



Optimalizace konstrukce plastové dílu pomocí FEM analýzy

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Jiří Šrytr

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie



Zadání diplomové práce

Optimalizace konstrukce plastové dílu pomocí FEM analýzy

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Šrytr**
Osobní číslo: S17000250
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky konstrukce plastových dílů.
2. Rozbor problematiky numerické analýzy procesu vstřikování.
3. Návrh a realizace konstrukční optimalizace vybraného plastového dílu.
4. Zhodnocení optimalizace konstrukčního návrhu.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] MALLOY, Robert A. *Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction*. [1st ed.]. München: Hanser, 1994. ISBN 1-56990-129-5.
- [2] BELOFSKY, Harold. *Plastic Product Design and Process Engineering*. München: Hanser, 1995. ISBN 1-56990-179-1.
- [3] GOODSHIP, V., B. MIDDELTON a R. CHERRINGTON. *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality: Structural Components, Injection Molding, and 3D Printing*. Weinheim: Wiley-VCH, 2016. ISBN 978-0-323-34061-8.
- [4] SIMCON SUPPLYING SOLUTIONS. User manual: Cadmould 3D-F Simulation. [s.l.]: Simcon, 2014.
- [5] ZHOUC, Huamin. *Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2013. ISBN 978-0-470-60299-7.
- [6] KENNEDY, Peter and Rong ZHENG. *Flow Analysis of Injection Molds*. München: Carl Hanser Verlag GmbH, 2013. ISBN 978-1-56990-512-8.

Vedoucí práce: Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2019
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

10. června 2020

Bc. Jiří Šrytr



Poděkování:

Rád bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Brdlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, podnětné rady, připomínky a pomoc při psaní mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu.



Optimalizace konstrukce plastového dílu pomocí FEM analýzy

Design optimization of the plastic part by FEM analysis

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na konstrukční optimalizaci plastového dílu pomocí softwaru Cadmould® 3D-F. Pro tři navržené optimalizace dílu je provedena simulace vstřikování, chlazení a deformace. Výsledky budou porovnány a bude vyhodnocen nejlepší návrh, která následně bude použita pro průmyslovou praxi.

Klíčová slova

Cadmould, CAE, digitalizace, vstřikování, optimalizace

Annotation

This diploma thesis is focused on the constructional optimization of a plastic part using Cadmould® 3D-F software. Injection, cooling and deformation simulations are performed for the three proposed part optimizations. The results will be compared and the best design will be evaluated.

Keywords

Cadmould, CAE, digitalization, injection, optimization



Obsah

1	Úvod	10
2	Teoretická část	11
2.1	<i>CAE pro vstřikování plastů</i>	<i>11</i>
2.1.1	Princip fungování CAE softwarů	11
2.1.2	Metoda konečných prvků (MKP).....	12
2.1.3	Rozdělení sítí.....	14
2.1.4	Hlavní CAE analýzy	20
2.2	<i>CAE softwary pro vstřikování plastů</i>	<i>21</i>
2.2.1	Cadmould® 3D-F.....	21
2.2.2	Autodesk® Simulation Moldflow®	22
2.2.3	Moldex3D	22
2.3	<i>Zásady správného navrhování plastových dílů.....</i>	<i>23</i>
2.3.1	Tloušťka stěny	23
2.3.2	Zaoblení.....	25
2.3.3	Vyztužení výrobku	26
2.3.4	Upevňovací výstupky.....	29
2.4	<i>Dimenzování plastových dílů.....</i>	<i>31</i>
2.4.1	Průvodní jevy	31
3	Experimentální část.....	33
3.1	<i>Popis dílu.....</i>	<i>33</i>
3.1.1	Použitý materiál – Polypropylen	33
3.1.2	Popis problému	33
3.2	<i>Možnosti řešení.....</i>	<i>34</i>
3.2.1	Změna procesních parametrů.....	34
3.2.2	Změna materiálu	35
3.2.3	Změna umístění a počtu vtoků.....	35
3.2.4	Konstrukční úprava dílu – tokové kanály.....	35
3.2.5	Změna tloušťky stěny	36
3.3	<i>Popis vstřikovací formy.....</i>	<i>36</i>
3.4	<i>Vstupní parametry simulace</i>	<i>38</i>
3.4.1	Tvorba sítě	38
3.4.2	Technologické parametry	39



3.4.3	Příprava chladících kanálů	41
3.4.4	Příprava vtokového kanálu	43
3.5	<i>Simulace stávajícího procesu</i>	44
3.6	<i>Simulace dílu se zesílenou tloušťkou stěny v okolí vtoku</i>	50
3.7	<i>Simulace dílu s tokovým kanálem</i>	55
3.7.1	Tokový kanál s kruhovým průřezem.....	56
3.7.2	Tokový kanál s obdélníkovým průřezem	61
4	Zhodnocení výsledků a jejich diskuze	67
4.1	<i>Technologické zhodnocení</i>	67
4.2	<i>Ekonomické zhodnocení</i>	76
4.3	<i>Vyhodnocení deformace</i>	77
5	Závěr	81



Seznam symbolů a zkratek

Zkratka:	Význam:
*.stl	formát souboru
*.igs	formát souboru
FEM	Finite Element Method (Metoda konečných prvků)
MKP	Metoda konečných prvků
CAD	počítačem podporovaná konstrukce
CAE	počítačem podporované konstruování
PP	polypropylen
GmbH	společnost s ručením omezeným
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
GIT	vstřikování s podporou plynu
WIT	vstřikování s podporou vody
PE	polyethylen
POM	polyoxymethylen
PBT	polybutylen-tereftalát
PA	polyamid
PS	polystyren
PC	polykarbonát
PVC	Polyvinylchlorid

1 Úvod

V dnešním silně konkurenčním prostředí je stále více využíváno softwarů, které jsou používány k optimalizaci nejen výrobního procesu. Řeč je zde o CAE analýzách pro vstřikování plastů, které jsou schopny na základě předem definovaných veličin vyhodnotit celý vstřikovací cyklus. Jedná se tedy o velice efektivní nástroj schopný předpovědět problematická místa dílu, která je vhodná optimalizovat. CAE analýzy slouží nejen ke konstrukční optimalizaci plastových dílů, ale i optimalizaci konstrukce formy a procesních parametrů výroby. Po zadání technologických parametrů, materiálu atd. jsou schopny provést výpočet a na základě těchto podmínek vyhodnotit výsledky, které jsou velice obsáhlé a přehledně interpretované.

V teoretické části této diplomové práce byla rozebrána problematika CAE analýzy pro vstřikování plastů. Byl zde podrobněji popsán princip, jakým tyto softwary fungují. Přičemž byl brán ohled na typy konečných prvků. Velice důležitý faktor zde hrála hustota sítě, která ovlivňuje nejen přesnost výsledků, ale i výpočtový čas. V práci byly představeny dostupné CAE softwary. Nejvíce prostoru však bylo věnováno softwaru Cadmould® 3D-F, který byl pro tuto práci stěžejní. Jelikož cílem diplomové práce byla konstrukční optimalizace plastového dílu, byla zde podrobněji také rozebrána problematika konstrukce plastových dílů. Pozornost byla zaměřena především na hlavní zásady správné konstrukce plastového dílu.

Cílem této diplomové práce byla optimalizace plastového dílu, který vykazoval výrobní vady. Problém byl řešen za pomoci softwaru Cadmould® 3D-F, přičemž byly analyzovány vybrané možnosti řešení. Byly navrženy celkem tři konstrukčně optimalizační varianty, u kterých byla provedena CAE analýza. Jednotlivé analýzy byly v kapitole diskuze výsledků porovnány z hlediska problematiky toku taveniny, aplikovatelnosti dotlaku a výsledné deformace dílu, přičemž v závěru bylo vybráno nejlepší řešení problému. Tato konstrukční varianta byla následně aplikována na vstřikovací formě. Následoval test výroby formy, přičemž pro kontrolu byl díl digitalizován pro vyhodnocení reálných deformací.

2 Teoretická část

V teoretické části věnuji pozornost CAE softwarům, jež jsou pro tuto diplomovou práci stěžejní. Zevrubně jsem popsal problematiku metody konečných prvků a síťování. Podrobněji jsem se zaměřil na software Cadmould® 3D-F, který je nedílnou součástí experimentální části. Vzhledem k charakteru práce jsem věnoval pozornost také správné konstrukci plastových dílů.

2.1 CAE pro vstřikování plastů

Zkratkou CAE (Computer Aided Engineering) je označováno počítačem podporované konstruování. Jde o specifický software určený k technickým výpočtům a ověřování konstrukcí (analýzy, simulace, testování apod.). Cílem těchto softwarů je optimalizovat budoucí produkt a zavčas odhalit možné vady již v předvýrobní fázi, snížíme tak budoucí náklady na úpravu nejen konstrukce produktu, ale i výrobního nástroje v průběhu sériové výroby, zároveň zkrátit čas uvedení výrobku na trh a v neposlední řadě snížit výrobní náklady. [1]

Softwary tohoto druhu využívají nejčastěji princip metody konečných prvků neboli MKP. Lze se setkat také s anglickou zkratkou FEM (Finite Element Method). Princip MKP je popsán v kapitole 2.1.2.

2.1.1 Princip fungování CAE softwarů

CAE softwary využívají jak softwarové, tak i hardwarové vybavení počítače. CAE softwary mají obvykle tři základní fáze.

První fáze pre-processing, se věnuje přípravám výpočtů. Uživatel v této části musí vložit 3D CAD model výrobku v datovém formátu podporovaném softwarem a na tomto základě vygenerovat výpočtovou síť, popřípadě tuto vygenerovanou síť následně upravit tak, aby jí byl 3D CAD model výrobku dobře pokryt i v nejkritičtějších místech. [1,2]

Určuje také technologické podmínky, za kterých chce daný díl analyzovat. Vybere materiál výrobku z databáze materiálů (je součástí softwaru) a stanoví další okrajové podmínky jako jsou tokové vlastnosti, geometrie, temperační soustavy, materiály nástroje apod. [2]

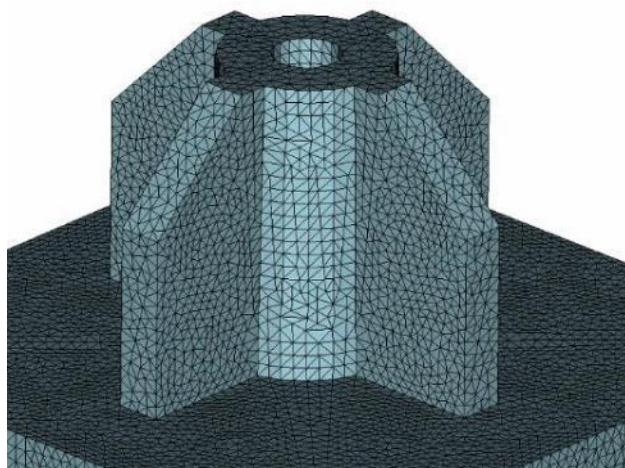
Software na základě pre-processingových dat popíše úlohu matematickými rovnicemi, které dále řeší. Čas výpočtu je přímo závislý na hustotě a typu výpočtové sítě a v neposlední řadě také na hardwaru počítače. Softwary nabízejí možnost výpočtově náročnější úlohy rozdělit mezi ostatní počítače propojené mezi sebou a docílit tak zrychlení výpočtů, tzn. k výpočtům je použita kapacita připojených počítačů např. během noci, nebo víkendu, kdy nebyly výrazně vytiženy. [1,2]

Post-processing ukazuje srozumitelnou formou dané výsledky výpočtů, přičemž nejčastěji je použita 3D vizualizace, případně také animaci časového průběhu sledované veličiny. Můžeme sledovat veličiny jako je např. plnění dílu, účinky dotlaku, případně i smrštění dílu. Veškeré vyhodnocení lze sledovat ve kterémkoliv okamžiku analýzy. [1,2]

2.1.2 Metoda konečných prvků (MKP)

Základem metody konečných prvků je rozdělení tělesa (jeho geometrie) na konečný počet dílů (prvků). Dále je nutné charakterizovat podmínky procesu (okrajové podmínky). Úloha se následně převede na soustavu diferenciálních rovnic (může obsahovat miliony rovnic), kterou již je počítač schopen řešit. Výhodou metody konečných prvků je, že dokáže s vysokou přesností popsat řešený díl.

Proces MKP se často označuje jako prostorová diskretizace, jelikož specifikuje, jakým způsobem je k problému přiřazen numerický model, který má konečný počet stupňů volnosti (neznámých parametrů). Rozdělením dílu na prvky vznikne síť konečných prvků (viz obr. 1), které jsou určeny uzlovými body a jejich souřadnicemi. [1,3]



Obrázek 1 Ukázka dílu rozdělený na prvky

Před spuštěním samotné simulace je nutné vytvořit tzv. síť konečných prvků (viz. kap. 2.1.3), která je tvořena jednotlivými prvky (elementy). Geometrie součásti případně nástroje je rozdělena prvky na malé elementy a tím vytváří síť. Prvky jsou definovány za

pomocí uzlů (souřadnice v prostoru), které jsou využívány k simulačním výpočtům. Existují tři základní skupiny:

2D čárové prvky

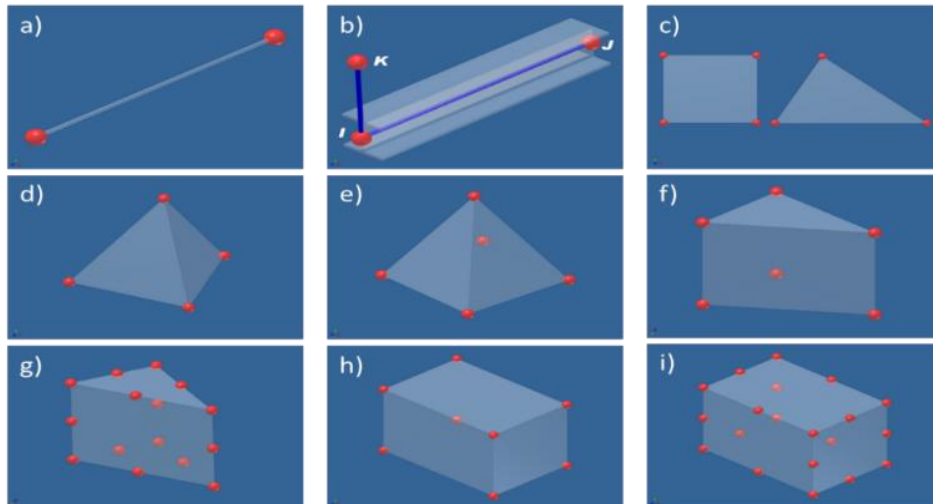
- Prutový prvek – Prvky příhradového nosníku jsou dlouhé a štíhlé, mají 2 uzly a mohou být orientovány kdekoli v 3D prostoru. Příhradové prvky přenášejí sílu pouze axiálně, umožňují pouze translaci, nikoli rotaci. Předpokládá se konstantní plocha průřezu, můžeme ji tedy použít například pro temperační kanály. Tyto prvky lze vidět na obrázku 2a. [4]
- Nosníkový prvek – jsou dlouhé a štíhlé prvky, mající tři uzlové body a mohou být orientovány kdekoli v 3D prostoru. Umožňují translaci i rotaci v každém koncovém uzlu (viz obr. 2b). Předpokladem je konstantní plocha průřezu. [4]

2D plošné prvky

- Trojúhelníkový a čtvercový prvek – je element se třemi nebo čtyřmi uzlovými body, které se nachází v rozích, jak lze vidět na obrázku 2c. Používají se pro popis tělesa s konstantní tloušťkou stěny, nebo pro popis povrchu dílu. [4]

3D prvky

- Tetrahedron prvek – je specifický svojí trojúhelníkovou stavbou. Dle tvaru může obsahovat od čtyř až po 15 uzlových bodů (viz obr. 2d, e, f, g). Používá se pro popis v celém objemu dílu. [4]
- Brick prvek – jedná se o prvky kvádrového tvaru, které mají osm až dvacet uzlových bodů (viz obr. 2h, i). Jsou vhodné pro popis dílu s velkou tloušťkou stěny (výkovky, odlitky) [4]

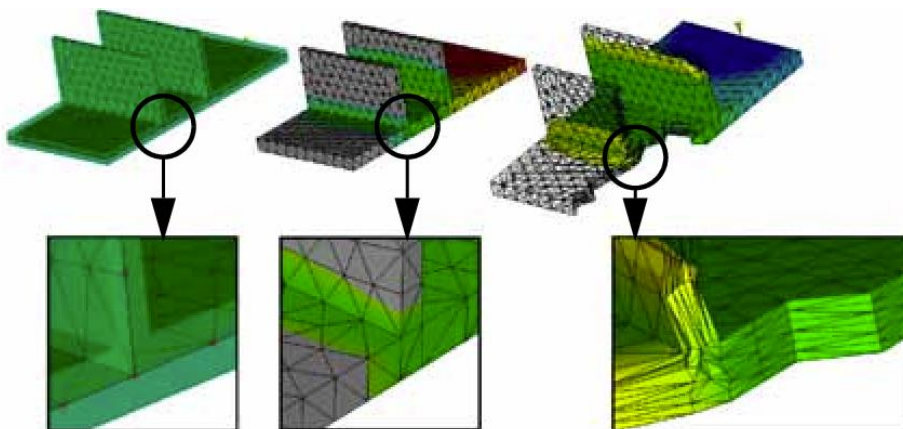


Obrázek 2 Druhy prvků a) prutový prvek, b) nosníkový prvek, c) trojúhelníkový a čtvercový prvek, d), e), f), g) tetrahedron prvek, h), i) brick prvek [4]

2.1.3 Rozdělení sítí

Pro analýzu technologie vstřikování plastů jsou využívány tři typy sítí. Využívá se přitom kombinace prvků (viz kap. 2.1.2.). Vyobrazení jednotlivých sítí lze vidět na obr. 3.

- Střední rovina (midplane) – výrobek je definován na střední ploše, případně ose výrobku. Primárně se zde využívají 2D trojúhelníkové nebo čtvercové prvky k definici dílu.
- Povrchová síť (fusion) – Využívá 2D trojúhelníkové nebo čtvercové prvky, které jsou definovány pouze na ploše výrobku.
- 3D síť – K definici dílu využívá 3D prvky v několika řadách (je vyplněn celý objem). V závislosti na použitém výpočetním softwaru lze využívat prvky typu tetrahedron, brick anebo kombinaci těchto prvků. [3]



Obrázek 3 Druhy sítí. Zleva střední rovina, povrchová síť, 3D síť [5]

Střední rovina a povrchová síť

Střední rovina i povrchová síť využívají stejné řešení toku materiálu. Všechny způsoby řešení mají jisté předpoklady, kde řešení je nejčastěji na principu generalizovaného Halen-Shaw modelu tečení taveniny. Model Halen-Shaw vychází z těchto předpokladů:

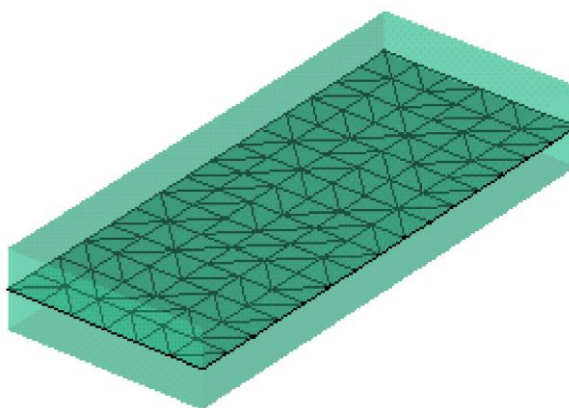
- Laminární tok obecné Newtonovské kapaliny
- Gravitace a setrvačnost lze zanedbat
- V rovině toku taveniny je vedení tepla zanedbatelné v porovnání ve směru tloušťky
- Tepelné proudění je ve směru tloušťky zanedbáno
- Tepelné ztráty mohou být v hranách ignorovány (pro trojúhelníkové prvky) [3,5]

Prvky a jejich předpoklady:

Prut: Jsou často označovány jako 1D prvky, které mají daný tvar i průřez. Jsou charakteristické osově souměrným kanálem toku obecné Newtonovské kapaliny. Lze charakterizovat i nekruhový tvar, který je nahrazen kruhovým kanálem a má stejný hydraulický průměr, ale se sníženým objemovým průtokem tak, aby byla zachována stejná průtoková rychlost jako má původní tvar. Ztráty, které jsou způsobeny zúžením v přenosovém kanálu jsou brány v potaz za pomocí empirického modelu Bagleyovy korekce pro viskózní chování. [3,5]

Trojúhelníkové elementy ve střední rovině:

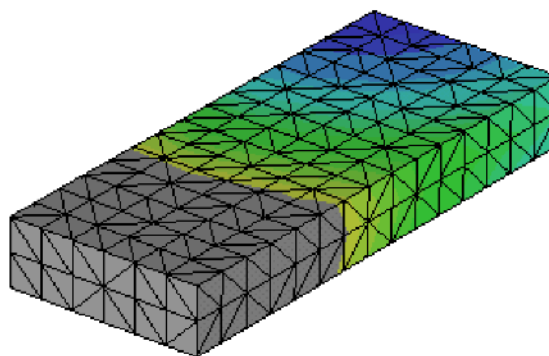
Trojúhelníkové elementy jsou využívány ve střední rovině jako 2,5D elementy. Tato síť popisuje 3D těleso jako 2D rovinnou plochu, která vede ve středu tloušťky tělesa jak lze vidět na obrázku 4. Rovině se přiřazuje tloušťka tělesa. Platí zde jistá omezení, která redukují poměr šířky k tloušťce. Ta nesmí být menší než 4:1. Při překročení této hranice způsobuje výpočet chybu, kdy při tomto poměru přestává platit rovnice pro přenos tepla. [3,5]



Obrázek 4 Síť tvořená trojúhelníky na střední rovině [5]

Trojúhelníkové elementy v povrchové síti:

Na povrchu dílu je vytvořena síť z trojúhelníkových elementů (viz obr. 5), které vytvářejí skořepinu. Rozdíl oproti střední rovině je v definici tloušťky stěny. Tloušťka stěny je charakterizována vzdáleností mezi prvky. [3,5]



Obrázek 5 Síť tvořená na povrchu dílu trojúhelníkovými elementy [5]

Výhody:

- Díky umožnění rozdělení tloušťky stěn do více vrstev je dosaženo vysokého rozlišení v oblastech velkých změn
- Za účelem optimalizace model konečných prvků umožňuje realizovat jednoduché změny geometrie (např. změna tloušťky stěny nebo přidání žebra)
- Relativně krátký výpočtový čas
- Vysoká přesnost výsledků

Nevýhody:

- Tento model ve většině případů nelze zcela automaticky vytvořit z geometrie CAD
- Návrh střednicového modelu je časově náročný a vyžaduje určitou míru zkušeností
- Ztížená interpretace výsledků z důvodů geometrického nezobrazování tloušťky stěn

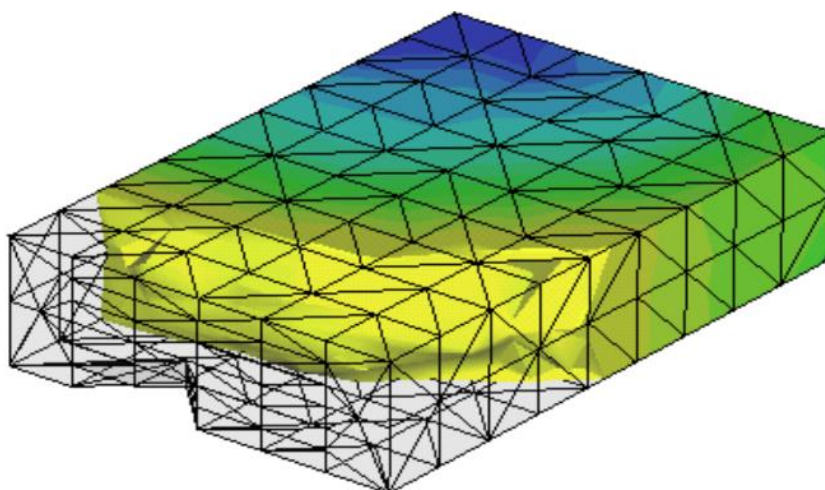
3D síť

Vytváří pravidelnou prostorovou síť v celém objemu, kterou lze vidět na obrázku 6. Lze pracovat i s tlustostěnnými a robustními díly. [5]

Předpoklady 3D sítě:

- Využívá 3D Navier-Stokesovy rovnice
- Řeší veškeré neznámé pro každý uzel zvlášť
- Bere v potaz vedení tepla ve všech směrech

- Poskytuje použití setrvačných nebo gravitačních sil



Obrázek 6 3D síť s čtyřúhelníkovými elementy [3]

Výhody:

- V tomto modelu jsou prostorové směry rovnocenné. Uživatel tedy nemusí rozdělovat geometrii na směr tloušťky stěn a směry tečení
- Pokud použijeme jednoduché konečné elementy může být výpočtová geometrie připravena automaticky díky generátoru sítě

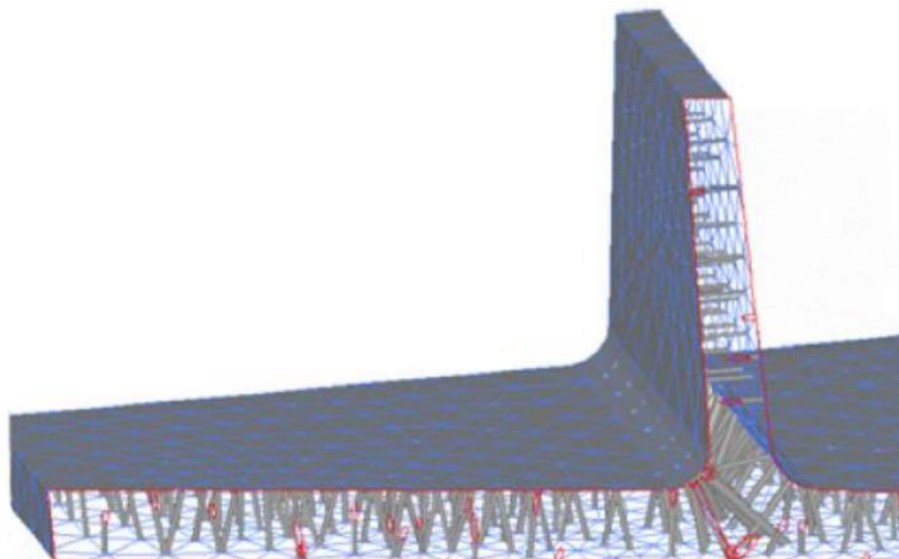
Nevýhody:

- Nízký počet elementů napříč tloušťkou stěny poskytuje nepřesné výsledky
- Vysoký počet elementů způsobuje vysoký výpočtový čas
- Obtížná změna geometrie

Příhradový model

Je charakteristický tím, že využívá kombinace povrchové sítě a jednoduchých elementů typu prut. Na povrchu dílu je vytvořena síť, která je složena z 2D trojúhelníkových útvarů. Uzlové body této sítě jsou následně propojeny jednoduchými prutovými elementy, které tak vyplní celý objem dílu, jak lze vidět na obrázku 7. Přičemž každý prutový element je rozdělen na 25 interpolačních uzlů, tím je vytvořena soustava bodů, která velice přesně

charakterizují daný díl. Další funkcí prutových elementů je přenášení mechanické síly, např. pro výpočty deformace či smrštění. Vznikne nám tak 3D síť, kde každý uzlový bod je popsán kartézskými souřadnicemi x , y a z . [2,3,5]



Obrázek 7 Ukázka přihradového výpočetního modelu

Výše uvedené řešení nám umožňuje získat přesné rozložení měnících se teplot, průběhů tlakových ztrát nebo smykové rychlosti. To je důležitou podmínkou k přesnému výpočtu měnících se proudových stavů ve všech místech konstrukce. Můžeme tak vypočítat průběh rychlosti vstřikování a tlaku a z toho vypočtené uzavírací síly a orientaci případného plniva. Všechny tyto faktory jsou hlavním předpokladem pro správně stanovení deformace a smrštění dílu. [3,5]

Výhody:

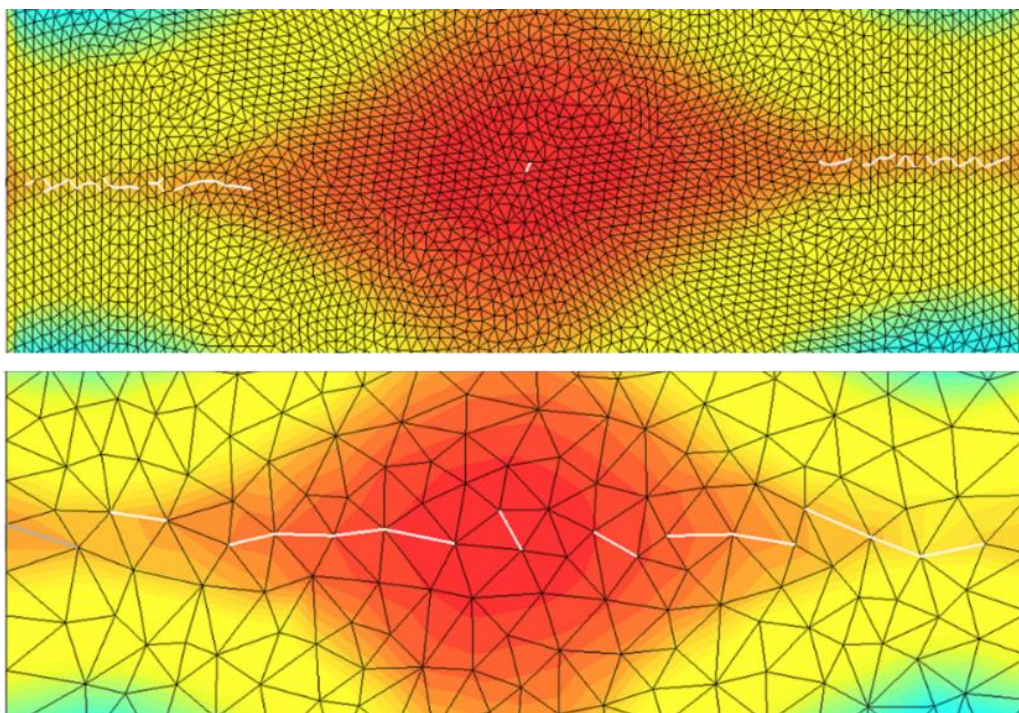
- Výpočtovou geometrii lze vytvářet automaticky
- Dosahuje vysoké přesnosti v místech velkých změn (např. při změně tloušťky stěny)
- Vysoká efektivita výpočtu
- Za účelem optimalizace model konečných prvků umožňuje realizovat jednoduché změny geometrie (např. změna tloušťky stěny nebo přidání žebra)
- zohledňuje objemné části dílu a oblasti s výraznými změnami tloušťky stěn
- Možnost převedení optimalizované geometrie do formátu STL

Hustota sítě

Hustota sítě je jedním z klíčových parametrů simulace. Obecně lze tvrdit, že s jemnější sítí lze dosáhnout vyšší přesnosti simulace. Avšak s aplikací jemnější sítě roste výpočetní čas. Při použití hrubé sítě však nemusí být vyhodnoceny důležité vady. Proto je vhodné volit jemnost sítě s rozmyslem. Je tedy vhodné volit kompromis mezi výpočetním časem a přesností simulace. Mezi dva důležité aspekty, které mohou být vlivem hrubé sítě zkráceny: [3,5]

- Uzavřený vzduch
- Studené spoje

To jsou běžné problémy, které souvisí s hustotou sítě. Pokud není síť dostatečně jemná tyto vady nemusí zachytit. Na obrázku 8 lze vidět porovnání hustoty sítě. Nahoře se nachází díl s jemnou sítí o velikosti elementu 1 mm. Pod ním se nachází díl s hrubou sítí s velikostí elementu 5 mm. Na díle byl záměrně vytvořen studený spoj pro vizualizaci problému. Z obrázku je jasně vidět, že studený spoj (na obrázku znázorněn bílou čarou) je lépe a přesněji vyhodnocen na díle s jemnější sítí. V místech, kde víme, že může nastat problém je vhodné síť zjemnit a v těchto místech tak zpřesnit výsledky. V místech malých změn může být síť hrubší. Tyto předpoklady platí pro běžné použití, které předpokládá použití běžně dostupných prostředků (výkonný stolní počítač). [1,3]



Obrázek 8 Rozdíl v hustotě sítě. Zhora jemná síť, dole hrubá síť

2.1.4 Hlavní CAE analýzy

Cílem CAE softwarů je u technologie vstřikování analýza plnění, dotlaku, chlazení, smrštění a deformace, které jsou níže podrobněji popsány.

Analýza plnění

Je jednou z nejdůležitějších analýz. Ukazuje nám kudy tavenina teče ve kterýkoliv okamžik. Tím jsme schopni vyhodnotit kritická místa dílu, která je vhodná vylepšit. Jedná se o úpravu tvaru výlisku, úpravu tloušťky stěny, přemístění žeber atd. Lze optimalizovat jak tvar, tak i polohu vtoku. [2,3]

Analýza plnění slouží také k predikci různých vad. To mohou být např. studené spoje, uzavírání vzduchu, orientace vláken atd. Tím je předurčena pro optimalizaci, respektive vybalancování celé vtokové soustavy a optimalizaci vstřikovacích parametrů. [3]

Analýza dotlaku

Používá se k posouzení dotlakové fáze procesu vstřikování, která vede k optimalizaci parametrů. Lze optimalizovat jak velikost, tak i trvání dotlaku na základě analýzy rozložení průběhu teplot a tlaků. V rozložení teplotních průběhů lze odhalit oblasti, kde je již tavenina zamrzlá v různých časových úsecích a tím odhalit, kde ještě lze působit dotlakem. [1,3]

Analýza chlazení

Používá se k posouzení fáze chlazení dílu. Výsledkem je rozložení teplot na díle. Tím lze odhalit místa, která mají výrazně vyšší teplotu než zbytek dílu. Jsou to místa, která chladnou jako poslední a prodlužují tak cyklus. Je tedy vhodné v těchto místech optimalizovat účinnost chladicího systému, případně konstrukci dílu. [1,3]

Analýza smrštění a deformace

Používá se k posouzení kvality dílu a vstřikovacího procesu při simulovaných podmínkách. Výstupem této analýzy je stanovení velikosti smrštění a deformace jak v jednotlivých směrech, tak i celkové. Lze ji také použít pro porovnání vstupního 3D modelu se simulovaným dílem a tím k lepší vizualizaci deformací. Umožňuje měření deformací na jednotlivých plochách dílu, kontrolu odchylky vybraných bodů a změnu křivosti jednotlivých ploch a podobně. [1,3]

2.2 CAE softwary pro vstřikování plastů

Simulačních softwarů pro analýzu vstřikování plastů je na trhu hned několik. V následujících podkapitolách jsou popsány softwary, které jsou často používány v České republice.

2.2.1 Cadmould® 3D-F

Jde o CAE software německé společnosti Simcon GmbH, který se zabývá analýzou procesu vstřikování plastů. Cadmould® 3D-F zcela automaticky připraví 3D výpočtový model, který je postavený na vlastní patentované metodě. Dané řešení umožňuje přesné rozlišení měnících se materiálových veličin (jako například teplota, smyková rychlost atd.) po tloušťce stěn, což je základním předpokladem k přesným výpočtům komplexních proudových stavů v různých místech dílu. U veškerých modulů Cadmould® 3D-F jsou výpočty teplotně závislé, zohledňují strukturně-viskózní chování tavenin plastů a respektují stlačitelnost tavenin. Přesnost výpočtu softwaru Cadmould® 3D-F je vysoká a přitom veškeré výpočty probíhají velmi rychle. Software Cadmould® 3D-F je typickým pro jednoduché pracovní prostředí, které vyžadují běžné systémy např. Windows XP/Vista/7/8/10. [6,7]

Mohou být prováděny výpočty jak pro termoplasty, tak i reaktoplasty a elastomery. Cadmould® 3D-F je určen pro analýzu technologie vstřikování a to jak pro klasické vstřikování, tak i pro další varianty této technologie (dvoukomponentní vstřikování, vstřikování do pootevřené formy, kaskádové vstřikování, vstřikování s podporou plynu apod.). [6]

Obsahuje moduly pro jednoduché analýzy fáze plnění a strukturně-viskózní tepelně závislé výpočty, které analyzují fáze plnění, dotlaku, chlazení, deformace a smrštění (jsou založené na metodě konečných prvků).

