

Využití simulace při návrhu a realizaci plastového dílce

Bc. Radek Vybíhal

Diplomová práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek VYBÍHAL**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Využití simulace při návrhu a realizaci plastového dílce.**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Proveďte konstrukci 3D modelu řešeného dílu v programu CATIA V5.
3. Proveďte tokové analýzy v programu MPI.
4. Porovnejte výsledky analýz se současným stavem.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

20. února 2009

Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2009

Ve Zlíně dne 12. února 2009



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá využitím simulace při návrhu a realizaci plastového dílce, který slouží jako krabička na vizitky.

V teoretické části byla popsána teorie vstřikování a vstřikovacího stroje, návrh a popis chladicího okruhu, návrh, konstrukce a popis vstřikovacích forem.

V praktické části bylo využito programu CATIA V5 pro 3D konstrukci jednotlivých dílů krabičky na vizitky, konstrukci chladicího a vtokového systému vstřikovací formy. Tyto jednotlivé části byly uloženy pod příslušnými koncovkami a převedeny do programu Moldflow Plastics Insight 6.2., kde byly provedeny analýzy potřebné k vyhodnocení a srovnání se současnou situací. V dalších variantách byly provedeny regulace teplot polymerní taveniny, temperačního média a konstrukční zásahy do původní formy. Na závěr byl proveden v programu Moldflow Plastics Insight 6.2. návrh čtyřnásobné formy a byla vybrána nejvhodnější varianta pro nahrazení současné situace.

Klíčová slova: vstřikovací forma, vstřikování, polymerní tavenina

ABSTRACT

Thesis deals with the simulation in the design and implementation of the plastic part of this-which serves as a box on a business cards.

In the theoretical part has been described theory of injection molding and molding injection machines, design and description of cooling circuit, the design, construction and description of injection molds.

In the practical part was used of CATIA V5 for 3D design of individual parts on a business cards box, but also for the construction of cooling and injection system of molds forms. These individual components were stored under the ends and transferred to the Moldflow Plastics Insight 6.2., which have been carried out the analysis needed for evaluation and comparison with current situation. In other variants have been carried out pulse-lot regulation polymer melt and temperate media, but also to design interventions in the original for-us. At the conclusion was made in Moldflow Plastics Insight 6.2. proposal forms and four were chosen most suited to replace the current situation.

Keywords: injection molds, injection molding, polymer melt

Poděkování:

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za obětavý přístup, připomínky, poskytnuté materiály a cenné rady pro tvorbu diplomové práce.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně dne 14. května 2009

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

OBSAH.....	6
ÚVOD.....	11
I. TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 VSTŘIKOVÁNÍ.....	13
1.1 POSTUP VSTŘIKOVÁNÍ.....	13
1.1.1 Vstřikovací cyklus.....	13
1.2 VŠEOBECNĚ O PLASTECH.....	14
1.3 VSTŘIKOVACÍ STROJ A JEHO FUNKCE.....	15
1.3.1 Funkce šnekové vstřikovací jednotky.....	16
1.3.2 Funkce uzavírací jednotky.....	17
2 CHLAZENÍ.....	19
2.1 OCHLAZOVACÍ FÁZE VSTŘIKOVACÍHO CYKLU.....	19
2.1.1 Výpočty, modelování a optimalizování ochlazovací fáze.....	19
2.1.2 Cesty ke zvyšování účinnosti výměny tepla mezi formou a temperačním systémem.....	20
3 CAD/CAM A CAE V PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ – KONSTRUOVÁNÍ FOREM.....	21
3.1 CAD/CAM V PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ.....	21
3.2 SYSTÉM CAD/CAM PŘI NÁVRHU VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	22
3.3 SYSTÉM CAE - MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT (MPI).....	22
3.4 REOLOGICKÉ DIMENZOVÁNÍ VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	27
3.5 MECHANICKÉ DIMENZOVÁNÍ VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	29
3.6 TERMICKÉ DIMENZOVÁNÍ VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	29
4 VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	31
4.1 VŠEOBECNĚ O VSTŘIKOVACÍCH FORMÁCH.....	31
4.2 ŘEŠENÍ VTOKOVÉ SOUSTAVY.....	32
4.3 ŘEŠENÍ VTOKOVÝCH SYSTÉMŮ.....	33

4.4	FORMY S HORKÝMI ROZVÁDĚCÍMI KANÁLKY	34
4.5	ZATÍŽENÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	35
4.6	TEPLOTNÍ ZATÍŽENÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY	36
II. PRAKTICKÁ ČÁST.....		38
5	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	39
6	VÝROBEK	40
6.1	POPIS VÝROBKU	41
6.2	VLASTNOSTI MATERIÁLU PS EMEPRA 251L.....	41
7	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	43
7.1	ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA VSTŘIKOVACÍHO STROJE	43
8	ANALÝZY VSTŘIKOVACÍHO PROCESU PRO HORNÍ DÍL	45
8.1	VARIANTA 1. – SOUČASNÉ VSTŘIKOVÁNÍ.....	45
8.1.1	Procesní podmínky při současném vstřikování	45
8.1.2	Umístění vtoku.....	46
8.1.3	Plnění dutiny formy	47
8.1.4	Průběh tlaku v místě vstřiku	48
8.1.5	Čas zatuhnutí výrobku.....	49
8.1.6	Průběh teploty v chladícím obvodu	50
8.1.7	Efektivita odvodu tepla	51
8.1.8	Uzavírací síla.....	52
8.1.9	Celková deformace vstřikované části.....	53
8.2	VARIANTA 2. – REGULACE TEPLOT TAVENINY A TEMPERAČNÍHO MÉDIA	54
8.2.1	Procesní podmínky při regulaci teplot současného vstřikování	54
8.2.2	Plnění dutiny formy	54
8.2.3	Průběh tlaku v místě vstřiku	55
8.2.4	Čas zatuhnutí výrobku.....	56
8.2.5	Průběh teploty v chladícím obvodu	57
8.2.6	Efektivita odvodu tepla	58
8.2.7	Průběh uzavírací síly.....	59
8.2.8	Celková deformace vstřikované části.....	60

8.3	VARIANTA 3. – VYTVOŘENÍ NOVÝCH TEMPERAČNÍCH KANÁLKŮ V SOUČASNÉ FORMĚ	61
8.3.1	Procesní podmínky při vytvoření nových temperačních kanálků	61
8.3.2	Plnění dutiny formy	61
8.3.3	Průběh tlaku v místě vstřiku	62
8.3.4	Čas zatuhnutí výrobku.....	63
8.3.5	Průběh teploty v chladícím obvodu	64
8.3.6	Efektivita odvodu tepla	65
8.3.7	Průběh uzavírací síly.....	66
8.3.8	Celková deformace vstřikované části.....	67
8.4	VARIANTA 4. – VYTVOŘENÍ NOVÉ, ČTYŘNÁSOBNÉ VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	68
8.4.1	Procesní podmínky při návrhu nové formy	68
8.4.2	Plnění dutiny formy	68
8.4.3	Průběh tlaku v místě vstřiku	69
8.4.4	Čas zatuhnutí výrobku.....	70
8.4.5	Průběh teploty v chladícím obvodu	71
8.4.6	Efektivita odvodu tepla	72
8.4.7	Průběh uzavírací síly.....	73
8.4.8	Celková deformace vstřikované části.....	74
8.5	POROVNÁNÍ VARIANT PRO NÁVRH VÝROBY SPODNÍHO DÍLU KRABÍČKY	75
9	ANALÝZY VSTŘIKOVACÍHO PROCESU PRO SPODNÍ DÍL.....	76
9.1	VARIANTA 1. – SOUČASNÉ VSTŘIKOVÁNÍ.....	76
9.1.1	Procesní podmínky při současném vstřikování	76
9.1.2	Umístění vtoku.....	77
9.1.3	Plnění dutiny formy	78
9.1.4	Průběh tlaku v místě vstřiku	79
9.1.5	Čas zatuhnutí výrobku.....	80
9.1.6	Průběh teploty v chladícím obvodu	81
9.1.7	Efektivita odvodu tepla	82
9.1.8	Průběh uzavírací síly.....	83
9.1.9	Celková deformace vstřikované části.....	84
9.2	VARIANTA 2. – REGULACE TEPLŮT TAVENINY A TEMPERAČNÍHO MÉDIA	85

9.2.1	Procesní podmínky při regulaci teplot současného vstřikování	85
9.2.2	Plnění dutiny formy	85
9.2.3	Průběh tlaku v místě vstřiku	86
9.2.4	Čas zatuhnutí výrobku.....	87
9.2.5	Průběh teploty v chladícím obvodu	88
9.2.6	Efektivita odvodu tepla	89
9.2.7	Průběh uzavírací síly.....	90
9.2.8	Celková deformace vstřikované části.....	91
9.3	VARIANTA 3. – VYTVOŘENÍ NOVÝCH TEMPERAČNÍCH KANÁLKŮ V SOUČASNÉ FORMĚ	92
9.3.1	Procesní podmínky při vytvoření nových temperačních kanálek	92
9.3.2	Plnění dutiny formy	92
9.3.3	Průběh tlaku v místě vstřiku	93
9.3.4	Čas zatuhnutí výrobku.....	94
9.3.5	Průběh teploty v chladícím obvodu	95
9.3.6	Efektivita odvodu tepla	96
9.3.7	Průběh uzavírací síly.....	97
9.3.8	Celková deformace vstřikované části.....	98
9.4	VARIANTA 4. – VYTVOŘENÍ ČTYŘ NÁSOBNÉ VSTŘIKOVACÍ FORMY	99
9.4.1	Procesní podmínky při úpravě teplot a temperačních kanálek.....	99
9.4.2	Plnění dutiny formy	99
9.4.3	Průběh tlaku v místě vstřiku	100
9.4.4	Čas zatuhnutí výrobku.....	101
9.4.5	Průběh teploty v chladícím obvodu	102
9.4.6	Efektivita odvodu tepla	103
9.4.7	Průběh uzavírací síly.....	104
9.4.8	Celková deformace vstřikované části.....	105
9.5	POROVNÁNÍ VARIANT PRO NÁVRH VÝROBY HORNÍHO DÍLU KRABÍČKY	106
10	EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	107
10.1	VYHODNOCENÍ PRO HORNÍ DÍL.....	107
10.1.1	Vyhodnocení výhod použití varianty 2.....	107
10.2	VYHODNOCENÍ PRO SPODNÍ DÍL	107

10.2.1 Vyhodnocení výhod použití varianty 2.....	107
DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	108
ZÁVĚR.....	109
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	110
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	111
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	112
SEZNAM TABULEK	115
SEZNAM PŘÍLOH.....	116

ÚVOD

Vstřikování je způsob tváření zejména termoplastů, při kterém se zpracováváný materiál v roztaveném stavu vstřikuje z pomocné tlakové komory do uzavřené tvarové dutiny vstřikovací formy, kde se pod tlakem ochladí a nechá ztuhnout na finální výrobek. Je to technologie vhodná pro velkosériovou výrobu, neboť jednotlivé operace lze velice snadno automatizovat. Další výhodou vstřikování je schopnost vyrábět poměrně složité dílce s velmi dobrou povrchovou úpravou a dobrými tolerancemi rozměrů, ale také při krátkých časech cyklu. Technologie vstřikování je v současné době jednou z nejrozšířenějších technologií pro zpracování plastů. Jedná se o proces diskontinuální, cyklický.

Z důvodů zkrácení výrobních časů a také snížení nákladů na výrobu vstřikovacích forem, vedlo k zavedení normálí. Forma je tak složena z jednotlivých normalizovaných dílů a upravena podle součásti, která se bude vstřikovat. Mezi nejznámější výrobce normalizovaných částí se řadí HASCO, STRACK a D-M-E.

Teoretická část této práce popisuje proces vstřikování, vstřikovací stroj, chladicí okruhy, návrh a konstrukce vstřikovacích forem za použití programů CAD/CAM a způsoby provedení tokových analýz v programu Moldflow Plastics Insight.

Praktická část je zaměřena na návrh optimalizace vstřikovacího cyklu plastového dílce, která je řešena jak pomocí konstrukčních úprav formy a chladících kanálků, tak změnou teplot v temperačních kanálcích a polymerní taveniny. Jako poslední varianta bude navržena čtyřnásobná forma v programu Moldflow Plastics Insight a provedeny následné analýzy. Závěrem dojde ke srovnání výsledných analýz pro jednotlivé varianty a bude vybrána nejvhodnější varianta.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je způsob tváření zejména termoplastů, při kterém se zpracováváný materiál v roztaveném stavu vstřikuje z pomocné tlakové komory do uzavřené tvarové dutiny vstřikovací formy, kde se pod tlakem ochladí a nechá ztuhnout na finální výrobek. Teplota vstřikovací formy je mnohem nižší než teplota tání zpracovávaného termoplastu. Tlaková komora je součástí vstřikovacího stroje a zásoba vstřikovaného materiálu se v ní stále doplňuje během cyklu.

Vstřikování je technologie vhodná pro velkosériovou výrobu, neboť jednotlivé operace lze poměrně snadno automatizovat. Výhodou vstřikování jsou také krátké časy cyklu, schopnost vyrábět složité součásti s dobrými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou, ale i konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. Touto technologií lze vyrábět výrobky téměř ze všech termoplastů i termosetů, a to od miniaturních součástí po rozměrné výrobky. [1]

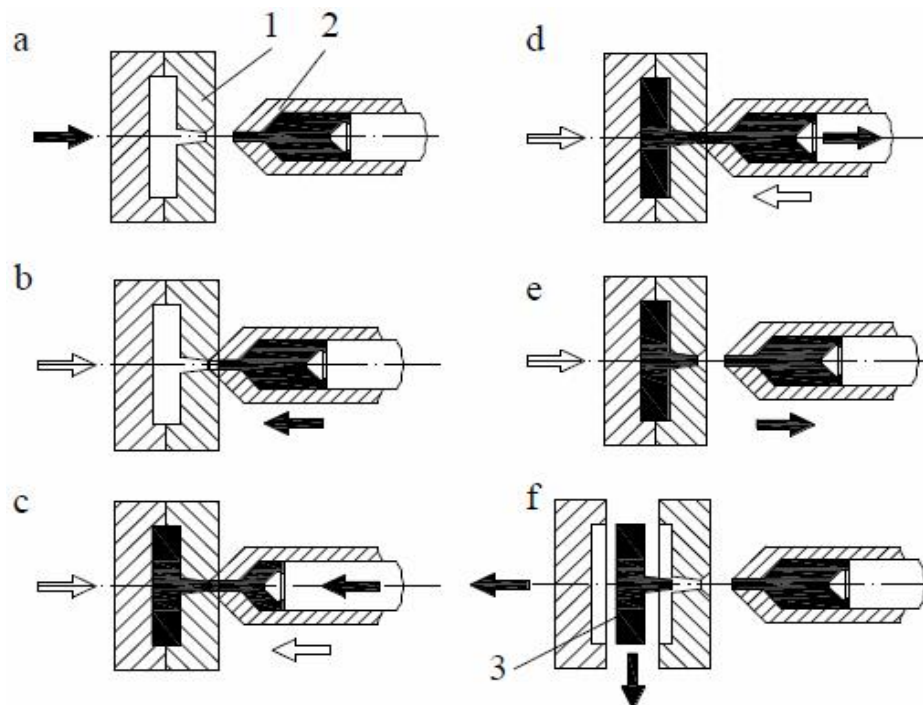
1.1 Postup vstřikování

Plast v podobě granulí je nasypán do násypky, z níž je odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem, pístem), která hmotu dopravuje do tavicí komory, kde za současného účinku tření a topení se plastové granule přemění na taveninu. Tavenina je následně vstřikována do dutiny formy, kterou zcela zaplní a zaujme její tvar. Následuje dotlak, pro snížení rozměrových změn a smrštění. Temperovaná forma odebírá z taveniny teplo a tuhnutím taveniny vzniká hotový výrobek. Poté se forma otevře a výrobek je za pomoci vyhazovačů z formy vyhozen. Celý cyklus se opakuje. [1]

1.1.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus zahrnuje dvě oblasti. Jedna se vztahuje k plastikační jednotce, druhá k formě. Schematicky je vstřikovací cyklus znázorněn na obrázku (*Obr. 1*). Po uzavření formy (a) se přisune plastikační jednotka tak, že vstřikovací tryska dosedne do ústí vtokového kanálu (b). Časový úsek, v němž se dutina formy plní, je tzv. doba plnění. Po zaplnění dutiny formy působí na vstříknutou hmotu tlak, tzv. dotlak (c). Dotlak působí až do chvíle, kdy dojde k úplnému zatuhnutí vtokového ústí. Dále polymer tuhne ve formě bez působení vnějšího tlaku (d). V této fázi také začíná postupné doplňování vstřikovací komo-

ry plastikovaným materiálem. V další fázi (e) odjíždí plastikační jednotka od formy, forma se otevírá a výstřík se automaticky nebo ručně vyhazuje (f). Forma i plastikační jednotka jsou ve výchozí poloze a celý cyklus se opakuje. [3]



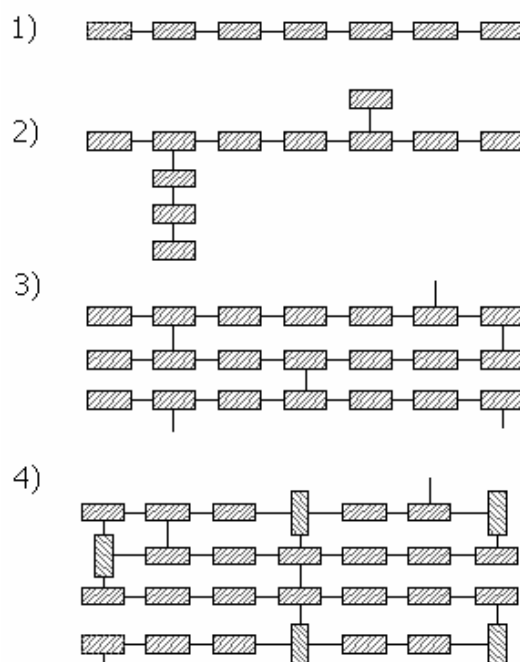
Obr. 1. Průběh vstřikovacího cyklu

1 - forma, 2 - plastikační jednotka, 3 - výstřík

1.2 Všeobecně o plastech

Plasty jsou materiály, jejichž podstatu tvoří makromolekulární látky, buď přírodní polymery (např. kaučuk), nebo jejich deriváty (např. acetát celulózy) nebo dnes nejvíce rozšířené syntetické polymery (např. polystyren, polyetylén a polyamid). Jejich základní vlastnosti jsou určeny chemickou stavbou a vzhledem ke kombinačním možnostem v organické chemii jsou možnosti nových typů takřka neomezené.

Základem makromolekulárních látek je makromolekula, což je velká molekula složená z mnohonásobně se opakujících strukturních jednotek spojených v dlouhé řetězce chemickými nebo jinými vazbami. Počet těchto jednotek v jedné makromolekule udává tzv. polymerační stupeň. Aby měl polymer určitou mechanickou pevnost, musí být polymerační stupeň minimálně 40 až 80 (podle typu hmoty), tj. makromolekula musí obsahovat nejméně 40 až 80 struktur. Makromolekuly mají různý tvar a podle toho jsou tříděny na lineární, rozvětvené a síťované. [1]



Obr. 2. Schéma tvaru makromolekul

- 1 - lineární, 2 - rozvětvené, 3 - síťované,
4 - prostorově středěné

1.3 Vstřikovací stroj a jeho funkce

Vstřikovací stroj je zařízení, které umožňuje roztavení plastu a jeho homogenizaci, dále vstříknutí taveniny pod tlakem do formy uzavřené a zajištěné proti otevření silou, která musí být větší než síla vyvolaná tlakem taveniny v dutině formy. [1]

Základní části stroje jsou:

- Vstřikovací jednotka

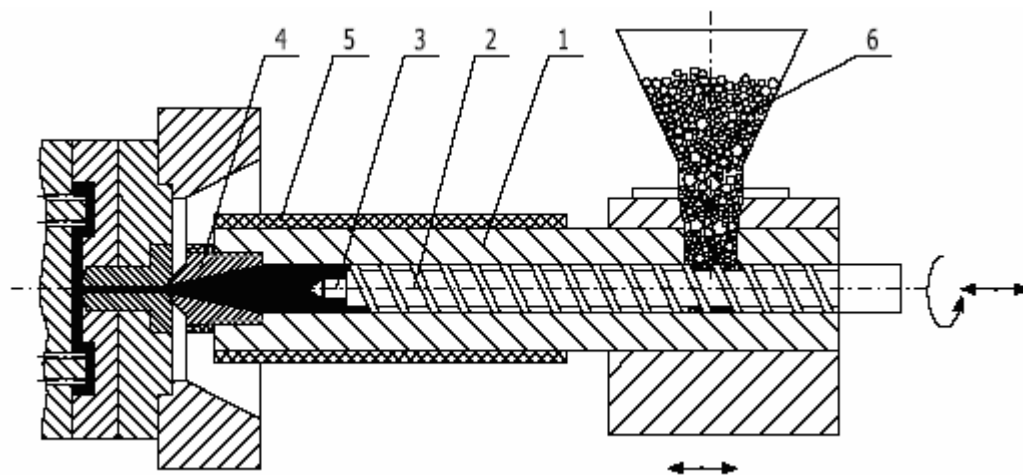
Tvoří ji: násypka, dávkovací zařízení, plastikační a vstřikovací komora s pístem nebo se šnekem, tryska, topení a regulace.

- Uzavírací jednotka

Tvoří ji: uzavírací mechanismus, přidržovací mechanismus a forma

- Příslušenství vstřikovacího stroje

Tvoří je: zdroj energie (tlak pro vyvození vstřikovací, uzavírací a přidržovací síly), temperační zařízení forem a regulační a ovládací prvky. [1]

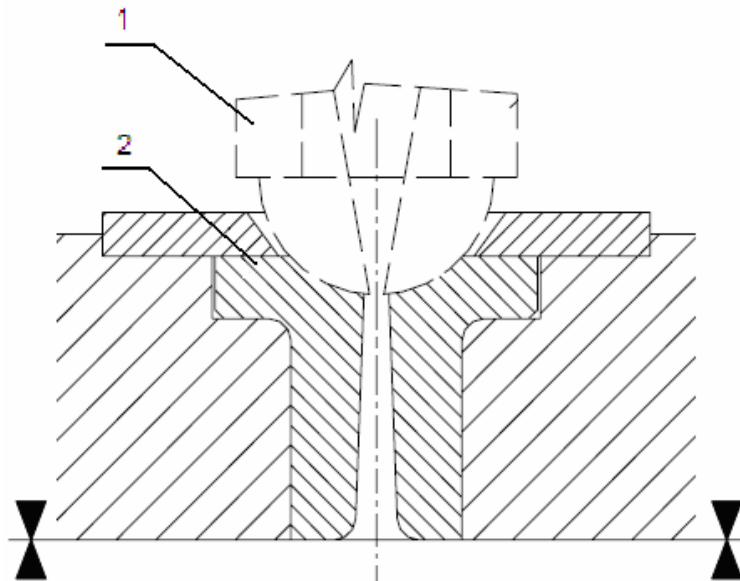


Obr. 3. Schéma vstřikovacího stroje

1 - pracovní válec, 2 - šnek, 3 - zpětný uzávěr, 4 - vstřikovací tryska,
5 - topné těleso, 6 - násypka

1.3.1 Funkce šnekové vstřikovací jednotky

Při plastikaci ustupuje šnek dozadu a tavenina se hromadí v prostoru mezi tryskou a špičkou šneku. Zpětný pohyb šneku (axiální) a současně plastikace (otáčení) se zastaví po najetí spínací stavitelné vačky (zarážky) na koncový spínač. Radiální pohon šneku (otáčení) je vyvozován přes převodovku (soustava ozubených kol včetně spojky napojené hřídelem na elektromotor). Pohon umožňuje změnu rychlosti otáčení šneku (např. variátorem, regulačním elektromotorem nebo hydromotorem). Axiální (podélný) pohyb šneku je ovládán hydraulickým válcem a příslušná síla se vyvolá tlakem hydraulické kapaliny. Při pohybu šneku vpřed (impuls dá časové relé) se šnek pohybuje tak dlouho, až zarážky narazí na přední koncový spínač, který přepne tlak na dotlak, při němž se doplňuje tavenina do formy. Doba působení dotlaku se opět nastavuje časovým relé. Po impulsu se tedy dotlak přeruší, válec odskočí od formy a může opět začít plastikace. Některé moderní stroje jsou opatřeny více-
stupňovými čerpadly a je na nich možno plastikovat v kterékoliv fázi cyklu. [1]



Obr. 4. Dosednutí trysky stroje na vtokovou vložku

1 - tryska vstřikovacího stroje, 2 - vtoková vložka formy

1.3.2 Funkce uzavírací jednotky

Úkolem uzavírací jednotky je:

- a) *otevírat a uzavírat formu*
- b) *zajistit zavřenou formu* takovou silou, aby se při vstřiku a dotlaku neotevřela působením tlaku taveniny na stěně tvarové dutiny formy.

Uzavírací mechanismus je charakterizován tzv. uzavírací silou, což je největší síla k uzavření formy. Pod tento pojem se obvykle zahrnuje i max. síla, kterou je třeba vyvinout, aby byla zajištěna těsnost formy během celého vstřikovacího cyklu. U základních typů hydraulických uzávěrů byly tyto dvě hodnoty totožné. [1]

S vývojem nových uzávěrů je třeba rozlišovat:

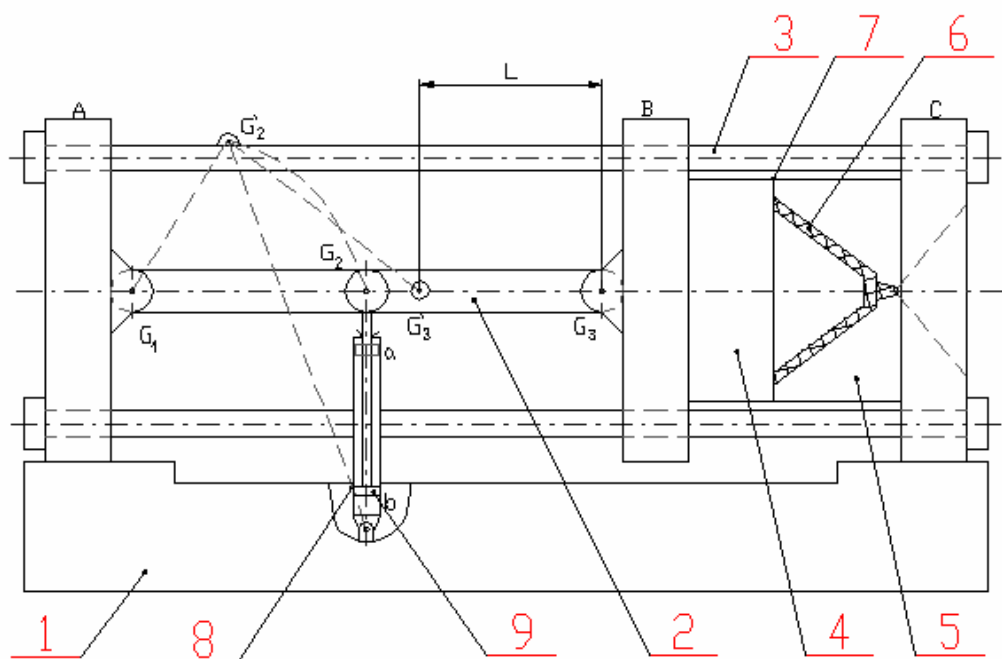
- a) *uzavírací sílu* (sílu potřebnou k uzavření formy),
- b) *přidržovací sílu* (sílu potřebnou k zajištění formy proti otevření tlakem taveniny).

