

Konstrukce a optimalizace dílu nosiče zavazadel pro motocykl

Bc. Marek Knot

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. Marek Knot
Osobní číslo:	T18710
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Konstrukce a optimalizace dílu nosiče zavazadel pro motocykl

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma
2. Provést 3D konstrukci dílu nosiče zavazadla
3. Provést analýzu procesu vstřikování a optimalizaci zadaného dílu
4. Vyhodnocení zvolených variant

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

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vydání ? Praha: BEN ? technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.

REES, Herbert. *Mold engineering*. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, c2002. ISBN 3-446-21659-6.

OSSWALD, T. A. *Injection molding handbook*. 2nd ed. Munich, Germany: Carl Hanser Publishers, 2008. 764 s. ISBN 978-3-446-40781-7.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 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

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem polymerního dílu pro uchycení nosiče zavazadel na rám motocyklu. V první teoretické části popisuje zásady navrhování výrobků vyráběných technologií vstřikování, materiály používané touto technologií, samotnou technologii a způsoby analyzování procesu vstřikování. Druhá část obsahuje samotný návrh dílu a jeho konstrukci. Pokračuje analýzou procesu vstřikování za účelem optimalizace konstrukce dílu a samotného procesu vstřikování pomocí softwaru Moldflow Synergy. Je zde vypracováno více návrhů analýz s odlišnými procesními podmínkami a způsoby chlazení, které jsou následně porovnány a zhodnoceny.

Klíčová slova: vstřikování, konstrukce silnostěnných polymerních dílů, analýza vstřikování

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of a polymer part for attaching the luggage rack to the motorcycle frame. The first theoretical part describes the principles of designing products manufactured by injection technology, the technology itself and methods of analyzing the injection process. The second part contains the design of the part itself and its construction. It continues by analyzing the injection molding process to optimize the part design and the injection molding process itself using Moldflow Synergy software. There are several proposals of analyzes with different process conditions and methods of cooling, which are then compared and evaluated.

Keywords: injection molding, construction of thick-walled polymer parts, injection molding analysis

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D za odborné vedení a pomoc při zpracování této práce. Jeho rady a připomínky především v oblasti analyzování procesu vstřikování a práci se softwarem Moldflow byli věcné a velmi prospěšné.

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

OBSAH

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 NAVRHOVÁNÍ DÍLŮ VYRÁBĚNÝCH TECHNOLOGIÍ VSTŘIKOVÁ	12
1.1 ZÁSADY PŘI NAVRHOVÁNÍ POLYMERNÍCH DÍLŮ.....	12
1.1.1 Stejná tloušťka stěn.....	12
1.1.2 Konstrukce žeber.....	13
1.1.3 Zaoblení.....	14
1.1.4 Konstrukce úchytů.....	15
1.1.5 Úkosy.....	16
1.2 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VSTŘIKOVÁNÍ.....	17
1.2.1 Rozdělení materiálů a jejich vlastnosti.....	18
1.2.2 Termoplasty.....	21
1.2.3 Plněné materiály.....	25
1.3 VADY VZNIKAJÍCÍ PŘI VSTŘIKOVÁNÍ.....	26
1.3.1 Studené spoje (weld lines).....	26
1.3.2 Spálené místa (diesel efekt).....	27
1.3.3 Propadliny (sink marks).....	28
1.3.4 Tryskový tok (jetting).....	28
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	30
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	30
2.1.1 Průběh tlaku a teploty během vstřikovacího cyklu.....	31
2.1.2 Charakteristika průběh tlaku v dutině formy pomocí p-v-T digramu.....	31
2.2 VSTŘIKOVACÍ STROJE.....	33
2.2.1 Šnekové vstřikovací stroje.....	34
2.2.2 Porovnání strojů podle pohonu – hydraulické, elektrické, hybridní.....	35
2.3 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA.....	37
2.4 VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	38
2.4.1 Vtokový systém.....	40
2.4.2 Studený vtokový systém (SVS).....	41
2.4.3 Horký vtokový systém (HVS).....	43
3 ANALÝZA PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ	44
3.1 PROGRAMOVÁNÍ CAE (COMPUTER AIDED ENGINEERING).....	44
3.2 3D MODEL VSTŘIKOVANÉHO VÝROBKU.....	45
3.3 NASTAVENÍ PARAMETRŮ ANALÝZY.....	48
3.4 VÝSLEDKY ANALÝZY.....	49
3.5 VYHODNOCENÍ ANALÝZY.....	50
3.5.1 Optimalizace procesu vstřikování.....	50

PRAKTICKÁ ČÁST	53
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	54
5 VSTŘIKOVANÁ SOUČÁST	55
6 NÁVRH VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI	59
6.1 KONSTRUKCE A TVAR SOUČÁSTI	59
6.2 VOLBA MATERIÁLU	60
6.3 PŘEDBĚŽNÉ ANALÝZY	61
6.3.1 Analýza ideálního umístění vtoku	61
6.3.2 Analýza plnění	63
6.3.3 Optimalizace analýzy plnění	65
6.4 NÁVRH UMÍSTĚNÍ VE FORMĚ	67
6.5 NÁVRH VTOKOVÉHO SYSTÉMU	68
6.6 NÁVRH TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU	70
7 NASTAVENÍ PODMÍNEK VSTŘIKOVÁNÍ	71
7.1 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE	71
7.2 PROCESNÍ PODMÍNKY	72
7.3 TEMPERAČNÍ SYSTÉM	74
8 ANALÝZA Č. 1 VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI	76
8.1 ČAS PLNĚNÍ	77
8.2 TEPLOTA TAVENINY	77
8.3 MAXIMÁLNÍ UZAVÍRACÍ SÍLA	78
8.4 ČAS POTŘEBNÝ PRO VYHAZOVÁNÍ	79
8.5 TEPLOTA TEMPERAČNÍHO OKRUHU	80
8.6 ÚČINNOST ODVODU TEPLA TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU	81
8.7 CELKOVÉ DEFORMACE VŠECH EFEKTŮ	82
8.8 PROPADLINY	84
8.9 STUDENÉ SPOJE	85
9 ANALÝZA OPTIMALIZACE VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI	87
9.1 OPTIMALIZACE TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU	87
9.2 OPTIMALIZACE KONSTRUKCE SOUČÁSTI	88
9.3 ANALÝZA OPTIMALIZOVANÉ SOUČÁSTI	90
9.3.1 Čas plnění optimalizované součásti	90
9.3.2 Maximální uzavírací síla	91
9.3.3 Účinnost odvodu tepla optimalizovaného temperačního systému	91
9.3.4 Celkové deformace všech efektů na optimalizované součásti	92
9.3.5 Propadliny na optimalizované součásti	93
9.4 ZHODNOCENÍ OPTIMALIZACE SOUČÁSTI	94

10	ANALÝZA Č. 2 VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI.....	95
10.1	VOLBA MATERIÁLU	95
10.2	PROCESNÍ PODMÍNKY PRO ANALÝZU Č. 2	96
10.3	ČAS PLNĚNÍ	97
10.4	TEPLOTA TAVENINY	98
10.5	MAXIMÁLNÍ UZAVÍRACÍ SÍLA	99
10.6	ÚČINNOST ODVODU TEPLA TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU	100
10.7	CELKOVÉ DEFORMACE VŠECH EFEKTŮ	100
10.8	PROPADLINY	101
10.9	ZHODNOCENÍ ANALÝZY Č. 2.....	101
11	ANALÝZA Č. 3 VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI.....	102
11.1	ČAS PLNĚNÍ	102
11.2	MAXIMÁLNÍ UZAVÍRACÍ SÍLA	103
11.3	ÚČINNOST ODVODU TEPLA TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU	103
11.4	CELKOVÉ DEFORMACE VŠECH EFEKTŮ	106
11.5	PROPADLINY	107
11.6	ZHODNOCENÍ ANALÝZY Č. 3.....	107
12	VYHODNOCENÍ ZVOLENÝCH VARIANT.....	108
12.1	VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ANALÝZ.....	108
12.2	OPTIMALIZOVANÁ SOUČÁST.....	109
12.3	OPTIMALIZACE TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU.....	110
	ZÁVĚR	112
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	114
	SEZNAM OBRÁZKŮ	119
	SEZNAM TABULEK.....	123

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí polymerní součásti, vyráběné technologií vstřikováním. Jedná se o součást, která má spojit nosič zavazadel na motocykl s rámem motocyklu.

Při průzkumu trhu se zavazadly a nosiči zavazadel na motocykl nelze najít nosič, který by byl použitelný na motocykl Ducati Monster modelový rok 1993 - 2007. Proto vznikl tento nosič, který se skládá z levé a pravé části rámu spojené hliníkovou plotnou. Tento nosič je pak doplněn navrhovanou součástí, která ho bude spojit s rámem motocyklu.

Konstrukce této součásti je zcela nová a ještě nikdy nebyla vyráběna. Jedná se tedy o vývoj od počátku, kdy vznikl nejprve model v softwaru Solidworks 2017 a následně prototypové součásti vyrobené technologií 3D tisku a CNC frézováním. Hlavním tématem této diplomové práce je upravit tuto prototypovou součást tak, aby bylo možné její použití v technologii vstřikování. Dále pak pomocí softwaru Moldflow Synergy 2016 provést analýzy vstřikování a na základě těchto analýz provést optimalizaci součásti a procesu vstřikování.

Každá analýza bude zhodnocena a budou popsány výsledky, zda byla optimalizace úspěšná, popřípadě jakým způsobem bude provedena další optimalizace nebo úprava součásti, k docílení lepších výsledků.

TEORETICKÁ ČÁST

1 NAVRHOVÁNÍ DÍLŮ VYRÁBĚNÝCH TECHNOLOGIÍ VSTŘIKOVÁ

1.1 Zásady při navrhování polymerních dílů

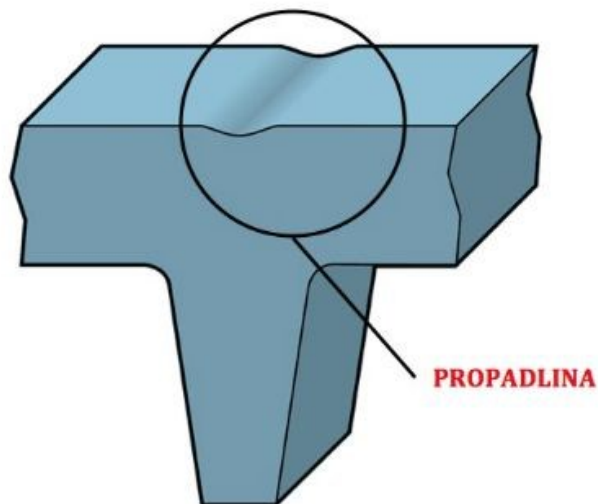
Mezi klíčové konstrukční principy, které musí konstruktér zvážit, patří tloušťka výrobku, úkosy, tvar a tloušťka žeber, zaoblení a další. Přestože konstruktér nezná v době návrhu přesný dopad na výrobu, musí tyto parametry definovat před zajištěním nástroje do materiálu, dokud jsou náklady na změny minimální.

1.1.1 Stejná tloušťka stěn

Většina plastových výrobků vyrobených technologií vstřikování jsou tenkostěnné výrobky. Tloušťky stěn mají vliv na konečný výsledek a dobu cyklu vstřikování. Tloušťka stěn a rovnoměrnost jsou dva nejdůležitější parametry. Tloušťka stěny bývá 1 – 4 mm.

Tento rozměr tloušťky stěny se volí z důvodu rychlejšího ochlazení. Zkracuje se tak doba cyklu formy a tím i celkový čas pro výrobu výrobku. Pokud dokážeme výrobek po vstříknutí rychleji ochladit na teplotu vhodnou k vyhazování, výrazně tak zkracujeme dobu cyklu a šetříme tak čas stroje, který stojí peníze a výroba je tak méně nákladná.

Druhým takovým zásadním důvodem je rovnoměrnost tloušťky stěn. Během vstřikovacího cyklu je nejdříve ochlazován povrch výrobku, tedy ta část materiálu, která je v kontaktu s dutinou formy. Pokud má výrobek stejnou tloušťku, při ochlazení se rovnoměrně smršťuje a výrobek je tak možné snadno vyjmout z formy. Pokud má však výrobek rozdílné tloušťky, roztavený střed v silnějších místech stále chladne, i když už je materiál v tenčích místech ztuhlý. Jak se materiál v silnějších místech ochlazuje, dále se smršťuje a vytváří tak na povrchu propadliny. Tato vada ukazuje na nevhodnou konstrukci výrobku, avšak pokud tato vada není příliš velká a nemá na funkci dílu vliv, lze udělat kompromis. Takové řešení je na zvážení konstruktéra. [1]



Obr. 1 – Propadliny v místech s příliš mnoho materiálem [2]

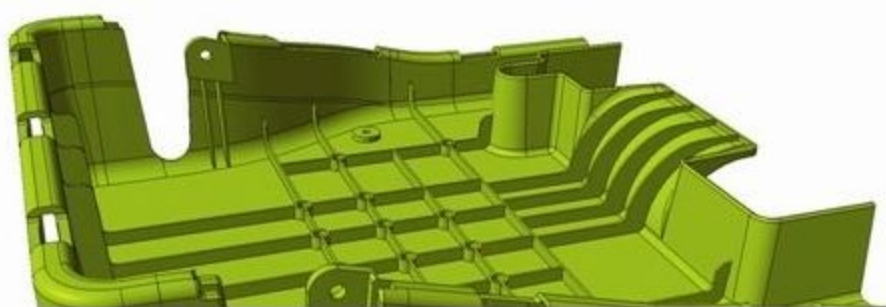
Tloušťka stěny významně ovlivňuje mnoho klíčových charakteristik plastového výrobku. Jedná se zejména o mechanickou odolnost, pocitové vlastnosti, celkový vzhled, zpracovatelnost a ekonomiku výrobku. Optimální tloušťka stěny je poté obvykle kompromisem mezi protikladnými požadavky, jako je pevnost versus hmotnost nebo trvanlivost versus náklady. Volba tloušťky stěny musí být provedena na základě kvalitně provedené rozvahy, aby byly v co možná nejvyšší míře eliminovány budoucí mnohdy velmi drahé úpravy vstříkovací formy spojené se značnými problémy při výrobě. [2]

1.1.2 Konstrukce žeber

Při návrhu žeber je důležité pamatovat na to, že jsou součástí konstrukce jen kvůli zvýšení pevnosti a nemělo by docházet ke kompromisům z důvodu estetiky výrobku. Konstrukteři obvykle při jejich návrhu postupují podle standardních metod. Je-li to možné, nemělo by docházet ke kombinaci tlustých a tenkých žeber. Zde jsou některé z nejobvyklejších konstrukčních zásad:

- tloušťka žeber by měla být mezi 60 a 80 % tloušťky stěny,
- maximální výška žebra by neměla být větší než trojnásobek tloušťky stěny - pro zvýšení pevnosti je lepší zvýšit počet žeber nežli zvětšovat jejich výšku,
- minimální vzdálenost mezi žebry by měla být dvojnásobkem nominální tloušťky stěny,
- poloměr zaoblení hran žeber by neměl být větší než 50 % tloušťky žebra,

- extrémně tlustá žebra by měla být odstraněna,
- jako nejvhodnější se jeví křížení žebor (pokud to design dovoluje), protože poskytuje větší stabilitu a umožňuje rovnoměrné rozložení napětí. [3]



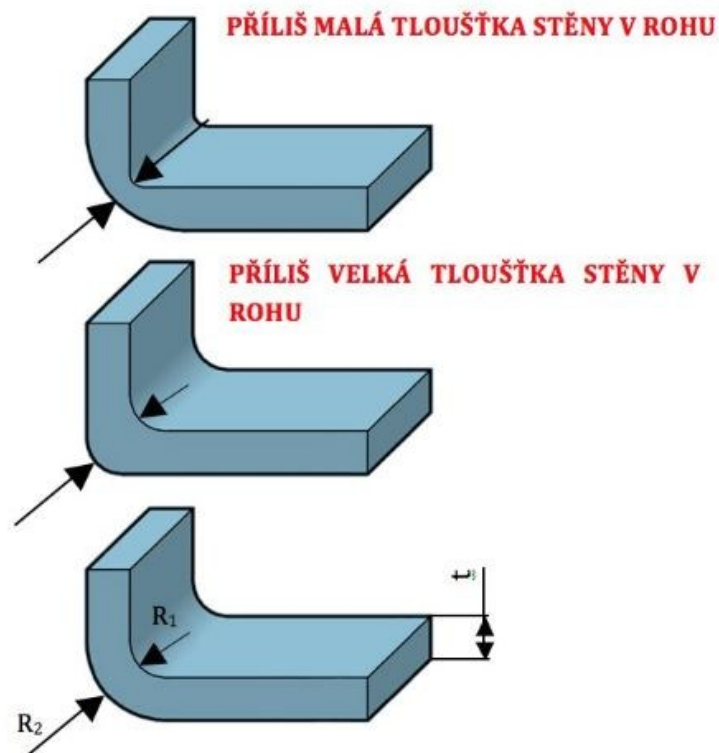
Obr. 2 – Konstrukce žebor [3]

Jednoduché rovnoběžné žebrování zvyšuje tuhost v ohybu v jednom směru, diagonální zvyšuje tuhost v ohybu a krutu. Křížové žebrování značně zvyšuje tuhost v ohybu a krutu. Ke zvýšení tuhosti a tvarové stability stěn výrobku je výhodné tyto stěny vytvořit jako prolamované. [4]

1.1.3 Zaoblení

Pro snadnější plnění tvarových dutin taveninou je výhodnější všechny změny vytvářet se zaoblením. Zaoblení snižuje odpor taveniny při toku a snižuje i napětí v místě ohybu. Zaoblení musí zajistit konstantní tloušťku stěny, nesmí dojít k hromadění materiálu. Velké množství plastových výrobků má problémy v důsledku ostrých rohů a nedostatečných poloměrů zaoblení.

Ostré rohy vytvářejí místní vnitřní pnutí, důsledkem čehož může být popraskání a předčasný rozpad plastového výrobku. Přidání zaoblení na všechny ostré rohy nejenže sníží vnitřní pnutí, ale také zlepší tečení materiálu. Obecně se dodržuje pravidlo, že na vnitřní stranu ostrého rohu se aplikuje minimální zaoblení s poloměrem rovným 0,5násobku tloušťky stěny a na vnější stranu ostrého rohu 1,5násobku tloušťky stěny výrobku, případně větší rádius, pokud to konstrukce dílu dovoluje. [4,3]



Obr. 3 – Zaoblení v rozích dílu [2]

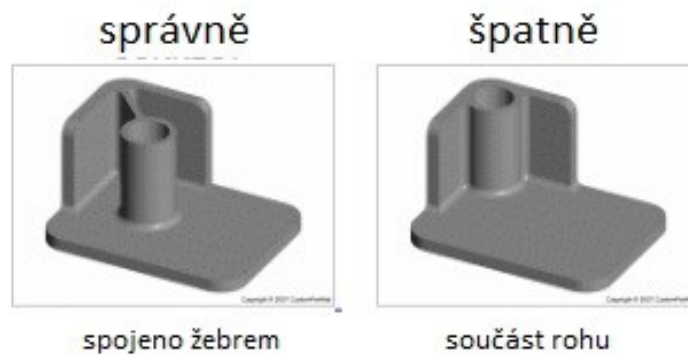
1.1.4 Konstrukce úchytů

Výrobky, které vyžadují upevňovací prvky, jako jsou například šrouby, musí obsahovat specifické úchyty. Tyto úchyty by měli mít o 60% menší tloušťku stěny, než je základní stěna. Dále jako žebra musí na základní stěnu navazovat rádiusem a měli by být podepřeny žebry. [5]



Obr. 4 – Úchyty pro upevňovací prvky [5]

Pokud potřebujeme úchyt umístit v blízkosti rohu, je třeba jej přiměřeně odsadit. Není správným řešením, aby takový úchyt byl přímo součástí rohu. Je nutné jej tedy odsadit a spojit s rohem buď to v jednom, nebo lépe ve dvou místech žebrem. [5]



Obr. 5 – Úchyty pro upevňovací prvky v rohu dílu [5]

1.1.5 Úkosy

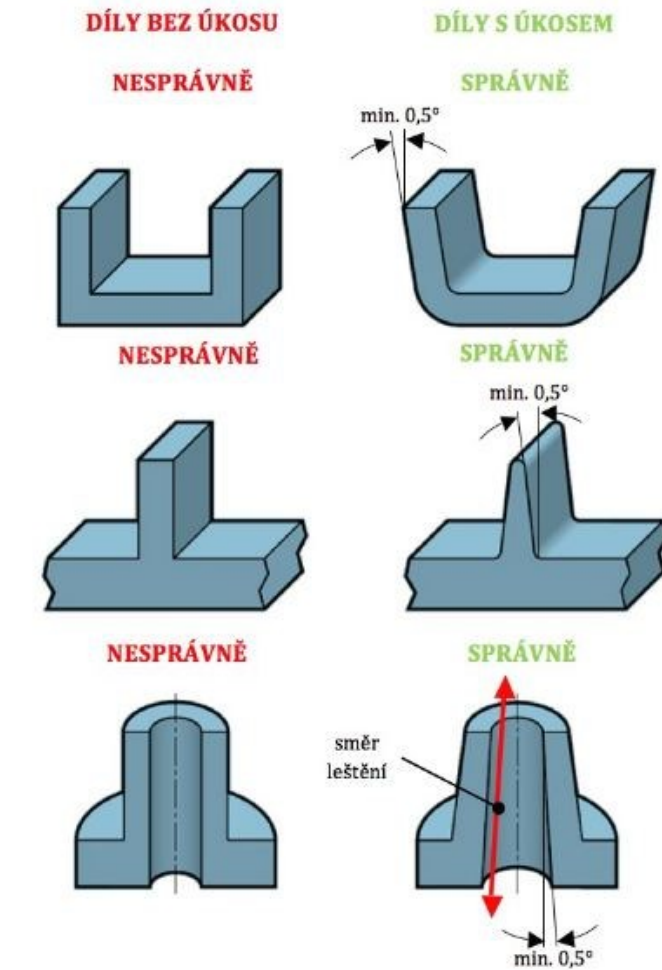
Potřeba úkosování je všeobecně známa, ale ve fázi konstrukce často opomíjena. Vypadá to jako jednoduchý problém, ale pokud není úkos aplikován ve správnou chvíli modelování dílu nebo jsou-li dodatečně vytvářena komplikovaná zaoblení, může být přidání úkosu složitým úkolem.

Úkosový úhel je důležitým technologickým parametrem, který umožňuje bez problémů vytáhnout výrobek z dutiny formy. Vysoký tlak vstříkovaného materiálu a jeho následné smrštění často způsobují obtíže při vyjímání dílu z formy. Je sice možné zaformovat díl s nulovým úkosem (nebo dokonce se záporným úkosem) za využití čelistí, vyhazovačů nebo dvoustupňového vyhazování, ale všechny tyto postupy výrazně zvyšují složitost a cenu formy.

Ačkoliv neexistuje přesné pravidlo, jaký úkos by měl odpovídat jakému modelu, existuje mnoho faktorů, které ovlivňují jeho optimální hodnotu. Obecně platí, že tenkostěnné výrobky s vysokým tlakem vstříkování potřebují větší úkos. Materiál je v tomto případě do dutiny více vtlačen. Proto díly, které nejsou vstříkovány pod vysokým tlakem, mohou mít menší úkos.

V případě hladkých povrchů je doporučen jako minimální úkosový úhel $0,5^\circ$ na každé stěně. Úkosový úhel 1° umožňuje lehké vyhození výrobku pro většinu povrchů. Přístup ke strukturovaným povrchům je odlišný, neboť nestejný povrch může při nedostateč-

ném úkosu táhnout a drhnout. Doporučovaným pravidlem je přidat ke standardnímu úkosu nejméně $1,5^\circ$ na 0,025 mm hloubky nerovnosti povrchu. [3]



Obr. 6 – Minimální úhel úkosu dílu [2]

1.2 Materiály vhodné pro vstřikování

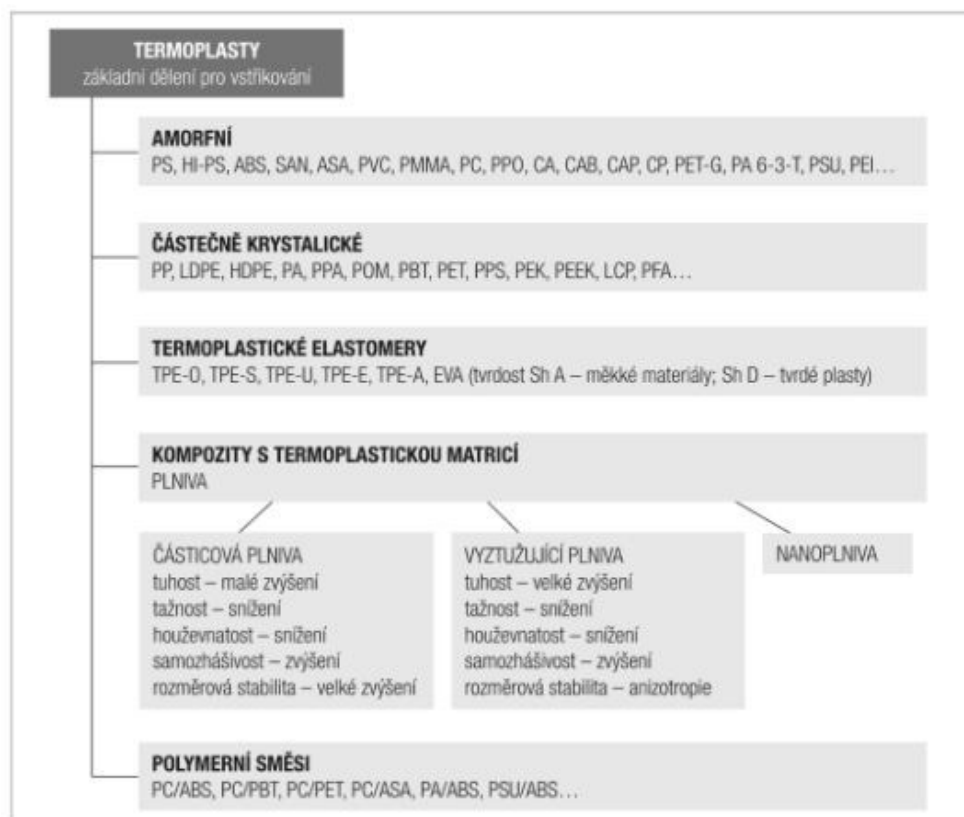
V této kapitole se budeme věnovat především materiálům, které jsou nejčastěji používané technologií vstřikování. Materiály používané pro vstřikování jsou především termoplasty. Na použitý materiál je kladen zvláštní důraz především z hlediska použití konečného výrobku. Pro namáhané výrobky použijeme určitě materiál s lepšími mechanickými vlastnostmi, než na výrobek, který není nijak namáhán. Pro zlepšení mechanických vlastností materiálu máme tzv. plněné materiály. Dále pak musíme určit materiál z hlediska toho, v jakém prostředí a jakým vlivům bude vystaven. Celkově pak můžeme na materiálu ušetřit přidáním malého procenta recyklátu.

1.2.1 Rozdělení materiálů a jejich vlastnosti

Při výběru materiálu výrobku je nutné provést základní rozhodnutí, zda pro konkrétní výrobek použijeme termoplast amorfní, částečně krystalický, termoplastický elastomer nebo materiál kompozitní s částicovým nebo vyztužujícím plnivem a termoplastickou maticí, případně některý ze speciálních typů termoplastů. [4]



Obr. 7 – Polymerní materiály – základní rozdělení [4]



Obr. 8 – Termoplasty pro výrobu vstříků – základní rozdělení [4]

Údaje o konkrétních vstřikovacích materiálech lze najít v databázích, kde jsou publikovány jejich materiálové listy a další odborná literatura s jejich vstřikováním související.

16. 3. 2020

Solvay Engineering Plastics TECHNYL STAR® AF 218 V25 BLACK 21N Polyamide 66

Distributed by  **RESINEX**
Monday, March 16, 2020

TECHNYL STAR® AF 218 V25 BLACK 21N

Solvay Engineering Plastics - Polyamide 66

Units **Action****Legend** [\(Open\)](#)**General Information****Product Description**

TECHNYL STAR® AF 218 V25 Black 21N is a polyamide 6.6, high flow, reinforced with 25% of glass fiber, heat stabilized, for injection moulding. Due to its outstanding flow characteristics, this grade shows exceptional processing behaviour and excellent surface aspect of the finished part. This grade is ideal for use in the automotive industry for engine components. This grade is ideal for Mucell® injection moulding technology.

General

Material Status	• Commercial: Active
Availability	• Africa & Middle East • Europe • North America • Asia Pacific • Latin America
Filler / Reinforcement	• Glass Fiber, 25% Filler by Weight
Additive	• Heat Stabilizer
Features	• Good Mold Release • High Flow • Heat Stabilized - Inorganic • Outstanding Surface Finish
Uses	• Automotive Applications • General Purpose • Pulleys
Agency Ratings	• EC 1907/2006 (REACH)
RoHS Compliance	• RoHS Compliant
Appearance	• Black
Forms	• Pellets
Processing Method	• Injection Molding • MuCell® Injection Molding
Resin ID (ISO 1043)	• PA66-GF25

ASTM & ISO Properties ¹

Physical	Nominal Value	Unit	Test Method
Density	1.32	g/cm ³	ISO 1183/A
Water Absorption (24 hr, 23°C)	0.90	%	ISO 62
Mechanical	Nominal Value	Unit	Test Method
Tensile Modulus (23°C)	8800	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile Stress (Break, 23°C)	150	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile Strain (Break, 23°C)	2.7	%	ISO 527-2
Impact	Nominal Value	Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength (23°C)	8.0	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy Unnotched Impact Strength (23°C)	55	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Thermal	Nominal Value	Unit	Test Method
Heat Deflection Temperature (1.8 MPa, Unannealed)	240	°C	ISO 75-2/Af
Melting Temperature	263	°C	ISO 11357-3

Processing Information

Injection	Nominal Value	Unit
Drying Temperature	80	°C
Suggested Max Moisture	0.20	%
Rear Temperature	265 to 275	°C
Middle Temperature	270 to 280	°C
Front Temperature	280 to 290	°C
Mold Temperature	60 to 90	°C

Injection Notes

The material is supplied in airtight bags, ready for use. In case that the virgin material has absorbed moisture, it must be dried with a dehumidified air drying equipment, dew point mini -20°C. Recommended time 2-4h

Injection Advice:

- For reinforced polyamides, Solvay recommends the use of steel with a high content of carbon, and purified for polishing, to avoid or limit the abrasion. For example: X38CrMoV5-1 (EN Norm) - 1.2367 / 1.2343 (DIN Norm) or X160CrMoV12 (EN Norm) - 1.2601 / 1.2379 (DIN Norm). In the case of high requirements on surface quality a mould temperature of up to 120°C can be considered.
- The processing parameters like processing temperatures are a recommendation and can be adjusted in function of injection machine size, part geometry / design

catalog.ides.com/Datasheet.aspx?l=26793&E=217124

1/2

Obr. 9 – Materiálový list PA 66 plněný 25 % skelným vláknem firmy Resinex [9]

Materiálový list PA 6 XT

Vlastnosti použitých materiálů ¹⁾	Norma	Jednotka	PA 6 XT natur
I. Všeobecné vlastnosti			
1. Hustota (ρ)	ISO 1183	g/cm ³	1,13
2a. Nasákavost (voda)	ISO 62	%	9,5
2b. Nasákavost (vzdušná vlhkost)	ISO 62	%	2,8
3a. Trvalá pracovní teplota (bez většího mech. namáhání) - horní mezní hodnota	UL 746B	°C	100
3b. Trvalá pracovní teplota (bez většího mech. namáhání) - dolní mezní hodnota		°C	-40
II. Mechanické vlastnosti			
1. Tahové napětí na hranici pružnosti (σ_s)	ISO 527	MPa	80
2. Tažnost (ϵ_s)	ISO 527	%	10
3. Mez pevnosti v tahu (σ_R)	ISO 527	MPa	54
4. Protažení při přetržení (ϵ_R)	ISO 527	%	> 50
5. Rázová houževnatost (α_K)	ISO 179	kJ/m ²	o.B.
6. Vrubová houževnatost (α_K)	ISO 179	kJ/m ²	7
7. Tvrdost (H_k) dle Rockwella	ISO 2039	MPa	155
8. Shore-D	ISO 868	-	80
9. Pevnost v ohybu ($\sigma_{B,3,5\%}$)	ISO 178	MPa	100
10. Modul pružnosti (E_t)	ISO 527	MPa	3330
III. Tepelné vlastnosti ⁹⁾			
1. Teplota měknutí dle VICATA VST/B/50	ISO 306	°C	-
		°C	204
2. Teplotní tvarová stálost HDT/B	ISO 75	°C	190
		°C	75
3. Koefficient délkové roztažnosti (α)	ISO 11359	K ⁻¹ x 10 ⁻⁴	1,1
4. Tepelná vodivost při 20°C (λ)	ISO 22007-4	W/(m x K)	0,32
5. Teplota skelného přechodu (T_g)	DIN EN ISO 3146	°C	60
6. Teplota tání (T_m)	DIN EN ISO 3146	°C	220
IV. Elektrické vlastnosti			
1. Specifický vnitřní odpor (ρ_D) ⁸⁾	IEC 60093	$\Omega \times \text{cm}$	$3 \cdot 10^{13}$
2. Povrchový odpor (R_s) ⁸⁾	IEC 60093	Ω	$\geq 10^{13}$
3. Permittivita při 1 Mhz (ϵ_R) ⁹⁾	IEC 60250		3,7
4. Dieľ. ztrátový činitel při 1 Mhz ($\tan\delta$) ⁹⁾	IEC 60250		0,03
5. Průrazná pevnost ⁹⁾	IEC 60243-1	kV/mm	30
6. Izolační odpor ⁹⁾	IEC 60112	V	CTI 600
V. Ostatní vlastnosti			
1. Možnost lepení			+
2. Fyziologická nezávadnost ⁵⁾⁹⁾	EEC		+
	FDA		+
3a. Hořlavost/chování při požáru ⁹⁾	UL 94	-	HB ¹⁾
3b. Limitní kyslíkové číslo (LOI) ⁹⁾	ASTM D2863	%	23
4. Odolnost proti UV ⁶⁾⁹⁾			-

Tel.: + 420 569 720 764
+ 420 569 731 360

email: akplast@akplast.cz
http://www.akplast.cz

IČO: 62063804
DIČ: CZ62063804

Společnost je zapsána u rejstříkového soudu v Hradci Králové pod sp. zn. C7483.

Obr. 10 – Materiálový list PA 6 od firmy AKPLAST [8]

Zde jsou příklady dvou materiálových listů od dvou tuzemských firem, které se zabývají výrobou těchto polymerů. Je nutné zmínit, že každá taková firma, i když na stejný poly-

mer, vydává vlastní materiálové listy. Je to z toho důvodu, že může dojít během výroby k odlišnostem ať už z jakéhokoliv důvodu a tím i k odlišným vlastnostem materiálu.

Vlastnosti každého materiálu pak každá firma měří dle daných norem, která musí být u každé vlastnosti polymeru uvedena. V materiálových listech konkrétních termoplastů lze nalézt i hodnotu výrobního smrštění, respektive anizotropní hodnoty smrštění podél a napříč toku polymerní taveniny v tvarové dutině formy.

Velkou roli v rozměrové přesnosti výstřiků z termoplastů hraje anizotropie rozměrových změn. Anizotropie neboli směrová rozdílnost změn je způsobena především orientací makromolekul a plniva (zejména vláknitého), včetně krystalických útvarů u částečně krystalických termoplastů. U neplněných termoplastů existuje vlivem orientace makromolekul rozdíl mezi smrštěním podélným (ve směru toku taveniny) a smrštěním příčným (ve směru kolmém k toku taveniny). Vzhledem řadě působících vlivů a vlastnostem jednotlivých termoplastů nelze obecně říci, které smrštění bude větší a které menší. Rozdíly ve směrovém smrštění bývají menší u amorfních termoplastů (5 až 10 %), větší u částečně krystalických termoplastů (10 až 25 %). [4]

1.2.2 Termoplasty

Většina termoplastů je vyrobena z ropy a má jedinečnou fyzikální vlastnost, že se můžou roztavit, nechat ztuhnout a následně znovu roztavit, aniž by se významně změnila jejich chemická struktura (za předpokladu, že jsou udržovány čisté a nekontaminované). Pomletím nebo rozdrcením ztuhlého termoplastu lze materiál obvykle znovu použít, s nebo bez smíchání s novým (ještě nezpracovaným) materiálem.

V závislosti na tom, kolikrát a za jakých podmínek byl termoplastický materiál roztaven a ztuhnout (tepelná historie), mohou být některé jeho vlastnosti sníženy. Výsledkem je, že většina termoplastů, které se znovu používají (označují se jako recyklát), se mísí s novým materiálem, kde recyklát představuje méně než 50 % výsledné směsi. Existují však případy, kdy se plastové výrobky vyrábí ze 100 % recyklátu. To jsou případy, kdy mechanické nebo kosmetické vlastnosti výsledných částí nejsou prioritní. [6]

laboratorní misky a další. PS se však velmi pomalu rozkládá, zejména pak ve formě pěny, a je zdrojem znečištění. [7]

- 2) Akrylonitril-butadien-styren (ABS) – má široké uplatnění ve spotřebitelském a automobilovém průmyslu. ABS je známý svou pevností a houževnatostí. Používá se k výrobě motocyklových přileb, telefonů a počítačů. Je také nejčastěji používaným materiálem při 3D tisku. [7]
- 3) Polykarbonát (PC) – Polykarbonát je tvrdý, tuhý polymer, který je nejlépe známý svou průhledností a odolností. Obvykle se používá k výrobě součástí pro okna, ochranné pomůcky a brýle. [7]
- 4) Polyvinylchlorid (PVC) – Polyvinylchlorid (PVC nebo vinyl) je ekonomický a všestranný termoplastický polymer široce používaný ve stavebnictví a k výrobě dveřních a okenních profilů, trubek (vodovodních, odpadních, atd.), izolace vodičů a kabelů, zdravotnických prostředků atd. Jedná se o třetí nejvíce rozšířený termoplastický materiál na světě objemově po polyethylen (PE) a polypropylen (PP). [10]

b) Semikrystalické termoplasty

Mezi významné znaky semikrystalických termoplastů (např. PE, PP, PA, POM, PBT a další) patří jejich schopnost vytvářet z taveniny krystalickou strukturu. Obsah krystalického podílu může dosáhnout až 80 % v závislosti na chemické stavbě polymeru a technologických podmínkách vstřikování. Polyamid (PA), může mít obsah krystalického podílu 15 až 40 %, u lineárního PE 50 až 65 %, u PP 50 až 60 % a u POM 65 až 80 %.