Program obsahuje vlastní databázi materiálů, kterou lze však rozšířit za pomoci databáze Campus (obsahuje více než 7000 různých materiálů).

Cadmould® 3D-F využívá k popsání dílu příhradový model, který vyvinula firma Simcon a nechala si ho patentovat. Jedná se o kombinaci 2D trojúhelníkové sítě a jednoduchých prutových elementů. Tento model konečných prvků je speciálně uzpůsoben k simulacím vstřikování plastových dílů. [6,7,8]

2.2.2 Autodesk® Simulation Moldflow®

Další z velmi používaných softwarů pro vstřikování plastů je Simulation Moldflow® od společnosti Autodesk®. [5]

Jde o komplexní soubor softwarových nástrojů. Při správném použití tohoto softwaru můžeme předcházet situacím jako je špatná geometrie dílu, volba materiálu, konstrukce nástroje apod.

Funkce programu Autodesk® Simulation Moldflow® nám umožňuje simulaci plnění, dotlaku nebo chlazení při vstřikování materiálů ze skupin termoplastů a reaktoplastů, které mohou obsahovat plniva. Také nám umožňují předpovědět následné jevy jako jsou např. deformace dílu. [5]

Autodesk® Simulation Moldflow® obsahuje rozsáhlou knihovnu materiálů s naměřenými materiálovými vlastnostmi (PVT diagramy, pevnost v tahu, ohybu atd.). Jsou dostupné také podrobné informace o chladících médiích. [5]

Autodesk® Simulation Moldflow® umožňuje tři hlavní metody analýzy modelu. Jako prvním metoda analýzy je model se střednicovou plochou konečných prvků (střednicový model). Díky solveru Autodesk® Simulation Moldflow®/Fusion můžeme analyzovat trojrozměrné tenkostěnné modely (objemový model). Pomocí solveru Autodesk® Simulation Moldflow®/3D lze analyzovat trojrozměrné tlustostěnné modely (příhradový model). [5]

2.2.3 Moldex3D

Mezi další velice používaný software lze zařadit Moldex 3D/Shell os firmy CoreTech system Co., Ltd. Je nabízen v pěti úrovních od základní úrovně eDesign Basic (základní simulace) až po Solution Add-on, který nabízí velmi pokročilé funkce. Navíc podporuje simulaci mnoha technologií jako je MuCell, GIT nebo WIT. Nabízí také speciální funkce jako je posouzení optických vlastností dílu nebo optimalizace procesu pomocí DOE. [8]

Moldex3D je vybaven generátorem 3D sítě, který je speciálně vyvinutý pro potřeby vstřikování plastů. Síť je schopný vytvořit sám, přičemž je schopen kombinovat různé typy sítí v závislosti na složitosti dílu. Kombinuje tedy 2D povrchovou síť s 3D sítí. Pro vysokou přesnost výpočtu využívá Bonduary Layer Mesh, která vytváří síť napříč tloušťkou stěny.

Hustota sítě není homogenní. Je vytvořena tak, aby poskytovala přesné výpočty tam, kde je to třeba. Tedy zhuštění sítě je v povrchové vrstvě. [9]

2.3 Zásady správného navrhování plastových dílů

Plasty jako takové jsou známy již téměř 100 let, avšak k masové výrobě začalo docházet spíše v druhé polovině 20. století. Oproti kovům jsou plasty novějším materiálem, který se snaží nahrazovat některé kovové díly. Ke konstrukci plastového dílu však musí konstruktér přistupovat odlišně, jelikož plasty mají jiné vlastnosti a jejich zpracování je též odlišné. Snahou bývá používat jisté konstrukční zásady, které budou zajišťovat kvalitu výrobků s eliminací vad. [10]

To, jak konstruovat plastové díly vychází především z empirických zkušeností, zvolené technologie, designu a materiálu. Díl by měl být navržen tak, aby byla zajištěna jeho funkce, a z výrobního hlediska by měl být design co nejjednodušší. Snahou dnešní doby je do výrobku vnést co nejvíce funkcí a přidat tak větší přidanou hodnotu. S tímto trendem však roste složitost jak konstrukce dílu, tak i nástroje, což nevyhnutelně vede k možnosti vzniku výrobních vad. [10]

2.3.1 Tloušťka stěny

Tloušťku stěny ovlivňuje několik požadavků, které jsou často v rozporu. Je tedy potřeba najít kompromis mezi tuhostí dílu, vyrobiteľností a ekonomičností výrobního procesu. Tloušťka stěny je tedy kompromisem mezi užitnými vlastnostmi a cenou výrobku.

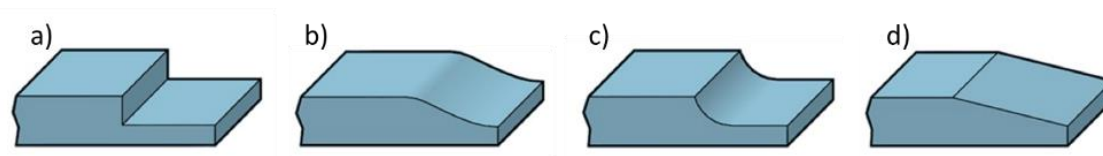
Z technologického hlediska by měla být tloušťka stěny, pokud možno co nejmenší, aby se zamezilo vzniku propadlin a vnitřních staženin. Tím se také sníží spotřeba materiálu (hmotnost), čas chlazení výrobku a výrobní smrštění. Tloušťka stěny závisí také na druhu plastu a délce toku (počtu vtoků). S rostoucí délkou toku taveniny musí růst i tloušťka stěny. [10,11]

Tloušťku stěny tedy ovlivňuje:

- Pevnostní výpočty
- Spotřeba materiálu
- Tekutost plastu (nebo viskozita)
- Počet vtoků
- Velikost výrobků

- Složitost dílu
- Technologie výroby

Platí, že tloušťka stěny by měla být, pokud možno konstantní po celém výrobku, která zaručuje rovnoměrný rozvod taveniny ve formě, rovnoměrné chlazení, smrštění a malé vnitřní pnutí. Obvyklé hodnoty tloušťky stěny se pohybují v intervalu od 0,5 mm až po 6 mm, výjimečně až 10 mm. Doporučená tloušťka stěny se pohybuje u běžných plastů v intervalu od 1,6 mm do 2,7 mm. Nedodržení tohoto doporučeného intervalu může zvýšit riziko výskytu různých nežádoucích defektů. Pokud není možné dodržet rovnoměrnou tloušťku stěny nesmí rozdíl v přechodu být větší jak 50 % (jedná se o empirickou hodnotu, skutečná hodnota závisí na materiálu a na hodnotě smrštění). Nerovnoměrná tloušťka stěny způsobuje víření taveniny, větší vnitřní pnutí (tenčí stěny chladnou rychleji, a proto mají menší procento smrštění než tlusté stěny) a nerovnoměrnou orientaci makromolekul. Přechod v tloušťce stěny by měl být pozvolný nebo opatřený rádiusem z důvodu vzniku vrubového účinku (viz obr. 9). Při nedodržení této zásady zde může vznikat prasklina, která bude snižovat užité vlastnosti, případně vést až k destrukci dílu. [11,12]



Obrázek 9 Přechod tloušťky stěny a) špatná konstrukce; b), c), d) správná konstrukce [11]

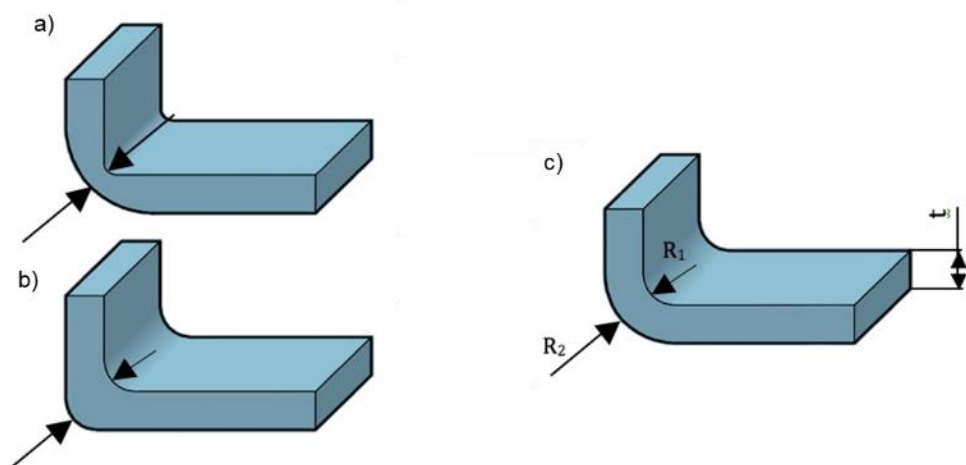
Z hlediska procesu vstřikování nám tloušťka stěny zásadně ovlivňuje proces. V případě tenkostěnného dílu sice snížíme množství vstříknutého materiálu, ale na druhou stranu výrobek ve formě rychleji chladne. Jelikož při vstřikování vzniká zamrzlá vrstva taveniny na lici formy je při tenkostěnném výrobku menší průřez pro tečení taveniny. To způsobuje zvýšení tlaku v dutině formy. Je tedy vhodné takové díly plnit tak rychle, aby nedocházelo ke spálení materiálu smykovými silami, případně výrobek opatřit více vtoky, které sníží tlak v dutině formy. Zvýšený tlak způsobuje rychlejší opotřebení formy, která zvládne méně vstřikovacích cyklů. V případě přidání dalších vtoků se zase zvyšuje cena nástroje. Obecně lze říci, že se snižující se tloušťkou stěny se zvyšují nároky na nástroj. [8]

2.3.2 Zaoblení

Ostré hrany jsou z hlediska konstrukce plastových dílů nežádoucí a jsou povolené pouze v dělicí rovině. Při špatném návrhu působí ostré hrany jako vrub, kde dochází ke koncentraci napětí a riziku vzniku trhlin. [12,13]

Zaoblení přechodů mezi stěnami je velice žádoucí, jelikož umožňuje lepší proudění taveniny. S rostoucím zaoblením hran se snižují hydraulické odpory proti průtoku taveniny, zvyšuje se homogenita proudění taveniny a stejné teplotní pole, to hraje při vstřikování důležitou roli, jelikož jsme schopni vstříknout díl za kratší čas. Snížení vstřikovacího tlaku má za následek nižší opotřebení formy, a i vyšší životnost. [12,13]

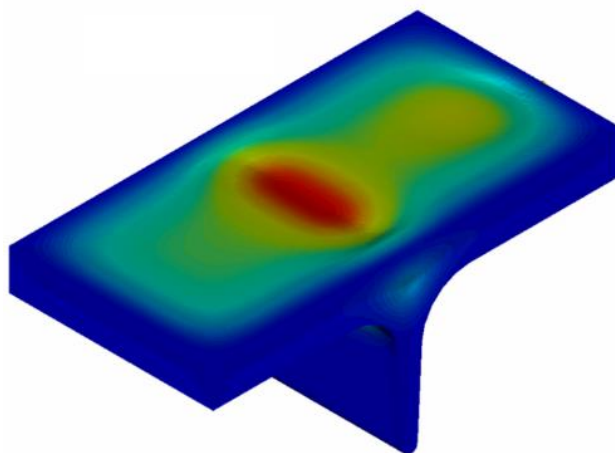
Na vnitřní straně výrobku se obvykle volí rádius v rozmezí $\frac{1}{4}$ mm až $\frac{3}{4}$ mm, další zvětšení rádiusu již nemá zásadní vliv na jakost výrobku. Jelikož musí mít výrobek rovnoměrnou tloušťku stěny, volí se vnější rádius o tloušťku stěny větší než na vnitřní straně (viz. obr. 10). Použití rádiusu v rozích, koutech a vnitřních hran napomáhá k eliminaci víření taveniny. [12,13]



Obrázek 10 Ukázka vnitřních a vnějších rádiusů a), b) špatně; c) správně [11]

Při volbě velkých rádiusů na kolmém styku dvou stěn typu T nebo při napojení žebra dochází k hromadění materiálu a tím k tvorbě propadlin, které můžeme vidět na obrázku 12. Tuto vadu lze eliminovat konstrukcí dílu, která spočívá ve zmenšení rádiusu, případně zmenšení tloušťky stěny žebra napojující se stěny. Tuto vadu lze také odstranit technologickými parametry, a to jak velikostí, tak dobou dotlaku. Nelze však očekávat vysokou účinnost, jelikož dotlak se nemusí ve vzdálenějších místech projevit. [12,14]

Na obrázku 11 lze vidět stěnu dílu, na které je napojeno žebro. Spoj je opatřen příliš velkými rádiusy, které způsobují nejen výraznou propadlinu, ale také hromadění materiálu způsobují teplotní uzel, který chladne jako poslední (tmavě modrá barva 50 °C, červená 100 °C). V extrémních případech může dojít až k vytvoření staženiny “lunkr“, který nemusí být na první pohled zřetelný. [14]



Obrázek 11 Napojení žebra s velkými rádiusy

2.3.3 Vyztužení výrobku

Žebra

Pro zvýšení tuhosti dílu je neekonomické používat větší tloušťky stěny, které vedou k vyšší spotřebě materiálu, delší době chlazení a riziku propadlin. Elegantním řešením je použití žebrování na povrchu dílu. Žebra je velice výhodné orientovat kolmo proti ohybovému momentu a diagonálně proti momentu krutu. Pro vyšší tuhost dílu se doporučuje použít křížení žebor, které zajišťuje velmi dobré rozložení napětí. [11,12]

Konstruktér, by měl brát v úvahu při návrhu žebrování i umístění vtoku. Pro dosažení vhodné orientace makromolekul a plniva je vhodné umístit žebra paralelně se směrem toku taveniny. Tento přístup má i výhodu v lepším plnění dutiny formy, jelikož je zde menší odpor proti tečení taveniny a žebra fungují jako kanály pro dopravu materiálu do vzdálenějších oblastí. [12,13]

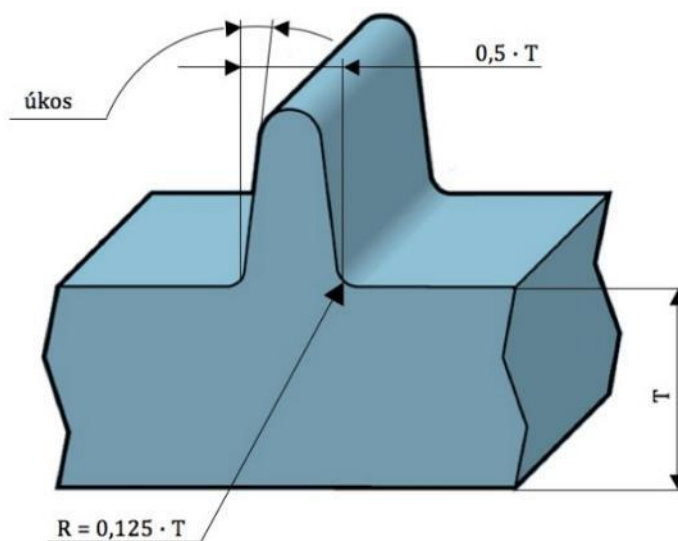
Velmi vhodným použitím žebrování je v podobě hexagonu. Propojením těchto útvarů získáváme síť, která připomíná včelí plást. Takto vytvořené žebrování přináší plynulé plnění bez velkých změn ve směru tečení materiálu. [12,13]

Žebrování se velmi často používá pro dosažení vyšší tuhosti dílu, případně zachování tuhosti při nižší tloušťce stěny. Při použití tlustšího žebra často dochází k propadlinám na protilehlé stěně. Z toho plyne, že žebro musí mít určitý vztah k tloušťce stěny. Empirické zkušenosti uvádějí, že optimální tloušťka žebra je mezi (0,7 až 1) násobkem tloušťky stěny

(viz tab.1), každopádně pokud je nežádoucí propadlina na protilehlé straně, tato hodnota se snižuje přibližně k (0,4) násobku tloušťky stěny. Tyto uvedené hodnoty jsou pouze orientační a závisí především na vlastnostech materiálu. Např. pro polypropylen se uvádí doporučená tloušťka žebra (0,5) násobku tloušťky stěny (viz obr. 12). Také i výška žebra má definovanou velikost mezi (1 až 3) násobkem tloušťky stěny a vzdálenost mezi nimi alespoň (2) násobek tloušťky stěny. Musí obsahovat také úkosy pro bezpečné odformování a rádiusy všech koutů a hran. [10,13]

Tabulka 1 Doporučená tloušťka žebra v závislosti na druhu materiálu

Typ plastu	nepatrná propadlina [%]	mírná propadlina [%]
PC	50	66
ABS	40	60
PA	50	66
PA + GF	33	50
PBT	30	40



Obrázek 12 Žebro a jeho základní rozměry [11]

Pro správný návrh žebrování je tedy nutné uvažovat nad následujícími parametry:

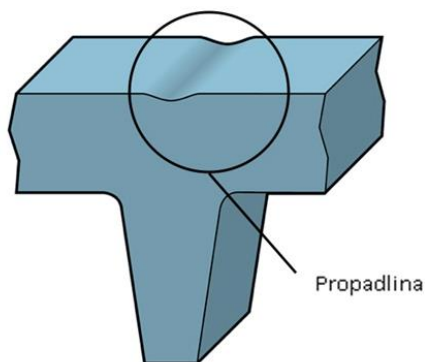
- Výška žebra
- Tloušťka žebra
- Počet žeber
- Umístění žebra

- A v neposlední řadě vyrobiteľnosť žebra

Žebra lze rozdělit podle funkce, pro kterou jsou používány:

- Technická žebra (pro vyztužení a zvýšení pevnosti)
- Technologická (snížení deformace, případně borcení stěn vlivem vnitřního pnutí)
- Estetická (zlepšení vzhledu, design)

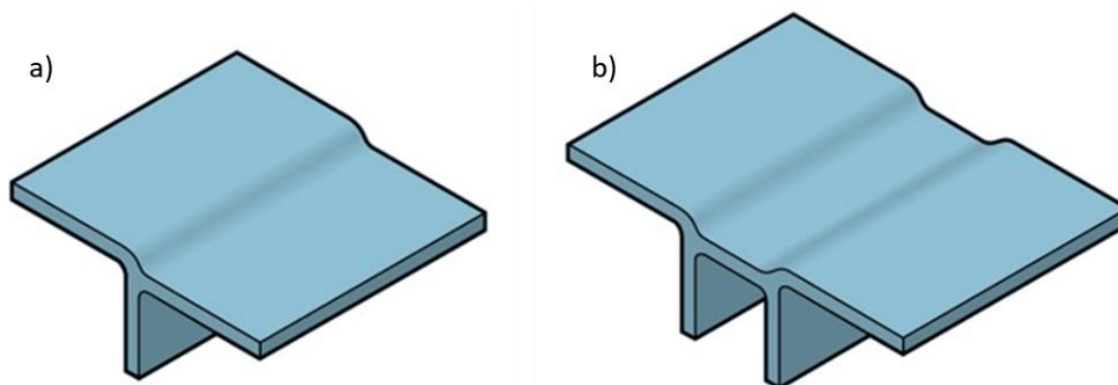
Žebra jsou u plastových dílů velice žádaná. Nejen že snižují hmotnost výrobku, navíc zlepšují tečení taveniny v dutině formy. Naproti tomu hromadí materiál ve spoji se stěnou, což má za následek zjevné vady na povrchu dílu (viz obr. 13). Velikost propadliny závisí především na tloušťce žebra a na velikosti smrštění materiálu. Dále také závisí na množství přísad nebo také na teplotě formy a taveniny. [14]



Obrázek 13 Ukázka propadliny v oblasti žebra [11]

Prolamování

Prolamování se používá pro zvýšení tuhosti dílu tak jako u žeber, ale s tím rozdílem, že se zde nepřidává dodatečný materiál. Tím pádem toto konstrukční řešení nemá negativní vliv na produktivitu výroby. Používá se pro eliminaci průhybu při ohybovém namáhání. Často se prolomení používá pro zakrytí propadliny, které lze vidět na obr. 14. [13,14]



Obrázek 14 ukázka možnosti prolomení a) jednoduché prolomení, b) dvojité prolomení [11]

2.3.4 Upevňovací výstupky

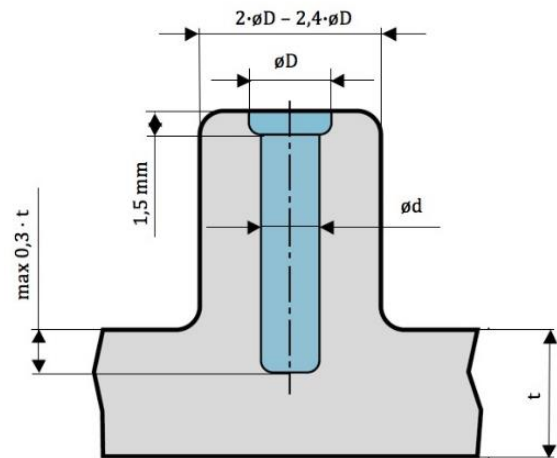
Tyto konstrukční prvky se s oblibou používají jako upevňující bod pro montáž dalších součástí. Mohou být provedeny jako průchozí nebo neprůchozí díry. Velmi často se využívají pro závrtné šrouby, nýty nebo pro zaskakovací kolíky. Pro správné navržení komínků se dodržuje především výška výstupku, průměr výstupku a hloubka díry. Dále je nutno opatřit výstupek úkosy a rádiusy pro správné odformování výrobku. [13,15]

Výška komínku je vázána především na vnitřní průměr díry, která se povoluje v maximální hodnotě (3) násobku průměru díry. S rostoucí výškou upevňovacího výstupku roste riziko nesprávného plnění dutiny formy, a to z důvodu rozdílné tloušťky stěny v honí části a u kořene výstupku. Často je u těchto konstrukčních prvků požadavek na díru bez úkosů, které komplikují odformování dílu. Jádra, která tvoří vnitřní průměr výstupku jsou štíhlé válečky, které špatně odvádějí teplo a způsobují tak nerovnoměrný odvod tepla a tím i náchylnost s vnitřní napjatostí dílu. Příliš vysoké upevňovací výstupky tedy nemají nijak velký význam. Alternativně lze tento problém řešit dlouhými žebry přesahujícími výstupek pro fixaci připevňovaného dílu, případně vysokým výstupkem s dírou z obou stran výstupku (mezi nimi vzniká přepážka o tloušťce stěny výstupku). [10,13]

Vnější průměr upevňovacího výstupku je vztažen k vnitřnímu průměru díry (šroubu), který se pohybuje mezi (2 - 2,4) D. Tento rozměr je však závislý na druhu šroubu a použitém plastu. Pro lepší montáž (navedení šroubu do díry) se opatřuje zvětšením průměru díry (na velký průměr závitu) do hloubky (0,5) násobku průměru díry (viz obr. 15). [10,13]

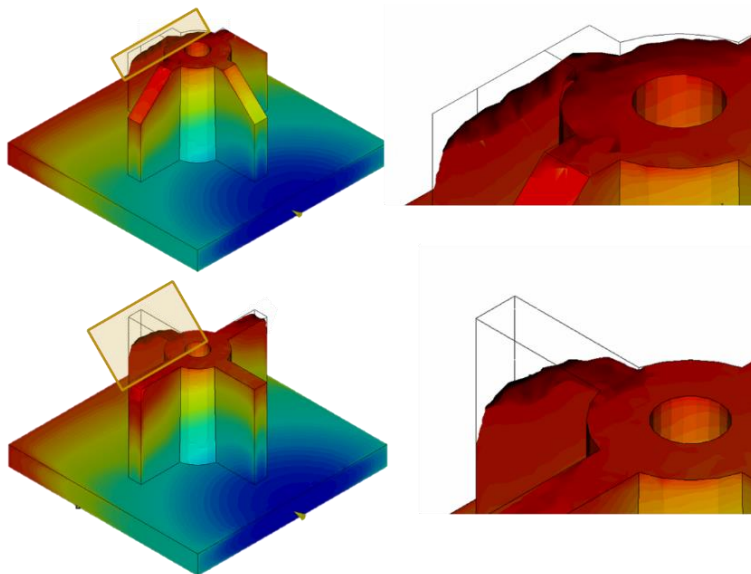
Hloubka díry v upevňovacím výstupku se běžně volí stejná jako jeho délka, avšak může být maximálně o (0,3) tloušťky větší. Toto pravidlo je především z důvodu zabránění hromadění materiálu a tím vzniku propadlin a tepelných uzlů. [10,13]

Pokud se upevňovací výstupek nachází v blízkosti stěny případně v rohu je vhodné je propojit pomocí žebra a zabránit hromadění materiálu. Všechny hrany musí být opatřeny rádiusem (0,25) tloušťky stěny. Vhodným umístěním žebra lze předcházet nežádoucím studeným spojům. [10,13]



Obrázek 15 Ukázka upevňovacího výstupku [11]

Pro vyztužení upevňovacích výstupků se používají žebra, která vedou rovnoběžně s upevňovacími výstupky (obvykle v počtu 4). Pravidla pro konstrukci výztuhy jsou obdobná jako u konstrukce žebra. Takto umístěná žebra uzavírají v rohu vzduch a zabraňují tak správnému plnění dutiny formy. Z tohoto důvodu se volí žebra se zkosením (viz obr. 16).



Obrázek 16 Vyztužení upevňovacích výstupku a) špatně – uzavírání vzduchu; b) správně

2.4 Dimenzování plastových dílů

2.4.1 Průvodní jevy

Každá technologie není dokonalá a do výrobku ukládá nežádoucí děje. U vstřikování plastů se musí počítat s anizotropií vlastností, orientací makromolekul, vnitřní napjatostí a studenými spoji. Tyto neduhy jsou spojeny přímo s technologií a nedají se odstranit. Je možné je ovlivňovat procesními parametry, ale nikoliv úplně odstranit. [13, 14]

Anizotropie vlastností

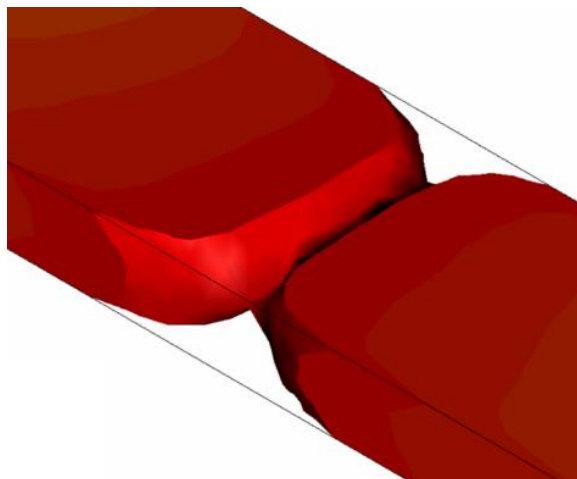
S anizotropií se setkáváme snad u každého materiálu, který prošel některým ze zpracovatelských procesů. V materiálu, byť na první pohled homogenním, lze sledovat jisté fyzikální rozdíly v různých směrech. Asi nejlepším příkladem pro představu je dřevo, které svými vlákny způsobuje odlišnou pevnost v ohybu při namáhání kolmo a rovnoběžně na směr vláken. [13, 14]

U vstřikovaných dílů je anizotropie způsobena orientací makromolekul a plniva. Orientace je zapříčiněna silami, které působí na taveninu plastu. Jedná se především o vstřikovací tlak a dotlak. Makromolekulární řetězce jsou natahovány ve směru působících sil. Pokud je vstřikován tenkostěnný profil, je zde riziko rychlého ztuhnutí, a to dříve než se makromolekuly stačí orientovat do energeticky výhodných poloh, které odpovídají maximální entropii systému. Tím je vloženo vnitřní napětí do dílu, které se po určitém čase začne uvolňovat (závislost na čase a teplotě) a může způsobovat viditelné deformace. [13]

Studené spoje

Patří mezi nežádoucí děje procesu vstřikování, se kterými se musí počítat a snažit se je posunout do méně kritických míst. Studené spoje vznikají při obtékání překážky, kdy se tavenina rozděluje na více proudů a za překážkou se opět spojí (viz obr. 21). Ke spojení taveniny může dojít i za jiných podmínek. Např. při vstřikování více vtoky současně. Studený spoj je více či méně viditelný dle podmínek, za kterých vznikl. Rozhodující je zde úhel mezi čely taveniny. Pokud je úhel větší než 135° je studený spoj méně zřetelný, jelikož orientace makromolekul v obou proudcích je téměř shodná. V opačném případě je studený spoj dobře viditelný. Je především závislý na podmínkách jako je teplota taveniny a tlak, který určuje zřetelnost a náchylnost dílu k jeho porušení. [13, 14]

Studený spoj je z hlediska mechanických vlastností místem, které je oslabené a nedokáže přenášet takové zatížení jako díl bez studeného spoje. Asi největší propad mechanických vlastností je u vyztužených plastů plnivy. Plnivo na rozhraní čel taveniny nedokáže dostatečně pronikat do druhého čela, tím klesá pevnost v této oblasti a může dosahovat až pevnosti matrice. [13]



Obrázek 17 Ukázka vzniku studeného spoje

Pokles mechanických vlastností může být také zapříčiněn uzavíráním vzduchu mezi čely taveniny, kde může být koncentrována vlhkost, případně i nečistotami, které byly strženy při plnění dutiny formy. Umístění studeného spoje ovlivňuje poloha a množství vtoků. Svoji roli zde hrají i vstřikovací parametry. Za pomoci numerické analýzy plnění dutiny formy lze studené spoje odhalit a mohou být eliminovány, a to buď přidáním žebra do kritického místa, případně zesílením tloušťky stěny.

3 Experimentální část

Cílem experimentální části práce byla konstrukční optimalizace plastového dílu klimatizační jednotky. U produkce tohoto dílu byla pozorována velká míra neshodných dílů při rozjezdu výroby i v jejím průběhu. Jelikož se jedná o nepohledový díl byla jeho optimalizace zaměřena zejména na stabilizaci procesu vstřikování, a nikoliv na optické vady způsobené orientací makromolekul a tokem materiálu.

3.1 Popis dílu

Jedná se o díl klimatizační jednotky výhradně pro zákazníka automobilky Toyota. Tento díl se objevuje v typech aut Toyota Yaris a Auris. Rozměry dílu jsou 310 x 310 x 208 mm s tloušťkou stěny 1,5 mm a hmotností 390 gramů. Díl slouží v klimatizační jednotce k zakrytí evaporátoru (výparník), který ochlazuje vzduch proudící skrze něj. Výrobek je tedy tepelně namáhán. Použitý materiál byl blíže popsán v následující podkapitole.

3.1.1 Použitý materiál – Polypropylen

Materiál, který je použit pro výrobu dílů klimatizační jednotky (Toyota) je Sabic PP3320EH. Jedná se o upravený polypropylen, který je teplotně stabilizovaný s 20 % příměsí talku s použitím výhradně v automobilovém průmyslu. Základní materiálové a pevnostní vlastnosti tohoto materiálu lze nalézt v tabulce 2.

Tabulka 2 Typické vlastnosti materiálu Sabic 3320EH

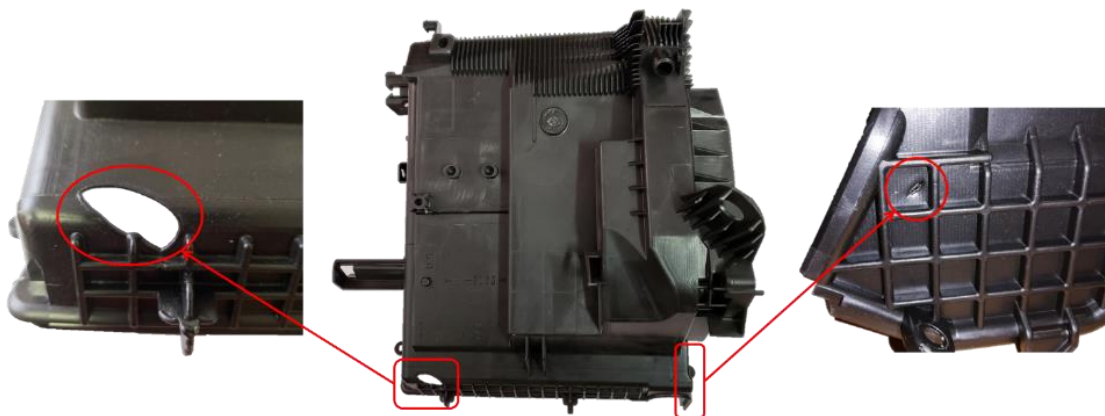
	hodnoty	jednotky	metoda
MFR (230 °C)	20	dg/min	ISO 1133
hustota	1040	kg/m ³	ASTM D1505
smrštění po 24 hodinách	1,1	%	
napětí na mezi kluzu	30	Mpa	ISO 527
napětí při přetržení	25	Mpa	ISO 527
poměrné prodloužení při přetržení	15	%	ISO 527
Shore D	72	-	ISO 868

3.1.2 Popis problému

Dlouhodobá výroba vykazuje jistou míru nestability, se kterou jsou spojeny vady výrobku. Nejčastěji se pak jedná o nedostřik, který je vidět na obrázku 18. Vada tohoto typu

je z hlediska funkčnosti výrobku nepřijatelná, a tudíž musí být eliminována. Jedná se tedy o ztráty jak finanční, tak i časové.

Při rozjezdu výroby je vyhazováno cca 30 kusů. Tento problém se nevyskytuje jen při rozjezdu, ale i při výrobě, kdy se začnou vyskytovat nedostříky na vyznačených místech.



Obrázek 18 Ukázka nedostříku na díle

3.2 Možnosti řešení

Možnosti, jak řešit tento problém je mnoho. Jistá řešení jsou levná jiná velice náročná a nákladná. V následujících podkapitolách byly popsány některé možnosti řešení problému, kterými lze více či méně úspěšně odstranit problém.

3.2.1 Změna procesních parametrů

Pokud není něco s dílem v pořádku, jako první jsou upravovány technologické parametry, které často vedou k rychlému vyřešení daného problému. Proto byla provedena úprava parametrů, které mají zásadní vliv na dolití dílu. Často se podobné problémy řeší prostým zvýšením vstřikované dávky taveniny, případně úpravou časů otevírání trysek, nicméně toto řešení bylo neúčinné. V momentě, kdy byla zajištěna stabilita procesu se objevily další vady výrobku. Jednalo se především o zástříky, a to bohužel i v kritických místech, kde zástřík být nesmí. Dále se objevil problém s přetlakováním formy a výrazným zhoršením odformování dílu z formy (objevovaly se bílé stopy od vyhazovačů, škrábance, deformace atd.). Změnou parametrů tedy správná cesta nevedla a bylo třeba zkusit jiné možnosti, které povedou k vyřešení tohoto problému.

3.2.2 Změna materiálu

Změnou materiálu by tento problém mohl být vyřešen. Použitím podobného materiálu, avšak s nižší viskozitou by mohlo vést ke správnému řešení. Materiálů, které mají podobné vlastnosti je mnoho. Jsou zde však mnohá úskalí v podobě odlišného smrštění, které povede k odchýlení rozměrů od výkresu. Dále je nutné tuto změnu řádně projednat se zákazníkem, který ji ne vždy povolí. Tato změna s sebou nese opětovné testování celých klimatizačních jednotek, a to všech verzí, které se dají složit. Je tedy nutné vyřídit mnoho dokumentů a projednání celé věci se zákazníkem a následné testování. Je velice časté, že zákazník chce mít všechny díly ze stejného materiálu, čímž by byla nutná změna materiálu u všech forem, které se podílí na výrobě klimatizační jednotky pro tohoto výrobce.