Obě síly působí ve stejném smyslu. [1]

Uzavírací jednotku (obr.6.) tvoří tyto hlavní části:

- a) *opěrná deska A*, která je pevně spojena s ložem stroje a na ní je upevněn systém uzávěru,

- b) *pohyblivá upínací deska B*, volně pohyblivá po vodících (sloupcích) – 3, u horizontálních strojů obvykle ve směru rovnoběžném s osou vstřikovací jednotky; na tuto desku se připevní jedna polovina formy – tvárník 4,
- c) *upínací deska s otvorem pro trysku C* – zde se připevní druhá polovina formy, tvárnice 5 s vtokovou soustavou a vtokem, vedoucím vtokovou vložkou ve směru osy vstřikovací jednotky,
- d) *vodící tyče* – sloupky 3, na nichž je deskami A, B, C vymezen úsek pro max. otevření formy,
- e) *zvedací a přidržovací mechanismus 2* s pohonem 8,
- f) *forma*, která je ovšem výměnnou částí uzavírací jednotky. [1]



Obr. 5. Schematické znázornění uzavírací jednotky s kloubovým mechanismem ovládaným hydraulicky

a - poloha „otevřeno“, b - poloha „zavřeno“, 1 - rám stroje, 2 - kloubový mechanismus, 3 - vodící sloupek, 4 - tvárník, 5 - tvárnice, 6 - výstřik, 7 - dělíčí rovina formy, 8 - hydraulický válec, 9 - píst, A - opěrná deska, B - pohyblivá upínací deska, C - vtoková upínací deska.

2 CHLAZENÍ

2.1 Ochlazovací fáze vstřikovacího cyklu

Ochlazovací fáze vstřikovacího cyklu zahrnuje část plnicí fáze (od objemového naplnění dutiny formy do přepnutí na dotlak), dobu dotlaku a chlazení bez tlaku v dutině formy. Ochlazovací fáze, resp. její optimalizace a modelování jsou důležité jak pro kvalitu výstřiku, tak i z hlediska ekonomie výroby a je tedy nutno je chápat jako součást komplexu studia procesu vstřikování. [2]

V čase ochlazování, resp. na průběhu ochlazování závisí formulace nadmolekulární struktury výstřiků, formulace jejich stavu napjatosti a anizotropie vlastností. Minimální doba ochlazování je limitována požadavkem minimální mezní tuhosti výstřiku potřebné pro jeho bezpečné vyhození z tvarové dutiny formy bez vzniku deformace. [2]

2.1.1 Výpočty, modelování a optimalizování ochlazovací fáze

Přístup k modelování a optimalizaci ochlazovací fáze je v zásadě možno rozdělit do dvou skupin. První skupina zahrnuje výpočty teplotního pole tavenin, resp. výstřiků v dutině formy a po vyhození z ní, kdy se exaktně řeší rovnice vedení tepla při uvažování změny fáze skupenství. Snahou těchto metod a modelů je co nejpřesnější přiblížení fyzikálním podmínkám a jevům probíhajícím při ochlazování. Pomocí těchto metod je možno vypočítat teplotní poměry v závislosti na čase pro jedno, dvou i trojrozměrný případ vedení tepla, při možnosti simulování různých okrajových a počátečních podmínek. [2]

Druhý přístup zahrnuje bilanční metodu. Je to metoda, kdy za zjednodušených podmínek se na formu a výstřik pohlíží jako na uzavřenou termodynamickou soustavu, pro výstřik a formu se počítá tepelná bilance.

Oba přístupy mají stejný cíl:

- dosáhnout toho, aby teplota povrchu stěny tvářecí dutiny formy byla trvale co nejpřesněji udržována,
- dosáhnout toho, aby teplota povrchu stěny tvářecí dutiny nebo tvářecích dutin formy byla místně co nejrovnoměrnější,
- dosáhnout toho, aby pro docílení vysoké hospodárnosti vstřikování při dodržení

předem určené kvality výstřiků byla doba chlazení a tím i doba pracovního cyklu co nejkratší. [2]

2.1.2 Cesty ke zvyšování účinnosti výměny tepla mezi formou a temperačním systémem

Konstruktér formy je při její konstrukci omezován různými hledisky, např. výběrem vhodných konstrukčních materiálů a polotovarů z nich, pružnostně-pevnostním hlediskem, standardizací, a normalizací konstrukčních prvků forem, konstrukčními zvyklostmi atd. Z uvedených důvodů není možno volit velikost a průběh temperačního systému libovolně. Obvyklé omezení je dáno způsobem zaformování daného výstřiku, z čehož vyplývá omezení dané uspořádáním formy, tj. umístěním a polohou vtokové soustavy, vyhazovacím systémem atd. Dalším důvodem je samozřejmě požadavek na těsnost temperačního okruhu – každé utěsnění přechodu kanálu z jednoho konstrukčního prvku do druhého může být příčinou poruch. Při uvědomění si uvedených a dalších omezení je tedy cílem konstruktéra návrh temperačního okruhu s max. účinností především z hlediska sdílení tepla při minimalizaci plošné výměry povrchu stěn temperačního okruhu. [2]

3 CAD/CAM A CAE V PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ – KONSTRUOVÁNÍ FOREM

3.1 CAD/CAM v procesu vstřikování plastů

Vstřikovací forma je jedním z rozhodujících prvků technologického zařízení pro vstřikování plastů, která spolurozhoduje o kvalitě výstřiků. Sebedokonalejší vstřikovací stroj a technologické podmínky vstřikování neodstraní chyby způsobené nevhodnou konstrukcí formy. Zejména při automatickém provozu musí být forma konstrukčně i výrobně dokonalá a musí zaručovat vazbu na požadované technologické parametry vstřikování a formulaci vlastností výstřiku nejen z hlediska tvaru a rozměrů, ale i z hlediska stavu a vlastností.

V matematické interpretaci procesu vstřikování představují vstupní hodnoty soustavy všechny nastavované parametry technologického procesu, konstrukční charakteristiky formy a tvářecí vlastnosti vstřikovaného plastu. Výchozí fyzikální stav hmoty ve formě je tedy charakterizován:

- průběhem teplotních změn $T = T(p, v)$,
- průběhem změn tlaků $p = p(T, v)$; $T, p, v = T, p, v(l, s, t)$,
- průběh změn rychlosti tečení $v = v(p, T)$.

Všechny tři soustavy jsou na sobě vzájemně závislé a navíc proměnné v čase t , různé v každém místě dráhy toku l a tloušťce průřezu tvářecí dutiny formy s . V důsledku jejich působení na taveninu polymeru se dosáhne naplnění tvarové dutiny formy, přičemž výstřik je prakticky vždy z hlediska vlastností více či méně anizotropní.

Při konstrukci tvarové dutiny formy je nutno vzít v úvahu:

- reologické vlastnosti taveniny – důležité z hlediska plnění formy (zejména vliv teploty a smykové rychlosti),
- tepelné vlastnosti – důležité z hlediska chlazení výstřiku (tepelná vodivost, entalpie, koeficienty přestupu tepla),
- fyzikální vlastnosti – důležité z hlediska formulace výstřiku (určují objemové změny polymeru při ochlazování, pV chování a tedy i smrštění a jeho anizotropii).

Integrovaná soustava programů pro navrhování a výrobu forem je zejména pod označením CAD/CAM, v rámci níž jsou k dispozici jednotlivé dílčí programy.

- CAD – Computer Aided Design – konstruování a projektování pomocí počítače (v některých případech se jedná pouze o Computer Aided Drafting – kreslení pomocí počítače),
- CAM – Computer Aided Manufacturing – výroba (plánování, řízení, kontrola) s pomocí počítače. [2]

3.2 Systém CAD/CAM při návrhu vstříkovací formy

CAD/CAM soustava programů umožňuje:

- konstrukci, znázornění a analýzu výstřiku, jednotlivých prvků formy, celé vstříkovací formy – konstruktér může provést zobrazení v jedno, dvou i třírozměrné formě, předmět natáčet, obracet, provádět řezy v libovolných místech, může okamžitě modifikovat rozměry a tvar konstrukčních prvků,
- provedení analýzy plnění dutiny formy taveninou – určení tlaků, zkoumání vlivu různých způsobů přivádění taveniny do dutiny formy, určení linií spojování jednotlivých toků (studené spoje), optimalizaci hydrodynamických podmínek při plnění vícenásobné formy,
- navrhování a výpočet temperační soustavy formy – vliv rozměrů, umístění temperačních kanálů a prvků na rozložení teploty ve formě, výpočet doby chlazení,
- provádění pevnostních výpočtů jednotlivých prvků formy,
- zhotovení výkresů detailů, sestav, rozpisek,
- sestavení programů pro číselně řízené obráběcí stroje – elektrojiskrové i třískové obrábění. [2]

3.3 Systém CAE - Moldflow Plastics Insight (MPI)

Moldflow Plastics Insight - je komplexní software s nástroji pro simulaci, analýzu, optimalizaci a kontrolu při konstrukci plastových dílů a nástrojů. Nabízí devatenáct specializo-

vaných modulů, pomocí kterých lze simulovat devět výrobních postupů. [6]

- Výhody predikativní analýzy:

Problémy, které se zjistí teprve při zahájení výroby, způsobují velké náklady a prodlevy. Aby se těmto situacím zabránilo, musí se vzájemně propojené vlivy geometrie dílu, volby materiálu, konstrukce nástroje a procesní podmínky vyrobitelnosti dílu posuzovat najednou. Simulační analýza vstřikovacího procesu umožňuje hodnotit vzájemné působení těchto proměnných a optimalizovat je již ve fázi vývoje, ještě před zahájením výroby.

Funkce analýzy MPI simulují plnění, dotlak a chlazení u vstřikování termoplastů, termosetů a materiálů s plnivými a se skelnými vlákny. Kromě toho lze předpovědět následné efekty, např. deformaci dílu. MPI může dále simulovat tok materiálu a vytvrzování v reaktivním vstřikovacím procesu.

Se 7800 materiály představuje MPI světově nejrozsáhlejší specializovanou databanku materiálů termoplastů a termosetů pro CAE analýzy. Dále jsou k dispozici detailní informace o chladicích médiích, materiálech pro výrobu nástrojů a možnostech hlavních značek a modelů vstřikovacích strojů. [6]

- Podpora geometrie:

Moldflow Plastics Insight poskytuje všechny tři metody řešení analýzy modelu. MPI umožní přímo analyzovat tradiční modely se střednicovou plochou konečných prvků. Trojrozměrné tenkostěnné modely lze analyzovat pomocí solveru MPI/Fusion a trojrozměrné silnostěnné modely pomocí solveru MPI/3D. [6]

- Řešení pro obvyklé modely se střednicovou plochou:

Sít' střednicové plochy představuje trojrozměrný model jako dvojrozměrný, s rovnými plochami, kterému se přidělí hodnota tloušťky. Konvenční tenkostěnné vstřikované díly lze nejlépe znázornit pomocí sítě střednicové plochy. Pro zvýšení produktivity při tvorbě a analýze těchto modelů lze pomocí modulu MPI/Midplane Generator vytvořit automaticky síť střednicové plochy a stanovit požadovanou tloušťku, čímž jsou zaručeny přesné výsledky výpočtu. [6]

- Řešení MPI/Fusion

Řešení MPI/Fusion jsou založena na patentované technologii Moldflow Dual Domain. Ta znázorní trojrozměrný díl s trojúhelníkovými prvky na povrchu CAD modelu v běžném STL nebo IGES formátu. Tak lze trojrozměrné tenkostěnné CAD modely přímo analyzovat. Bez jakýchkoliv dalších úprav modelu lze poté analyzovat další varianty designu a provést hloubkové analýzy. [6]

- Rozsah analýzy

Software Moldflow Plastics Insight představuje nástroje pro detailní simulaci procesu, díky kterému je možno rozpoznat a odstranit potenciální výrobní problémy. Kromě toho software umožňuje optimalizaci konstrukci dílu a nástroje i samotného vstřikovacího procesu. MPI analýzy dávají spolehlivá řešení, která pokrývají rozsáhlé pole procesů pro vstřikování platových dílů a nejmodernější procesní aplikace. [6]

Jednotlivé moduly:

Ø Simulace toku materiálu

- **MPI/Flow** simuluje fázi plnění a dotlaku vstřikovacího procesu termoplastů s cílem předpovědět chování toku taveniny, a tím vlastní vyrobitelnost dílu. Pomocí MPI/Flow lze optimalizovat umístění vtoku, vyvážit systém kanálů, vyhodnotit procesní podmínky a tím vytvořit stabilní procesní okno. Potenciální vady dílu lze rozpoznat a opravit již předem. Rovněž lze simulovat inovační procesy jako jsou zástřiky dílů a 2K-vstřikování. Kromě toho lze analyzovat vliv nerovnoměrného rozdělení teploty v nástroji, určit optimální pořadí sekvenčního vstřikování, porovnat průběh toku u systému studených nebo horkých kanálů a analyzovat Dynamic Feed aplikace. Pomocí dalších alternativních modulů MPI/Flow lze simulovat komplexnější procesy vstřikování termoplastů.
- **MPI/Gas** simuluje proces vstřikování s asistencí plynu, při kterém je plyn, zpravidla chemicky inertní dusík, vstříknut do taveniny polymeru. Plyn tlačí polymer dutinou formy, aby se nástroj zcela zaplnil a aby se vytvořila síť dutých kanálů ve všech částech dílu. Výsledky získané pomocí MPI/Gas pomá-

hají určit pozici místa vstříku plynu a polymeru, kolik plastu vstříknout před vstříknutím plynu a optimální velikost a umístění kanálů pro plyn.

- **MPI/Co-Injection** simuluje sekvenční vstřikovací proces, při kterém se nejdříve vstříkne materiál vnější plochy a poté následuje další materiál tvořící jádro dílu. Lze pozorovat posun materiálů v dutině i jak se mění dynamický poměr mezi materiálem na povrchu a v jádře v průběhu plnění. Výsledky umožní optimalizovat kombinaci obou materiálů a zároveň maximalizovat poměr nákladů vůči užitku pro daný výrobek.
- **MPI/Injection Compression** simuluje procesy, při kterých probíhá vstříknutí polymeru a stlačení formy simultánně nebo sekvenčně a umožňuje naprogramovat kompresní fázi před, po nebo během průběhu vstřikování. Výsledky umožňují rozsáhlé zhodnocení potencionálních materiálů, konstrukce dílu a nástroje a procesních podmínek.
- **MPI/MuCell** simuluje mikrocelulární proces vstřikování pěny, při kterém se smíchá superkritické médium jako je oxid uhličitý nebo dusík s taveninou polymeru a vstříkne do nástroje, aby se vytvořily díly s mikrocelulární pěnou. Pomocí MPI/MuCell lze porovnat a zhodnotit vyrobiteľnost a možné výhody tohoto procesu s obvyklými postupy. Kromě toho umožňují různé výsledky analýzy optimalizaci konstrukci dílu a procesních podmínek. [6]

Ø Simulace pro optimalizaci vstřikovacího procesu

- **MPI/Design-of-Experiments** umožňuje vytvoření a provedení automatizovaného zkušebního plánu, při kterém se obměňují uživatelem vybrané parametry jako teplota nástroje a taveniny, čas vstřikování, dotlak, čas dotlaku a tloušťka stěny. Program automaticky sestaví zkušební plán a výsledky podrobí statistické analýze s cílem optimalizovat zpracovatelské parametry a tím i vyráběný díl. Výsledek zahrnuje základní kvalitativní indikátory jako je objem smrštění, vstřikovací tlak, uzavírací síla, teplota čela taveniny a rovněž ukazatele času plnění, tlaku a teploty.
- **MPI/Optim** provádí výpočty s ohledem na specifický vstřikovací stroj. Přitom se zohledňuje skutečný čas reakce stroje, maximální vstřikovací rychlost

a počet kroků, které lze na řízení naprogramovat pro rychlost a tlak. Cílem výpočtu je jednotný průběh rychlosti čela toku a teplotních profilů přes trysky stroje, vtokový systém a dutiny nástroje. [6]

Ø Simulace chlazení

- **MPI/Cool** nabízí možnost modelovat chladicí okruh nástroje, jeho rozložení kolem dílu a vypočítat jeho výkonnost. Pomocí MPI/Cool-Simulation lze optimalizovat design formy a chladicího okruhu tak, aby se dosáhlo jednotného chlazení dílu, minimalizoval čas cyklu, eliminovala deformace kvůli chlazení a celkově snížily náklady na výrobu dílu. [6]

Ø Simulace strukturální integrity

MPI obsahuje širokou paletu simulačních modulů, které byly vyvinuty speciálně pro předpovídání pevnosti vstřikovaných dílů.

- **MPI/Warp** předpovídá smrštění a deformaci v plastových dílech na základě procesních zbytkových pnutí. Rovněž lze předpovědět posun jádra na základě nerovnoměrného rozložení tlaku. MPI/Warp pomáhá pochopit příčiny deformace, ukazuje příslušná místa a umožňuje optimalizovat design, materiál a procesní parametry a zabránit deformaci dílu ještě předtím, než se díl začne vyrábět.
- **MPI/Fiber** může na základě chování toku ve vyztužených materiálech vypočítat orientaci vláken a z toho plynoucí pevnost kompozitu plastu a vláken. Je důležité chápat a řídit orientaci vláken u vyztužených plastů, aby bylo možné zredukovat rozdílné hodnoty smrštění dílu a tímto způsobem minimalizovat deformaci dílu nebo ji zcela vyloučit.
- **MPI/Shrink** předpovídá smrštění polymeru na základě zpracovatelských vlivů a dat o kvalitě materiálu. Tím je k dispozici předpověď lineárního smrštění nezávisle na deformaci. Protože při chlazení plastových dílů vzniká smrštění, musí se toto smrštění započítat co nejpřesněji do konstrukce nástroje, aby se dodržely kritické tolerance výrobku.
- **MPI/Stress** předpovídá chování plastových dílů po procesu vstřikování, po-

kud je díl zatížen různými externími vlivy. Výpočet zhodnocuje vlivy chování toku materiálu při vstřikování a z toho vyplývající mechanické vlastnosti týkající se pevnosti dílu. [6]

Ø Simulace reaktivního vstřikování

- **MPI/Reactive Molding** simuluje tok a vytvrzování termosetů v procesech jako je reaktivní vstřikování termosetů a elastomerů, strukturální reaktivní vstřikování a vstřikování kaučuků. Z výsledku lze posoudit vyrobiteľnost, minimalizovat čas cyklu a optimalizovat procesní podmínky. [6]

3.4 Reologické dimenzování vstřikovacích forem

Správné dimenzování vtokového rozvodu, typu a umístění ústí vtoku a tvar tvářecí dutiny má velký vliv na plnění dutiny formy taveninou plastu. Plnicí a kompresní fáze vstřikovacího cyklu ovlivňuje především jevy související s reologickými vlastnostmi taveniny za podmínek relativně vysokých smykových rychlostí. Jedná se o molekulární orientaci a rychlost krystalizace (u částečně krystalických plastů) a z nich vyplývajících vlastností povrchu a anizotropie vlastností mechanických. Kompresní fáze pak formuluje tvar výstřiku a podílí se na charakteru a úrovni vnitřního pnutí. [2]

Jedním z hlavních konstrukčních úkolů reologického návrhu je stanovení typu, počtu, rozměrů a umístění vtokových ústí na výstřiku, resp. dutině formy. Tyto parametry mají směrodatný vliv na průběh fronty tečení taveniny, rovnoměrné plnění dutiny formy, počet a umístění studených spojů, uzavření vzduchu – odvzdušnění, hlavní směr orientace makromolekul, smykové namáhání taveniny, na potřebný plnicí tlak, průběh teploty, pevnostní vlastnosti, vlastnosti povrchu výstřiku, určení velikosti stroje atd. [2]

Po zjištění obrazu plnění se provádí kvantitativní analýza procesu plnění pomocí reologických výpočtů. Při reologickém výpočtu se postupuje následovně: do obrazu plnění se zakreslí tokové cesty včetně jejich větvení. Podél tokových cest se díl dutiny formy rozdělí na segmenty jednoduchých geometrických tvarů (např. kruhový kotouč, deska, válec, atd.). Po zadání těchto a dalších dat geometrie vtokového rozvodu, která jsou pro zajištění rovnoměrnosti plnění formy proměnná (vyvážení vtokových rozvodů), reologických a termodynamických dat vstřikovaného plastu a parametrů vstřikování počítač podle předem zadané strategie – programu, vypočte podél pozorované tokové dráhy od jednoho segmentu

ke druhému ztráty tlaku, změny teploty ochlazování, disipaci teploty důsledku smykových sil a smykové namáhání (smykovou rychlost). [2]

Na konci fáze plnění je pomocí součtu možno určit celkovou potřebu tlaku na naplnění formy, z této hodnoty určit uzavírací sílu stroje, tlakové údaje dále slouží pro mechanické dimenzování formy. Variabilitou zadávaných dat je možno provést optimalizaci postupu plnění. [2]

Modelování procesu plnění dutiny formy řeší následující problémy:

- již při konstrukci formy optimalizaci plnicí fáze vstřikovacího cyklu a tím vlastnosti výstřiku na základě simulace geometrických tvarů dutiny formy, počtu a umístění ústí vtoku (umožňuje určení studených spojů, uzavření vzduchu, zajišťuje rovnoměrně plnění a minimalizuje potřebu plnicího tlaku),
- zajištění vyváženého toku taveniny do dutiny vícenásobných forem s geometricky shodnými dutinami při různých délkách rozvodných kanálů – stejný okamžik plnění všech dutin formy je dán vypočítanou různou geometrií (rozměry) rozvodných kanálů,
- vyrovnání proudění pomocí optimalizovaných rozměrů kanálů a ústí vtoku u vícenásobných forem s geometricky rozdílnými tvary dutiny,
- vyrovnání proudění při plnění vícenásobnými ústími vtoku do jedné dutiny formy,
- vyrovnání proudění u systémů horkých kanálů a kombinací horkých a studených kanálů,
- určování plnicích časů, rychlostí a objemových proudů,
- výpočet a optimalizace vstřikovacích (plnicích) tlaků,
- určování teplot (chlazení, disipace) a kritických oblastí při plnění dutiny formy (nezatečení taveniny v důsledku snížené teploty atd.),
- určování kritických oblastí smykových sil a napětí,
- optimalizační výpočty z hlediska potřeby tlaku, teploty, zatížení vstřikovacího stroje a vstřikovaného materiálu,
- určování uzavírací síly formy – velikosti vstřikovacího stroje. [2]

3.5 Mechanické dimenzování vstřikovacích forem

Pro pevnostní dimenzování vstřikovacích forem jsou v podstatě k dispozici 3 výpočetní metody:

- využití jednoduchých analytických vzorců a rovnic, např. rovnice průhybu jednoduchých nosníků, uvažuje se pouze deformace ohybem,
- vzorce odvozené z teorie výpočtu desek, berou se v úvahu ohybové i smykové deformace,
- metoda konečných prvků (FEM), komplexní výpočet, relativně vysoké náklady.[2]

Prakticky všechny metody a konkurenční programy nejprve rozkládají formu na jednotlivá, základní geometricky jednoduchá tělesa, po provedení pevnostního výpočtu jednotlivých těles se na základě principu superpozice určí deformace formy jako celku.

Superpoziční metoda vychází z následujícího postupu:

- nástroj se rozloží na konstrukční díly- deska, rám, kvádr, válec atd.,
- deformace jednotlivých konstrukčních dílů se po určení podmínek uložení a zatížení vypočítá podle rovnic a vzorců teorie pružnosti a pevnosti kovových materiálů,
- každý prvek nástroje je nahrazen pružinou – vychází se ze samozřejmého požadavku platnosti Hookova zákona, tj. deformace je lineárně úměrné zatížení,
- deformace jednotlivých konstrukčních dílů jsou navzájem superponovány podle zákonů sériového a paralelního řazení pružin. [2]

Tímto způsobem je možno určit celkovou deformaci daných oblastí nástroje nebo celého nástroje. [2]

3.6 Termické dimenzování vstřikovacích forem

Účelem je zajišťování následujících cílů:

- co nejpřesnější dosažení požadované střední teploty stěny tvářecí dutiny formy;
- co nejrovnoměrnější místní rozložení teploty na stěně tvářecí dutiny formy;
- dosažení co nejkratší doby chlazení a tím i vstřikovacího cyklu při dosažení požadovaných vlastností výstřiku. [2]

Z hlediska vstřikovacího cyklu se teplotní výpočty a optimalizace týkají zejména ochlazovací fáze, která kromě důležitosti pro kvalitu výstřiků zásadně ovlivňuje i ekonomii vstřikování. [2]

Přístup k výpočtům a optimalizaci ochlazovací fáze je v zásadě možno rozdělit do dvou skupin. První skupina zahrnuje výpočty teplotního pole výstřiků a forem, resp. řezů formou na základě exaktního řešení rovnice vedení tepla při daných okrajových a počátečních podmínkách. Je možno pracovat v systému jedno, dvou i třírozměrného vedení tepla a simulací různých počátečních a okrajových podmínek optimalizovat návrh a konstrukci vstřikovací formy. Výstupem jednotlivých metod a konkurenčních programů je obvykle znázornění průběhu izoterm. [2]

Druhý přístup zahrnuje bilanční metodu. Bilanční metoda představuje relativně jednoduché, přibližné zjišťování termických poměrů v nástroji při vstřikování, ale ve většině praktických případů dává dostatečné informace. Za zjednodušených úvah, kdy se na formu a výstřik pohlíží jako na uzavřenou termodynamickou soustavu, se pro výstřik a formu provádí tepelná bilance, přičemž pomocí uvedené bilance a dat uložených v paměti počítače (termické vlastnosti plastů, materiálů formy, temperačních medií, vzduchu atd.) je možno určit následující veličiny: dobu chlazení, tepelné toky, polohu a dimenzování temperačních kanálů, průběh teploty ve formě, průtok a teplotu temperačního media, homogenitu, případně chyby teploty tvářecích dutin formy, topné, resp. chladicí systémy, polohu teplotního čidla v nástroji, simulaci – změnou vstupních dat optimalizovat výše uvedené parametry.[2]

4 VSTŘIKOVACÍ FORMY

Forma je výměnnou částí uzavírací jednotky. Její funkce je dát tavenině výsledný tvar výrobku a zachovat jej až do ztuhnutí a ochlazení na takovou teplotu, při níž nedochází k podstatnější deformaci. Forma je vedle plastikačního válce nejdůležitější částí vstřikovacího stroje a na její konstrukční a výrobní přesnosti závisí nejen rozměrové tolerance výrobků, ale i jeho vlastnosti užití (zejména mechanické) a také ekonomie celé výroby (dosažitelný stupeň automatizace). [1]

4.1 Všeobecně o vstřikovacích formách

Vstřikovací formy mají na rozdíl od jiných druhů forem své konstrukční zvláštnosti, vyplývající z chování taveniny pod tlakem (tlaky ve formě se pohybují v průměru od 15 až do 150 N/mm²). Vlivem hydraulického tlaku v dutině formy jsou její nosné části značně namáhány a nejsou-li dostatečně tuhé, mohou se deformovat (průhyb). Pro zatečení (a vytvoření otřepu) taveniny plastu do dělicí roviny postačí již průhyb větší než 0,05 mm (záleží na viskozitě taveniny). Na druhé straně může tlak na stěnu nedostatečně dimenzované formy způsobit její vyboulení. Proto se tvarové části formy musí správně dimenzovat, popř. se musí podepřít deskami nebo opěrnými sloupky. Zhruba lze pro dimenzování použít výpočtu pro namáhání desky určitého průřezu podepřené a zatížené rovnoměrným tlakem.

Návrh konstrukce formy musí vycházet z těchto údajů:

- a) *tvaru výrobku* (požadovaných rozměrů a tolerancí),
- b) *typu stroje* (jeho parametrů),
- c) *druhu vstřikovaného materiálu* (zejména vlastnosti taveniny při podmínkách vstřikování),
- d) *požadovaného počtu kusů* (ebeny, jejich ceny a dodacího termínu).