Tato skutečnost má za následek větší smrštění výrobků proti formě, které se pohybuje od 1 do 2,5 %. Výrobky ze standardních částečně krystalických polymerů v důsledku tvorby sférolitické struktury nemohou být transparentní jako polymery amorfni. Jejich vlastnosti (zejména tuhost, pevnost a houževnatost) jsou závislé na obsahu krystalického podílu, a proto je výrazně ovlivňuje fáze ochlazování (z technologických parametrů tedy především teplota formy). Teplota T_g je z hlediska procesu vstřikování u semikrystalických polymerů málo významná. Dominantní teplotou pro tyto polymery je teplota bodu tání krystalického podílu (T_m). Až do této teploty si výrobky zachovávají určitou pevnost a tuhost a nebortí se, nad touto teplotou je oblast taveniny (viskózně tekutý stav), v níž probíhá proces vstřikování.

Dominantní aplikační oblastí těchto polymerů jsou technické výrobky více či méně mechanicky namáhané. Největší podíl připadá na různě modifikovaný PP, PA, PET, PBT a POM. [11]



Obr. 12 – Semikrystalické termoplasty: 1 – polyformaldehyd POM; 2 – polyamidy PA 6, PA 6,6; 3 – polypropylen a kopolymery PP; 4 – polyetyleny PE [11]

Nejčastěji používané semikrystalické termoplasty:

- 1) Polypropylen (PP) – Polypropylen je měkký, pružný a lehký polymer. Protože se při vystavení chemickým látkám, vodě nebo kyselinám nedegraduje, běžně se používá v čistících zařízeních, autobateriích a při balení roztoků. [7]
- 2) Nízkohustotní polyetylen (LDPE, LLDPE) – Polyetylen s nízkou hustotou má dobrou rovnováhu mezi flexibilitou, pevností, bariérovými vlastnostmi a náklady a může mít širokou kombinaci vlastností. Polyetylen o nízké hustotě má vysokou čitelnost, je chemicky inertní a má dobrou rázovou pevnost a vynikající odolnost proti roztržení a praskání. Polyetylen s nízkou hustotou (LDPE) má uplatnění ve sterilních blistrech pro balení léčiv. Lineární nízkohustotní polyetylen (LLDPE) se používá ve fóliích a obalech díky své pružnosti a houževnatosti. [12]
- 3) Vysokohustotní polyetylen (HDPE) – Polyetylen o vysoké hustotě je obvykle průsvitný a méně pružný než LDPE. Díky své vyšší krystaličnosti má lepší chemickou odolnost, tuhost a pevnost než LDPE. Chirurgické a lékařské nástroje používají

v drtivé většině HDPE. Stejně jako LDPE vykazuje HDPE dobrou odolnost proti chemickým a napěťovým trhlinám, odolnost vůči záření a rázovou pevnost. Polyethylen o vysoké hustotě je široce používán pro výrobu lékařských hadiček a katetrů pro jeho nízké náklady, nízké tření, chemická odolnost a snadnou formovatelnost. Je konkurentem pro PVC. [12]

- 4) Polyamid (PA6, PA66) – Známy taky jako Nylon je další univerzální plast používaný v mnoha průmyslových odvětvích, včetně lékařského, automobilového, průmyslového a spotřebního. Je známo, že je odolný proti opotřebení a je stabilní při vystavení vysokým teplotám nebo chemikáliím.

Zatímco Polyamid 6 a 66 jsou velmi podobné materiály, poskytují mírně odlišné vlastnosti. Důvodem rozdílů je především jejich rozdíl v chemické struktuře. Polyamid 6 je vyroben z jednoho monomeru, který má 6 atomů uhlíku, zatímco Polyamid 66 je vyroben ze 2 monomerů, z nichž má každý 6 atomů uhlíku, tedy název Polyamid 66. Důležitým rozdílem mezi polyamid 6 a 66 je ve smršťování. Menší smrštění Polyamidu 6 zajišťuje vyšší přesnost konečných rozměrů součástí, což je výhodné. Zatímco větší smrštění Polyamidu 66 má za následek větší deformace, tudíž i větší nepřesnost v konečných rozměrech. Znamená to, že se tvar materiálu po zpracování se více mění, což je nutno zohlednit. Další klíčové rozdíly mezi těmito dvěma Polyamidy jsou rychlost absorpce vody a odvod tepla. Protože Polyamid 6 absorbuje více vody než Polyamid 66 a má nižší rozmezí teplotní použitelnosti, není vhodný pro aplikace, které jsou vystaveny vodě při vysokých teplotách. Polyamid 66 by byl lepší volbou mezi nimi. [7,13]

1.2.3 Plněné materiály

Termoplasty, plněné minerálními plnivými (krátkými nebo dlouhými vlákny), mají díky netavitelnému podílu anorganického materiálu v plastickém stavu větší vnitřní tření taveniny, než neplněné plasty. Ke vstřikování jsou nezbytné teploty nejméně o 10 °C vyšší. Rovněž tlaky, teplota formy a rychlost vstřikování jsou doporučovány vyšší, neboť taveniny plněných termoplastů rychle tuhnou a nedoporučuje se vyrábět díly s tloušťkou menší, než 2 mm. Délky šneků se doporučují v poměru 26 D.

V současné době se začínají prosazovat plněné plasty dlouhými vlákny (10 až 12 mm), což výrazně zvyšuje tuhost vyráběných dílů a s tím spojené i ostatní výhody, které přinášejí

dlouhá vlákna. Při zpracování (plastikaci) sice dochází k rozlámání granulí, ale i přes tento nedostatek jsou výsledná vlákna mnohem delší, než u materiálu s krátkými vlákny (zhruba desetkrát). Plastikace se musí provádět velmi šetrně speciálně upraveným šnekem, který se může otáčet oběma směry. [14]

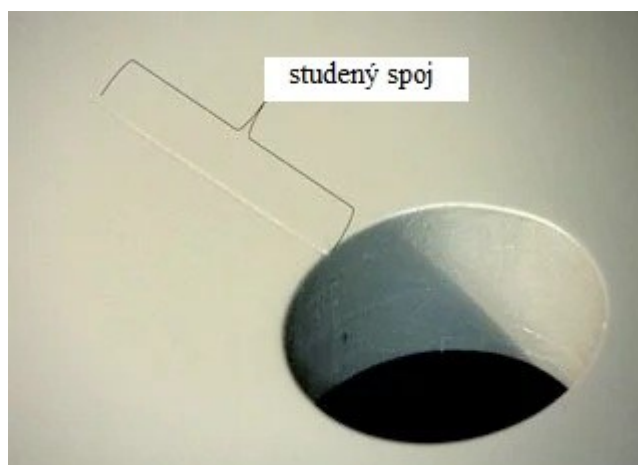
1.3 Vady vznikající při vstřikování

Problémy s kvalitou u vstřikovaných výrobků se mohou pohybovat od drobných povrchových vad až po závažnější problémy, které mohou ovlivnit bezpečnost, výkon a funkci výrobku. Mohou být způsobeny problémy souvisejícími s procesem formování, použitím materiálu, konstrukcí nástrojů nebo kombinací všech tří.

Některé formovací vady mohou být obtížné nebo nákladné řešit. Jiným lze zabránit úpravou formovacího procesu, aniž by bylo nutné přepracovávat nástrojové vybavení formy nebo vyměňovat jiné výrobní zařízení. Obvykle se těmto defektům můžete vyhnout relativně snadno jednoduše úpravou průtoku, teploty nebo tlaku ve formě. [30]

1.3.1 Studené spoje (weld lines)

Studené spoje se mohou objevit na povrchu tvarované součásti, kde roztavený materiál konvergoval po rozdělení do dvou nebo více směrů ve formě. Vlasová svarová linie je výsledkem spojení dvou nebo více proudů taveniny, což snižuje pevnost součásti. [30]



Obr. 13 – Studený spoj [30]

Tyto dva proudy, které například obtékají jádro, se jednoduše nepromísí. Příčinou tak může být nízká teplota formy, malá rychlost taveniny, nízká tekutost taveniny, nebo nízký tlak. Úpravou těchto parametrů můžeme velmi jednoduše eliminovat tuto vadu.

1.3.2 Spálené místa (diesel efekt)

Vstřikování termoplastů vyžaduje, aby byl materiál roztaven teplem a poté vstřikován do uzavřené dutiny formy při vysokém tlaku a rychlosti. Když vstupuje do dutiny, musí tavenina vytlačovat plyny zachycené uvnitř dutiny v době uzavření formy. Pokud tyto plyny nejsou vytlačeny z dutiny, mohou se náhle stlačit mezi 2 a 5% původního objemu, což způsobí další vysoký tlak uvnitř dutiny. Tento vysoký tlak zvyšuje teploty výrazně nad teploty vhodné pro proces vstřikování. Tyto zvýšené teploty způsobují lokální vznícení (dieselový efekt) termoplastické taveniny a spalování formovaných výrobků. [31]



Obr. 14 – Spálená místa na výrobku (diesel efekt) [31]

Únik plynů z dutiny formy je umožněn odvzdušňovacím systémem. Odvzdušňovací systém je tvořen mezerami v dělicích rovinách dutin, dělicími liniemi pro vložení dutin formy, vyhazovací kolíky, vyhazovací kroužky, slinuté pórovité vložky nebo speciální aktivní ventilační systémy jako logické těsnění (podtlak chladicí kapaliny), odvětrání forem, vakuové ventilační systémy dutin a další.

Odvzdušňování je však obvykle méně důležitým aspektem konstrukce formy, která je často zanedbávána, dokud formovací pokusy neukazují nedostatky formy související s odvětráváním. Pochopení účelu a funkce větracích otvorů může konstruktérovi formy pomoci navrhnout větrací otvory, pokud je to nezbytně nutné, a zajistit, aby forma mohla v případě potřeby pojmout další větrací otvory. [31]

1.3.3 Propadliny (sink marks)

Propadliny jsou malé vybrání nebo prohlubně v jinak rovném a konzistentním povrchu vstříkované součásti. K této vadě může dojít, když se vnitřní část tvarovaného dílu zmenší a vtahuje materiál z vnějšku dovnitř. [30]

K propadlinám dochází, protože tlustší vrstva materiálu se ochlazuje pomaleji než tenčí. To znamená, že silnější vrstva materiálu si udrží teplo déle než ta tenčí. Pokud se tloušťka stěny náhle změní na silnější průřez, například v rohu kde se obě stěny setkají, bude se i nadále chladit a smršťovat delší dobu po tenčích stěnách. To způsobí, že se materiál v tlustší oblasti vtáhne do místa, kde je materiál stále teplý. V závislosti na závažnosti rozdílu v tloušťce může být umyvadlo docela malé nebo by mohlo v dané části vytvořit mezeru. [32]

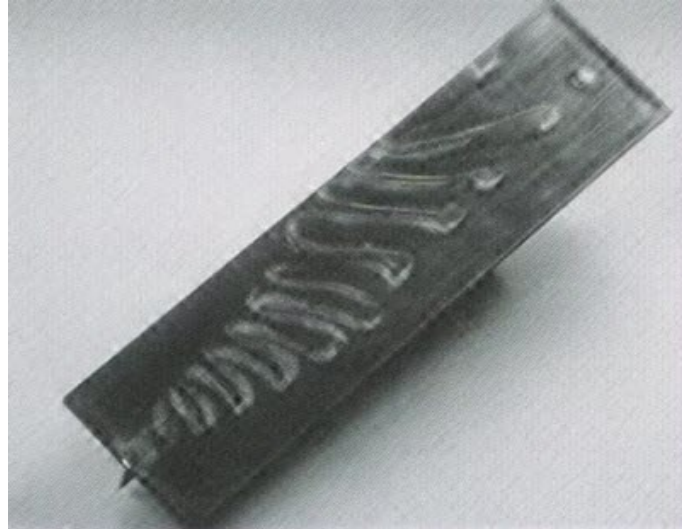


Obr. 15 – Místa s propadlinami [30]

1.3.4 Tryskový tok (jetting)

K tryskovému toku dochází, když je tavenina polymeru tlačena vysokou rychlostí přes restriční oblasti, jako je tryska, do otevřených, silnějších oblastí, aniž by došlo ke kontaktu se stěnou formy. Prasklý proud s tryskajícím proudem taveniny způsobuje, že se mezi záhyby taveniny v proudu vytvářejí kontaktní body, čímž se vytvářejí malé svary.

Aby nedocházelo k tryskání, je třeba změnit geometrii formy a podmínky procesu, aby se navodil laminární tok uvnitř dutiny formy. Po opuštění vtokového ústí by se měla tavenina postupně rozvíjet, než aby jej opouštěla jako nekontrolovatelný proud. [33]



Obr. 16 – Tryskový tok [30]

Pomůže snížení celkové rychlosti vstřikování. Nejlepším přístupem je však profilovat rychlost od pomalého k rychlému, nejprve vytvořit laminární tok, ale stále co nejrychleji vyplnit dutinu. Další možností je zvýšení teploty taveniny. [33]

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování plastů je pravděpodobně jednou z nejdůležitějších metod zpracování polymerů, která představuje přibližně jednu třetinu zpracovaných termoplastů, a byla zařazena na první místo z hlediska celkové hodnoty produktu, počtu vyrobených a prodaných strojů a celkového počtu pracovních míst. [15]

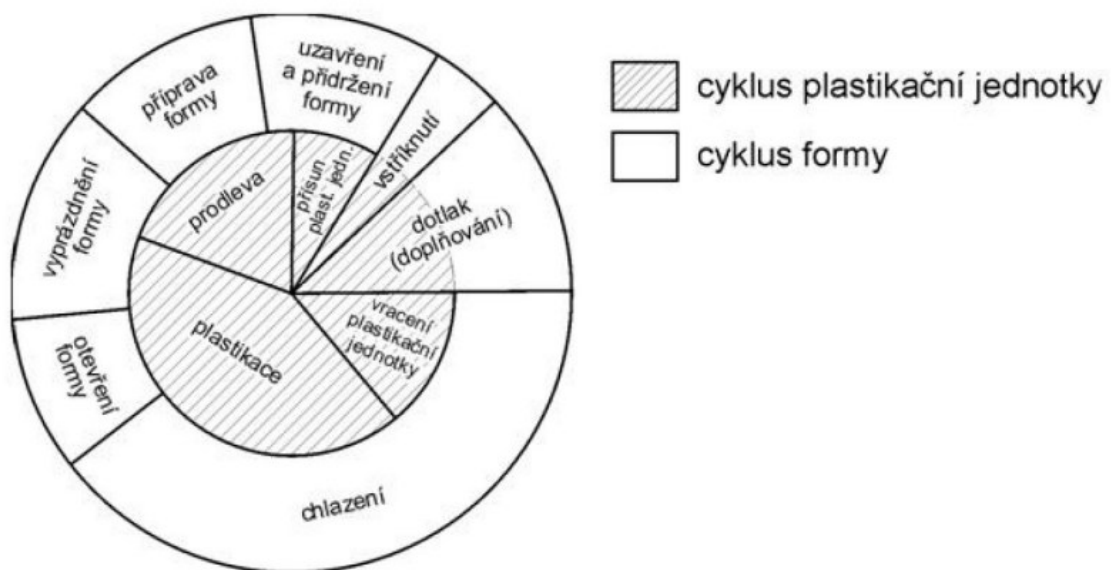
Vstřikování je výrobní proces pro výrobu dílů z termoplastických materiálů. Vstřikovací stroj používaný v této technologii lze rozdělit na dvě poloviny: vstřikovací jednotku, kde je materiál připraven pro vstřikování do formy, a pevnou jednotku, kde je vstřikovaný plast zachycen ve formě za podmínek teploty a tlaku, aby se vytvořil hotový produkt. [16]

2.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus tvoří sled přesně specifikovaných postupných kroků, fází, které se svou činností podílí na výrobě vstřikovaných dílů. Vstřikovací cyklus je proces, během kterého plast prochází teplotním a tlakovým cyklem.

Pro popis vstřikovacího cyklu je nutné jednoznačně definovat jeho počátek. Za počátek vstřikovacího cyklu lze např. s výhodou považovat okamžik odpovídající impulsu k uzavření vstřikovací formy.

Tento cyklus lze zaznamenat graficky v koláčovém grafu:



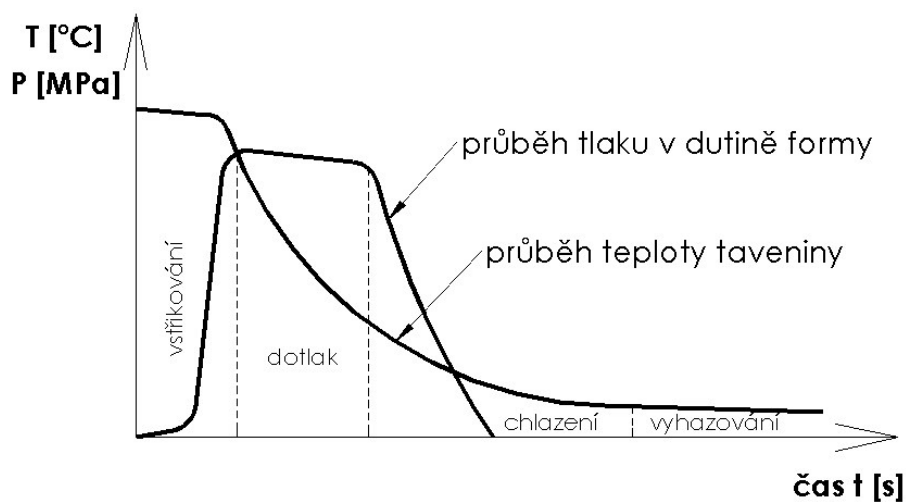
Obr. 17 – Vstřikovací cyklus [23]

Vstřikovací cyklus tvoří sled přesně specifikovaných úkonů. Jedná se o proces neizotermický, během něhož plast prochází teplotním cyklem.

2.1.1 Průběh tlaku a teploty během vstřikovacího cyklu

Vstřikovací cyklus se dá popsat i jako průběh tlaku uvnitř formy. Během vstřikování dochází k prudkému narůstání tlaku. Jakmile je dutina formy zaplněna, je přepnuto na fázi dotlaku, na které stroj setrvá určitou dobu, nezbytně nutnou pro doplnění materiálu. Následně vstřikovací jednotka odjíždí od formy, tlak klesá a nastává fáze chlazení.

Během toho cyklu je cílem řídit teplotu taveniny. Ideální je během samotného vstřikování udržet teplotu na vstřikovací teplotě, a jakmile je forma vyplněna taveninou a cyklus přejde do fáze dotlaku nastává řízené chlazení až na teplotu vyhazování, která zajistí bezpečné vyhození výrobku, aniž by došlo k jeho poškození.



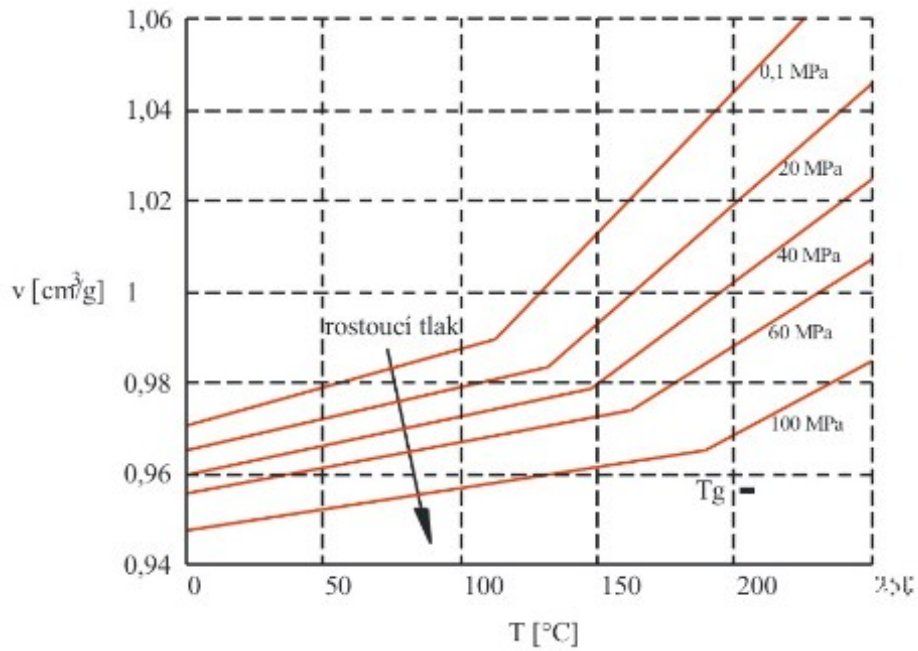
Obr. 18 – Průběh tlaku v dutině formy a teploty taveniny během vstřikovacího cyklu

2.1.2 Charakteristika průběh tlaku v dutině formy pomocí p-v-T digramu

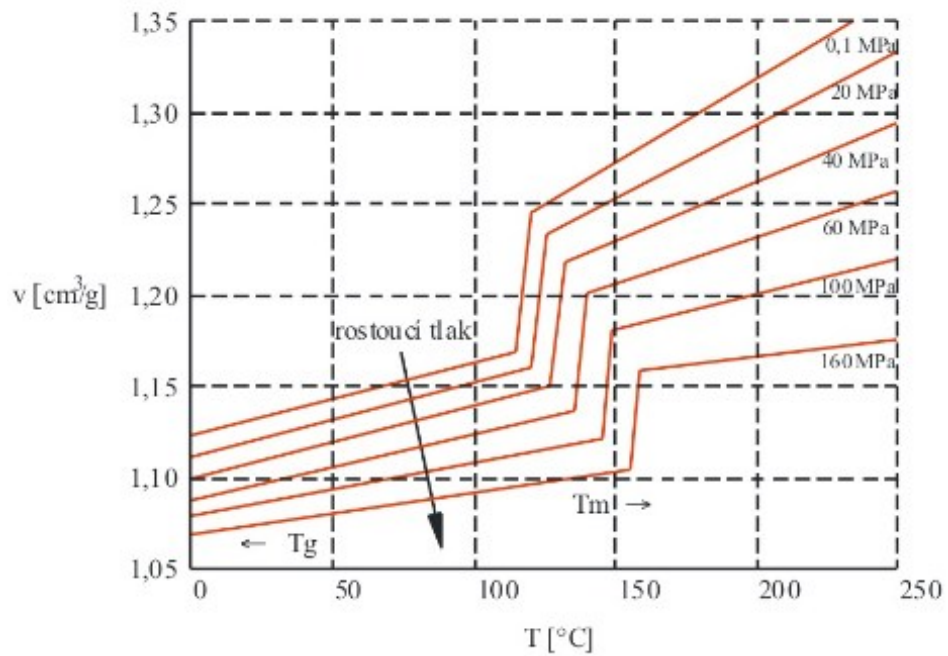
Kromě popisu vstřikovacího cyklu pomocí závislosti vstřikovacího tlaku na čase můžeme vstřikovací cyklus popsat také pomocí stavových termodynamických veličin, tj. tlaku p , měrného objemu v (převrácená hodnota hustoty) a teploty hmoty T .

Průběh stavových veličin je v různých místech výstřiku odlišný a je ovlivněn zvoleným polymerem, tvarem výrobku a tloušťkou stěn, vstřikovacím tlakem a dotlakem, vstřikovací rychlostí, teplotou taveniny a teplotou formy. Změny stavových veličin potom přímo určují vznik struktury a ovlivňují hmotnost a rozměry výrobku. Řízení vstřikovacího cyklu po-

mocí diagramu $p - v - T$ patří k moderním metodám zpracování termoplastů a je aplikován u současných strojů, řízených mikroprocesory. [24]



Obr. 19 – Diagram $p-v-T$ pro amorfni termoplast [24]



Obr. 20 – Diagram $p-v-T$ pro semikrystalický termoplast [24]

2.2 Vstřikovací stroje

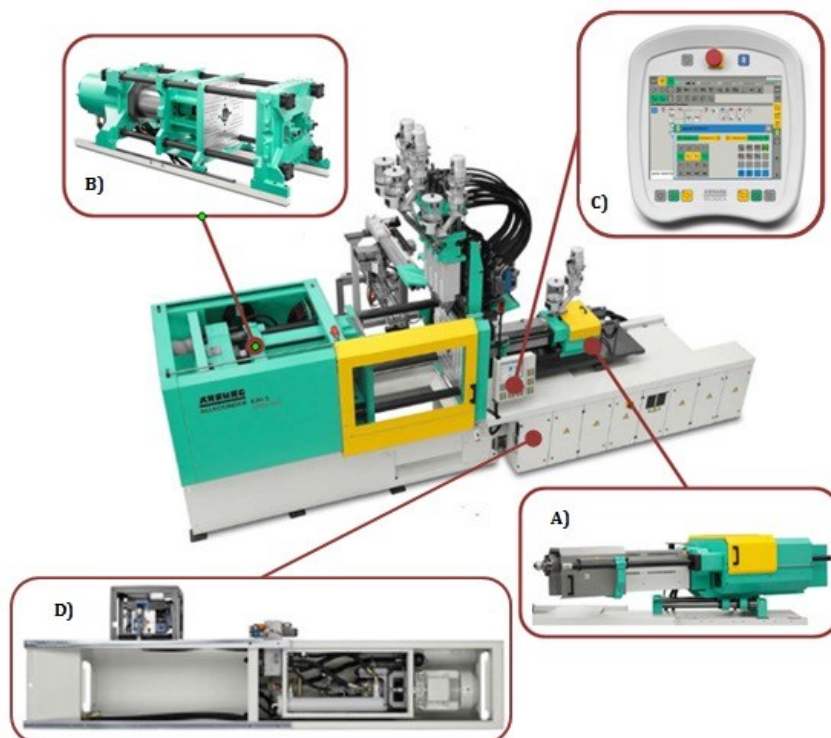
Vstřikovací stroje (VS), jsou primárně určeny pro zpracování polymerních materiálů, především v podobě granulí. Polymery a směsi rovněž mohou být dodávány ve formě prášku či hmoty těstovinové konzistence. Na těchto strojích lze zpracovávat i kapalinné systémy. Vstřikovací stroje je možné dělit do skupin dle různých kritérií:

- dle pohonu zajišťující pohyb v hlavních osách stroje (posuvy vstřikovací a uzavírací jednotky) - tyto pohony tvoří hydraulické motory (hydraulické vstřikovací stroje) nebo elektrické motory (elektrické vstřikovací stroje). Existují i hybridní vstřikovací stroje, které kombinují přednosti obou typů pohonů.
- dle pracovního členu v tavicí komoře vstřikovací jednotky - dělení na pístové vstřikovací stroje a šnekové vstřikovací stroje.
- dle směru posuvu pohyblivé desky uzavírací jednotky bez ohledu na pozici vstřikovací jednotky - pokud se deska pohybuje v horizontální rovině (zleva doprava či naopak), tak jde o horizontálně orientované vstřikovací stroje, zatímco co u vertikálních vstřikovacích strojů se upínací deska uzavírací jednotky pohybuje shora dolů či naopak.
- dle typu zpracovávaného plastu - dělení na vstřikovací stroje pro zpracování termoplastů, reaktoplastů či kaučuků.
- dle počtu desek uzavírací jednotky (dvoudeskové a třideskové)
- dle počtu šneků (jednošnekové, vícešnekové)
- dle rychlosti otáček šneku (rychloběžné, pomaloběžné)
- dle použití předplastikace ve vstřikovací jednotce (bez předplastikace, s předplastikací)
- dle počtu vodících tyčí uzavírací jednotky (bez vodících tyčí nebo také bezsloupkové, se dvěma vodícími tyčemi nebo se čtyřmi vodícími tyčemi)
- dle maximální síly, kterou je uzavírací jednotka schopna vyvinout (malé VS do 500 kN = 50 tun, střední VS 500 až 5000 kN = 50 až 500 tun a velké VS nad 5000 kN = 500 tun; v praxi se běžně používá spíše označení v tunách). [25]

2.2.1 Šnekové vstřikovací stroje

Základní koncept konstrukce šnekových vstřikovacích strojů je zachycen na obrázku 17. Jsou zde znázorněné základní jednotky a jejich rozmístění na rámu stroje. Konkrétně jde o vstřikovací jednotku, uzavírací jednotku, řídicí a kontrolní jednotku. Pro jednoznačné určení a popis daného konstrukčního řešení se užívá orientace uzavírací jednotky, přičemž nejběžnější jsou vstřikovací stroje s horizontálně orientovanou uzavírací jednotkou, což je i varianta zachycená na obrázku 17. Při používání více vstřikovacích jednotek na jednom stroji je možné se sekat i se vstřikovací jednotkou orientovanou pod úhlem, nejčastěji 45°. Existují i konstrukční řešení vstřikovacích strojů, kde je možné polohu a orientaci vstřikovací a uzavírací jednotky měnit.

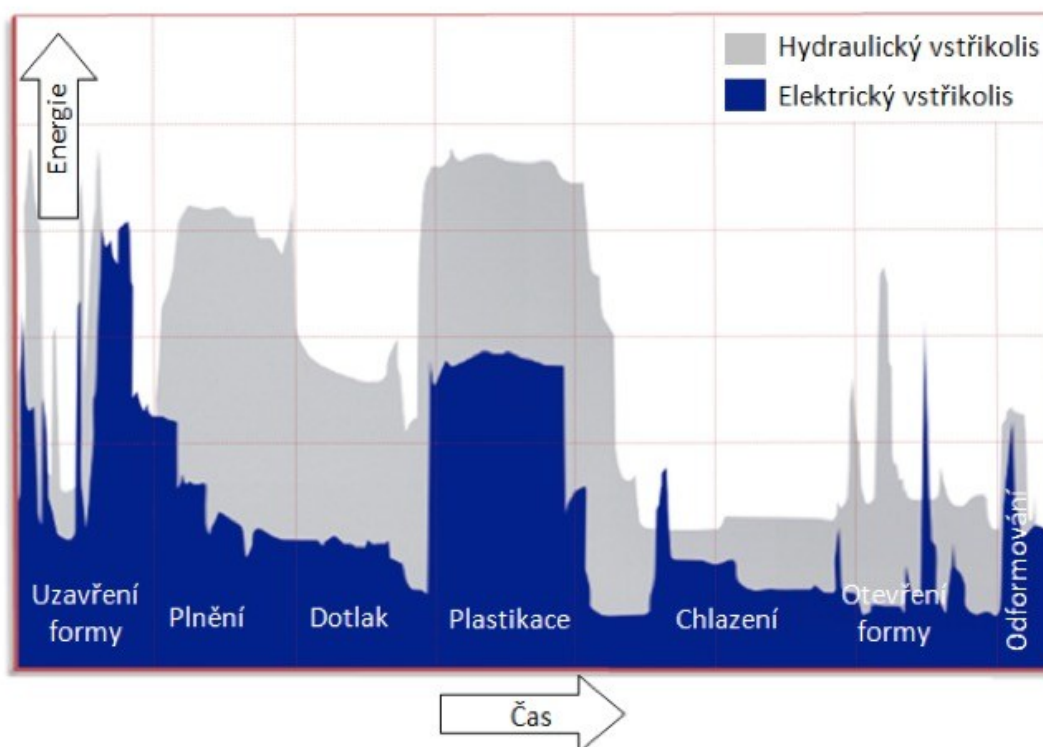
Vzhledem k velkému množství typů polymerů, které lze pomocí technologie injekčního vstřikování zpracovávat, dochází ke stále vyšším nárokům na složitost i rozměry výrobků a energetické úspory. Výrobci vstřikovacích strojů nabízejí velké množství různých typů strojů rozmanitých velikostí a modelů, ať už úzce specifikované pro konkrétní aplikace, nebo stroje modulární konstrukce, které vzhledem ke svému „stavebnicovému“ řešení lze snadno přestavovat a upravovat dle požadavků zpracovatele polymerních materiálů.



Obr. 21 – Vstřikovací stroj – A) vstřikovací jednotka, B) uzavírací jednotka, C) řídicí a kontrolní systém, D) rám stroje s hydraulickým pohonem [25]

2.2.2 Porovnání strojů podle pohonu – hydraulické, elektrické, hybridní

V současnosti jsou na trhu z hlediska pohonů tři základní typy vstřikovacích strojů. Hlavní pohyby uzavírací a vstřikovací jednotky jsou vyvozeny buďto elektromechanickým pohonem (plně elektrické stroje s velmi rychlými servomotory), nebo elektrohydraulickým pohonem (plně hydraulické stroje s čerpadly) anebo kombinací obou pohonů (hybridní stroje), kdy jsou kombinované výhody obou typů pohonů. Plně elektrické stroje jsou prosazovány především kvůli vysoké účinnosti celého systému vzhledem k energetické spotřebě během vstřikovacího cyklu. Hybridní stroje se potom ve spotřebě energie pohybují mezi oběma znázorněnými průběhy. Nelze však jednoznačně tvrdit, že vzhledem k energetickým úsporám (které podle některých zdrojů představují 60 až 70%) jsou plně elektrické stroje nejlepší. Při vzájemném porovnání musí být vždy brána v úvahu daná aplikace, což zahrnuje jak velikost produkce, tak design výrobku, výrobní cyklus, potřebnou uzamykací sílu, velikost dávky taveniny apod. [25]



Obr. 22 – Srovnání energetické náročnosti hydraulického a elektrického vstřikovacího stroje [25]

Hydraulické stroje na vstřikování plastů hrály dlouho prim v oblasti zpracování plastů. Dnes jde však již o zastaralou metodu zpracování plastů, jelikož s postupem doby narazily na meze svých možností. Rychlostí, kvalitou provedení a konzistencí nemohou konkurovat

strojům, které jsou vybavené novými technologiemi. Vývojáři se i tak snaží o jejich vylepšení, proto je jejich výhodou veliký záběr jejich využití a možnost dodatečného přidání dalších funkcí. [26]

Trendem dnešní doby jsou plně elektrizované vstřikovací stroje. Veškeré funkce strojů jsou poháněny servomotory, nebo asynchronními motory s frekvenčními měřiči. Mezi špičku výrobců plně elektrizovaných strojů na vstřikování plastů patří firma FANUC, která se zaměřuje na plně automatizované vstřikování s maximální spolehlivostí. Jádro elektrických strojů na vstřikování plastů tvoří řídicí systémy CNC. CNC řídicí jednotka umožňuje strojům pohyb v několika osách, nebo se přizpůsobit potřebám požadovaného produktu. Detekce kolizí zabudovaná v CNC jednotce zase zabrání poškození stroje i jednotlivých výrobků.

Například stroje od japonského výrobce FANUC dokáží dodat produkt v naprosto stejné kvalitě i po 50 000 cyklech. S touto výkonností jsou stroje typu ROBOSHOT často využívány v automobilovém průmyslu, ale také při výrobě kontaktních čoček.

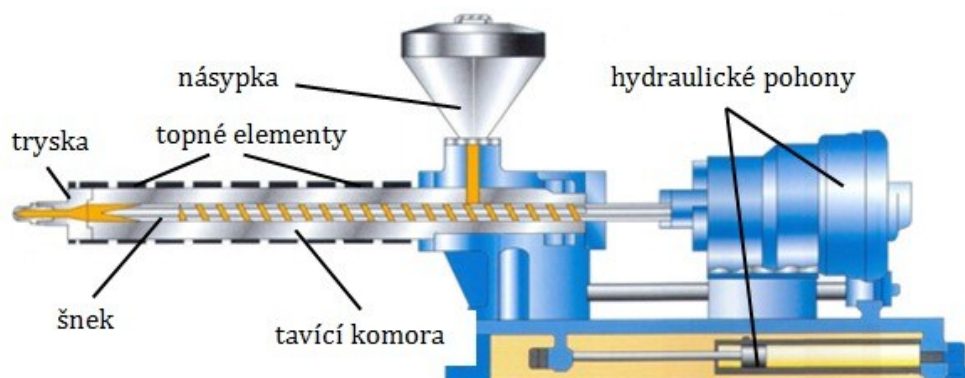
Elektrické pohony se v souvislosti se vstřikovacími stroji využívají dlouho. Až doposud tomu tak ale bylo ve spojení s hydraulickým pohonem. Hybridní typ stroje využívá servomotor pro pohon šneku prostřednictvím převodovky nebo ozubeného řemene. Pomocí pohonu se dávkuje materiál současně s pohyby stroje. To umožňuje plastifikovat dostatečné množství materiálu v krátkém čase. Elektrický pohon v případě hybridních strojů umožňuje úsporu energie. Hybridní stroje můžeme považovat za jakýsi mezistupeň mezi hydraulickými a plně elektrickými stroji na vstřikování plastů. [26]

Celkově se trh vyrovnává a plně hydraulické stroje jsou nahrazovány elektrickými nebo hybridními vstřikovacími stroji. Velký potenciál plně elektrických a hybridních strojů je především mezi malými a středními stroji (uzavírací síla do 5000 kN). Mezi velkými vstřikovacími stroji jsou však stále široce používány i hydraulické stroje. Velkou konkurencí pro ně jsou však hybridní provedení vstřikovacích strojů.