3.2.3 Změna umístění a počtu vtoků

Umístění vtoku hraje zásadní roli při vstřikování plastů. Je tedy vhodné mít vtok dobře umístěný (vybalancovaný). V ideálním případě by mělo být vstřikování rovnoměrné (tavenina zatéká všude stejně). Ve většině případů toho nelze dosáhnout úplně. Vždy bude některé místo plněno jako poslední.

Změna polohy vtoku by mohla vést ke stabilizování výroby. Jelikož změnou umístění vtoku se změní i tlakové rozložení taveniny ve formě. Bylo by tedy vhodné balancovat umístění vtoku, tak, aby tavenina rovnoměrně dotékala. Přidáním dalšího vtoku by mohlo dojít ke snížení tlaku v dutině formy a rovnoměrnějšímu tečení taveniny.

Řešení tohoto typu mohou být jednoduše optimalizována pomocí CAE analýzy, avšak provést na již vyrobené formě úpravu počtu vtoků je téměř nemyslitelné. Pokud bychom chtěli změnit umístění například dle výsledků simulace, nejspíše by byl v těsné blízkosti například temperační kanál, nebo by to nebylo umožněno konstrukčně. Nutno také dodat, že změna umístění vtoku je mnohdy velice nákladnou záležitostí.

3.2.4 Konstrukční úprava dílu – tokové kanály

Jsou charakteristické místním nárůstem tloušťky stěny ve směru, ve kterém chceme, aby tavenina lépe tekla. Mohou mít kruhový nebo obdélníkový průřez. Velikost (průřez kanálu) je závislá na tom, jak moc je zapotřebí ovlivnit tok taveniny. Jsou tedy vhodné použít tam, kde tavenina špatně dotéká. Na obrázku 19 lze vidět ukázkou kanálu s obdélníkovým

průřezem. Tokové kanály jsou jednoduše vyrobitelné a za nízkých výrobních nákladů lze dosáhnout optimalizace plnění dílu.



Obrázek 19 Ukázka tokového kanálu obdélníkového průřezu

3.2.5 Změna tloušťky stěny

Změna tloušťky stěny může být provedena na celém díle, případně změnu tloušťky provést na vhodně vybrané stěně, která zaručí lepší rozvod taveniny v dutině formy. Pokud tedy zvětšíme tloušťku stěny v blízkém okolí vtokového ústí, dojde k rychlejšímu plnění dutiny formy (viz kap. 2.3.1).

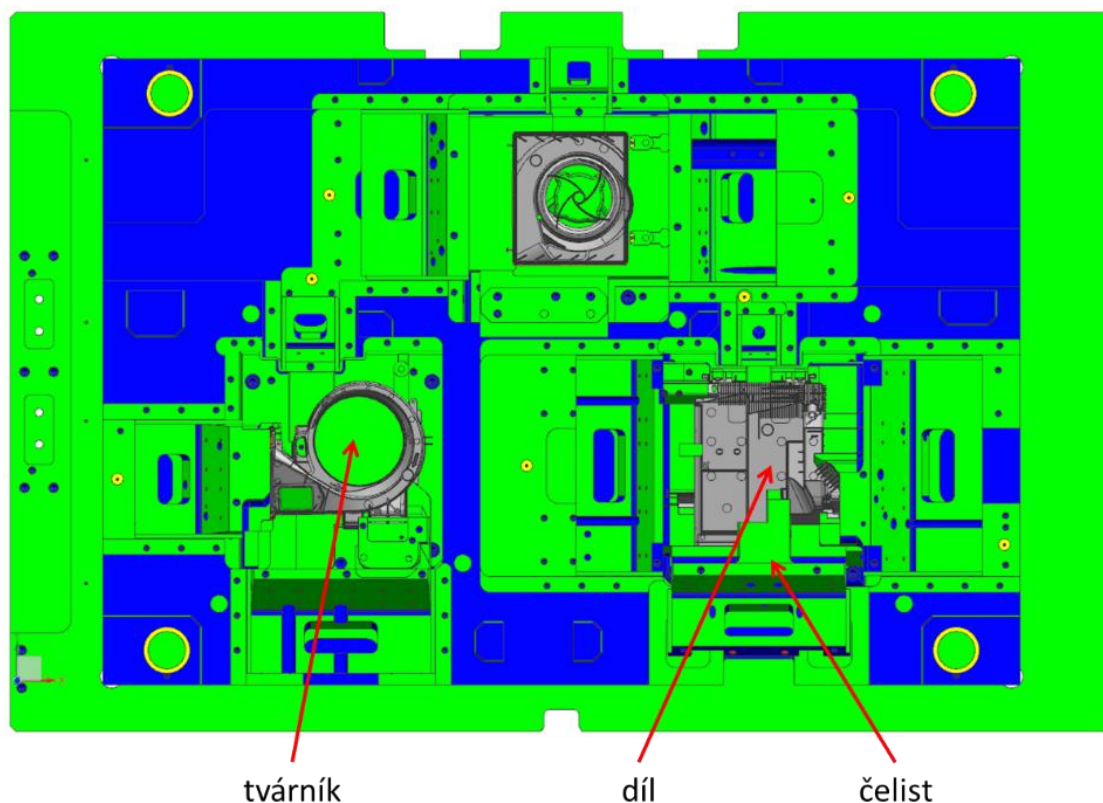
3.3 Popis vstřikovací formy

Vstřikovací forma, která byla použita k experimentu je majetkem firmy DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. Forma o rozměrech 1900 x 1240 x 1100 mm a o váze ca. 13 tun. Z hlediska konstrukce se jednalo o formu se třemi dutinami (family nástroj). Jelikož se jedná o složitější výrobky, musela být forma vyrobena s několika dělicími rovinami, které tvořily čelisti formy (čelist'ová forma). Dutina formy se skládala z několika částí. Hlavní část byla vyrobena z nástrojové oceli 1.2738. Forma obsahovala také menší vložky, které byly vyrobeny buď z nástrojové oceli 1.2738, nebo ze slitiny mědi HR750 (pro účinnější chlazení). U optimalizovaného dílu se vložka ze slitiny mědi nacházela v okolí vtokového ústí. Pohled do formy (pohyblivá strana) se zaformovanými díly můžeme vidět na obrázku 20.

Vtokový systém byl tvořen třemi horkými vtoky (pro každý díl jeden), které byly elektricky vytápěné (horký rozvod taveniny) a byly uloženy ve tvárnici a směřovaly kolmo

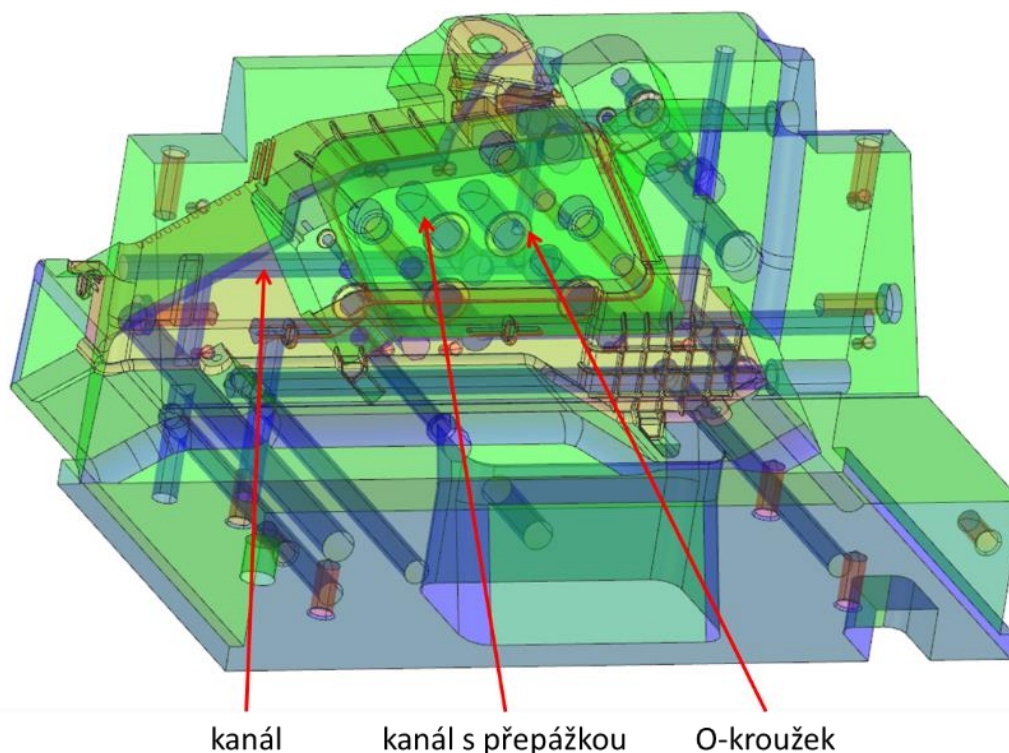
na hlavní dělicí rovinu. Průměr vtokového ústí byl konstantní u všech dílů, a to o průměru 7,6 mm. Vtoky byly za pomoci jehel uzavírány dle vstřikovacích parametrů.

Vyhazování výlisků bylo zajištěno kruhovými vyhazovači o průměru v rozmezí od 8 do 15 mm, které byly upevněny ve vyhazovací desce. Vyhazovací systém byl ovládán hydraulicky s možností profilování rychlosti a zrychlení (pro bezpečné vyhození výrobku z formy).



Obrázek 20 Pohled do otevřené formy (pohyblivá strana) s vloženými díly

Forma byla temperována devíti okruhy se standardním kruhovým průřezem. Přechody mezi základní deskou tvárnice a vyjímatelnými vložkami byly utěsněny pomocí O-kroužků. Forma byla primárně chlazená pomocí vrtaných kanálů o průměru 15 mm a 20 mm s vloženou přepážkou (chladičí médium je nuceno tuto přepážku obtékat a vytváří tak účinnější přenos tepla). Tyto temperační kanály byly propojeny vrtanými kanály, a tak vytvářely okruh. Na obrázku 21 lze vidět čelist, která je pro lepší názornost průhledná. Jsou zde vidět temperační kanály a utěsnění za pomoci O-kroužku.



Obrázek 21 Pohled na čelist (částečně zprůhledněná)

3.4 Vstupní parametry simulace

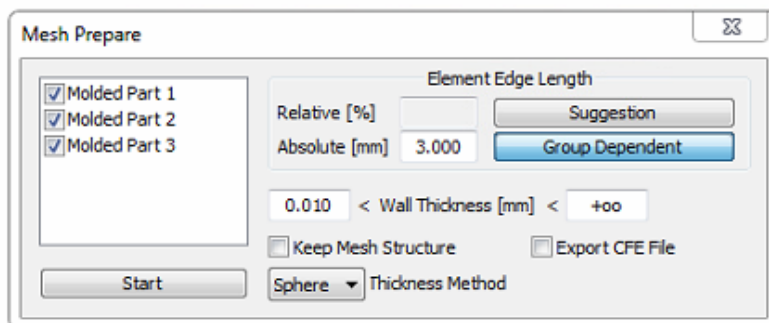
Analýza dílů byla provedena za pomoci softwaru Cadmould® 3D-F. V následujících podkapitolách byl popsán postup práce s daným softwarem, a to od tvorby sítě přes simulace vybraných návrhů až po vyhodnocení reálné deformace dílů.

Jelikož není výrobek ve formě zaformován sám, bylo nutné provést simulaci všech dílů, které jsou ve formě zaformovány. Důvod je jednoduchý. Při reálném vstřikování se otvírají trysky v závislosti na dráze šneku a ovlivňují tak tlak v jednotlivých dutinách formy, respektive rychlost tečení taveniny. To má za následek jiné vstřikovací podmínky než při vstřikování dílu samotného. Dopustili bychom se chyby, která by ovlivnila výslednou deformaci a smrštění.

3.4.1 Tvorba sítě

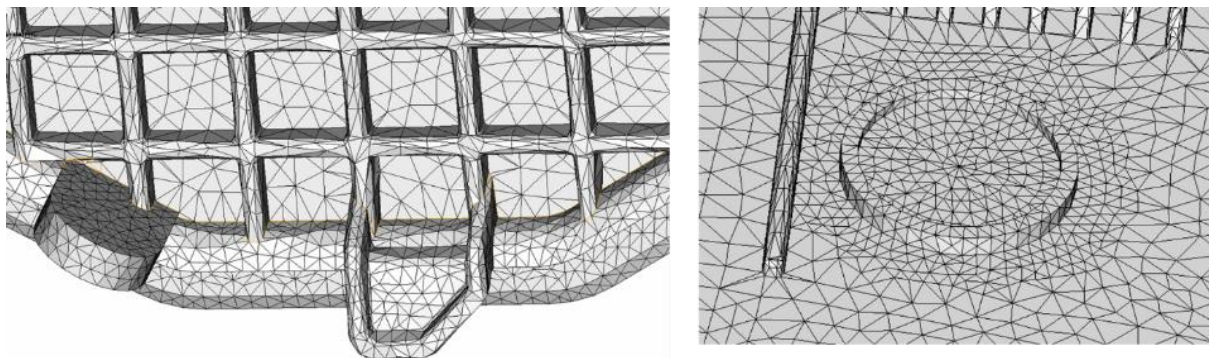
Program Cadmould® 3D-F umožňuje automatickou generaci sítě na zvoleném díle, přičemž software navrhuje doporučenou velikost elementu, která by měla zaručovat

dostatečné popsání dílu. V mém případě software navrhnul 3,278 mm. Velikost elementu byla zvolena 3 mm. Dialogové okno pro tvorbu sítě můžeme vidět na obrázku 22.



Obrázek 22 Dialogové okno pro tvorbu sítě

Jelikož byl díl tvarově složitý a obsahoval různá žebra a malé výstupky, byla v těchto částech vytvořena jemnější síť, která zaručovala dokonalé pokrytí sítí i v kritických oblastech (viz kapitola 2.1.3). Dále byla síť zjemněna i v okolí vtoku a v okrajích výrobku, jak lze vidět na obrázku 23. Jemnější síť dosahovala hodnoty 1,5 mm.



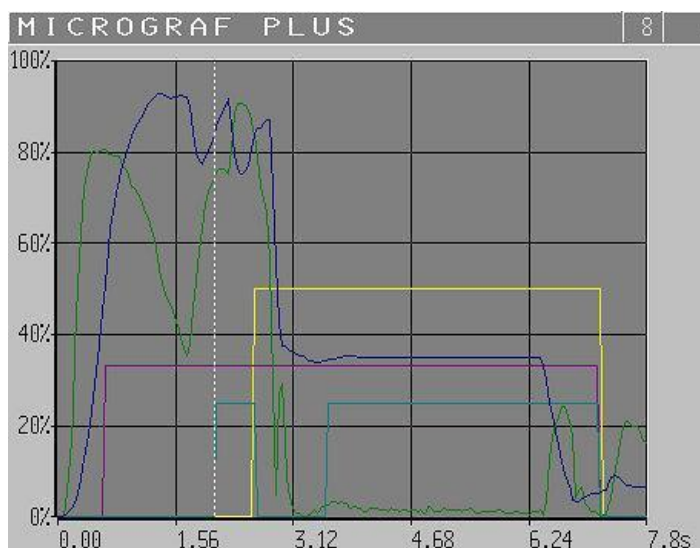
Obrázek 23 Ukázka sítě na okraji výrobku

3.4.2 Technologické parametry

Technologické parametry jsou zásadní faktor pro vstřikování plastů. Je tedy nutné získat parametry, které odpovídají realitě. Každá forma má svoji návodku s technologickými parametry, které jsou uvolněny na daném stroji (viz příloha 1). Jsou na ni napsány důležité parametry, se kterými může seřizovač v toleranci hýbat. Informace ve strojní návodce jsou vázány na daný typ stroje, a ne všechny lze přímo aplikovat pro CAE analýzu. Nicméně je možné tyto hodnoty do jisté míry převést a přizpůsobit možnostem simulačních programů.

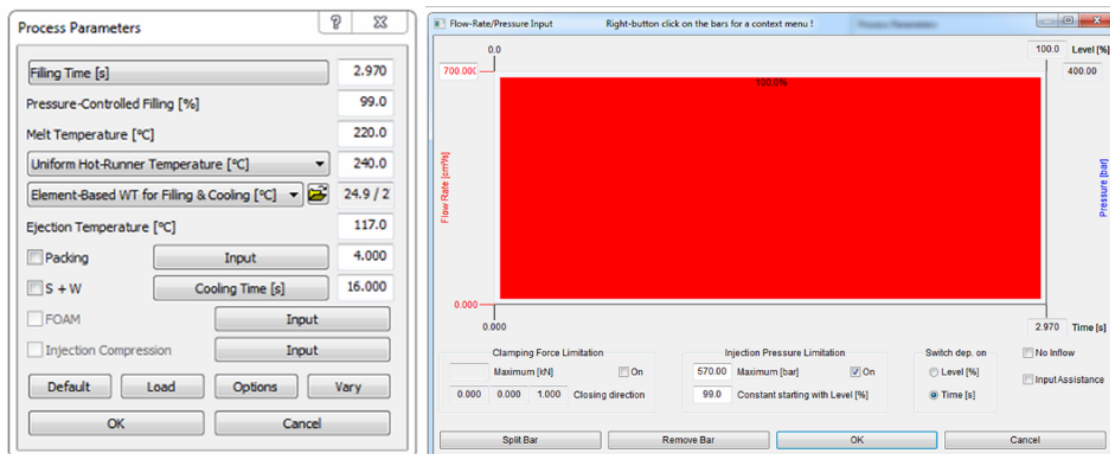
Jako příkladem může být dotlak, který je na stroji řízen za pomoci hydrauliky a seřizovač nastavuje hodnotu tlaku právě v hydraulickém válci, který působí na šnek a vyvozuje tím tlak na taveninu uvnitř válce. Simulace neuvažuje hodnoty v hydraulickém obvodu. Vstupním bodem v simulaci je vtoková vložka, kde je uvažováno natékání taveniny do formy. Jedná se o bod, kde je definovaný tlak a teplota. Pro získání velikosti dotlaku je tedy nutné mít tlakový senzor na vstupu do formy anebo znát konstantu pro přepočítání tlaku v hydraulice na reálný tlak na špičce trysky. Konstanta pro přepočítání strojních dat v tomto případě nabývá hodnoty 7,8. Tedy pokud na stroji bude nastaven dotlak dle návodky na hodnotu 35 barů, pak reálně bude dotlak dosahovat hodnoty 273 barů.

Jelikož Cadmould® 3D-F neumožňuje řízení trysek v závislosti na pozici šneku, musely být hodnoty přepočteny na čas (čas při kterém dojde k otevření dané trysky). Na obrázku 24 lze vidět mikrograf pořízený ze stroje, který vyráběl dané výrobky. Z mikrografu byly odečteny hodnoty času, kdy byly trysky právě otevřeny.



Obrázek 24 Mikrograf znázorňující závislost tlaků a časů otevírání trysek na čase

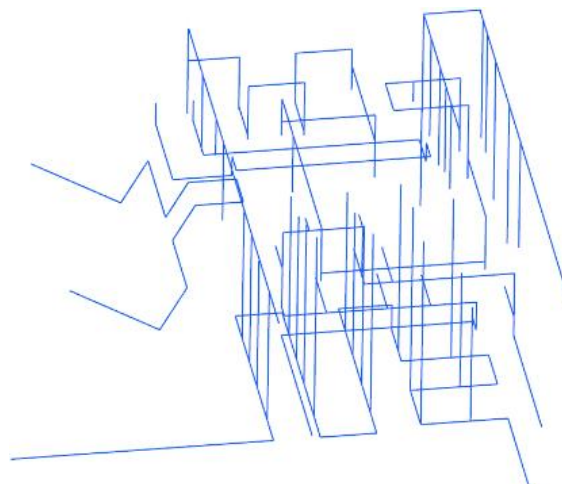
Po získání všech potřebných technologických parametrů byla následně nastavena data v Cadmould® 3D-F, respektive do dialogového okna procesních parametrů jak lze vidět na obrázku 25.



Obrázek 25 Dialogové okno pro definování technologických parametrů

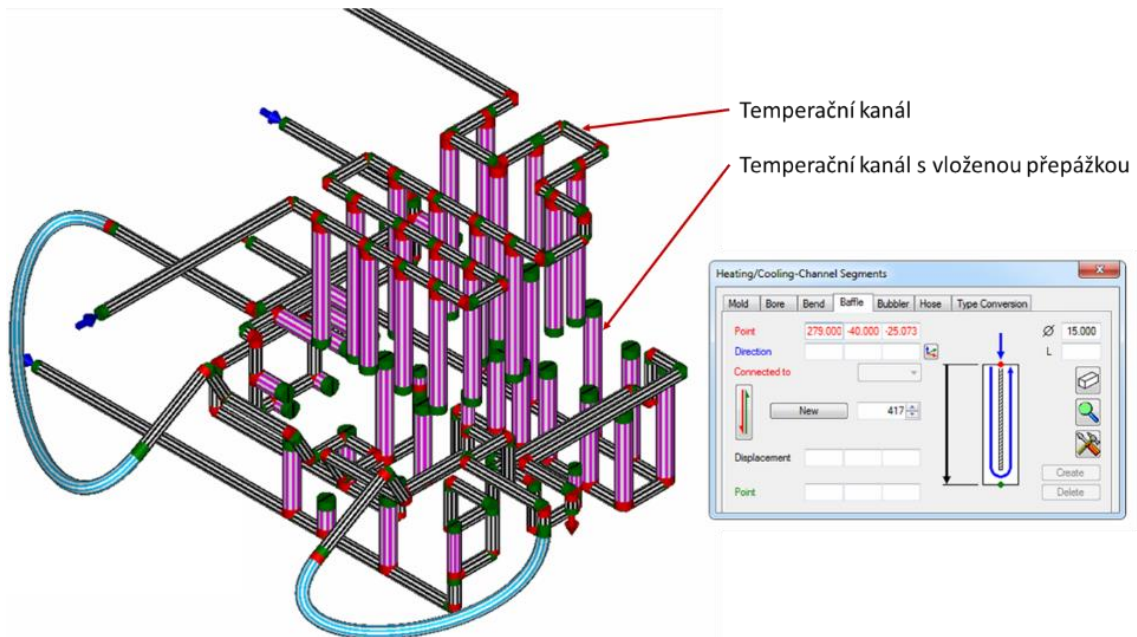
3.4.3 Příprava chladících kanálů

Rozmístění chladících okruhů bylo získané z 3D dat formy. Jelikož byly chladící kanály kruhového průřezu bylo možné získat jejich osy. Takto vygenerované osy byly poté upraveny (oříznuty konce tak, aby tvořily navazující trasu) a převedeny do formátu .igs (viz obr. 26).



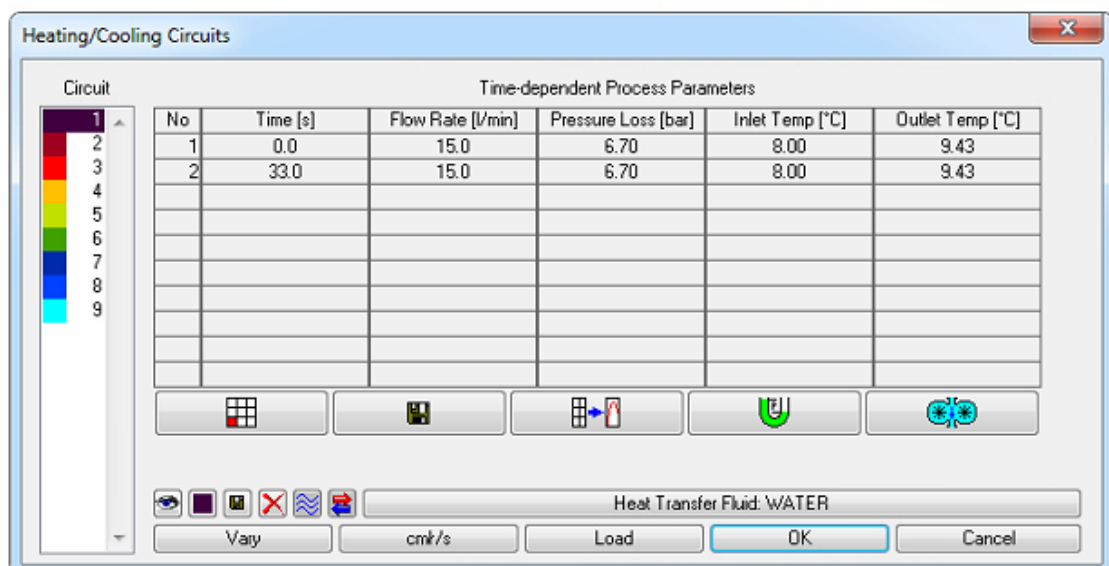
Obrázek 26 Osy chladících kanálů sledovaného dílu

Následně byly osy importovány do Cadmould® 3D-F. Zde bylo možné přiřadit kanálům jejich průměr. Temperační kanály měly průměr 15 mm, přičemž kolmo na ně byly vrtané kanály o průměru 20 mm, které měly vloženou přepážku. Na obrázku 27 lze vidět temperační kanály sloužící pro temperaci sledovaného dílu. Připraveny byly i temperační kanály pro ostatní výrobky. Celkem bylo vytvořeno 9 chladících kanálů.



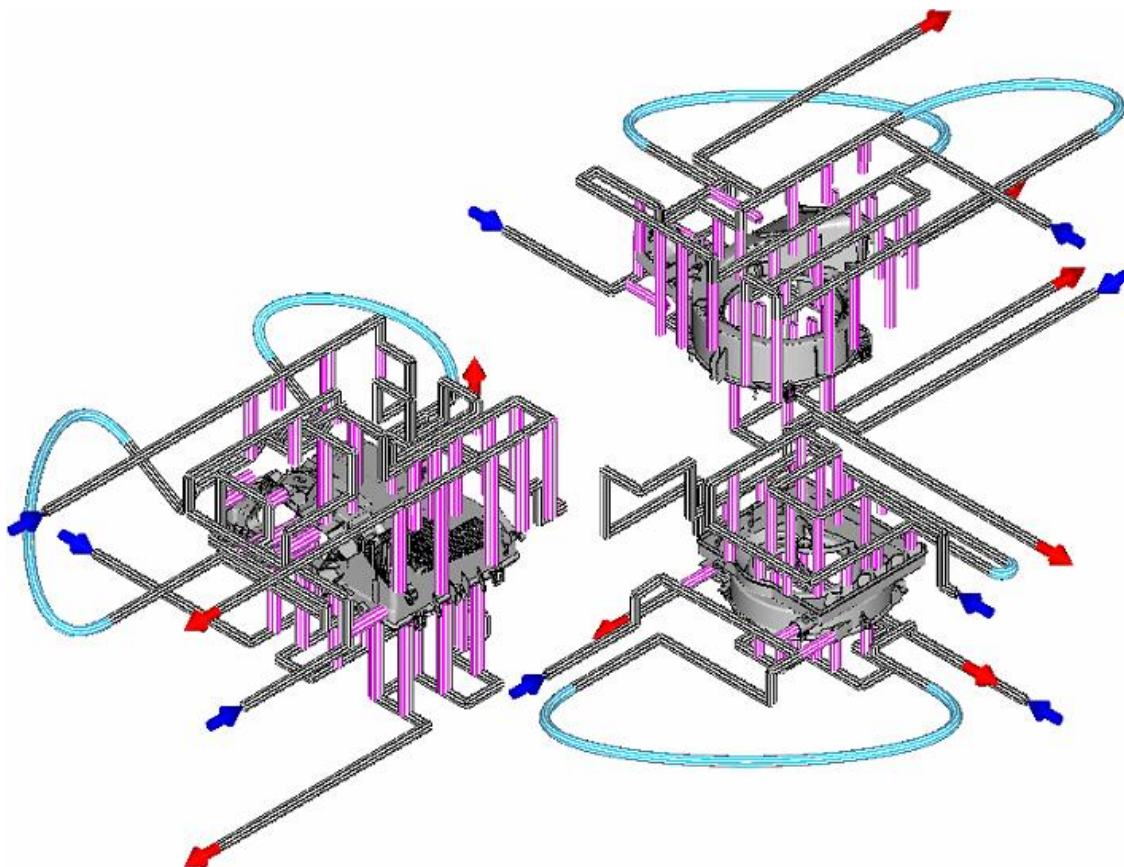
Obrázek 27 Ukázka temperačních kanálů s dialogovým oknem pro vytvoření kanálů

Jednotlivé kanály byly následně propojeny prvkem typu hadice do chladících okruhů tak, aby to odpovídalo co nejvíce reálnému stavu. Dále bylo nutné definovat použité chladicí médium, které v tomto případě byla voda o teplotě 8 °C. Definovaný musel být také průtok vody chladicím kanálem a směr proudění. Všechny tyto hodnoty se zadávaly do dialogového okna viz obrázek 28. Hodnoty průtoku vody byly nastaveny dle návodky viz příloha 1.



Obrázek 28 Dialogové okno pro zápis okrajových podmínek temperačních kanálů

Na obrázku 29 lze vidět připravené temperační kanály s analyzovanými díly. Jsou zde tedy vidět 3 výrobky a celkem 9 chladících okruhů. Přičemž na pevné i pohyblivé straně má každý výrobek vlastní chladicí okruh. Okruhy v čelistech každého dílu byly propojeny do jednoho. Každý výrobek měl tedy 3 chladicí okruhy.

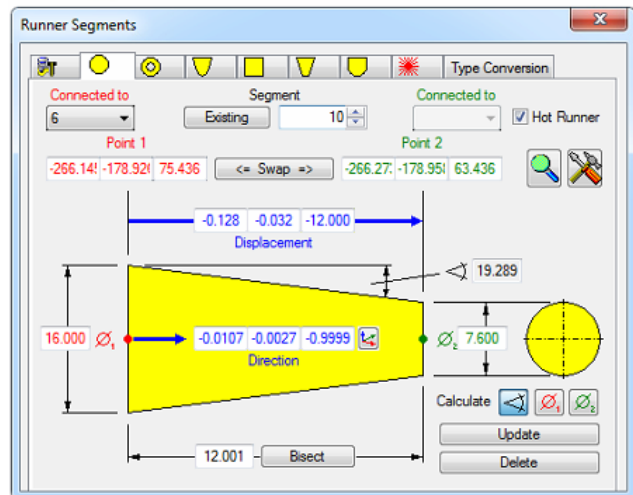


Obrázek 29 Soustava temperačních kanálů s díly

3.4.4 Příprava vtokového kanálu

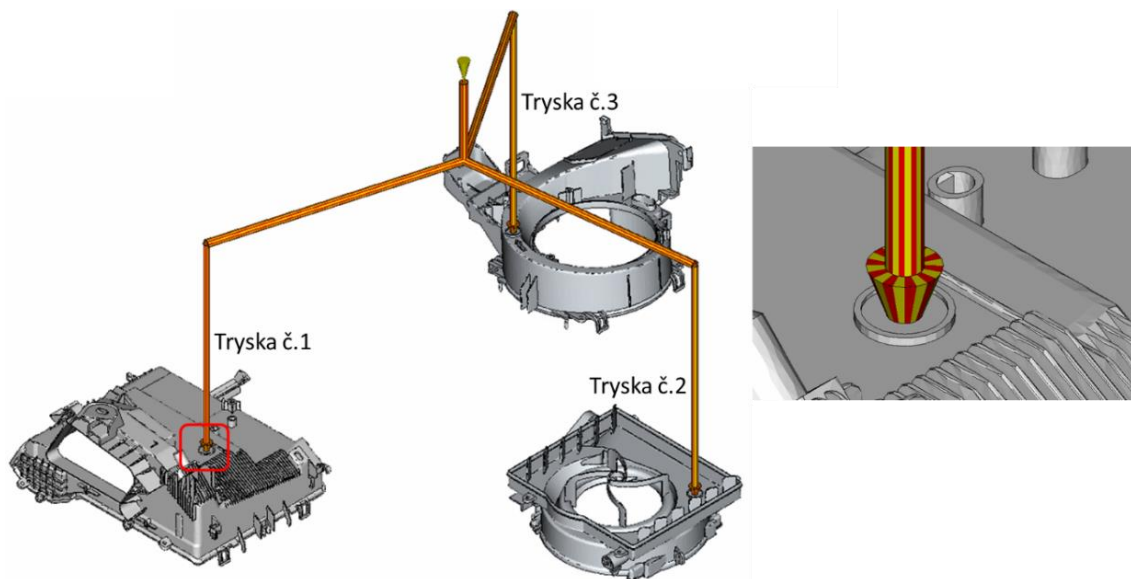
Vtokové kanály byly vytvořeny obdobně jako temperační kanály. V panelu nástrojů pro vtokový systém však najdeme různé typy útvarů, které lze na sebe skládat a lze tak vytvořit celý vtokový systém. Tento postup je vhodný pro jednoduché vtokové systémy. V případě horkých rozvodů si lze vybrat z knihovny, kde jsou již sestaveny některé používané typy trysek.

Forma disponovala horkým rozvodem taveniny s uzavíratelnými tryskami. Každý díl byl plněn jednou tryskou, které byly jednoduché konstrukce a nebylo tak potřeba extrahovat osy horkokanálu. Průměry a poloha byly odečteny z 3D dat formy. Následně pomocí dialogového okna pro tvorbu vtokového systému (viz obr. 30) byla vytvořena kompletní vtoková soustava.



Obrázek 30 Dialogové okno pro tvorbu vtokového systému

Horký rozvod taveniny měl průměr 16 mm. Na něj navazovala tryska s průměrem též 16 mm, avšak se uvnitř nacházela jehla o průměru 7,8 mm. Vtokové ústí tvořil komolý kužel o průměru od 12 až po 16 mm, který měl délku 12 mm. Svoji užší stranou byl napojen na díl. Na obrázku 31 lze vidět vytvořený horký rozvod taveniny s připojením na jednotlivé díly.



Obrázek 31 Ukázka horkokanálu se vstřikovanými díly

3.5 Simulace stávajícího procesu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4.2 bylo nutné některé vstřikovací parametry přepočítat. CAE analýza byla tedy spuštěna s parametry viz tab. 3 v souladu se strojní

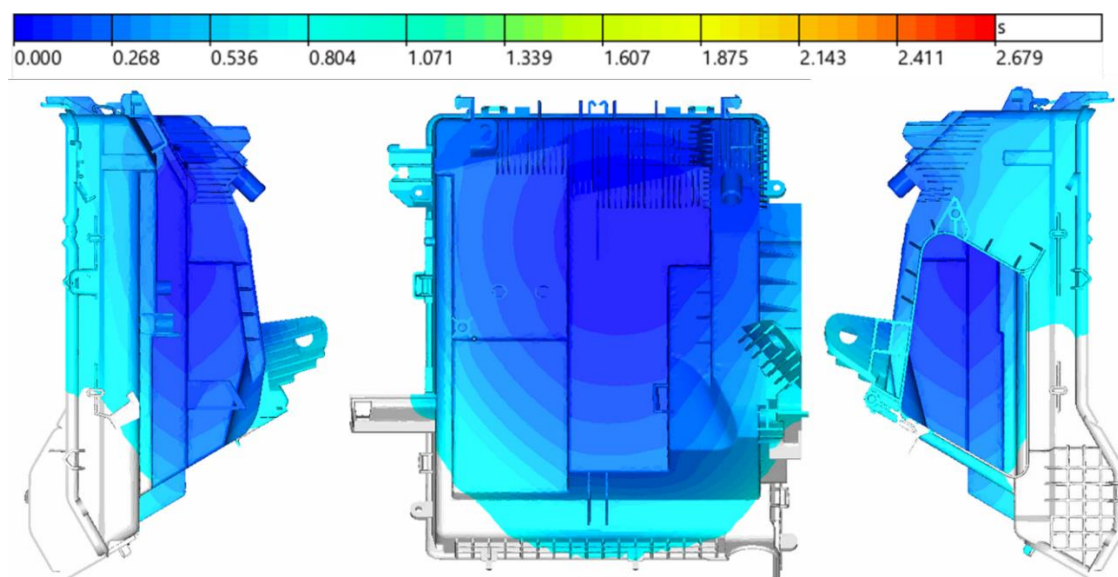
návodkou. V tabulce 3 jsou zapsány parametry, se kterými byla simulace spuštěna. Vstříkací cyklus byl řízen maximální hodnotou tlaku, a nikoliv objemovým průtokem taveniny. Velikost dotlaku byla konstantní po dobu 4 sekund. Otevírání trysek bylo řízeno časově, přičemž tryska číslo 1 odpovídala sledovanému dílu.