Na základě těchto údajů se určí násobnost formy, způsob zaformování dílce, dělicí rovina a vtoková soustava. Počet výstřiků má rozhodující vliv na volbu násobnosti formy a ovlivňuje i výběr materiálu, z něhož bude zhotovena, a technologii její výroby. Když je určité řešení zvoleno, je třeba provést konkrétní výpočet se zřetelem na plastikační výkon stroje a na pracovní cyklus a musí se zkontrolovat, zda přidržovací síla formy u použitého stroje bude postačující s ohledem na tlak taveniny ve formě. [1]

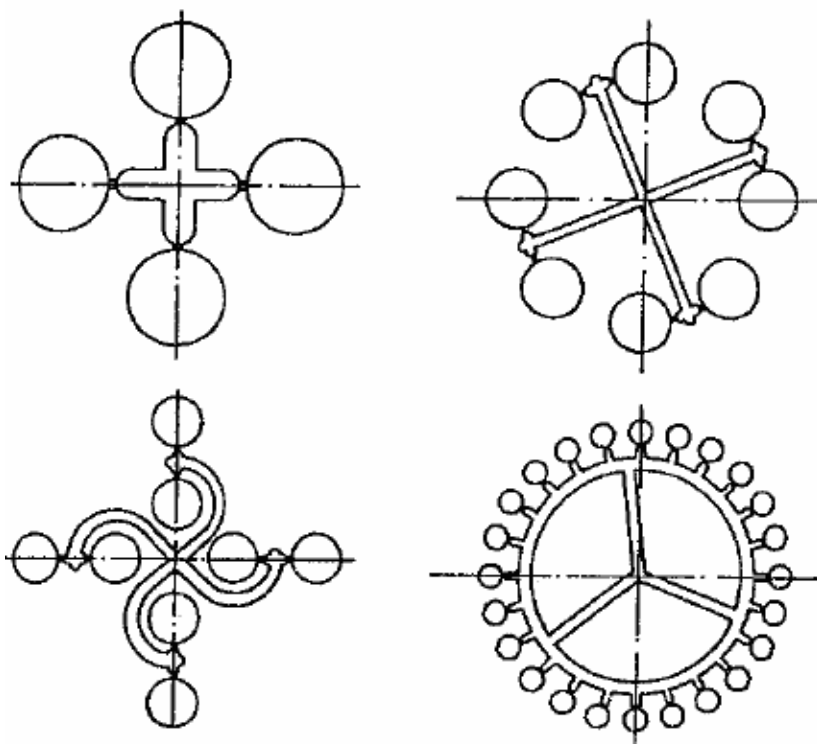
4.2 Řešení vtokové soustavy

Polymer roztavený v plastikační jednotce proudí tryskou do vtokové soustavy vstříkovací formy, jenž tvoří systém vtokových kanálů. Tyto kanály vedou k dutinám formy. Rozdíly v uspořádání vtokové soustavy jsou dány především konstrukcí formy a její násobností. [4]

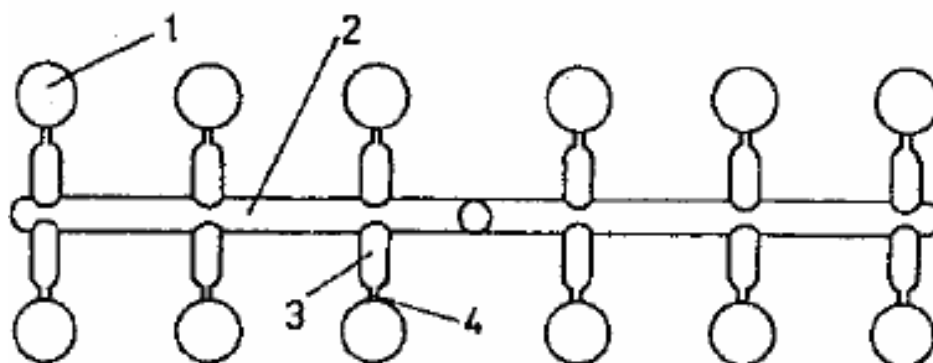
Při návrhu vtokové soustavy musíme respektovat některé pravidla, jež vycházejí z technologických požadavků při samotném vstříkávání:

- dráha toku od vstříkovací trysky k dutinám formy má být co nejkratší, aby mohla být tavenina vstříkována co největší rychlostí,
- dráha toku ke všem dutinám formy má být stejně dlouhá,
- průřez vtokových kanálů musí být dostatečně velký, aby po naplnění formy zůstalo jádro vtokového kanálu dostatečně dlouho v plastickém stavu, to umožní efektivnost dotlaku jako kompenzaci při smršťování výstříku,
- ústí vtoku má být umístěno tak, aby tavenina vtékala do nejtlustšího průřezu výstříku a tekla k nejužšímu místu,
- pro přesné výstříky jsou výhodnější plné vtoky, protože na rozdíl od bodových vtokových ústí nezamrzne předčasně (nezumožní efektivní průběh dotlaku),
- ústí vtoku má být rovněž co nejkratší, vhodná je délka (0,5 - 1,2) mm,
- dosedací plochy trysky a vtokové vložky spolu musí lícovat; jsou-li kulovité, musí být poloměr koule na trysce o (0,4 – 0,6)mm menší než na vtokové vložce. Dále průměr
- otvoru v trysce musí být rovněž menší (přibližně o 0,5 mm) než průměr otvoru ve vtokové vložce. Pokud to není dodrženo, hrozí zatékání taveniny do dosedací plochy. [1]

4.3 Řešení vtokových systémů



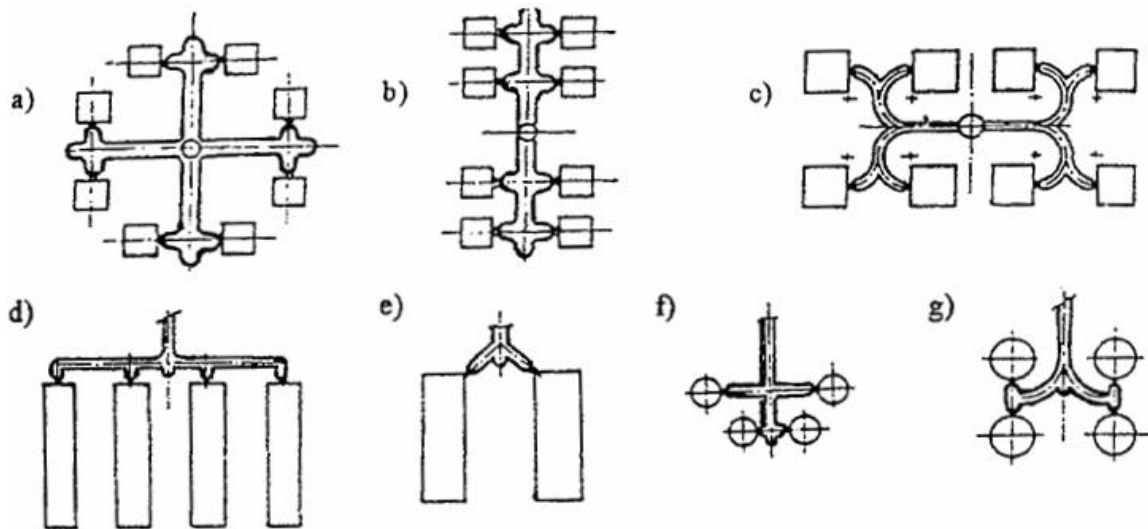
Obr. 6. Hvězdicové a kruhové řešení rozváděcích kanálů násobných forem



Obr. 7. Řádkový vtok vícenásobných forem

1- výstřik, 2 - hlavní rozváděcí kanál, 3 - vedlejší rozváděcí kanál,

4 - bodové ústí vtoku



Obr. 8. Další typy vtokových systémů

a, c, e, f – stejná délka, g – vhodné řešení, b, d – nutná korekce vtokových sítí

4.4 Formy s horkými rozváděcími kanálky

Výhody použití:

- ušetření polymeru z vtokových zbytků,
- není nutné dodatečné odstraňování vtokových zbytků s eventuálním začišťováním,
- nejsou nutné třídeskové formy,
- odpadá nutnost plastikovat materiál i na vtokové zbytky zkrácení vstřikovacího cyklu,
- snadná automatizace procesu. [2]

Nevýhody:

- vyšší cena forem,
- vzhledem k poměrně složitosti těchto forem - náročnější opravy možné delší přerušování výroby. [2]

Uplatnění:

- u malých výstřiků, kde objem vtokových zbytků by byl stejný nebo větší než objem výstřiku nebo kde vzhledem k malé tloušťce stěny, je nutné vstřikování několika vtoků. [2]

Základní typy:

- a) formy s izolovanými rozváděcími kanály,
- b) formy s vyhřívanými rozváděcími kanály,
- c) formy s modifikovanými izolovanými rozváděcími kanály. [2]

Formy s izolovanými rozváděcími kanály - třídeskové formy s rozváděcími kanály o větším průměru. Na počátku vstřikování tavenina polymeru sice zatuhne na stěnách kanálů, ale zbylé plastické jádro má dostatečný průřez umožňující průtok taveniny v dalších cyklech. Dělicí rovina rozváděcích kanálů se otevírá pouze při přerušení výroby.

Formy s vyhřívanými rozváděcími kanály - rozváděcí systém taveniny trvale udržován nad teplotou tání taveniny vstřikovaného polymeru: celý obsah kanálů roztavený.

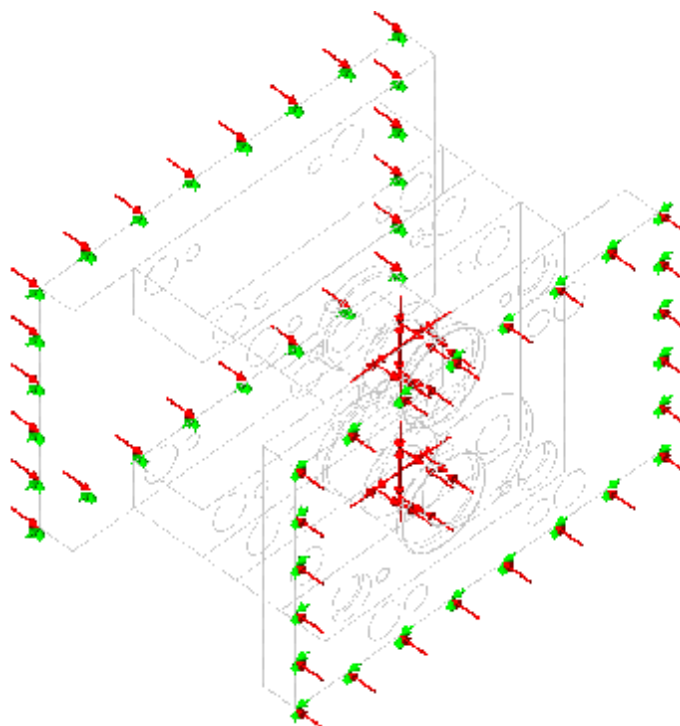
Velmi náročné po konstrukční a výrobní stránce, vyplatí se pro výstřiky menších hmotností ve velkých sériích.

Formy s modifikovanými izolovanými rozváděcími kanály - kompromis mezi oběma předchozími systémy.

Tavenina v hlavních kanálech je izolována ztuhlým polymerem, ale trysky jsou vyhřívány malými odporovými tělesy - přesnější nastavení a ovládání teplot. [2]

4.5 Zatížení vstřikovací formy

Vstřikovací forma je nejvíce zatěžována tlakem vstřikované taveniny polymeru. Zatížení působí jednak na vtokovou soustavu, ale hlavně na tvarové části vstřikovací formy. Dále je vstřikovací forma zatěžována silami uzavírací jednotky vstřikovacího stroje. Tyto síly působí hlavně deformaci rámu formy. V důsledku teplotních změn, které vznikají při vstřikování taveniny polymeru do formy a následujícím chlazením je forma namáhána také tepelně. [7]

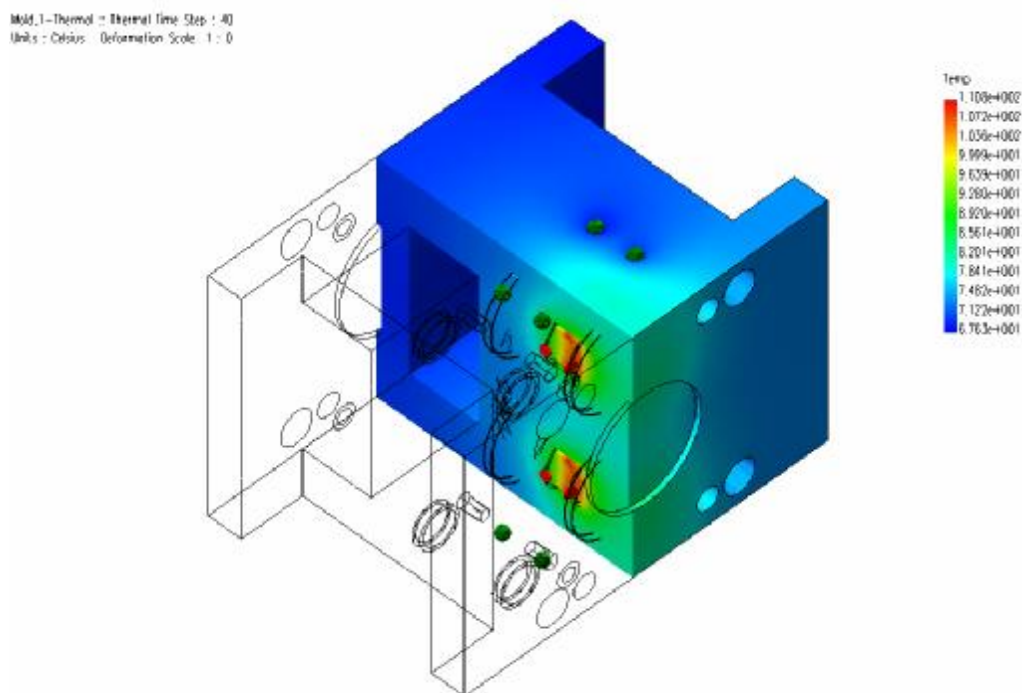


Obr. 9. Zatížení vstřikovací formy tlakem taveniny a uzavírací silou.

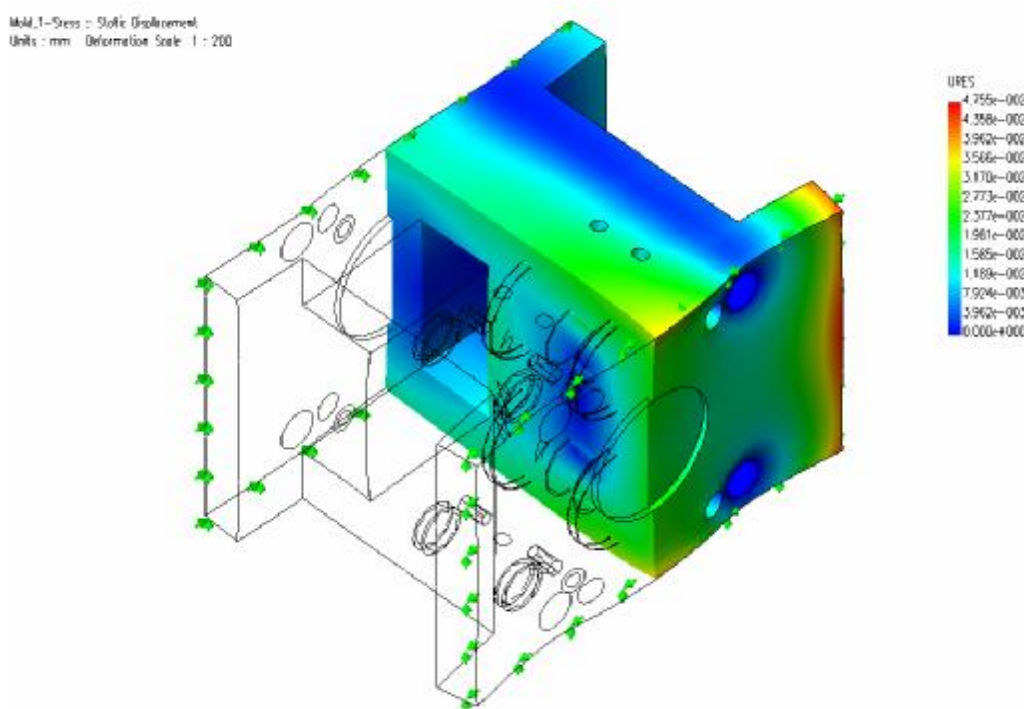
4.6 Teplotní zatížení vstřikovací formy

Teplotní podmínky ve vstřikovací formě závisí na množství tepla, které se odvede z polymerní taveniny vstříknuté do dutiny formy, na čase chlazení ve vstřikovacím cyklu.

Odvedené teplo závisí na teplotě taveniny při vstřikování, na teplotě výstřiku při vyhození z formy a na měrném teple polymeru. Protože měrné teplo není u polymerní taveniny konstantní, hovoříme o rozdílu entalpií mezi teplotou taveniny a teplotou vyhozeného výstřiku. Největší část vstřikovacího cyklu je dána časem chlazení, tj. dobou, za kterou musíme odvést teplo přivedené taveninou polymeru do dutiny formy. Teplotní namáhání formy je výsledkem rozdílné teplotní roztažnosti dvou komponentů, ale hlavně rozdílem teplot v různých částech formy. Teplo je odváděno chladícím médiem, které proudí chladicími kanály. Rozdíl teplot mezi stěnou dutiny formy a stěnou chladicího kanálu pak generuje mechanické napětí, které závisí na koeficientu teplotní roztažnosti a teplotním gradientu. Mechanické napětí pak způsobuje deformace komponentů vstřikovací formy. [7]



Obr. 10. Teplota formy při vstřikovacím cyklu



Obr. 11. Deformace formy v důsledku rozdílu teplot

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Byly určeny následující cíle diplomové práce:

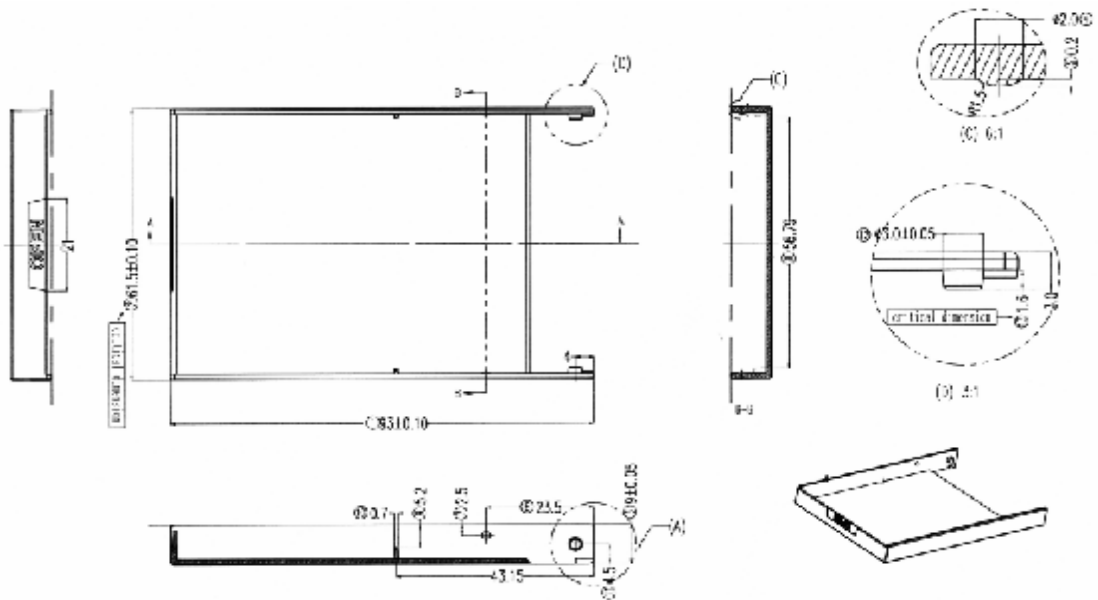
1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Proved'te konstrukci 3D modelu řešeného dílu v programu CATIA V5.
3. Proved'te tokové analýzy v programu MPI.
4. Porovnejte výsledky analýz se současným stavem.

V literární studii je charakterizován princip vstřikování, vstřikovací stroj, základní rozdělení polymerů, návrh a optimalizace chlazení, konstrukce a popis vstřikovacích forem. Tato studie byla zaměřena především na návrh vstřikovacích forem a temperačních kanálků v simulačních programech, které budou dále využity v praktické části pro optimalizaci vstřikovacího cyklu zadaného dílce.

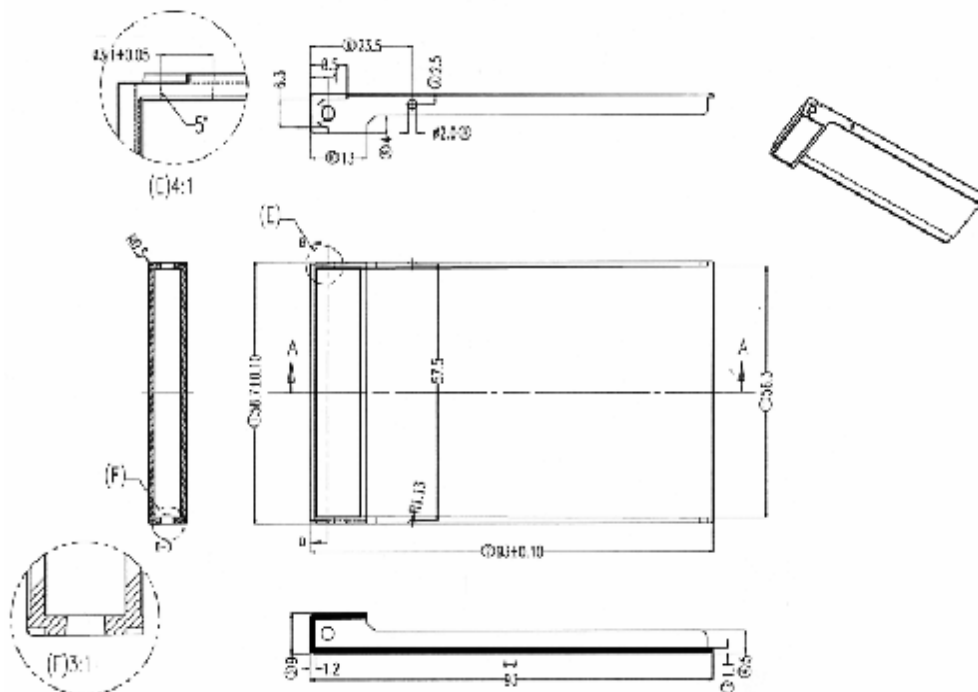
V praktické části byl v programu CATIA V5 vytvořen model jednotlivých částí krabičky na vizitky. Jelikož tyto části byly dále převedeny do programu MPI, byly nakresleny v tzv. pracovní verzi. To znamená, že pro práci v simulačním programu je to díl, který neobsahuje úkopy a zaoblení menší než 1 mm, které by vedly k zdoluhavým výpočtům. Po převedení jednotlivých dílů krabičky do programu MPI byly rozmístěny dle výrobních výkresů vstřikovací formy, byl vytvořen vtokový systém a temperační kanálky dle skutečné formy. Poté byla provedena toková analýza a porovnání výsledků se současným stavem. Dále byly vytvořeny úpravy jak temperačních kanálků, tak teplot formy a chladicí kapaliny a opět provedeny analýzy. Poté se porovnaly výsledky analýzy sestavené dle vyrobené formy a upravené formy, zda došlo ke snížení vstřikovacího cyklu nebo se cyklus příliš nezměnil. Dále následovaly jiné varianty, a to jak regulace teplot temperačního média, tak polymerní taveniny, ale také konstrukční zásahy do současné formy. Jako poslední varianta byla sestavena čtyřnásobná vstřikovací forma v programu Moldflow Plastics Insight 6.2. Na závěr došlo k porovnání všech variant a k vybrání nejvhodnější pro nahrazení současné situace.

6 VÝROBEK

Zadaný výrobek slouží jako krabička na vizitky



Obr. 12. Horní díl krabičky na vizitky



Obr. 13. Spodní díl krabičky na vizitky

6.1 Popis výrobku

Jedná se o tenkostěnný výrobek, který je složen ze dvou dílů. Každý z těchto dílů je zhotoven vstřikováním do osminásobné formy. Vstřikovaným materiálem je PS Empera 251L, barva čirá. Výrobek je produkován firmou GM, spol. s. r. o. Vyškov. Vstřikovací cyklus u obou dílů je poměrně dlouhý. Nejdéle probíhá proces chlazení. Právě tento čas bude snahou snížit z důvodu vyšší produktivity výroby.

6.2 Vlastnosti materiálu PS Empera 251L

Polystyren je jedním z nejrozšířenějších tepelně zpracovatelných plastů, tzv. termoplastů. Je to poměrně tvrdý, ale křehký plast, který dobře odolává kyselinám a zásadám. Při stárnutí křehne a vytvářejí se v něm trhliny. Neodolává organickým rozpouštědům, zejména benzínu, aldehydům a ketonům. Je citlivý vůči UV záření a málo odolný vůči teplotě (jen asi do 70 °C). Při teplotě kolem 70 °C se výrobky z polystyrenu deformují.

Ze standardního polystyrénu se vyrábějí např. číré výrobky, které vzhledem připomínají PMMA (polymethylmethakrylát) - příkladem mohou být různé obaly, zkumavky používané ve zdravotnictví a v laboratořích atd. [8]

Tab. 1. Základní vlastnosti materiálu PS Empera 251L

Vlastnosti polymeru	Jednotky	Hodnota
Index toku taveniny	g /10min	2,19
Modul pružnosti	MPa	3200
Poissonova konstanta	-	0,353
Modul ve smyku	MPa	1183
Hustota taveniny	g/cm ³	0,94412
Hustota pevné látky	g/cm ³	1,048
Teplota povrchu formy	°C	50
Teplota taveniny	°C	230
Rozsah teploty povrchu formy	°C	20 – 70
Rozsah teploty taveniny	°C	180 – 280
Absolutní maximum teploty taveniny	°C	320
Teplota pro vyhození	°C	80
Maximální smykové napětí	MPa	0,24
Maximální smyková rychlost	MPa	40 000
Rovnoběžné smrštění	%	0,3662
Kolmé smrštění	%	0,3519

7 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Jednotlivé díly krabičky na vizitky jsou vstřikovány do dvou osminásobných forem na dvou vstřikovacích strojích značky ENGEL řady VICTORY 750 / 220 TECH, POWER. Jedná se o vstřikovací stroj plně hydraulický, bezsloupkový.