Vstřikovací stroje navrhované pouze pro zpracování reaktoplastů a elastomerů mají až o polovinu menší energetické nároky, než stroje téže velikosti konstruované pro zpracování termoplastů. Tento fakt je dán především jinými požadavky na vstřikovací jednotku, která není vytápěna a vzhledem k velké tekutosti termoplastů a především elastomerů je možno používat i výrazně nižší vstřikovací tlaky, což snižuje i nároky na uzavírací jednotku. [25]

2.3 Vstřikovací jednotka

Základní funkcí standardní vstřikovací jednotky určené pro zpracování termoplastů je převedení tuhého polymeru do stavu vysoce viskózní taveniny a následný přesun taveniny do tvarové dutiny vstřikovací formy se zajištěním maximální tvarové a rozměrové přesnosti. Jak již bylo zmíněno, nejrozšířenějším typem určeným pro zpracování termoplastů jsou vstřikovací jednotky se šnekem, který rotuje kolem své osy a axiálně se pohybuje vpřed a vzad. Vstřikovací jednotka je připevněna k posuvné konzole, která zajišťuje její pohyb, konkrétně přísun trysky vstřikovací jednotky ke vtokové vložce vstřikovací formy a vybudování a udržení potřebné přitlačné síly. Hlavní pohony vstřikovací jednotky musí také zajistit rotaci šneku při plastikaci dávky taveniny a přesun této dávky do tvarové dutiny výrobního nástroje dopředným pohybem šneku, kdy šnek působí jako píst, který vytlačuje taveninu polymeru z tavicí komory vstřikovací jednotky. Takto šnek působí na taveninu i během fáze dotlaku. Příslušenství vstřikovací jednotky musí v současné době zajistit velmi přesnou kontrolu pozice a rychlosti šneku a celé jednotky a rovněž velikosti působících tlaků. Celkový design vstřikovací jednotky (a rovněž šneku) by měl zajistit snadnou a rychlou výměnu zpracovávaného materiálu, případně i samotného šneku, či celé jednotky. [25]



Obr. 23 – Vstřikovací jednotka [25]

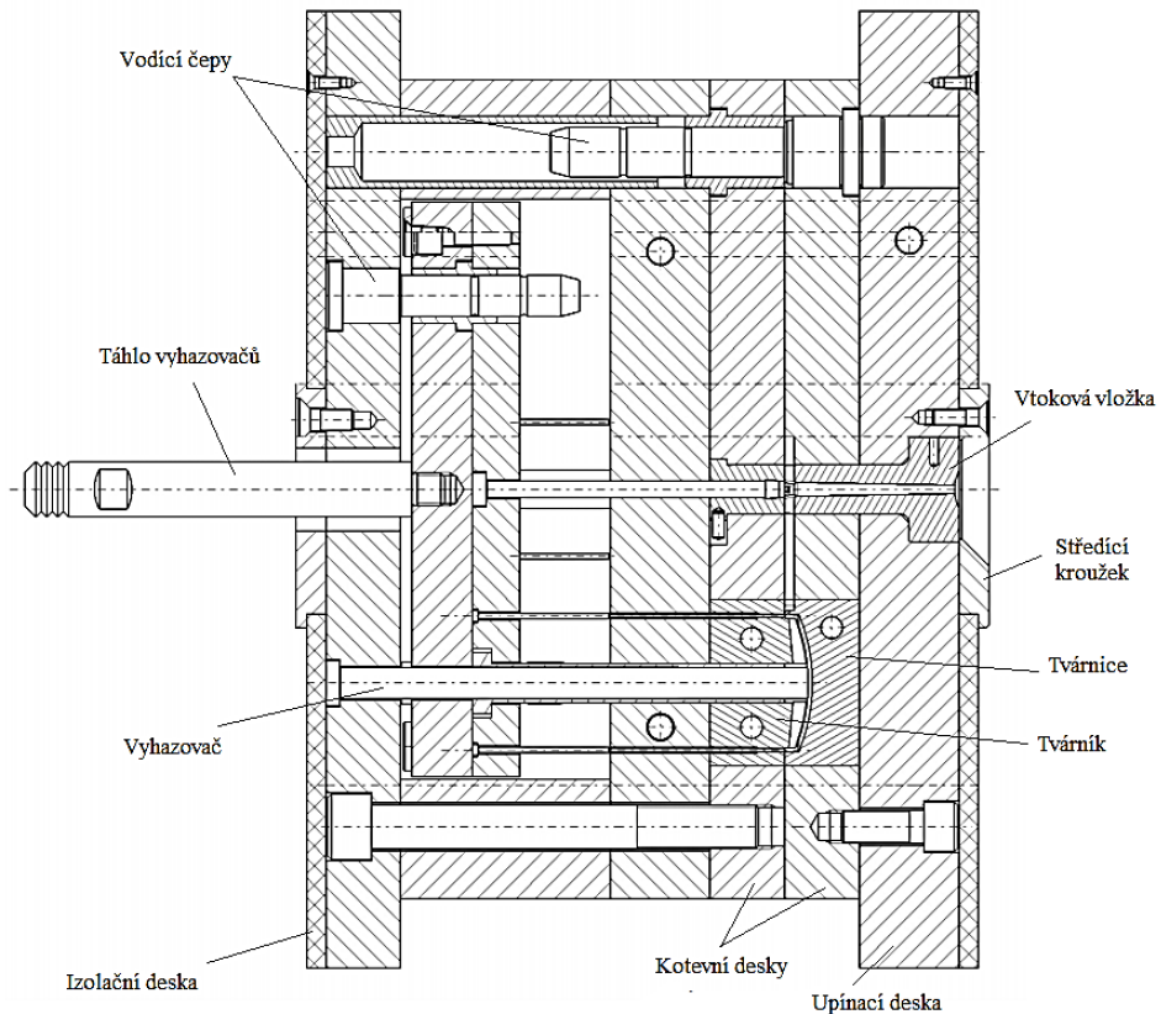
Vstřikovací jednotka je složena z několika částí. Násyпка tvoří vstupní část, na níž navazuje tavicí (plastikační) komora, která je obklopena topnými pásy. Tavicí komora je ukončena tryskou, která těsně dosedá na vtokovou vložku vstřikovací formy, skrze kterou tavenina plastu proudí dále do formy. Uvnitř tavicí komory je umístěn šnek s charakteristickou geometrií. Na plast působí teplo z topných pásů, ale hlavně je zahříván především vlivem tření polymeru mezi stěnami tavicí komory a šneku (přibližně 70%

tepelné energie je do plastu přenesena třením, v závislosti na otáčkách šneku a typu zpracovávaného materiálu). Vzhledem k faktu, že plasty nejsou dobrými vodiči tepla, je šnek konstruován tak, aby množství polymeru mezi bočními stěnami šneku a tavící komory nebylo příliš velké. Konstrukční řešení vstřikovací jednotky a tavící komory vychází především z typu materiálu, pro jehož zpracování je určena. Výkonnost vstřikovací jednotky je charakterizována především dvěma parametry, kterými jsou vstřikovací kapacity a plastikační kapacita. [25]

2.4 Vstřikovací formy

Vstřikovací formy se skládají ze dvou částí: nástrojového jádra a dutiny formy. Prostor, který tyto dvě části vytvářejí, když je forma uzavřena, se nazývá dutina součásti (dutina, která přijímá roztavený plast). V závislosti na potřebách výroby mohou být formy „s více dutinami“ navrženy tak, aby vytvořily více stejných dílů (až 100 nebo více) během jednoho cyklu. Forma, která zvládne více, než jeden výrobek na jeden vstřikovací cyklus nazýváme vícenásobnou formou.

Navrhování formy a jejích různých součástí (označovaných jako nástroje) představuje vysoce technický a často složitý proces, který vyžaduje vysokou přesnost a vědecké know-how pro výrobu vysoce kvalitních dílů s těsnými rozměry. Například musí být vybrána správná jakost oceli, aby součásti, které jsou spolu v kontaktu, se předčasně neopotřebovaly. Tvrdost oceli musí být také stanovena pro udržení správné rovnováhy mezi opotřebováním a houževnatostí. Kanály temperace musí být umístěny tak, aby maximalizovaly chlazení a minimalizovaly deformace. Konstrukční forem také potřebují vypočítat specifikace rozměrů vtokového systému pro správné plnění a minimální doby cyklu, jakož i určit nejlepší metody uzavírání pro trvanlivost nástrojů po celou dobu životnosti formy. [27]



Obr. 24 – Řez formou s popisem základních částí

Většina forem je vyrobena z kalené nebo předem kalené oceli. Tvrzená ocel (tepelně zpracovaná po obrábění) má vynikající odolnost proti opotřebení ve srovnání s předem tvrzenou ocelí. Ačkoli ocelové formy jsou dražší než formy vyrobené z jiných materiálů, jako je hliník, jsou odolnější a podporují vyšší rychlost výroby s delší životností.

Konstrukční inženýři musí brát v úvahu tvrdost oceli oproti její křehkosti. Tvrďší ocel je křehčí, a proto není dobrou volbou pro součásti formy, které jsou vystaveny bočnímu zatížení nebo nárazu. V takovém případě by došlo k prasknutí a trvalému poškození části formy. Tvrďší ocel je také potřebná pro formování skleněného materiálu, který může předčasně opotřebovat nástroje. Vyšší míra opotřebení může být také na vtokových systémech a vtokových ústích.

Kvůli svým vlastnostem rychlého chlazení se hliník někdy používá pro obrábění. Může také zkrátit čas potřebný k výrobě formy, protože je jednodušší jeho obrábění než u oceli. Protože je však měkčí než ocel, je obtížné jej udržovat a rychleji se opotřebuje - což je vhodnější pro prototypy a nízký počet cyklů. V závislosti na designu výrobku a formy mohou být někdy vyrobeny hybridní formy, které jsou většinou z oceli, ale pro přenos tepla používají hliník v oblastech s nízkým opotřebením. [27]

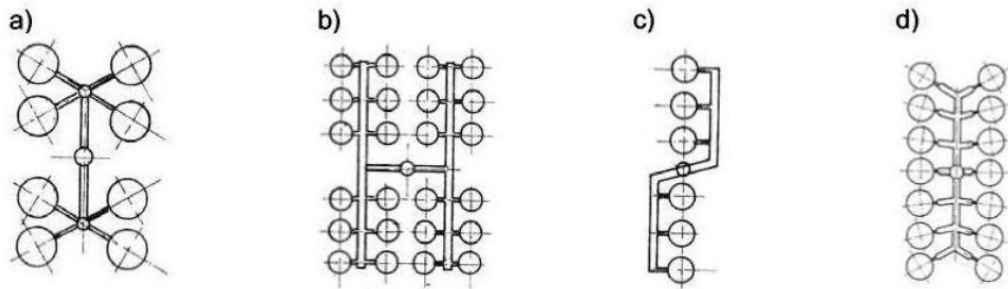
2.4.1 Vtokový systém

Je to systém kanálů a ústí vtoku, který má za úkol zajistit správné naplnění dutiny formy termicky homogenní taveninou plastu v nejkratším možném čase a s minimálními odpory, snadné odtržení nebo oddělení od výrobku a snadné vyhození vtokového zbytku.

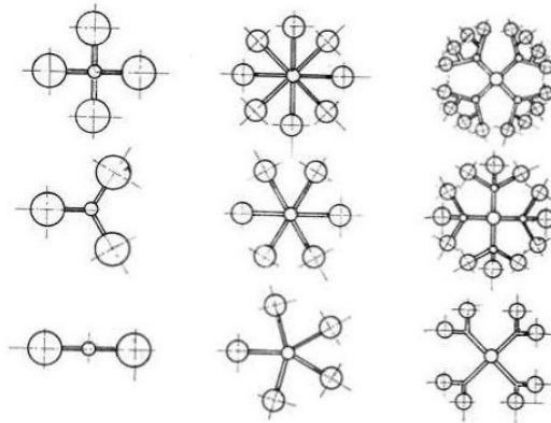
Tvar, rozměry, umístění vtoku a ústí vtoku do dutiny ovlivňuje:

- rozměry, vzhled a vlastnosti výrobku,
- spotřeba materiálu,
- náročnost začištění vtoku na výrobku,
- energetická náročnost výroby.

Vtoková soustava a její celkové uspořádání je dáno konstrukcí formy a počtem tvarových dutin (násobností). Zejména u termoplastů má druh a umístění vtoku podstatný vliv na proudění taveniny ve formě, vytváření tzv. studených spojů, orientaci makromolekul a plniva, rovnoměrnost krystalizace, anizotropii vlastností a rozměrů, povrchový vzhled apod. Vtok má být řešen tak, aby naplnění formy proběhlo co nejkratší možnou cestou bez teplotních a tlakových ztrát a pokud možno všude ve stejném čase. Pokud je forma řešena jako vícenásobná musí dojít k naplnění všech dutin současně a při stejných technologických podmínkách, a tedy při stejné teplotě taveniny a při stejném vnitřním tlaku. [28]



Obr. 25 – Řadové uspořádání vtokové soustavy vícenásobné formy – a) se stejnou délkou toku taveniny; b), c), d) s rozdílnou délkou toku taveniny (nevhodné bez korekce ústí vtoku) [28]



Obr. 26 – Symetrické uspořádání vtokového systému vícenásobné formy [28]

Charakter výstřiku, způsob a ekonomika výroby pak určí, zda se použije:

- studený vtokový systém, který je vhodný pro jednodušší výstřiky a malosériovou výrobu,
- horký vtokový systém, který je vhodnější pro složitější výstřiky a hromadnou výrobu.

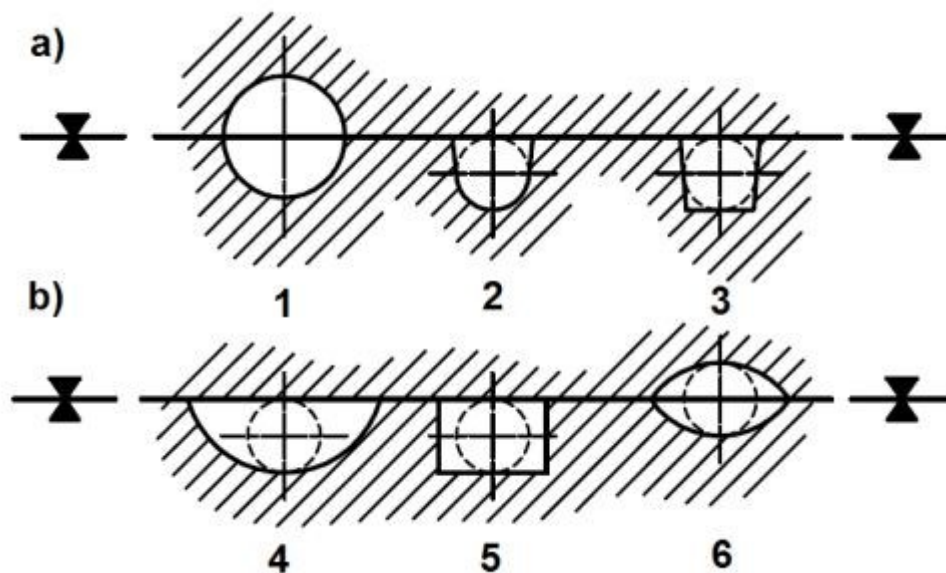
2.4.2 Studený vtokový systém (SVS)

Průtokem taveniny studeným vtokovým systémem roste její viskozita na vnějším povrchu (plast tuhne). Ztuhlá povrchová vrstva tak vytváří tepelnou izolaci stále tekutému vnitřnímu proudu, který zaplní celou vnitřní dutinu formy. V okamžiku zaplnění dutiny prudce vzroste vnitřní odpor a poklesne průtok. Odvodem tepla do stěn formy pokračuje tuhnutí

plastu v dutině a ve vtocích. Vlivem dotlaku dochází k vývinu tepla ve vtokovém ústí a tím se oddaluje úplné zatuhnutí taveniny. Při nárůstu protitlaku vlivem tuhnutí taveniny na hodnotu, kterou již stroj není schopen překonat, dojde k poklesu vstřikovací rychlosti a k úplnému ochlazení plastu.

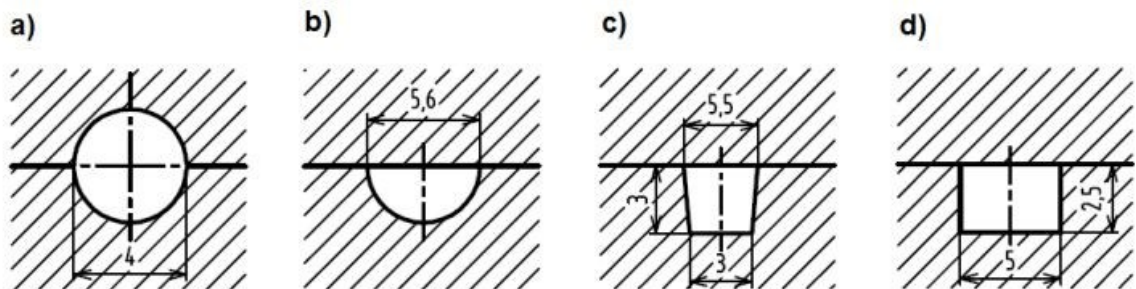
Funkční vtokový systém má zabezpečit, aby:

- dráha toku od vstřikovacího stroje do dutiny formy byla co nejkratší (bez zbytečných tlakových a tepelných ztrát),
- ke všem tvářecím dutinám byla dráha toku stejná (kvůli rovnoměrnému plnění),
- byl dostatečně velký průřez vtokových kanálů (aby bylo zaručeno, že po naplnění dutiny zůstane jádro taveniny plastické a umožní působení dotlaku). Vtokový kanál má mít minimální povrch, ale současně maximální průřez (kruhový apod.),
- vyústění vtoků do dutiny formy, jeho průřez, poloha a počet zajistily kvalitní spojení a ochlazení proudů taveniny (tyto spoje jsou tzv. studené spoje a mají sníženou pevnost),
- u vícenásobných forem byla zachována stejná rychlost taveniny (odstupňovaný průřez kanálů). [28]



Obr. 27 – Průřez vtokových kanálů: a) funkčně výhodné; b) funkčně nevýhodné; 2-5) výrobně výhodné; 1), 6) výrobně nevýhodné [28]

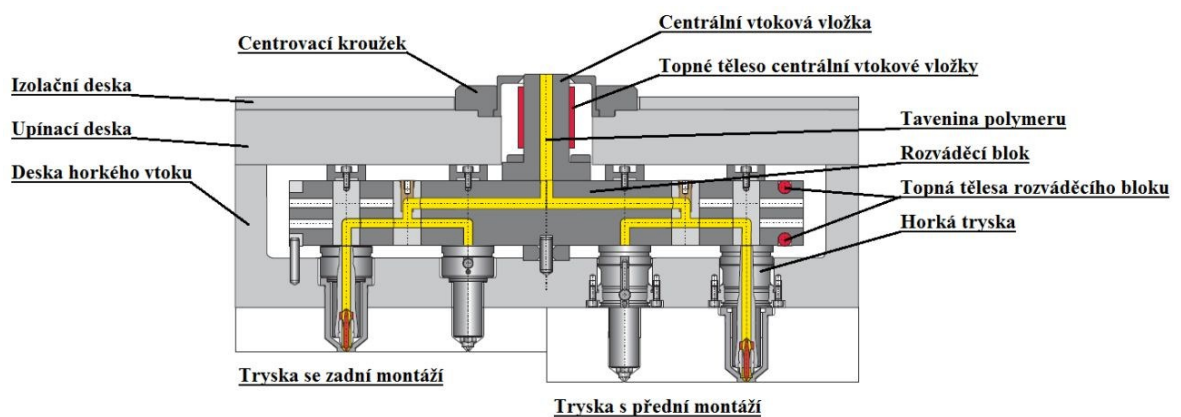
Z jednotlivých druhů průřezů kanálu je kruhový nejpoužívanější a také nejvhodnější. Jeho výhoda spočívá ve snadné výrobě. Jestli je průřez vhodný nebo nevhodný se hodnotí podle tzv. smáčivého čísla a_s , které vyjadřuje poměr průtočného průřezu k smáčenému povrchu. Čím je číslo vyšší, tím je průřez vhodnější. [28]



Obr. 28 – Srovnání základních typů kanálů podle smáčivého čísla a_s : a) $a_s = 1$; b) $a_s = 0,86$; c) $a_s = 0,84$; d) $a_s = 0,83$ [28]

2.4.3 Horký vtokový systém (HVS)

Vyhřívané vtokové soustavy se používají především u forem pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Jelikož je soustava rozvodu taveniny značně tepelně i mechanicky namáhána, vyžaduje větší tuhost formy a tedy i větší přesnost jejich výroby. Tím se zvýší také výsledná cena formy. Proto nejsou tyto formy ekonomicky vhodné pro krátkodobý nebo přerušovaný provoz. U jednonásobné formy je vstřikovací tryska napojena přímo na ústí do dutiny formy. U vícenásobných forem je součástí vyhřívané vtokové soustavy vyhřívaný rozváděcí blok s tryskami, který pak ústí přímo do dutiny formy nebo do pomocných kanálů. Správná teplota taveniny je řízena regulátorem ovládaným snímači. U náročnějších a větších forem se používá více nezávislých topných okruhů. [28]



Obr. 29 – Horký vtokový systém [29]

3 ANALÝZA PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je jednou z nejpoužívanějších technologií pro zpracování polymeru a je používána k hromadné výrobě plastových výrobků již mnoho desetiletí. Nicméně nelze splnit stále přísnější požadavky a vyšší očekávání zákazníků původní konvekční technologií. Proto bylo vyvinuto mnoho pokročilejších technologií, aby vyhovovaly stále přísnějším nárokům. Tyto pokročilé technologie obsahují prvky jako:

- vícekomponentní vstřikování – vstřikování více materiálů do jedné formy,
- vstřikování plněných materiálů,
- vstřikování za pomoci plynu (GIT) a vody (WIT),
- vstřikování s řízeným vytápěním (chlazením) formy,
- vstřikování s horkým vtokovým systémem.

Zmíněné pokročilé technologie se využívají již několik let, ale je potřeba pochopit jejich základní mechanismy a jak budou ovlivňovat samotnou výrobu.

Proto byly vyvinuty přidružené technologie programování CAE, které analyzují proces vstřikování, a ukazuje, jak tento proces probíhá a co se během něho děje. Díky této technologii můžeme mnohem efektivněji využívat výše zmíněné pokročilé technologie a optimalizovat proces výroby. [17]

3.1 Programování CAE (Computer Aided Engineering)

CAE je metoda pro využití počítačového softwaru k usnadnění inženýrské analýzy a optimalizaci. Termín CAE obecně zahrnuje simulace, validace a optimalizace výrobků a výrobních nástrojů. V informačních sítích, se jednotlivé CAE systémy považují za jeden uzel sítě implementovaný do celkové informační sítě, přičemž každý samostatný uzel může komunikovat s ostatními uzly v síti.

Termín CAE se dříve používal, v širším slova smyslu, pro využití výpočetní techniky v inženýrské praxi obecně, tj. nejen pro inženýrské analýzy a optimalizace, jak je uvedeno výše. Pro širší využití výpočetní techniky v inženýrské praxi se dnes používají zkratky CAx a PLM – Product Lifecycle Management, proces řízení komplexního životního cyklu produktu, od jeho prvního konceptu, přes detailní návrh, výrobu a poprodejní servis.

Při simulacích a modelování se studuje nějaká věc, respektive možné varianty nějaké věci, přičemž slovo „věc“ chápeme jako nějaký objekt hmotného světa, jako objekt, který existuje, nebo o kterém uvažujeme, že by mohl existovat, ale ještě není definitivně rozhodnuto o jeho konečné podobě.

Podstatou modelování je náhrada zkoumaného systému jeho modelem, přičemž cílem je získat pomocí pokusů s modelem informace o původním zkoumaném systému.

Simulace je technika, při níž se zkoumaný dynamický systém – dynamický = systém je v každém okamžiku své existence v jistém stavu – nahradí jeho modelem, se kterým se provádějí experimenty pro zjištění informací o původním zkoumaném dynamickém systému. Cílem experimentů je lepší pochopení chování studovaného systému nebo posouzení různých variant činností systému. [18]

3.2 3D model vstřikovaného výrobku

Navržený 3D model výstřiku (může být i vypracován metodami reversního inženýrství, v případě, že není k dispozici jeho počítačový návrh, ale existuje reálný díl) není pouze geometrická kopie reálného výstřiku. V pojetí Virtual Prototypingu se může jednat o model geometrický, model matematický – popsáný diferenciálními rovnicemi, model výpočtový – pro numerická řešení, model technologický – ověřující technologické postupy, zejména obrábění, model komplexně popisující navrhovaný výstřik – popis geometrie, hmotové vlastnosti, materiál, barva, atd. Základním a nejčastěji používaným počátkem všech prací ve virtuálním prostoru jsou modely popisující prostorovou geometrii budoucího výstřiku. [19]

Modely obvykle dělíme do dvou základních skupin:

- fyzické modely – jsou hmatatelné, vycházejí z fyzikální nebo geometrické podobnosti mezi modelovaným systémem a modelem,
- matematické modely – jsou to abstraktní, virtuální modely, neumožňují provádět experimenty fyzikální podstaty, ale umožňují zkoumat jevy pomocí matematického popisu jejich průběhu.

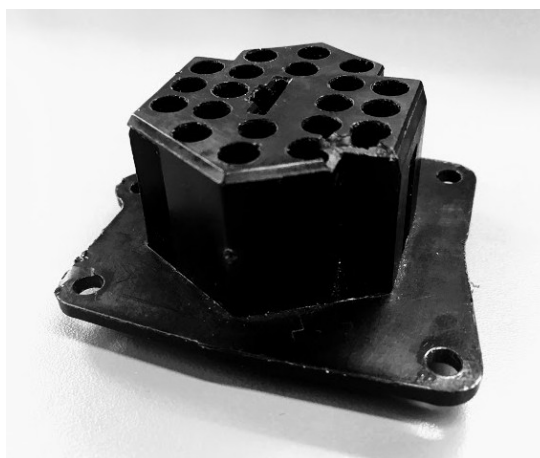
Matematický model musíme implementovat do vhodného prostředí – v našem případě se jedná o speciální simulační prostředí, které umožňuje použití modelů, provádění jejich analýz a dokumentaci bez nutnosti velkých programátorských znalostí.

Pro implementaci modelů do simulačního prostředí se používá metoda MKP – Metoda konečných prvků (FEM – Finite Element Method; FEA – Finite Element Anylysis).

Metoda vychází z Lagrangeova principu, který říká, že těleso je v rovnováze, jestliže celková potenciální energie deformace soustavy je minimální. Metoda MKP má tři kroky – preprocesor (příprava modelu, jeho diskretizace), výpočtový modul a postprocesor (zobrazení). Geometrický CAD model (plně objemový) se diskretizuje, tj. provede se nahrazení nekonečného objemu CAD modelu konečným počtem prvků, respektive uzlových bodů. Tím se pro každý diskrétní bod získají tři rovnice pole posuvů ve směrech x , y , z a počítá se pole deformací (6 rovnic) a pole napětí (6 rovnic). Funkce posuvů se nahradí polynomm, zavedou se okrajové podmínky a řeší se lineární algebraické rovnice, z nichž vyjde výpočet deformací a napětí pro jednotlivé uzlové body. Posledním krokem je, obvykle, grafické zobrazení vypočtených dat na modelu, případně s výpisem vybraných hodnot. [18]

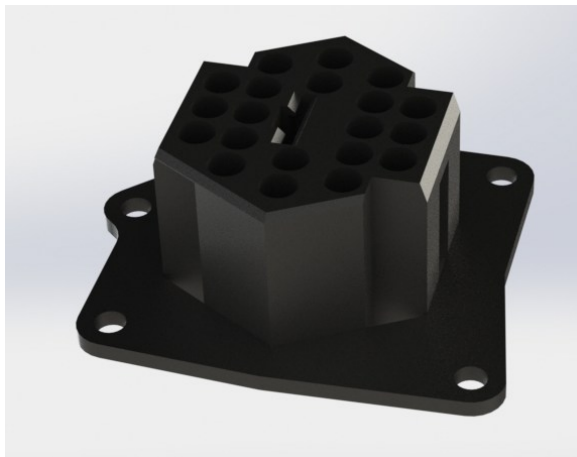
Příklad revesního inženýrství aplikovaného na polymerní díl:

- 1) Zhodnocení výrobku – u výrobku je důležité zjistit, k čemu je určen resp. jakou funkci musí splňovat. Zjistíme z jakého materiálu je vyroben a zda by se dal použít jiný materiál pro případné zlevnění nebo zlepšení vlastností. S tím také souvisí, v jakém prostředí pracuje a jakým podmínkám musí odolávat.



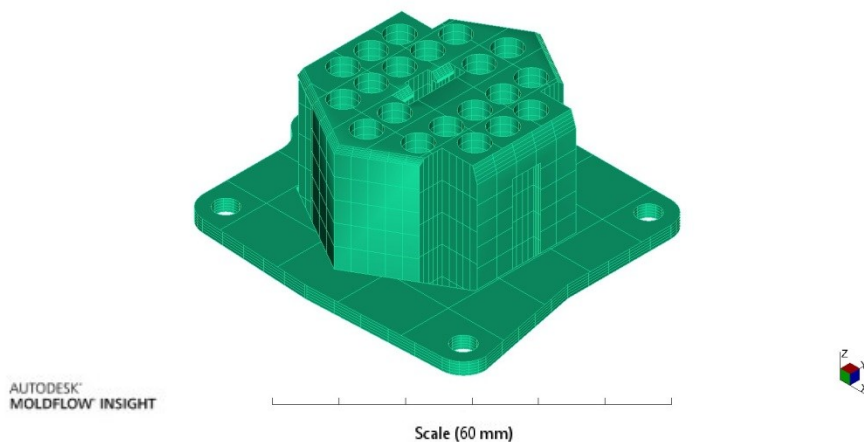
Obr. 30 – Výrobek určen k analýze – domek konektoru

- 2) Převedení na 3D model – následně je třeba výrobek převést na 3D model. Používá se některý z CAD softwarů jako např. Catia, SolidEdge, Inventor, Solidworks. Je důležité výrobek změřit a všechny jeho tvary důkladně zanezt do 3D modelu aby jeho podobnost byla co nejpřesnější. Pro usnadnění se u rozměrných výrobců využívá laserových 3D scannerů.



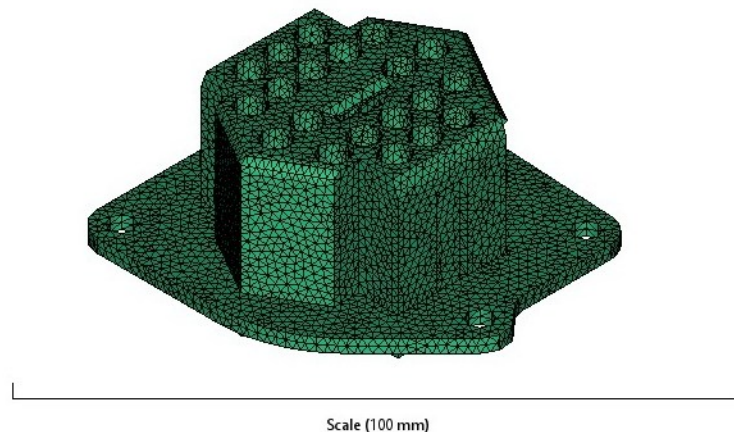
Obr. 31 – 3D model analyzovaného výrobku

- 3) Převedení modelu do simulačního softwaru CAE – 3D model jako objemové těleso převedeme do CAE softwaru jako je např. Moldflow. Protože každý modelační software pracuje v jiném prostředí, je nutné převést model do nějakého z univerzálních formátů jako je STEP, STL, IGS atd. Takový soubor bude pak použit jako vstupní data pro výpočtový model.



Obr. 32 – Výpočtový model v CAE softwaru Moldflow

- 4) Vysítování modelu – model je nahrazen sítí tvořenou trojúhelníky s uzlovými body. Správné nastavení sítě a její hustota výrazně ovlivňuje přesnost výpočtu analýzy. Pokud by síť byla příliš hustá, výsledek bude velmi přesný, nicméně bude trvat příliš dlouho a bude mít vysoké nároky na výpočtový počítač. V takové případě analýza může trvat v řádech desítek hodin někdy i několika dní v závislosti na výkonu počítače a složitosti výrobku. Proto je nutné nastavit vysítování výrobku tak, aby bylo dosaženo dostačující přesnosti v přiměřeně dlouhém čase.



Obr. 33 – Síť výrobku

3.3 Nastavení parametrů analýzy

Parametry analýzy nastavujeme na základě dříve získaných informací o výrobku, použitém materiálu a formě daného výrobku. To jaký použijeme materiál, je jeden z nejdůležitějších parametrů analýzy. Neméně důležité je znalost parametrů výrobní formy. Forma nám poskytuje mnoho dalších informací pro nastavení jako je například její násobnost. S tím je spojen celkový objem vstříkovaného materiálu. Na základě této informace je pak třeba zvolit vhodný vstříkovací stroj. A nejen objem materiálu je kritériem pro volbu stroje. Dalšími parametry je pak uzavírací síla, kterou dokáže stroj vyvinout a pak samotné rozměry formy. Každý stroj má rozmezí maximálních a minimálních rozměrů formy, které lze na daném stroji použít.

Toto jsou asi jedny z hlavních parametrů, které se při prvotním nastavení analýzy musí kontrolovat a dodržovat.

3.4 Výsledky analýzy

Na konci každé analýzy jsou všechny výsledky zkoumány a prezentovány. Na základě těchto výsledků se hodnotí, zda proces vstřikování proběhl od začátku až do konce, jestli byla dutina formy zcela zaplněna atd. Toto jsou podstatné výsledky, CAE softwary ovšem produkují mnoho dalších výsledků. Mezi ty důležité patří:

- **Analýza ideálního umístění vtokového ústí** – tato analýza se dělá jako jedna z prvních a určuje nám místo na výrobku, kde je ideální umístit vtokové ústí. Na základě toho můžeme upravit vtokový systém a určit nejvhodnější kombinaci vtokového ústí, a jestli použijeme horký nebo studený vtokový systém případně jejich kombinaci.
- **Čas plnění** – je doba, za kterou dojde k zaplnění dutiny formy.
- **Teplota taveniny** – během celého cyklu můžeme analyzovat teplotu taveniny v jakémkoliv místě a čase.
- **Teplota potřebná pro vyhazování** – je teplota, která je doporučena pro vyhození výrobku z formy aniž by došlo k jeho deformaci. Díky této analýze můžeme určit místa, kde se této teploty dosáhne nejdříve. Do těchto míst je pak možné umístit vyhazovače a výrazně tak zkrátit dobu cyklu vstřikování.
- **Maximální uzavírací síla** – je síla, kterou dosahuje tavenina uvnitř formy a způsobuje odtažení pohyblivé části formy. Tento parametr je důležitý při výběru vstřikovacího stroje. Je třeba volit stroj s vyšší uzavírací silou, než jakou nám ukázala analýza.
- **Teplota a průtok temperačního okruhu** – teplota temperačního okruhu formy je velmi důležitá během chlazení. Správným návrhem můžeme docílit velmi efektivního chlazení a tím výrazně zkrátit dobu cyklu. Průtok temperačního média by měl být turbulentní pro lepší odvod tepla.
- **Účinnost odvodu tepla** – v této analýze pozorujeme, v kterých místech temperačního systému je účinnost odvodu tepla a tedy chlazení nejefektivnější.
- **Celková deformace** - tato analýza nám zobrazuje celkové deformace na výrobku, vzniklé působením všech vlivů, které na něj působí během celého procesu vstřikování.

- **Orientace vláken** – můžeme analyzovat orientaci krátkých i dlouhých vláken ve vzdálenostech od povrchu stěny formy.

Do pokročilejších simulací můžeme zařadit software pro tepelnou analýzu – výpočty konvenčních, konformních i pulzních temperačních systémů vstřikovacích forem, výpočty topných systémů forem, výpočty induktivních systémů teploty vstřikovacích forem. Simulace horkých rozvodných systémů na vstřikovací formy i výstřik, výpočet přenosu tepla mezi vstřikovací formou a upínacím systémem vstřikovacího stroje, mezi formou a okolím.

K nejdůležitějším výsledkům simulačních výpočtů patří analýzy smrštění a deformací, měření vzdáleností dvou bodů na výstřiku po jeho smrštění, zjišťování smrštěním vyvolané deformace, měření odchylek od rovinnosti, přímosti, kruhovitosti a naklonění stěn. [19]

3.5 Vyhodnocení analýzy

Na základě všech výsledků analýzy se provádí vyhodnocení. Správnou analýzou a vyhodnocením pak můžeme efektivně optimalizovat jak samotný výrobek změnou jeho geometrie, tak i procesní podmínky a nastavení stroje. Optimalizací tak můžeme zlepšit vlastnosti výrobku a velmi často také zkrátit dobu cyklu vstřikování.

3.5.1 Optimalizace procesu vstřikování

Z neúplného výčtu výše uvedených možností simulačních výpočtů vyplývají možnosti nespokojit se pouze konstatováním, že simulační výpočet poukázal na to, že nějaký jev vznikne (studený spoj, uzavřený vzduch, deformace, atd.) - což je, bohužel dosud častý přístup k simulačním výpočtům, ale použít tento vývojový nástroj k variantním a optimalizačním simulačním výpočtům. S tímto přístupem souvisí zkratka DOE.

DOE – Design of Experiments, v překladu technika plánovaných experimentů (nesprávně a úzce - plánování experimentů). Existuje více variant technik DOE, nejznámější jsou dva přístupy – DOE, které zkoumá všechny varianty a statistické DOE, které zkoumá pouze statistický výběr ze všech možných variant. V běžné praxi se velmi často používá varianta statistického DOE, která využívá přístup podle japonského inženýra a statistika Genichi Taguchi. [20]

Kromě optimalizace technologických procesních parametrů vstřikovacího procesu je možno DOE přístup použít pro další variantní výpočty – například, změnou umístění vtokového ústí na výstřiku optimalizovat místa s uzavíráním vzduchu a s tvorbou studených spojů nebo změnou umístění, průměrem temperačních kanálů snížit (optimalizovat) deformace, zkrátit dobu výrobního cyklu, atd.

Výsledky simulačních, variantních výpočtů mohou také odhalit problém, který může vyvstat při kontrole jakosti výrobků z termoplastů. S rozšiřujícím se přístupem kótování výrobků z termoplastů prakticky bez lineárních kót, ale kótováním s geometrickými úchylkami – úchylkami tvaru a polohy – a měřením pomocí různých skenerů (optické, laserové) vyvstává otázka určení měřících vztažných základů.