Tabulka 3 Vstříkací parametry

	hodnoty	jednotky
teplota taveniny	220	°C
teplota horkokanálu	240	°C
doba dotlaku	4	s
velikost dotlaku	273	bar
chlazení	16	s
tlakové omezení	570	bar

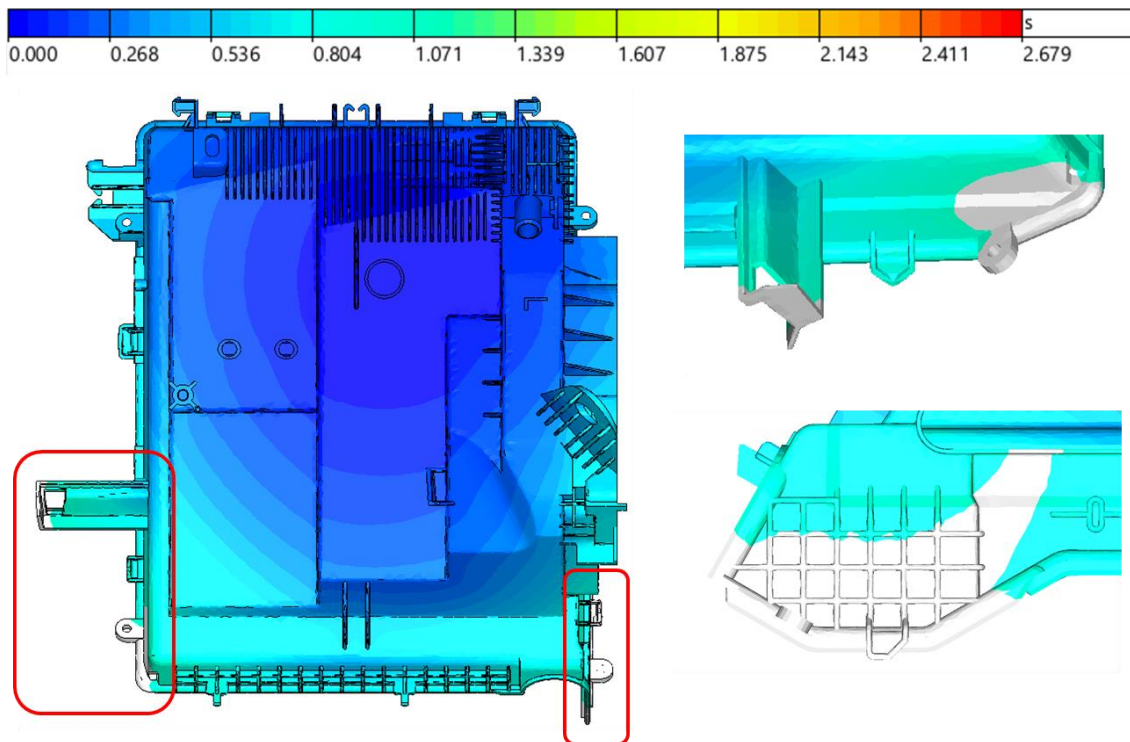
	čas otevření trysky
tryska č.1	0
tryska č.2	1,55
tryska č.3	1,99

Sledováním plnění dílu bylo zjištěno, že díl je plněn nerovnoměrně. Na obrázku 32 lze vidět, že díl je již naplněn z ca. 90 %, přičemž jeho horní část je již plně naplněna, každopádně spodní část nikoliv. Dochází zde tedy k nerovnoměrnému plnění dílu.



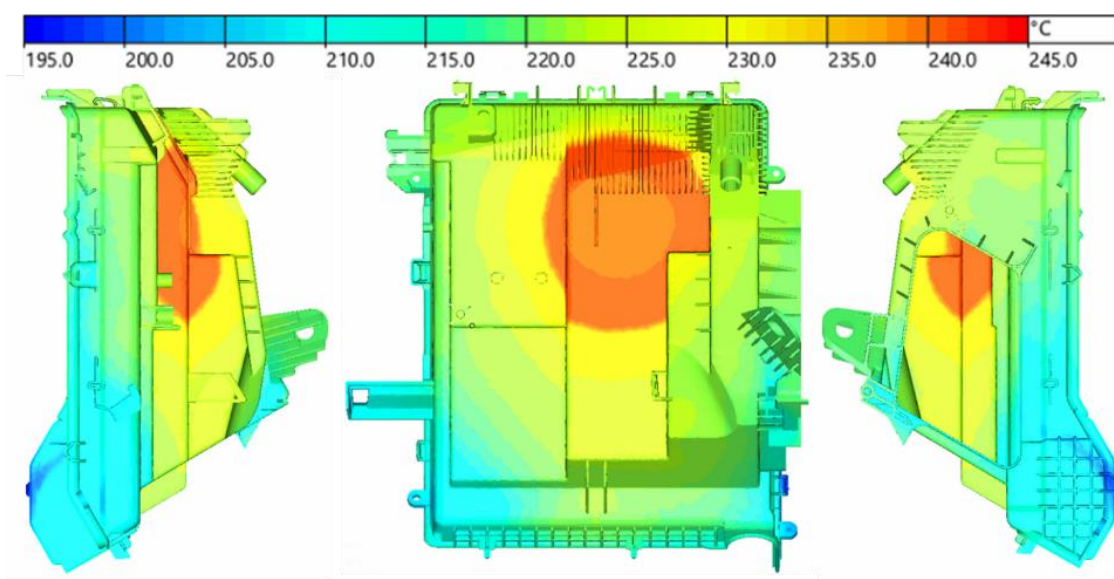
Obrázek 32 Plnění dutiny formy v čase 0,7 sekundy

Výsledky simulace potvrdily, že se dutina formy plní nerovnoměrně a může způsobovat vady, které jsou popsány v kapitole 3.1.2. Z obrázku 33 je patrné, kde se nachází místa, kam se tavenina dostane jako poslední. Jsou to právě ty místa, která jsou při reálné výrobě náchylná na nedolití. Další CAE analýzy jsem tedy soustředil na optimalizaci těchto kritických míst.



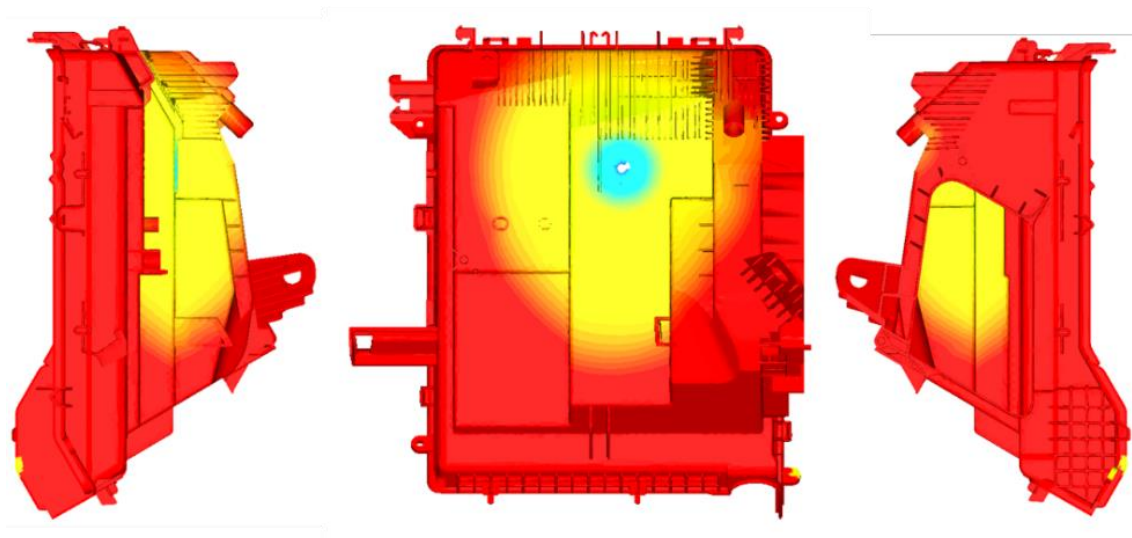
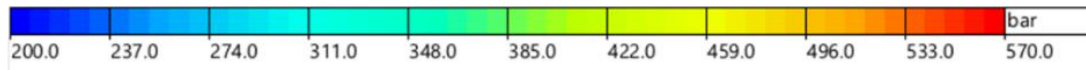
Obrázek 33 Poslední místa dolití taveninou vyhodnocené ze simulace původního dílu v čase 1,1 sekundy

Teplota taveniny na konci fáze plnění, kterou byl díl plněn lze vidět na obrázku 34. Jde zde vidět, že maximální teplota taveniny je v blízkém okolí od vtoku ca. 240 °C, přičemž s rostoucí vzdáleností klesá, a to až na 195 °C (kritická místa plnění). Nejnižší teploty však dosahoval ve spodní části výrobku, kde již tavenina měla vysokou viskozitu a tím bylo plnění dílu omezeno.



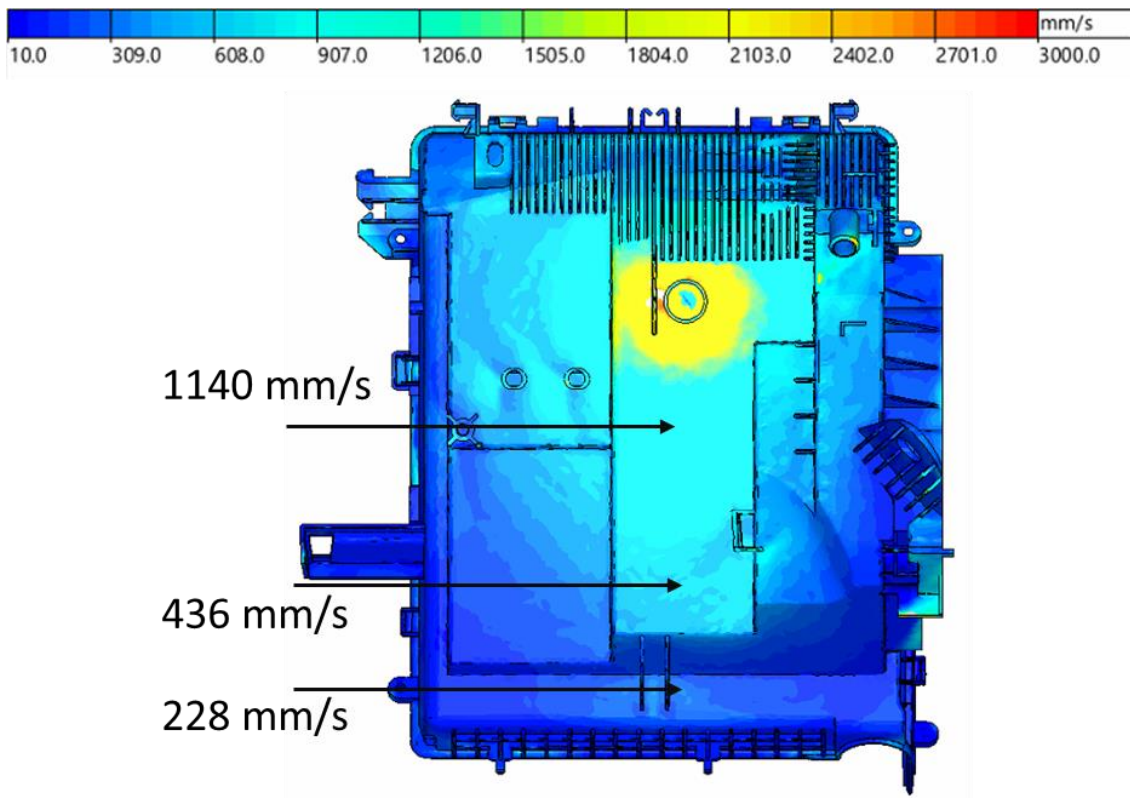
Obrázek 34 Rozložení teplot toku taveniny průběhu vstřikování

Na obrázku 35 lze vidět vyhodnocení tlakových ztrát (konec fáze plnění), které jsou s rostoucí délkou od vtoku výraznější. Nejvíce dosahují hodnoty 570 barů, což je hodnota tlaku, na kterou byl vstřikovací tlak omezen. Můžeme také vidět, že tlakové ztráty rostou se vzdáleností od vtoku. Od určité vzdálenosti jsou na maximální hodnotě a již dále nerostou. Zůstávají konstantní až k okrajům výrobku.



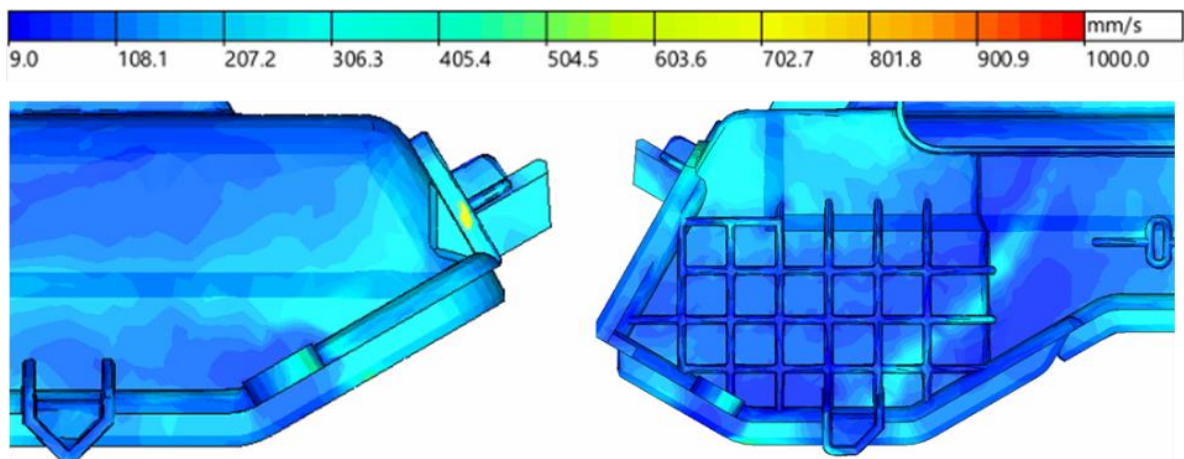
Obrázek 35 Tlakové ztráty v průběhu plnění dílu

Na obrázku 36 můžeme vidět rychlost proudění čela taveniny. Je zde tedy vidět, že s rostoucí délkou toku tato rychlost výrazně klesá, a to díky tlakovým ztrátám. Maxima dosahuje v blízkém okolí vtoku, kde nabývá hodnoty ca. 2200 mm/s. Ve vzdálenosti ca. 50 mm od vtoku (směrem do kritických míst) tato hodnota klesá ca. na polovinu tedy 1140 mm/s. Vzdálenost 125 mm od vtoku dále snižuje hodnotu na ca. 436 mm/s. Ve vzdálenosti ca. 190 mm rychlost klesá až na hodnotu 228 mm/s.



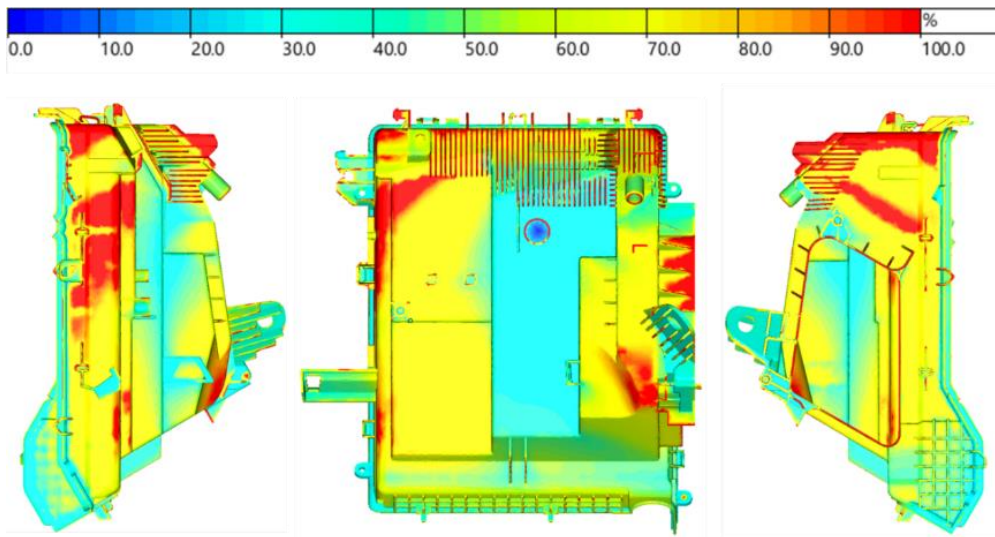
Obrázek 36 Rychlost plnění dílu v průběhu plnění

Na okrajích výrobku jsou již tak velké tlakové ztráty, že tavenina zpomaluje na rychlost v rozmezí 100 mm/s až 200 mm/s. V některých kritických oblastech dílu však rychlost klesá až na hodnotu 50 mm/s, viz obr. 37. Tavenina do těchto oblastí velice pomalu zatéká oproti ostatním částem dílu.



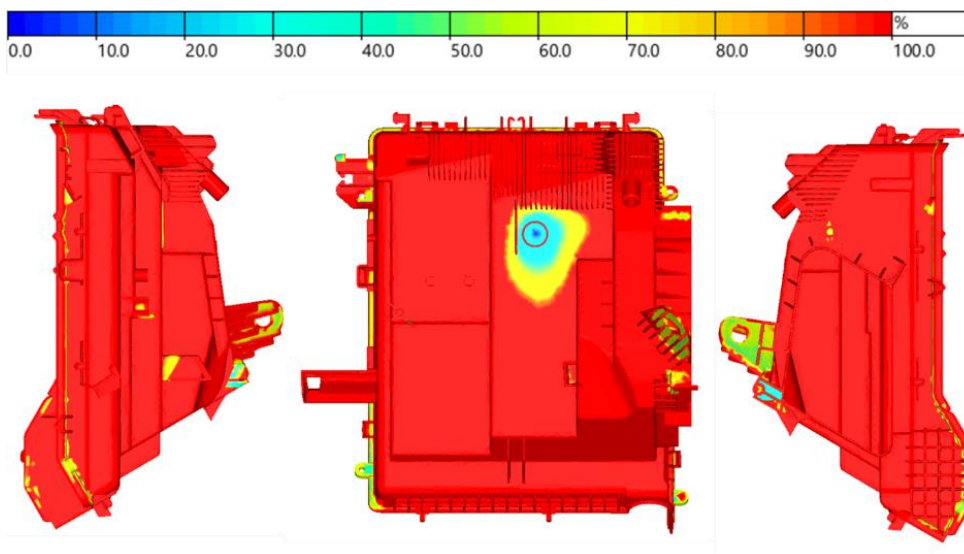
Obrázek 37 Rychlost plnění dílu v kritických oblastech, v průběhu vstřikování

Na začátku dotlakové fáze v čase 2,68 sekundy díl vykazoval oblasti, kde byla tavenina již zatuhlá a nebylo tedy možné do těchto míst působit dotlakem. Celkově díl vykazoval zamrzlou vrstvu v rozmezí od 35 % až 100 % jak lze vidět na obrázku 38. Dotlak je zde tedy omezený a nemůže působit v celém díle.



Obrázek 38 Zamrzlá vrstva taveniny na začátku dotlakové fáze v čase 2,68 sekundy

Na konci dotlakové fáze (v čase 6,68 sekundy) již zamrzlá vrstva dosahovala z velké části 100 %. V některých vzdálených místech od vtoku se nacházela izolovaná místa, která měla ca. 65 % zamrzlé vrstvy, každopádně dotlak zde již nebyl schopen působit, a to z důvodu již zamrzlé vrstvy v okolí. Dotlak tedy působil pouze v blízkém okolí vtoku, jak lze vidět na obrázku 39.

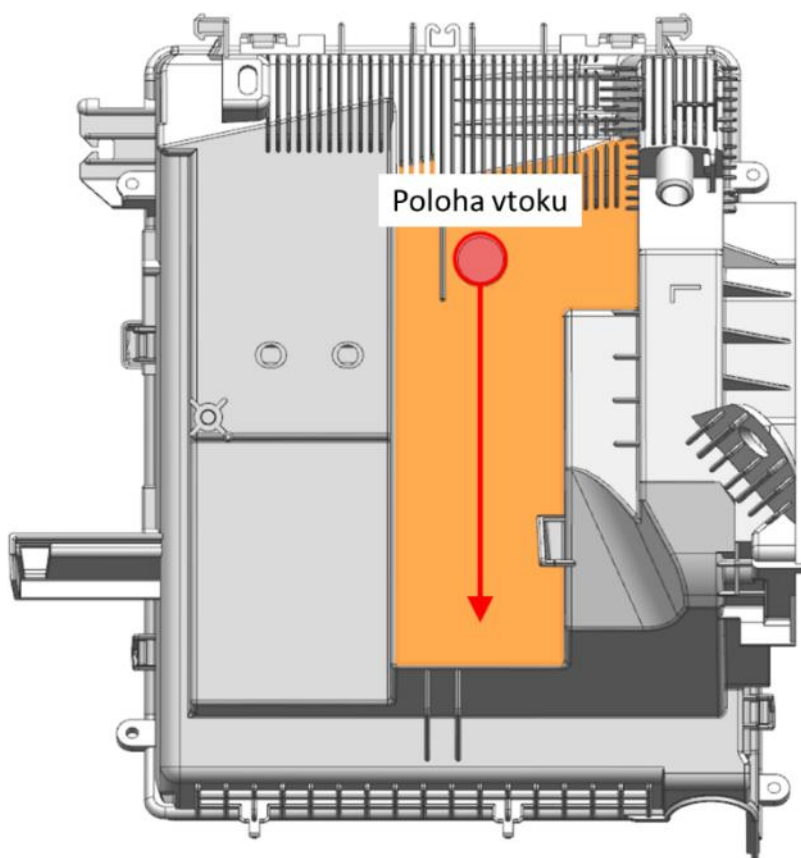


Obrázek 39 Zamrzlá vrstva taveniny na konci dotlakové fáze v čase 6,68 sekundy

3.6 Simulace dílu se zesílenou tloušťkou stěny v okolí vtoku

Jak již bylo představeno jednou z možností konstrukční optimalizace je změna tloušťky stěny ve vhodně vybraném místě, která by mohla zajistit optimální tečení taveniny do kritických míst. Návrh byl tedy upravit tloušťku stěny v okolí vtoku, která by měla napomoci lepšímu rozvodu taveniny v dutině formy (viz obr 40). Stěna byla zesílena o hodnotu 0,3 mm. Tato hodnota byla maximální možná, kterou zákazník dovolil. Tloušťka stěny zde nemůže být výrazně vyšší, a to z důvodu, že větší zvýšení tloušťky stěny by mohlo negativně ovlivnit proudění vzduchu uvnitř klimatizace. Z tohoto důvodu byla provedena simulace pouze varianty s nejvyšší možnou tloušťkou stěny.

Na obrázku 40 lze vidět díl s naznačeným místem, kde byla tloušťka stěny zesílena o hodnotu 0,3 mm. Můžeme zde také vidět předpokládaný směr kudy tavenina lépe poteče do problematických míst výrobku.



Obrázek 40 Díl s optimalizovanou tloušťkou stěny v oranžově označeném místě

Zvětšením tloušťky stěny ve vyobrazeném místě o 0,3 mm zvětšíme objem dílu o 4,6 cm³, což vede ke zvýšení hmotnosti dílu o 4,78 gramů.

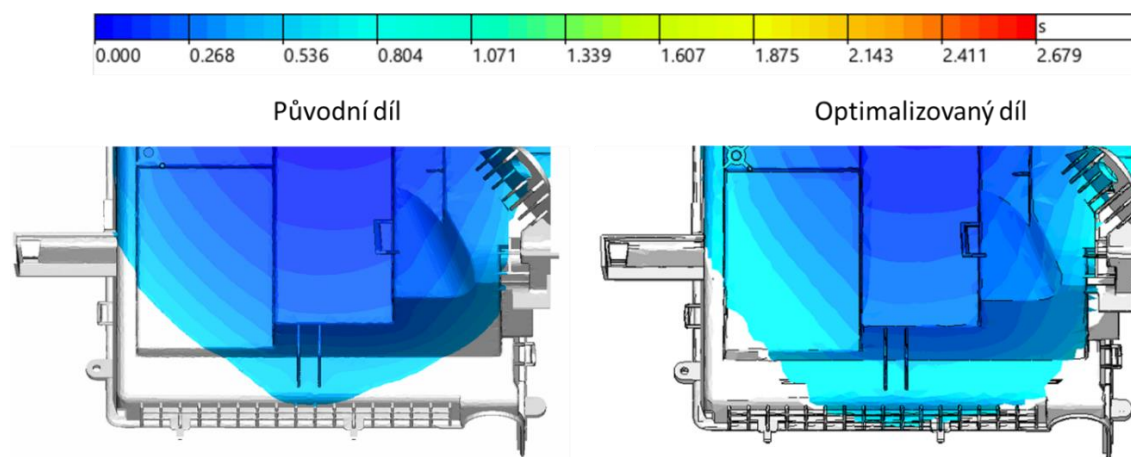
Simulace byla spuštěna se stejnými parametry jako měl stávající proces (viz kapitola 3.5) s tím, že byla simulace zastavena po naplnění sledovaného dílu. Důvodem bylo rychlejší naplnění prvního dílu (upravovaného dílu) a to o 0,45 sekundy. O tuto hodnotu byly sníženy časy pro otevírání trysek 2 a 3. Tak byly zachovány vstřikovací parametry s tím rozdílem, že námi upravovaný díl byl rychleji naplněn. Vstřikovací parametry viz tab.4.

Tabulka 4 Optimalizované vstřikovací parametry

	hodnoty	jednotky
teplota taveniny	220	°C
teplota horkokanálu	240	°C
doba dotlaku	4	s
velikost dotlaku	273	bar
chlazení	16	s
tlakové omezení	570	bar

	čas otevření trysky
tryska č.1	0
tryska č.2	1,1
tryska č.3	1,54

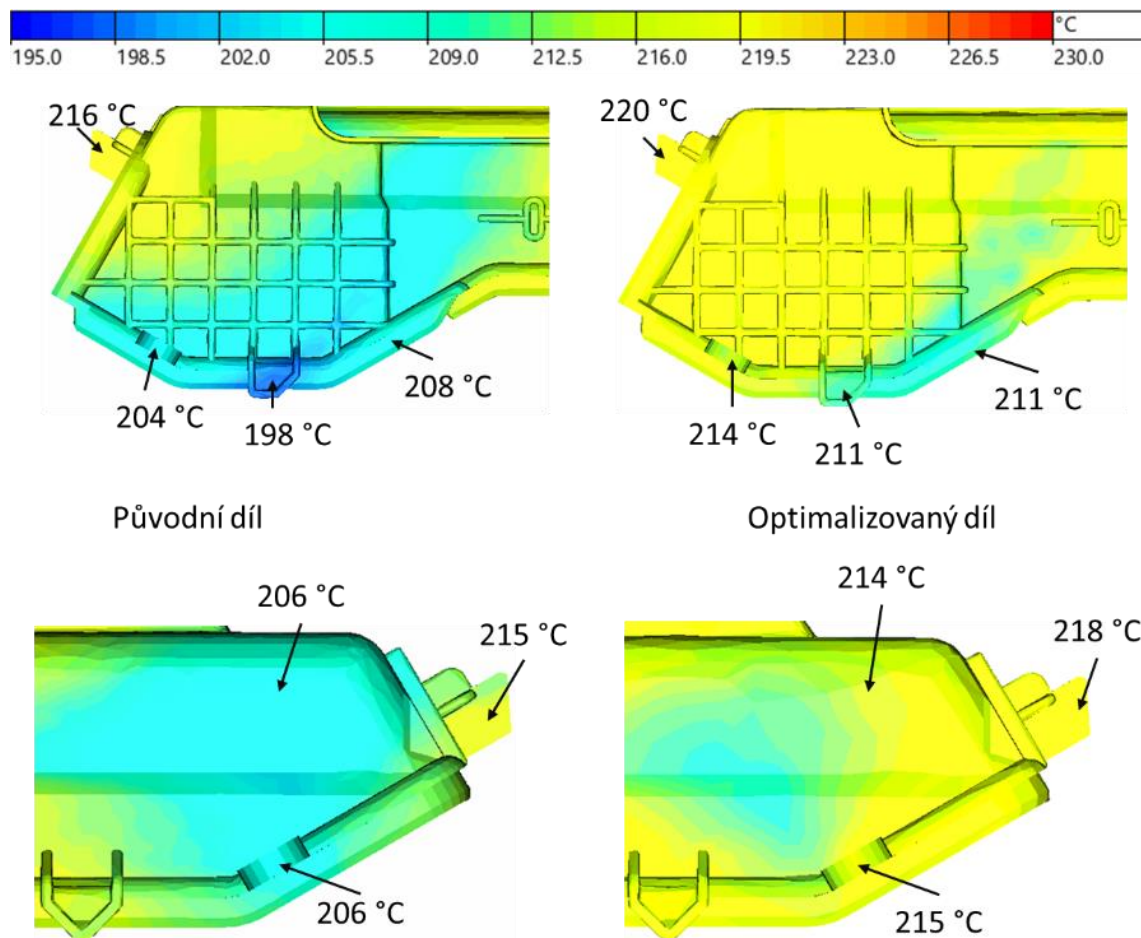
Na obrázku 41 lze vidět porovnání výsledků simulace toku taveniny, kde na levé straně je vidět díl bez úpravy a na pravém obrázku díl se zvětšenou tloušťkou stěny o 0.3 mm. Obrázek znázorňuje situaci, kde v obou případech je zachyceno plnění dílu, a to ve stejný čas plnění 0,5 sekundy. Již na první pohled je vidět, že tavenina lépe teče v dutině formy a za stejný čas se dostane do vzdálenějších míst od vtoku. Lze tedy vidět, že optimalizovaný díl lépe vede taveninu do kritických míst.



Obrázek 41 Porovnání simulací dílu před a po úpravě v čase vstřikování 0,5 sekundy

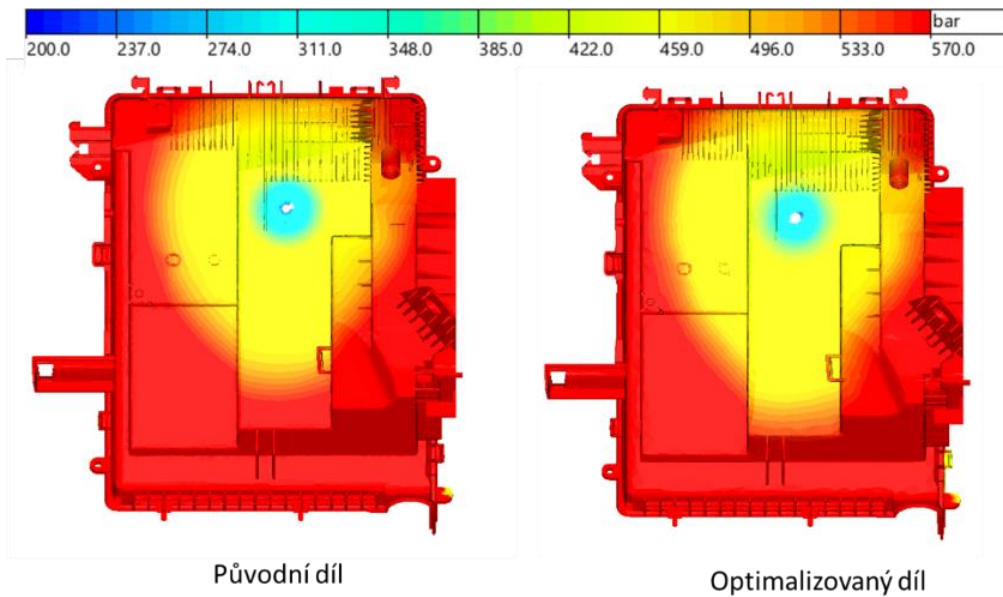
Na obrázku 42 je vyobrazené rozložení teplot taveniny na díle (v momentě, kdy byl díl právě naplněn), kdy na levé straně můžeme vidět původní díl a na pravé straně díl s upravenou tloušťkou stěny. Můžeme zde tedy vidět, že zvětšení tloušťky stěny má

pozitivní vliv na teplotu taveniny v okrajích výrobku, které dosahují zvýšení teploty až o ca. 13 °C. Byla také zaznamenána lepší distribuce teplot, která vykazuje menší rozptyl.



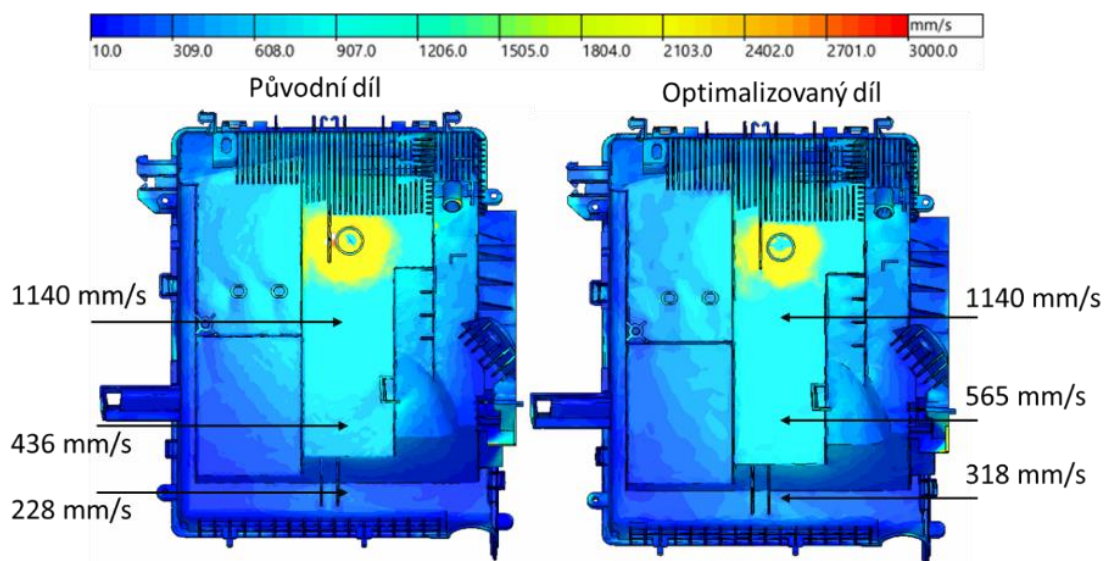
Obrázek 42 Rozložení teplot toku taveniny v kritických místech před a po úpravě

Na obrázku 43 můžeme vidět porovnání tlakových ztrát (na levé straně původní díl a na pravé optimalizovaný díl). Porovnáním lze vidět, že u optimalizovaného dílu došlo ke snížení tlakových ztrát, a to především ve směru, kde se nachází kritická místa. V obou případech však dosahují v blízkém okolí vtoku hodnoty ca. 300 barů, přičemž s rostoucí vzdáleností od vtoku rostou a zastavují se na 570 barech.