7.1 Základní charakteristika vstřikovacího stroje

Tab. 2. Základní charakteristika vstřikovacího stroje - vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka		
Průměr šneku	mm	50
Délka šneku	L/D	24
Maximální objem zdvihu	cm ³	392
Zdvih dávkování	mm	200
Otáčky šneku max.	min ⁻¹	230
Vstřikované množství - teoretické hodnoty	cm ³ /s	284
Specifický vstřikovací tlak	bar	1430
Zvýšený specifický vstřikovací tlak	bar	1910
Zdvih agregátu × přídržná síla trysky	mm × kN	350 × 67
Instalovaný příkon topení plastifikačního válce	kW	15,3
Počet topných pásů	-	5

Tab. 3. Základní charakteristika vstřikovacího stroje - uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka		
Uzavírací síla	kN	2200
Dráha otevření formy	mm	750
Vestavěná výška formy, min.	mm	300
Max. otevření upínacích desek	mm	1050
Velikost upínacích desek hor. × vert. (standard TECH)	mm	860 × 580
Zvětšené upínací desky hor. × vert. (standard POWER)	mm	860 × 830
Šířka vypadávací šachty	mm	600
Zdvih vyhazovače × síla vyhazovače	mm × kN	170 × 80
Hmotnost formy max.(z toho 2/3 na pohyblivé upínací desce)	kg	2250



Obr. 14. Vstřikovací stroj ENGEL řady VICTORY 750 / 220 TECH, POWER

8 ANALÝZY VSTŘIKOVACÍHO PROCESU PRO HORNÍ DÍL

8.1 Varianta 1. – současné vstřikování

8.1.1 Procesní podmínky při současném vstřikování

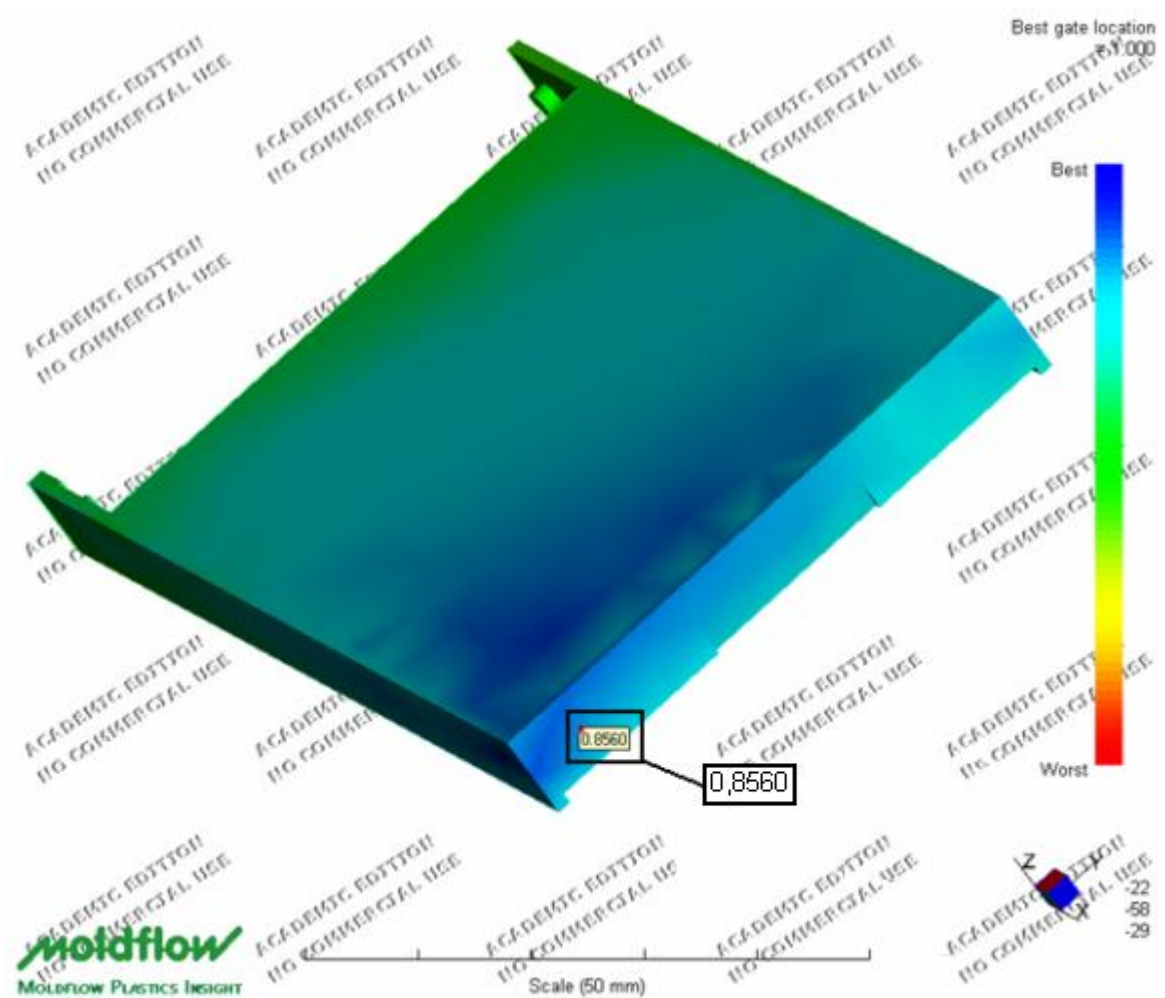
Pro simulaci vstřikovacího procesu je nutné stanovit základní okrajové podmínky, dále vytvořit kopii umístění jednotlivých dutin vstřikovací formy, temperačního a vtokového systému.

Pro současné vstřikování horního dílu byly v programu MPI nastaveny procesní podmínky, které používá firma GM, spol. s. r. o. Vyškov a jsou uvedeny v parametrech seřízení stroje.

Tab. 4. Procesní podmínky při současném vstřikování

Teplota formy	°C	60
Teplota taveniny	°C	255
Čas otevření formy	s	5
Čas cyklu	s	31,8
Čas vstřiku	s	0,68
Bod přepnutí	s	16
Čas dotlaku	s	1,8
Pokles tlaku vůči vstřikovacímu	%	85,5
Teplota horkého vtoku	°C	300
Teplota temperačního média	°C	60
Průtok temperačního média	lit/min	60

8.1.2 Umístění vtoku



Obr. 15. Vhodné místo pro umístění vtoku

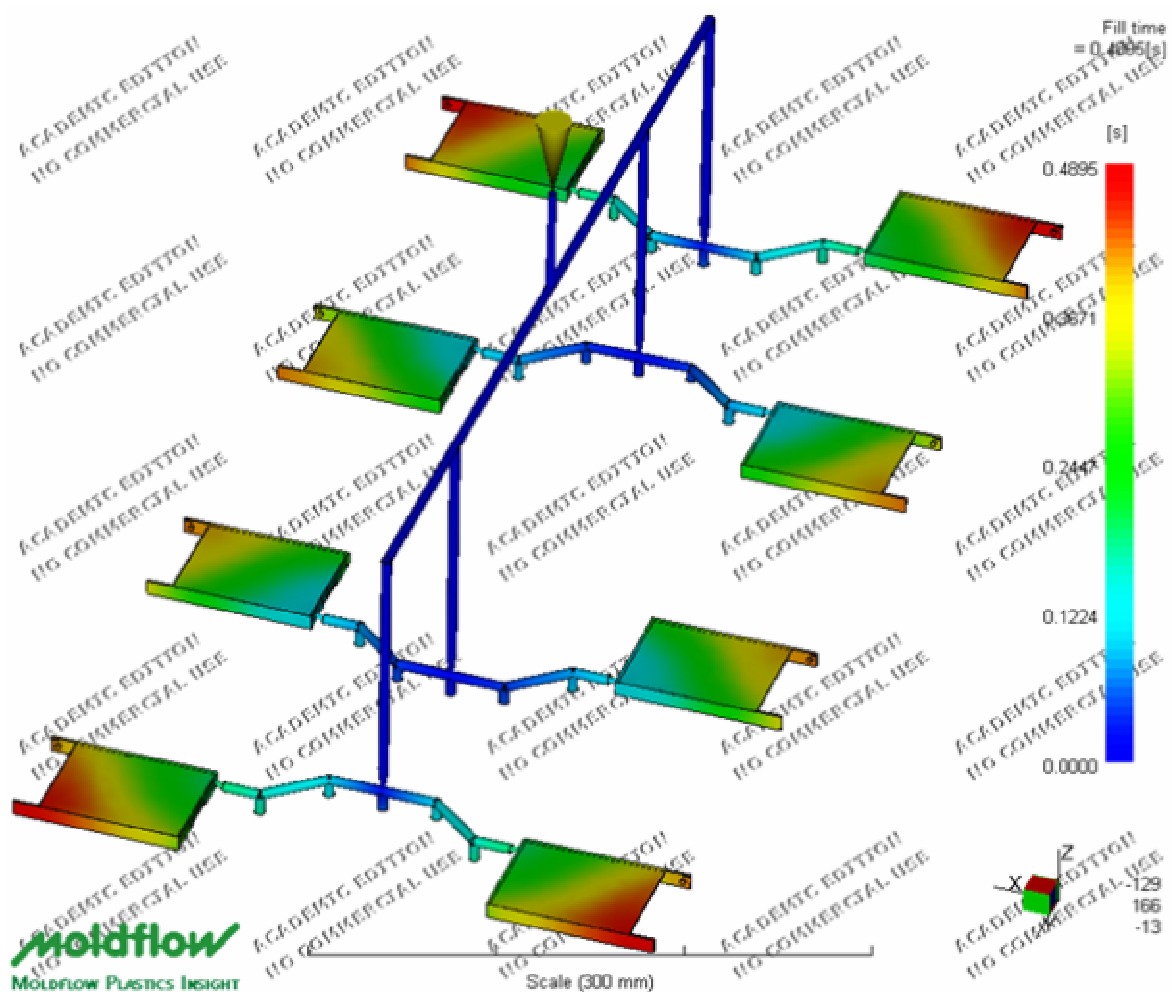
Byla provedena analýza umístění vtoku (Gate Location), za jejíž pomoci bylo zjištěno nejvhodnější místo pro vtok polymerní taveniny. Za nejvhodnější je považováno takové místo, ze kterého by měl polymer přibližně stejnou dráhu do všech dutin formy. Před výpočtem je nutné stanovit tvar vstřikované části, definovat vstřikovací stroj, druh a teploty vstřikovaného polymeru.

Místo, kde je v současné době umístěn vtok, se jeví podle určení analýzy Gate Location vhodné z 85,6 %.

8.1.3 Plnění dutiny formy

V současné době je dutina formy plněna čtyřmi horkými tryskami vstupujícími do čtyř studených rozvodných kanálků.

Podle výrobních výkresů vstřikovací formy byl sestaven přesný model plnění dutiny formy a provedena analýza plnění (Fill), která určí potřebný čas k zaplnění formy polymerní taveninou. Opět pro výpočet je nutné definovat vstřikovací stroj, druh a teploty vstřikovaného polymeru, ale také definovat rozvodné kanálky a horké trysky.

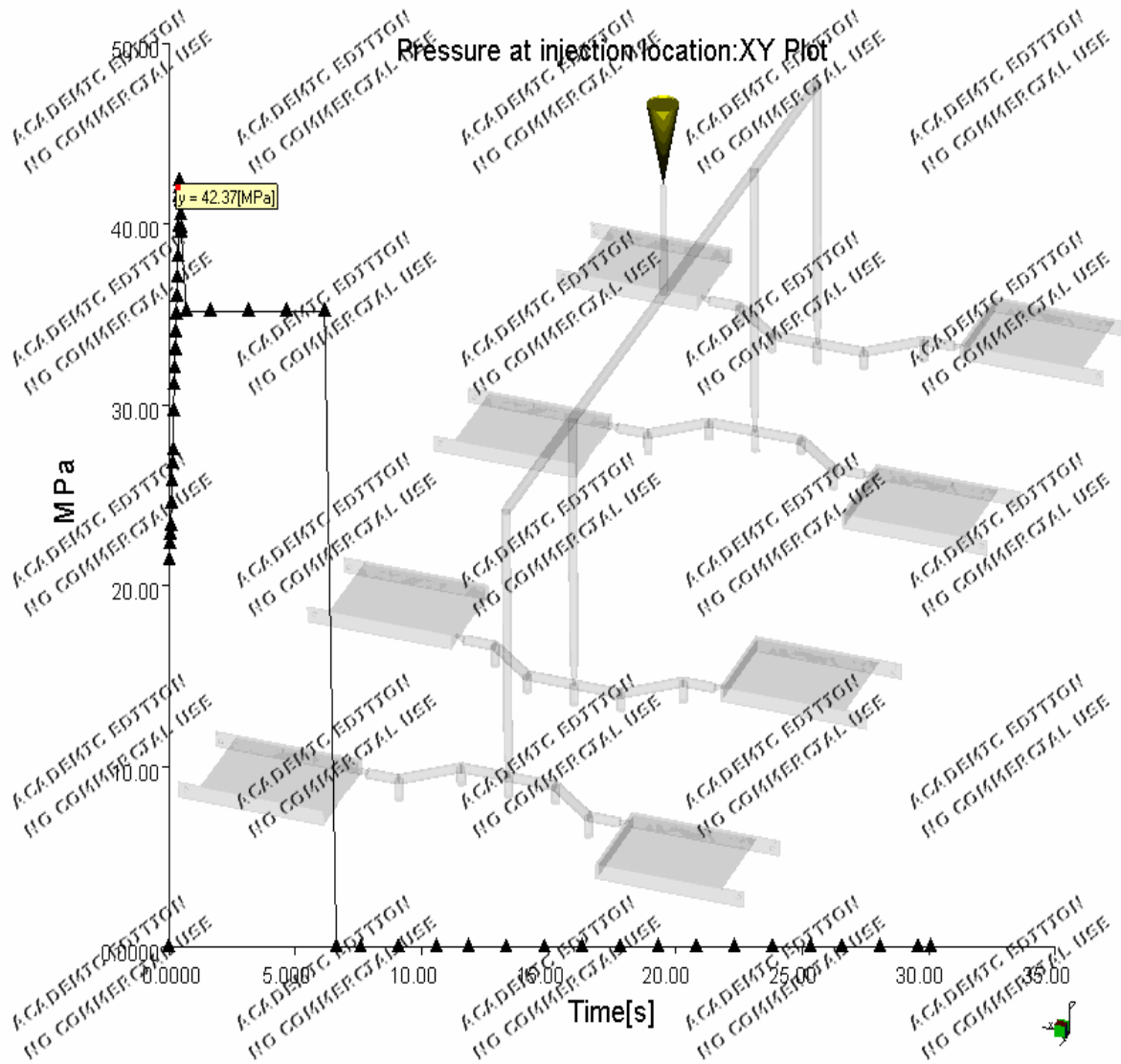


Obr. 16. Plnění dutiny formy

Potřebná doba pro zaplnění dutiny formy při nastavených podmínkách dle parametrů seřízení stroje byla spočtena na 0,49 s. Tato doba je nižší než skutečná doba vstřikování součásti. To však může být ovlivněno různými nepřesnostmi při skutečném vstřikování.

8.1.4 Průběh tlaku v místě vstřiku

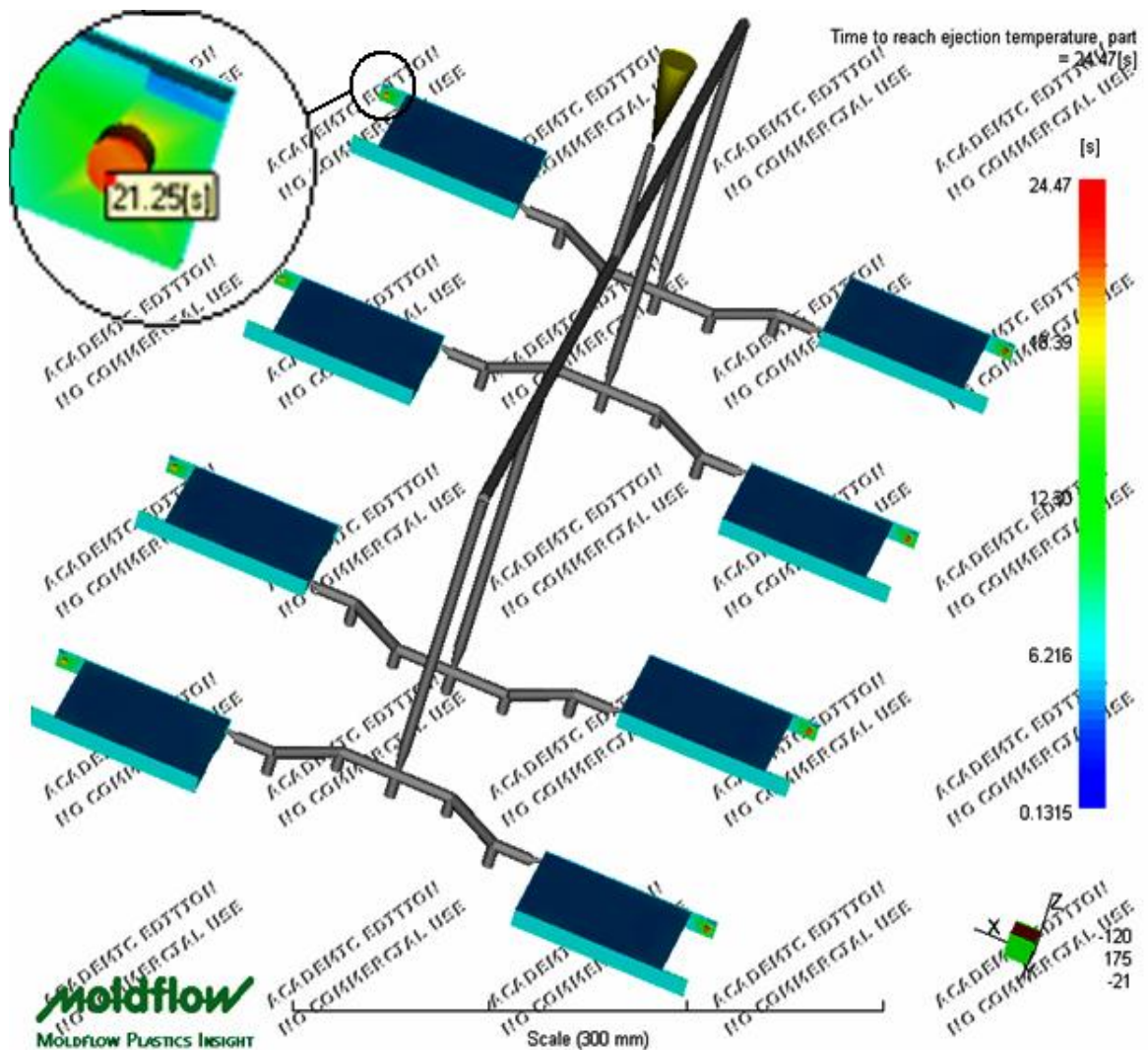
Graf znázorňuje tlak v místě vstřiku. Křivka zaznamenává změnu tlaku v tomto kritickém místě při průběhu fází: vstřik, dotlak, chlazení. Hodnota maximálního tlaku je rovna hodnotě 42,37 MPa.



Obr. 17. Průběh tlaku v místě vstřiku

8.1.5 Čas zatuhnutí výrobku

Jedná se o čas potřebný k zatuhnutí všech vrstev v dutině formy. Tento čas udává dobu od konce plnění až k vyhazovací teplotě. V ideálním případě by měla být součást rovnoměrně a co nejrychleji zchlazena. U silnostěnných výrobků stačí zchlazení z 80 %. U ostatních menších výrobků je postačující pouze z 50 %.



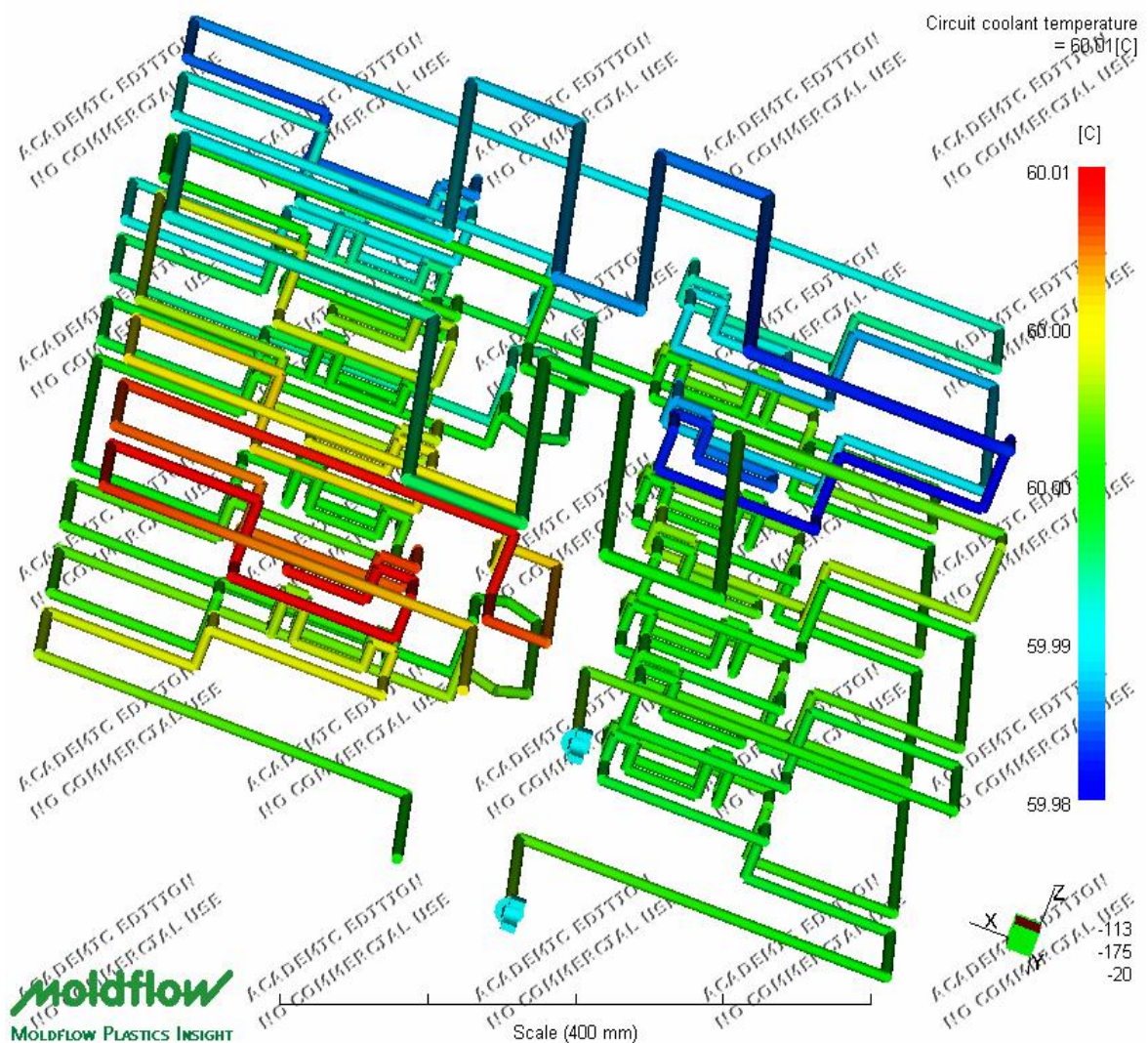
Obr. 18. Čas zatuhnutí výrobku

Vypočítaný čas zatuhnutí je téměř shodný s časem zatuhnutí při vstřikování ve skutečnosti. Tento čas bude snahou v dalších variantách snížit na optimální hodnotu.

8.1.6 Průběh teploty v chladicím obvodu

Analýza teploty chladicího média v obvodu zobrazuje změnu teploty média od místa vstupu do místa výstupu v chladicím obvodu. Rozdíl teplot chladicího média na vstupu a výstupu v jednom temperačním obvodu by neměl překročit 5 °C.

Na obr. 19. je vidět teplota chladicího média uvnitř chladicího obvodu. Rozdíl teplot na vstupu a výstupu je 0,03 °C. Z toho plyne, že chladicí okruh vyhovuje.

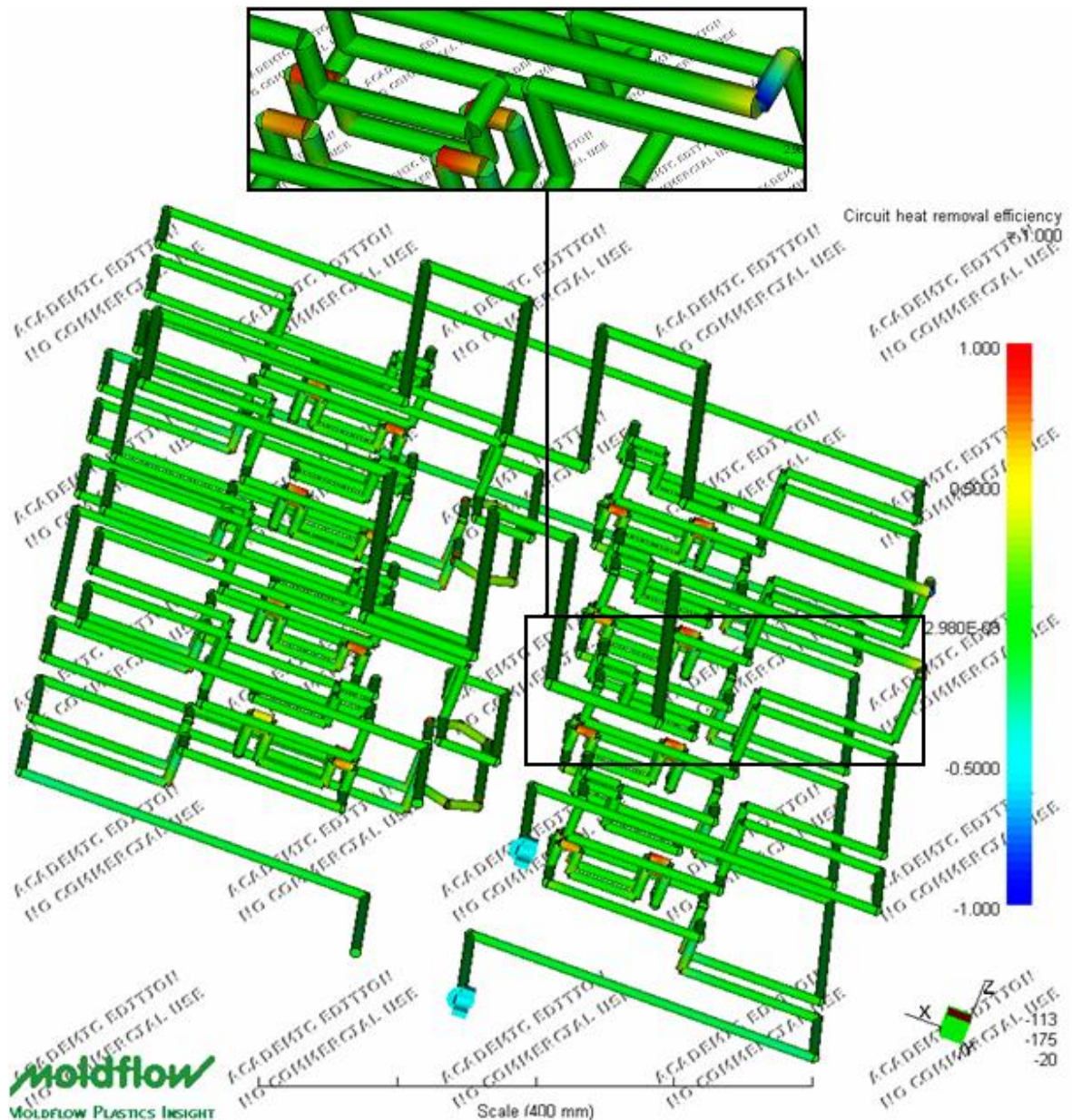


Obr. 19. Průběh teploty v chladicím obvodu

Levý okruh je realizován vrtanými otvory o průměru 8 mm. Pravý okruh je také o průměru 8 mm, ale dále okruh kolem horkých trysek je redukován na průměr 10 mm. Jako temperační médium slouží upravená voda.

8.1.7 Efektivita odvodu tepla

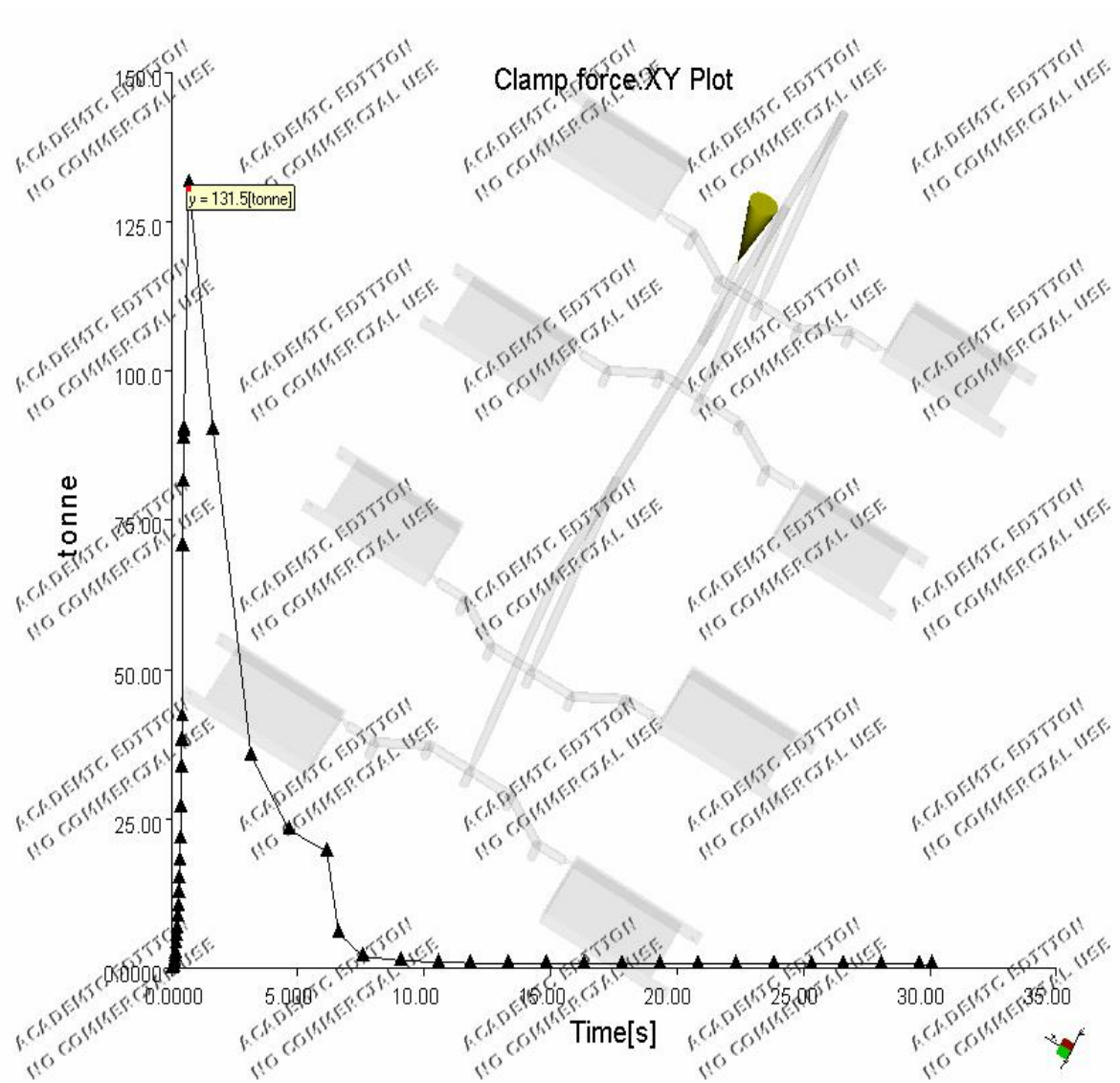
Znázornění schopnosti jednotlivých temperačních okruhů odvádět teplo. Efektivita je závislá na vzdálenosti temperačních kanálů od modelu, Reynoldsově číslu, rozdílu teplot mezi chladicím médiem a formou v dané oblasti.