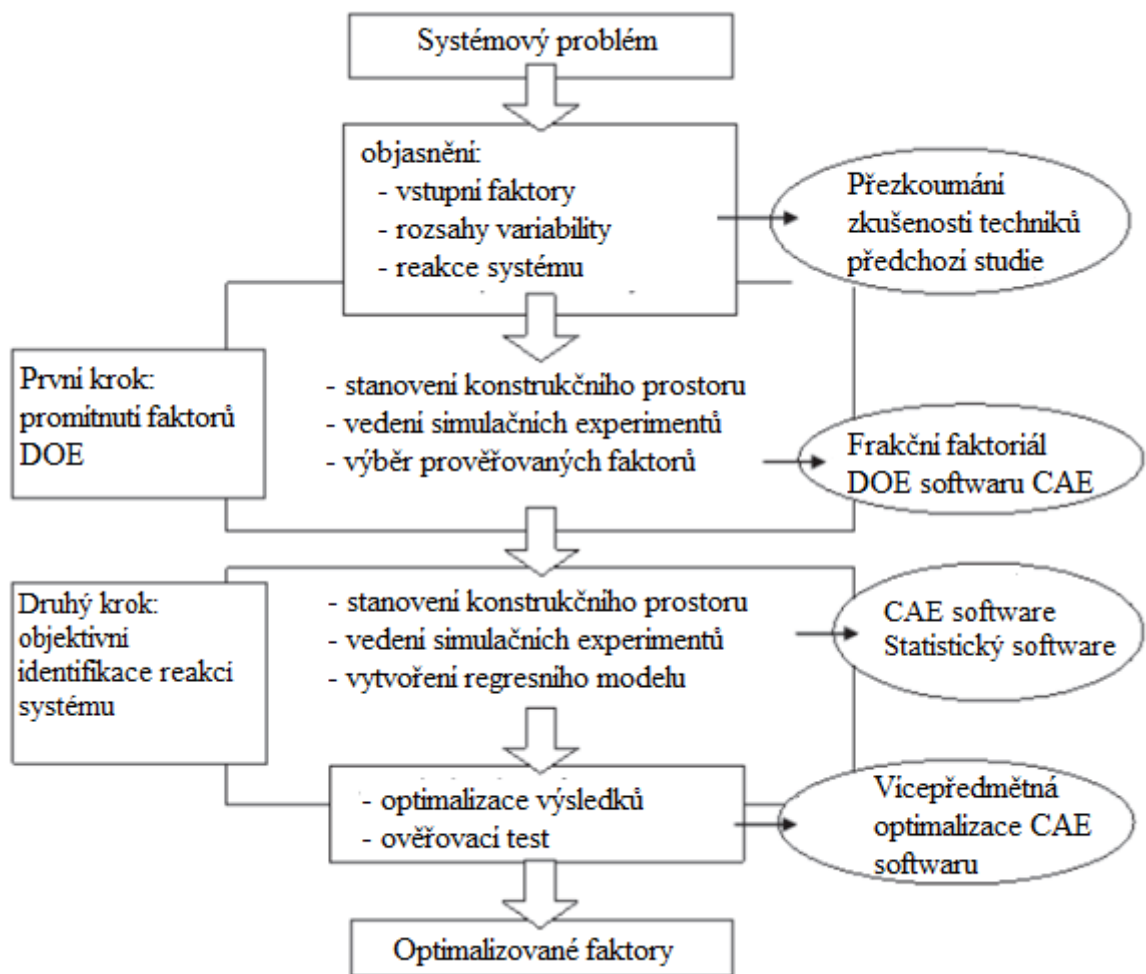
Konstruktér, který zná návaznosti tohoto výrobku na jiné díly v sestavě, volí vztažné základy podle těchto vazeb, ale mnohdy za základnu zvolí tvar na výrobku, který se bude (z důvodu konstrukce výrobku, z důvodu umístění ústí vtoku, z důvodu technologických parametrů, atd. - vždy půjde o kompromisy mezi funkčností výrobku a jeho optimalizací) deformovat, což neumožní korektní proměření daného výrobku.

Obecně DOE může přinášet tyto užitky – lepší návrh výrobku a procesu jeho vstřikování, zlepšení jakosti výrobku, zlepšení procesu vstřikování, snížení nákladů, řešení problémů s jakostí při výrobě výrobků a zvýšení konkurence schopnosti. [20]

V poslední době byl postup DOE používán pro systematické zkoumání procesních proměnných nebo produktových proměnných, které ovlivňují kvalitu výrobků. Je možné identifikovat podmínky procesu a části produktu, které ovlivňují kvalitu produktu a náklady.

Postup DOE sestává z následujících čtyř kroků:

- plánování – definice problému a cíle a vypracování experimentálního plánu,
- screening – snížení počtu proměnných určením klíčových proměnných, které ovlivňují kvalitu produktu,
- optimalizace – stanovení optimálních hodnot pro různé experimentální faktory,
- ověření – provedení následného experimentu na internetu předpovědané nejlepší podmínky zpracování pro potvrzení výsledků optimalizace. [21]



Obr. 34 – Diagram pracovního postupu [22]

PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle této diplomové práce jsou tyto:

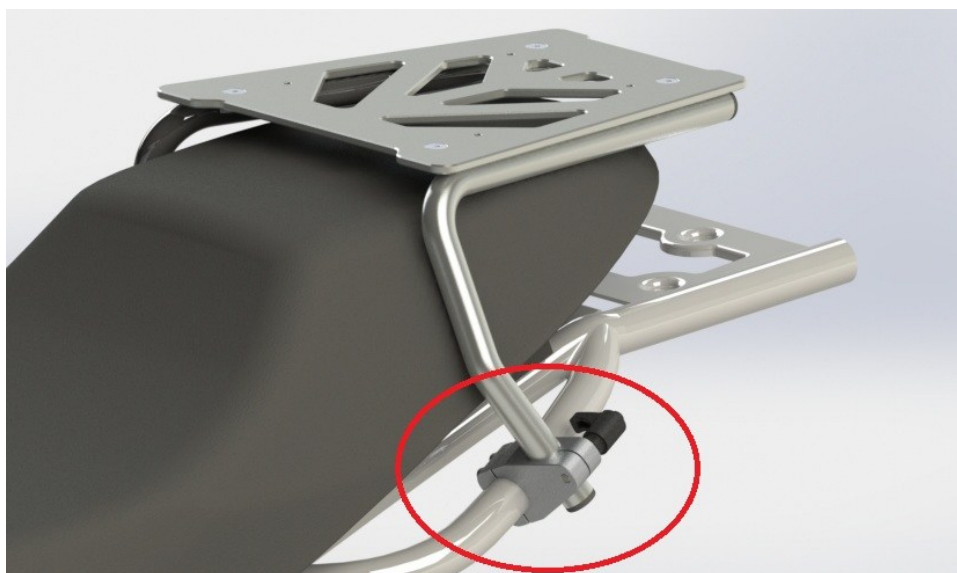
- 1) vypracovat literární studii pro dané téma,
- 2) provést 3D konstrukci dílu nosiče zavazadla,
- 3) provést analýzu procesu vstřikování a optimalizaci zadaného dílu,
- 4) vyhodnocení zvolených variant.

V praktické části diplomové práce je cílem navrhnout a vytvořit 3D model vstřikovaného dílu. Jedná se o díl, který by měl zajistit držení dvou na sebe kolmých trubek, kdy jedna trubka je součástí rámu motocyklu a druhá trubka je část nosiče. Následně provést analýzu vstřikování tohoto dílu a provést jeho konstrukční optimalizaci vzhledem k technologii vstřikování a následně proces vstřikování také optimalizovat. V závěru mezi sebou porovnat jednotlivé konstrukční varianty a optimalizace procesu vstřikování.

5 VSTŘIKOVANÁ SOUČÁST

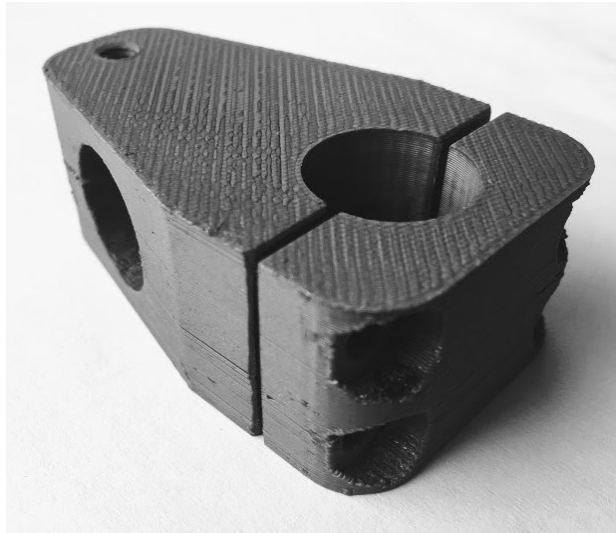
Tato součást má jednoduchým způsobem spojovat rám nosiče zavazadel s rámem motocyklu. Jedná se o motocykl značky Ducati Monster, modelový rok 1993 - 2007. Na trhu neexistuje žádný nosič zavazadel použitelný pro tento motocykl. Nejprve byl tedy vyroben nosič s použitím ocelových trubek a hliníkového plechu.

Hlavním tématem této diplomové práce resp. praktické části je navrhnout a zanalyzovat součást, která bude spojovat rám motocyklu a nosič. Součást je rozdělena na dvě části aby bylo možné ji uchytit k rámu motocyklu. Dále je ve větší z těchto dvou částí ještě jeden otvor pro umístění rámu nosiče.



Obr. 35 – Prvotní 3D návrh vstřikované součásti

Jako prototyp byla tato součást vyrobena technologií 3D tisku. Pro ověření rozměrů a zvolené polohy takto vyrobená součást naprosto dostatečně vyhovovala. Nicméně nelze ji použít jako plnohodnotný díl. Jelikož nosič ponese jistou zátěž a díl tak bude zatěžován jak staticky, tak i dynamicky během jízdy. Musíme uvažovat i se značnými vibracemi jak samotného motocyklu, tak pružením rámu nosiče při zatížení.



Obr. 36 – Reálná součást vyrobená 3D tiskem



Obr. 37 – Použití součásti vyrobené 3D tiskem

Jak bylo výše zmíněno, součást vyrobenou 3D tiskem nebylo možné použít během provozu se zátěží. Proto byla tato součást vyrobena ještě jednou, tentokrát ale technologií CNC frézováním. Byl použit materiál slitiny hliníku 7075 - AlZn5,5MgCu (často nazýván jako letecký dural). Takto vyrobená součást už mohla být použita jako plnohodnotná, a celá konstrukce se mohla vyzkoušet v provozu. Po několika testech především v provozu a to

jak bez zátěže tak i se zátěží se neprojevili žádné nedostatky. Co se návrhu týče a především polohy jak obou rámu vůči sobě tak i poloze na motocyklu, byl tento díl navržen dobře.



Obr. 38 – Reálná součást vyrobená CNC frézováním

Nicméně, po delší době používání a následném sejmutí z motocyklu bylo zjištěno, že součást v místě kde je uchycena k rámu motocyklu došlo odření laku. Součást by bylo třeba doplnit o měkčené nebo plastové uložení v místech styku s rámem. Dalším nedostatkem jsou i výrobní náklady na jednu sadu těchto úchytů ze slitiny hliníku.



Obr. 39 – Nosič uchycen k rámu motocyklu pomocí navrhované součásti

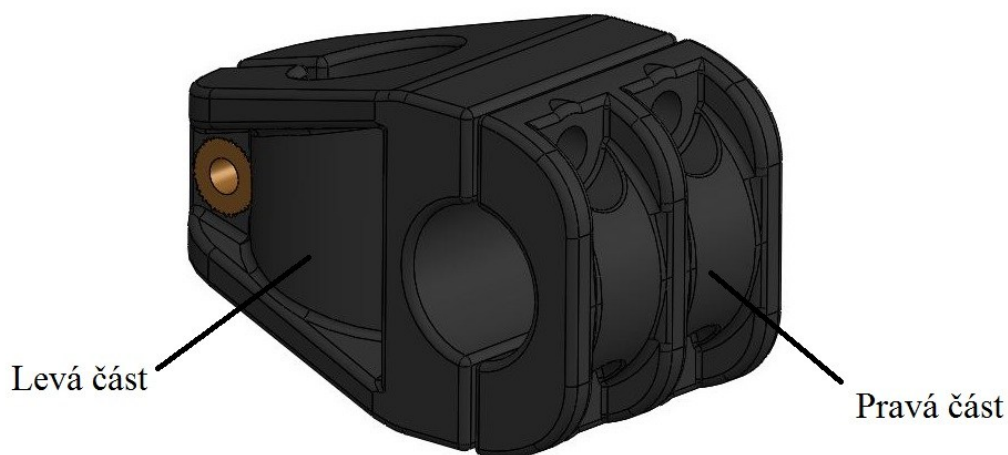
Po zvážení všech nedostatků by bylo výhodné tuto součást vyrobit jako vstříkovaný polymerní díl. Proto tato součást z hliníku slouží jen jako zkušební a konečný výrobek, kterým se budeme dále zabývat v praktické části, bude vyroben technologií vstříkování z materiálu PA6 plněným skelným vláknem pro větší pevnost.

6 NÁVRH VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI

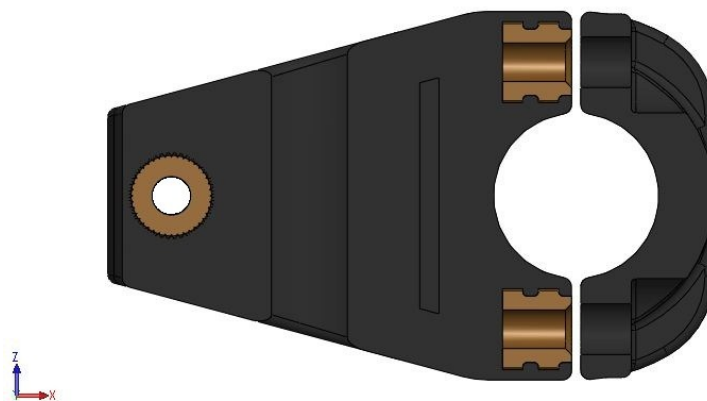
6.1 Konstrukce a tvar součásti

Pro návrh vstřikované součásti byl použit software SolidWorks 2017. Tvarově i rozměrově vychází z prototypového dílu vyrobeného ze slitiny hliníku. Konstrukce je velmi jednoduchá a jak bylo dříve zmíněno, součást má 2 části. Dohromady tvoří jakousi objímku, která se připevní k rámu motocyklu. Na jedné půlce (označena jako levá část) je navíc otvor pro nasunutí rámu nosiče.

Celá součást je již konstrukčně upravena tak, aby splňovala zásady navrhování polymerních dílů. Jedná se především o vybrání, úkosity, zaoblení atd. Jednou ze zásadních změn je nahrazení děr se závity pro šrouby závitovými vložkami pro zastříknutí. Tyto vložky budou během vstřikování zastříknuty a budou tak součástí výstřiku.



Obr. 40 – Konstrukce vstřikované součásti



Obr. 41 – Řez vstřikované součásti v místě závitových vložek

6.2 Volba materiálu

Volba materiálu, ze kterého bude součást vyrobena, je velmi důležitá. Z hlediska použití, kdy se předpokládá, že součást bude mechanicky namáhána, bude výběr směřovat na semikrystalické polymery. Tyto polymery jsou označovány jako konstrukční a vzhledem ke své struktuře jsou tak velmi pevné. Mezi tyto polymery patří např. PA, PE, PP, POM.

Pro ještě větší pevnost by bylo výhodné vyztužit jeden z těchto materiálů plnivem. Takovým plnivem mohou být krátká nebo dlouhá skelná vlákna. Běžně se jako plněný materiál používá PA6. Bude tedy zvolen materiál PA6 plněný ze 14 % skelným vláknem. Konkrétně se jedná o materiál s označením Ultramid 8231GHS od výrobce BASF Engineering Plastics.

Description	Recommended Processing	Rheological Properties	Thermal Properties
Family name	POLYAMIDES (NYLONS, PPA, ...)		
Trade name	Ultramid 8231GHS		
Manufacturer	BASF Engineering Plastics		
Link	http://ultrasim.com/moldflow-datalink		
Family abbreviation	PA6		
Material structure	Crystalline		
Data source	Moldflow Corporation : pv T-Measured : mech-Measured		
Date last modified	25-JUL-06		
Date tested	03-DEC-02		
Data status	Non-Confidential		
Material ID	10859		
Grade code	CM10859		
Supplier code	BASF		
Fibers/fillers	14% Glass Fiber Filled		

Obr. 42 – Popis zvoleného materiálu

Description	Recommended Processing	Rheological Properties
Mold surface temperature	90	C
Melt temperature	271	C
Mold temperature range (recommended)		
Minimum	70	C
Maximum	110	C
Melt temperature range (recommended)		
Minimum	260	C
Maximum	282	C
Absolute maximum melt temperature	322	C
Ejection temperature	172	C
Maximum shear stress	0.5	MPa
Maximum shear rate	60000	1/s

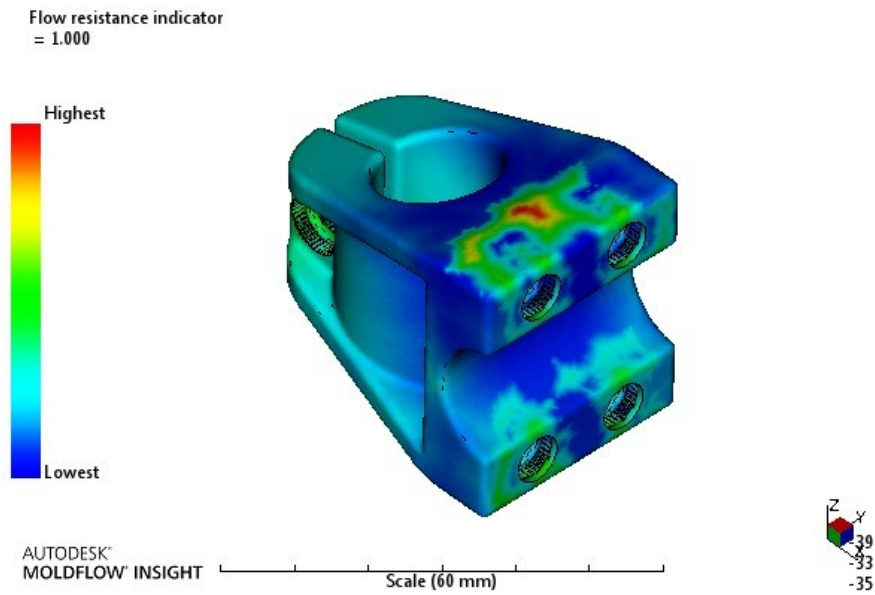
Obr. 43 – Doporučené teploty pro zpracování

6.3 Předběžné analýzy

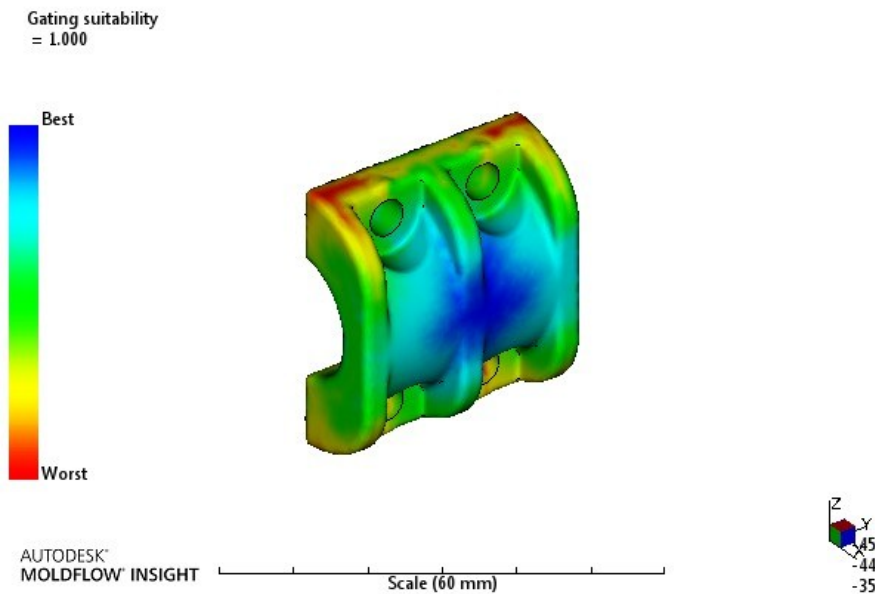
Analýzy vstřikování této součásti budou vytvořeny v softwaru Autodesk Moldflow Synergy 2016. Předběžné analýzy aplikované na navrhnutou součást jsou analýza ideálního umístění vtoku a analýza plnění. V obou těchto analýzách budou nastaveny procesní podmínky na automatický režim, kdy teplota taveniny a teplota formy jsou nastaveny podle zvoleného materiálu. Zbylé parametry jako např. vstřikovací čas, přechod z fáze plnění na dotlak a nastavení profilu plnění zůstanou v automatickém režimu.

6.3.1 Analýza ideálního umístění vtoku

Tato analýza nám ukáže místo na součásti, kde je ideální umístit ústí vtokového systému. Pomůže nám tak i s tím, jak umístěním součásti ve formě.

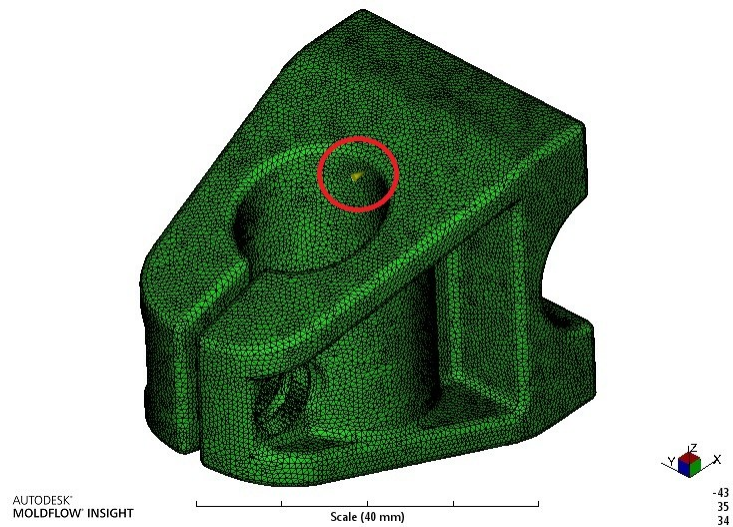


Obr. 44 – Analýza ideálního umístění vtoku – Levá část

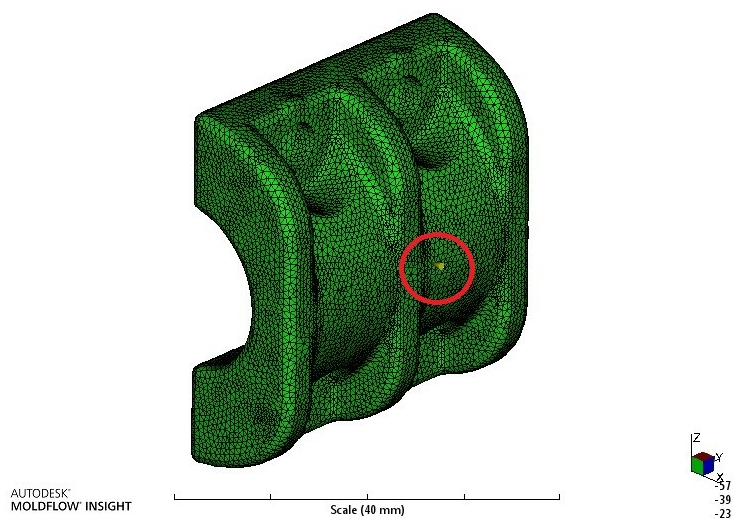


Obr. 45 – Analýza ideálního umístění vtoku – Pravá část

Z analýzy lze vidět místa, kde je umístění vtoku nejlepší a kde naopak špatné. Tmavě modrá místa jsou ta místa, kde by bylo ideální umístit ústí vtokového systému. Analýza také vyhodnotila jedno nejlepší místo.



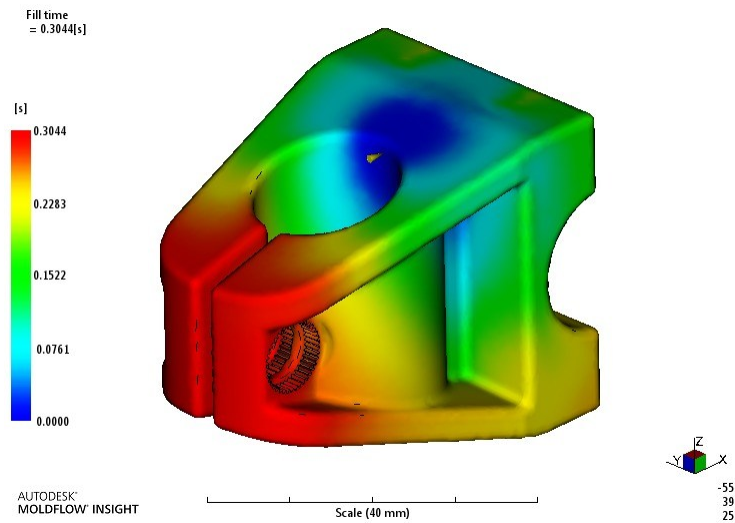
Obr. 46 – Místo ideálního vtoku na levé části



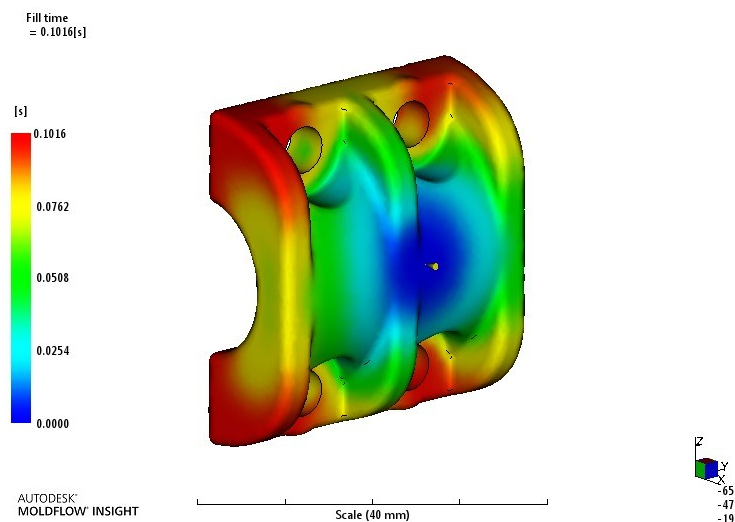
Obr. 47 – Místo ideálního vtoku na pravé části

6.3.2 Analýza plnění

Tato analýza znázorňuje, jak tavenina plní dutinu formy v čase. Model součásti byl vysítován metodou 3D solid. Síť je tak vytvořena v celém objemu modelu a díky tomu můžeme názorně vidět proudění taveniny v kterémkoliv řezu součásti v daném čase.



Obr. 48 – Čas plnění levé části



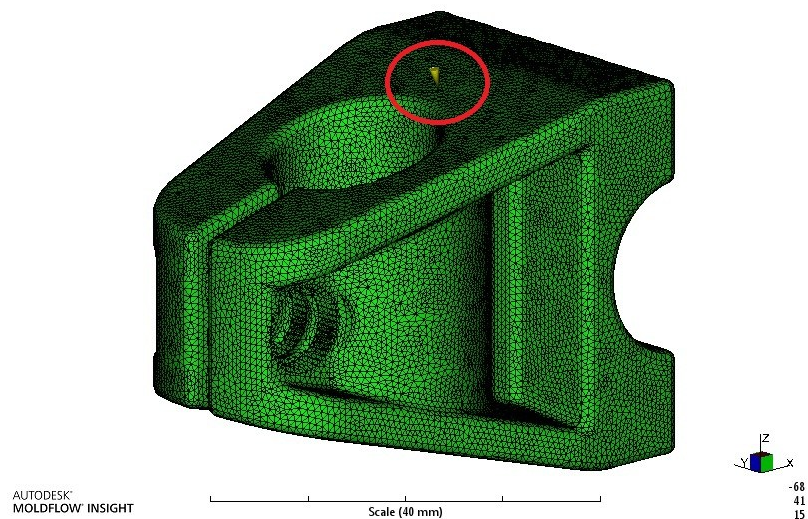
Obr. 49 – Čas plnění pravé části

Zde vidíme výsledek analýzy, kdy vtokové ústí bylo ponecháno na místě, jaké bylo vyhodnoceno předchozí analýzou jako nejlepší. Čas plnění levé části je 0,3 sekundy. Umístění vtoku u levé části je uvnitř otvoru, kterým prochází rám nosiče. Toto místo není příliš vhodné, protože po na místě v toku vždy zůstane stopa a zde je požadováno, aby byl povrch čistý a hladký. V tomto případě bude vhodnější přesunout vtok na horní stranu součásti, kde je stále ještě tmavě modrá oblast (viz Obr. 44) pro ideální umístění vtokového ústí.

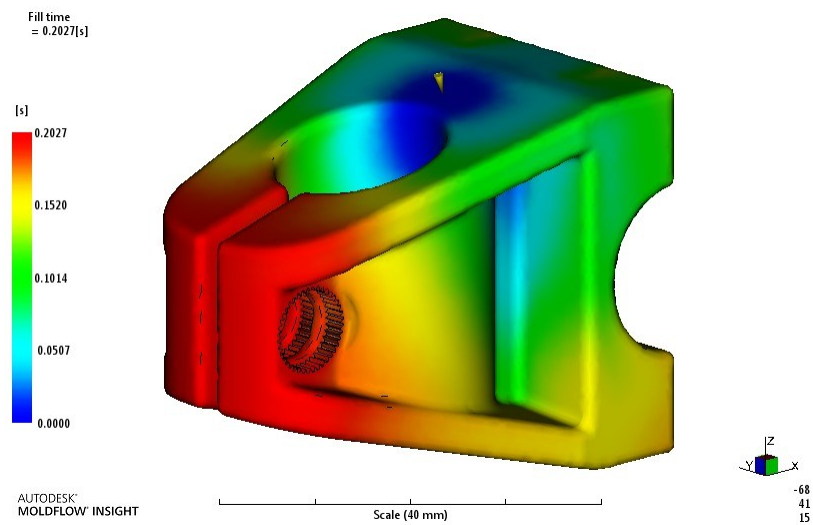
U analýzy plnění pravé části lze vidět, že je tavenina poměrně rovnoměrně rozvedena. Čas plnění této části je 0,1 sekundy. Lze si všimnout, že místo ideálního umístění vtoku z předchozí analýzy je umístěno mírně vpravo od svislé osy. Proto bude provedena malá korekce vtokového ústí na střed, aby byla zajištěna zcela rovnoměrná distribuce taveniny. Poloha a umístění z hlediska funkčnosti a vzhledu je zcela v pořádku.

6.3.3 Optimalizace analýzy plnění

Oproti předchozí analýze bude optimalizací změna umístění ústí vtokového systému. U Levé části byla zvolena horní zešikmená plocha. Toto místo je označeno tmavě modrou barvou z předchozí analýzy jako ideální pro umístění vtokového systému. Toto místo bylo vybráno i z toho důvodu, že zde bude uvažováno s dělicí rovinou.

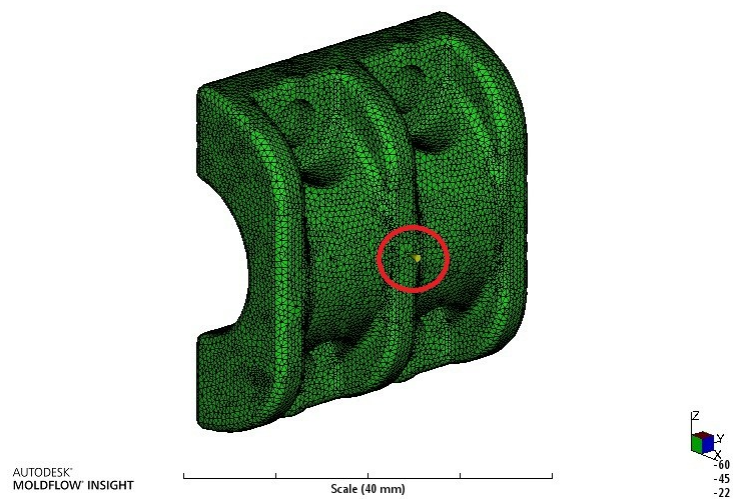


Obr. 50 – Optimalizace místa ideálního vtoku na pravé části

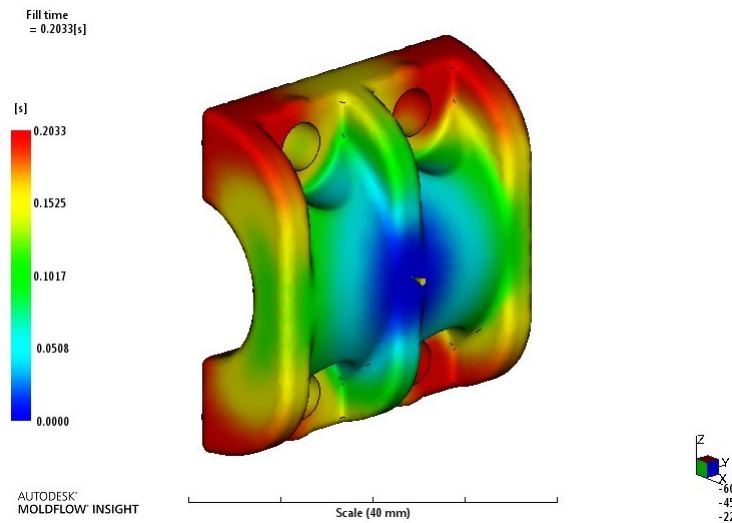


Obr. 51 – Optimalizace místa ideálního vtoku na levé části

U pravé části, jak bylo dříve zmíněno, se ústí vtokového systému přesunulo více do středu součásti. Změna byla velmi malá, tudíž se nepředpokládají nějaké výrazné změny, co se týče plnění dutiny taveninou.



Obr. 52 – Optimalizace místa ideálního vtoku na pravé části



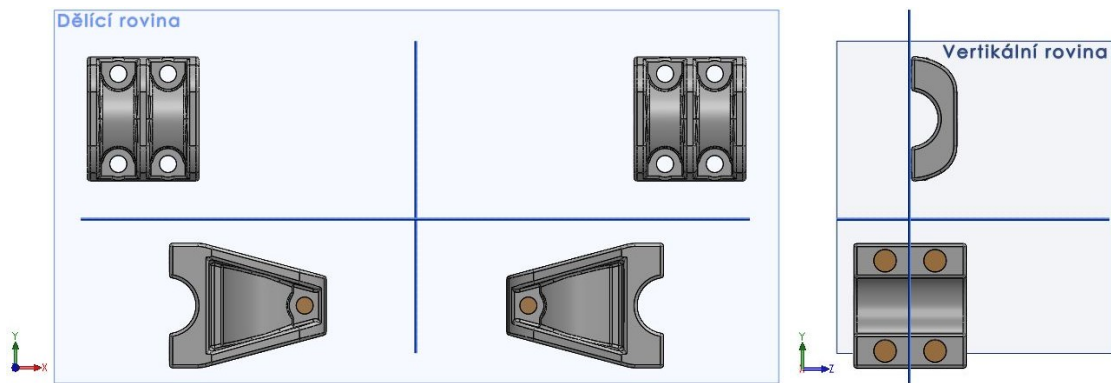
Obr. 53 - Čas plnění pravé části se změnou polohy vtokového ústí

Z optimalizovaných analýz plnění lze pozorovat rovnoměrné plnění dutiny taveninou u obou částí. Tato konfigurace bude použita i pro další analyzování, zvolení násobnosti formy a návrh umístění ve formě. Na základě těchto údajů a předběžných analýz bude zvolen konkrétní vstřikovací stroj, navržen vtokový a temperační systém. Oba tyto systémy budou důležité při nastavení procesních podmínek, které budou dále optimalizovány.

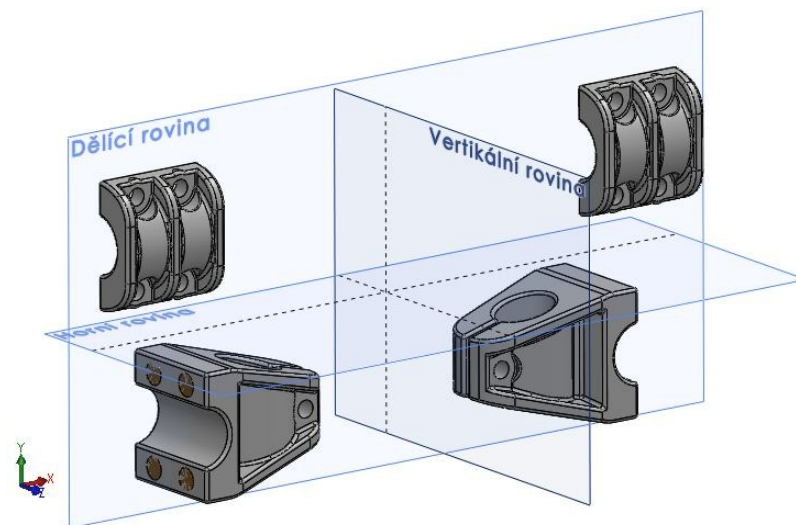
6.4 Návrh umístění ve formě

Jak už bylo dříve zmíněno, vstřikovaná součást má dvě části a pro jeden nosič zavazadel je třeba dvou těchto součástí. Návrh umístění tak bude pro celou tuto sadu. Na jeden vstřikovací cyklus se budou vstřikovat dvě levé části a dvě pravé části vstřikované součásti.

Při návrhu umístění ve formě je třeba zvolit vhodně dělicí rovinu pro obě části, aby bylo možné jejich odformování. Dál je důležité znát, kudy předběžně povede vtokový systém a jakého bude typu. To samé platí i u temperačního systému. Tyto dva systémy se nesmí protínat.