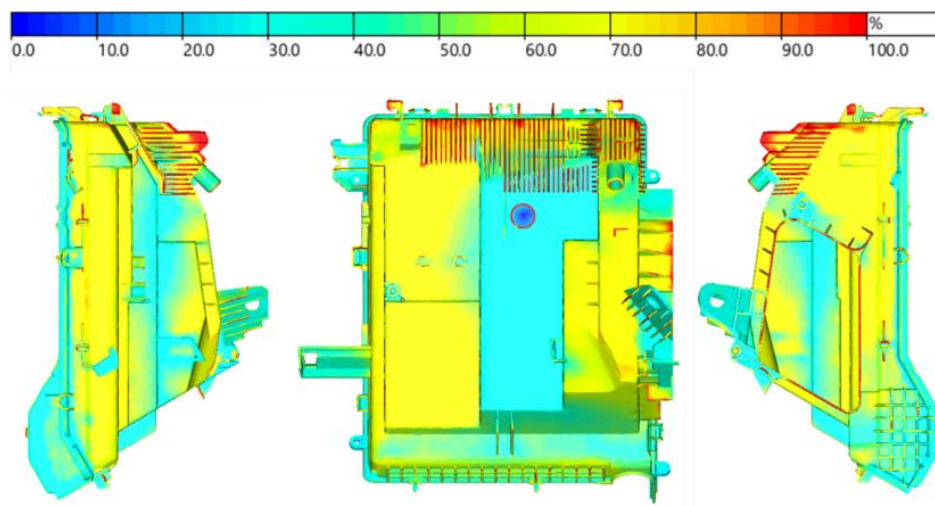
Obrázek 43 Porovnání tlakových ztrát v průběhu plnění dílu (na levé straně původní díl a na pravé optimalizovaný díl)

Obrázek 44 znázorňuje rychlost plnění dílu, která vykazovala zlepšení oproti původnímu dílu. V blízkém okolí vtoku zde dosahovala stejných hodnot a to ca. 2200 mm/s. Ve vzdálenosti 50 mm od vtoku také nelze pozorovat zlepšení. Teprve ve vzdálenosti 125 mm od vtoku můžeme sledovat rozdíl. Upravený díl zde dosahoval rychlosti ca. 565 mm/s, přičemž oproti původnímu dílu je to již rozdíl o ca. 129 mm/s. Vzdálenost 190 mm od vtoku přinášela rychlost 318 mm/s, tedy rozdíl 110 mm/s. Lze tedy vidět, že s rostoucí vzdáleností rychlost taveniny klesá, každopádně spád není tak markantní jako u původního dílu.



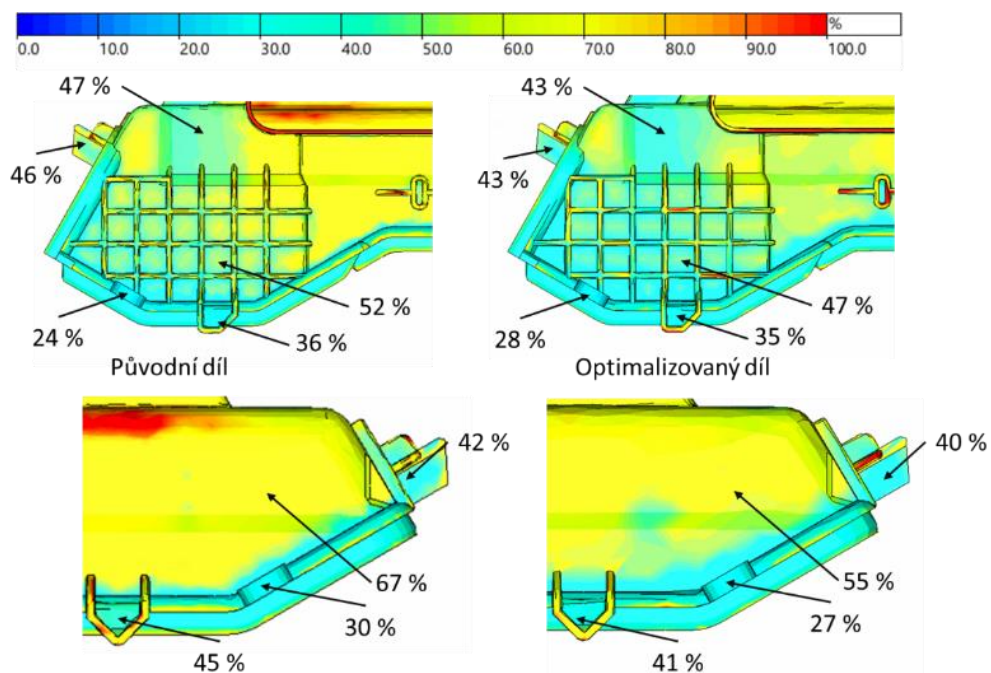
Obrázek 44 Rychlost plnění dílu, v průběhu plnění dílu

Na obrázku 45 lze vidět zamrzlou vrstvu taveniny, a to v čase 2,28 sekundy (začátek dotlaku). Zde je vidět, že oproti původnímu dílu v této fázi nevykazuje mnoho míst, která by byla 100% ztuhlá (pouze na okrajích žeber). V oblasti zvýšení tloušťky stěny je zamrzlá vrstva na hodnotě ca. 30 %, přičemž stále můžeme působit dotlakem do kritických míst, která dosahují ca. 40 % až 65 % úrovně zamrzlé vrstvy



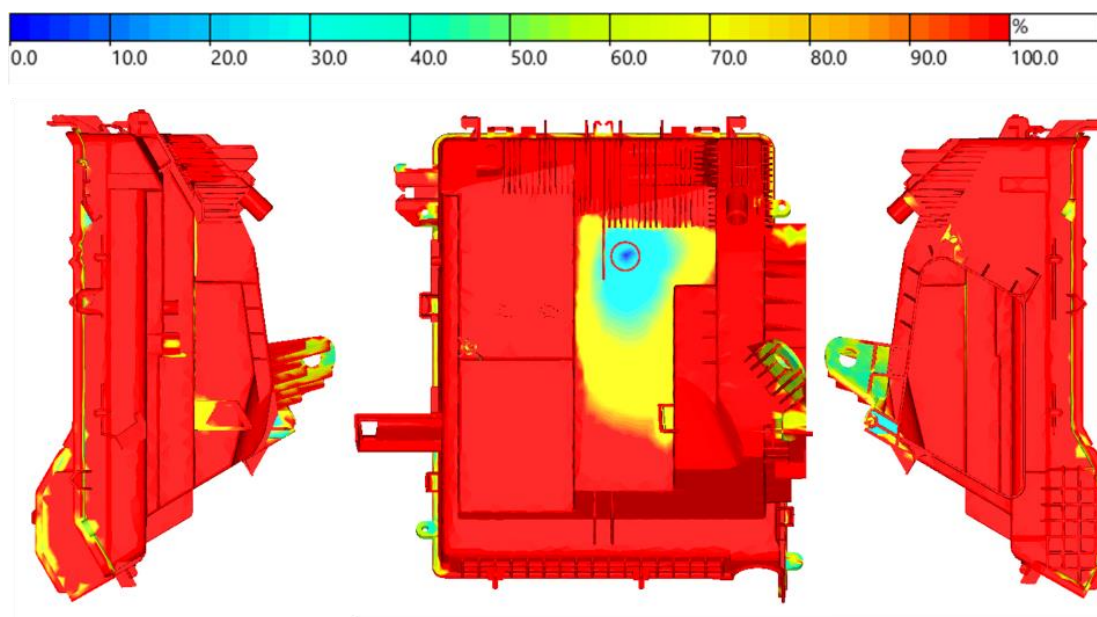
Obrázek 45 Zamrzlá vrstva taveniny na začátku dotlakové fáze v čase 2,28 sekundy

Na obrázku 46 lze vidět porovnání zamrzlé vrstvy na začátku dotlakové fáze (v čase 2,28 sekundy) kritických míst. Můžeme vidět, že v momentě přepnutí na dotlak vykazoval optimalizovaný díl nižší úroveň zamrzlé vrstvy. Dotlak zde tedy může působit po delší dobu.



Obrázek 46 Zamrzlá vrstva taveniny na začátku dotlakové fáze v kritických místech výrobku v čase 2,28 sekundy

Na konci dotlakové fáze jsou již možnosti působení dotlaku omezené (viz obr. 47), a to díky 100 % zamrzlé vrstvy. Některá hůře chlazená místa stále vykazují ca. 60 % zamrzlé vrstvy, přičemž zde dotlak již není schopen působit. Oblast, do které dotlak může působit je již malý, každopádně ovlivněná oblast je větší než u původního dílu, avšak již do kritických oblastí dílu nemůže působit. Je to způsobeno především zvětšenou tloušťkou stěny v okolí vtoku.

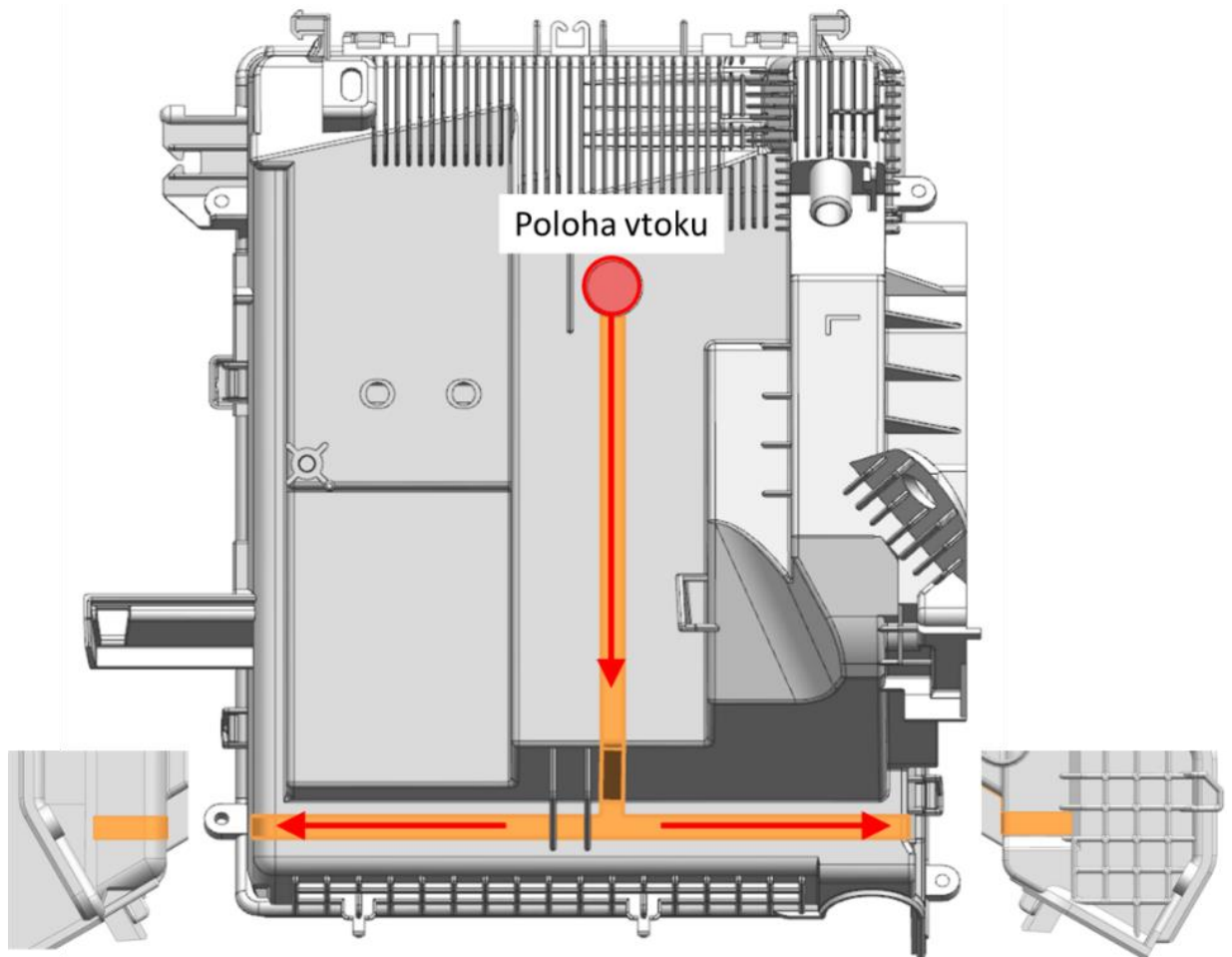


Obrázek 47 Zamrzlá vrstva taveniny na konci dotlakové fáze v čase 6,28 sekundy

3.7 Simulace dílu s tokovým kanálem

Konstrukční optimalizace aplikací tokového kanálu spočívá v místním zesílení tloušťky stěny ve směru, kde se nachází místa, kam se obtížně dostává tavenina. Místním zvětšením tloušťky stěny klesá odpor proti tečení (snižují se tlakové ztráty) taveniny, čímž je schopna vést taveninu ve směru, ve kterém je to zapotřebí. Při správném dimenzování tokového kanálu by mohlo zajistit účinnou optimalizaci problematických míst. Další výhodou je snížení tlaku taveniny uvnitř dutiny formy, jelikož není potřeba takového tlaku na dolití posledních míst taveninou.

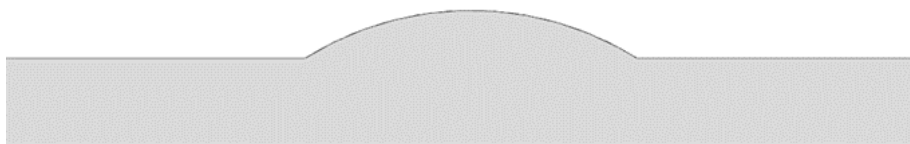
Na obrázku 48 lze vidět díl, na kterém je navrhnutý tokový kanál (znázorněn oranžovou barvou) směřující do oblastí kam špatně dotéká tavenina plastu. Byla zvolena nejjednodušší cesta, která vede od vtoku (znázorněn červeně) do těchto míst tak, aby nenarušovala funkci daného výrobku.



Obrázek 48 Díl s navrhnutým tokovým kanálem

3.7.1 Tokový kanál s kruhovým průřezem

Byl navrhnut tokový kanál o průřezu kruhové úseče šířky 6,9 mm a maximální výšky 0,95 mm s poloměrem zaoblení 6,5 mm, jak lze vidět na obrázku 49. Tokový kanál o průřezu $4,73 \text{ mm}^2$ a celkovém objemu $2,196 \text{ cm}^3$ odpovídá hmotnosti 2,28 gramů.



Obrázek 49 Příčný řez tokovým kanálem kruhového průřezu

Simulace probíhala obdobně jako v kapitole 3.6, kdy byly použity původní nezměněné vstřikovací parametry. Jak jsme očekávali, byla simulace zastavena z důvodu rychlejšího naplnění prvního dílu (námi upravovaný) a to o 0,35 sekundy. O tuto hodnotu

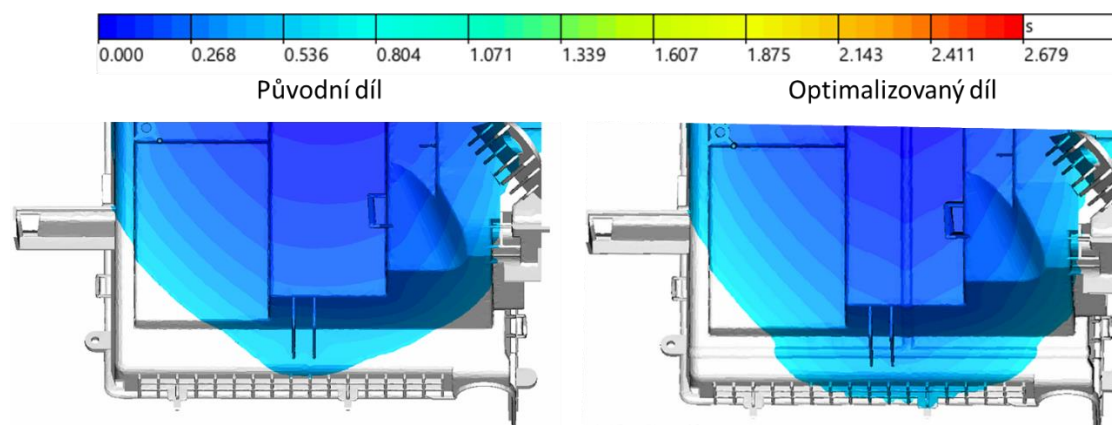
bylo upraveno otevírání jednotlivých trysek (trysky 2 a 3). Tím bylo docíleno stejného výsledku jako u stávajícího procesu s tím rozdílem, že námi upravovaný díl byl rychleji naplněn, a to za čas 1.2 sekundy. Všechny ostatní parametry byly tedy zachovány stejné viz tab. 5.

Tabulka 5 Upravené vstříkovací parametry

	hodnoty	jednotky
teplota taveniny	220	°C
teplota horkokanálu	240	°C
doba dotlaku	4	s
velikost dotlaku	273	bar
chlazení	16	s
tlakové omezení	570	bar

	čas otevření trysky
tryska č.1	0
tryska č.2	1,2
tryska č.3	1,64

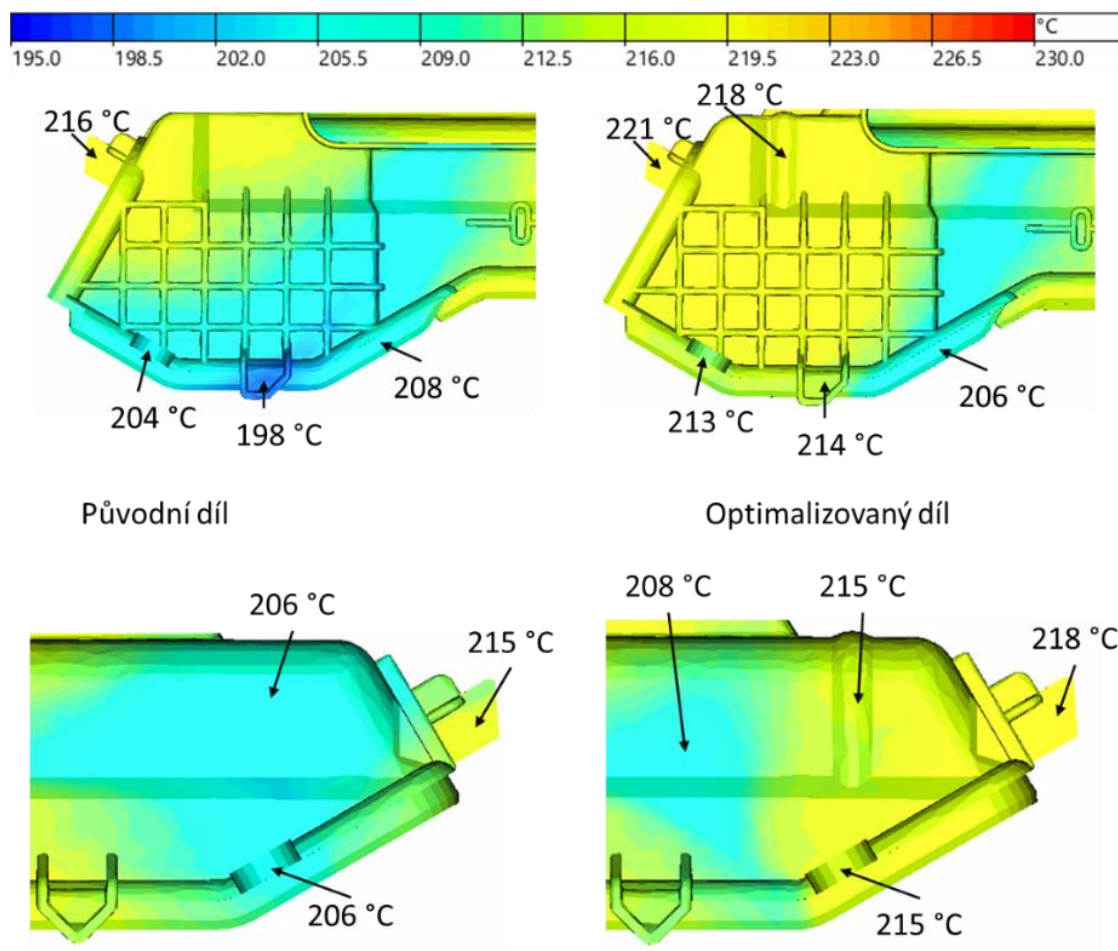
Na obrázku 50 lze vidět porovnání simulace toku taveniny, kde na levé straně je vidět díl bez úpravy a na pravém obrázku díl s kruhovým tokovým kanálem. Můžeme zde vidět jak ve stejném čase plnění 0,5 sekundy je díl naplněn taveninou. Dle výsledků simulace lze tedy vyhodnotit, že upravený díl vede lépe taveninu směrem, kde díl vykazuje problémy s plněním. Můžeme tedy vidět, že za stejný čas vstříkování je upravený díl více naplněn.



Obrázek 50 Porovnání simulací dílu před a po úpravě v čase vstříkování 0,5 sekundy

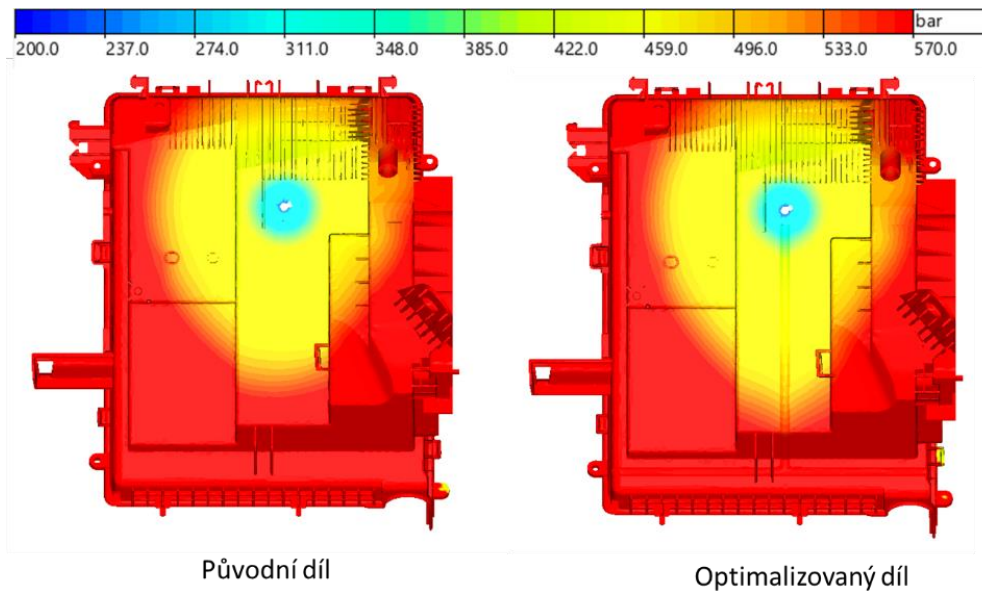
Na obrázku 51 lze vidět teplotní distribuci toku čela. Na levé straně je neupravený díl a na pravé straně díl opatřený kruhovým tokovým kanálem. Ze simulace je patrné, že tavenina teče snadněji směrem, který je požadován. Dostane se tedy rychleji a s vyšší teplotou do míst, která jsou náchylná na nedostříky. Z obrázku můžeme vidět, že u dílu bez úpravy jsou nižší teploty na okraji výrobku, které způsobují vyšší viskozitu plastu a tím

i obtížnější plnění dílu. Upravený díl dosahuje v kritických oblastech vyšších teplot, a to o ca. 5 až 16 °C (oproti původní variantě). Můžeme zde také vidět, že optimalizovaný díl má menší rozptyl teplot.



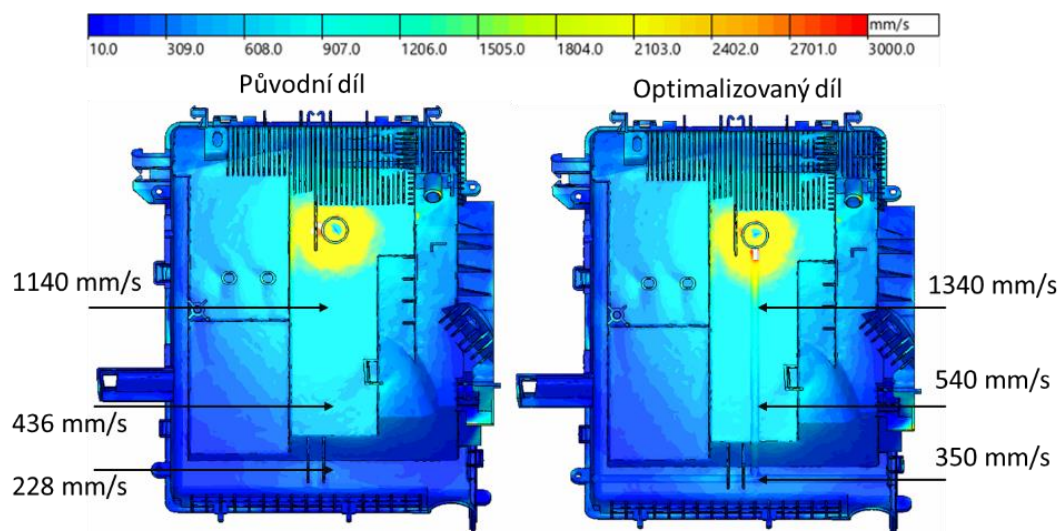
Obrázek 51 Rozložení teplot toku taveniny v kritických místech před a po úpravě

Na obrázku 52 jsou znázorněny tlakové ztráty. V blízkém okolí vtoku dosahují hodnot ca. 300 barů, přičemž s rostoucí vzdáleností od vtoku se zvyšují a to až do hodnoty 570 barů. Oproti dílu bez optimalizace je zde vidět snížení tlakových ztrát a to v oblasti směřující do kritických míst. Nicméně jedná se především o snížení tlakových ztrát ve směru plnění dílu (hlavního proudu taveniny). V ostatních místech dílu zůstávají tlakové ztráty na stejné úrovni jako u původní konstrukční varianty.



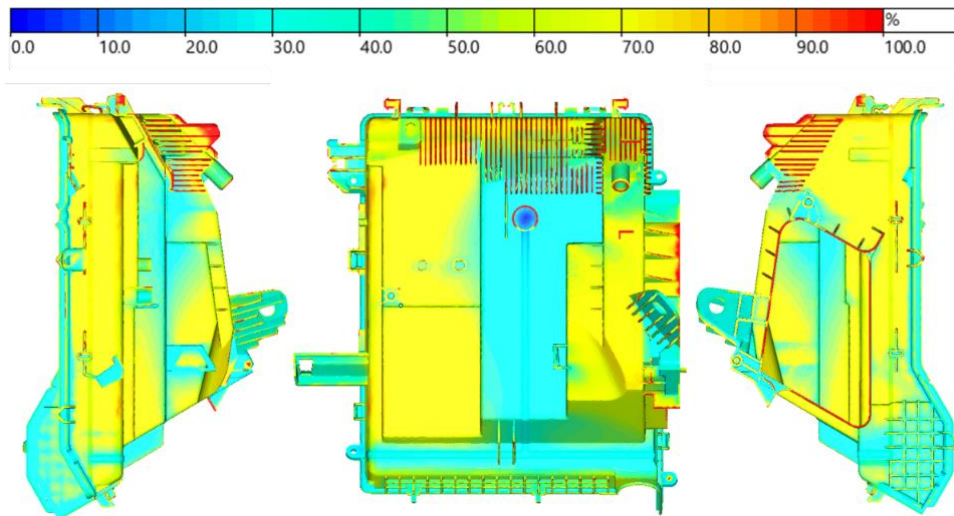
Obrázek 52 Porovnání tlakových ztrát v průběhu plnění dílu (na levé straně původní díl a na pravé optimalizovaný díl)

Na obrázku 53 můžeme sledovat rychlost proudění taveniny jak původního, tak i upraveného dílu (opatřený kruhovým tokovým kanálem). Zde lze vidět, že rychlost proudění taveniny je již od vtoku vyšší, než u původního dílu. Ve vzdálenosti 50 mm od vtoku zde dosahuje tavenina rychlosti ca. 1340 mm/s, což činí rozdíl oproti původnímu dílu ca. 200 mm/s. Ve vzdálenosti 125 mm od vtoku již není rozdíl markantní, přičemž došlo ke zvýšení rychlosti o ca. 104 mm/s. Rychlost taveniny ve vzdálenosti 190 mm od vtoku zde dosahovala 320 mm/s s rozdílem ca. 92 mm/s. Lze tedy sledovat, že tokový kanál působí pozitivně na rychlost tečení taveniny, přičemž s rostoucí vzdáleností od vtoku je rozdíl menší.



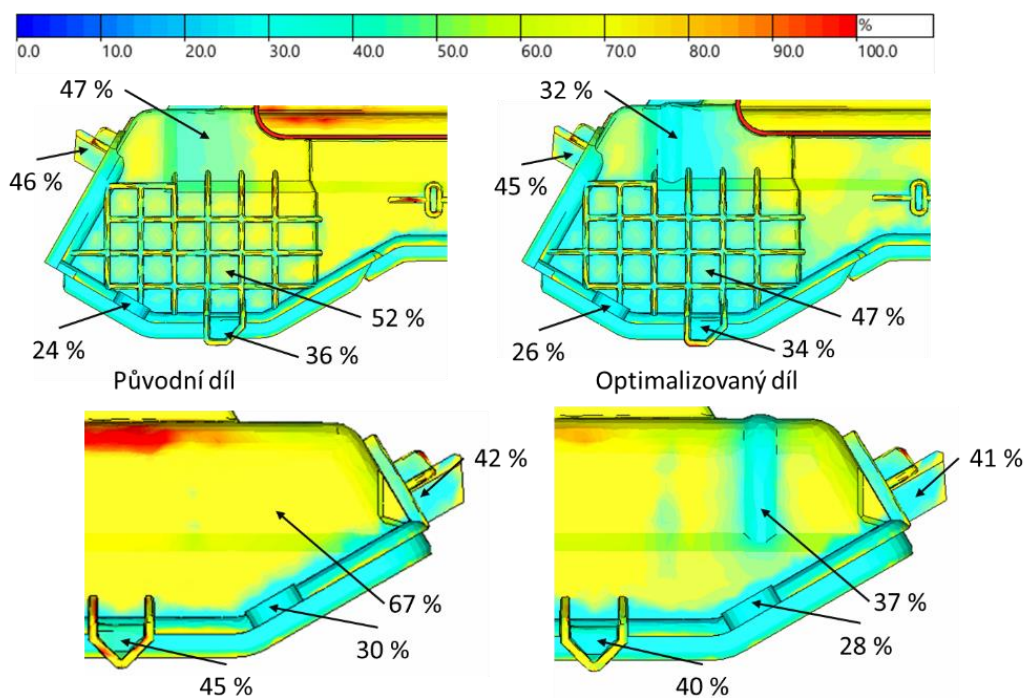
Obrázek 53 Rychlost plnění dílu, v průběhu plnění dílu

Na začátku dotlakové fáze (2,33 sekund) díl dosahoval zamrzlé vrstvy v rozmezí od 25 až 70 %. Lze tedy působit dotlakem do vzdálených míst od vtoku. Některá místa již vykazovala 100 %. Jednalo se především o žebra v okrajích výrobku viz obrázek 54.



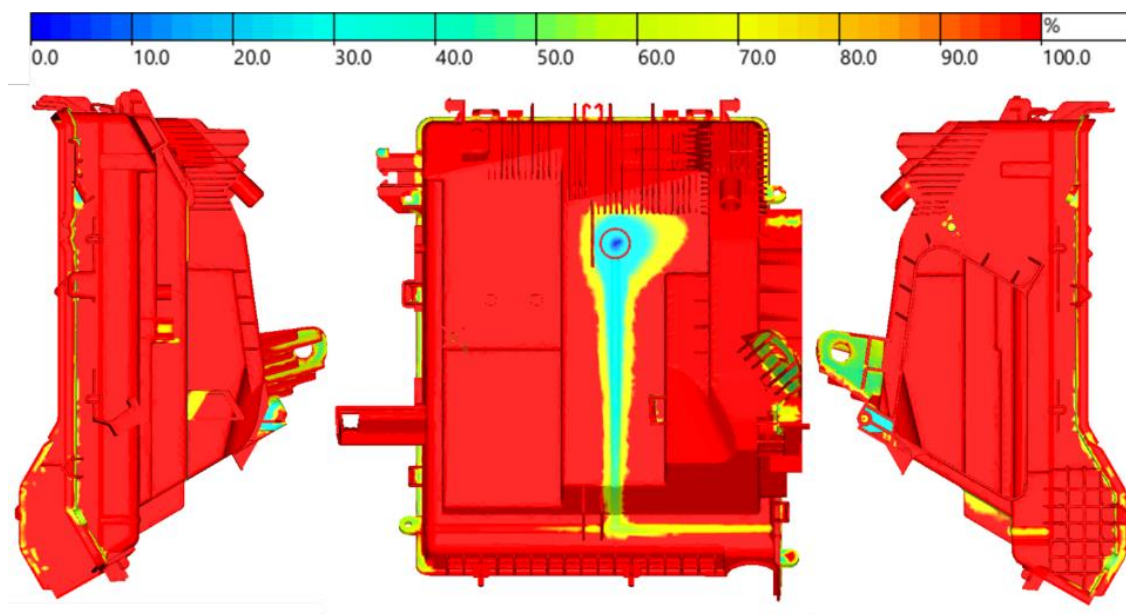
Obrázek 54 Zamrzlá vrstva taveniny na začátku dotlakové fáze v čase 2,33 sekundy

Porovnání zamrzlé vrstvy v kritických místech je znázorněno na obrázku 55. Je zde vidět, že upravený díl vykazoval menší zamrzlou vrstvu a to ca. o 5 % přičemž v tokovém kanálu dosahovala v rozmezí 32 % až 37 %. Což bylo způsobeno zvýšenou tloušťkou stěny a tím i koncentrací materiálu.



Obrázek 55 Zamrzlá vrstva taveniny na začátku dotlakové fáze v kritických místech výrobku v čase 2,33 sekund

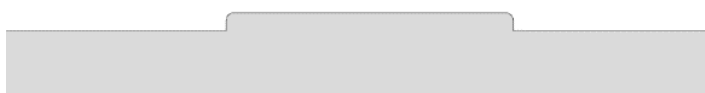
Na konci dotlakové fáze (viz obr. 56) je vidět, že díl již dosahuje téměř všude 100 % zamrzlé vrstvy. Pouze tokový kanál dosahuje zamrzlé vrstvy ca. 35 %, což je způsobeno zvýšenou tloušťkou stěny. Je tedy stále aktivní a lze s ním působit do vzdálenějších (kritických) oblastí. Stále je zde několik oblastí, které vykazují ca. 60 % zamrzlé vrstvy. Jedná se především o tvarově složitá místa a místa s větší tloušťkou stěny.



Obrázek 56 Zamrzlá vrstva taveniny na konci dotlakové fáze v čase 6,33 sekundy

3.7.2 Tokový kanál s obdélníkovým průřezem

Návrh je obdobný jako v kapitole 3.7.1 s tím rozdílem, že byl namísto průřezu kruhové úseče použit obdélníkový (viz obr. 57) a to o rozměrech 8 x 0,5 mm s průřezem 4 mm². Ve výsledku měl tokový kanál objem 1,851 cm³ což odpovídá hmotnosti 1,92 gramů.



Obrázek 57 Příčný řez tokovým kanálem obdélníkového průřezu

Postup simulace byl obdobný jako v kapitole 3.6. Nejdříve byla simulace spuštěna s původními vstřikovacími parametry. Simulace byla opět zastavena po naplnění prvního dílu. Naplnění dílu bylo rychlejší o 0,3 sekundy. Opět byl upraven vstřikovací cyklus tak, aby probíhal obdobně jako neupravený. Tím je myšleno, že byly upraveny hodnoty otevírání

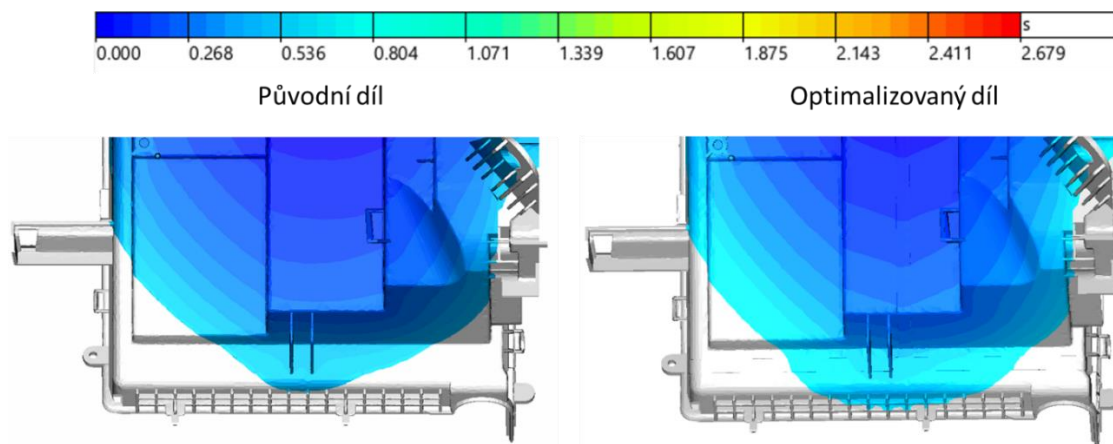
trysk 2 a 3 viz tabulka 6. Bylo tedy docíleno stejného plnění dílu jako u stávajícího procesu s tím rozdílem, že námi upravovaný díl byl rychleji naplněn, a to za čas 1,25 sekund. Všechny ostatní parametry byly tedy zachovány stejné.

