledem na tvar dílu počítat se složitější formou, a tedy vyšší cenou tohoto nástroje.

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byla shrnuta problematika vstřikovacího procesu, se zaměřením na vady výrobků, které se při tomto procesu mohou objevit a možnosti jejich odstranění.

Praktická část se zabývala optimalizací procesu výroby vstřikovaného dílu pro automobilový průmysl, který patří do sestavy řadící páky.

Byl stručně popsán současný stav dílu a vady, které se na něm vyskytují.

Pro proces výroby tohoto dílu bylo navrženo 6 variant vstřikovací formy s různými úpravami temperačních okruhů, vtokových systémů, počtů kavit a vstřikovaným materiálem.

Z navržených variant byla poté vybrána neoptimálnější varianta – návrh číslo 3. Tento návrh využívá horký vtokový systém, který odstraní ztráty v podobě vtokového zbytku, dále pak obsahuje dvě kavity, tedy zdvojnásobuje produkci. Temperační systém byl optimalizován na základě výsledků z předchozích návrhů.

Z navrhovaných materiálů byl vybrán jako vhodnější materiál polyamid 66 plněný 50 % skelných vláken. Oproti stejnému materiálu plněnému pouze 30 % skelných vláken vykazoval mnohem kratší dobu ochlazení součásti na vyhazovací teplotu i kratší dobu vstřikování, proto bude výroba dílu z tohoto materiálu efektivnější.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BĚHÁLEK, Luboš et al. Úvod do technologií zpracování plastů. Vydání první. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. 167 stran. ISBN 978-80-7494-460-4.
- [2] BĚHÁLEK, Luboš a HABR, Jiří. Moderní plasty a vláknové kompozity. Díl I., Vstřikování plastů: materiály a technologie. Vydání první. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. 122 stran. ISBN 978-80-7494-458-1.
- [3] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2018. 455 stran. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [4] ŘEHULKA, Zdeněk. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2015. ISBN 978-80-7204-919-6.
- [5] LENFELD, Petr. Technologie vstřikování [online]. Svitavy: publi.cz, 2016 [cit. 22.01.20]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [6] Kaskádové vstřikování a simulační analýza Cadmould 3D -F | Technický týdeník. TT | Technický týdeník [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 22.01.2020]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/kaskadove-vstrikovani-a-simulacni-analyza-cadmould-3d-f_20733.html
- [7] NEUHÄUSL, Emil. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Vady výstřiků 1.-6. díl. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2010 [cit. 22.01.20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanky.html>
- [8] KG 2000 POLYPROPYLEN. Kanalizace z plastu [online]. Copyright © [cit. 22.01.2020]. Dostupné z: <https://kanalizacezplastu.cz/stranky/kg-2000-polypropylen>
- [9] POLYETYLÉN. PE potrubí z polyetylenu - PDF Free Download. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 22.01.2020]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68928012-Polyetylen-pe-potrubí-z-polyetylenu.html>
- [10] OT PVC 110|3,2|6000 Trubka ochranná hladká hrdlovaná | AMISPOL. Úvodní stránka | AMISPOL [online]. Copyright © 2012 [cit. 22.01.2020]. Dostupné z: <https://www.amispol.cz/ot-pvc-110-3-2-6000-trubka-ochranna-hladka-hrdlovana>