Obr. 20. Efektivita odvodu tepla

V místech, kde je hodnota záporná, dochází místo k chlazení výrobku k jeho ohřívání a tím se efektivita chlazení v daném místě snižuje.

8.1.8 Uzavírací síla



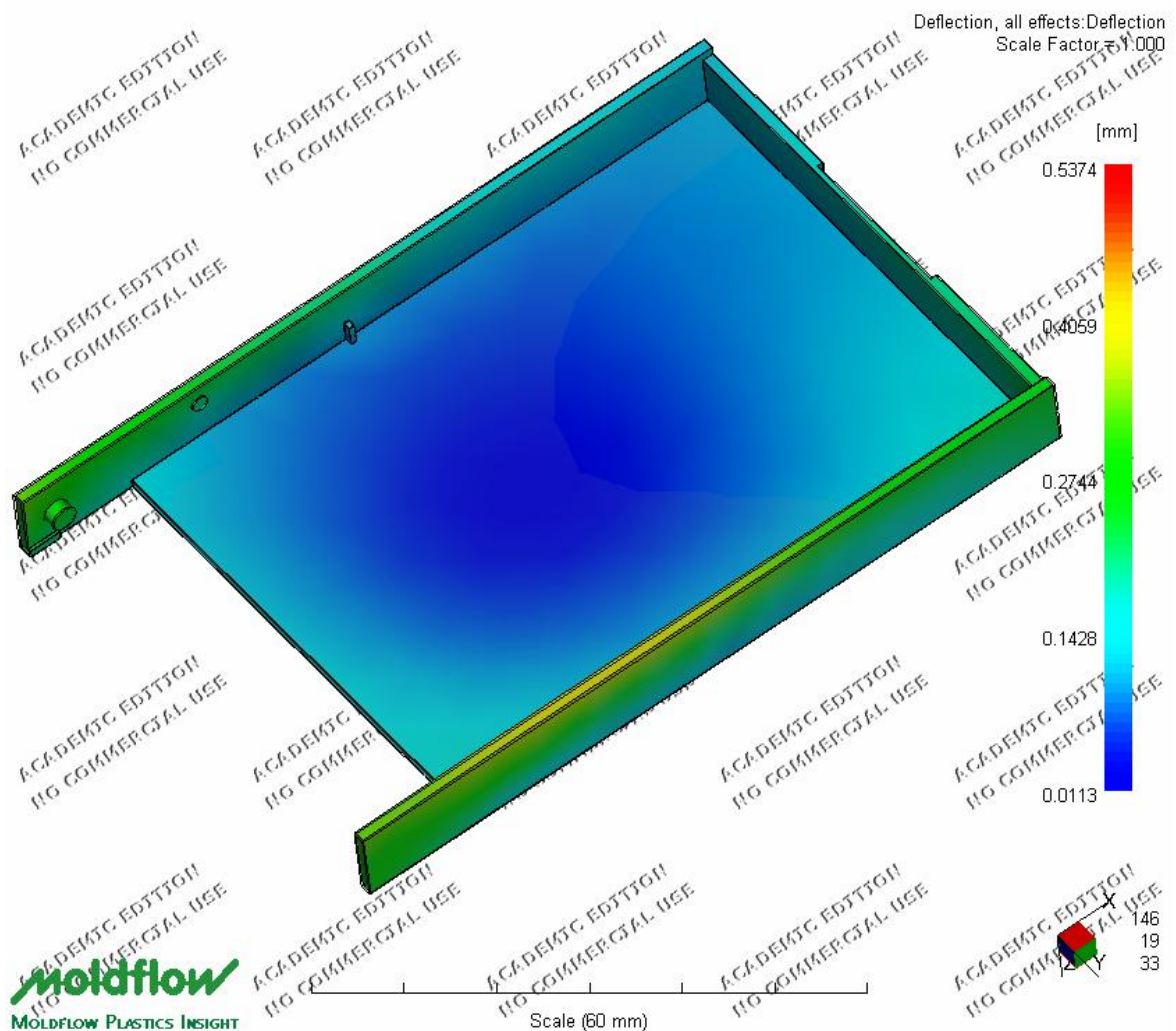
Obr. 21. Průběh uzavírací síly

Graf znázorňuje průběh uzavírací síly. Potřebná uzavírací síla činí 131,5 t. Této hodnoty se využívá především pro volbu vhodného vstřikovacího stroje. Maximální potřebná uzavírací síla pro vstřikovací formu by měla odpovídat nejvýše 80 % maximální uzavírací síly vstřikovacího stroje. Zbývajících 20 % je považováno za bezpečnostní faktor.

8.1.9 Celková deformace vstřikované části

Byla provedena analýza deformace (Warp), pomocí které je zobrazena celková deformace výrobku způsobená různými vlivy, jimiž jsou: chlazení, smrštění, orientace. Každý z výsledků je zobrazován celkově i ve třech osách (x, y, z). Nejvyšší vliv na celkové deformace má smrštění.

Každý polymerní materiál má definované smrštění v podélném a kolmém směru. S ohledem na toto smrštění je třeba navrhnout dutinu formy o danou velikost smrštění větší, z důvodu aby výrobek po ochlazení dosahoval požadovaných rozměrů.



Obr. 22. Celková deformace vstřikované části

Celkové smrštění dílu při současném vstřikování se rovná hodnotě 0,54 mm

8.2 Varianta 2. – regulace teplot taveniny a temperačního média

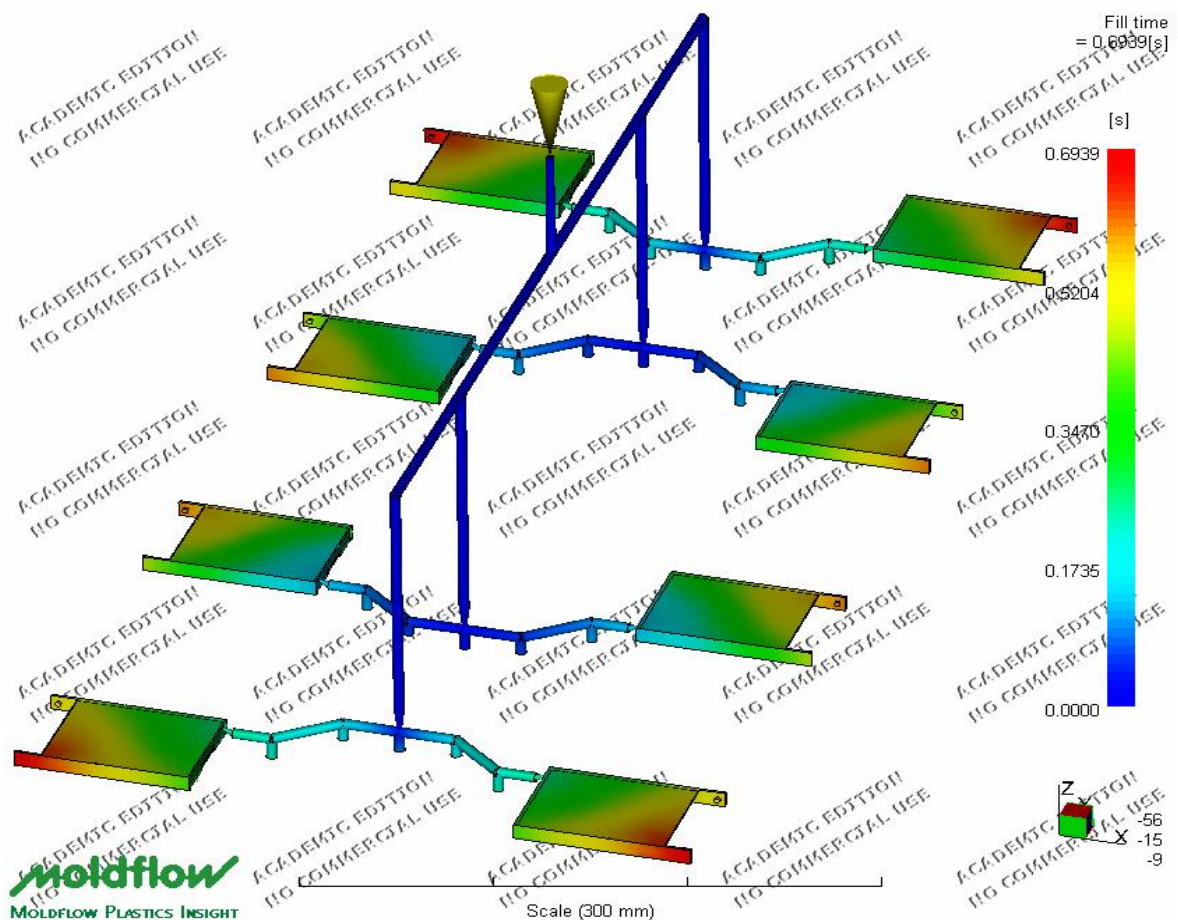
8.2.1 Procesní podmínky při regulaci teplot současného vstřikování

Nyní byla upravena hodnota teploty temperačního média, ale také teplota taveniny ve vstřikovací stroji a v horkých tryskách. V tab. 5. jsou uvedeny změněné hodnoty pro vstřikování při této regulaci teplot. Dále budou použity i v následujících variantách, aby mohlo dojít ke srovnání výsledků a vybrání nejvhodnější varianty.

Tab. 5. Procesní podmínky pro následující tři varianty

Teplota formy	°C	30
Teplota taveniny	°C	245
Teplota horkého vtoku	°C	255
Teplota temperačního média	°C	30

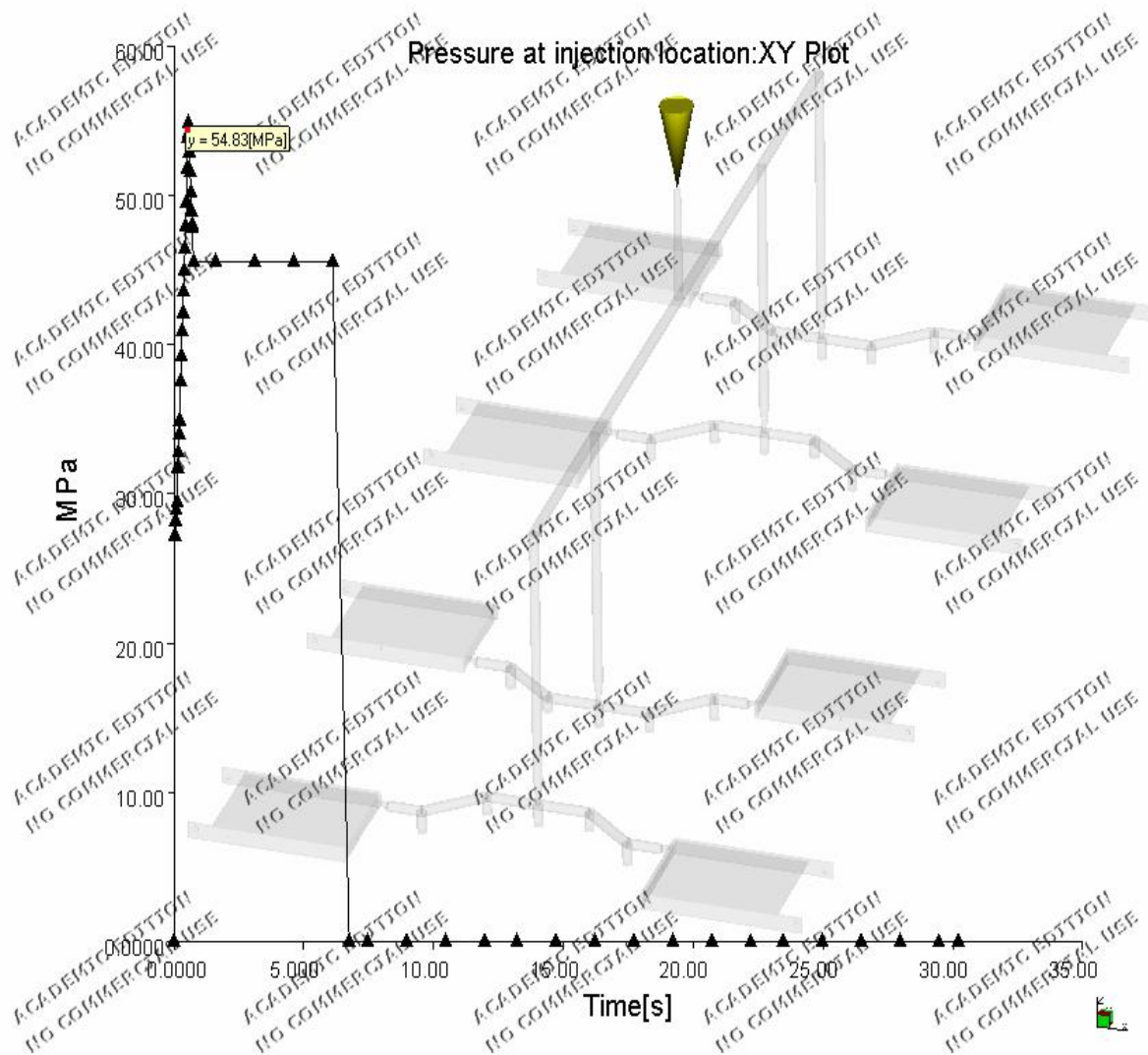
8.2.2 Plnění dutiny formy



Obr. 23. Plnění dutiny formy

Při regulaci teplot taveniny a temperačního média je čas pro zaplnění dutiny formy roven hodnotě 0,69 s. Došlo k mírnému navýšení než u varianty 1., ale jedná se o téměř zanedbatelnou hodnotu, což může být způsobeno především větší viskozitou polymerní taveniny.

8.2.3 Průběh tlaku v místě vstřiku



Obr. 24. Průběh tlaku v místě vstřiku

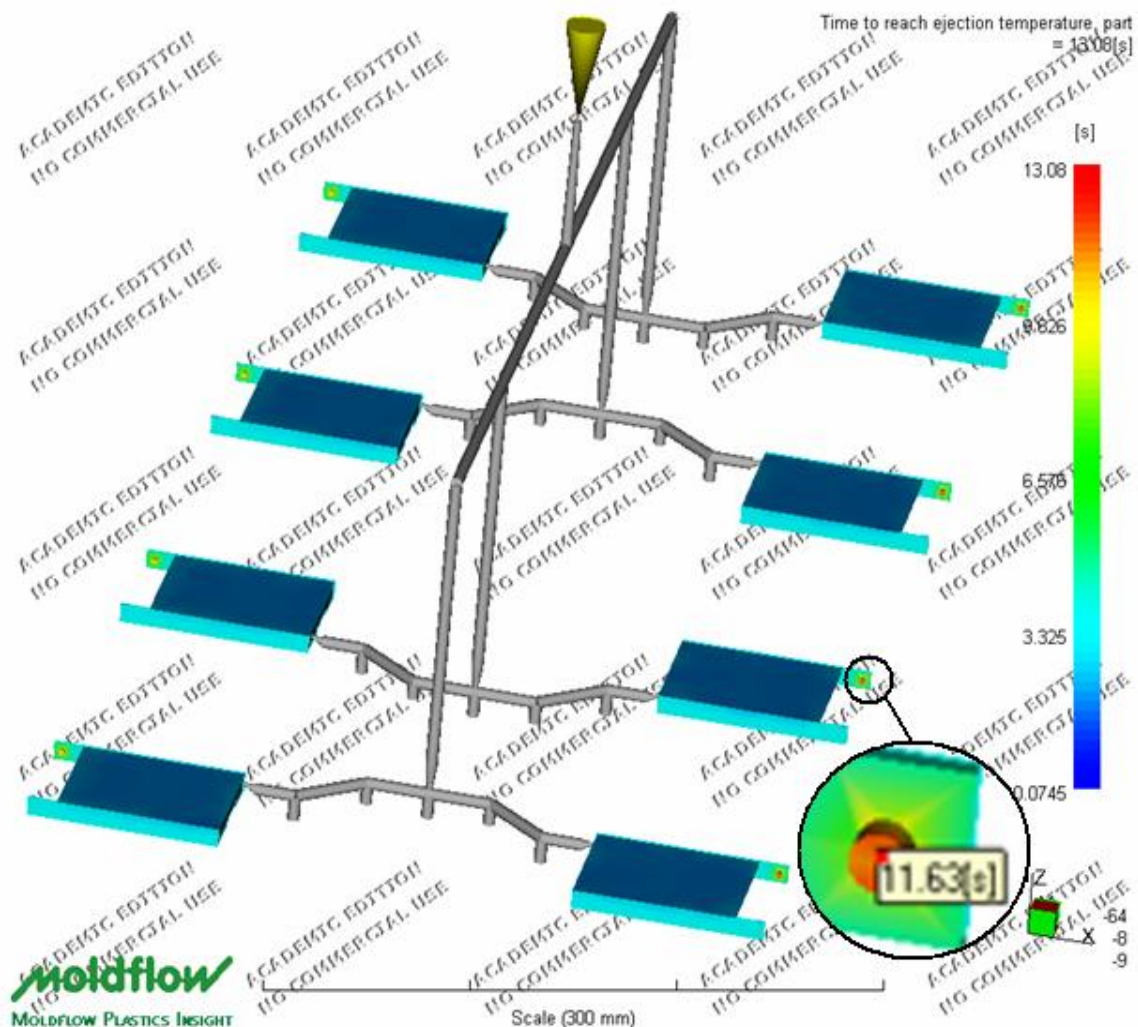
Z grafu je zřejmé, že tlak pro vstříknutí taveniny se zvýšil o 12,46 MPa od současného vstřikování. Hodnota tlaku v místě vstřiku je rovna 54,83 MPa.

8.2.4 Čas zatuhnutí výrobku

Čas zatuhnutí při regulaci teplot je roven hodnotě 13,08 s. Oproti současným podmínkám došlo k zlepšení o 11,39 s.

Nejdelší čas potřebný pro zatuhnutí je v oblasti pantů krabičky. Toto místo zatuhne jako poslední z důvodu větší tloušťky stěny než ostatní části tohoto dílu. Při vyhazování výstřiku z formy však není nijak namáhané a tudíž by mohlo dojít k vyhození i v dřívějším čase.

Způsob vyhazování výstřiků z formy je řešen pomocí robotu s přísavkami, které se přisají na horní plochu výstřiku, která je již zatuhlá v čase přibližně 3 s.

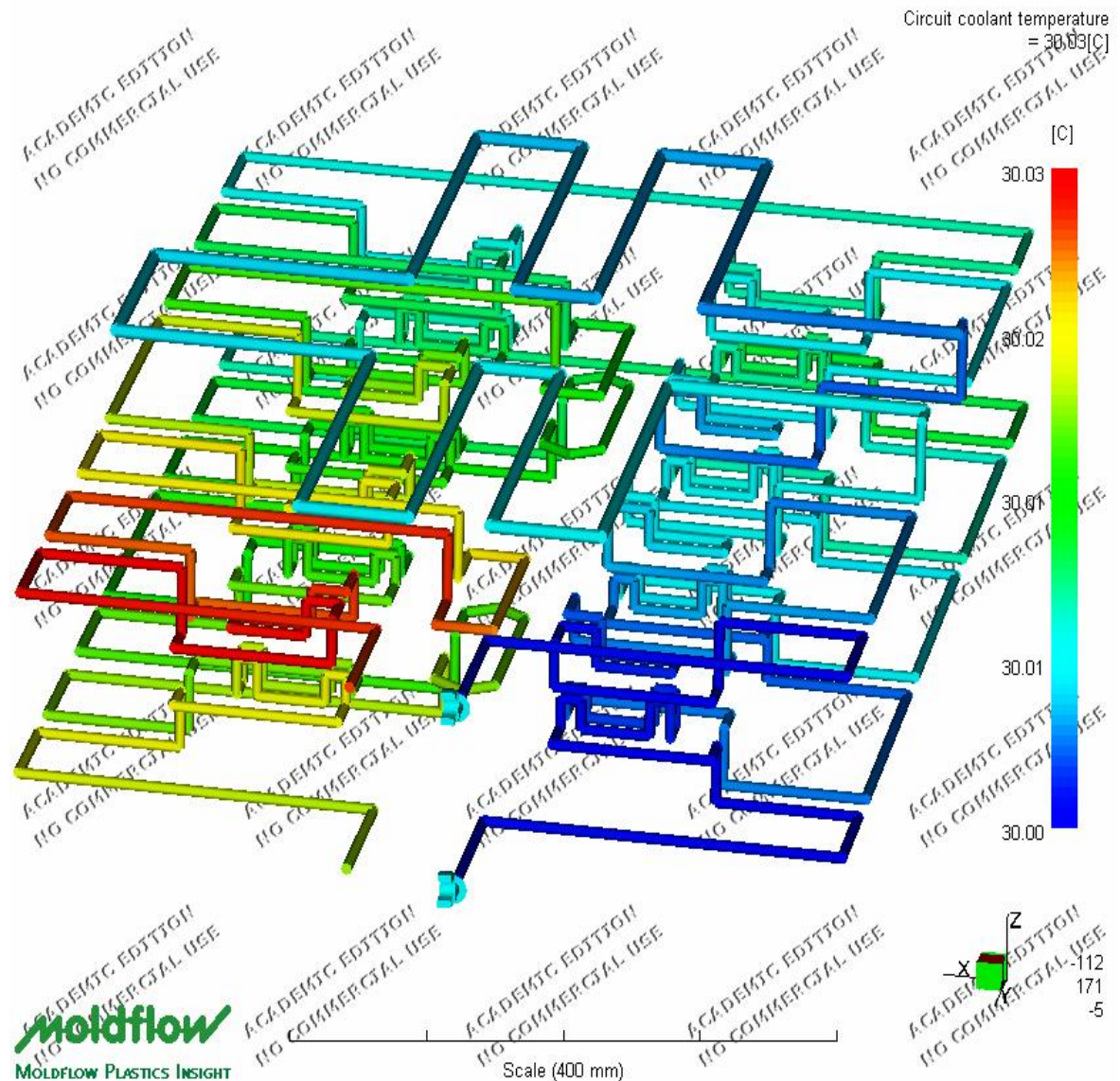


Obr. 25. Čas zatuhnutí výrobku

8.2.5 Průběh teploty v chladicím obvodu

Při variantě 2. nedošlo k žádným konstrukčním zásahům do vstřikovací formy, tudíž temperační okruhy jsou shodné s variantou 1.

Rozdíl teplot na vstupu a výstupu je roven hodnotě 0,02 °C. Z toho plyne, že chladicí okruh vyhovuje.

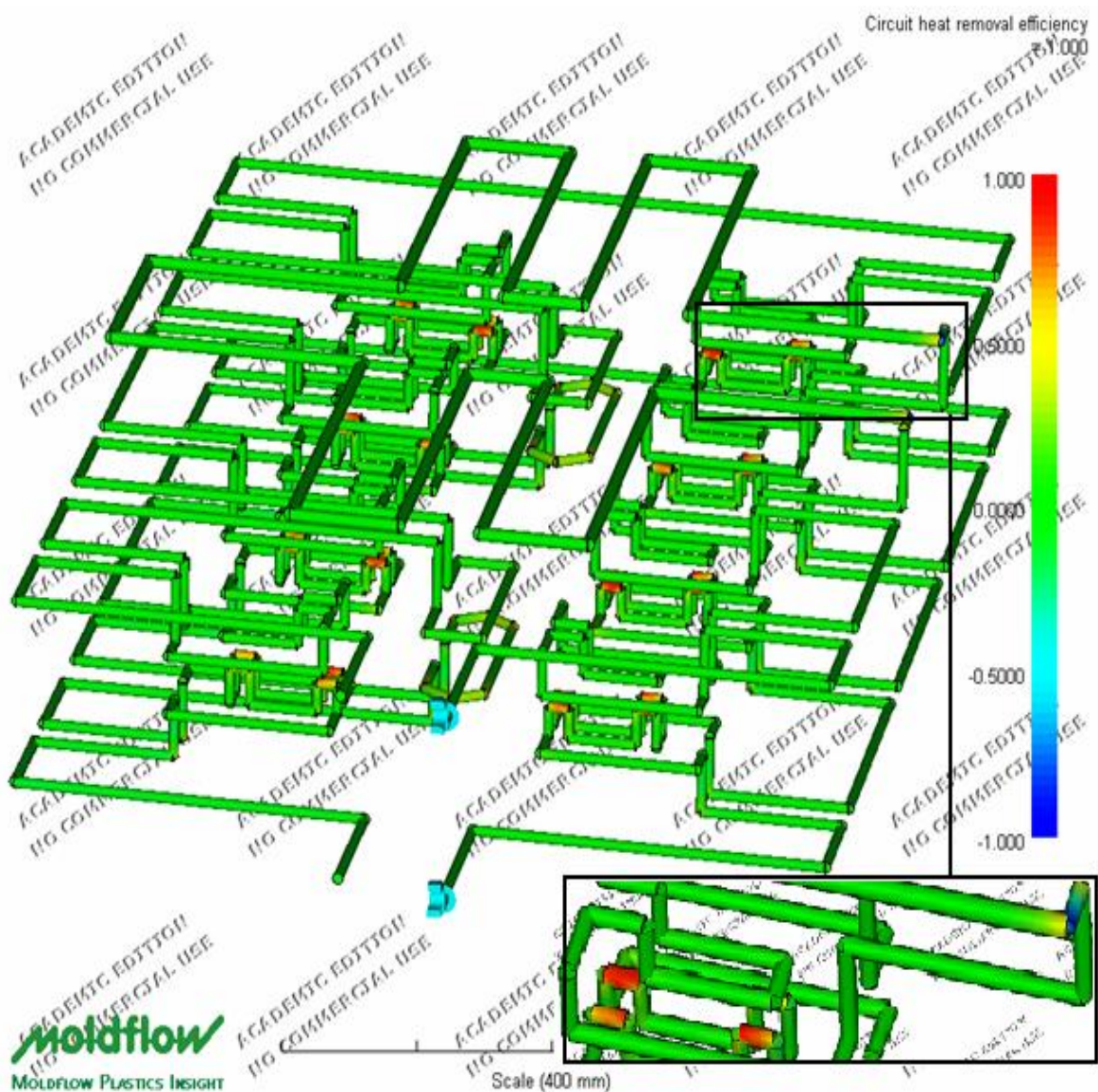


Obr. 26. Průběh teploty v chladicím obvodu

8.2.6 Efektivita odvodu tepla

Části chladicího okruhu blížící se v barevné škále hodnotě 1 mají účinnost 100 % odvodu tepla. Ty části, které se pohybují v záporných hodnotách, formu spíše ohřívají, než chladí. Detail na obr. 27. znázorňuje okruh pro jeden výstřik. Z něj je zřejmé že levý okruh v určitých místech dosahuje účinnosti téměř 100 %. Okruh v blízkosti horkých trysek dosahuje hodnoty přibližně kolem 50 %.