Tabulka 6 Optimalizované vstřikovací parametry

	hodnoty	jednotky
teplota taveniny	220	°C
teplota horkokanálu	240	°C
doba dotlaku	4	s
velikost dotlaku	200	bar
chlazení	16	s
tlakové omezení	570	bar

	čas otevření trysky
tryska č.1	0
tryska č.2	1,25
tryska č.3	1,69

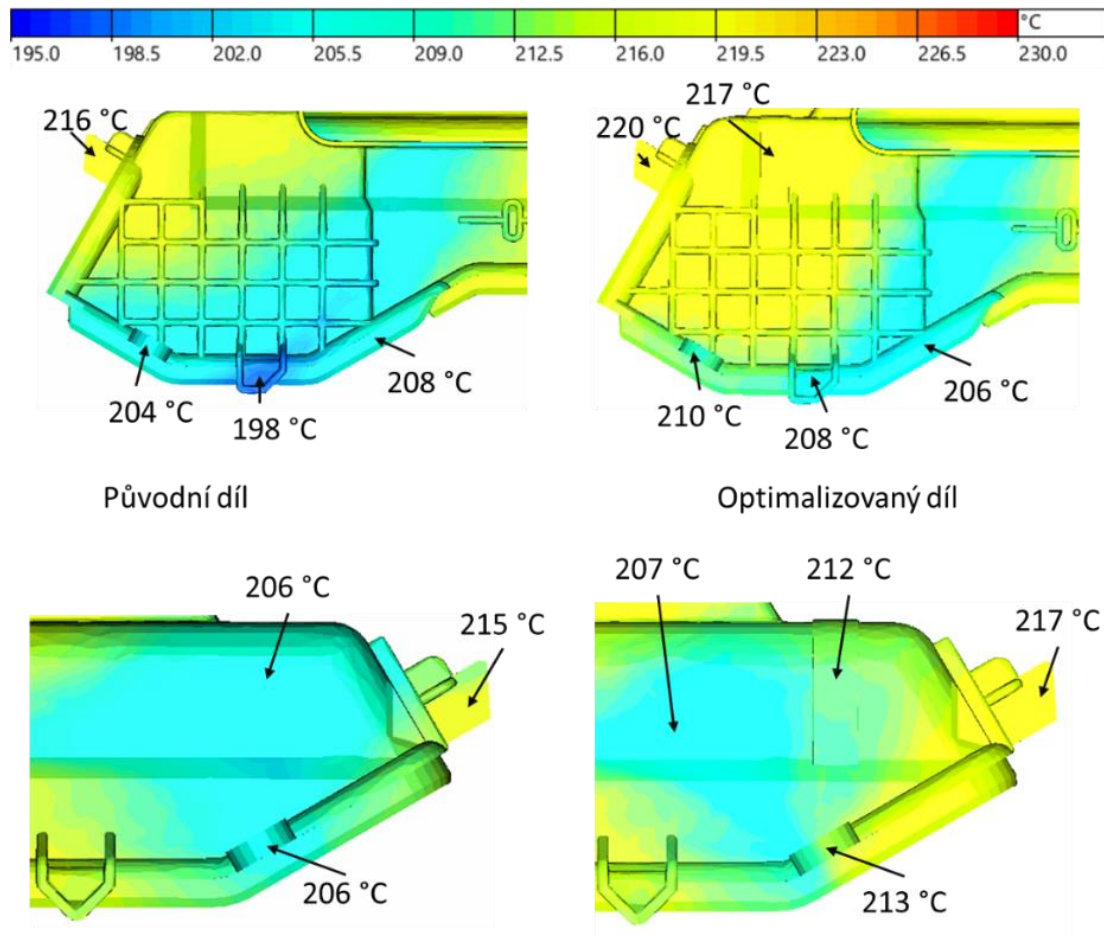
Porovnání simulací původního dílu a upraveného dílu lze vidět na obrázku 58. Na levé straně se nachází díl bez úpravy a na pravé pak konstrukčně upravený díl, a to v čase plnění 0,5 s. Porovnáním obrázků lze vidět, že plnění dílu je příznivější u upraveného dílu, který je rychleji plněn při zachování plnicího tlaku a usměrnění toku taveniny směrem k místům náchylné na nedostříky.



Obrázek 58 Porovnání simulací dílu před a po úpravě v čase vstřikování 0,5 sekundy

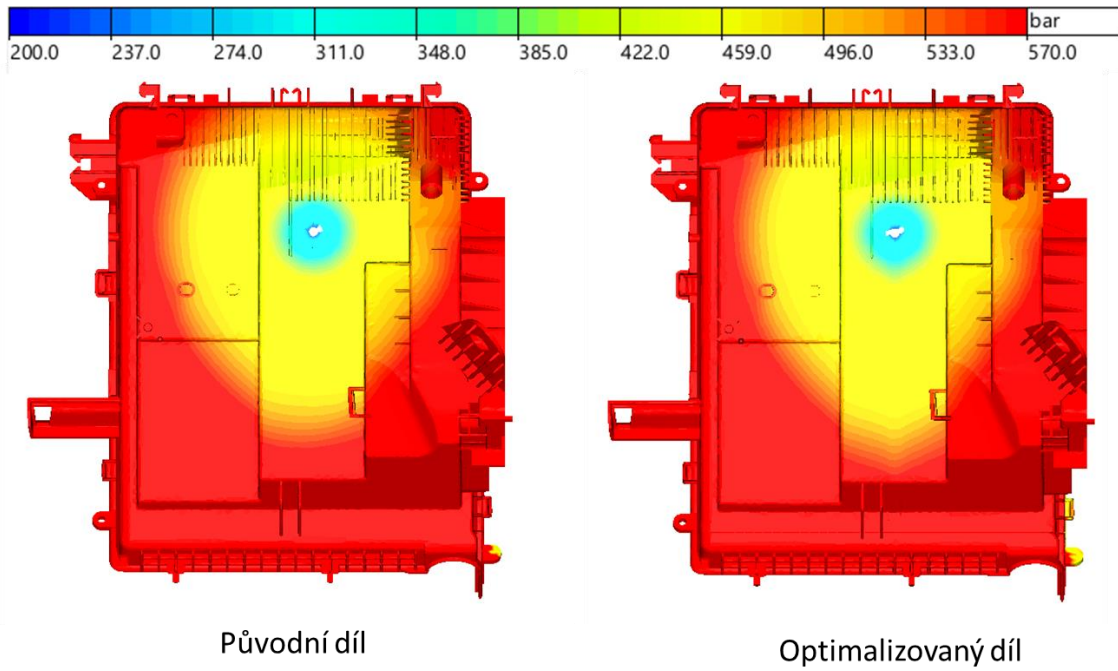
Z výsledků simulace je jasně patrné, že tavenina snadněji teče směrem, který je požadován. Dostane se tedy rychleji a s vyšší teplotou do míst, která jsou náchylná na nedostříky. Na obrázku 59 lze vidět rozložení teplot na díle při plnění dílu. Na levé straně je neupravený díl a na pravé straně díl opatřený obdélníkovým tokovým kanálem. Z obrázku je patrné, že u dílu bez úpravy jsou nižší teploty na okraji výrobku, které způsobují vyšší

viskozitu plastu a tím i obtížnější plnění dílu. Upravený díl má vyšší teploty, a to v rozmezí 2 až 10 °C, což má za následek lepší tekutost taveniny a snadnější plnění dílu.



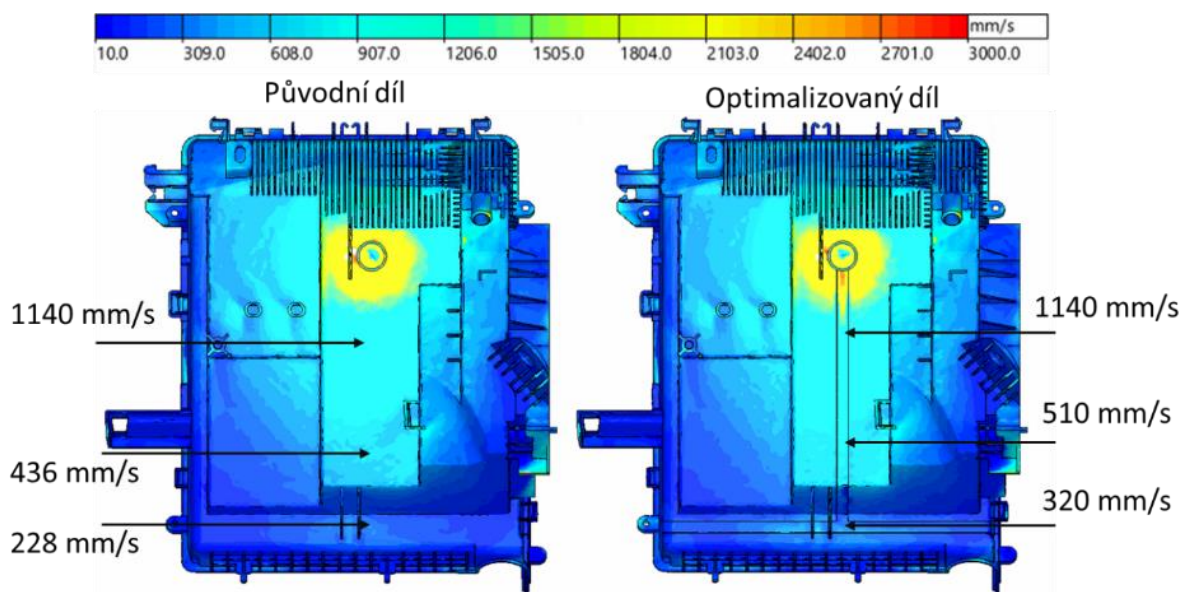
Obrázek 59 Rozložení teplot toku taveniny v kritických místech před a po úpravě

Tlakové ztráty jsou znázorněny na obrázku 60. Je zde vidět, jak s rostoucí vzdáleností od vstupu rostou tlakové ztráty až do 570 barů. Oproti původní simulaci je zde vidět rozšířená oblast, kde tlakové ztráty nedosahují maxima.



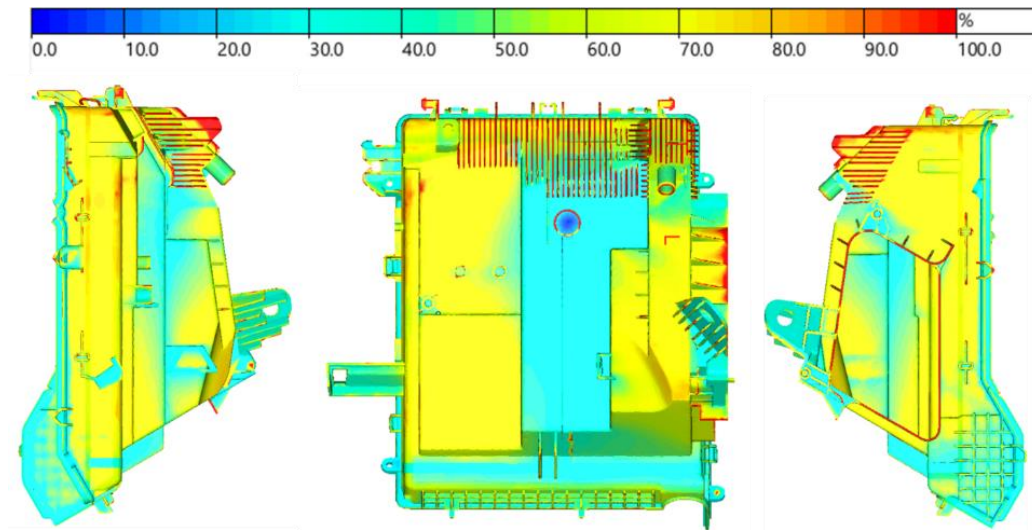
Obrázek 60 Tlakové ztráty v průběhu plnění dílu

Rychlost taveniny je znázorněna na obrázku 61. V okolí vtoku dosahuje podobných hodnot jako u původního dílu. Vzdálenost 50 mm od vtoku vykazuje stejné hodnoty jako původní díl. S rostoucí vzdáleností však lze zaznamenat zvýšení rychlosti. Ve vzdálenosti 125 mm již rychlost činila 510 mm/s s rozdílem 74 mm/s. Ve vzdálenosti 190 mm dosahoval rozdíl 92 mm/s oproti původnímu dílu. Lze tedy hovořit o zvýšení rychlosti tečení taveniny ve směru kritických oblastí.



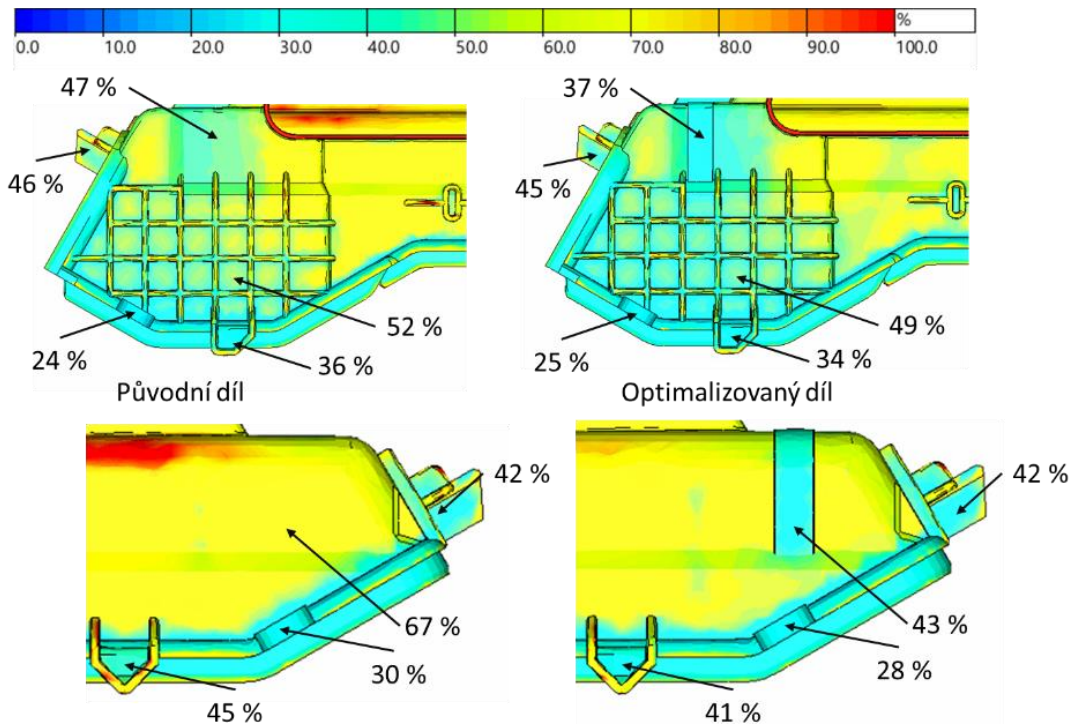
Obrázek 61 Rychlost plnění dílu, v průběhu plnění dílu

Na začátku dotlakové fáze dosahoval díl zamrzlé vrstvy v rozmezí 30 % až 70 %, která zaujímala značnou část výrobku, jak lze vidět na obrázku 62. Na několika částech dosahovala zamrzlá vrstva 100 %, přičemž se jednalo o konce žeber.



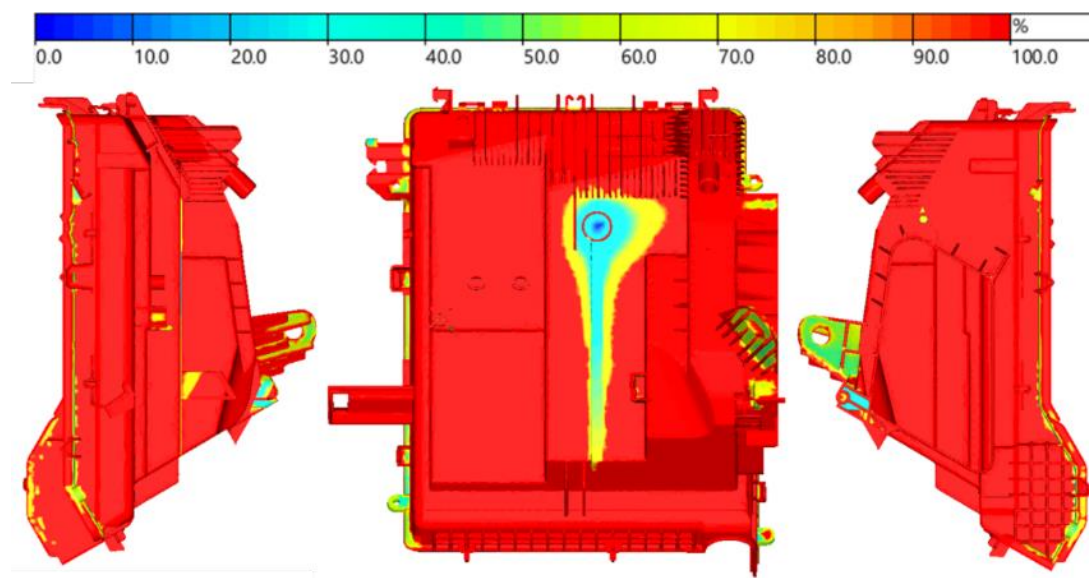
Obrázek 62 Zamrzlá vrstva taveniny na začátku dotlakové fáze v čase 2,38 sekundy

Na obrázku 63 můžeme vidět porovnání kritických míst, kde je vyhodnocena zamrzlá vrstva. Zamrzlá vrstva u optimalizovaného dílu vykazuje snížení zamrzlé vrstvy ca. o 5 %, přičemž v tokovém kanálu dosahuje v rozmezí ca. 37 až 43 %.



Obrázek 63 Zamrzlá vrstva taveniny na začátku dotlakové fáze v kritických místech výrobku v čase 2,38 sekundy

Na konci dotlakové fáze (viz obrázek 64) dosahovala zamrzlá vrstva na většině dílu 100 %. V blízkém okolí vtoku a v místě tokového kanálu však dosahovala zamrzlá vrstva ca. 35 %. Dále byla ca. 55 % zamrzlá vrstva v oblastech složitějších výstupků, kde byla vyšší koncentrace materiálu.



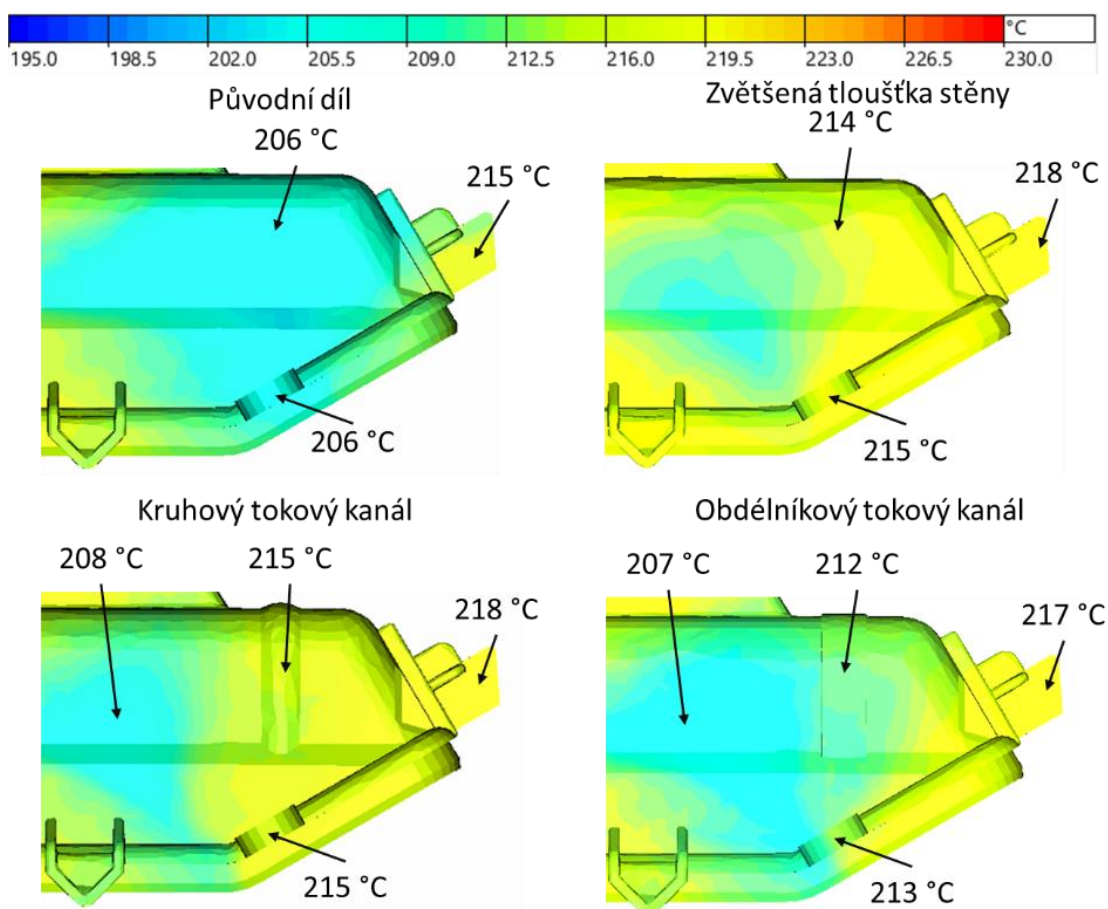
Obrázek 64 Zamrzlá vrstva taveniny na konci dotlakové fáze v čase 6,38 sekundy

4 Zhodnocení výsledků a jejich diskuze

V podkapitolách níže byly zhodnoceny výsledky simulací. Dále byl brán zřetel na ekonomické hledisko, a to jak úpravy formy, tak i z hlediska produkce dílů. Vyhodnocena byla také deformace dílu.

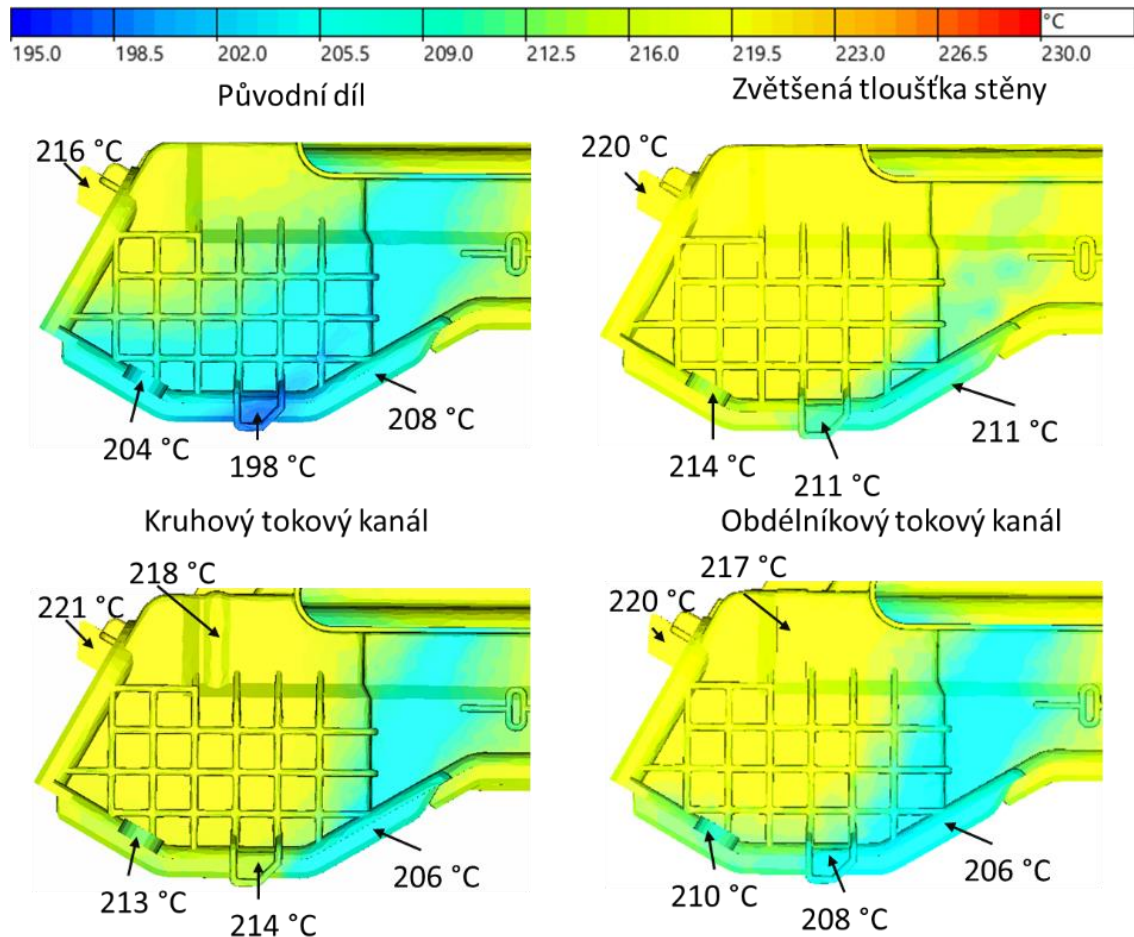
4.1 Technologické zhodnocení

U všech navržených konstrukčních variant došlo k nižšímu poklesu teplot toku taveniny první kritické oblasti dílu v porovnání se stávajícím konstrukčním řešením viz obr. 65. Nejlepších výsledků dosahují varianty se zvětšenou tloušťkou stěny a varianta s kruhovým tokovým kanálem. Přičemž rozdíl oproti původnímu dílu zde činil až ca. 9 °C. Další pozitivní efekt pozorovaný u všech navrhovaných konstrukčních variant byla rovnoměrnější teplotní distribuce, přičemž varianty se zvětšenou tloušťkou stěny a kruhovým tokovým kanálem se opět vyznačovaly nepatrně lepšími výsledky.



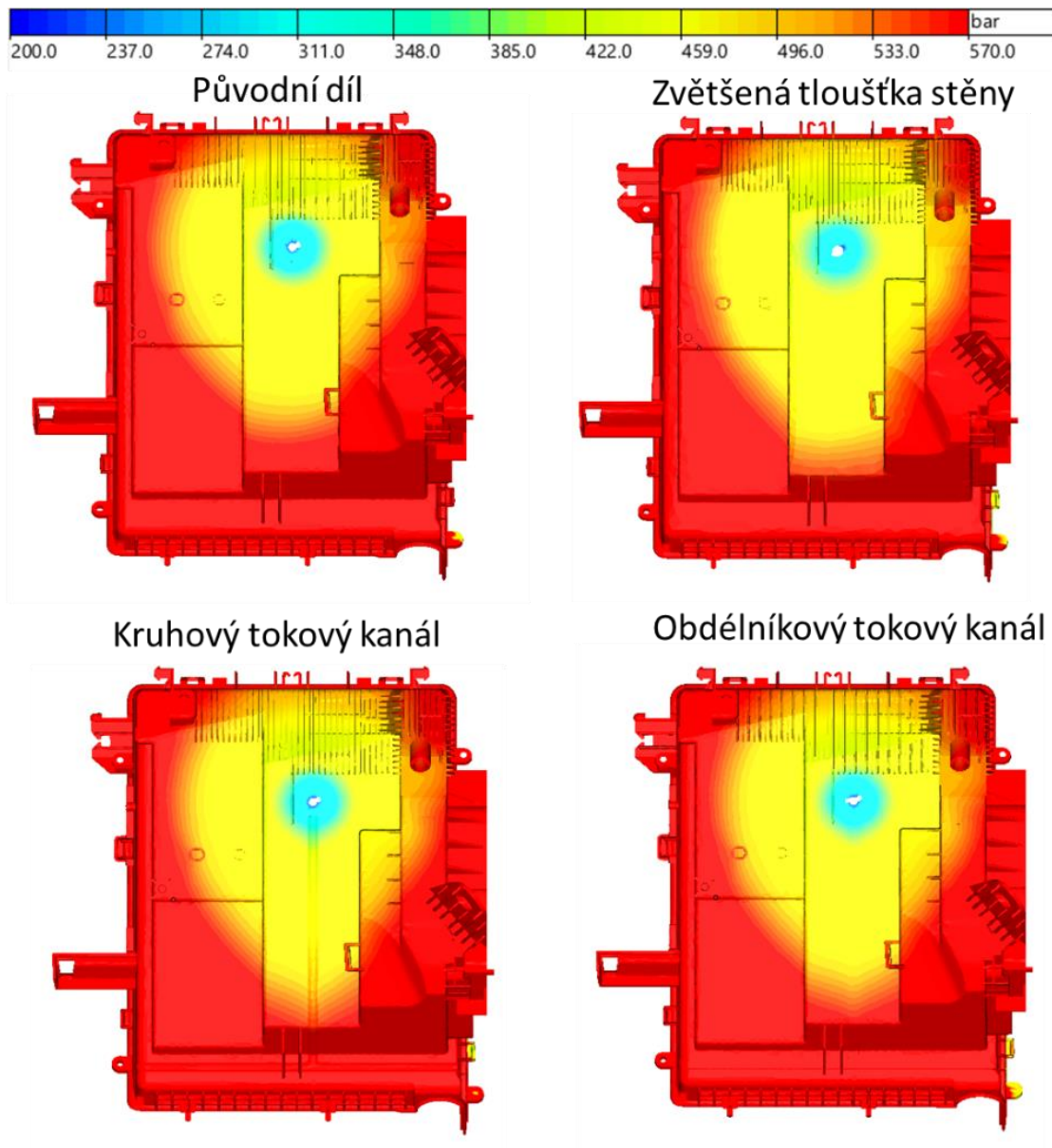
Obrázek 65 Porovnání teplot toku taveniny v průběhu vstřikování dílů, které jsou znázorněny v kritické oblasti (levý spodní roh)

Teplotní poměry v druhém kritickém místě můžeme vidět na obrázku 66. Situace je zde obdobná jako v levém dolním rohu dílu. Nejlepších výsledků zde dosahuje varianta s kruhovým tokovým kanálem, která vykazuje zvýšení teplot až o ca. 16 °C. O něco menší zvýšení teplot vykazovala varianta se zvětšením tloušťky stěny, která vykazovala až o ca. 5 °C nižší teploty, avšak dosahovala nejlepší distribuce teplot v této oblasti.



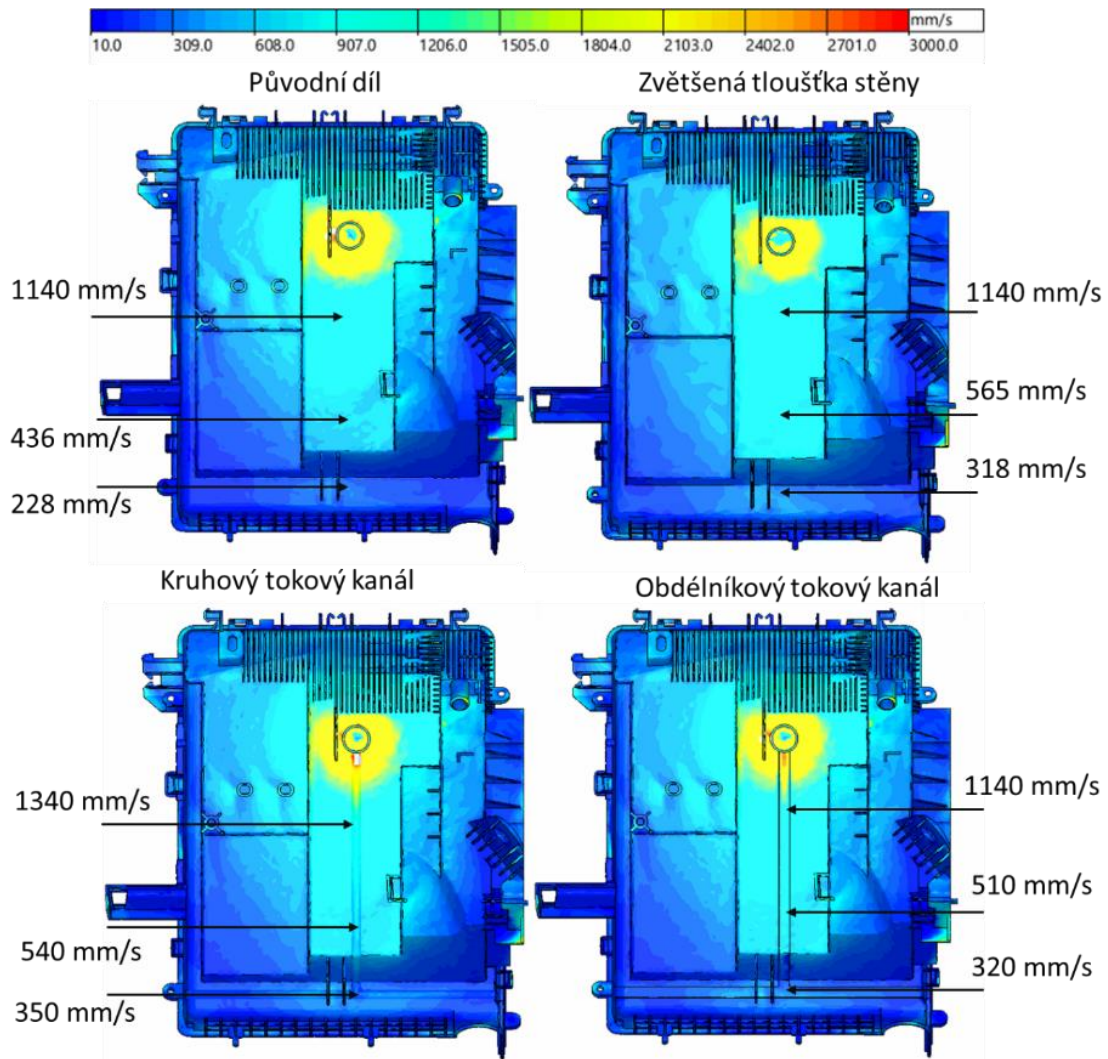
Obrázek 66 Porovnání teplot toku taveniny v průběhu vstřikování dílů, které jsou znázorněny v kritické oblasti (pravý spodní roh)

Tlakové ztráty lze vidět na obrázku 67. U všech nových konstrukčních variant bylo dosaženo zlepšení distribuce tlakových ztrát. Jednalo se zejména o oblasti v blízkém okolí upravené geometrie. Při plnění dutiny formy tak materiál klade menší odpor proti tečení taveniny a lépe tak plní kritické oblasti. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u varianty se zvětšenou tloušťkou stěny.