- [11] Publi-BOBEK, Jiří. Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů [online]. Svítavy: publi.cz, 2016 [cit. 22.01.20]. 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Impresum.html>
- [12] TOMIS, F. Základy gumárenské a plastikářské technologie. Praha: SNTL, 1. vyd. 1975. 414-33543.
- [13] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. 1. vyd. Praha: BEN -technická literatura, 2009. str. 248. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [14] Understanding and optimizing weld lines in thermoplastic molding . Covestro – A leader in polymer solutions [online]. [cit. 22.01.2020]. Dostupné z: https://www.covestro.com/en/media/newsletters/healthcare-polymers/2018_10_understanding-and-optimizing-weld-lines-in-thermoplastic-molding
- [15] Injection moulding problems in engineering thermoplastics [online]. [cit. 22.01.2020]. Dostupné z: https://industries.basf.com/assets/global/corp/en/Plastics-Rubber/Performance_Polymers/Services/brochure_injection_molding_problems_en.pdf
- [16] Top ten Injection molding defects and how to fix them [online]. [cit. 22.01.20]. Dostupné z : <https://www.creativemechanisms.com/blog/what-cause-injection-molding-defects-and-how-to-fix-them>
- [17] Čištění vstřikovacích jednotek, teorie nasazení, nejčastější chyby a ekonomická výhodnost | Technický týdeník. TT | Technický týdeník [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 22.01.2020]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/cisteni-vstrikovacich-jednotek-teorie-nasazeni-nejcastejsi-chyby-a-ekonomicka-vyhodnost_44063.html
- [18] BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2007, xvi, 308 s. ISBN 978-1-56990-421-3
- [19] DAVIES, Geoff. Materials for automobile bodies. 2nd ed. Place of publication not identified: Butterworth-Heinemann, 2012, 1 online zdroj. ISBN 9780080969794.
- [20] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, [2018], xx, 491 s. ISBN 978-1-56990-645-3.

- [21] WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang HSU. Molding simulation: theory and practice. Cincinnati: Hanser Publications, [2018], xviii, 513 s. ISBN 978-1-56990-619-4.
- [22] KENNEDY, Peter a Rong ZHENG. Flow analysis of injection molds. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Publishers, [2013], 1 online zdroj (xxviii, 349 p.). ISBN 9781569905227

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PP	polypropylen
PE	polyetylen
PS	polystyren
PVC	polyvinylchlorid
POM	polyoxymetylen
PET	polyetylentereftalát
PF	fenolformaldehydová pryskyřice
EP	epoxidová pryskyřice
UF	močovinoformaldehydová pryskyřice
MF	melamin-formaldehydová pryskyřice
UP	polyesterové pryskyřice
IR	izoprenový kaučuk
SBR	butadienstyrenový kaučuk
NBR	nitril butadien kaučuk
EMDM	etylen-propylen-dienový kaučuk
PSU	polysulfony
PPS	polyfenylsulfidy
PEEK	Polyetheretherketony
PI	polyimidy
PBI	polybenzimidazoly

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Lineární (vlevo) a rozvětvené řetězce (vpravo)</i>	11
<i>Obr. 2. Trubka z PP (vlevo), trubka z PE (uprostřed), trubka z PVC (vpravo) [8][9][10].....</i>	12
<i>Obr. 3. Možnosti modifikace vlastností polymerů v současné technické praxi[2]</i>	14
<i>Obr. 4. Vstřikovací stroj - 1 – uzavírací jednotka, 2 – pohyblivá upínací deska, 3 – pohyblivá část vstřikovací formy, 4 – vodící sloupy, 5 – pevná upínací deska, 6 – čelo špičky vstřikovací trysky, 7 – tavící komora, 8 – šnek, 9 – násypka pro plastový polotovar, 10 – pohonná jednotka šneku [11]</i>	17
<i>Obr. 5. Vstřikovací cyklus pro termoplasty [12]</i>	18
<i>Obr. 6. Průběh vnitřního tlaku v dutině formy [5]</i>	20
<i>Obr. 7. p-v-T diagram pro amorfní (vlevo) a semikrystalické polymery [5]</i>	20
<i>Obr. 8. Vstřikovací cyklus v p-v-T diagramu [13].....</i>	21
<i>Obr. 9. Řešení tlouštěk stěn při konstrukci výrobku [11]</i>	24
<i>Obr. 11. Příklad znečištění výrobku zdegradovaným polymerem [7]</i>	25
<i>Obr. 12. Vznik studeného spoje a vrubu v místě spoje [14]</i>	26
<i>Obr. 13. Příklad kaskádové vtokové soustavy [5]</i>	27
<i>Obr. 14. Studený spoj vzniklý obtékáním taveniny kolem jádra pro díru [14].....</i>	28
<i>Obr. 15. Bubliny na povrchu výrobku [15]</i>	29
<i>Obr. 16. Staženiny v příliš tlusté stěně [15]</i>	30
<i>Obr. 17. Deformace výrobku vzniklá při odformování [15].....</i>	31
<i>Obr. 18. Dieselefekt – spálený polymer v důsledku komprese vzduchu [15]</i>	32
<i>Obr. 19. Černé tečky na výrobku [15]</i>	33
<i>Obr. 20. Zdegradovaný materiál pocházející z plastikační jednotky [15]</i>	34
<i>Obr. 21. Propadliny na výrobku vzniklé nevhodnou konstrukcí žeber [15].....</i>	34
<i>Obr. 22. Stopy po volném proudu taveniny [15]</i>	36
<i>Obr. 23. Vliv teploty formy (TW) na lesk výrobku [15]</i>	37
<i>Obr. 24. Stříbření v důsledky nevysušeného materiálu [15]</i>	38
<i>Obr. 25. Stříbření způsobené skelnými vlákny [15].....</i>	38
<i>Obr. 26. Povrch gramofonové desky [15]</i>	39
<i>Obr. 27. Nedotečený výrobek [15].....</i>	40
<i>Obr. 28. Přetok do dělicí roviny [15]</i>	41
<i>Obr. 29. Tokové čáry [15]</i>	41