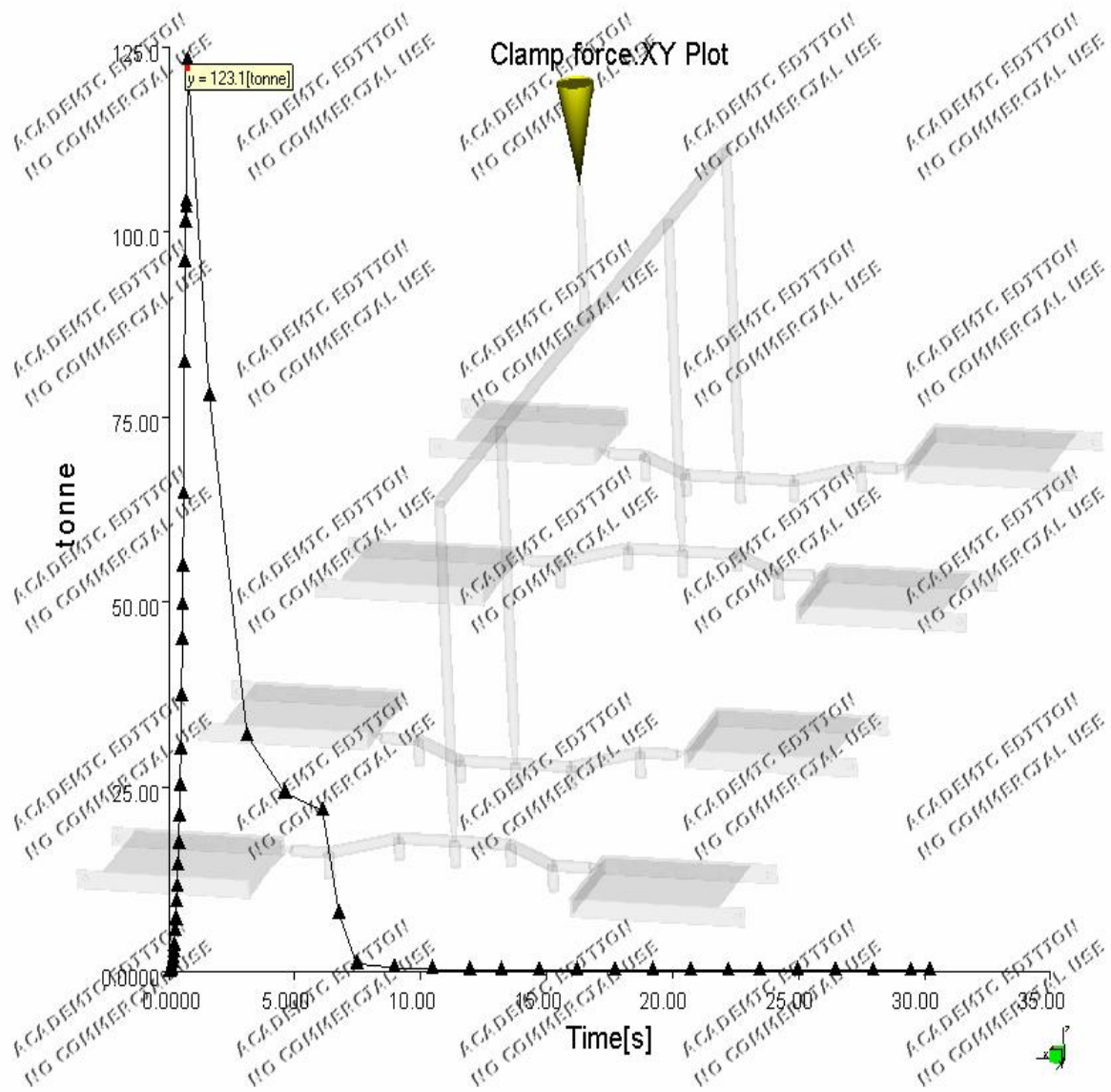
Efektivita je závislá na vzdálenosti temperačních kanálů od modelu, Reynoldsově čísle, rozdílu teplot mezi chladicím médiem a formou v dané oblasti.



Obr. 27. Efektivita odvodu tepla

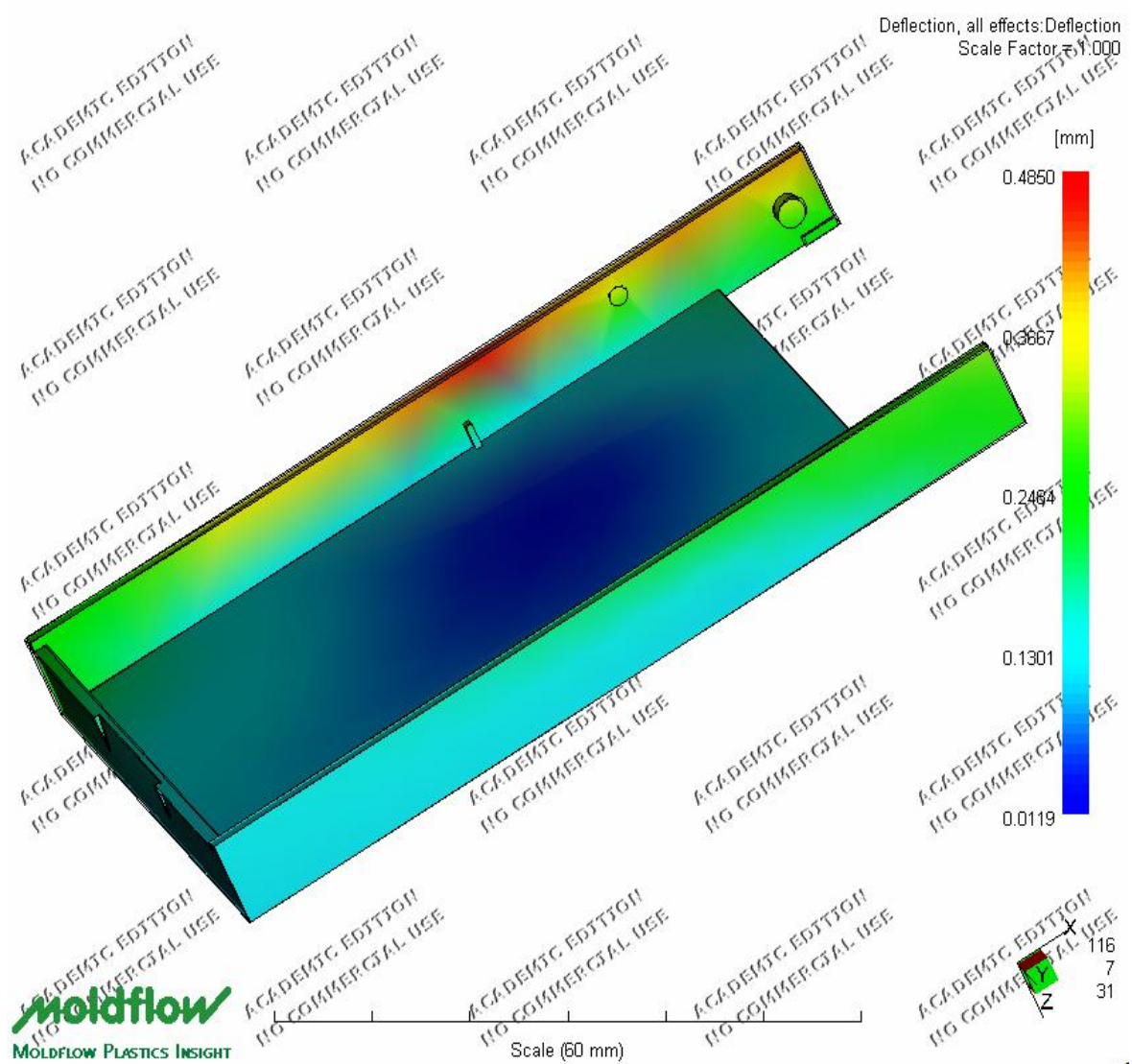
8.2.7 Průběh uzavírací síly

Graf znázorňuje změnu uzavírací síly v průběhu cyklu. Maximální potřebná síla je rovna hodnotě 123,1 t.



Obr. 28. Průběh uzavírací síly

8.2.8 Celková deformace vstříkované části



Obr. 29. Celková deformace vstříkované části

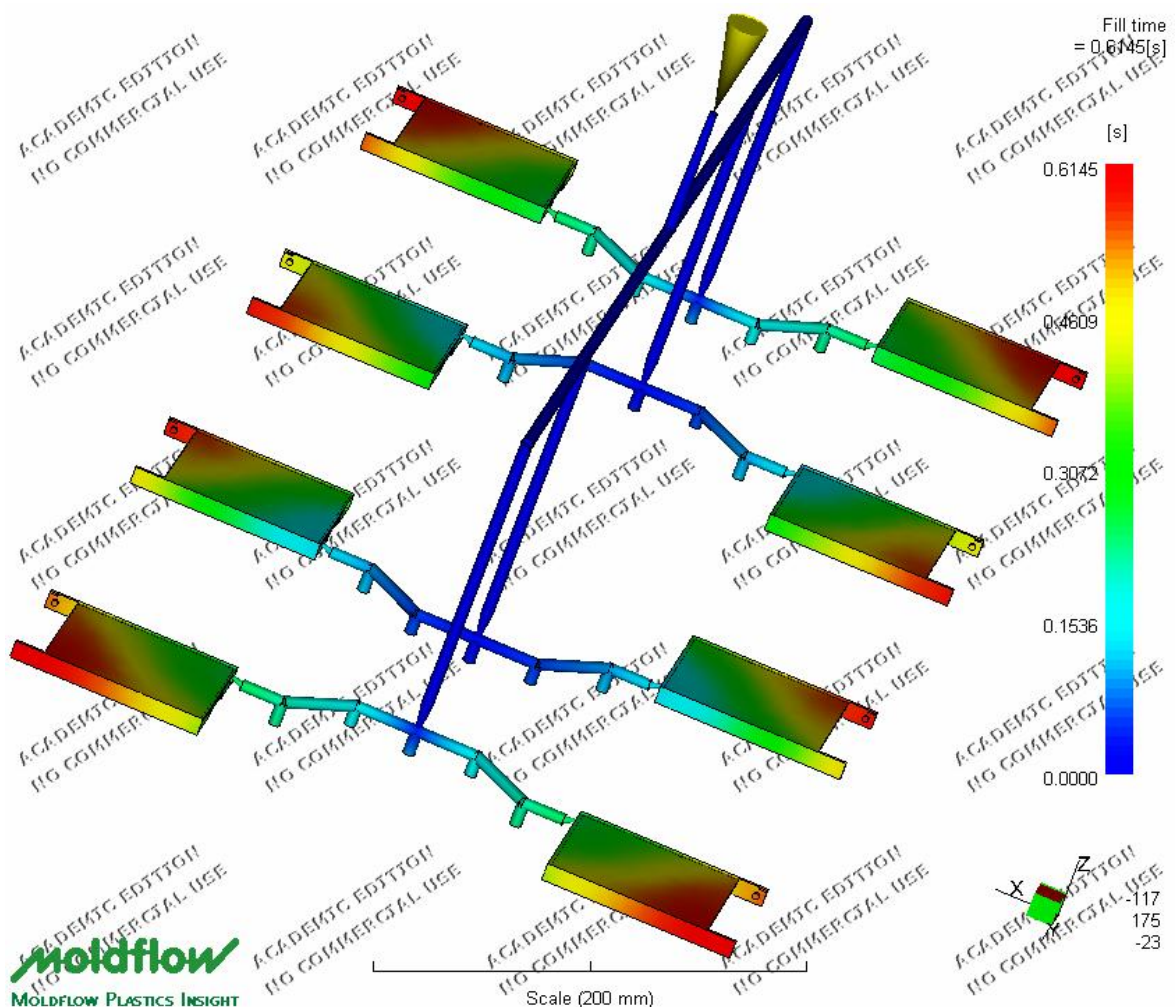
Celková deformace se rovná hodnotě 0,49 mm, což znamená zlepšení o 0,05 mm než při vstříkování v současné době, jak bylo spočítáno při variantě 1. Hodnota tohoto rozdílu je však téměř zanedbatelná.

8.3 Varianta 3. – vytvoření nových temperačních kanálků v současné formě

8.3.1 Procesní podmínky při vytvoření nových temperačních kanálků

Do současné vstřikovací formy byl proveden konstrukční zásah, a to takový, že byly vyvrtány další temperační kanálky o průměru 8 mm a byly napojeny na nový okruh. Průtoky temperačního media jsou shodné s variantou 2.

8.3.2 Plnění dutiny formy

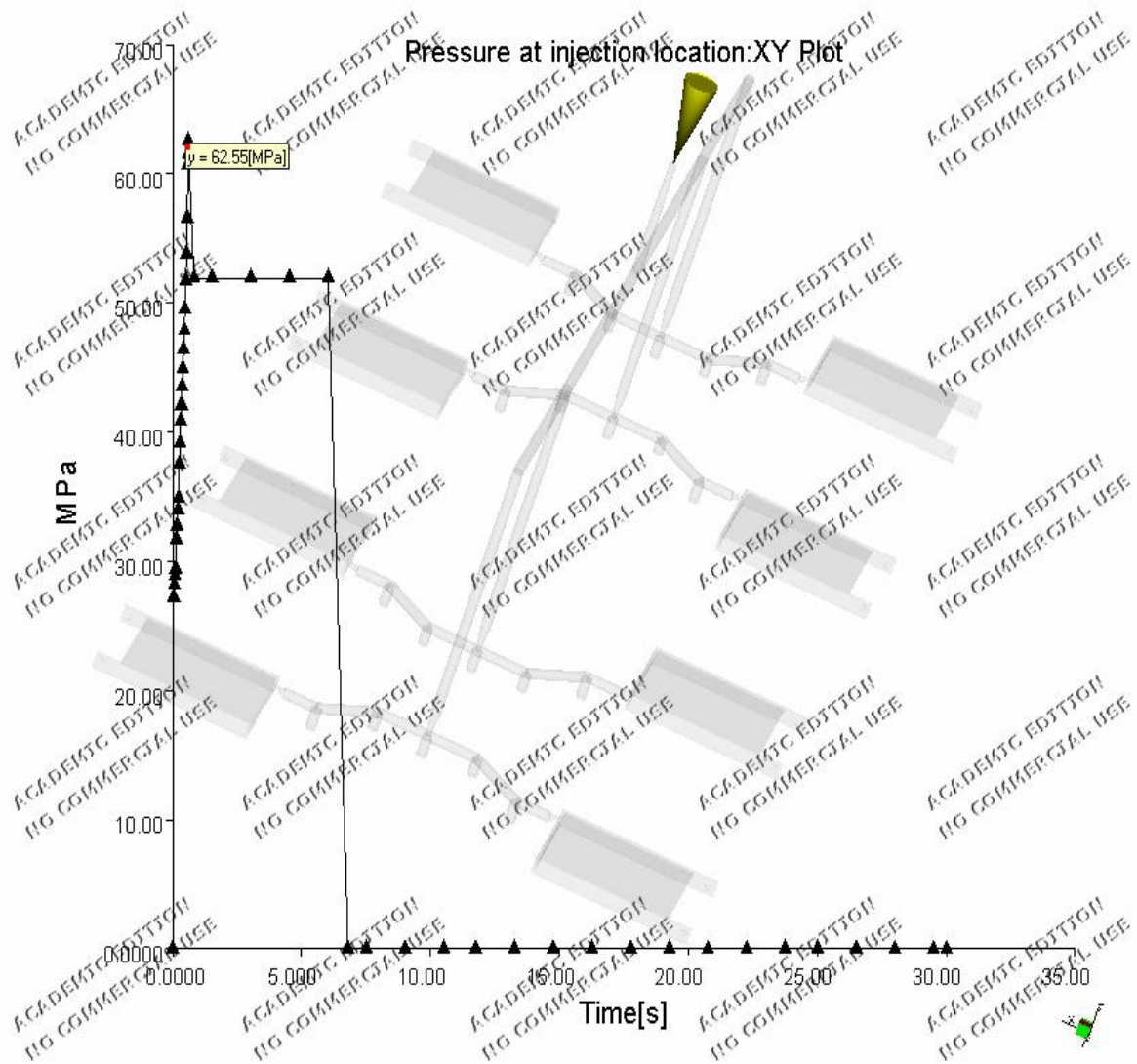


Obr. 30. Plnění dutiny formy

Po konstrukčním zásahu přidání temperačních kanálků se snížila doba plnění dutiny formy taveninou ve srovnání s variantou 2. o zanedbatelnou hodnotu 0,07 s.

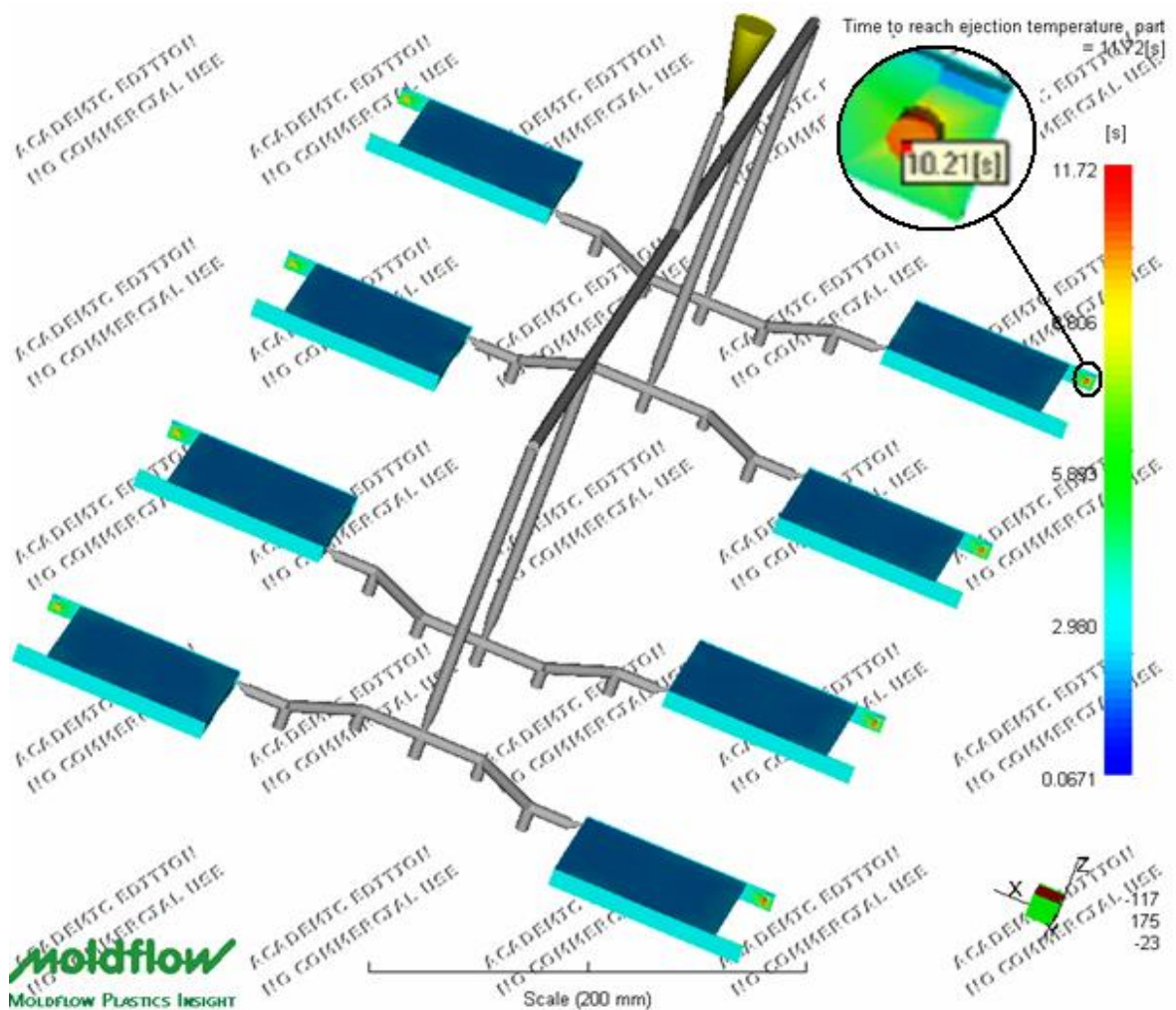
8.3.3 Průběh tlaku v místě vstřiku

Na grafu je znázorněna změna průběhu tlaku v místě vstřikování. Maximální hodnota činí 62,22 MPa. Oproti variantě 2. došlo k navýšení tlaku o hodnotu 7,67 MPa. Tato hodnota vzrůstá především se zvyšující se viskozitou.



Obr. 31. Průběh tlaku v místě vstřiku

8.3.4 Čas zatuhnutí výrobku



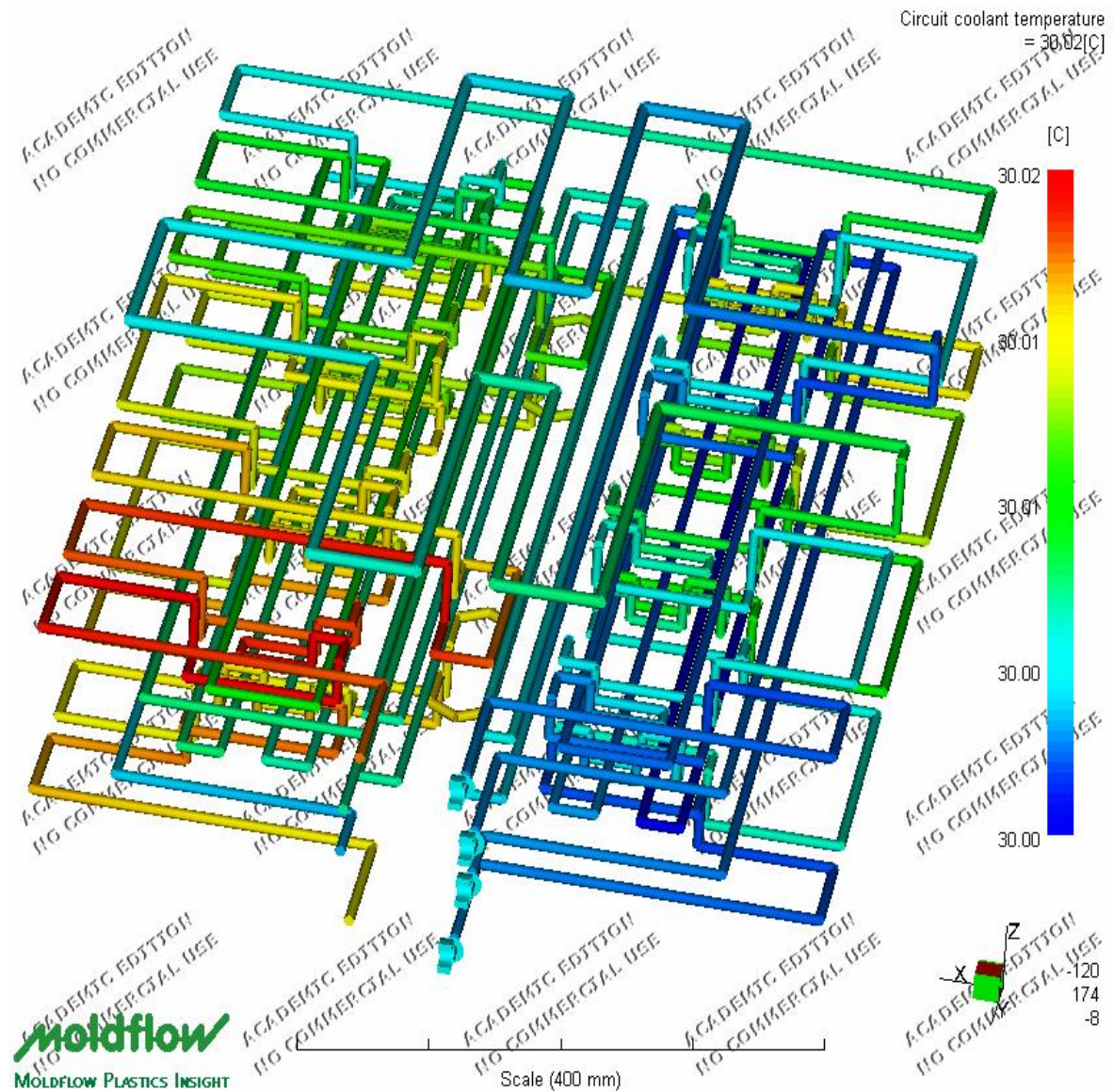
Obr. 32. Čas zatuhnutí výrobku

Při navýšení počtu temperačních kanálků je hodnota zatuhnutí výrobku rovna 11,72 s. Což je oproti variantě 2. zlepšení o 1,36 s. Ovšem tato varianta vede ke konstrukčnímu zásahu do vstřikovací formy. Tímto zásahem by vedla k určitým finančním nákladům a zlepšení je téměř zanedbatelné vůči nákladům na úpravu formy.

Opět ovšem dochází k nejdelšímu zatuhnutí čepů, které slouží jako panty krabičky. Na obr. 32. je detailně vidět časový rozdíl tuhnutí tohoto čepu a ostatních částí výstřiku. Jelikož pro vyhazování výstřiku je použito robotu s přísavkami, které se přisají na horní plochu dílu, opět není nutné čekat na zatuhnutí částí, jež by se při vyhazování jinak deformovaly. Plocha sloužící pro vyjmutí výstřiku je ochlazena na vyhazovací teplotu přibližně za 2,5 s.

8.3.5 Průběh teploty v chladícím obvodu

Při současné úpravě formy mají nově navržené, přídavné temperační kanálky, průměr 8 mm.

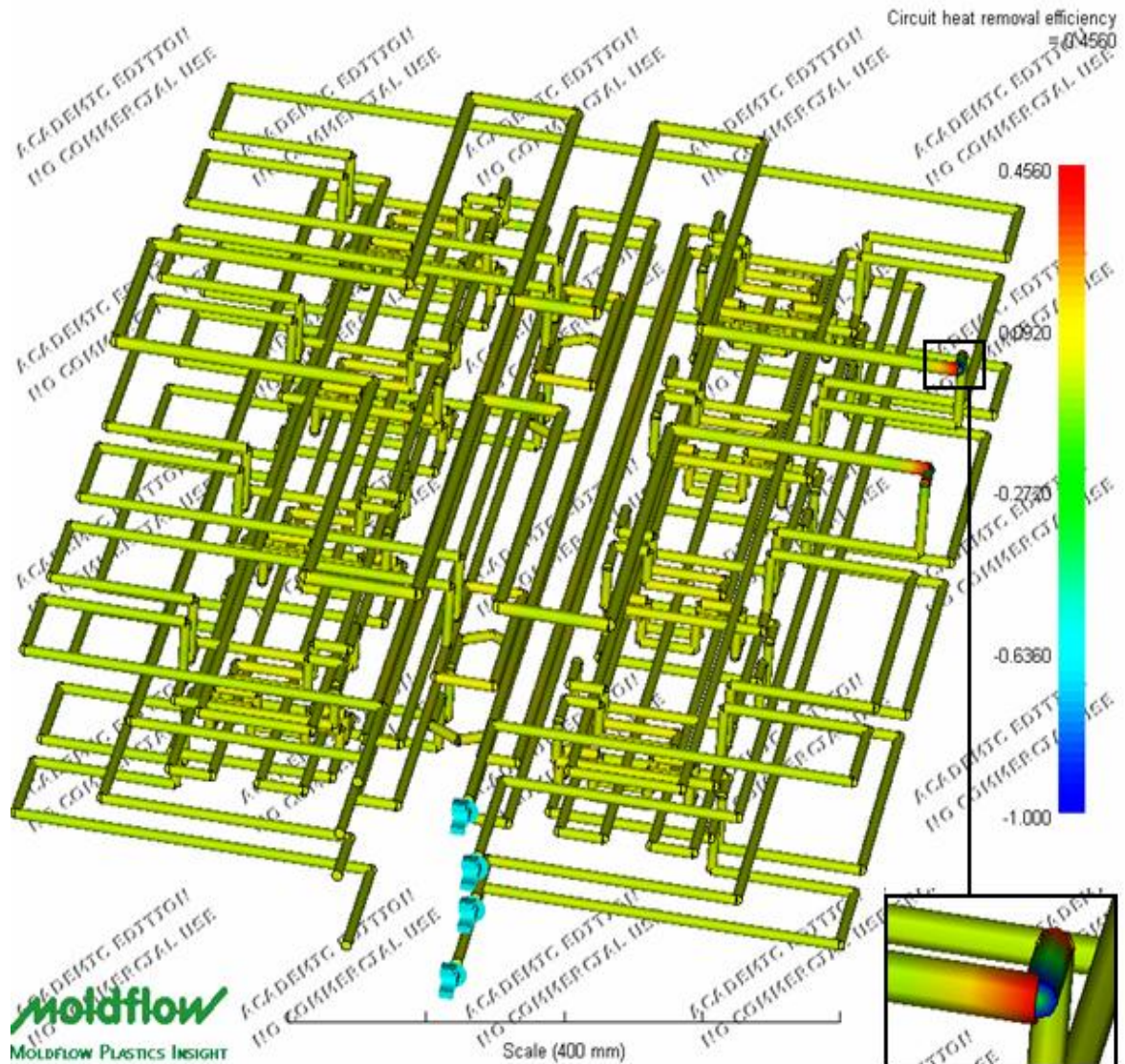


Obr. 33. Průběh teploty v chladícím obvodu

Vstupující médium má teplotu 30 °C. Na výstupu dle obr. 33. dosahuje temperační médium teploty 30,02 °C, což činí rozdíl 0,02 °C. Maximální rozdíl teplot mezi vstupním a výstupním médiem by měl dosahovat maximálně 5 °C. Navržené okruhy tuto podmínku splňují.