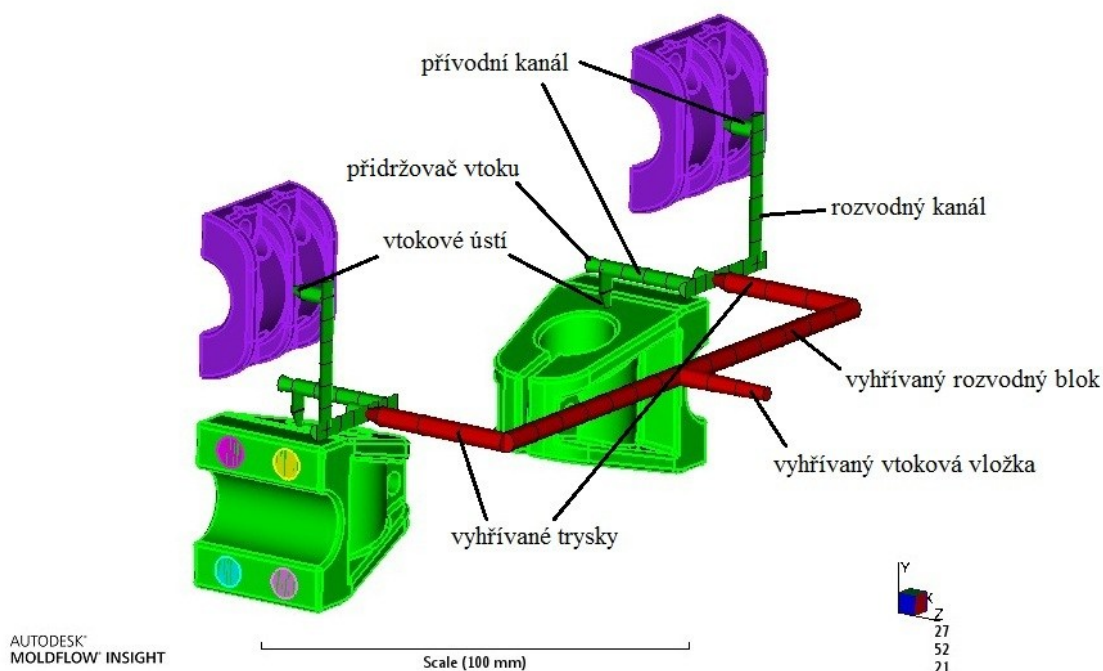
Obr. 54 – Rozmístění součásti ve formě z pohledu dělicí a vertikální roviny



Obr. 55 – 3D pohled na rozmístění výrobku ve formě

6.5 Návrh vtokového systému

Volbou pro tuto součást je kombinace horkého a studeného vtokového systému. Použitím pouze studeného vtokového systému je nevýhodou velká spotřeba materiálu. Ideální je použití pouze horkého vtokového systému. Velmi efektivně se dá řídit časování vstřiku a sníží se i spotřeba materiálu. Nicméně konstrukce formy by se nejspíš musela příliš zvětšovat a s tím by rostly i náklady. Bude proto využito vlastností obou těchto systémů a bude navržena jejich kombinovat.



Obr. 56 – Návrh vtokového systému

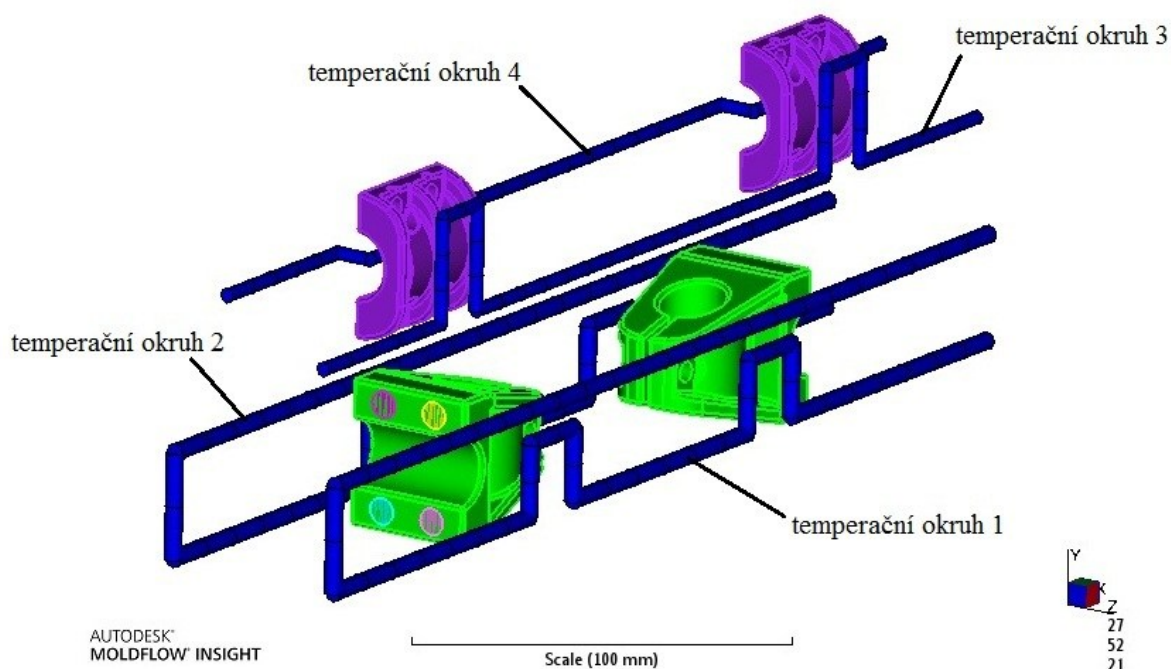
Tab. 1 – Tvar a rozměry navrženého vtokového systému

Druh kanálu	Tvar - Průřez	Rozměr [mm]
Vyhřívání vtoková vložka	komolý kužel	$\varnothing d = 3,5; \varnothing D = 5$
Vyhřívání rozvodný blok	kruh	$\varnothing D = 5$
Vyhřívání tryska	kruh	$\varnothing D = 5$
rozvodný kanál	půlkruh	$\varnothing D = 4; v = 2$
přívodní kanál	kruh	$\varnothing D = 4$
přidržovač vtoku	komolý kužel	$\varnothing d = 3; \varnothing D = 4$
vtokové ústí 1	komolý kužel	$\varnothing d = 2; \varnothing D = 4$
vtokové ústí 2	komolý půlkužel	$\varnothing d = 2; v = 1; \varnothing D = 4; v = 2$

Hlavní rozvod taveniny zajistí horký rozvodný blok se dvěma tryskami, které dopraví taveninu do rozvodných kanálů. Lehkými úpravami rozvodných studených kanálů pak lze řídit průtok taveniny a zajistit tak rovnoměrné plnění dutin formy. Po odformování díky studenému vtoku zůstanou spojeny levá a pravá část součásti, což může být výhodou při oddělování vtoku operátorem.

6.6 Návrh temperačního systému

Temperační systém musí být navržen s ohledem na konstrukci a tvar výrobku. Při návrhu musí být dodrženy také základní pravidla návrhu vtokového systému a to průměry kanálů a vzdálenosti od dutiny formy. Síla materiálu mezi kanálem a dutinou formy by neměla být menší než průměr kanálu. Proudění temperačního média systémem by mělo být vždy turbulentní. Tak bude zajištěn dostatečný odvod tepla z oblasti dutiny formy.



Obr. 57 – Návrh temperačního systému

Tab. 2 – Tvar a rozměry navrženého temperačního systému

Druh kanálu	Tvar - Průřez	Rozměr [mm]
Temperační okruh 1	kruh	$\varnothing D = 5$
Temperační okruh 2	kruh	$\varnothing D = 5$
Temperační okruh 3	kruh	$\varnothing D = 4$
Temperační okruh 4	kruh	$\varnothing D = 4$

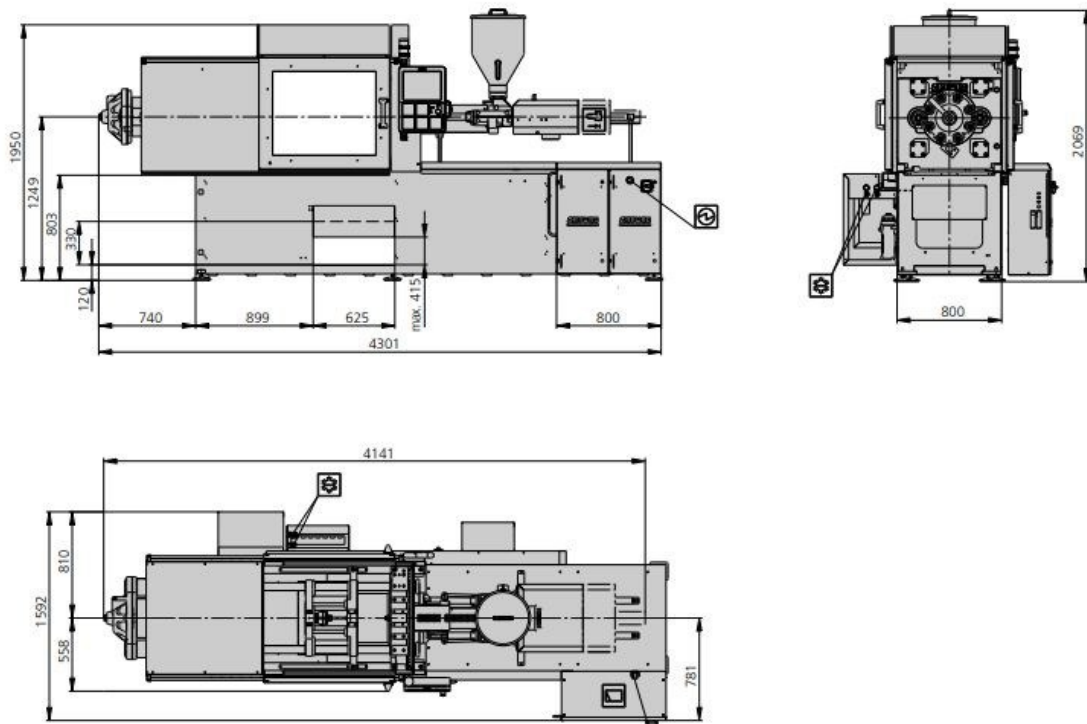
7 NASTAVENÍ PODMÍNEK VSTŘIKOVÁNÍ

Na základě předchozích předběžných analýz budou nastaveny konkrétní procesní podmínky jako je plnicí čas, fáze plnění a dotlaku atd. Dále bude zvoleno temperační médium na již konkrétní temperační systém, které bude systémem protékat.

7.1 Volba vstřikovacího stroje

Podle návrhu umístění součásti ve formě a návrhu vtokového a teperačního systému musí být určeny s určitou rezervou i rozměr formy. Rozměr formy je jedním ze zásadních parametrů při volbě vstřikovacího stroje. Z předchozích analýz lze vyčíst objem potřebného materiálu a potřebnou uzavírací sílu. Na základě těchto údajů se zvolí vstřikovací stroj. Protože není známa skutečná velikost formy, je třeba volit stroj s dostatečnou rezervou, a to hlavně rozměrem mezi sloupy.

Zvolený stroj pro analýzy je od firmy Arburg a konkrétně se jedná o stroj Allrounder 420 C 110 tons 6.1 oz (35mm). Tento vstřikovací stroj má rozměr mezi sloupy 420 mm, je schopen vstřikovat v jednom cyklu dávku o velikosti 144 cm^3 a maximální uzavírací síla je 100 tun.



Obr. 58 – Rozměry zvoleného vstřikovacího stroje [34]

Clamping unit		420 C GOLDEN EDITION		
with clamping force	max. kN	1000		
Opening force stroke	max. kN mm	250 500		
Mould height, fixed variable	min. mm	250 ---		
Platen daylight fixed variable	max. mm	750 ---		
Distance between tie bars (w x h)	mm	420 x 420		
Mould mounting platens (w x h)	max. mm	570 x 570		
Weight of movable mould half	max. kg	600		
Ejector force stroke	max. kN mm	40 175		
Dry cycle time EUROMAP 2	min. s - mm	1,8 - 294		

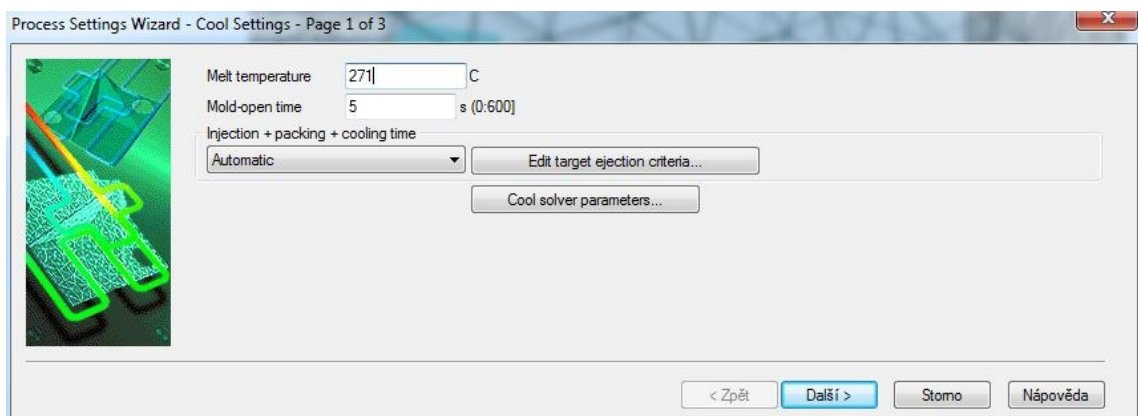
Injection unit		290		
with screw diameter	mm	30	35	40
Effective screw length	LD	23,3	20	17,5
Screw stroke	max. mm	150		
Calculated stroke volume	max. cm ³	106	144	188
Shot weight	max. g PS	97	132	172
Material throughput	max. kg/h PS	17	20,5	24,5
	max. kg/h PA6.6	8,5	10,5	12,5
Injection pressure	max. bar	2500	2000	1530
Holding pressure	max. bar	2500	2000	1530
Injection flow ²	max. cm ³ /s	102	140	182
Screw circumferential speed ²	max. m/min	46	54	62
Screw torque	max. Nm	320	380	430
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm	60 240		
Heating capacity zones	kW	6,4 5		
Feed hopper	l	50		

Obr. 59 – Technická data zvoleného vstřikovacího stroje [34]

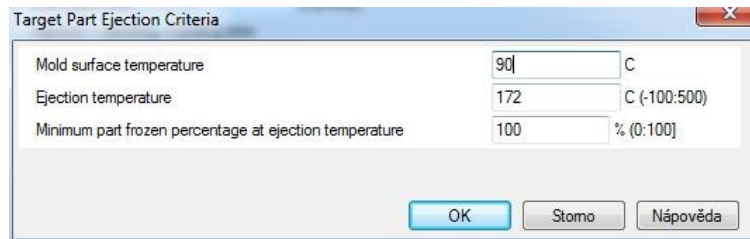
7.2 Procesní podmínky

Nastavení procesních podmínek probíhá především v závislosti na zvoleném materiálu. Materiál, ze kterého je vstřikována součást je PA6 plněný skelným vláknem. Každý materiál má doporučené hodnoty teploty taveniny, teploty povrchu formy (viz. 6.2 - Volba materiálu).

Samotné nastavení těchto podmínek má 3 kroky. V prvním kroku jde o nastavení teploty taveniny a doby otevření formy. Teplota taveniny zůstane ponechána jako výchozí podle zvoleného materiálu. Doba otevření formy byla zvolena na 5 sekund.

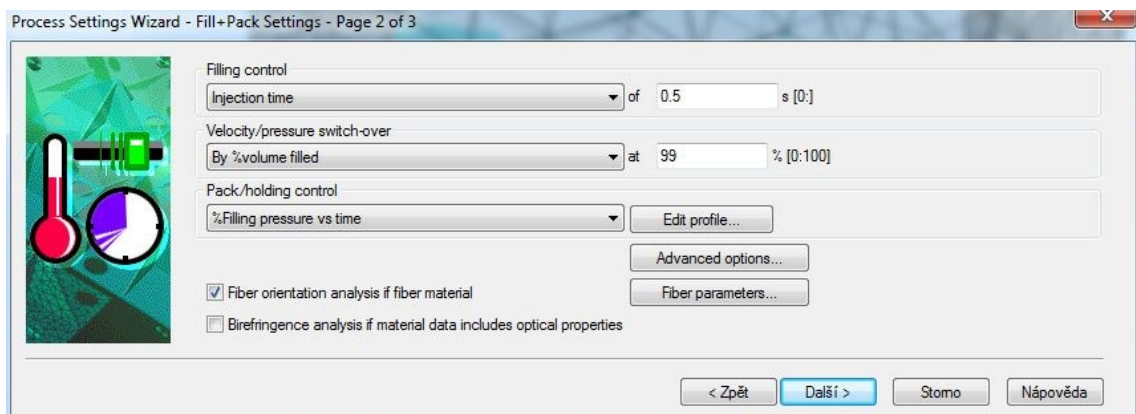


Obr. 60 – Nastavení teploty taveniny a doby otevření formy

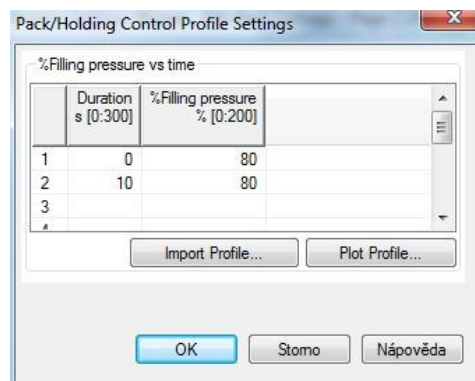


Obr. 61 – Cílová kritéria pro vyhazování

Druhá část nastavení procesních parametrů se zabývá nastavením času plnění, přepnutím z fáze plnění na dotlak a fází dotlaku. Doba plnění lze ponechat v automatickém režimu. V předběžných analýzách byla doba plnění vypočtena přibližně na 0,3 sekund. S určitou rezervou tak bude nastavena doba plnění na 0,5 sekundy. Nastavení hodnoty přepnutí z plnění na dotlak lze také ponechat v automatickém režimu. Na základě předběžných analýz bude nastaveno přepnutí na dotlak při 99 % zaplnění dutiny formy.

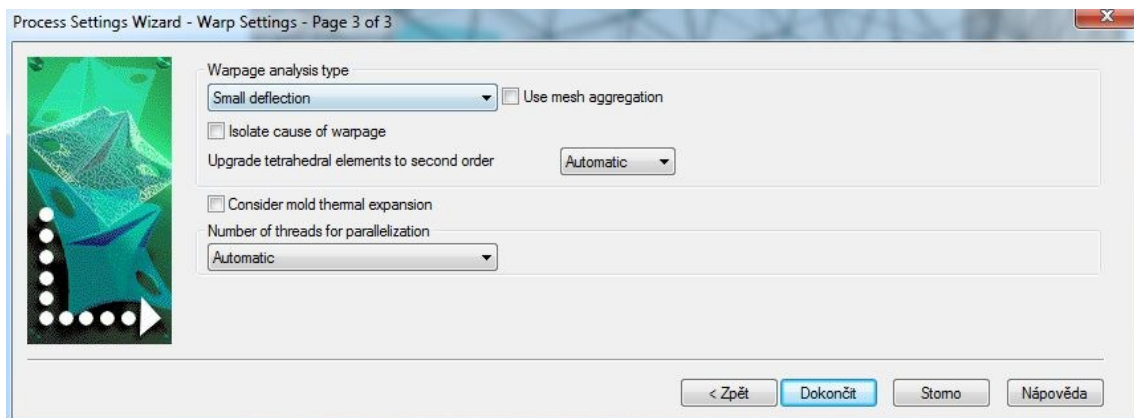


Obr. 62 – Nastavení vstřikovacího času a fáze dotlaku



Obr. 63 – Nastavení kontrolního profilu dotlaku

Ve třetí části nastavení procesních podmínek lze nastavit typ analýzy deformace a možnost zvolit izolovat příčiny deformace. Také je možnost vzít v úvahu tepelnou roztažnost formy.



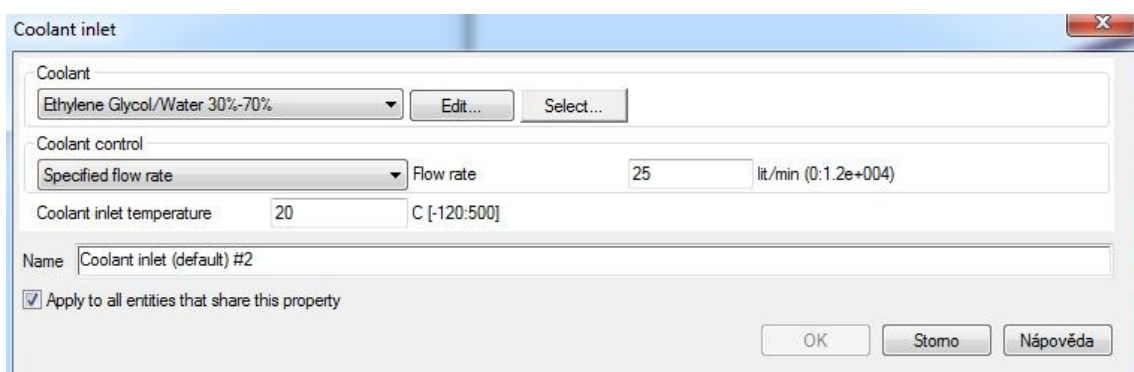
Obr. 64 – Nastavení analýzy deformace a teplotní roztažnosti formy

Takto nastavené procesní podmínky budou brány jako výchozí pro následující analýzy. Změnou určitých parametrů lze docílit optimalizace procesu vstřikování.

7.3 Temperační systém

V temperačním systému bude použito médium, které obsahuje 70 % vody a 30 % ethyleneglykol. Toto médium má výhodu, že zamezuje korozi temperačního systému. Nevýhodou však může být v případě úniku média kontaminace okolí. Je nutná jeho ekologická likvidace.

Jako výchozí podmínky pro temperaci je nastavena teplota na 20 °C ve všech okruzích a průtok média 25 l/min v okruzích 1 a 2 a 35 l/min v okruzích 3 a 4.



Obr. 65 – Nastavení temperace v okruhu 1 a 2

Coolant inlet ☒

Coolant
Ethylene Glycol/Water 30%-70% Edit... Select...

Coolant control
Specified flow rate Flow rate 35 lit./min (0:1.2e+004)

Coolant inlet temperature 20 C [-120:500]

Name Coolant inlet (default) #3

Apply to all entities that share this property

OK Storno Nápověda

Obr. 66 – Nastavení teploty v okruhu 3 a 4

8 ANALÝZA Č. 1 VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI

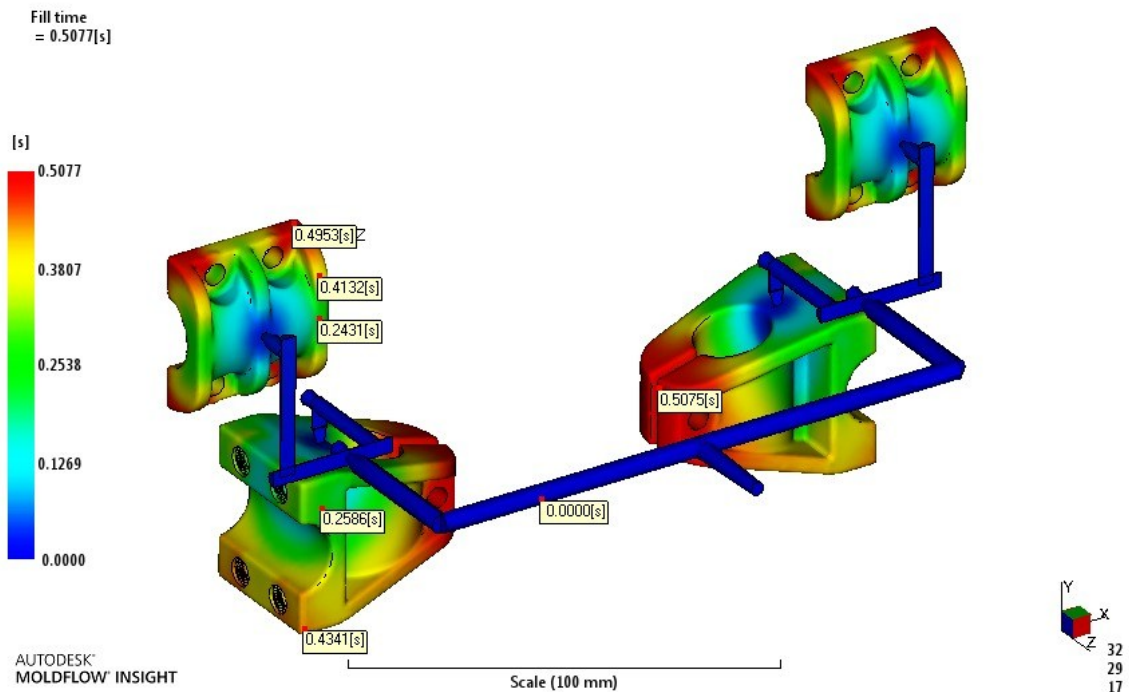
V této kapitole se budeme věnovat vyhodnocení první analýzy navrhované vstřikované součásti. Analýza byla provedena softwarem Autodesk Moldflow Synergy 2016. Ve vyhodnocení budou zpracovány tyto výsledky:

- čas plnění,
- teplota taveniny,
- maximální uzavírací síla
- čas potřebný pro vyhazování,
- teplota temperačního média,
- účinnost odvodu tepla temperačního okruhu,
- celková deformace,
- propadliny,
- studené spoje.

Výše vypsané výsledky analýzy se nejvíce týkají problému navrhování a konstrukce vstřikovaných součástí. Proto budou následně zhodnoceny a bude navržena jejich změna pro optimalizaci jak samotné součásti, tak i procesu vstřikování. Optimalizace bude použita v následující analýze.

8.1 Čas plnění

Při nastavení procesních podmínek byl nastaven čas plnění. Tento čas byl zvolen na hodnotu 0,5 sekundy na základě předběžných analýz, které ukazovali potřebný čas 0,3 sekundy pro zaplnění především levé části vstřikované součásti. V analýze lze pozorovat barevné schéma postupného plnění dutiny formy v závislosti na čase.

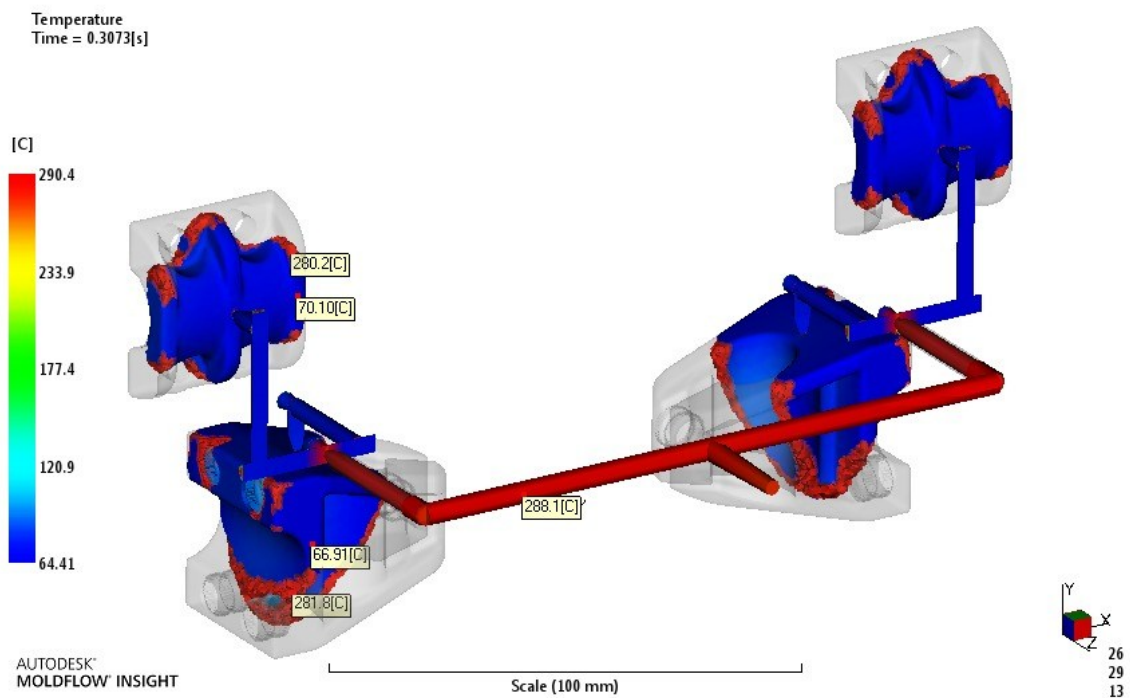


Obr. 67 – Čas plnění

Z výsledku analýzy lze pozorovat poměrně rovnoměrně zaplnění všech dutin formy. Plnění dutin formy je tak vyvážené. Rozdíl v plnění dutin formy pro levou a pravou část součásti je přibližně 0,01 sekundy, což s časem plnění 0,51 sekund je zanedbatelná hodnota. Navržení vtokového systému vzhledem k plnění formy je takto v pořádku.

8.2 Teplota taveniny

Během plnění dutiny taveninou lze vidět, jak se mění její teplota. Tavenina po kontaktu s dutinou formy, by měla být určitou rychlostí a pozvolna ochlazována. Takové řízené chlazení je možné docílit správně navrženým temperačním systémem.

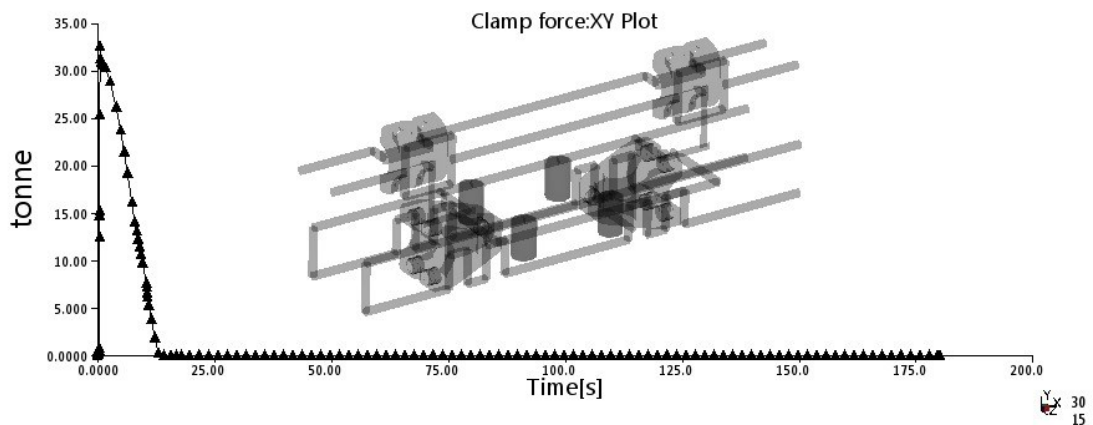


Obr. 68 – Teplota taveniny během plnění dutiny formy

Zde na obrázku 68 je teplota taveniny v průběhu plnění dutiny formy. V nastavené teploty vstřikování 271 °C se teplota nejprve zvýšila v horkém rozvodném bloku na teplotu 288 °C a poté ve studených rozvodných kanálech a dutině formy skokově spadla na teplotu kolem 70 °C přesto, že v procesních podmínkách je teplota formy nastavena na 90 °C. Tato analýza vypovídá o tom, že chlazení není nastaveno správně. Zřejmě bude třeba zvýšit teplotu temperačního média, a jelikož je třeba dosáhnout teploty kolem 90 °C, bude vhodné změnit i médium na olej.

8.3 Maximální uzavírací síla

Hodnota maximální velikosti uzavírací síly je jeden ze základních parametrů při výběru vstřikovacího stroje. Pokud by zvolený stroj nedokázal vyvinout dostatečný tlak, tak by mohlo dojít k pootevření formy během cyklu, což by mělo za následek přetoky a výrobek by neměl svůj výsledný tvar.

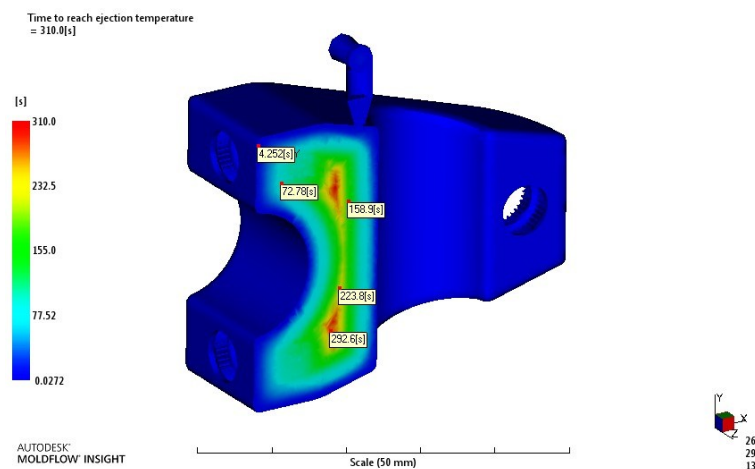


Obr. 69 – Maximální uzavírací síla

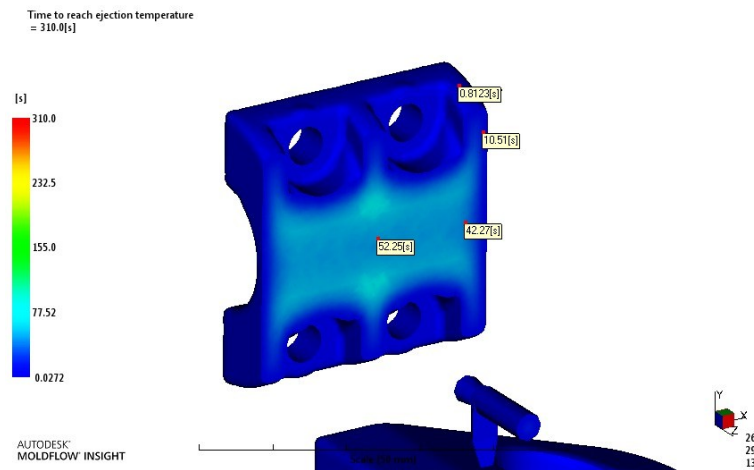
Dle analýzy je maximální hodnota uzavírací síly asi 33 tun. Navrhovaný vstřikovací stroj Allrounder 420 C 110 tons 6.1 oz (35mm) má maximální uzavírací sílu podle parametrů softwaru Moldflow necelých 100 tun. Tento stroj má tak dostatečnou uzavírací sílu.

8.4 Čas potřebný pro vyhazování

Toto je čas, za který je možné bezpečně vyhazovat součást v jakémkoliv jeho místě, aniž by došlo k poškození nebo k promáčknutí. Barevná škála opět znázorňuje, ve kterém místě je tento čas kratší nebo naopak delší. Díky této analýze lze výrazně zkrátit cyklus a to tak, že se určí nejvhodnější místo pro umístění vyhazovačů. Není třeba striktně dodržovat čas, který tento výsledek stanoví, ale je třeba dodržovat určité zásady procesu vstřikování.



Obr. 70 – Čas potřebný pro vyhazování – levá část



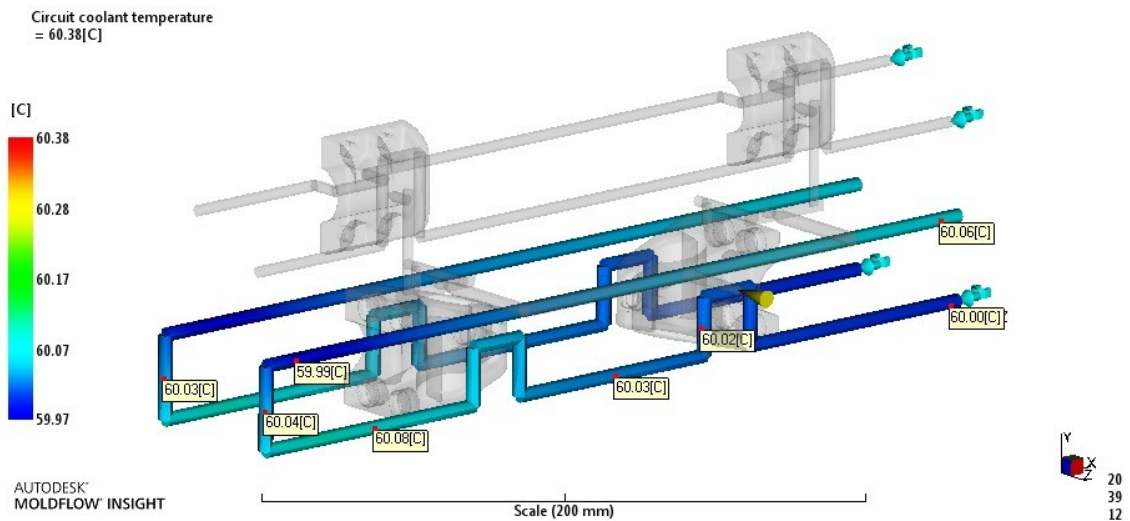
Obr. 71 – Čas potřebný pro vyhazování – pravá část

Na dvou obrázcích s použitím řezů lze vidět, v jakém čase je dosaženo nastavené vyhazovací teploty 172 °C. Na povrchu součásti je této teploty dosaženo během několika sekund. Nicméně aby se součást ochladila na tuto teplotu v celém objemu, je potřeba až 310 sekund.

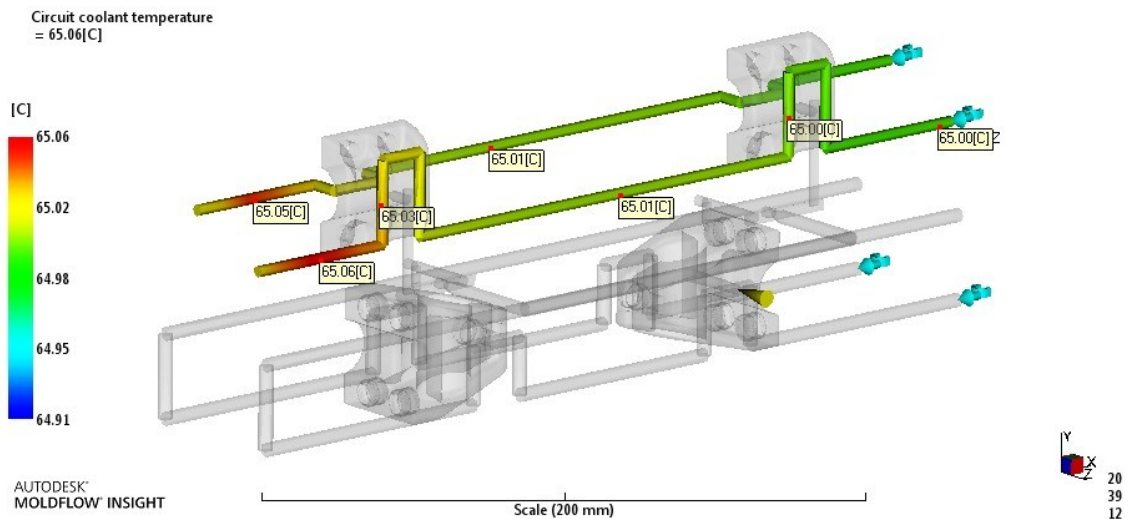
Není zcela nutné, aby se dodržel tento čas. Je třeba ale myslet na to, jaký má chlazení vliv na vstříkovanou součást, především z hlediska smrštění a deformace. Proto by bylo vhodné dobu chlazení nastavit přibližně na 150 sekund, což je přibližně zelená oblast, z původních 310 sekund. Bude tak zajištěno, aby nedošlo k poškození povrchu při vyhazování, a po vyjmutí z formy bude součást povolna dochlazena na vzduchu.