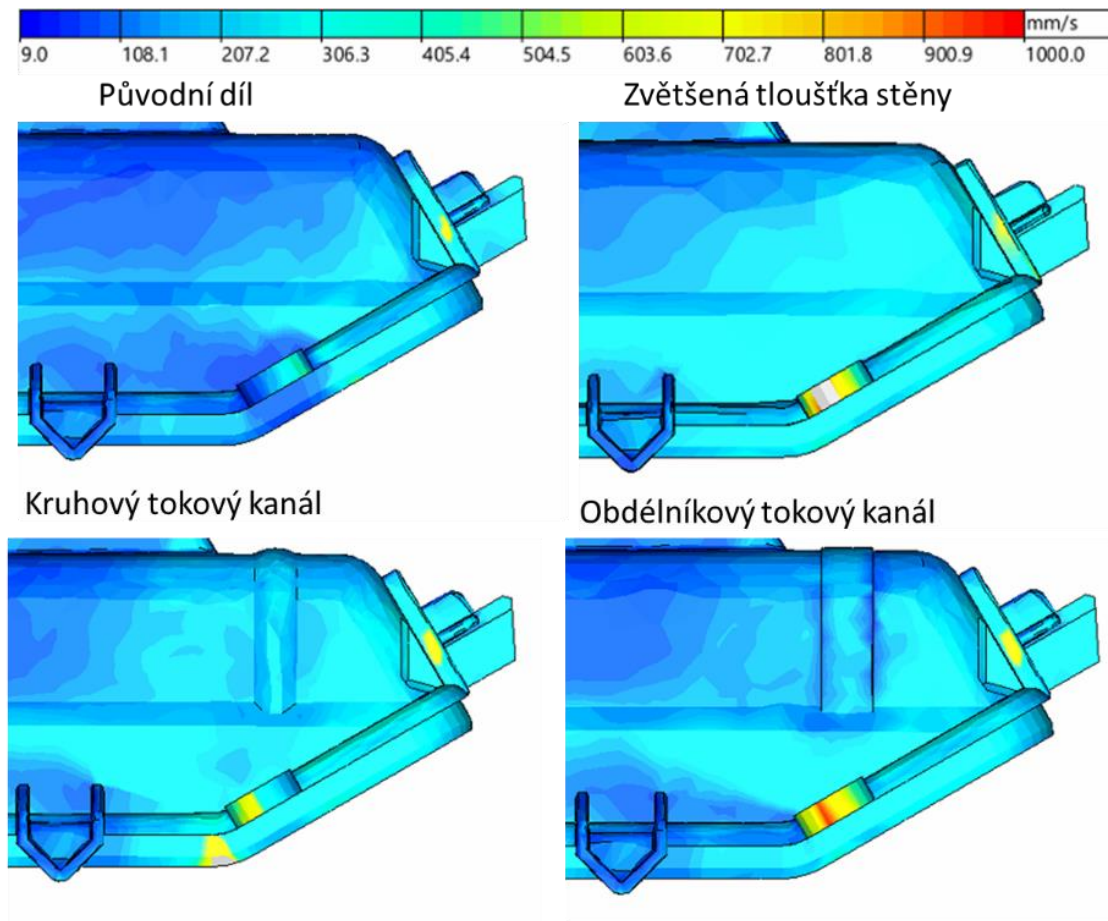
Obrázek 67 Porovnání tlakových ztrát v průběhu plnění dílu, vyobrazeny jsou všechny varianty

Všechny optimalizované varianty přinesly zvýšení rychlosti tečení taveniny ve směru kritických oblastí (viz obr. 68), přičemž ve vzdálenosti 125 mm od vtoky dosahovala nejlepších výsledků varianta se zvětšenou tloušťkou stěny, která přinášela zvýšení ca. o 139 mm/s (oproti původní variantě). Ve větších vzdálenostech od vtoky dosahoval nejlepších výsledků varianta s kruhovým tokovým kanálem.



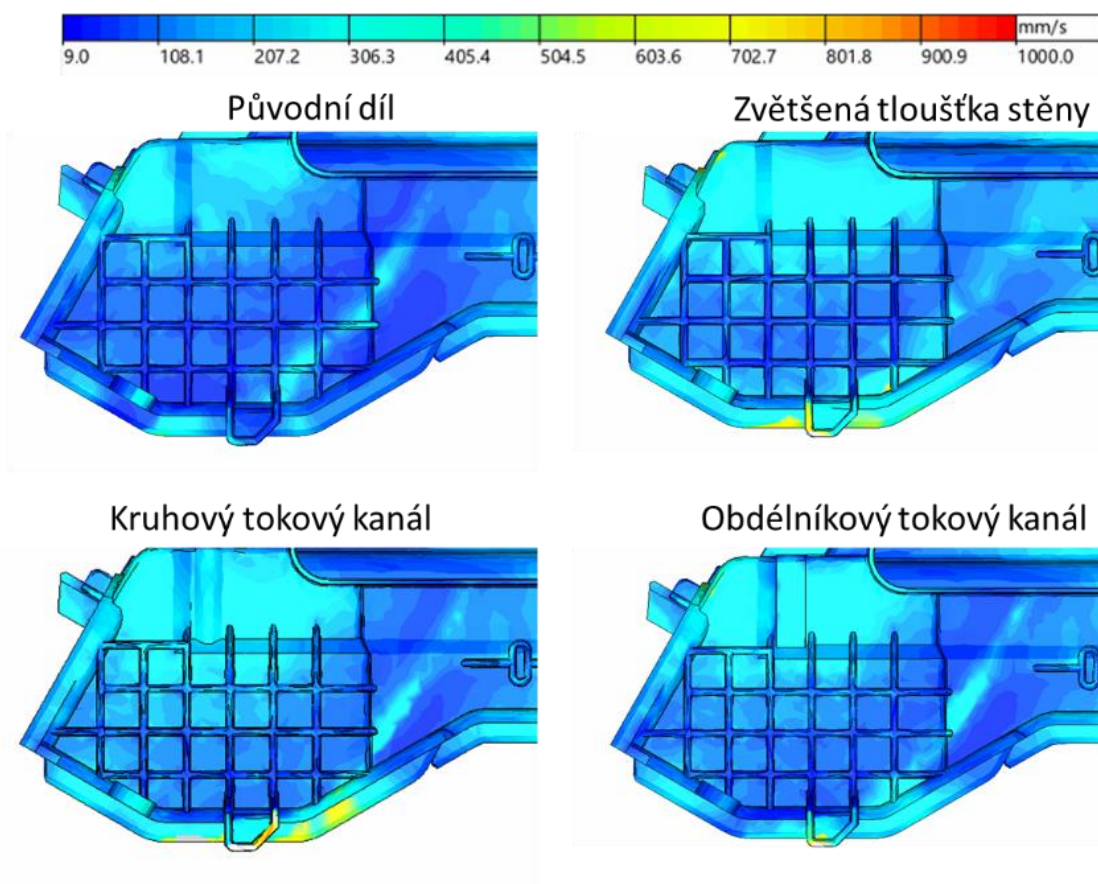
Obrázek 68 Porovnání rychlosti plnění dílu v průběhu plnění dílu

V kritické oblasti nacházející se v levém dolním rohu dílu byly opět podmínky toku taveniny u všech optimalizovaných návrhů lepší než u původního dílu. Na obrázku 69 vidíme, že došlo ke zvýšení rychlosti taveniny, kdy varianty se zvýšenou tloušťkou stěny a kruhovým tokovým kanálem vykazovaly plnění obdobnou rychlostí v této oblasti, která dosahovala hodnoty až 350 mm/s. Kritická oblast byla v obou případech rovnoměrněji naplněna. Varianta s obdélníkovým tokovým kanálem nevykazuje tak vysoké úrovně zlepšení tokových vlastností jako ostatní konstrukční varianty.



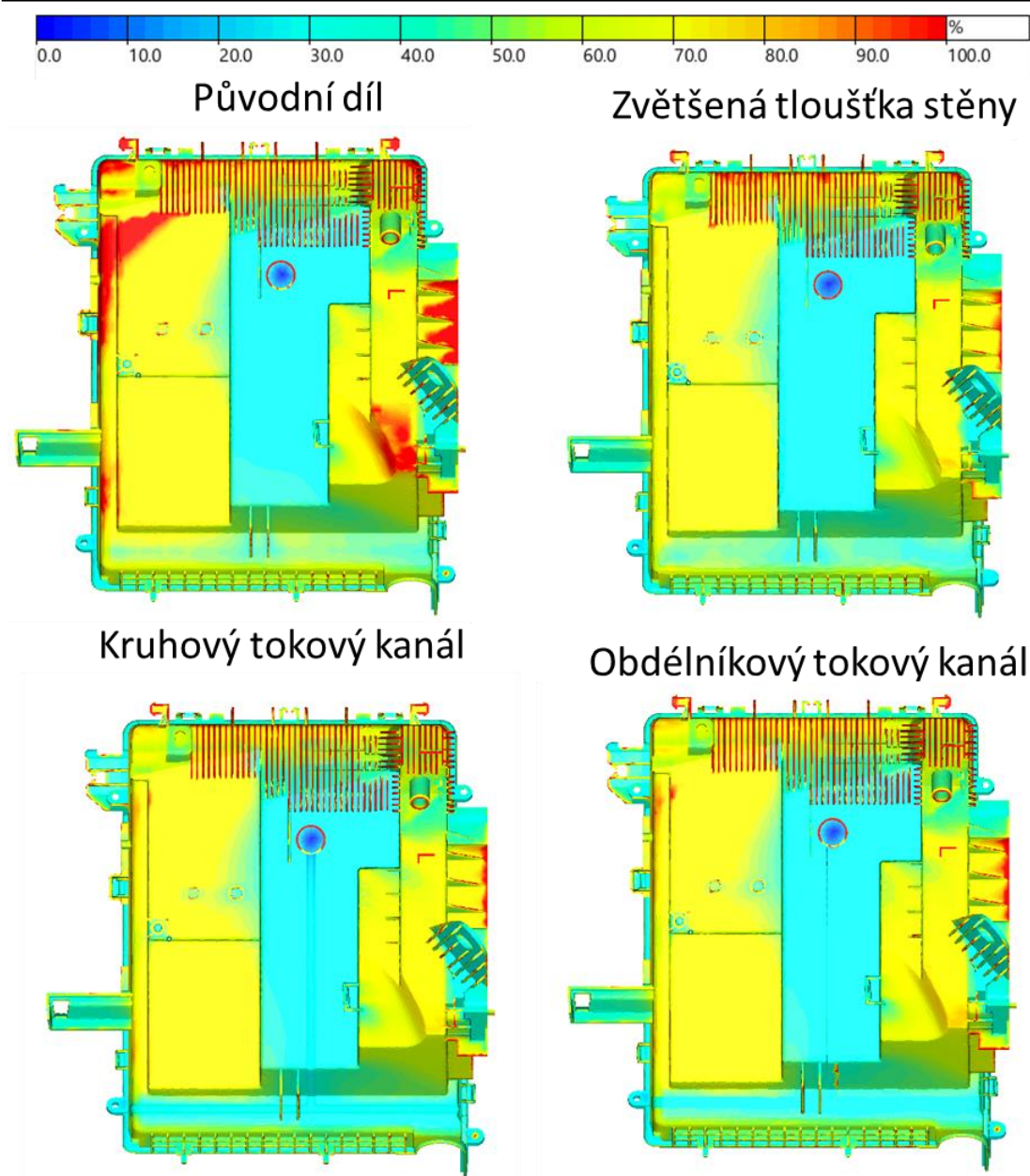
Obrázek 69 Porovnání rychlosti plnění dílu v průběhu plnění dílu v kritické oblasti (levý dolní roh)

Výraznější změny v rychlosti tečení taveniny byly zaznamenány v kritické oblasti v pravém dolním rohu dílu (viz obr. 70). Původní varianta konstrukce dílu zde dosahovala velice malých rychlostí (ca. 50 mm/s). Všechny nové konstrukční varianty přinesly zlepšení v této oblasti. Nejlepších výsledků zde dosahovala varianta s kruhovým tokovým kanálem, která nejvíce zvýšila rychlost tečení taveniny v této oblasti. Rychlost zde byla změřena až ca. 300 mm/s.



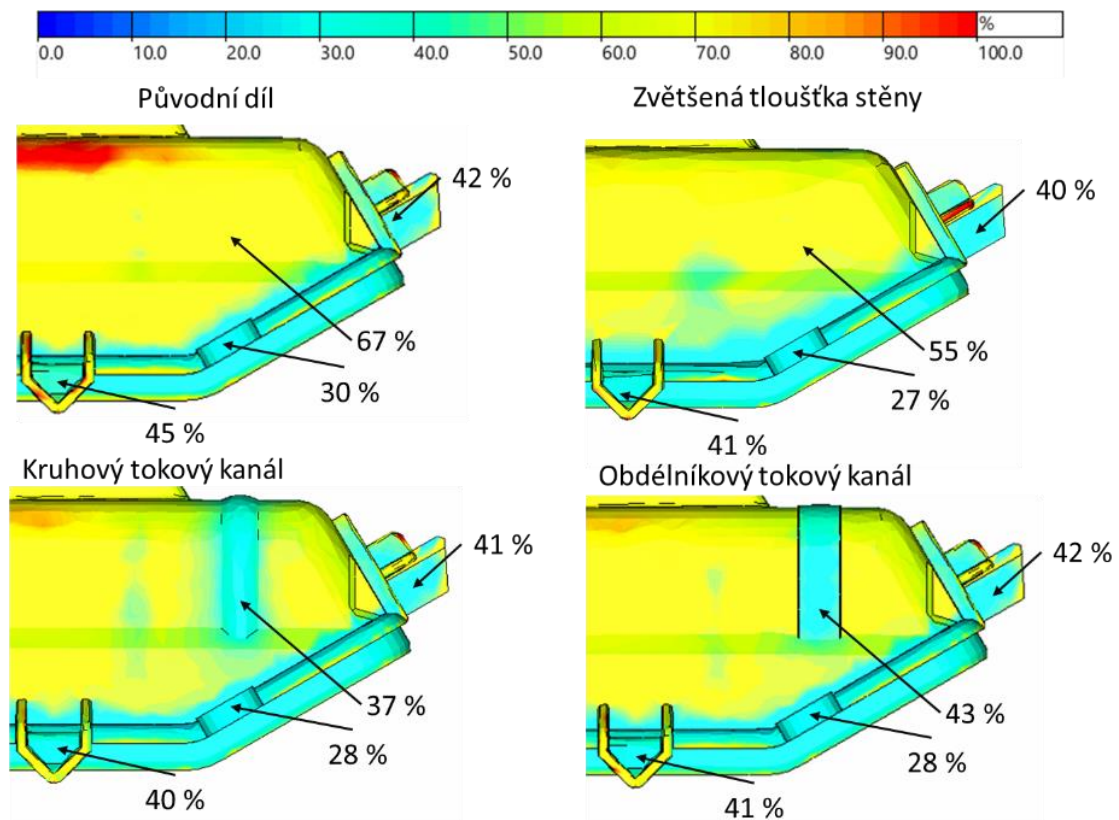
Obrázek 70 Porovnání rychlosti plnění dílu v průběhu plnění dílu v kritické oblasti (pravý dolní roh)

Na obrázku 71 můžeme vidět zamrzlou vrstvu na díle v momentě přepnutí na dotlak. Všechny navržené úpravy vykazovaly výrazné zlepšení problematického místa dílu. Je tedy zlepšena možnost působení dotlaku, který může působit i do míst, která jsou u původní verze dotlakem nedostupná. Působení dotlaku má následně pozitivní vliv na rozměrovou přesnost dílu i kvalitu dílu (deformace, propadliny).



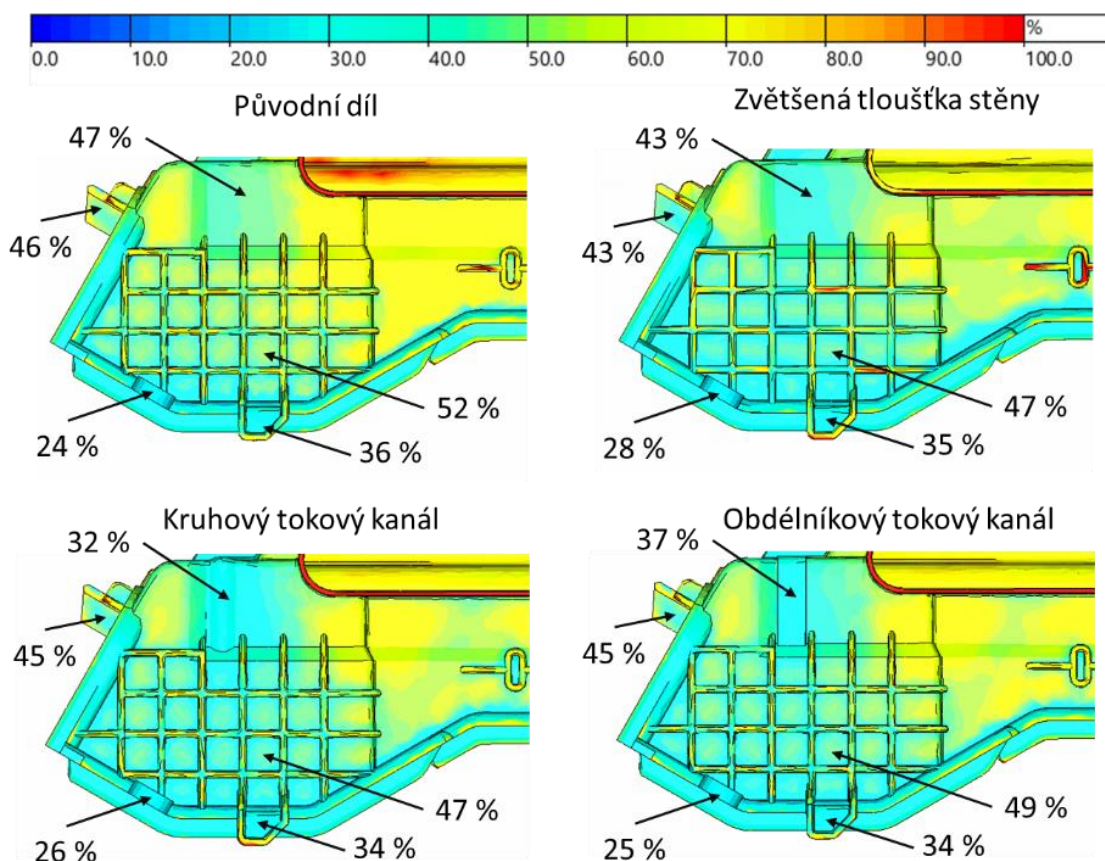
Obrázek 71 Porovnání zamrzlé vrstvy v momentě přepnutí na dotlak, vyobrazeny jsou všechny varianty

Při pohledu na dolní levý roh dílu (viz obr. 72) již lze vidět rozdíly mezi variantami. Nejlepších výsledků zde dosahuje varianta s kruhovým tokovým kanálem, která dosahuje pouze 37 % zamrzlé vrstvy v oblasti tokového kanálu. Oproti původnímu dílu zde byl zaznamenán rozdíl ca. 30 %. Výrazné zlepšení je způsobeno tokovým kanálem, ve kterém je koncentrován materiál, který pomaleji chladne a může tak v dotlakové fázi doplňovat taveninu. O něco hůře je na tom tokový kanál s obdélníkovým průřezem, u kterého došlo oproti předchozí variantě k poklesu o ca. 6 %.



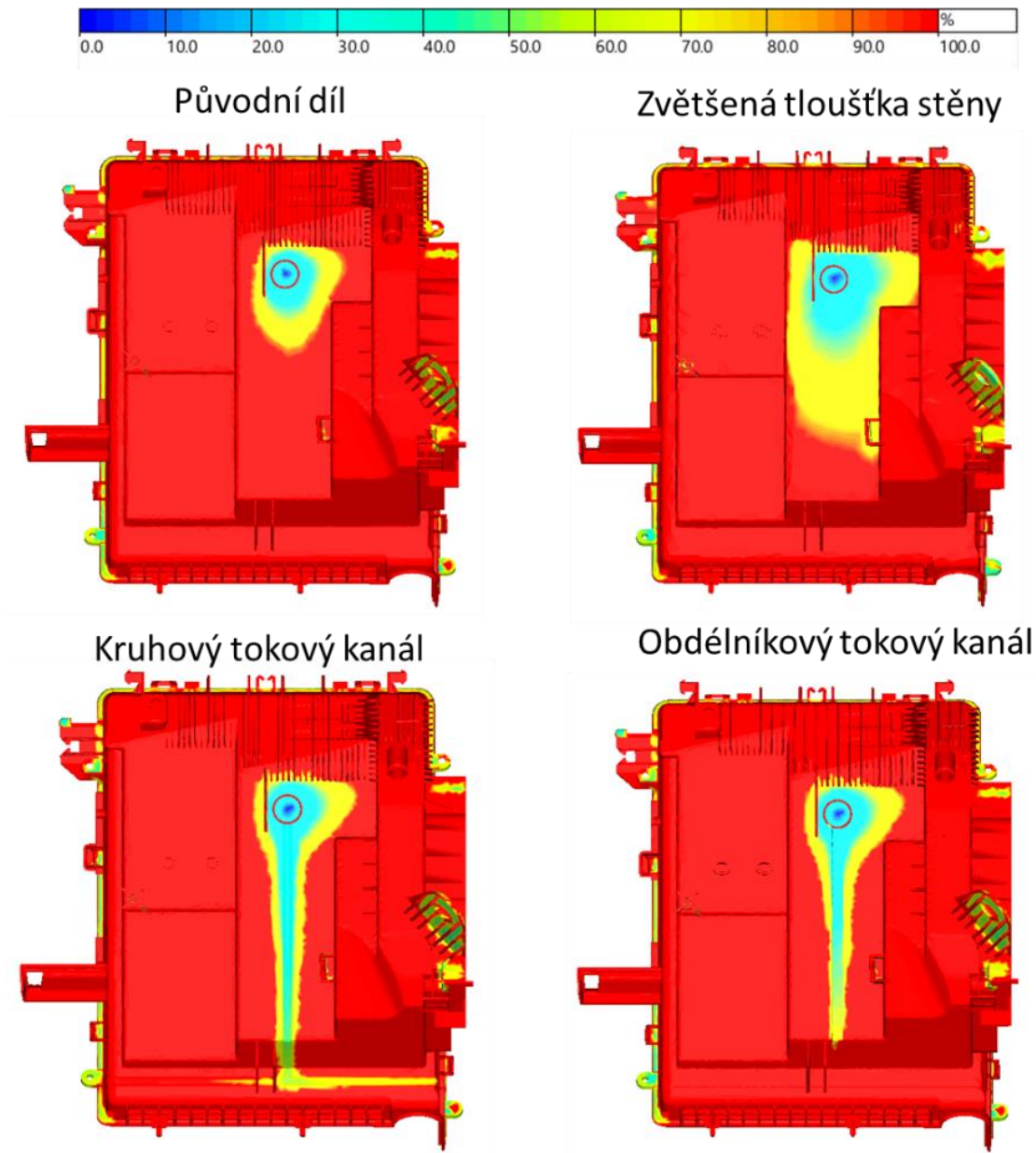
Obrázek 72 Porovnání zamrzlé vrstvy v momentě přepnutí na dotlak, vyobrazeny jsou všechny varianty v kritické oblasti (levý spodní roh)

V pravém spodním rohu dílu byla situace obdobná (viz obr. 73). Nejlepších výsledků zde dosahovala varianta s kruhovým tokovým kanálem. V oblasti tokového kanálu byl rozdíl ve velikosti zamrzlé vrstvy o ca. 30 % oproti původnímu dílu. Mírného zlepšení dosahovala i v jiných oblastech, přičemž rozdíl byl méně markantní.



Obrázek 73 Porovnání zamrzlé vrstvy v momentě přepnutí na dotlak, vyobrazeny jsou všechny varianty v kritické oblasti (pravý spodní roh)

Na konci dotlakové fáze (viz obr. 74) je již téměř všechna tavenina ztuhlá. Zamrzlá vrstva tedy dosahuje hodnot 100 %. Všechny varianty obsahují stále vzdálená místa od vtoku, která vykazují nižší hodnotu zamrzlé vrstvy, přičemž jsou odříznuta od vtokového ústí a nemůže zde být doplňována tavenina. Jedná se především o místa s koncentrací materiálu (okraje výrobku) případně o místa se složitější geometrií, a tedy i omezeným odvodem tepla. Výrazného zlepšení zde dosahuje varianta s kruhovým tokovým kanálem, která na konci dotlakové fáze vykazuje stále nezatuhlé oblasti, které směřují do kritických míst výrobku. Může tak lépe a efektivně doplňovat taveninu.



Obrázek 74 Porovnání zamrzlé vrstvy na konci dotlakové fáze, vyobrazeny jsou všechny varianty

4.2 Ekonomické zhodnocení

Pokud budeme porovnávat uspořené čas na naplnění dílu, pak nejlépe vychází zvýšení tloušťky stěny, kde byl redukován o 27 %. U varianty s kruhovým tokovým kanálem došlo k redukcí o 20 %. Nejdéle se plnil díl s obdélníkovým tokovým kanálem, kde došlo k úspoře času o 17 %. Lze tedy tvrdit, že všechna řešení poskytují snížení času pro plnění dílu a tím i snížení celkového vstřikovacího cyklu.

Z ekonomického hlediska došlo ke zvýšení hmotnosti dílu u všech návrhů. Nejvíce materiálu bylo přidáno u varianty se zvětšenou tloušťkou stěny, kde bylo přidáno 4,78 gramů materiálu. Což se může zdát poměrně málo, každopádně pokud bude forma vyrábět 1 směnu a vyrobí tak ca 900 kusů, bude zapotřebí o ca 4,3 kilogramu více materiálu. Varianta s kruhovým tokovým kanálem je na tom mnohem lépe. Zde bylo přidáno 2,28 gramu materiálu, což za směnu odpovídá ca. 2 kilogramům materiálu navíc. Nejmenší přírůstek dosahoval u varianty s obdélníkovým tokovým kanálem, kde byla navýšena hmotnost dílu o ca 1,92 gramu, které odpovídají 1,7 kilogramům navíc za jednu směnu.

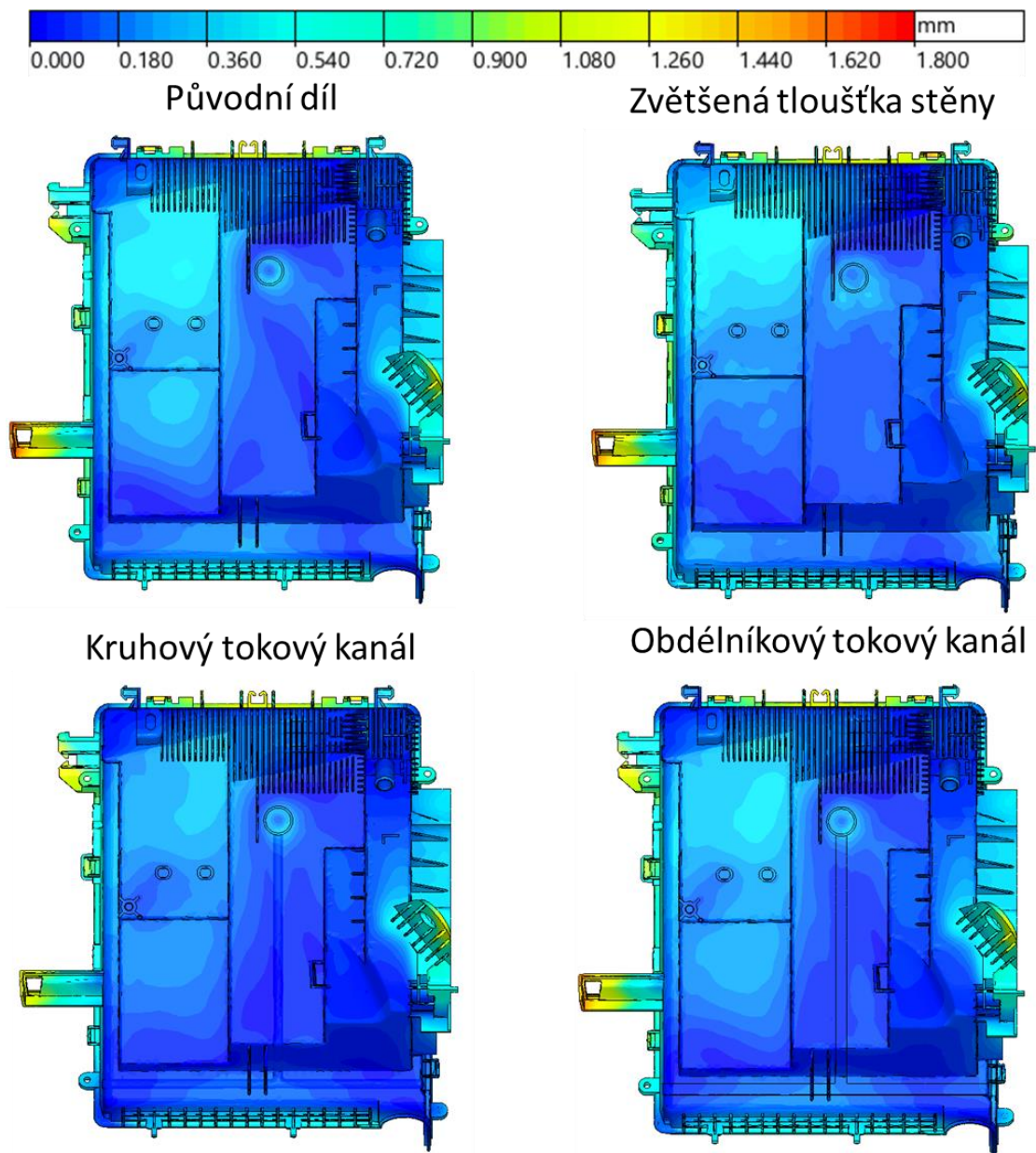
V tabulce 7 je představen odhad ceny jednotlivých úprav. Ceny se pohybují od 1000 do 1500 euro, do kterých bylo započteno rozebrání formy, samotná úprava a následné slícování formy. Nejdražší úpravou formy je realizace kruhového tokového kanálu. Naopak nejlevnější úpravou formy je zvýšení tloušťky stěny v oblasti vtoku. Na druhou stranu tato varianta přináší v důsledku zvýšení hmotnosti dílu i zvýšení jeho ceny.

Tabulka 7 Tabulka ukazující ekonomické zhodnocení

díl	redukce času plnění dílu [%]	zvýšení hmotnosti dílu [g]	zvýšení ceny/ks [EUR]	odhad ceny úpravy formy [EUR]
zvýšení tloušťky stěny	26,67	4,78	0,005736	1000
kruhový tokový kanál	20,00	2,28	0,002736	1500
obdélníkový tokový kanál	16,67	1,92	0,002304	1400

4.3 Vyhodnocení deformace

Deformace byla vyhodnocena na všech variantách za pomoci CAE analýzy (viz obr. 75). Můžeme zde vidět, že varianty s tokovým kanálem vykazují mírné snížení deformace v kritických oblastech nejdélšího toku taveniny, přičemž největší redukce byla zaznamenána právě v oblasti tokového kanálu u varianty s kruhovým tokovým kanálem. Varianta se zvýšenou tloušťkou stěny nevykazovala žádné významné zlepšení.

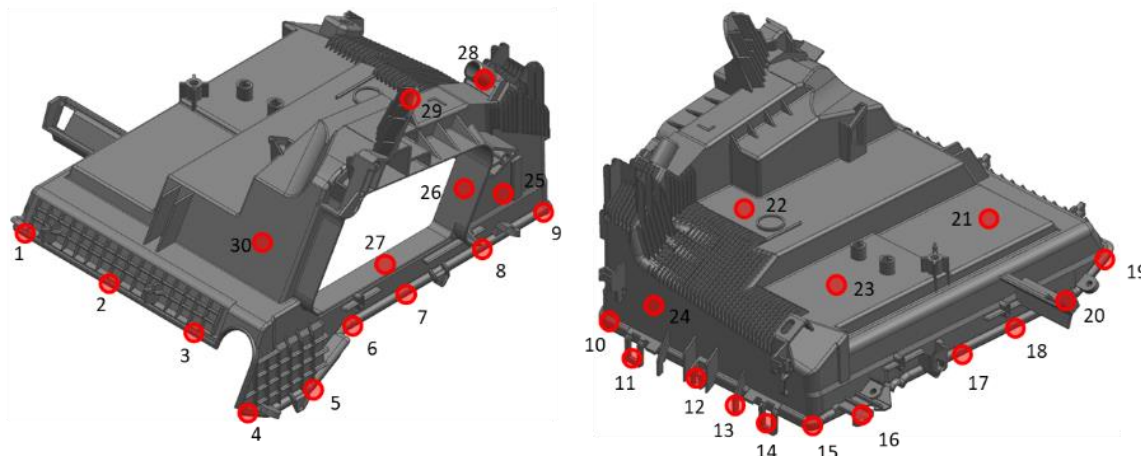


Obrázek 75 Porovnání výsledků deformace CAE analýzy

Na díle bylo vybráno celkem 30 bodů (viz obr. 76), kde byla změřena velikost deformace, která byla následně vzájemně porovnána a vyhodnocena. Při porovnání konkrétních hodnot (viz tab. 8) deformací došlo u varianty s kruhovým tokovým kanálem k nejvýraznější redukci ze všech variant, a to především v bodech č.1, 4, 6, 19 a 30, kde bylo dosaženo snížení o ca. 35 %. Naopak bod č.16 vykazoval mírného zvýšení deformace o ca. 17 % oproti původnímu simulovanému dílu.

Varianta s obdélníkovým tokovým kanálem vykazovala největší zlepšení v bodě č.4, kde byla deformace o 27 % nižší. Naopak v bodě č.16 dosahovala zvýšení deformace o ca. 34 % (v porovnání s původním dílem).

Nejvyšší zvýšení deformace dosahovala varianta se zvětšenou tloušťkou stěny. Zde došlo ve většině bodů k nárůstu deformace. Největší zhoršení dosahoval bod č.15, který vykazoval zvýšení až o ca. 87 % oproti původnímu dílu.



Obrázek 76 Díl s vyznačenými místy, kde byla měřena deformace dílu

Tabulka 8 Hodnoty deformací ve vybraných místech

Velikost deformace [mm]		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
Simulace	původní díl	0,32	0,69	0,58	0,31	0,42	0,47	0,33	0,44	0,26	0,31	1,47	1,49	1,31	1,48	0,15
	kruhový kanál	0,20	0,49	0,50	0,20	0,33	0,30	0,28	0,41	0,23	0,28	1,50	1,55	1,43	1,55	0,16
	obdélníkový kanál	0,30	0,53	0,50	0,23	0,40	0,41	0,36	0,42	0,25	0,34	1,53	1,65	1,53	1,53	0,14
	zvětšená tloušťka stěny	0,33	0,56	0,43	0,29	0,42	0,45	0,35	0,51	0,44	0,49	1,59	1,57	1,48	1,47	0,28

Velikost deformace [mm]		16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.
Simulace	původní díl	0,71	0,72	0,75	0,23	1,63	0,16	0,07	0,28	0,39	0,51	0,41	0,34	0,17	1,06	0,08
	kruhový kanál	0,83	0,71	0,57	0,14	1,18	0,10	0,08	0,21	0,25	0,45	0,47	0,45	0,13	1,09	0,05
	obdélníkový kanál	0,95	0,69	0,68	0,20	1,57	0,16	0,06	0,26	0,32	0,62	0,48	0,43	0,17	1,11	0,06
	zvětšená tloušťka stěny	0,62	0,85	0,77	0,35	1,51	0,08	0,11	0,26	0,41	0,57	0,47	0,37	0,17	1,05	0,08

Pro ověření výsledků byl původní díl digitalizován ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. za pomoci optického 3D skeneru COMET L3D od společnosti Steinbichler. Skener byl vybaven 8 megapixelovým snímačem, který dosahuje maximálního rozlišení 0,024 mm.

Nejdříve byly nanášeny referenční značky na povrch dílu, jež jsou nutné k sestavení jednotlivých snímků. Následně byl zmatněn povrch dílu křídovým prachem. Díl byl tedy

naskenován a následně byl uložen ve formátu stl. Deformace byly vyhodnoceny proložení modelu se skenem, přičemž byly sledovány odchylky od rozměru ve vybraných místech (viz obr. 76). Deformace byla následně porovnána s výsledky ze simulací.

Porovnáním výsledků deformace ze simulace původního dílu a 3D skenu (viz tab. 9) lze vidět, že reálný díl vykazuje vyšší deformace (o ca. 0,1 mm), a to ve všech měřených bodech.