<i>Obr. 30. Analyzovaný díl</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 31. Analyzovaný díl– pohled shora</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 32. Umístění vtokového ústí.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 33. Varianta č.1</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 34. Čas plnění – varianta č. 1</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 35. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta 1</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 36. Vzduchové kapsy – varianta č. 1</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 37. Studené spoje – varianta č. 1.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 38. Propadliny – varianta č. 1.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 39. Celková deformace – varianta č. 1.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 40. Rychlost smykové deformace – varianta č. 1</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 41. Návrh varianty č. 2</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 42. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta č. 2</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 43. Studené spoje – varianta č. 2.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 44. Propadliny – varianta č. 2.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 45. Celková deformace – varianta č. 2.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 46. Rychlost smykové deformace – varianta č. 2</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 47. Efektivita odvodu tepla temperačním systémem.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 48. Teplota temperačního média – varianta č. 2.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 49. Varianta č.3</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 50. Čas plnění – varianta č. 3</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 51. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta č. 3</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 52. Vzduchové kapsy – varianta č. 3</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 53. Studené spoje – varianta č. 3.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 54. Propadliny – varianta č. 3.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 55. Celková deformace – varianta č. 3.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 56. Rychlost smykové deformace – varianta č. 3</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 57. Návrh varianty č. 4</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 58. Čas plnění – varianta č. 4</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 59. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta č. 4</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 60. Vzduchové kapsy – varianta č. 4</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 61. Studené spoje – varianta č. 4.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 62. Propadliny – varianta č. 4.....</i>	<i>63</i>

<i>Obr. 63. Celková deformace – varianta č. 4</i>	63
<i>Obr. 64. Rychlost smykové deformace – varianta č. 4</i>	64
<i>Obr. 65. Návrh varianty č. 5</i>	64
<i>Obr. 66. Čas plnění – varianta č. 5</i>	65
<i>Obr. 67. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta č. 5</i>	66
<i>Obr. 68. Vzduchové kapsy – varianta č. 5</i>	66
<i>Obr. 69. Studené spoje – varianta č. 5</i>	67
<i>Obr. 70. Propadliny – varianta č. 5</i>	67
<i>Obr. 71. Rychlost smykové deformace – varianta č. 5</i>	68
<i>Obr. 72. Efektivita chladičího okruhu – varianta č. 5</i>	68
<i>Obr. 73. Teplota temperačního média – varianta č. 5</i>	69
<i>Obr. 74. Celková deformace – varianta č. 5</i>	69
<i>Obr. 75. Čas plnění – varianta č. 6</i>	70
<i>Obr. 76. Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – varianta 6</i>	71
<i>Obr. 77. Propadliny – varianta č. 6</i>	71
<i>Obr. 78. Celková deformace – varianta č. 6</i>	72
<i>Obr. 79. Rychlost smykové deformace – varianta č. 6</i>	72

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Doporučené procesní parametry pro materiál Akulon S223 – HG0 Natl.</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 2. Procesní parametry nastavené při analýzách</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 3. Přehled navrhovaných variant</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 4. Doporučené procesní parametry pro materiál J66GF6.</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 5. Vybrané parametry z Moldflow analýzy jednotlivých variant návrhu optimalizace.....</i>	<i>74</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: DVD obsahující diplomovou práci, Moldflow analýzy