8.5 Teplota temperačního okruhu

Podle návrhu je temperační okruh rozdělen do 4 samostatných okruhů. Temperačním médiem je voda mísená s ethylenglykolem. Tato analýza ukazuje, jak se mění teplota média protékající temperačním systémem.



Obr. 72 – Teplota temperačního okruhu 1 a 2

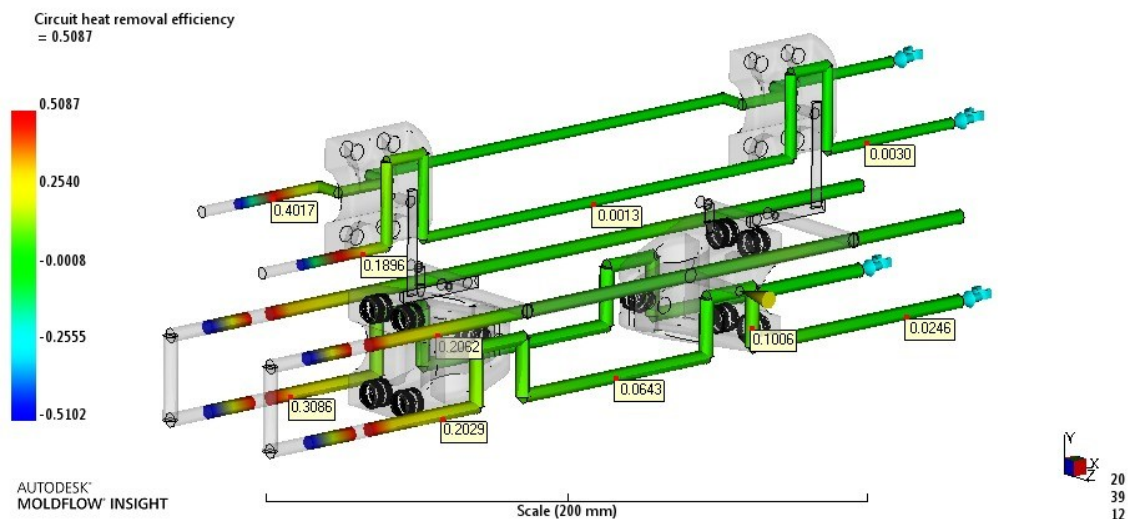


Obr. 73 – Teplota temperačního okruhu 3 a 4

Z analýzy lze vidět, že rozdíl teploty na vstupu, výstupu a vlastně i v celém systému se téměř nemění. Celkový rozdíl teplot ve všech okruzích je v řádech setin °C. Z tohoto hlediska je temperační systém v pořádku.

8.6 Účinnost odvodu tepla temperačního systému

V této analýze lze pozorovat, ve kterých místech temperačního systému je účinnost odvodu tepla a tedy chlazení nejefektivnější. Na stupnici jsou zaznamenány hodnoty od -1 do +1. Spodní hranice znamená, že temperační systém předává své teplo do okolí formy. Naopak horní hranice, na které nám více záleží, značí účinnost odvodu tepla z formy.



Obr. 74 – Účinnost odvodu tepla temperačního systému

Pro lepší znázornění bylo rozmezí hodnot účinnosti omezeno na hodnoty od -0,5 do +0,5. I tak je ale možné vidět, že v převážné většině temperačního systému se účinnost pohybuje od 0 do 0,1. Jinak řečeno, účinnost odvodu tepla v těchto místech je přibližně 10 %. Podle obrázku jsou v temperačním systému i místa, kde se dostává účinnost i přes hodnotu +0,5 (vynechané místo mezi červenými oblastmi), nicméně tato místa jsou zcela mimo dutinu formy, odkud potřebujeme odvádět teplo. Tyto místa jsou tedy bezvýznamné.

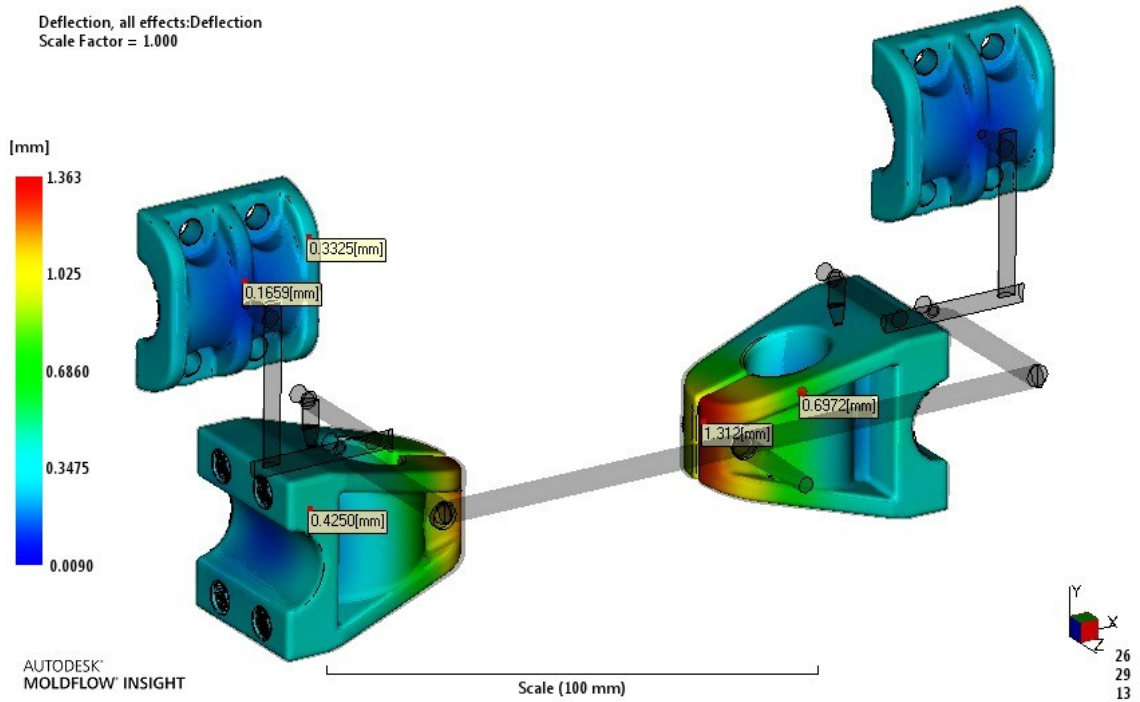
Místa na obrázku označena modrou barvou jsou záporné hodnoty účinnosti odvodu tepla. Znamená to, že temperační systém naopak předává teplo do okolí formy, resp. forma ochlazuje temperační systém.

Z této analýzy lze soudit, že odvod tepla a tedy chlazení není příliš účinné. Účinnost odvodu tepla přibližně 10 % není optimální. Jelikož chlazení má významný vliv na kvalitu a vlastnosti vstříkované součásti, bude nutné pro další analyzování přepracovat temperační systém přepracovat a především upravit procesní podmínky pro chlazení.

8.7 Celkové deformace všech efektů

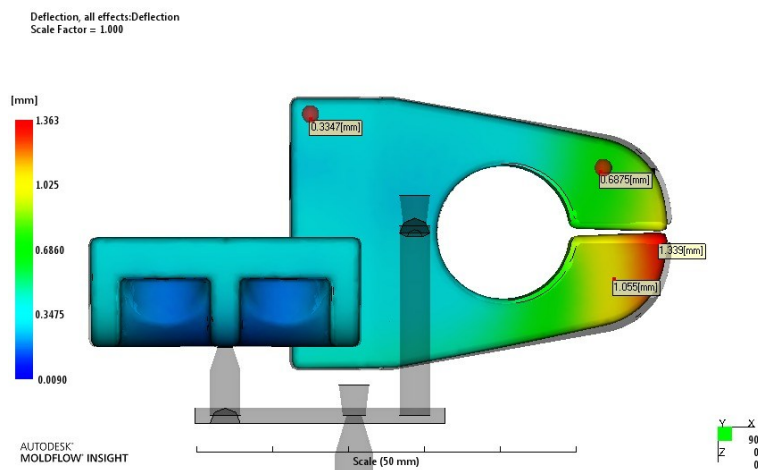
Tato analýza zobrazuje celkové deformace na výrobku, vzniklé působením všech vlivů, které na něj působí během celého procesu vstříkovaní. Deformaci ovlivňuje několik efektů jako například vliv smrštění materiálu, vliv chlazení nebo v našem případě přítomnost

vyztužujícího plniva v podobě skelných vláken. Největší podíl na deformaci má právě smrštění.



Obr. 75 – Celkové deformace všech efektů

Z analýzy deformace lze pozorovat, jak se součást deformuje. Co se týká pravé části součásti, jsou deformace poměrně rovnoměrné a nejsou ani příliš velké. Na rozdíl levá část má poměrně velké deformace v oblasti, kde je umístěna závitová vložka. Tato část má sloužit jako pružná svěrka. Deformace dosahuje hodnoty 1,3 mm, což způsobuje vyosení závitové vložky oproti průchozí díře.



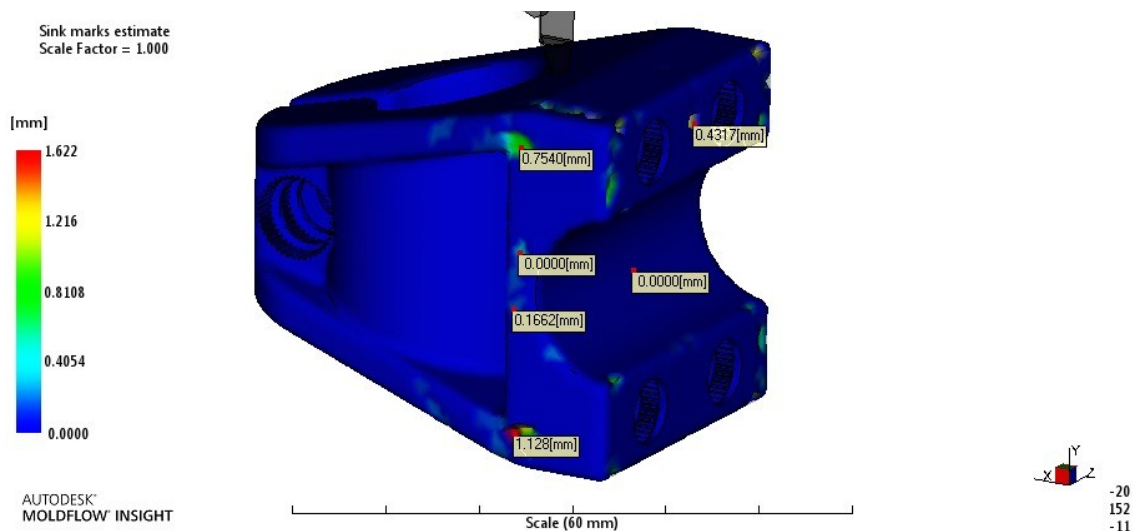
Obr. 76 – Detail deformace součásti

V detailu lze vidět, že deformace dosahuje hodnoty 1,3 mm. Po deformaci se jedna půlka téměř dotýká druhé. Je možné si všimnout, že půlka kde je pouze průchozí díra, se deformuje víc, než půlka kde je zastříknuta závitová vložka. Tato závitová vložka zřejmě částečně vyztužuje součást. Je ale vyrobena z mosazi, tudíž může také odvádět z tohoto místa teplo a deformace jsou tak menší.

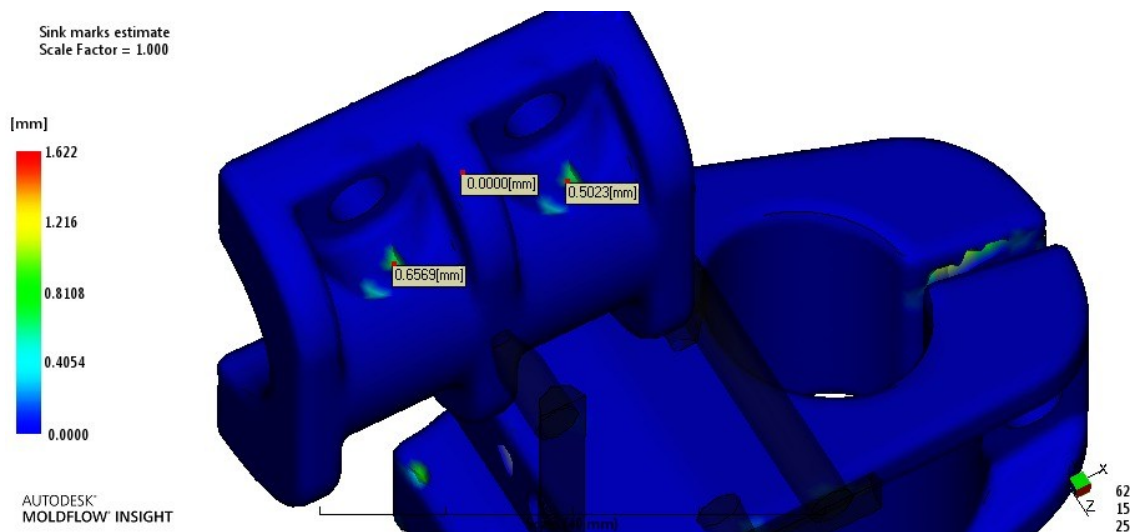
Na tuto deformaci může mít především vliv nevhodně navržená temperace, jak bylo zjištěno v předchozí kapitole. Proto bude nutné při optimalizaci temperace se soustředit na tuto oblast a vhodnou úpravou se snažit docílit menších deformací.

8.8 Propadliny

Propadliny jsou vady především vzhledu. V této analýze je možné pozorovat, ve kterých místech tyto vady vznikají. Tato vada vzniká především v místech, kde je velká tloušťka materiálu a na základě této analýzy můžeme tyto místa odhalit.



Obr. 77 – Propadliny na levé části

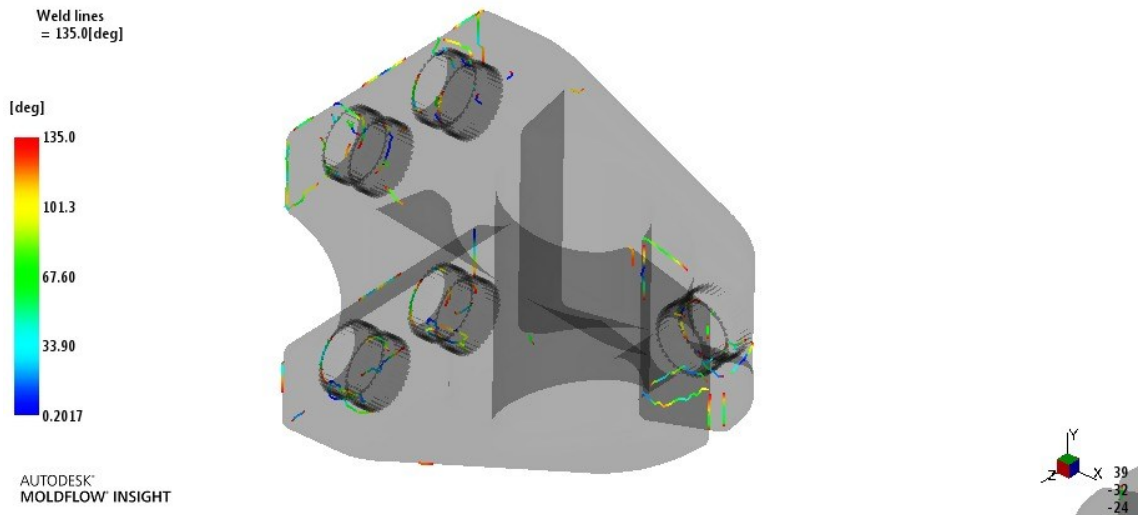


Obr. 78 – Propadliny na pravé části

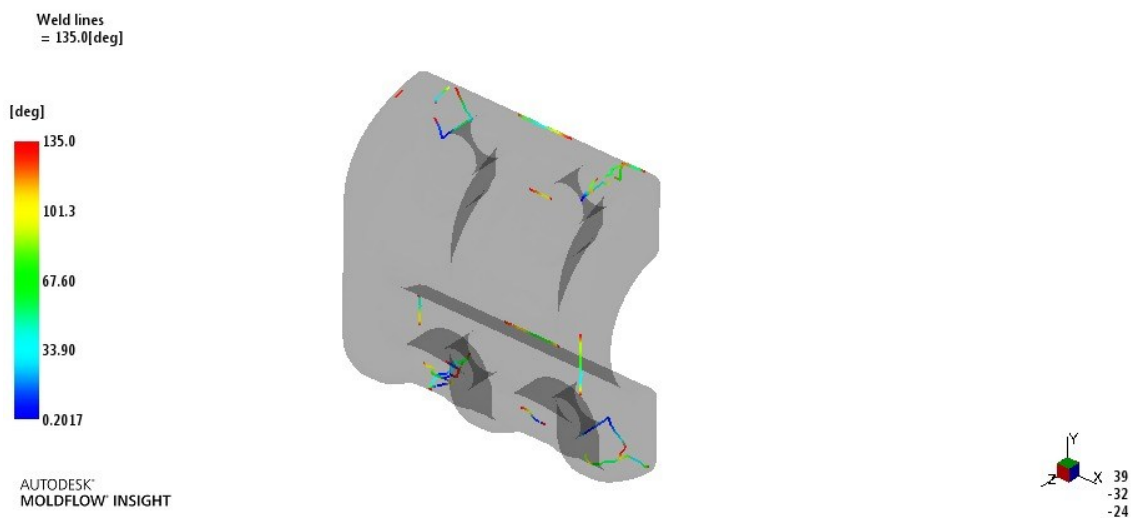
Propadliny se vyskytly na místech, které pro funkčnost dílu nemají vliv. To jsou místa, kde se stýká trubka rám motocyklu nebo nosiče s touto součástí. Na většině míst jsou to propadliny menší než 1 mm. Bylo by na zvážení, zda se je snažit eliminovat, nebo ponechat. Ovšem na levé části součásti se vyskytuje místo s propadlinou kolem 1,5 mm. Propadlina není nijak rozsáhlá. Je spíše víc hluboká než široká. Takové místa už je třeba odstranit především z důvodu koncentrace napětí a možného vzniku trhlin.

8.9 Studené spoje

Tato analýza odhaluje místa studených spojů. Ty vznikají v místech, kde se potkávají dvě čela taveniny. V některých místech se tomuto jevu nevyhneme. Je pak na posouzení, zda v daném místě bude mít vliv na vlastnosti součásti z hlediska mechanických nebo i estetických.



Obr. 79 – Studené spoje na levé části



Obr. 80 – Studené spoje na pravé části

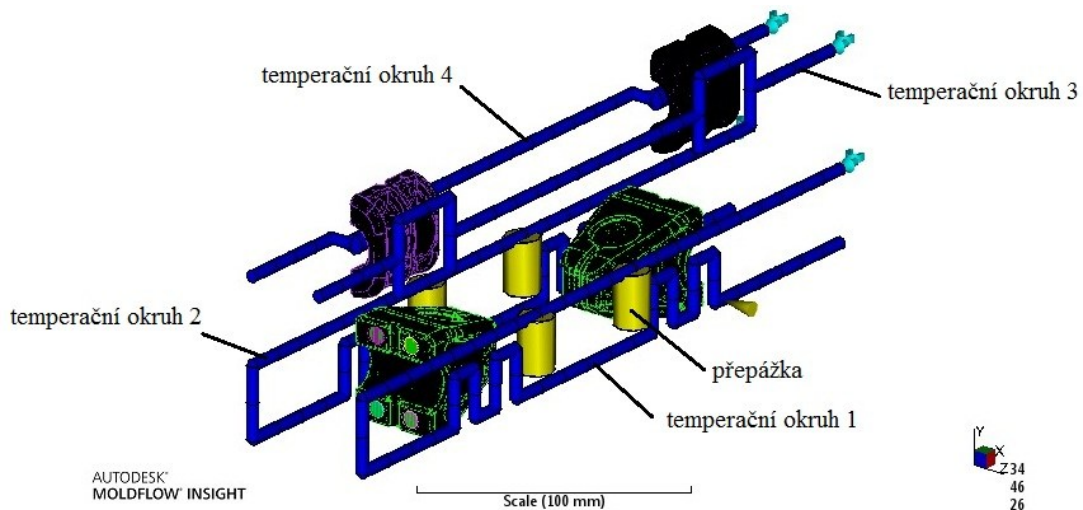
Z analýzy lze pozorovat, že opravdu studené spoje vznikly v místech, kde tavenina obchází díry a následně se spojuje. Také vznikly mnohočetné studené spoje kolem závitové vložky. Co je důležité, žádné studené spoje nevznikají na mechanicky namáhaných částech. Jsou to plochy, kde bude součást svírat rám motocyklu nebo nosiče. Pokud by zde vznikaly studené spoje, velmi pravděpodobně by mohlo dojít v tomto místě k prasknutí.

9 ANALÝZA OPTIMALIZACE VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI

Návrh optimalizace součásti bude především za účelem odstranit nedostatky v předchozí analýze. Půjde o změnu temperačního systému, který byl z hlediska jeho účinnosti navržen nedostatečně. Také bude nutné změnit temperační médium a podmínky teploty. Dále bude provedena změna v konstrukci vstřikované součásti, aby se eliminovaly především vady, jako jsou propadliny.

9.1 Optimalizace temperačního systému

V předchozí analýze bylo zjištěno, že temperační systém je nevyhovující. Bude tedy provedena jeho optimalizace.



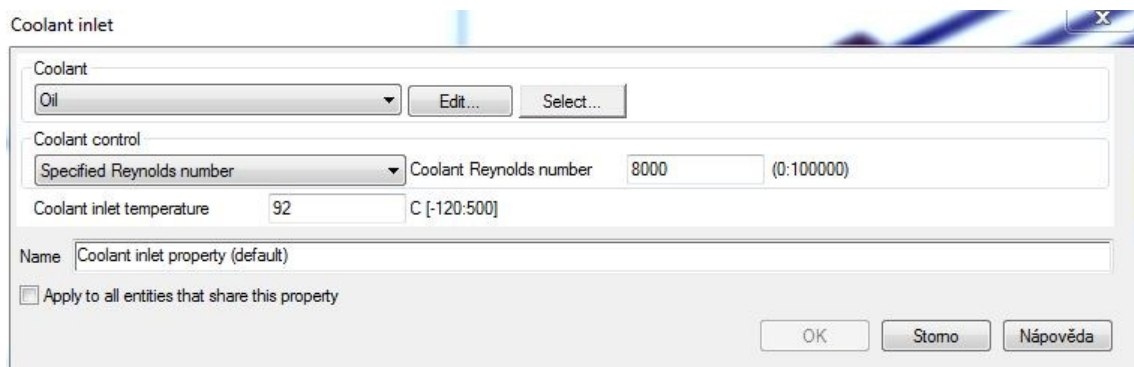
Obr. 81 – Optimalizovaný temperační systém

Temperační systém byl přepracován. V okruzích 1 a 2 byla přidána jedna smyčka a také kanál s přepážkou o průměru 14 mm. U temperačního okruhu 3 byla změněna geometrie a v okruhu 4 byl změněn průměr ze 4 mm na 5 mm. V místě, kde je kanál nejbližší součásti, byl ještě zvětšen na průměr 8 mm.

Tab. 3 – Tvar a rozměry optimalizovaného temperačního systému

Druh kanálu	Tvar - Průřez	Rozměr [mm]
Temperační okruh 1	kruh	$\varnothing D = 5$
Temperační okruh 2	kruh	$\varnothing D = 5$
Přepážka	kruh	$\varnothing D = 14$
Temperační okruh 3	kruh	$\varnothing D = 5$
Temperační okruh 4	kruh	$\varnothing D = 5; \varnothing D = 8$

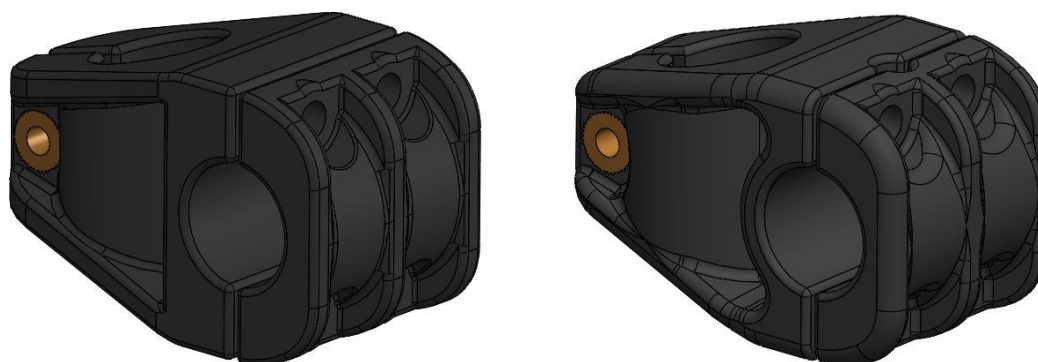
Byly provedeny také změny procesní podmínek temperačního systému. Hlavní změnou je použití oleje jako temperačního média. Olej musí mít teplotu přibližně o 2 – 5 °C vyšší, než má být teplota formy. Dle zvoleného materiálu je tato teplota 90 °C. Nastavená teplota pro olej je 92 °C. Proudění média by mělo být turbulentní. Proto na místo průtoku v litrech za minutu bude nastavena hodnota Reynoldsova čísla na 8000.



Obr. 82 – Optimalizované procesní podmínky temperačního systému

9.2 Optimalizace konstrukce součástí

Pro zlepšení tečení materiálu jsou na součásti upraveny všechny rádiusy. Také boční vybrání na levé části součásti bylo upraveno, aby se ubralo materiálu v místě, kde předchozí analýza ukazovala místa se značnými propadlinami. Propadliny se vyskytovaly i v místě mezi závitovými vložkami, proto zde bylo přidáno vybrání, aby se také ubralo materiálu. Pravá část součásti zůstala téměř nezměněna, pouze byly upraveny rádiusy jako na levé části.



První návrh součásti

Optimalizovaný návrh součásti

Obr. 83 – Porovnání původního a optimalizovaného návrhu součásti



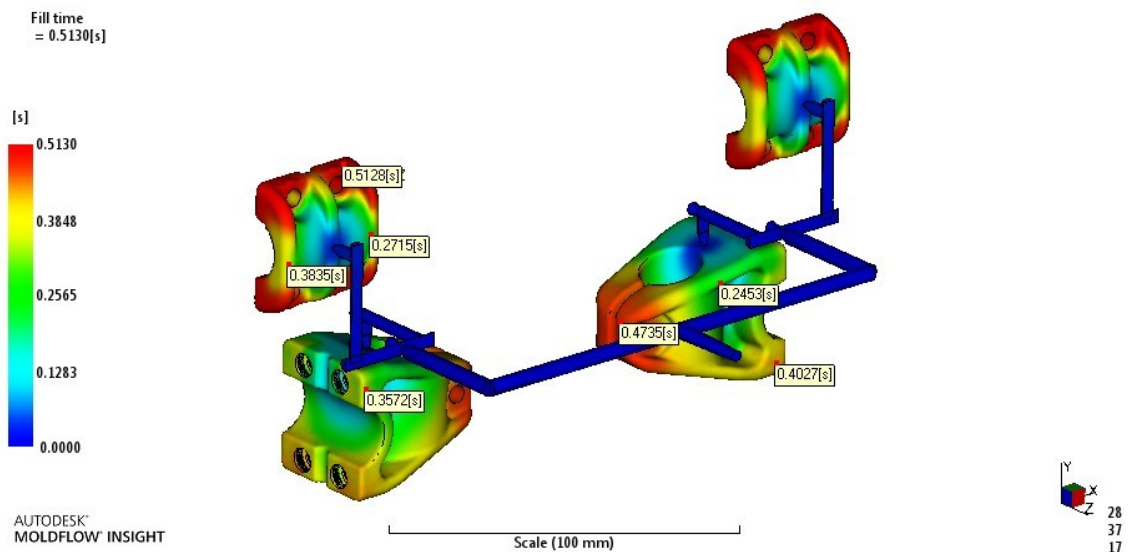
Obr. 84 – Místa na součásti podrobené optimalizaci

Na obrázku 84 jsou znázorněna místa, která byla opravena během optimalizace. V oblasti 1 se jednalo o rozšíření vybrání. Toto vybrání více kopíruje plochu, která slouží k uchycení na rám motocyklu. V této oblasti jsou také vyznačena dvě místa, ve kterých byly analýzou vyznačeny místa s největšími propadlinami. Tímto vybráním by mělo dojít k jejich odstranění. V oblasti 2 bylo přidáno zaoblení, aby došlo ke zlepšení zatékání materiálu. Ze stejného důvodu bylo provedeno v oblasti 3. V oblasti 4 bylo přidáno opět vybrání z důvodu vzniku propadliny a také aby došlo ke zlepšení zatečení materiálu mezi závitové vložky. Na celé součásti pak byly upraveny rádiusy a především ty vnější, které se zvětšily z 1 mm na 3 mm.

9.3 Analýza optimalizované součásti

V této analýze budou zkoumány především výsledky, které měli být optimalizací zlepšeny. Půjde o výsledky času plnění, deformací, účinnosti temperačního systému a povrchových vad.

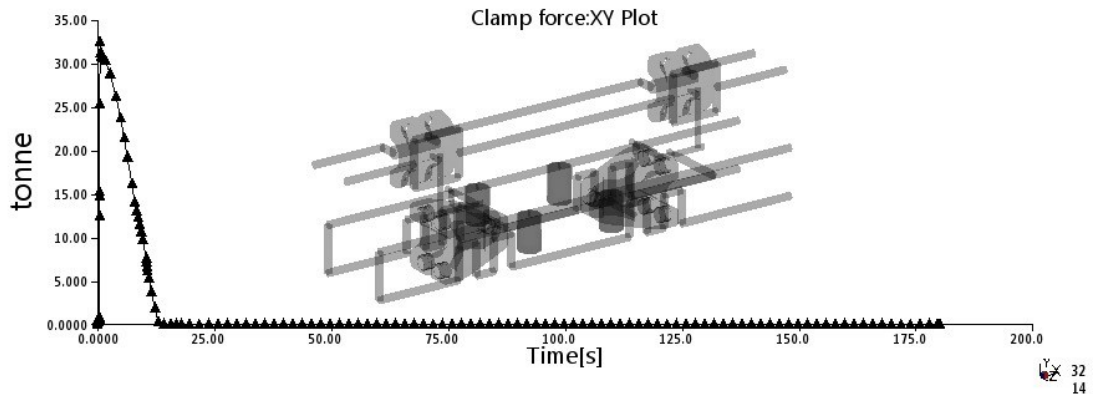
9.3.1 Čas plnění optimalizované součásti



Obr. 85 – Čas plnění optimalizované součásti

Po úpravě temperačního systému, podmínek teploty a konstrukce součásti je nutné nejprve zkontrolovat čas plnění dutiny formy. Vždy by mělo být zajištěno vyvážené plnění. V porovnání s předchozí analýzou lze vidět, že nyní dochází nejdříve k zaplnění levých částí součásti. Časový rozdíl v zaplnění dutin levé a pravé části je však stále malý a nepředstavuje žádné riziko. K doladění a vyvážení plnění by stačilo mírně změnit rozvodné kanály.

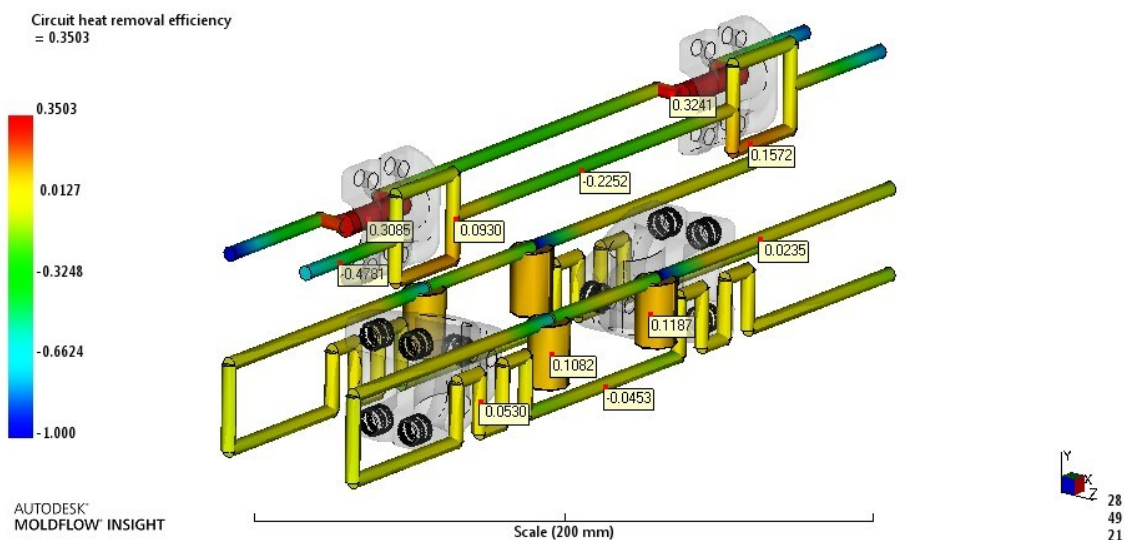
9.3.2 Maximální uzavírací síla



Obr. 86 – Maximální uzavírací síla

Z obrázku maximální uzavírací síly lze vidět, že optimalizace součásti a temperačního systému neměla nijak významný vliv na potřebnou maximální uzavírací sílu. Uzavírací síla tak zůstává přibližně 33 tun.

9.3.3 Účinnost odvodu tepla optimalizovaného temperačního systému

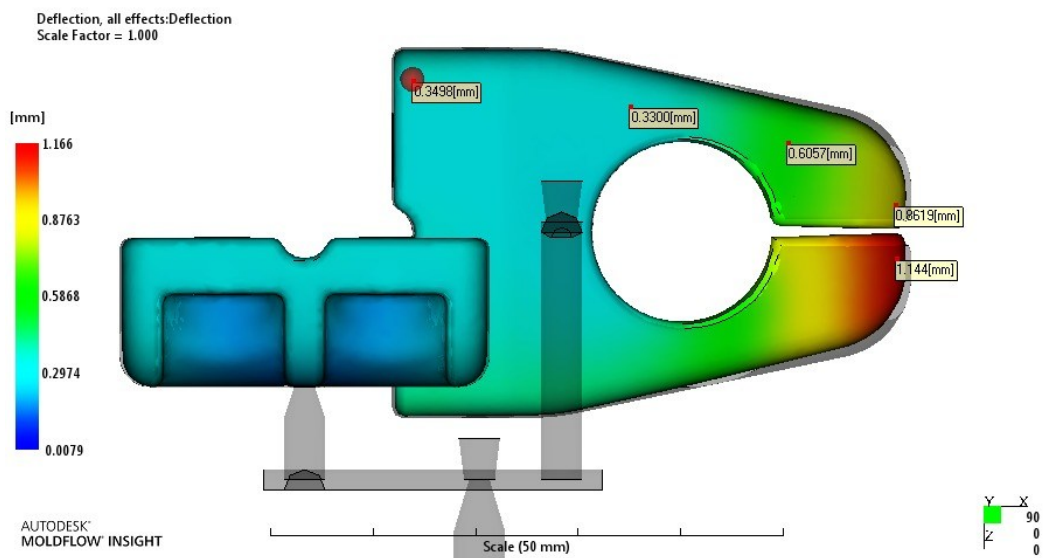


Obr. 87 – Účinnost odvodu tepla optimalizovaného temperačního systému

Po optimalizaci se účinnost odvodu tepla zlepšila. Především v oblastech dutiny formy je účinnost lepší. Nejvíce se změnila v oblasti pravé části součásti, kde byl změněn průměr kanálu na 8 mm. Tady se účinnost zvedla až na 35 %. Proto by byla vhodná ještě jedna

optimalizace, ve které by se změnily průměry kanálů, které jsou v těsném kontaktu s dutinou formy.

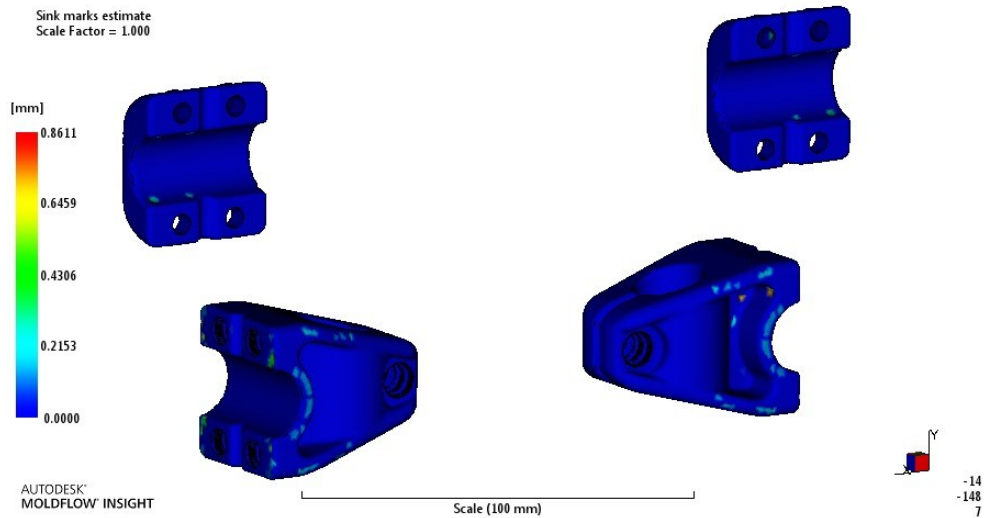
9.3.4 Celkové deformace všech efektů na optimalizované součásti



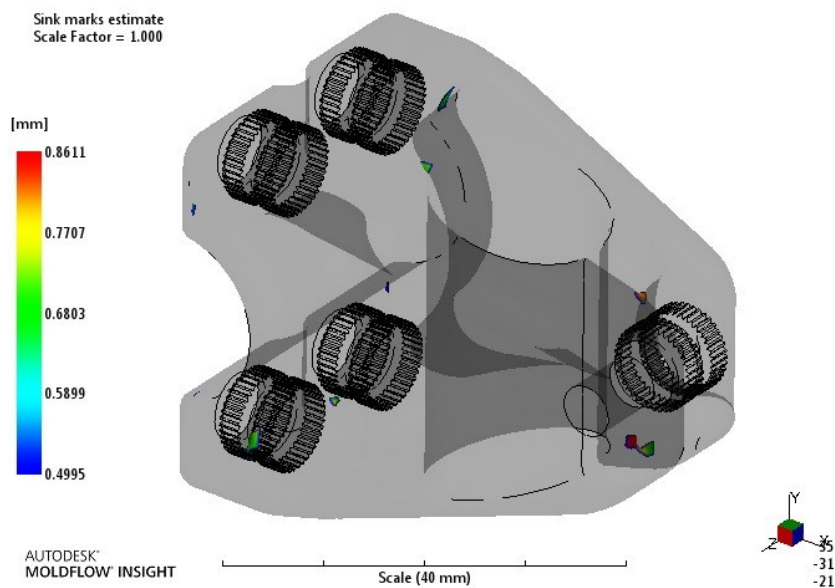
Obr. 88 – Celkové deformace všech efektů po optimalizaci

Po optimalizaci lze vidět, že i deformace se zlepšily. Nicméně pravá strana levé části se stále deformuje více, než levá strana. Stále tak bude díra pro šroub vyosena oproti závitové vložce. Tady by bylo třeba další optimalizace, ale pouze na té straně, kde se součást deformuje více. Cílem další optimalizace by bylo dosáhnout stejné deformace na obou stranách.