8.3.6 Efektivita odvodu tepla

Znázornění schopnosti jednotlivých temperačních okruhů odvádět teplo.

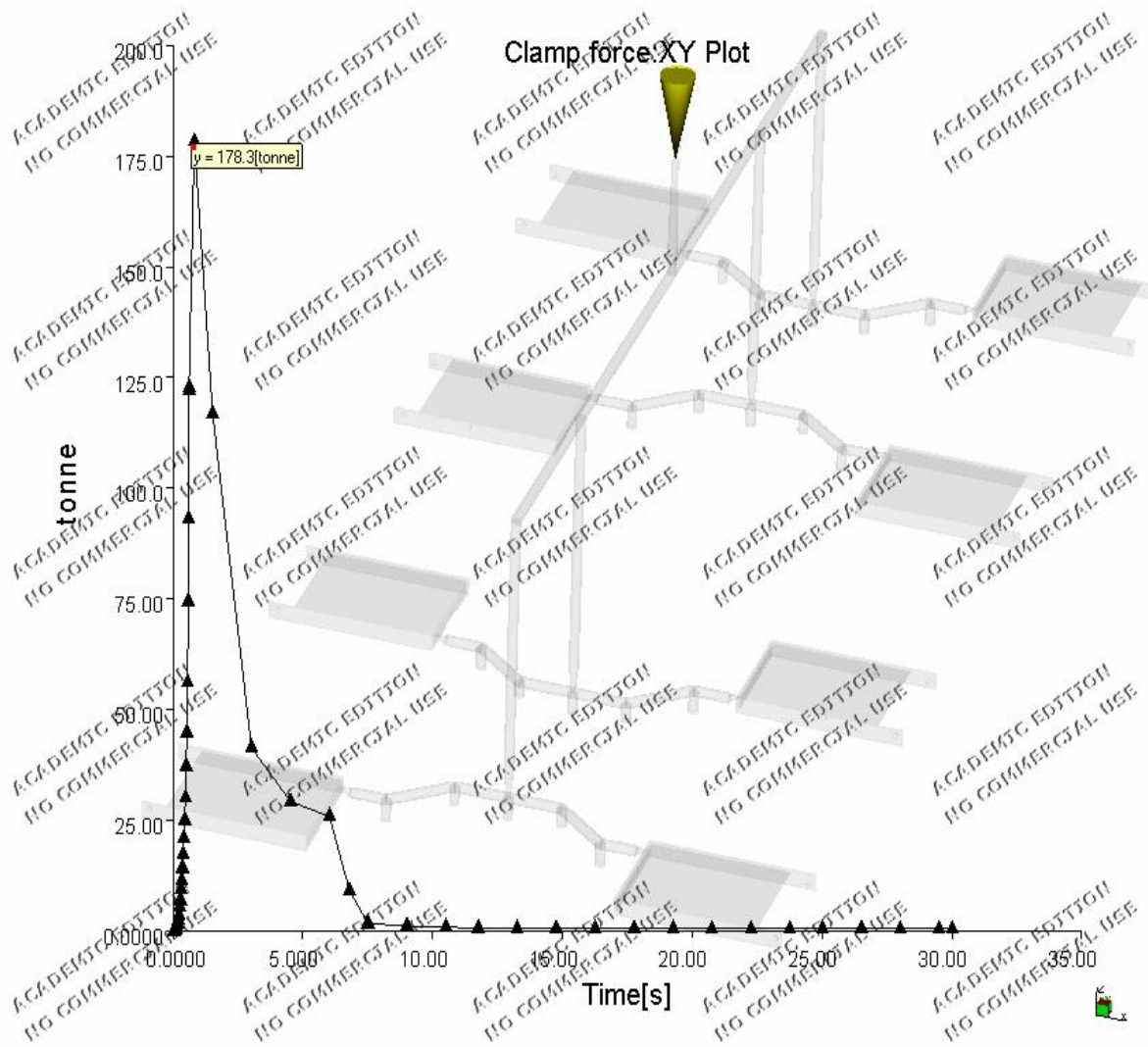


Obr. 34. Efektivita odvodu tepla

Maximální efektivita chlazení dosahuje pouze v místě, kde dochází k redukci okruhu z průměru 8 mm na průměr 10 mm, což znázorňuje detail na obr. 34. Celkově chlazení má průměrnou efektivitu přibližně 20 %. V místech, ve kterých je hodnota záporná, dochází k ohřívání výstřiku a tím se efektivita chlazení v daném místě snižuje.

8.3.7 Průběh uzavírací síly

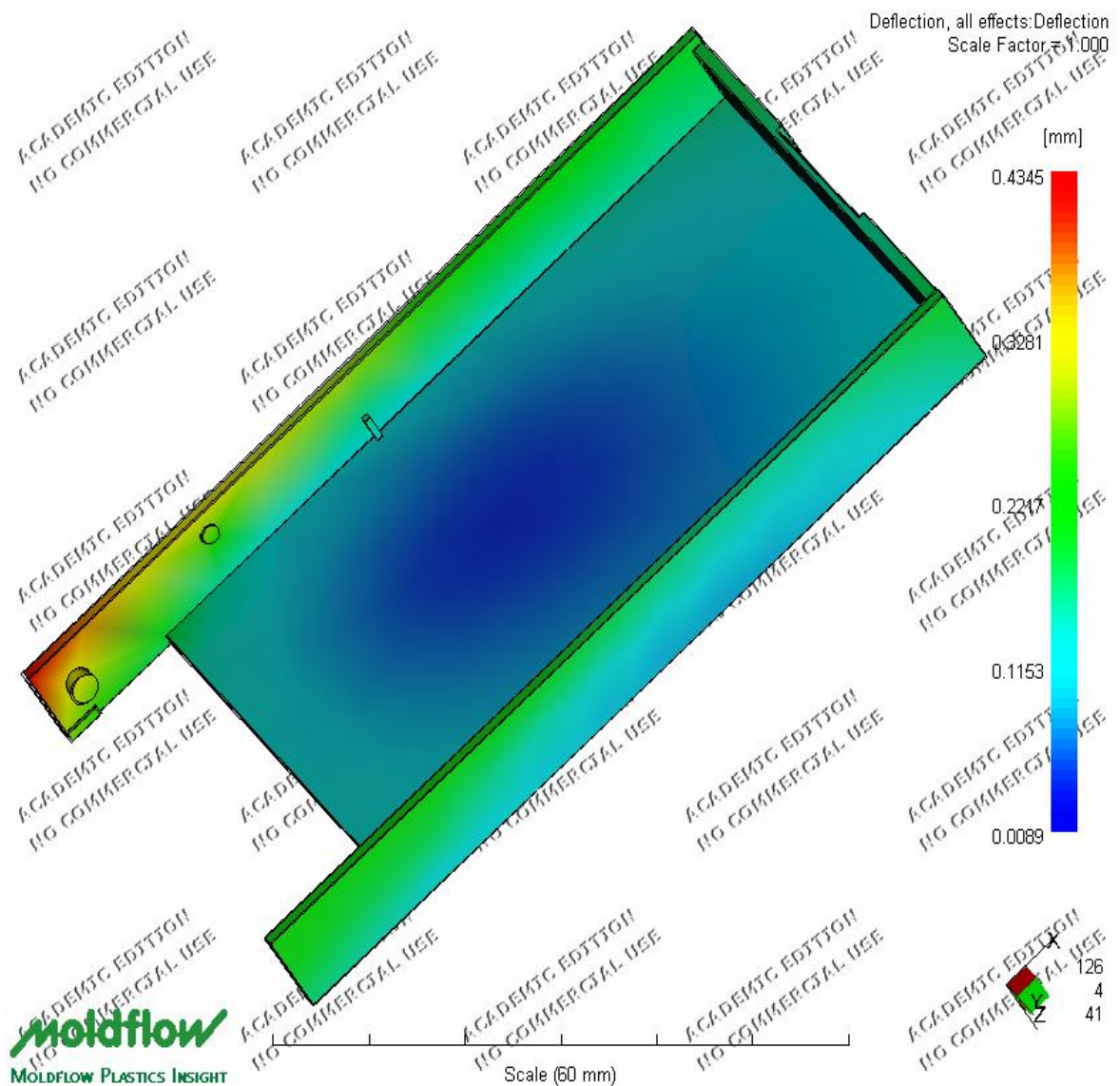
Potřebná uzavírací síla je rovna hodnotě 178,3 t. V porovnání s variantou 2. se hodnota zvýšila 55,2 t.



Obr. 35. Průběh uzavírací síly

Došlo zde k překročení maximální potřebné uzavírací síla o 1,05 %. Tím pádem také ke snížení bezpečnostního faktoru, a tudíž je tato varianta nevhodná.

8.3.8 Celková deformace vstříkované části



Obr. 36. Celková deformace vstříkované části

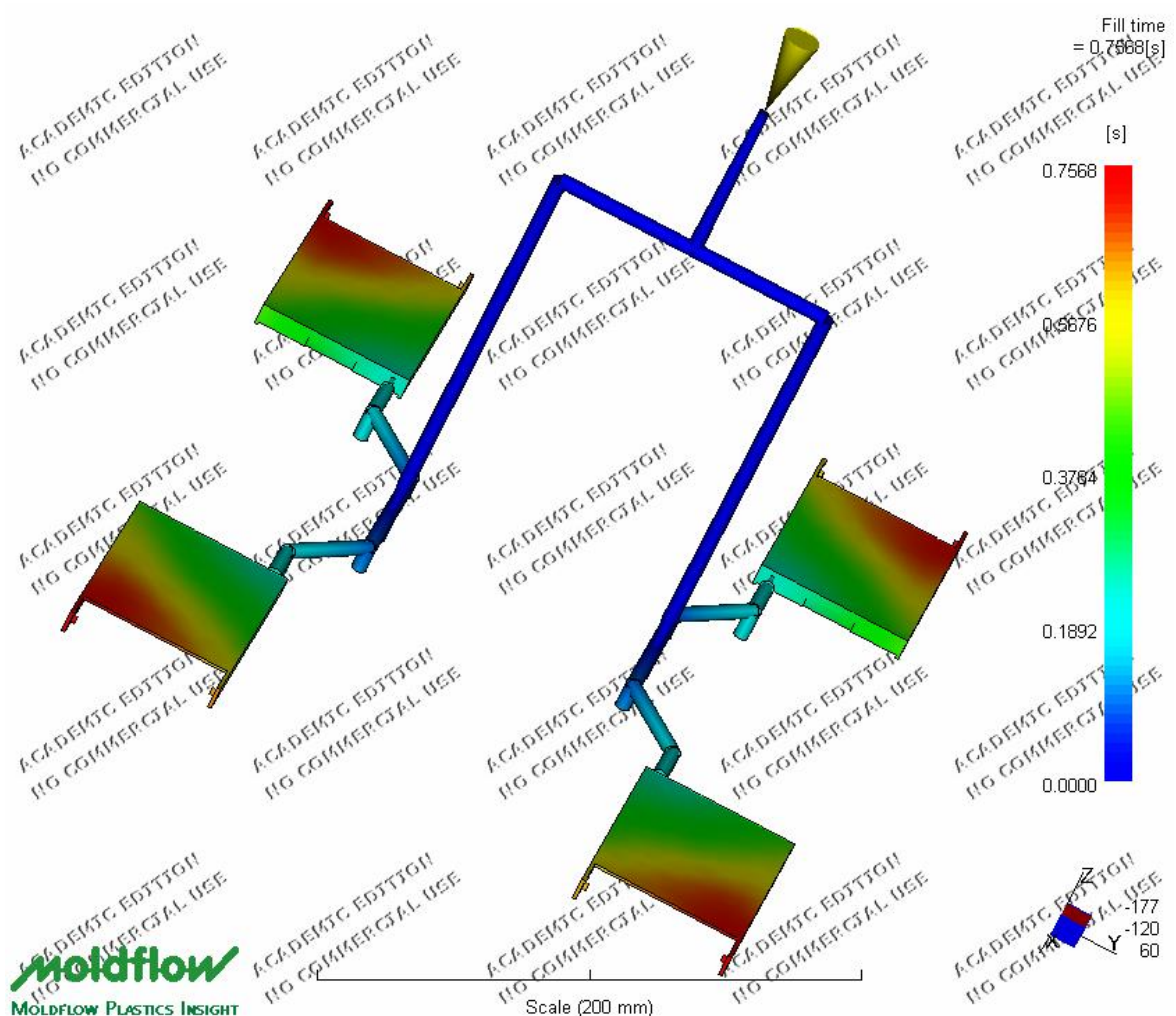
Celková deformace vzniklá především objemovým smrštěním je rovna hodnotě 0,44 mm. Ve srovnání s variantou 2. došlo ke zlepšení o zanedbatelnou hodnotu 0,05 mm.

8.4 Varianta 4. – vytvoření nové, čtyřnásobné vstřikovací formy

8.4.1 Procesní podmínky při návrhu nové formy

Byla navržena nová, čtyřnásobná vstřikovací forma, která obsahuje dvě horké trysky. Temperační kanálky byly navrženy dle výrobních výkresů pro původní osmi násobnou formu. Byly pouze zkráceny pro temperaci čtyř dutin vstřikovací formy. Hodnoty pro vstřikování jsou shodné s variantou 2 a jsou uvedeny v tab. 5.

8.4.2 Plnění dutiny formy

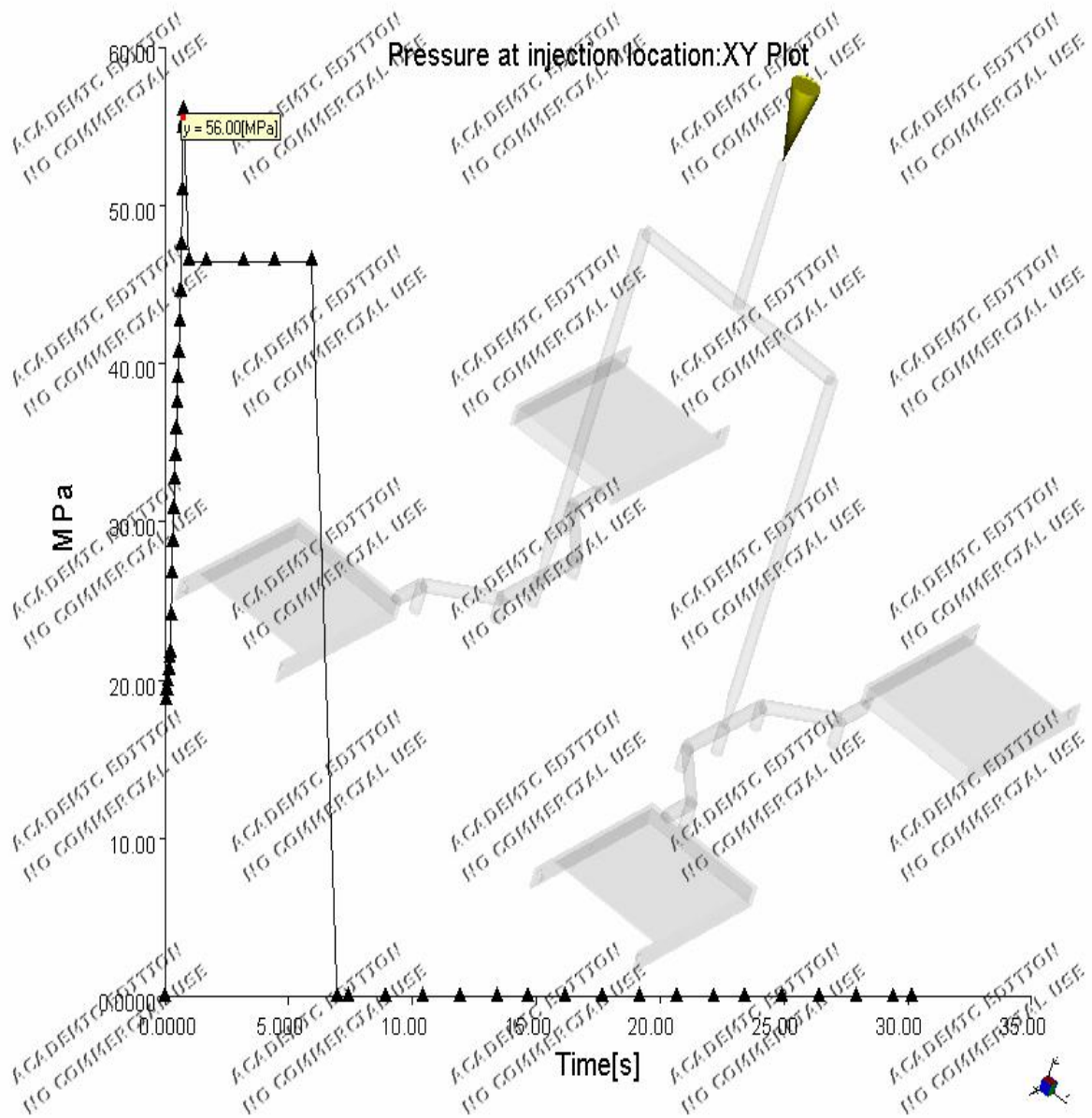


Obr. 37. Plnění dutiny formy

Při návrhu nové formy je čas pro zaplnění formy taveninou roven hodnotě 0,76 s.

8.4.3 Průběh tlaku v místě vstříku

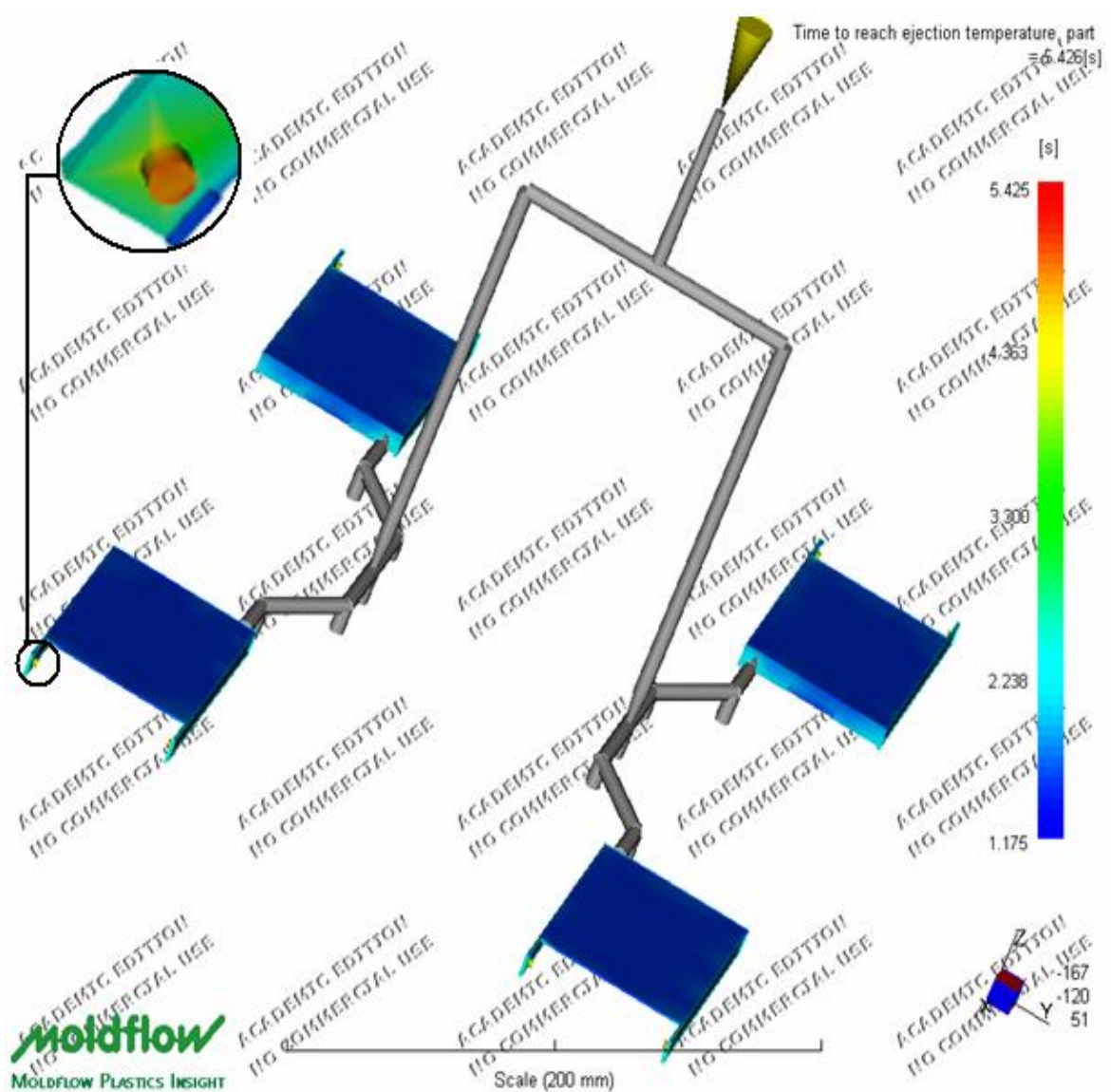
Na obr. 38. je znázorněn průběh změny tlaku během vstřikování. Maximální tlak v místě vstříku je roven hodnotě 56 MPa. Ve srovnání s osminásobnou formou u varianty 2. dochází ke zvýšení tlaku 1,17 MPa.



Obr. 38. Průběh tlaku v místě vstříku

8.4.4 Čas zatuhnutí výrobku

Při návrhu čtyřnásobné formy je čas potřebný k zatuhnutí všech vrstev roven hodnotě 5,4 s. Oproti nejlépe jeví se variantě 2. dochází v tomto případě ke zlepšení o 7,7 s. Jak již bylo dříve zmiňováno, opět nejvyšší doba zatuhnutí je v místě čepu, který při vyhazování z formy pomocí robotu s přísavkami nebude nijak deformován. Tím výstřik z formy může být vyhozen již při zatuhnutí plochy, na kterou dosedají přísavky robotu. Pomocí barevného spektra je zřetelné, že doba potřebná k zatuhnutí horní plochy výstřiku je přibližně rovna 1,5 s.

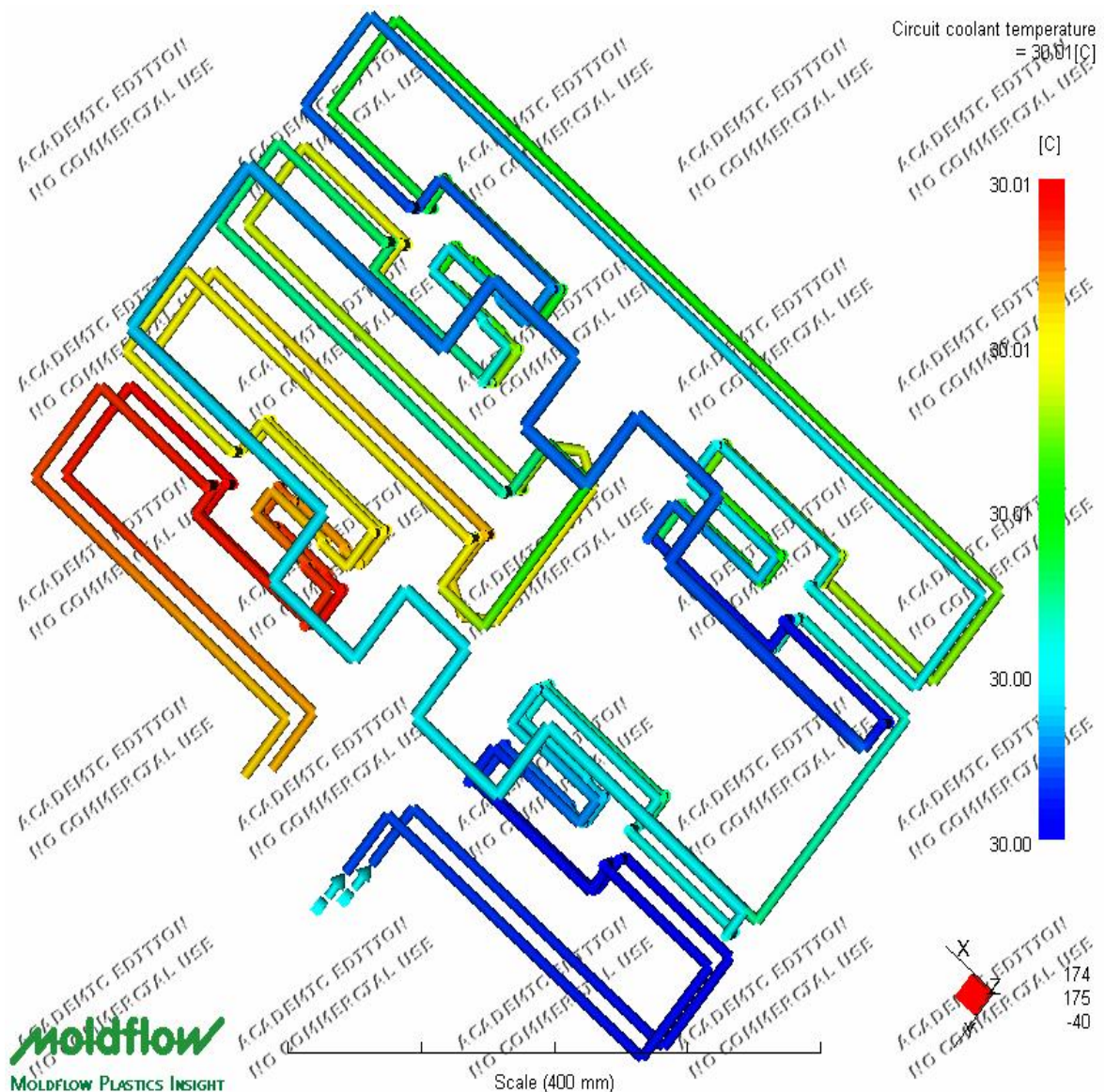


Obr. 39. Čas zatuhnutí výrobku

8.4.5 Průběh teploty v chladicím obvodu

Při návrhu nové čtyřnásobné formy byly okruhy temperačních kanálků zachovány dle současné formy, pouze však zúženy z osminásobné formy na čtyřnásobnou. Jako temperační médium se používá upravená voda.

Pomocí této analýzy dochází ke srovnání teploty temperačního média od místa vstupu do místa výstupu v chladicím okruhu. Rozdíl těchto teplot činí 0,01 °C, což splňuje podmínku maximálního rozdílu 5 °C.



Obr. 40. Průběh teploty v chladicím obvodu

8.4.6 Efektivita odvodu tepla

Znázornění schopnosti chlazení v navrženém temperačním okruhu.