Tabulka 9 Hodnoty deformací ve vybraných místech

Velikost deformace [mm]		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
simulace	původní díl	0,32	0,69	0,58	0,31	0,42	0,47	0,33	0,44	0,26	0,31	1,47	1,49	1,31	1,48	0,15
3D scan	původní díl	0,46	0,82	0,71	0,45	0,58	0,54	0,46	0,57	0,38	0,43	1,52	1,52	1,39	1,53	0,27

Velikost deformace [mm]		16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.
simulace	původní díl	0,71	0,72	0,75	0,23	1,63	0,16	0,07	0,28	0,39	0,51	0,41	0,34	0,17	1,06	0,08
3D scan	původní díl	0,86	0,88	0,79	0,36	1,58	0,21	0,11	0,32	0,41	0,58	0,53	0,39	0,22	1,14	0,14

5 Závěr

Cílem diplomové práce byla konstrukční optimalizace vybraného plastového dílu, který je součástí klimatizační jednotky, jež vyrábí firma DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. Proces výroby vykazoval při rozjezdu velkou míru neshodných dílů. Největším problémem byla vada nedostříknutí dílu, které byla primárně v této diplomové práci věnována pozornost.

Prvním krokem konstrukční optimalizace bylo provedení CAE analýzy stávajícího procesu v programu Cadmould® 3D-F. Pro přesnost výsledků byla provedena simulační analýza kompletního procesu výroby. Analyzována byla tedy celá vstřikovací forma, která vyráběla tři různé výrobky, přičemž byl vyhodnocen pouze námi sledovaný díl. Tato simulace potvrdila stejná problematická místa posledního plnění jako při reálné výrobě. Ze simulace plyne špatné plnění těchto míst, přičemž tavenina zde teče malou rychlostí a dosahuje nízkých teplot.

Dále byly navrženy tři konstrukční optimalizace stávajícího konstrukčního řešení dílu, které byly zaměřeny na ovlivnění toku taveniny uvnitř dutiny formy. Jednalo se o změnu tloušťky stěny a vytvoření tokových kanálů (kruhový, obdélníkový), které směřovaly do míst posledního plnění.

U všech optimalizovaných konstrukčních variant došlo ke zlepšení problematiky plnění dílu, a to především směrem do kritických oblastí. To mělo příznivý vliv jednak na tlakové ztráty, ale i teplotu taveniny ve vzdálenějších oblastech od vtoku. Kritické oblasti tak mohly být plněny rovnoměrněji, rychleji a inkriminovaná místa se vyznačovala nižším poklesem teploty taveniny. Jsou-li porovnávány jednotlivé varianty, pak nejlepších výsledků dosahovala varianta s kruhovým tokovým kanálem. Dimenzování tohoto kanálu zajišťovalo optimalizaci proudění taveniny potřebným směrem, ale i možnost efektivního doplňování taveniny na konci dotlakové fáze. Varianta se zvýšenou tloušťkou stěny dosahovala z hlediska rovnoměrnosti plnění, rychlosti plnění, teplotní distribuce taveniny a tlakových ztrát obdobných výsledků jako varianta s kruhovým tokovým kanálem, nicméně úroveň zamrzlé vrstvy (aplikace dotlaku) nedosahovala tak příznivých výsledků. Varianta s obdélníkovým tokovým kanálem nedosahovala tak výrazného zlepšení problematiky plnění, ani aplikovatelnosti dotlakové fáze (úroveň zamrzlé vrstvy), jako varianta s kruhovým kanálem.

Pro zlepšení kvality dílu byla vybrána optimalizace dílu za pomoci tokového kanálu s kruhovým průřezem. Hlavním důvodem této volby byla jednoduchá výroba za pomoci elektroerozivního obrábění a také skutečnost, že tato varianta z hlediska optimalizace problematiky plnění a možnosti aplikace dotlaku dosahovala nejlepších výsledků. Došlo zde také k největšímu snížení deformace, viz kapitola 4.3. Z ekonomického hlediska (úprava formy) se jednalo o nejdražší variantu. Nicméně z hlediska navýšení hmotnosti dílu se jedná v porovnání s konstrukční variantou zvýšení tloušťky stěny o mnohem výhodnější řešení (ca. o 50 % méně).

Po úpravě formy bylo nutné provést ověřovací testy, které potvrdí správnost úprav. Forma byla tedy upnuta na stroj, na kterém byla uvolněna pro výrobu. Následně zde byly optimalizovány vstřikovací parametry, a to z důvodu rychlejšího plnění námi upravovaného dílu. Jak simulace předpověděla, bylo nutné optimalizovat časy otevírání trysek a to tak, aby se otvíraly dříve. Po úpravě parametrů (dle nastavení CAE analýzy) byl díl vyhodnocen interně kvalitou, kde byly zkoumány vady dílu. Uvolnění výroby bylo bez problémů a mohla být aplikována sériová výroba.

Při dlouhodobém sledování výroby byl zjištěn výrazný pokles neshodných dílů. Bylo tedy zaznamenáno výrazné zvýšení kvality dílů a zlepšení stability procesu vstřikování. Tím byly ušetřeny finance na výrobu neshodných dílů a prostoje způsobené častým seřizováním.

Po úpravě formy byl díl znovu naskenován. Výsledky měření lze vidět v příloze 2. Porovnáním reálného dílu před a po úpravě lze vidět snížení hodnoty deformace, a to až o 36 % v bodě č.30, naopak zvýšení došlo v bodě č.16 a to o 2 %.

Použitá literatura

- [1] FUH, J. Y. H., et al. *Computer-aided mold design and manufacture*. New York: Marcel Dekker, 2004. 372 s. ISBN 0-8247-5314-3
- [2] ZHOUC, Huamin. *Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2013. ISBN 978-0-470-60299-7.
- [3] KENNEDY, Peter and Rong ZHENG. *Flow Analysis of Injection Molds*. Munchen: Carl Hanser Verlag GmbH, 2013. ISBN 978-1-56990-512-8.
- [4] Element Types. Object moved [online]. [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: http://fea-cae-engineering.com/fea-cae-engineering/element_types.htm
- [5] Autodesk® Simulation Moldflow® brožura [online]. [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: https://marciaswan.weebly.com/uploads/1/3/5/8/13585698/mfdg_low-res_proof_part1.pdf
- [6] SIMCON SUPPLYING SOLUTIONS. User manual: Cadmould 3D-F Simulation. [s.l.]: Simcon, 2014.
- [7] Plasty Gabriel. Cadmould 3D-F. Cadmould.cz [online]. © 2019 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://cadmould.cz/software/cadmould-3d-f/>
- [8] Popis modelu CADMOULD 3D-F | Plasty Gabriel s.r.o.. Plasty Gabriel s.r.o. - Optimalizace procesu vstřikování | Software Cadmould 3D-F | Poradenství | Soudní znaleství | Školení [online]. Copyright © 2018 Plasty Gabriel s.r.o [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: <http://cadmould.cz/2013/02/popis-modelu-cadmould-3d-f/>
- [9] Simulplast. Moldex3D. Simulplast.cz/moldex3d.php [online]. ©2019 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://www.simulplast.cz/moldex3d.php>
- [10] SEIDL, Martin. *Konstrukce plastových dílů*. 2019. ISBN 978-80-7494-461-1
- [11] BOBEK, Jiří [online]. [cit. 2019-10-14] <https://etul.publi.cz/?book=179-vstrikovaci-formy-pro-zpracovani-termoplastu>. ISBN: 978-80-88058-65-6
- [12] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.



- [13] MALLOY, Robert A. *Plastic Part Design for Injection Molding: an Introduction*. [1st ed.] München: Hanser, 1994. ISBN 1-56990-129-5.

- [14] BELOFSKY, Harold. *Plastic Product Design and Process Engineering*. München: Hanser, 1995. ISBN 1-56990-179-1.

- [15] GOODSHIP, V., B. NIDDELTON a R. CHERRINGTON. *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality: Structural Components, Injection Molding and 3D Printing*. Weinheim: Wiley-VCH 2016. ISBN 978-0-323-34061-8.



Seznam příloh

Příloha č. 1: Vstřikovací parametry

Příloha č. 2: Tabulka deformací ve vybraných bodech



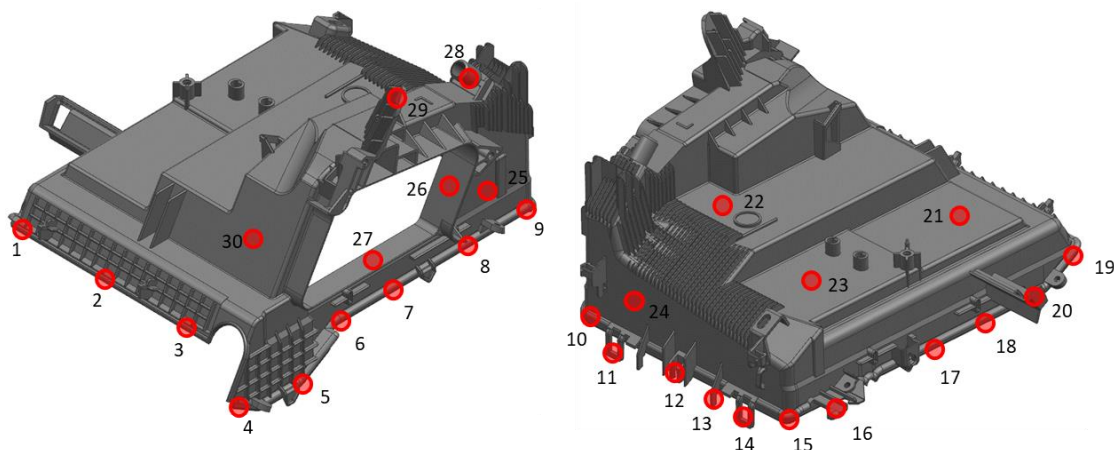
Příloha č. 1: Vstřikovací parametry

POUŽITELNÉ PRO IMM: 5, 6, 7, 8, 9		ČÍSLO FORMY & INVENTURNÍ ČÍSLO: 035 MO-251																																																																																																																																																													
MATERIÁL: Sabic 3320EH		VÝROBNÍ CYKLUS: [R] 32,8s ±0,3s																																																																																																																																																													
NASTAVENÍ TOPENÍ:		PRODLOUŽENÍ CYKLU MAX.: ^[R] 0,0s																																																																																																																																																													
<table border="1"> <tr> <td rowspan="9">TRYSKA</td> <td>no.:</td> <td>°C</td> <td rowspan="9">HORKOVANÁ FORMY</td> <td>no.:</td> <td>°C</td> <td>no.:</td> <td>°C</td> <td>no.:</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>1.</td> <td>220</td> <td>16.</td> <td>235</td> <td>24.</td> <td>235</td> <td>32.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>3.</td> <td>220</td> <td>17.</td> <td>235</td> <td>25.</td> <td>235</td> <td>33.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>4.</td> <td>220</td> <td>18.</td> <td>235</td> <td>26.</td> <td>235</td> <td>34.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>5.</td> <td>220</td> <td>19.</td> <td>235</td> <td>27.</td> <td>-</td> <td>35.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>6.</td> <td>220</td> <td>20.</td> <td>235</td> <td>28.</td> <td>-</td> <td>36.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>7.</td> <td>220</td> <td>21.</td> <td>235</td> <td>29.</td> <td>-</td> <td>37.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>8.</td> <td>210</td> <td>22.</td> <td>-</td> <td>30.</td> <td>-</td> <td>38.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>9.</td> <td>195</td> <td>23.</td> <td>-</td> <td>31.</td> <td>-</td> <td>39.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Tráv. 100</td> <td colspan="8"></td> </tr> </table>		TRYSKA	no.:	°C	HORKOVANÁ FORMY	no.:	°C	no.:	°C	no.:	°C	1.	220	16.	235	24.	235	32.	-	3.	220	17.	235	25.	235	33.	-	4.	220	18.	235	26.	235	34.	-	5.	220	19.	235	27.	-	35.	-	6.	220	20.	235	28.	-	36.	-	7.	220	21.	235	29.	-	37.	-	8.	210	22.	-	30.	-	38.	-	9.	195	23.	-	31.	-	39.	-	Tráv. 100										NASTAVENÍ VSTŘIKOVÁNÍ: Profil vstřikovací RYCHLOSTI 1-10: [mm³/s] <table border="1"> <tr> <td>pozice 1..</td> <td>78 ±5</td> <td>78 ±5</td> <td>78 ±5</td> <td>78 ±5</td> <td>78 ±5</td> </tr> <tr> <td>pozice 6..</td> <td>78 ±5</td> <td>78 ±5</td> <td>78 ±5</td> <td>78 ±5</td> <td>78 ±5</td> </tr> </table>		pozice 1..	78 ±5	78 ±5	78 ±5	78 ±5	78 ±5	pozice 6..	78 ±5	78 ±5	78 ±5	78 ±5	78 ±5																																																												
TRYSKA	no.:		°C	HORKOVANÁ FORMY		no.:	°C	no.:	°C	no.:	°C																																																																																																																																																				
	1.		220			16.	235	24.	235	32.	-																																																																																																																																																				
	3.		220			17.	235	25.	235	33.	-																																																																																																																																																				
	4.		220			18.	235	26.	235	34.	-																																																																																																																																																				
	5.		220			19.	235	27.	-	35.	-																																																																																																																																																				
	6.		220			20.	235	28.	-	36.	-																																																																																																																																																				
	7.		220			21.	235	29.	-	37.	-																																																																																																																																																				
	8.		210			22.	-	30.	-	38.	-																																																																																																																																																				
	9.	195	23.		-	31.	-	39.	-																																																																																																																																																						
Tráv. 100																																																																																																																																																															
pozice 1..	78 ±5	78 ±5	78 ±5	78 ±5	78 ±5																																																																																																																																																										
pozice 6..	78 ±5	78 ±5	78 ±5	78 ±5	78 ±5																																																																																																																																																										
Odchyly válece: pozitivní: 10 °C negativní: 10 °C		Odchyly formy: pozitivní: 10 °C negativní: 10 °C																																																																																																																																																													
Tolerance nastavení: válec: ±5 °C forma: ±5 °C		NASTAVENÍ VSTŘIKOVACÍHO TLAKU: ZVÝŠENÝ SPECIFICKÝ VSTŘIKOVACÍ TLAK: <input type="checkbox"/> NE MEZ. VSTŘIKOVACÍHO TLAKU: ^[P6][bar] <input type="text" value="107 ±5"/> VSTŘIK STOP NA TLAKOVÉ MEZI: <input type="checkbox"/> NE																																																																																																																																																													
NASTAVENÍ POHYBŮ FORMY: Nastavení profilu OTEVŘENÍ formy: <table border="1"> <tr> <td>pozice</td> <td><sup>[A]</sup> [°]</td> <td><sup>[W2]</sup> [V8]</td> <td><sup>[W4]</sup> [V7]</td> <td><sup>[D]</sup> [V6]</td> </tr> <tr> <td>Dráha [mm]</td> <td>1000 ±0</td> <td>210 ±0</td> <td>80 ±0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Rychlost [%]</td> <td>0</td> <td>100 ±5</td> <td>65 ±5</td> <td>30 ±5</td> </tr> </table>		pozice	^[A] [°]	^[W2] [V8]	^[W4] [V7]	^[D] [V6]	Dráha [mm]	1000 ±0	210 ±0	80 ±0	0	Rychlost [%]	0	100 ±5	65 ±5	30 ±5	KONTROLA DOBY VSTŘIKU: ^[Z5][s] MIN.: [R] <input type="text" value="2,20 ±0,2"/> MAX.: [R] <input type="text" value="6,00 ±0,2"/>																																																																																																																																														
pozice	^[A] [°]	^[W2] [V8]	^[W4] [V7]	^[D] [V6]																																																																																																																																																											
Dráha [mm]	1000 ±0	210 ±0	80 ±0	0																																																																																																																																																											
Rychlost [%]	0	100 ±5	65 ±5	30 ±5																																																																																																																																																											
OTEVŘENÍ FORMY PO DÁVKOVÁNÍ: <input type="checkbox"/> NE		VOLBA PŘEPNUTÍ: [v závislosti na dávce] VOLBA PŘEPNUTÍ: ^[C3][mm] <input type="text" value="18,0 ±1,0"/>																																																																																																																																																													
Nastavení profilu UZAVÍRÁNÍ formy: <table border="1"> <tr> <td>pozice</td> <td><sup>[A]</sup> [V1]</td> <td><sup>[W3]</sup> [V2]</td> <td><sup>[W1]</sup> [V3]</td> <td><sup>[G]</sup> [V4]</td> </tr> <tr> <td>Dráha [mm]</td> <td>1000 ±0</td> <td>900 ±0</td> <td>350 ±0</td> <td>150 ±0</td> </tr> <tr> <td>Rychlost [%]</td> <td>90 ±5</td> <td>100 ±5</td> <td>50 ±5</td> <td>20 ±5</td> </tr> </table>		pozice	^[A] [V1]	^[W3] [V2]	^[W1] [V3]	^[G] [V4]	Dráha [mm]	1000 ±0	900 ±0	350 ±0	150 ±0	Rychlost [%]	90 ±5	100 ±5	50 ±5	20 ±5	NASTAVENÍ DOTLAKU: DOTLAK: ^[P7 a8 P16][bar] <input type="text" value="35 ±5"/> DOBA DOTLAKU: ^[Z2][s] <input type="text" value="4,00 ±0,0"/> DOBA CHLAZENÍ: ^[Z4][s] <input type="text" value="12,00 ±0,0"/>																																																																																																																																														
pozice	^[A] [V1]	^[W3] [V2]	^[W1] [V3]	^[G] [V4]																																																																																																																																																											
Dráha [mm]	1000 ±0	900 ±0	350 ±0	150 ±0																																																																																																																																																											
Rychlost [%]	90 ±5	100 ±5	50 ±5	20 ±5																																																																																																																																																											
TLAK OCHRANY FORMY: ^[P2][bar] <input type="text" value="15 ±2"/> DOBA OCHRANY FORMY: ^[ZF][s] <input type="text" value="2,5 ±0,2"/>		KONTROLA POLŠTÁŘE: ^[CP][mm] ANO MIN.: [mm] <input type="text" value="14,0 ±1,0"/> MAX.: [mm] <input type="text" value="20,0 ±1,0"/>																																																																																																																																																													
F4 UZAVÍRACÍ SÍLA ZADANÁ: ^[SK][kN] <input type="text" value="10 500 ±500"/> 2. TLAK OCHRANY FORMY: ANO START 2. TLAKU OCHRANY FORMY: ^[G3][mm] <input type="text" value="50 ±5"/> 2. TLAK OCHRANY FORMY: ^[P2a][bar] <input type="text" value="13 ±3"/>		NASTAVENÍ DÁVKOVÁNÍ: ZDVÍH DÁVKOVÁNÍ: ^[C1][mm] <input type="text" value="118 ±5"/> RYCHLOST DÁVKOVÁNÍ: ^[DZ] [%] (100% = 120rpm) <input type="text" value="79,0 ±5"/> ZPĚTNÝ TLAK: ^[P5][bar] <input type="text" value="5 ±2"/> DEKOMPRESA PO DÁVKOVÁNÍ: ^[C2][mm] <input type="text" value="5 ±2"/>																																																																																																																																																													
F5 VÝŠKA FORMY: ^[FH][mm] <input type="text" value="1100 ±5,0"/>		S NASTAVENÍ UZAVÍRATELNÝCH TRYSEK: Tabulka nastavení OTEVŘENÍ / UZAVÍRÁNÍ trysek:																																																																																																																																																													
NASTAVENÍ POHYBŮ VYHAZOVAČE: Nastavení profilu pohybu VPŘED: <table border="1"> <tr> <td>Dráha [mm]</td> <td><sup>[L3]</sup></td> <td>50 ±0</td> <td><sup>[L5]</sup></td> <td>65 ±0</td> <td><sup>[L1]</sup></td> <td>103 ±5</td> </tr> <tr> <td>Rychlost [%]</td> <td><sup>[V25]</sup></td> <td>20 ±5</td> <td><sup>[V27]</sup></td> <td>35 ±5</td> <td><sup>[V29]</sup></td> <td>35 ±5</td> </tr> <tr> <td>Tlak [%]</td> <td><sup>[P25]</sup></td> <td>25 ±5</td> <td><sup>[P27]</sup></td> <td>25 ±5</td> <td><sup>[P29]</sup></td> <td>35 ±5</td> </tr> </table>		Dráha [mm]	^[L3]	50 ±0	^[L5]	65 ±0	^[L1]	103 ±5	Rychlost [%]	^[V25]	20 ±5	^[V27]	35 ±5	^[V29]	35 ±5	Tlak [%]	^[P25]	25 ±5	^[P27]	25 ±5	^[P29]	35 ±5	* mapa pozic trysek je na druhé straně této instrukce																																																																																																																																								
Dráha [mm]	^[L3]	50 ±0	^[L5]	65 ±0	^[L1]	103 ±5																																																																																																																																																									
Rychlost [%]	^[V25]	20 ±5	^[V27]	35 ±5	^[V29]	35 ±5																																																																																																																																																									
Tlak [%]	^[P25]	25 ±5	^[P27]	25 ±5	^[P29]	35 ±5																																																																																																																																																									
ZPOZDĚNÍ VYJETÍ VYHAZOVAČE: ^[ZAV][s] <input type="text" value="0,4 ±0,2"/>		Nastavení profilu pohybu ZPĚT: <table border="1"> <tr> <td>Dráha [mm]</td> <td><sup>[L4]</sup></td> <td>65 ±0</td> <td><sup>[L6]</sup></td> <td>55 ±0</td> <td><sup>[L}</sup></td> <td>41 ±0,5</td> </tr> <tr> <td>Rychlost [%]</td> <td><sup>[V26]</sup></td> <td>95 ±5</td> <td><sup>[V28]</sup></td> <td>45 ±5</td> <td><sup>[V30]</sup></td> <td>15 ±5</td> </tr> <tr> <td>Tlak [%]</td> <td><sup>[P26]</sup></td> <td>90 ±5</td> <td><sup>[P28]</sup></td> <td>25 ±5</td> <td><sup>[P30]</sup></td> <td>15 ±5</td> </tr> </table>		Dráha [mm]	^[L4]	65 ±0	^[L6]	55 ±0	^{[L}}	41 ±0,5	Rychlost [%]	^[V26]	95 ±5	^[V28]	45 ±5	^[V30]	15 ±5	Tlak [%]	^[P26]	90 ±5	^[P28]	25 ±5	^[P30]	15 ±5																																																																																																																																							
Dráha [mm]	^[L4]	65 ±0	^[L6]	55 ±0	^{[L}}	41 ±0,5																																																																																																																																																									
Rychlost [%]	^[V26]	95 ±5	^[V28]	45 ±5	^[V30]	15 ±5																																																																																																																																																									
Tlak [%]	^[P26]	90 ±5	^[P28]	25 ±5	^[P30]	15 ±5																																																																																																																																																									
ZPOZDĚNÍ ZAJETÍ VYHAZOVAČE: ^[ZA][s] <input type="text" value="0,4 ±0,2"/>		NASTAVENÍ HYDRAULICKÝCH JADER:																																																																																																																																																													
Jádru # [pozice]:		<table border="1"> <tr> <td></td> <td colspan="2">3 [pevná str.]</td> <td colspan="2">4 [pevná str.]</td> <td colspan="2">6 [pevná str.]</td> <td colspan="2">1 [pohyb. str.]</td> <td colspan="2">2 [pohyb. str.]</td> <td colspan="2">5 [pohyb. str.]</td> </tr> <tr> <td>Povolení jádra:</td> <td colspan="2">ON</td> <td colspan="2">ON</td> <td colspan="2">OFF</td> <td colspan="2">ON</td> <td colspan="2">OFF</td> <td colspan="2">OFF</td> </tr> <tr> <td>Start pozice formy [mm]:</td> <td>0 ±0</td> <td>0 ±0</td> <td>0 ±0</td> <td>0 ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>1000 ±0</td> <td>0 ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> </tr> <tr> <td>Kontrolní bod [mm]:</td> <td>0 ±0</td> <td>0 ±0</td> <td>0 ±0</td> <td>1000 ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>0 ±0</td> <td>1000 ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> </tr> <tr> <td>Priorita najetí/vyjetí:</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Paralelně k pohybu formy:</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>ANO</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td>Vyjetí na koncové pozici:</td> <td>NE</td> <td>ANO</td> <td>NE</td> <td>ANO</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>ANO</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td>Vyjetí během doby chlazení:</td> <td></td> <td>ANO</td> <td></td> <td>ANO</td> <td></td> <td>NE</td> <td></td> <td>ANO</td> <td></td> <td>NE</td> <td></td> <td>NE</td> </tr> <tr> <td>Pročl. od začátku chlazení [s]:</td> <td></td> <td>6,0 ±0</td> <td></td> <td>8,0 ±0</td> <td></td> <td>- ±0</td> <td></td> <td>5,0 ±0</td> <td></td> <td>- ±0</td> <td></td> <td>- ±0</td> </tr> <tr> <td>Kontrolní doba [s]:</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> </tr> <tr> <td>Rychlost [%]:</td> <td>80 ±10</td> <td>80 ±10</td> <td>80 ±10</td> <td>60 ±10</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>50 ±10</td> <td>55 ±10</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> </tr> <tr> <td>Tlak [%]:</td> <td>80 ±10</td> <td>80 ±10</td> <td>80 ±10</td> <td>85 ±10</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>50 ±10</td> <td>35 ±10</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> <td>- ±0</td> </tr> </table>			3 [pevná str.]		4 [pevná str.]		6 [pevná str.]		1 [pohyb. str.]		2 [pohyb. str.]		5 [pohyb. str.]		Povolení jádra:	ON		ON		OFF		ON		OFF		OFF		Start pozice formy [mm]:	0 ±0	0 ±0	0 ±0	0 ±0	- ±0	- ±0	1000 ±0	0 ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	Kontrolní bod [mm]:	0 ±0	0 ±0	0 ±0	1000 ±0	- ±0	- ±0	0 ±0	1000 ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	Priorita najetí/vyjetí:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Paralelně k pohybu formy:	NE	NE	NE	NE	NE	NE	ANO	NE	NE	NE	NE	NE	Vyjetí na koncové pozici:	NE	ANO	NE	ANO	NE	NE	NE	ANO	NE	NE	NE	NE	Vyjetí během doby chlazení:		ANO		ANO		NE		ANO		NE		NE	Pročl. od začátku chlazení [s]:		6,0 ±0		8,0 ±0		- ±0		5,0 ±0		- ±0		- ±0	Kontrolní doba [s]:	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	Rychlost [%]:	80 ±10	80 ±10	80 ±10	60 ±10	- ±0	- ±0	50 ±10	55 ±10	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	Tlak [%]:	80 ±10	80 ±10	80 ±10	85 ±10	- ±0	- ±0	50 ±10	35 ±10	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0
	3 [pevná str.]		4 [pevná str.]		6 [pevná str.]		1 [pohyb. str.]		2 [pohyb. str.]		5 [pohyb. str.]																																																																																																																																																				
Povolení jádra:	ON		ON		OFF		ON		OFF		OFF																																																																																																																																																				
Start pozice formy [mm]:	0 ±0	0 ±0	0 ±0	0 ±0	- ±0	- ±0	1000 ±0	0 ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0																																																																																																																																																			
Kontrolní bod [mm]:	0 ±0	0 ±0	0 ±0	1000 ±0	- ±0	- ±0	0 ±0	1000 ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0																																																																																																																																																			
Priorita najetí/vyjetí:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																			
Paralelně k pohybu formy:	NE	NE	NE	NE	NE	NE	ANO	NE	NE	NE	NE	NE																																																																																																																																																			
Vyjetí na koncové pozici:	NE	ANO	NE	ANO	NE	NE	NE	ANO	NE	NE	NE	NE																																																																																																																																																			
Vyjetí během doby chlazení:		ANO		ANO		NE		ANO		NE		NE																																																																																																																																																			
Pročl. od začátku chlazení [s]:		6,0 ±0		8,0 ±0		- ±0		5,0 ±0		- ±0		- ±0																																																																																																																																																			
Kontrolní doba [s]:	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0																																																																																																																																																			
Rychlost [%]:	80 ±10	80 ±10	80 ±10	60 ±10	- ±0	- ±0	50 ±10	55 ±10	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0																																																																																																																																																			
Tlak [%]:	80 ±10	80 ±10	80 ±10	85 ±10	- ±0	- ±0	50 ±10	35 ±10	- ±0	- ±0	- ±0	- ±0																																																																																																																																																			
Určení jádra (př. PTC otvor...):		Dvůřňový otvor vždy ON		OFF ON - brázdito		OFF ON - otvor pro rezistor																																																																																																																																																									



<p>NASTAVENÍ CHLAZENÍ:</p> <p>NASTAVENÁ TEPLOTA CHLADÍCÍ VODY: $^{\circ}\text{C}$ <input type="text" value="8,0 ±0,0"/></p> <p>TLAK CHLADÍCÍ VODY: [bar] <input type="text" value="9,0 ±0,5"/></p> <p>TOLEROVANÁ ODCHYLKA OD NASTAVENÉ TEPLoty: <input type="text" value="+3"/> <input type="text" value="-2"/></p> <p>Nastavení průtoků <PEVNÁ strana>:</p> <table border="1"> <tr> <th>průtok #</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> </tr> <tr> <td>Qmin.</td> <td>19,6</td> <td>13,7</td> <td>13,0</td> <td>26,6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>±3,0</td> <td>±3,0</td> <td>±3,0</td> <td>±3,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>kontrola</td> <td>ON</td> <td>ON</td> <td>ON</td> <td>ON</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Nastavení průtoků <POHYBLIVÁ strana>:</p> <table border="1"> <tr> <th>průtok #</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> </tr> <tr> <td>Qmin.</td> <td>17,3</td> <td>4,5</td> <td>13,1</td> <td>14,9</td> <td>14,7</td> <td>15,7</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>±3,0</td> <td>±3,0</td> <td>±3,0</td> <td>±3,0</td> <td>±3,0</td> <td>±3,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>kontrola</td> <td>ON</td> <td>ON</td> <td>ON</td> <td>ON</td> <td>ON</td> <td>ON</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		průtok #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Qmin.	19,6	13,7	13,0	26,6							±3,0	±3,0	±3,0	±3,0						kontrola	ON	ON	ON	ON						průtok #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Qmin.	17,3	4,5	13,1	14,9	14,7	15,7						±3,0	±3,0	±3,0	±3,0	±3,0	±3,0					kontrola	ON	ON	ON	ON	ON	ON					<p>S POZICE TRYSEK:</p> <p>Strana bez obsluhy</p> <p>Strana obsluhy</p>	
průtok #	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																																														
Qmin.	19,6	13,7	13,0	26,6																																																																																			
	±3,0	±3,0	±3,0	±3,0																																																																																			
kontrola	ON	ON	ON	ON																																																																																			
průtok #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																													
Qmin.	17,3	4,5	13,1	14,9	14,7	15,7																																																																																	
	±3,0	±3,0	±3,0	±3,0	±3,0	±3,0																																																																																	
kontrola	ON	ON	ON	ON	ON	ON																																																																																	
<p>S NASTAVENÍ STARTU VÝROBY:</p> <p>PŘÍPRAVA ROZJEZDU FORMY:</p> <p>DOBA PŘEDEHŘEVU NA VÝM. STOLE: <input type="text" value="20-45 minut"/></p> <p>KONTROLA FUNKCE TRYSEK: <input type="text" value="Pokud bylo topení vypnuto více jak 20 minut - prostříkni."/></p> <p>PROSTŘÍKNUTÍM PŘES FORMU:</p> <p>POUŽITÍ SPREJE (SEPARÁTOR) PŘED ROZJEZDEM VÝROBY: <input type="text" value="Bez aplikace spreje"/></p> <p>TEST NAHŘÁTÍ VTKŮ (PURGELESS): <input type="text" value="NE"/></p> <p>Tabulka nastavení PURGELESS:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>tryska</th> <th>ztl.vstřik. spouště</th> <th>tržba vstřik.</th> <th>max. vstřikací tlak</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>on</td> <td></td> <td>mm bar</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>on</td> <td>s</td> <td>mm bar</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>on</td> <td>s</td> <td>mm bar</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>off</td> <td>s</td> <td>mm bar</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>off</td> <td>s</td> <td>mm bar</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>off</td> <td>s</td> <td>mm bar</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>off</td> <td>s</td> <td>mm bar</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>off</td> <td>s</td> <td>mm bar</td> </tr> </tbody> </table> <p>* PŘED STARTEM TESTU NAHŘÁTÉ MUŽÍ BÝT FORMA PŘEDEHŘÁTÁ NA PROVOZNÍ TEPLotu.</p> <p>MAX. TEST VSTŘIKOVACÍ RYCHLOSTI: $^{\circ}\text{C}$ <input type="text" value="±0"/></p> <p>MAX. VSTŘIKOVACÍ RYCHLOST: $^{\circ}\text{mm/s}$ <input type="text" value="±0"/></p>		tryska	ztl.vstřik. spouště	tržba vstřik.	max. vstřikací tlak	1	on		mm bar	-	on	s	mm bar	-	on	s	mm bar	-	off	s	mm bar	-	off	s	mm bar	-	off	s	mm bar	-	off	s	mm bar	-	off	s	mm bar	<p>PŘÍPRAVA ROZJEZDU VÝROBY:</p> <p>NAJÍZDĚCÍ CYKLUS - POČET ZDVHŮ: [dvíhly] <input type="text" value="1"/></p> <p>NAJÍZDĚCÍ CYKLUS S BEZPEČNOSTÍ FORMY: <input type="text" value="NE"/></p> <p>NAJÍZDĚCÍ CYKLUS - VOLBA PŘEPNUTÍ: <C3a>[mm] <input type="text" value="20,0 ±1"/></p> <p>SCRAP - ROZJEZDOVÉ DÍLY: [dvíhly] <input type="text" value="3"/></p>																																																	
tryska	ztl.vstřik. spouště	tržba vstřik.	max. vstřikací tlak																																																																																				
1	on		mm bar																																																																																				
-	on	s	mm bar																																																																																				
-	on	s	mm bar																																																																																				
-	off	s	mm bar																																																																																				
-	off	s	mm bar																																																																																				
-	off	s	mm bar																																																																																				
-	off	s	mm bar																																																																																				
-	off	s	mm bar																																																																																				

Příloha č. 2: Tabulka deformací ve vybraných bodech



Velikost deformace [mm]		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
Simulace	původní díl	0,32	0,69	0,58	0,31	0,42	0,47	0,33	0,44	0,26	0,31	1,47	1,49	1,31	1,48	0,15
	kruhový kanál	0,20	0,49	0,50	0,20	0,33	0,30	0,28	0,41	0,23	0,28	1,50	1,55	1,43	1,55	0,16
	obdélníkový kanál	0,30	0,53	0,50	0,23	0,40	0,41	0,36	0,42	0,25	0,34	1,53	1,65	1,53	1,53	0,14
	zvětšená tloušťka stěny	0,33	0,56	0,43	0,29	0,42	0,45	0,35	0,51	0,44	0,49	1,59	1,57	1,48	1,47	0,28
3D scan	původní díl	0,46	0,82	0,71	0,45	0,58	0,54	0,46	0,57	0,38	0,43	1,52	1,52	1,39	1,53	0,27
	kruhový kanál	0,32	0,64	0,59	0,33	0,41	0,39	0,37	0,51	0,31	0,35	1,49	1,48	1,37	1,47	0,19

Velikost deformace [mm]		16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.
Simulace	původní díl	0,71	0,72	0,75	0,23	1,63	0,16	0,07	0,28	0,39	0,51	0,41	0,34	0,17	1,06	0,08
	kruhový kanál	0,83	0,71	0,57	0,14	1,18	0,10	0,08	0,21	0,25	0,45	0,47	0,45	0,13	1,09	0,05
	obdélníkový kanál	0,95	0,69	0,68	0,20	1,57	0,16	0,06	0,26	0,32	0,62	0,48	0,43	0,17	1,11	0,06
	zvětšená tloušťka stěny	0,62	0,85	0,77	0,35	1,51	0,08	0,11	0,26	0,41	0,57	0,47	0,37	0,17	1,05	0,08
3D scan	původní díl	0,86	0,88	0,79	0,36	1,58	0,21	0,11	0,32	0,41	0,58	0,53	0,39	0,22	1,14	0,14
	kruhový kanál	0,88	0,86	0,65	0,22	1,21	0,17	0,09	0,29	0,31	0,47	0,52	0,38	0,18	1,15	0,09