9.3.5 Propadliny na optimalizované součásti



Obr. 89 – Propadliny na optimalizované součásti



Obr. 90 – Propadliny na optimalizované levé části součásti

Při optimalizaci součásti bylo cílem odstranit kritické propadliny. Na této analýze lze vidět, že propadliny v maximální hodnotě se zmenšili o téměř polovinu. V detailu na obrázku 90 pak lze vidět propadliny s rozptylem od 0,5 do 0,8 mm. Vyskytují se opravdu minimálně a jsou na místech, kde nemají na funkci vliv a nevádí ani z hlediska estetiky. Tato optimalizace součásti a procesních podmínek byla prospěšná na eliminaci propadlin.

9.4 Zhodnocení optimalizace součásti

Na základě analýzy č. 1 byla přepracována vstříkovaná součást a také temperační systém. Ten má nyní jinou geometrii a přibyl v něm prvek přepážky. Temperačním médiem oproti analýze č. 1 byl použit olej.

Po vyhodnocení optimalizace analýzy lze konstatovat, že se podařilo zlepšit chlazení formy a především zvýšit účinnost odvodu tepla z oblasti dutiny formy. Přepracováním konstrukce součásti se podařilo snížit celkové deformace a také částečně eliminovat vady propadlin.

10 ANALÝZA Č. 2 VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI

Tato analýza bude vycházet z analýzy č. 1. Pouze dojde ke změně materiálu. Na optimalizovanou součást a temperační systém bude aplikován jiný materiál.

Všechny ostatní parametry analýzy včetně geometrie vtokového a temperačního systému zůstanou stejné, jako byli při poslední optimalizaci. Změní se jen procesní podmínky závislé na materiálu a to jak teploty taveniny, tak teplota formy, temperačního média a vyhazovací teploty.

10.1 Volba materiálu

Zvolený materiál je POM (Polyoxymethylen). Jedná se o semykrystalický materiál, který se také poměrně hodně používá pro technické díly, které mají být pevné a mají odolávat mechanickému namáhání. Konkrétně se jedná o materiál POM plněný 25 % skelným vláknem.

Thermoplastics material				
	Microcellular Properties	Optical Properties	Environmental Impact	Quality Indicator
Description	Recommended Processing	Rheological Properties	Thermal Properties	pvT
Family name	ACETALS (POM)			
Trade name	Generic POM (+ fiber)			
Manufacturer	Generic Shrinkage Characterised Material			
Link				
Family abbreviation	POM			
Material structure	Crystalline			
Data source	Autodesk Moldflow Plastics Labs : pvT-Measured : mech-Measured			
Date last modified	31-JAN-12			
Date tested	30-JAN-12			
Data status	Non-Confidential			
Material ID	14998			
Grade code	CM14998			
Supplier code	GENERIC			
Fibers/fillers	25% Glass Fiber Filled			

Obr. 91 – Popis zvoleného materiálu pro analýzu č. 2

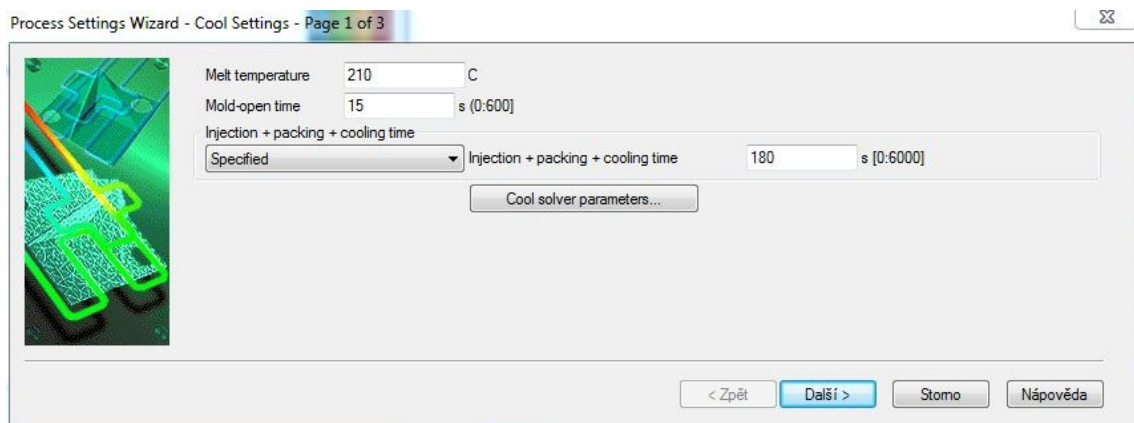
Description	Recommended Processing	Rheological Properties
Mold surface temperature	100	C
Melt temperature	210	C
Mold temperature range (recommended)		
Minimum	80	C
Maximum	120	C
Melt temperature range (recommended)		
Minimum	190	C
Maximum	230	C
Absolute maximum melt temperature	250	C
Ejection temperature	137	C
Maximum shear stress	0.45	MPa
Maximum shear rate	40000	1/s

Obr. 92 – Doporučené teploty pro zpracování

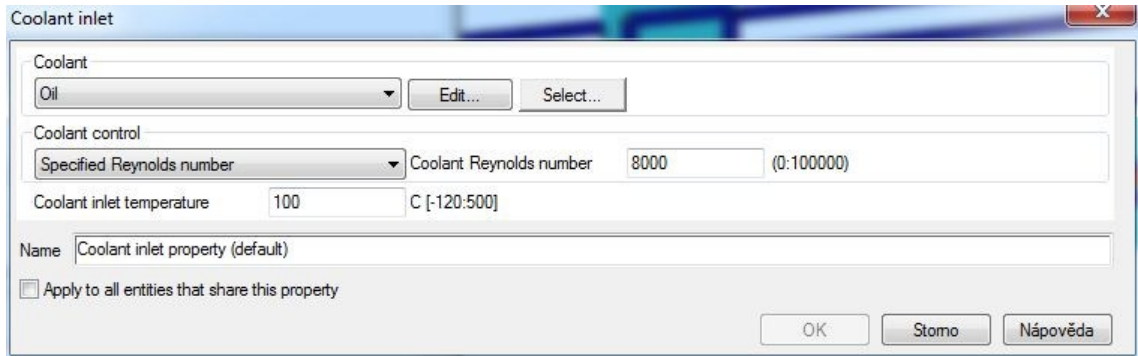
10.2 Procesní podmínky pro analýzu č. 2

Procesní podmínky vstřikování jsou samozřejmě jiné pro každý materiál. Podle zvoleného materiálu a doporučených teplot pro zpracování, které jsou uvedeny na obr. 92, dojde k úpravě i podmínek vstřikování. V tomto případě se jedná pouze o změnu teploty taveniny na 210 °C, teploty pro vyhazování a teploty temperačního média na 100 °C kvůli jiné doporučené teplotě formy.

Volba vstřikovacího stroje zůstává stejná, i jeho parametry a vlastnosti. Objem vstřikovaného materiálu zůstává stejný a zvolený materiál lze použít na takto konfigurovaném stroji.

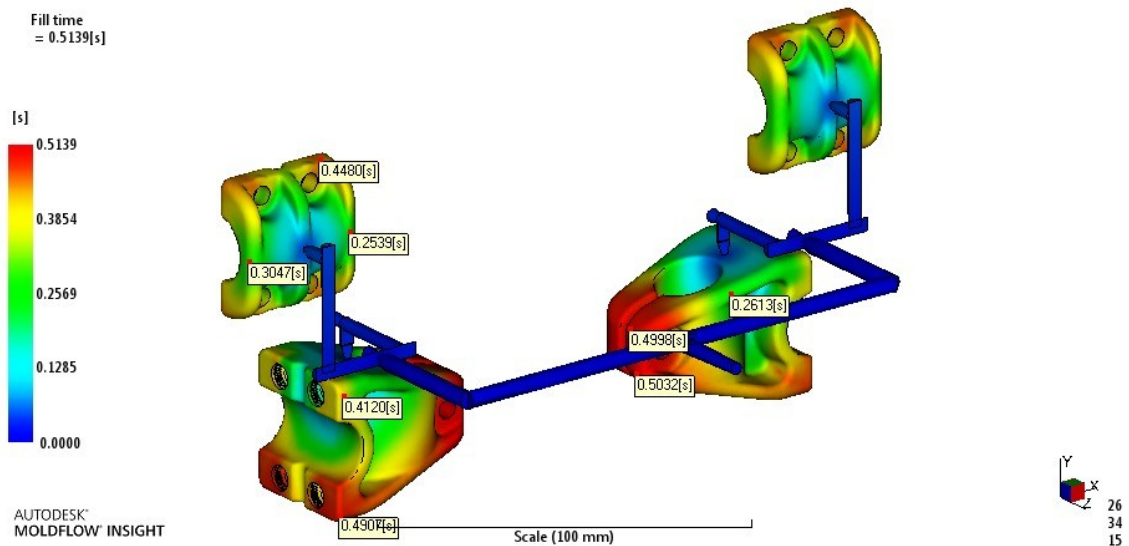


Obr. 93 – Teplota taveniny pro materiál POM



Obr. 94 – Teplota temperačního média

10.3 Čas plnění

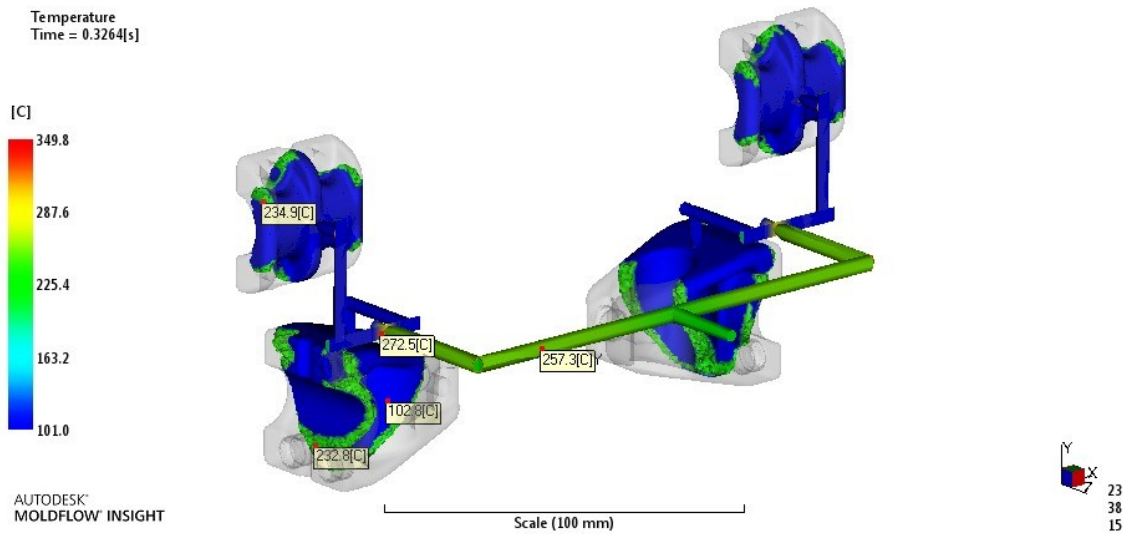


Obr. 95 – Čas plnění

Pro tuto analýzu byl změněn materiál na POM s 25 % skelných vláken. Kromě změněných procesních podmínek závislých na použitém materiálu zůstalo nastavení tak, jak bylo použito při optimalizaci analýzy č. 1.

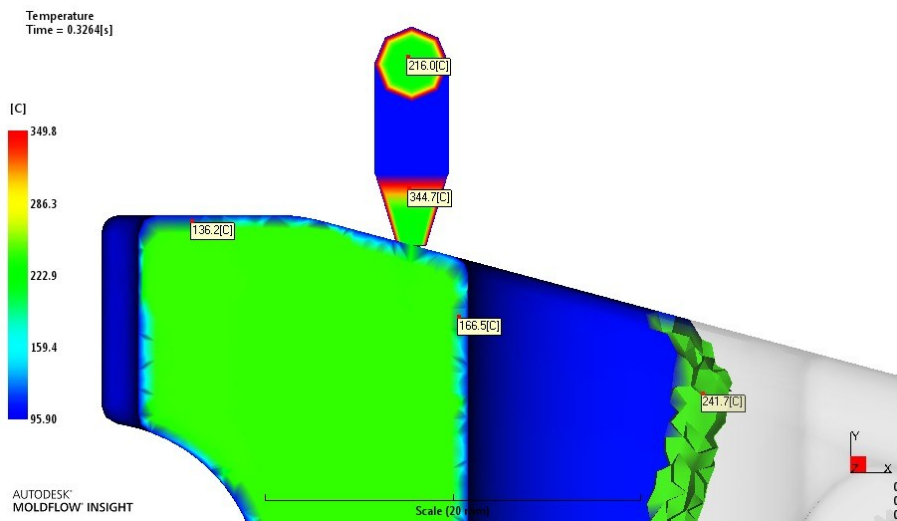
Jak si lze všimnout, čas plnění v dutinách formy pro levou a pravou část součásti je výrazně rozdílný, než v předchozích analýzách. V tomto případě by bylo nutné výrazně změnit geometrii vtokového systému tak, aby došlo k vybalancování plnění.

10.4 Teplota taveniny



Obr. 96 – Teplota taveniny

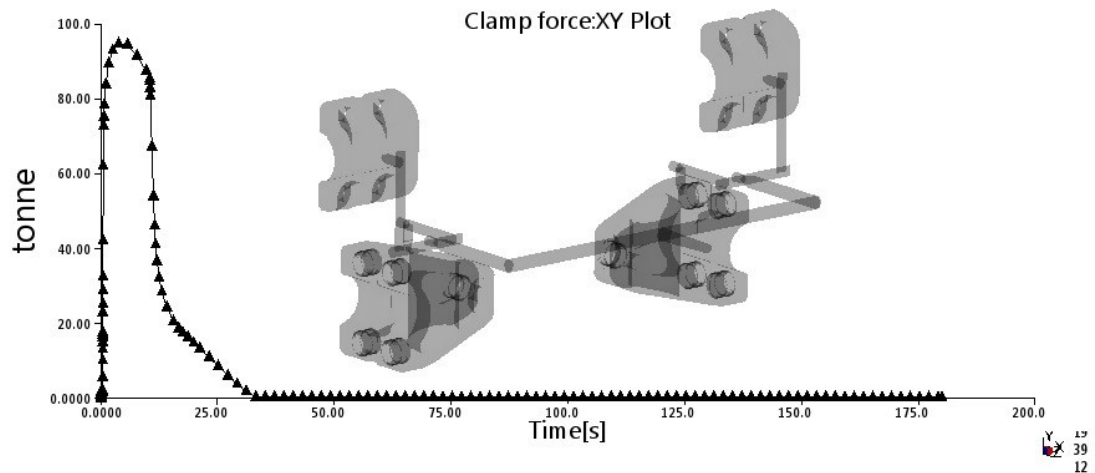
Při kontrole teploty taveniny bylo zjištěno, že především v horkém vtokovém systému dosahuje vyšší teploty, než je nastaveno, tedy 210 °C. To je zřejmě způsobeno velkým smykovým napětím taveniny v kanále, kdy se zvyšujícím se smykovým napětím se generuje teplo. Navíc podle ukazatele dosahuje teploty až 350 °C.



Obr. 97 – Detail teploty taveniny – řez dělicí rovinou

Takto vysoké teploty je dosaženo ve vtokovém ústí. Takto vysoká teplota je pro materiál naprosto nepřijatelná. V takovém případě by se musel přepracovat celý vtokový systém. Ke zlepšení by bylo třeba zvětšit průřezy všech kanálů a zejména vtokových ústí.

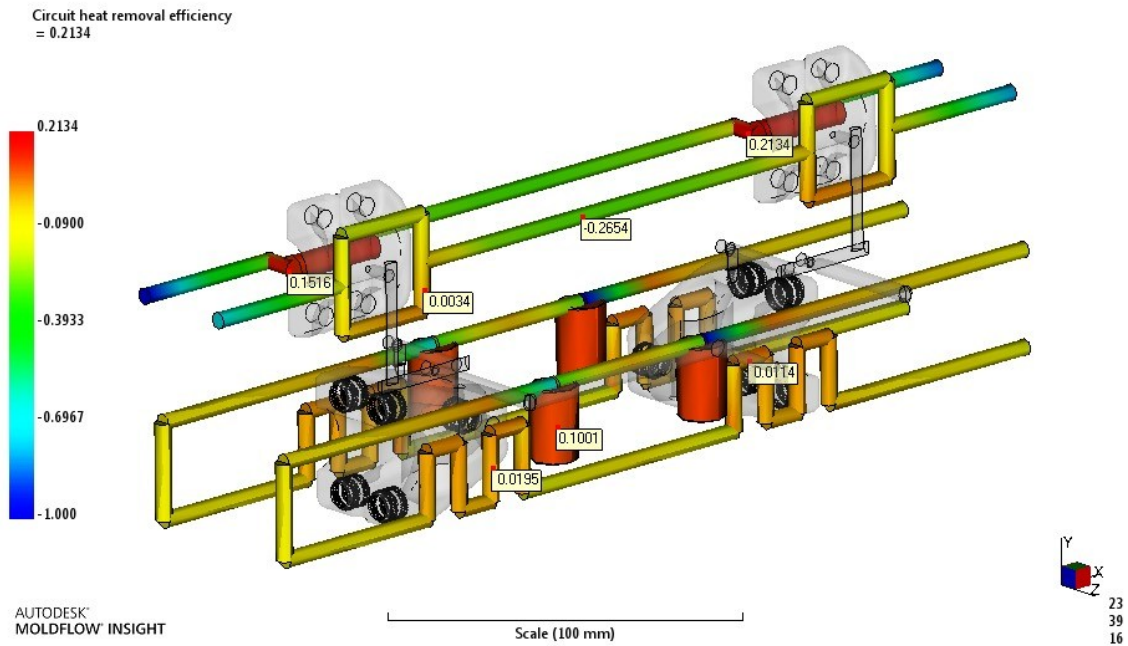
10.5 Maximální uzavírací síla



Obr. 98 – Maximální uzavírací síla

Z grafu lze vidět, že s použitím tohoto materiálu je potřeba i mnohem větší uzavírací síly. Tato síla potřebná k udržení uzavřené formy dosahuje hodnoty až téměř 100 tun. To je ale také maximální síla, jakou je zvolený vstřikovací stroj schopen vyvinout. Je tedy jasné, že pro tento materiál by musel být zvolen jiný vstřikovací stroj, který zvládne vyvinout větší uzavírací sílu.

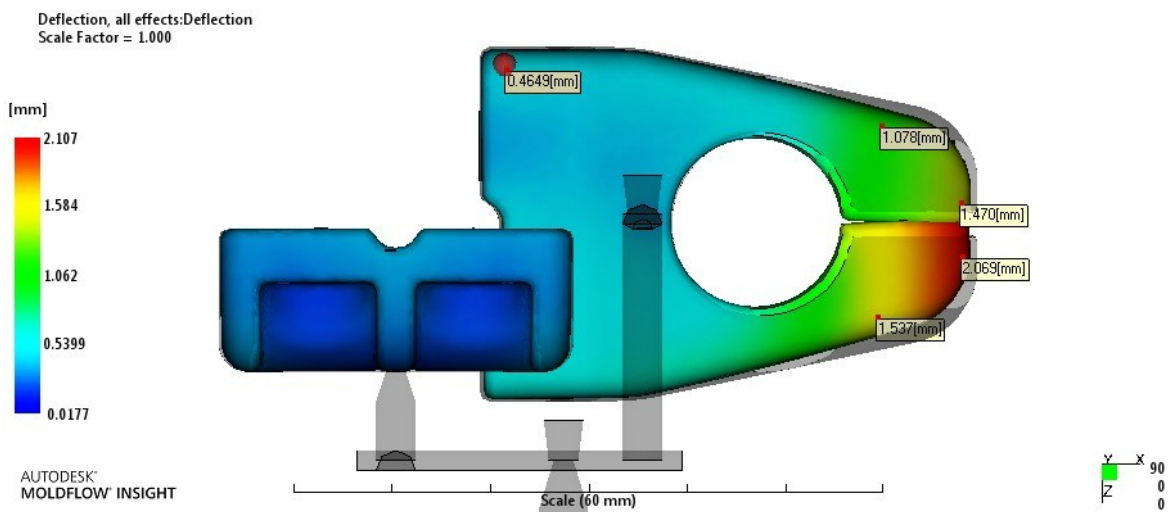
10.6 Účinnost odvodu tepla temperačního systému



Obr. 99 – Účinnost odvodu tepla temperačního systému

Ani účinnost temperačního systému není v pořádku. I zde by se musel přepracovat celý temperační systém a podmínky teploty. Pro tento materiál je navržený temperační systém nevhodný.

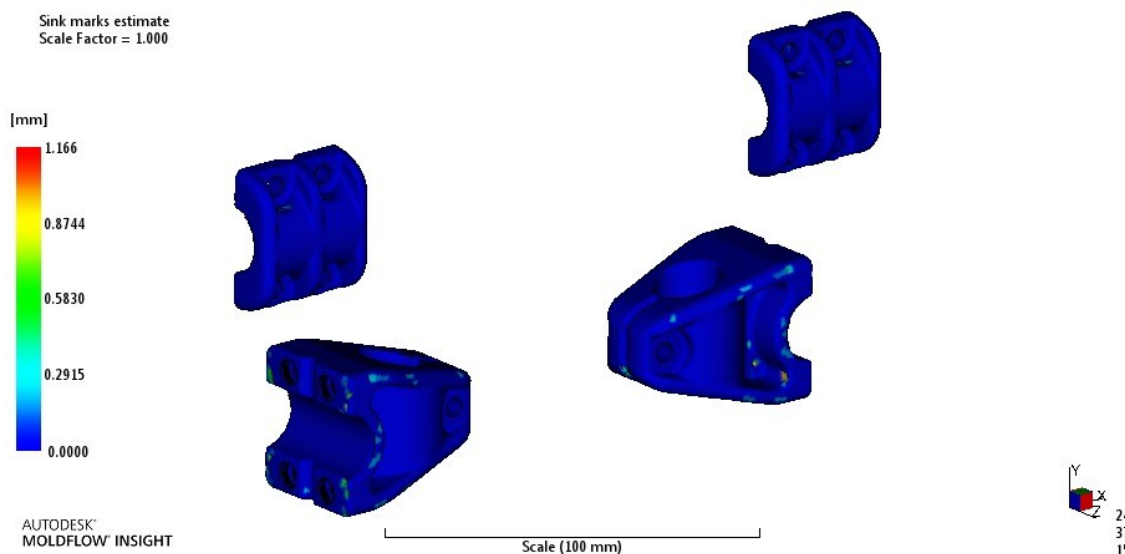
10.7 Celkové deformace všech efektů



Obr. 100 – Celkové deformace všech efektů

Celkové deformace, s použitím tohoto materiálu jsou téměř dvojnásobné, než bylo u předchozí optimalizované analýzy. Deformace jsou natolik velké, že se jedna půlka součásti dotýká druhé. Taková součást by byla nepoužitelná.

10.8 Propadliny



Obr. 101 – Propadliny

Stejně jako deformace, s použitím jiného materiálu se zvětšili i propadliny. V maximální hodnotě se pohybují kolem 1 mm. Navíc se vyskytují na více místech a také na místech, kde už by mohli vadit jak z estetického tak pevnostního hlediska. Muselo by dojít k přepracování celé součásti a dalšími úpravami se snažit odstranit místa s propadlinami.

10.9 Zhodnocení analýzy č. 2

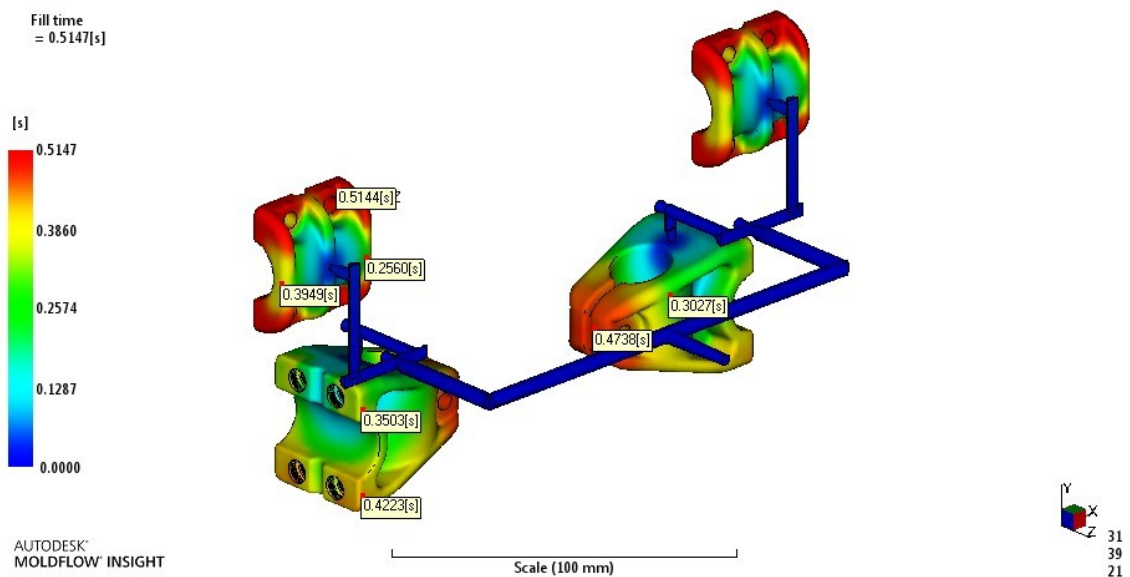
Analýza č. 2 ukázala, že použití jiného materiálu na dříve navrhnuté parametry vstřikování, vtokový a temperační systém není vhodné. To, že součást z analýzy vyšla jako nepoužitelná, může být způsobeno i použitím vyššího procenta skelných vláken v materiálu. Nicméně jedná se o jiný materiál, než byl použitý v analýze č. 1 a její optimalizaci. Proto i návrh všech parametrů již v počátku by se měl přizpůsobit vždy zvolenému materiálu.

11 ANALÝZA Č. 3 VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI

Tato analýza navazuje na analýzu z kapitoly 9 a bude za účelem zlepšení účinnosti odvodu tepla temperačního systému. Změnou průřezu některých kanálů resp. zvětšení průměrů by se mělo docílit větší teplosměnné plochy a tudíž zlepšení účinnosti odvodu tepla a zlepšení chlazení.

11.1 Čas plnění

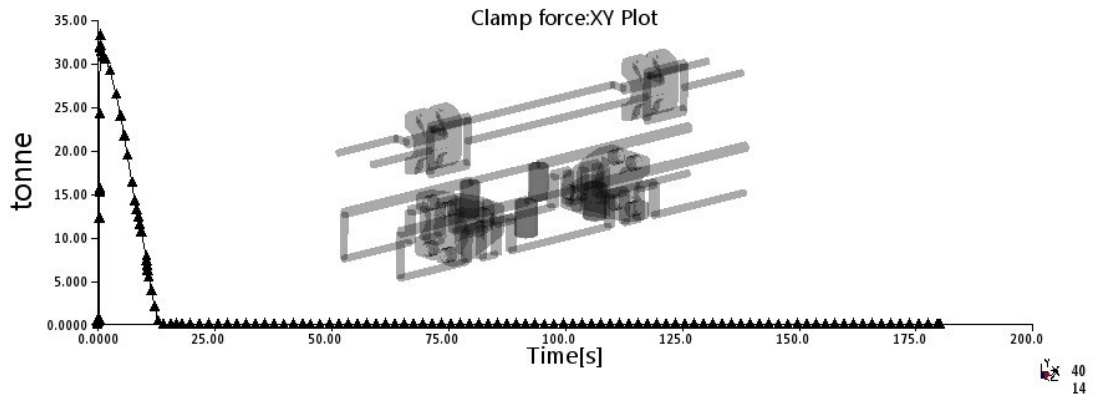
Opět proběhne nejprve kontrola plnění dutiny formy. S každou změnou chlazení může totiž dojít k tomu, že některá část formy se bude chladit jinak, ať už rychleji nebo pomaleji, což má samozřejmě vliv i na tuhnutí materiálu v dutině formy.



Obr. 102 – Čas plnění

Z analýzy lze vidět, že čas plnění je prakticky identický s časem plnění v analýze optimalizace. Proto i v tomto případě, pokud by bylo nutné lépe vyvážit plnění dutiny formy, by stačilo mírně poupravit geometrii studeného vtokového systému.

11.2 Maximální uzavírací síla

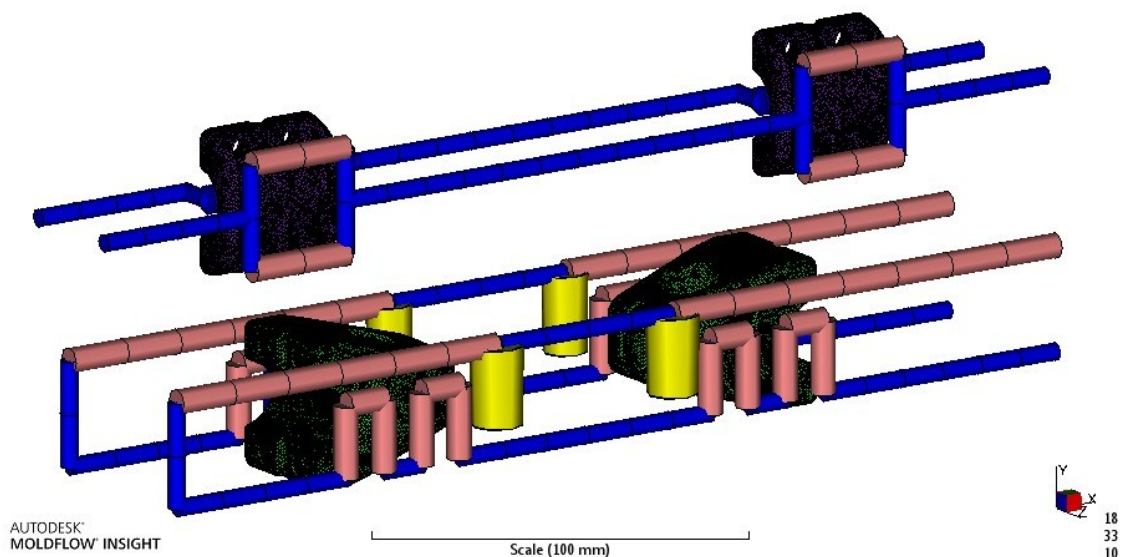


Obr. 103 – Maximální uzavírací síla

Stejně jako u analýzy č. 1 a její optimalizace se maximální uzavírací síla pohybuje kolem 33 tun. Provedené úpravy na součásti a optimalizaci neměli tedy téměř žádný vliv na potřebnou uzavírací sílu stroje.

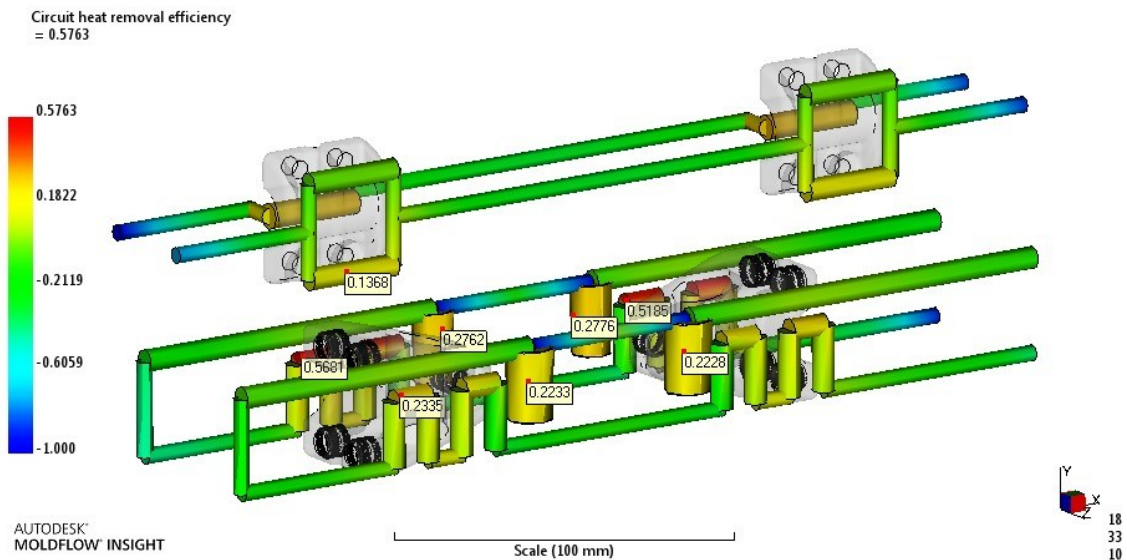
11.3 Účinnost odvodu tepla temperačního systému

Jak bylo zmíněno, půjde o zlepšení účinnosti temperačního systému. Některé kanály především v blízkosti dutiny formy budou zvětšeny. Už v analýze optimalizace se potvrdilo, že když se zvětší průměr, zvětší se účinnost odvodu tepla a chlazení.



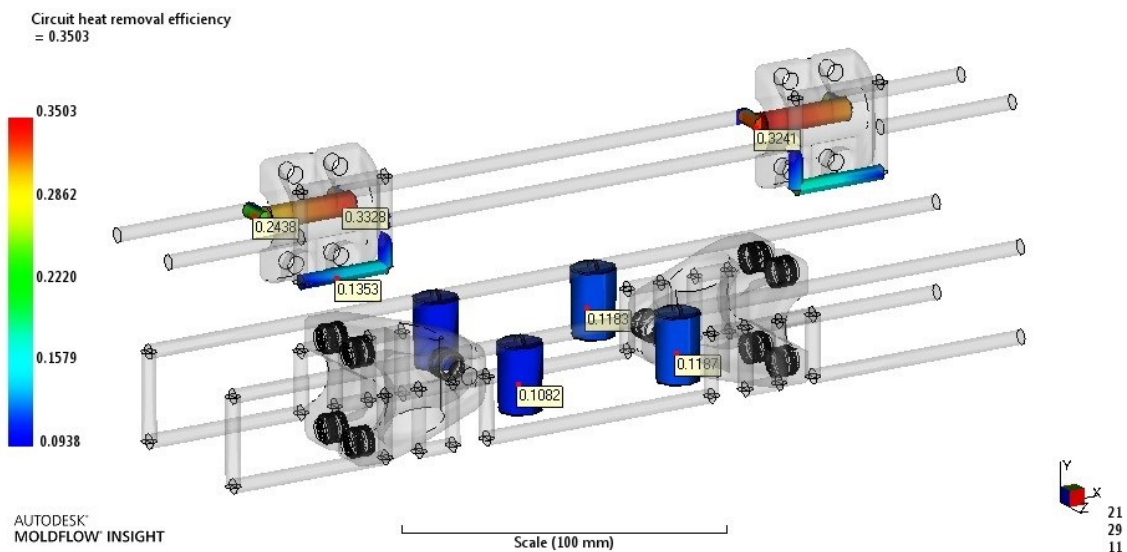
Obr. 104 – Změna průměrů kanálů temperačního systému

Na obrázku lze vidět znázorněné růžovou barvou kanály, které byly oproti analýze optimalizace změněny. Tyto kanály byly zvětšeny z průměru 5 mm na 7 mm.

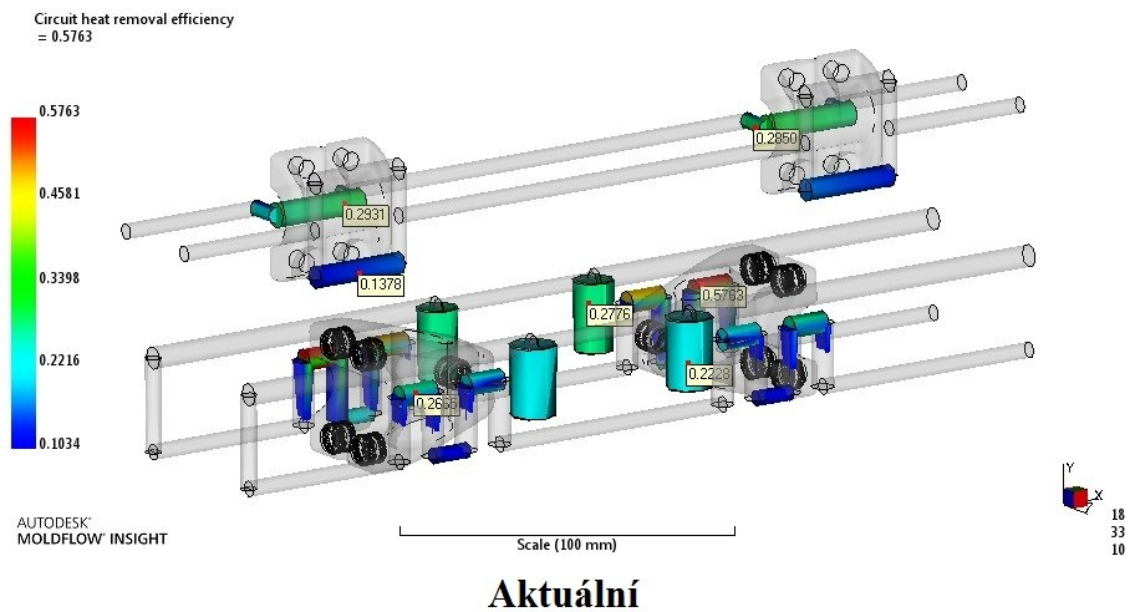


Obr. 105 – Účinnost odvodu tepla temperačního systému

Na obrázku 102 lze vidět účinnost odvodu tepla v celém temperačním systému. Oproti předchozí analýze účinnost v maximu stoupla až na 0,576. Jinými slovy, v maximech je účinnost odvodu tepla téměř 58 %.



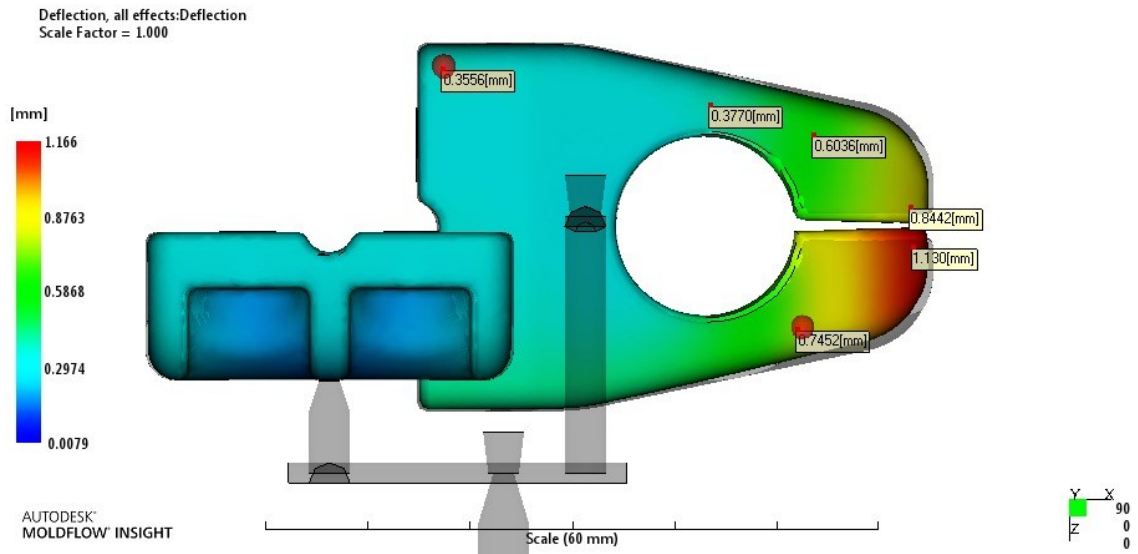
Předchozí



Obr. 106 – Srovnání účinnosti odvodu tepla s předchozí analýzou

Na srovnání dvou analýz lze vidět, jak se zlepšila účinnost odvodu tepla temperačního systému. Pro větší názornost bylo upraveno rozmezí účinnosti, kdy spodní hranice je nastavena na +0,1. Z aktuální analýzy lze snadno vidět, kde všude zasahuje účinnost odvodu tepla. Je to především v oblasti dutiny formy pro levou část součásti a tyto hodnoty jsou oproti předešlé analýze místy až dvojnásobné.

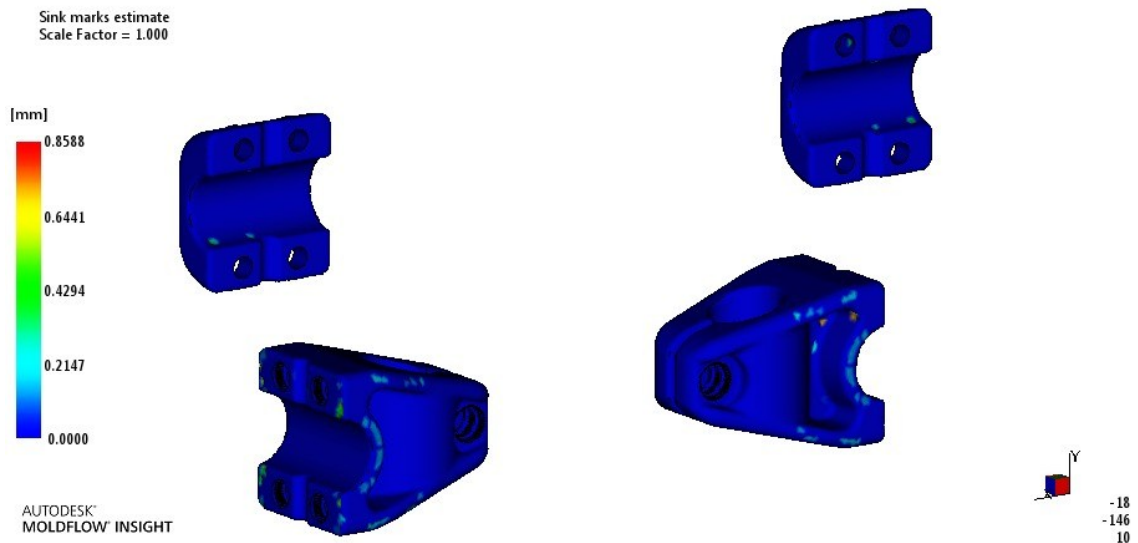
11.4 Celkové deformace všech efektů



Obr. 107 – Celkové deformace všech efektů

Po kontrole celkové deformace nejsou viditelné velké změny oproti předešlé analýze optimalizace. Ale pokud srovnáme výsledky s první analýzou lze vidět, že systém chlazení a jeho optimalizace má velký vliv na deformace. V tomto případě by bylo nutné temperační systém přepracovat s tím, že by se použilo lokálního chlazení přímo k místu s velkou deformací.

11.5 Propadliny



Obr. 108 – Propadliny

Z obrázku lze vidět, že propadliny po další úpravě temperačního systému se vyskytují na téměř totožných místech jak u analýzy optimalizace. Maximální hodnota propadliny se však mírně zmenšila a celkově všechny naznačené propadliny se zmenšili, tudíž úprava temperačního systému prospěla této vadě na součásti.

11.6 Zhodnocení analýzy č. 3

V této analýze proběhla optimalizace temperačního systému za účelem zlepšení účinnosti odvodu tepla temperačního systému. Dle výsledků se podařilo účinnost navýšit oproti předcházející analýze o 20 % na konečných 58 %. Upravení temperačního systému tak mělo pozitivní vliv na účinnost temperačního systému, ale také na propadliny, které se mírně zmenšily.

12 VYHODNOCENÍ ZVOLENÝCH VARIANT

V této kapitole budou vyhodnoceny vybrané výsledky analýz a porovnány mezi sebou. Bude porovnána součást před a po optimalizaci a jaké úpravy měli na optimalizaci vliv.

12.1 Výsledky jednotlivých analýz

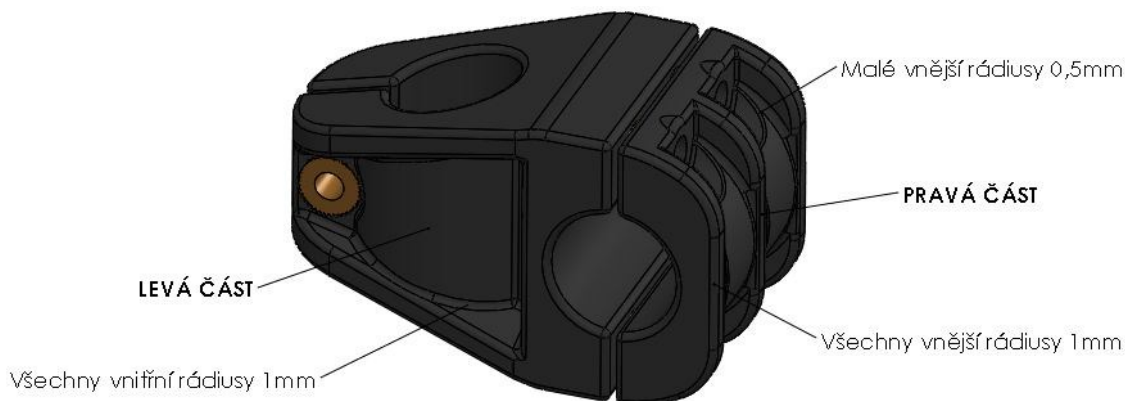
Tab. 4 – Srovnání výsledků analýz

Parametr	Analýza č. 1	Opt. analýzy č. 1	Analýza č. 2	Analýza č. 3
Čas plnění [s]	0,510	0,513	0,514	0,515
Max. deformace [mm]	1,36	1,17	2,11	1,17
Účinnost odvodu tepla temperačního systému	0 – 0,2	-0,3 – 0,35	-0,4 – 0,2	-0,22 – 0,58
Max. uzavírací síla [tun]	33	33	99	33
Propadliny [mm]	1,62	0,86	1,17	0,85

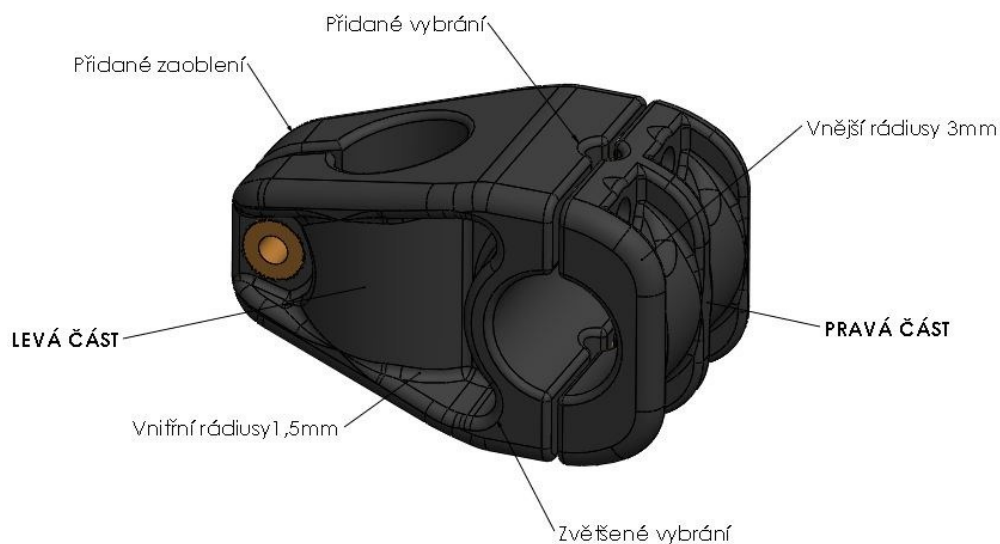
Z výše uvedené tabulky, která obsahuje vybrané výsledky této práce lze vidět, že nastavený čas vstřikování 0,5 sekundy byl ve všech případech dodržen v určité toleranci. Cílem bylo však optimalizovat součást. Úpravou temperačního systému se podařilo snížit deformace v maximální hodnotě o 15 %, mimo analýzu, kde byl použit jiný materiál. Zde deformace narostly o 80 %. Postupnou úpravou temperačního systému bylo v analýze č. 3 docíleno nejlepší účinnosti odvodu tepla. Uzavírací síla, až na analýzu s jiným materiálem, byla 33 tun. U analýzy s použitým jiným materiálem se uzavírací síla vyšplhala až na maximum vstřikovacího stroje. V tomto případě by bylo nutné použít jiný stroj. Propadliny a součásti se podařilo poměrně výrazně eliminovat. Srovnání analýzy č. 1 a analýzy č. 3 se propadliny v maximální hodnotě zmenšili více než o polovinu. Ze všech analyzovaných výsledků lze konstatovat, že výsledky poslední analýzy vyšli jako nejlepší.

12.2 Optimalizovaná součást

Součást byla navržena s ohledem na technologii vstřikování. Dle použití byl navržen vhodný materiál a následně zvoleny procesní podmínky. Poté byla provedena první analýza procesu vstřikování.



Obr. 109 – Původní součást



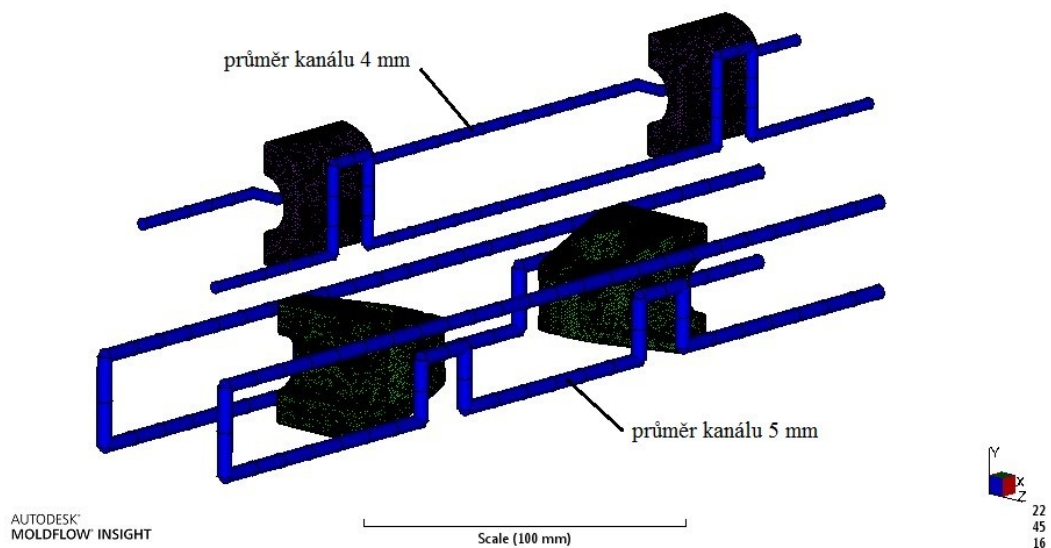
Obr. 110 – Optimalizovaná součást

Na obrázcích lze vidět srovnání původní a optimalizované součásti. Všechny úpravy provedené na součásti byly za účelem optimalizace tečení materiálu. Tyto úpravy se týkali změny velikosti vnějších i vnitřních rádiusů a zaoblení na čele levé části součásti. Pro

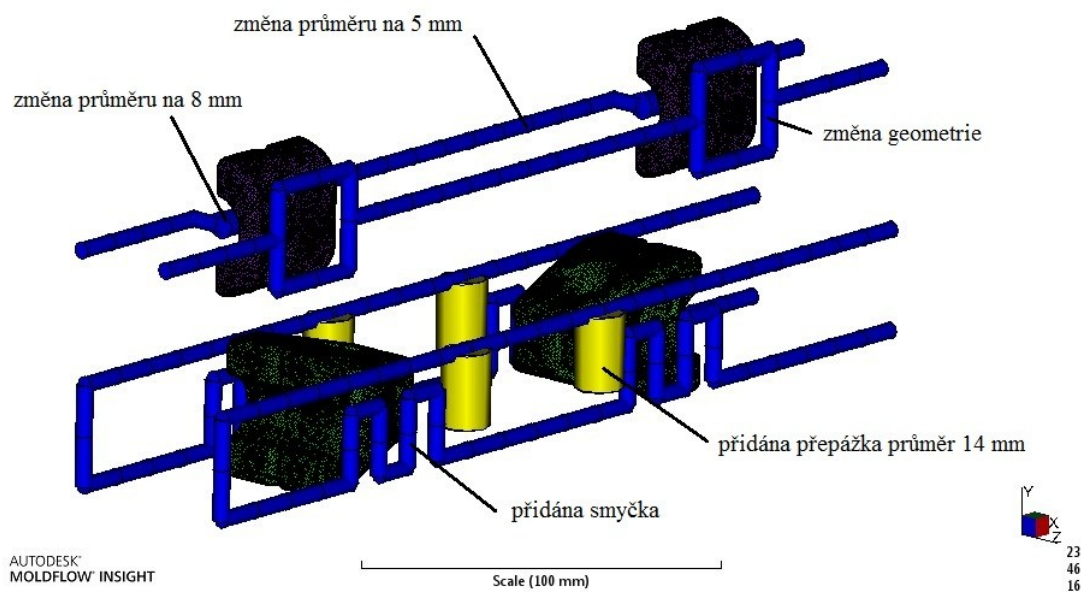
eliminace vady typu propadliny pak bylo zvětšeno vybrání po stranách levé části a přidáno kruhové vybrání na levé i pravé části. Zde vznikaly propadliny mezi závitovými vložkami. Z hodnot uvedených v tabulce 4 si lze všimnout, že propadliny (které se vyskytovali právě v těchto místech) se snížili v maximální hodnotě o téměř polovinu.

12.3 Optimalizace temperačního systému

Při optimalizaci byla provedena také úprava temperačního systému.



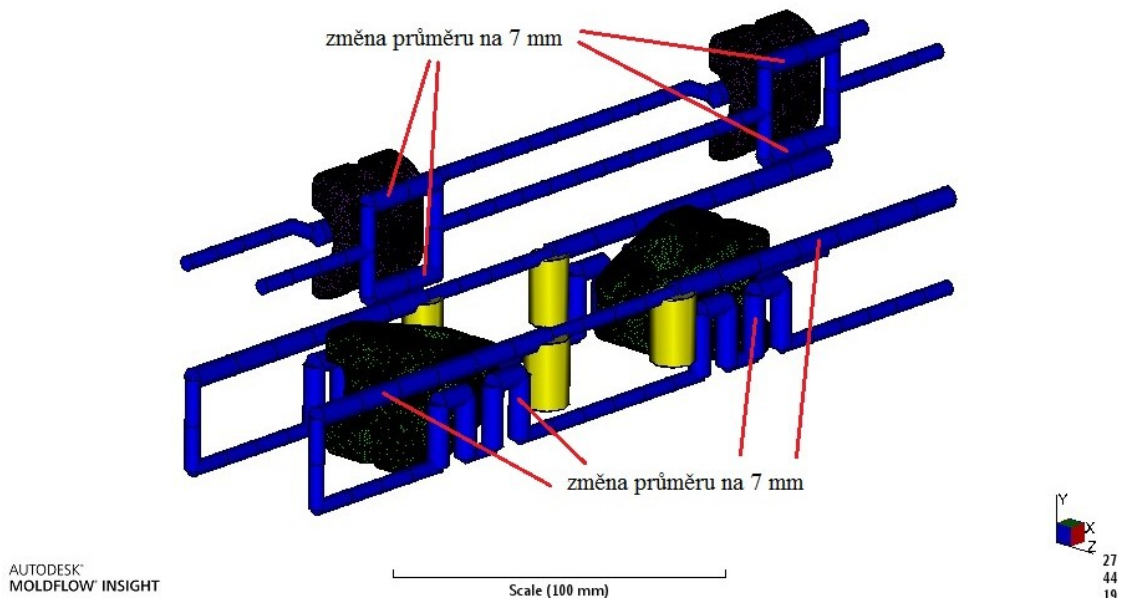
Obr. 111 – Původní návrh temperačního systému



Obr. 112 – Optimalizovaný temperační systém

Úpravou temperačního systému bylo docíleno zmenšení deformací. Na úpravě deformací měla vliv jak úprava geometrie temperačního systému, tak i změna temperačního média a podmínek temperace. V původním návrhu byla médiem voda mísená s ethylen glykolem přehříváná na teplotu 60 a 65 °C a průtokem 35 l/min. V optimalizovaném temperačním systému byl použit olej s jednotnou teplotou ve všech kanálech 92 °C. Aby bylo bezpečně zajištěno turbulentní proudění oleje, změnilo se nastavení proudění na řízení podle Reynoldsova čísla na hodnotu 8000.

V poslední analýze bylo účelem optimalizace temperačního systému zvýšit účinnost odvodu tepla. Účinnost se podařilo zvýšit a to především změnou průměrů některých z kanálů zejména v oblasti dutin formy.



Obr. 113 – Změna průměrů temperačních kanálů

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala konstrukcí a návrhem součásti pro uchycení nosiče zavazadel k rámu motocyklu. Tato součást byla nejprve navržena a vyrobena jako prototypový díl, na kterém se vyzkoušela správnost konstrukce. Poté se tato součást přepracovala tak, aby bylo možné její vyrobění technologií vstřikováním.

Při návrhu součásti pro vstřikování bylo dbáno na zásady konstruování polymerních dílů a to především na zaoblení hran, dodržení tloušťek stěn atd. Dalším důležitým krokem bylo, navrhnou umístění součásti ve formě. Jelikož součást tvoří dvě části a pro uchycení nosiče jsou zapotřebí dvě kompletní součásti, budou se vyrábět na jeden vstřikovací cyklus dvě tyto součásti tedy jedna sada.

Jedna část této součásti je tvarově složitější a také asi dvakrát větší co se týče objemu materiálu. Proto bylo důležité správně navrhnout vtokový systém, který tvoří kombinace horkého a studeného vtokového systému. To se poměrně dobře povedlo hned v prvních předběžných analýzách. Tyto analýzy byly zaměřeny právě na plnění dutiny formy a lokalizaci umístění vtokového ústí. Následovaly kompletní analýzy simulující celý cyklus vstřikování. Po vyhodnocení analýzy č. 1 proběhla optimalizace součásti, na které změnil tvar, a zvětšili se zaoblení pro zlepšení toku taveniny. Také se optimalizoval temperační systém pro zlepšení chlazení.

Všechny tyto úpravy se projeví v následující analýze optimalizace, kde došlo k viditelnému zlepšení. Plnění dutiny formy se změnilo tak, že jako první se nyní zaplní pravé části součásti. V první analýze tomu bylo naopak. Nicméně rozdíly v zaplnění obou částí jsou tak minimální, že nepředstavují žádné riziko. Dále došlo k výraznému zlepšení účinnosti odvodu tepla temperačním systémem a to díky přepracováním téměř celého systému. Další co se podařilo optimalizovat, byly vady na součásti. Podařilo se zmenšit deformace a také propadliny, které byly v některých místech velmi výrazné.

Analýza č. 2 vycházela z předchozí optimalizované analýzy. Všechny parametry analýzy zůstaly ponechány, pouze došlo k záměně materiálu a s ním spojených podmínek. Po vyhodnocení několika výsledků se prokázalo, že návrh součásti, vstřikování a všech podmínek nelze aplikovat na více různých materiálů. Pro návrh vstřikování je důležité tak znát již na počátku, s jakým materiálem se bude pracovat a přizpůsobit tomu návrh.

Poslední analýza č. 3 navazuje na analýzu optimalizace a je zde zkoumána ještě více účinnost odvodu tepla temperačním systémem. V předchozích analýzách bylo zjištěno, že

správně navržený temperační systém má velký vliv na konečný výrobek. Proto došlo ještě jednou k úpravě temperačních kanálů a výsledkem bylo navýšení účinnosti temperace o dalších 20 % na konečných 58 % což je výborný výsledek. Bohužel už se nepodařilo snížit deformace, které vznikají na především na levé části součásti. Tyto deformace by se podařilo snížit lokálním chlazením v daném místě a možnou další úpravou součásti.

Na takto analyzovanou součást by navazovala konstrukce vstřikovací formy. Následně by probíhala zkušební výroba a vyrobená součást by se porovнала s analýzou. Po následném odladění by se mohlo přejít na sériovou výrobu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Wall Thickness in Injection Molding | Fictiv - Hardware Guide. *Fictiv | On-Demand Manufacturing* [online]. [cit. 5.3.2020] Dostupné z: <https://www.fictiv.com/hwg/fabricate/wall-thickness-in-injection-molding>
- [2] Základní principy konstrukce plastových dílů. [online]. [9. 3. 2020] Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/10.html>
- [3] Principy konstrukce plastových vylisků. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Copyright © 2020 www.mmspektrum.com [cit. 09. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/principy-konstrukce-lastovych-vylisku.html>
- [4] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN isbn978-80-271-0614-1.
- [5] What Specifications Does Your Injection Mold Manufacturer Need? - CFL Molding. *CFL Molding - News and Everything About Molding* [online]. Copyright © 2020 CFL Molding [cit. 10. 03. 2020]. Dostupné z: <https://cflmolding.com/specifications-injection-mold-manufacturer-need/>
- [6] OLMSTED, Bernie A. a Martin E. DAVIS. *Practical injection molding*. New York: Marcel Dekker, c2001. *Plastics engineering* (Marcel Dekker, Inc.), 63. ISBN isbn0-8247-0529-7.
- [7] Most Common Materials Used in Plastic Injection Molding. *Home | Custom Plastic Injection Molding Company* [online]. Copyright © 2018 Murray Plastics Inc. [cit. 16. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.murrayplastics.com/blog/most-common-materials-used-in-plastic-injection-molding>
- [8] *Specialista v plastech a Váš partner pro dodávky plastových polotovarů a výrobků | AK Plast s.r.o.* [online]. [cit. 16. 3. 2020]. Copyright © [cit. 16. 03. 2020]. Dostupné z: http://www.akplast.cz/admin/files/ck/files/TechData/PA6xt_mat_list.pdf
- [9] PA 6, PA 66, Technyl Star, Solvay - Resinex. *Resinex - Distribuce plastů a kaučuků* [online]. Copyright © 2020 RESINEX Group, Czech Republic [cit. 16. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/produkty/technyl-star.html>

- [10] Polyvinyl Chloride (PVC) Plastic: Uses, Properties, Benefits & Toxicity. *Plastic Materials | Free Online Database for Plastic Industry* [online]. Copyright © SpecialChem 2020 [cit. 17. 03. 2020]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyvinyl-chloride-pvc-plastic>
- [11] Polymery amorfni a semikrystalické z hlediska vstřikování. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Copyright © 2020 www.mmspektrum.com [cit. 17. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani.html>
- [12] Low Density Poly-Ethylene - an overview | ScienceDirect Topics. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. Copyright © 2020 Elsevier B.V. or its licensors or contributors. [cit. 17. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/low-density-poly-ethylene>
- [13] Nylon 6 or Nylon 66 - Which One Should I Choose?. *Ai Engineering Plastics and Laminates | Buy Engineering Plastics Online* [online]. Copyright © 2017 Ai Engineering Plastics [cit. 17. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.aiplastics.com/blog/nylon-6-or-nylon-66/>
- [14] *Speciální způsoby vstřikování | Vstřikování vlákných plněných termoplastů - Katedra strojírenské technologie* [online]. [17. 3. 2020]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/05.htm#057
- [15] CHEN, Shia-Chung a Lih-Sheng TURNG. *Advanced injection molding technologies*. Cincinnati, OH: Hanser Publications, [2019]. ISBN 978-1-56990-603-3.
- [16] FRIZELLE, William G. Injection Molding Technology. *Applied Plastics Engineering Handbook* [online]. Elsevier, 2011, 2011, s. 205-214 [cit. 26. 3. 2020]. ISBN 9781437735147. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781437735147100133>
- [17] CHEN, Shia-Chung a Lih-Sheng TURNG. *Advanced injection molding technologies*. Cincinnati, OH: Hanser Publications, [2019]. ISBN 978-1-56990-603-3.

- [18] ZEMAN, Lubomír. Využití programů CAE a optimalizace vstřikování termoplastů, Lubomír Zeman, část 1. *Plasticportal* [online]. 2020, 3. 3. 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/vyuziti-programu-cae-a-optimalizace-vstrikovani-termoplastu-lubomir-zeman-cast-1/c/6200/>
- [19] ZEMAN, Lubomír. Využití programu CAE a optimalizace vstřikování termoplastů, Lubomír Zeman, část 2. *Plasticportal* [online]. 2020, 3. 3. 2020 [cit. 30. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/vyuziti-programu-cae-a-optimalizace-vstrikovani-termoplastu-lubomir-zeman-cast-2/c/6201/>
- [20] ZEMAN, Lubomír. Využití programu CAE a optimalizace vstřikování termoplastů, Lubomír Zeman, část 3. ZEMAN, Lubomír. *Plasticportal* [online]. 10. 3. 2020. 2020, 10. 3. 2020 [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/vyuziti-programu-cae-a-optimalizace-vstrikovani-termoplastu-lubomir-zeman-cast-3/c/6202/>
- [21] Design of experiment considering two-way interactions and its application to injection molding processes with numerical analysis - ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. Copyright © 2003 Elsevier B.V. All rights reserved. [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013603010045>
- [22] ANDRISANO, A.O. et al., 2011. *Design Of Simulation Experiments method for Injection Molding process optimization: Department of Mechanical and Civil Engineering.* Venice. Dostupné také z: <https://pdfs.semanticscholar.org/477a/9e76faa47103b122534b67db771dd4d40295.pdf>. University of Modena and Reggio Emilia (Italy).
- [23] STOKLASA, K. Zpracovatelské inženýrství I – Základy gumárenské a plastikářské technologie, [Skripta], 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická 2007.
- [24] *Technologie vstřikování plastů: Technologie vstřikování plastů* [online], [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [25] *Základní dělení a funkce vstřikovacích strojů* [online], [cit. 3. 4. 2020]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/01.html>

- [26] SVOBODA, Rostislav, 2017. Stroje na vstřikování plastů? Pomůžeme vám vyznat se v nich! *Factory Automation: Magazín o průmyslové automatizaci a robotice* [online]. [cit. 3. 4. 2020]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/stroje-na-vstrikovani-plastu-pomuzeme-vam-vyznat-se-v-nich/>
- [27] Mold Design and Tooling for Injection Molding, 2013. *Design World* [online]. [cit. 4. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/mold-design-tooling-for-injection-molding/>
- [28] *ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE* [online]. Copyright © [cit. 04. 04. 2020]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/cviceni/htn_tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy_zak.pdf
- [29] *EWIKON Heißkanalsysteme GmbH - Heißkanaltechnik* [online]. Copyright © [cit. 04. 04. 2020]. Dostupné z: https://www.ewikon.com/fileadmin/pdf/broschueren/Produktuebersicht/EWIKON_Produktuebersicht_DE.pdf
- [30] KNACK, Oliver, 2015. 11 INJECTION MOLDING DEFECTS AND HOW TO PREVENT THEM: Manufacturing and QC blog. *InTouch* [online]. [cit. 4. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.intouch-quality.com/blog/injection-molding-defects-and-how-to-prevent>
- [31] KOŠÍK, Miroslav, 2014. *DIESEL EFFECT PROBLEM SOLVING DURING INJECTION MOULDING* [online]. Bratislava [cit. 4. 4. 2020]. Dostupné z: https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/doc/casopis_Vedecke_prace/33SN/4-Kosik.pdf. Vědecká práce. SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA.
- [32] HUDSPETH, Mike, 2016. All is Not Sunk: How to Deal with Sink Marks in an Injection-Molded Part. *Engineers rule: Technology for Design and Engineering* [online]. [cit. 4. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.engineersrule.com/not-sunk-deal-sink-marks-injection-molded-part/>
- [33] What is jetting in injection molding? - Quora. *Quora - A place to share knowledge and better understand the world* [online]. [cit. 4. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-jetting-in-injection-molding>

- [34] *ARBURG* [online]. Copyright © [cit. 20. 04. 2020]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_420C_GOLDEN_EDITION_TD_523677_en_GB.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Propadliny v místech s příliš mnoho materiálem [2].....	13
Obr. 2 – Konstrukce žeber [3]	14
Obr. 3 – Zaoblení v rozích dílu [2]	15
Obr. 4 – Úchyty pro upevňovací prvky [5].....	15
Obr. 5 – Úchyty pro upevňovací prvky v rohu dílu [5]	16
Obr. 6 – Minimální úhel úkosu dílu [2]	17
Obr. 7 – Polymerní materiály – základní rozdělení [4]	18
Obr. 8 – Termoplasty pro výrobu výstřiků – základní rozdělení [4]	18
Obr. 9 – Materiálový list PA 66 plněný 25 % skelným vláknem firmy Resinex [9].....	19
Obr. 10 – Materiálový list PA 6 od firmy AKPLAST [8]	20
Obr. 11 – Výstřiky z amorfních termoplastů [11]	22
Obr. 12 – Semikrystalické termoplasty [11]	24
Obr. 13 – Studený spoj [30].....	26
Obr. 14 – Spálená místa na výrobku (diesel efekt) [31]	27
Obr. 15 – Místa s propadlinami [30].....	28
Obr. 16 – Tryskový tok [30]	29
Obr. 17 – Vstřikovací cyklus [23]	30
Obr. 18 – Průběh tlaku v dutině formy a teploty taveniny během vstřikovacího cyklu	31
Obr. 19 – Diagram p-v-T pro amorfní termoplast [24].....	32
Obr. 20 – Diagram p-v-T pro semikrystalický termoplast [24].....	32
Obr. 21 – Vstřikovací stroj [25].....	34
Obr. 22 – Srovnání energetické náročnosti hydraulického a elektrického VS [25]	35
Obr. 23 – Vstřikovací jednotka [25]	37
Obr. 24 – Řez formou s popisem základních částí	39
Obr. 25 – Řadové uspořádání vtokové soustavy vícenásobné formy [28]	41
Obr. 26 – Symetrické uspořádání vtokového systému vícenásobné formy [28]	41
Obr. 27 – Průřez vtokových kanálů [28].....	42
Obr. 28 – Srovnání základních typů kanálů podle smáčivého čísla a_s [28].....	43
Obr. 29 – Horký vtokový systém [29]	43
Obr. 30 – Výrobek určen k analýze – domek konektoru	46
Obr. 31 – 3D model analyzovaného výrobku	47
Obr. 32 – Výpočtový model v CAE softwaru Moldflow	47
Obr. 33 – Síť výrobku.....	48
Obr. 34 – Diagram pracovního postupu [22].....	52

Obr. 35 – Prvotní 3D návrh vstřikované součásti	55
Obr. 36 – Reálná součást vyrobená 3D tiskem	56
Obr. 37 – Použití součásti vyrobené 3D tiskem.....	56
Obr. 38 – Reálná součást vyrobená CNC frézováním	57
Obr. 39 – Nosič uchycen k rámu motocyklu pomocí navrhované součásti.....	57
Obr. 40 – Konstrukce vstřikované součásti	59
Obr. 41 – Řez vstřikované součásti v místě závitových vložek.....	59
Obr. 42 – Popis zvoleného materiálu.....	60
Obr. 43 – Doporučené teploty pro zpracování.....	61
Obr. 44 – Analýza ideálního umístění vtoku – Levá část.....	62
Obr. 45 – Analýza ideálního umístění vtoku – Pravá část.....	62
Obr. 46 – Místo ideálního vtoku na levé části	63
Obr. 47 – Místo ideálního vtoku na pravé části	63
Obr. 48 – Čas plnění levé části	64
Obr. 49 – Čas plnění pravé části	64
Obr. 50 – Optimalizace místa ideálního vtoku na pravé části	65
Obr. 51 – Optimalizace místa ideálního vtoku na levé části	66
Obr. 52 – Optimalizace místa ideálního vtoku na pravé části	66
Obr. 53 – Čas plnění pravé části se změnou polohy vtokového ústí	67
Obr. 54 – Rozmístění součásti ve formě z pohledu dělicí a vertikální roviny.....	68
Obr. 55 – 3D pohled na rozmístění výrobku ve formě	68
Obr. 56 – Návrh vtokového systému	69
Obr. 57 – Návrh temperačního systému	70
Obr. 58 – Rozměry zvoleného vstřikovacího stroje [34].....	71
Obr. 59 – Technická data zvoleného vstřikovacího stroje [34].....	72
Obr. 60 – Nastavení teploty taveniny a doby otevření formy.....	72
Obr. 61 – Cílová kritéria pro vyhazování	73
Obr. 62 – Nastavení vstřikovacího času a fáze dotlaku	73
Obr. 63 – Nastavení kontrolního profilu dotlaku.....	73
Obr. 64 – Nastavení analýzy deformace a teplotní roztažnosti formy.....	74
Obr. 65 – Nastavení teploty v okruhu 1 a 2.....	74
Obr. 66 – Nastavení teploty v okruhu 3 a 4.....	75
Obr. 67 – Čas plnění	77
Obr. 68 – Teplota taveniny během plnění dutiny formy.....	78
Obr. 69 – Maximální uzavírací síla	79

Obr. 70 – Čas potřebný pro vyhazování – levá část	79
Obr. 71 – Čas potřebný pro vyhazování – pravá část	80
Obr. 72 – Teplota temperačního okruhu 1 a 2	81
Obr. 73 – Teplota temperačního okruhu 3 a 4	81
Obr. 74 – Účinnost odvodu tepla temperačního systému	82
Obr. 75 – Celkové deformace všech efektů	83
Obr. 76 – Detail deformace součásti	83
Obr. 77 – Propadliny na levé části	84
Obr. 78 – Propadliny na pravé části	85
Obr. 79 – Studené spoje na levé části	86
Obr. 80 – Studené spoje na pravé části	86
Obr. 81 – Optimalizovaný temperační systém	87
Obr. 82 – Optimalizované procesní podmínky temperačního systému	88
Obr. 83 – Porovnání původního a optimalizovaného návrhu součásti	89
Obr. 84 – Místa na součásti podrobené optimalizaci	89
Obr. 85 – Čas plnění optimalizované součásti	90
Obr. 86 – Maximální uzavírací síla	91
Obr. 87 – Účinnost odvodu tepla optimalizovaného temperačního systému	91
Obr. 88 – Celkové deformace všech efektů po optimalizaci	92
Obr. 89 – Propadliny na optimalizované součásti	93
Obr. 90 – Propadliny na optimalizované levé části součásti	93
Obr. 91 – Popis zvoleného materiálu pro analýzu č. 2	95
Obr. 92 – Doporučené teploty pro zpracování	96
Obr. 93 – Teplota taveniny pro materiál POM	96
Obr. 94 – Teplota temperačního média	97
Obr. 95 – Čas plnění	97
Obr. 96 – Teplota taveniny	98
Obr. 97 – Detail teploty taveniny – řez dělicí rovinou	98
Obr. 98 – Maximální uzavírací síla	99
Obr. 99 – Účinnost odvodu tepla temperačního systému	100
Obr. 100 – Celkové deformace všech efektů	100
Obr. 101 – Propadliny	101
Obr. 102 – Čas plnění	102
Obr. 103 – Maximální uzavírací síla	103
Obr. 104 – Změna průměrů kanálů temperačního systému	103

Obr. 105 – Účinnost odvodu tepla temperačního systému	104
Obr. 106 – Srovnání účinnosti odvodu tepla s předchozí analýzou.....	105
Obr. 107 – Celkové deformace všech efektů	106
Obr. 108 – Propadliny.....	107
Obr. 109 – Původní součást	109
Obr. 110 – Optimalizovaná součást	109
Obr. 111 – Původní návrh temperačního systému	110
Obr. 112 – Optimalizovaný temperační systém.....	110
Obr. 113 – Změna průměrů temperačních kanálů	111

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Tvar a rozměry navrženého vtokového systému	69
Tab. 2 – Tvar a rozměry navrženého temperačního systému	70
Tab. 3 – Tvar a rozměry optimalizovaného temperačního systému	88
Tab. 4 – Srovnání výsledků analýz	108