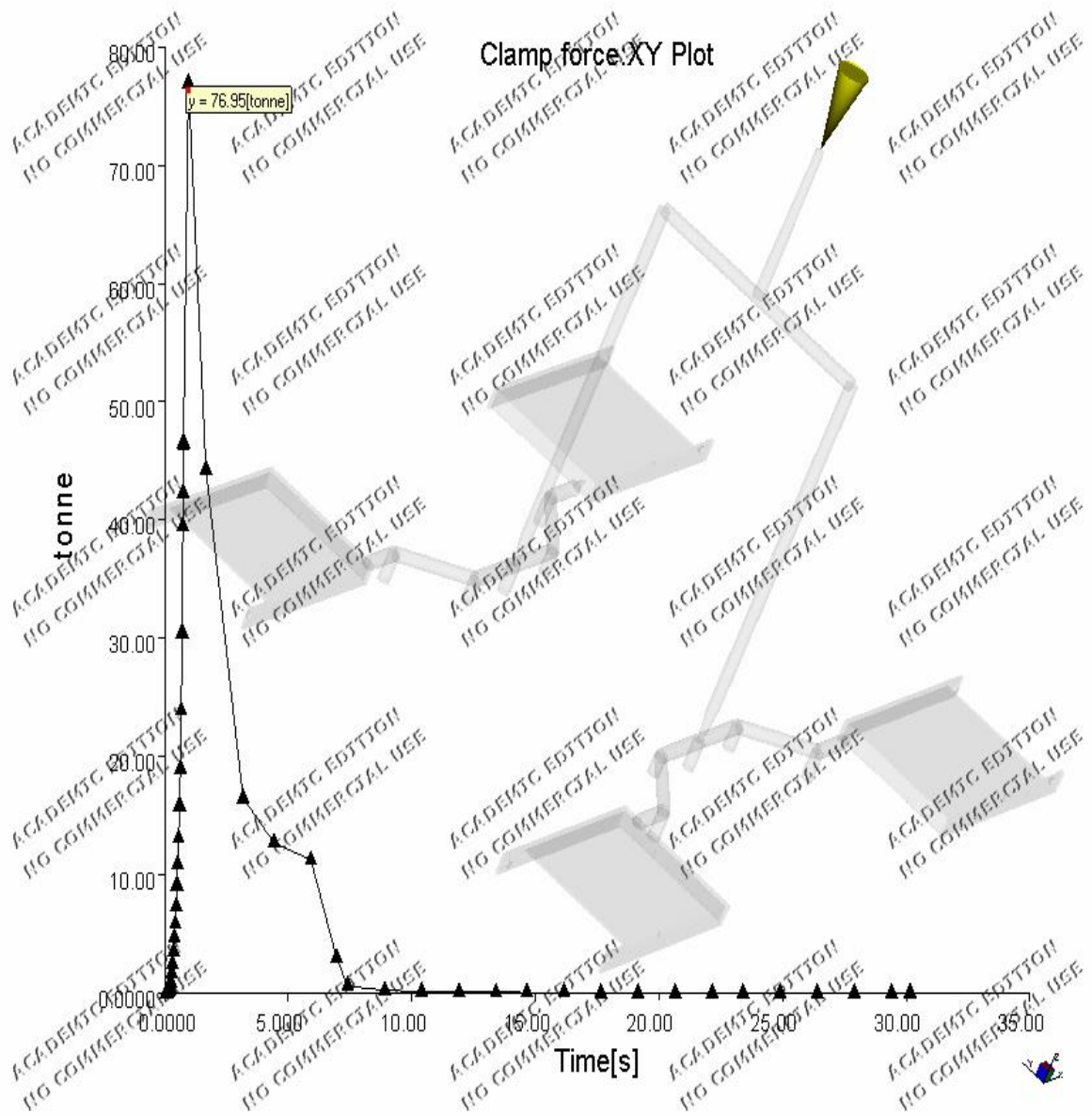
Obr. 41. Efektivita odvodu tepla

Maximální efektivita chlazení dosahuje pouze v místě, kde dochází redukci okruhu z průměru 8 mm na průměr 10 mm, což znázorňuje detail na obr. 41.

Průměrná hodnota efektivity temperačního okruhu je rovna přibližně 20 %. V místech, kde je dosaženo záporných hodnot dochází k ohřevu výstřiku a tím se efektivita odvodu tepla v daném místě snižuje.

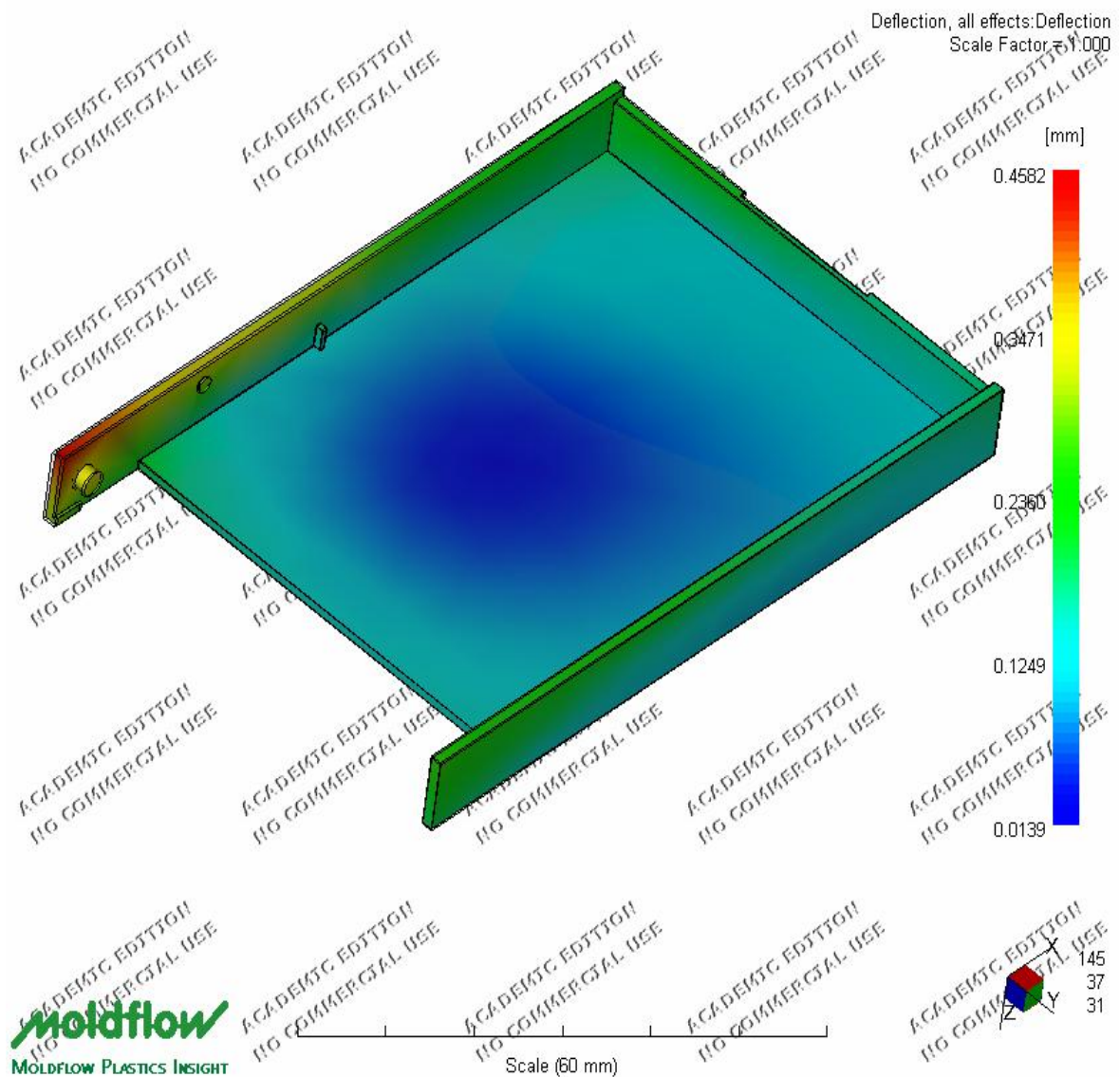
8.4.7 Průběh uzavírací síly

Při návrhu nové čtyřnásobné formy je zapotřebí uzavírací síly 76,95 t. Jedná se o téměř poloviční sílu než při použití osminásobné formy. Výhodou je použití menších a tím pádem levnějších vstřikovacích strojů.



Obr. 42. Průběh uzavírací síly

8.4.8 Celková deformace vstříkované části



Obr. 43. Celková deformace vstříkované části

Největší deformace vzniká v okolí místa čepu a rovná se 0,46 mm. Tato deformace je o 0,03 mm menší než při nejlépe se především finančně jevící variantě 2. Tento rozdíl hodnot je však zanedbatelný.

8.5 Porovnání variant pro návrh výroby spodního dílu krabičky

Tab. 6. Porovnání variant pro spodní dílec

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	Jednotky
Doba plnění	0,49	0,69	0,61	0,76	[s]
Tl. v místě vstříku	42,37	54,83	62,55	56,00	[MPa]
Čas zatuhnutí	24,47	13,08	11,72	5,42	[s]
Uzavírací síla	131,5	123,1	178,30	76,95	[t]
Deformace	0,54	0,49	0,44	0,46	[mm]

V tab.6. jsou vypsány základní hodnoty, které budou dále sloužit k porovnání a vyhodnocení nejvhodnější varianty.

Varianta 1. - byla sestavena podle dostupných parametrů nastavení vstřikovacího stroje, které byly získány z firmy GM, spol. s. r. o. Vyškov. Po namodelování součásti v programu CATIA V5 byla součást v pracovní verzi převedena do programu MPI, kde byly provedeny následné analýzy. Tyto analýzy se v některých případech lišily od skutečného procesu. To však může být ovlivněno nepřesnostmi během vstřikování, teploty okolí, teplotní ztráty u temperačního média aj.

Varianta 2. - byla sestavena pomocí varianty 1., kde byly upraveny teploty polymerní taveniny ve vtokovém systému, v horkých tryskách a také teplota temperačního média. Tyto změněné hodnoty jsou uvedeny v tab. 5. Varianta 2. se jeví jako nejvýhodnější z důvodu snížení času zatuhnutí polymerní taveniny v dutině formy, snížení uzavírací síly a především z důvodů finančních, jelikož se nejedná o žádný zásah do vstřikovací formy.

Varianta 3. - byla sestavena za použití stávající vstřikovací formy a byly pouze přidány dva temperační okruhy v levé i pravé části formy. Tímto došlo ke snížení hodnoty zatuhnutí polymerní taveniny v dutině formy, ale ve srovnání s náklady na úpravu formy o zanedbatelnou hodnotu. Dále byl překročen bezpečnostní faktor uzavírací síly o 1,05%.

Varianta 4. – byla navržena nová čtyřnásobná forma. Tato varianta má výhodu použití menšího a tím pádem levnějšího vstřikovacího stroje, ale ve srovnání s dobou zatuhnutí polymerní taveniny v dutině formy je tento čas pro vstříknutí osmi dílců téměř srovnatelný.

Z ekonomického hlediska by tato varianta byla nejnákladnější.

9 ANALÝZY VSTŘIKOVACÍHO PROCESU PRO SPODNÍ DÍL

9.1 Varianta 1. – současné vstřikování

9.1.1 Procesní podmínky při současném vstřikování

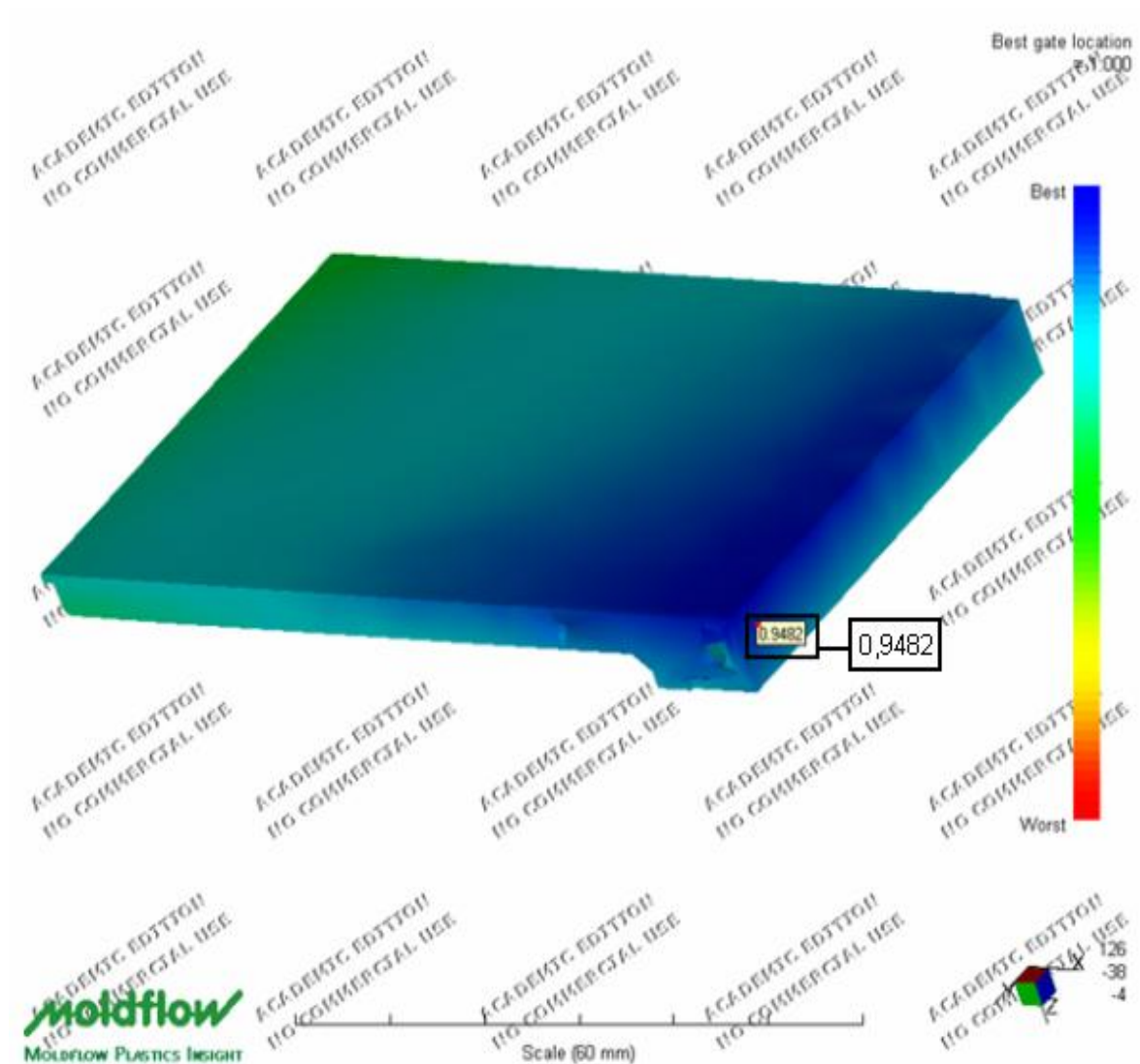
Pro simulaci vstřikovacího procesu je nutné stanovit základní okrajové podmínky, dále vytvořit kopii umístění jednotlivých dutin vstřikovací formy, temperačního a vtokového systému.

Pro současné vstřikování spodního dílu byly v programu MPI nastaveny procesní podmínky, které používá firma GM, spol. s. r. o. Vyškov, a jsou uvedeny v parametrech seřízení stroje.

Tab. 7. Procesní podmínky při současném vstřikování

Teplota formy	°C	60
Teplota taveniny	°C	255
Čas otevření formy	s	5
Čas cyklu	s	31,8
Čas vstřiku	s	0,55
Bod přepnutí	s	17,2
Čas dotlaku	s	2,2
Pokles tlaku vůči vstřikovacímu	%	85,5
Teplota horkého vtoku	°C	300
Teplota temperačního média	°C	60
Proud temperačního média	L /min	60

9.1.2 Umístění vtoku



Obr. 44. Vhodné místo pro umístění vtoku

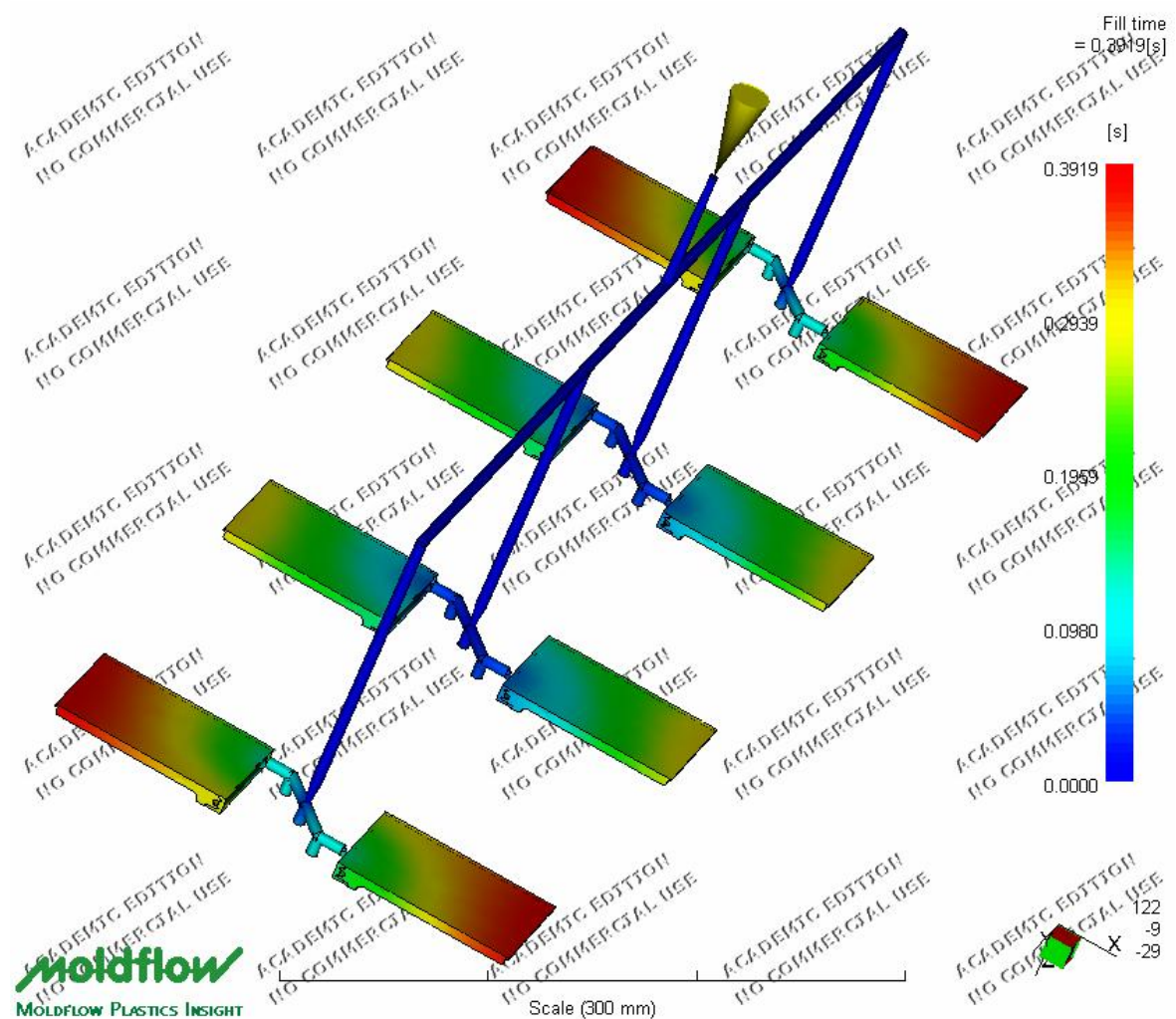
Byla provedena analýza umístění vtoku (Gate Location), za jejíž pomoci bylo zjištěno nejvhodnější místo pro vtok. Před výpočtem je nutné stanovit tvar vstřikované části, definovat vstřikovací stroj, druh a teploty vstřikovaného polymeru.

Místo umístění vtoku, které bylo určeno pomocí analýzy Gate Location, se téměř shoduje se současným místem a je vhodné z 94,82 %.

9.1.3 Plnění dutiny formy

V současné době je dutina formy plněna za pomoci čtyř horkých trysek a čtyř studených rozvodných kanálků.

Podle výrobních výkresů vstřikovací formy, byl sestaven přesný model a provedena analýza plnění (Fill), která určí čas, potřebný k zaplnění formy polymerní taveninou. Pro výpočet je nutné definovat vstřikovací stroj, druh a teploty vstřikovaného polymeru, definovat rozvodné kanálky a horké trysky.

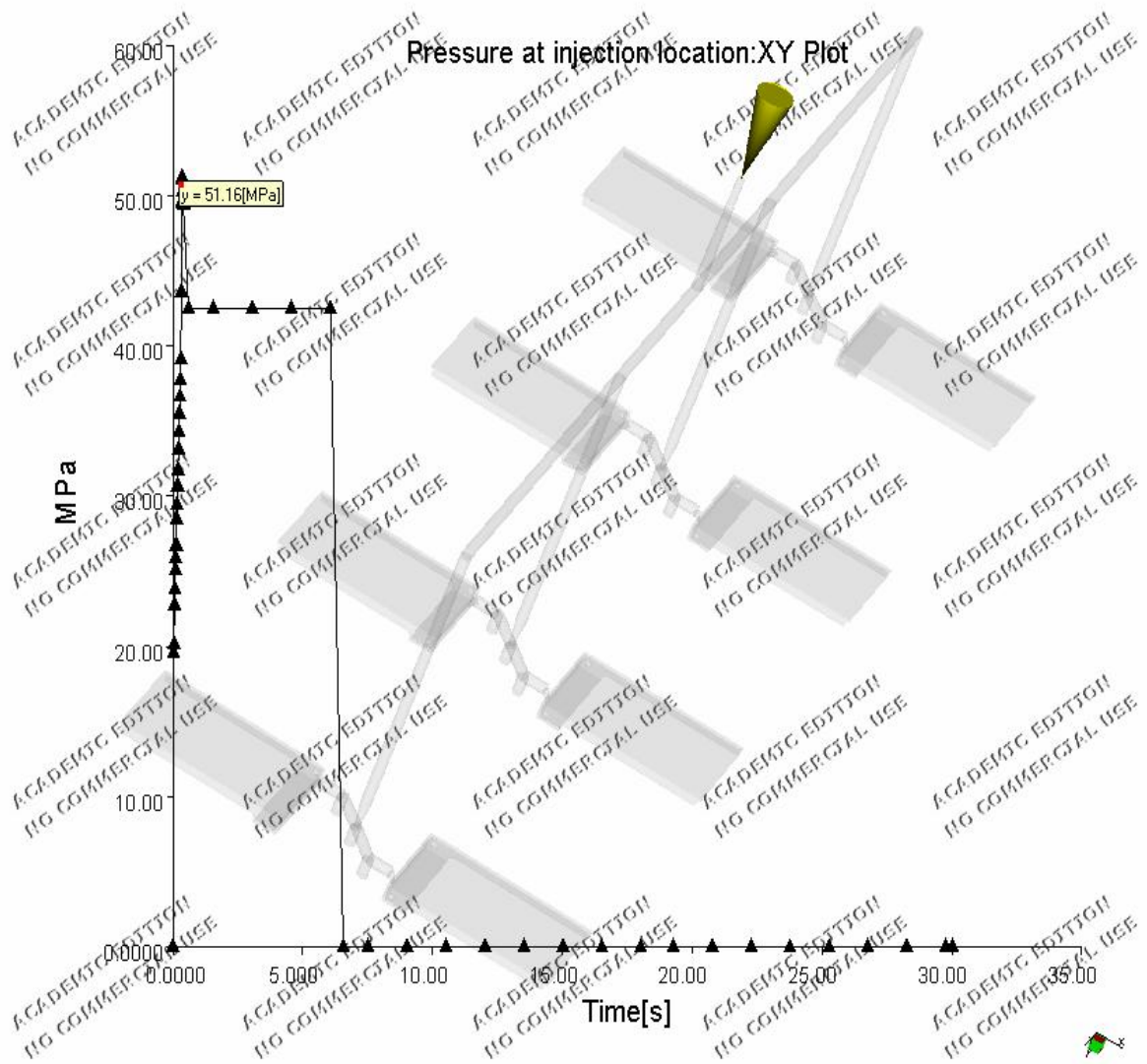


Obr. 45. Plnění dutiny formy

Potřebná doba pro zaplnění dutiny formy při nastavených podmínkách dle parametrů seřízení stroje byla spočtena na 0,39 s. Tato doba je nižší než skutečná doba vstřikované součásti, což může být ovlivněno různými nepřesnostmi během vstřikování.

9.1.4 Průběh tlaku v místě vstřiku

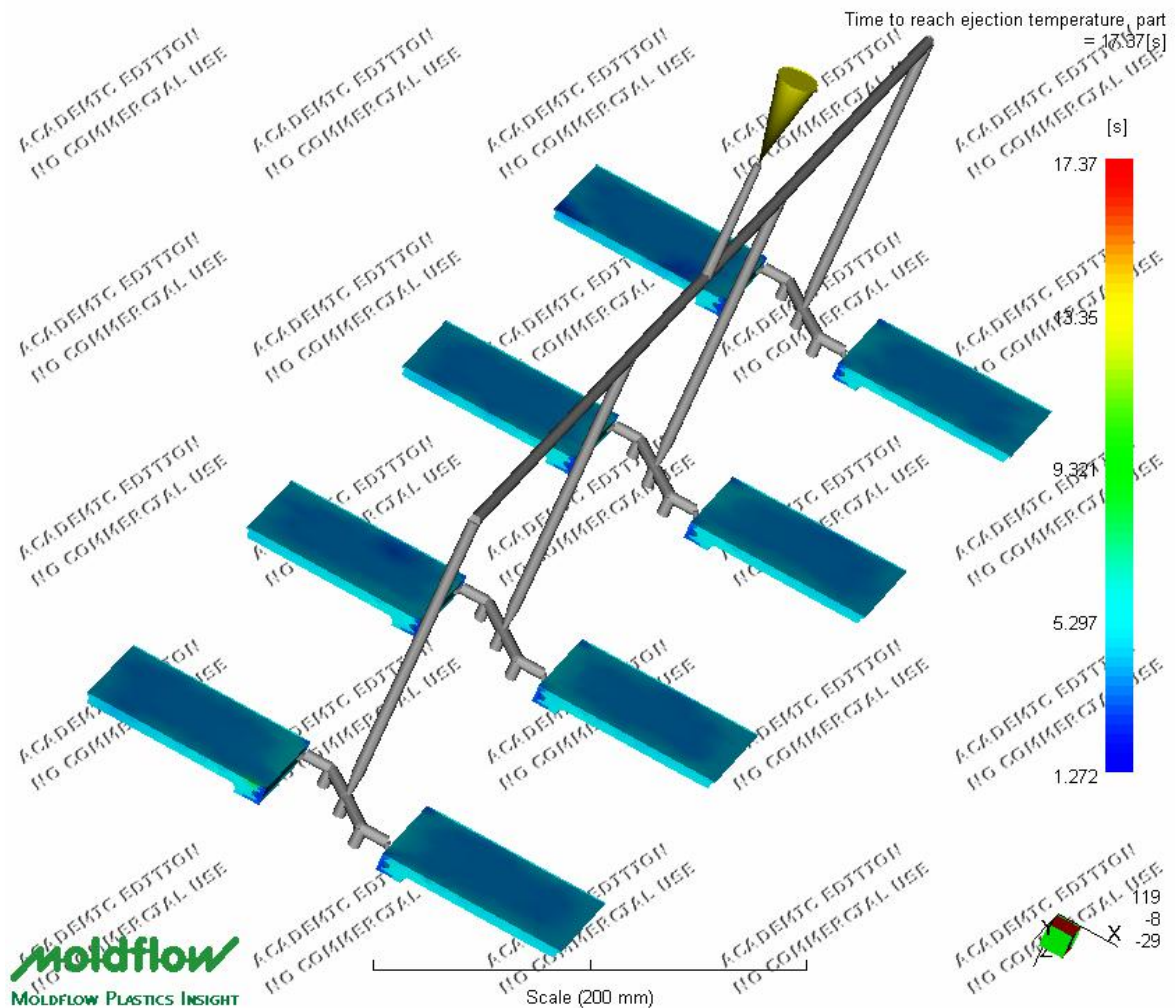
Graf znázorňuje tlak v místě vstřiku. Křivka zaznamenává změnu tlaku v tomto kritickém místě při průběhu fází: vstřik, dotlak, chlazení. Hodnota maximálního tlaku je rovna hodnotě 51,16 MPa.



Obr. 46. Průběh tlaku ve formě

9.1.5 Čas zatuhnutí výrobku

Jedná se o čas potřebný k zatuhnutí všech vrstev v dutině formy. Udává dobu od konce plnění až k vyhazovací teplotě. U silnostěnných výrobků postačuje zchlazení z 80 %. U ostatních menších výrobků je postačující pouze z 50 %. V tomto případě tato možnost odpadá, jelikož vstřikovací forma obsahuje horký vtokový systém.

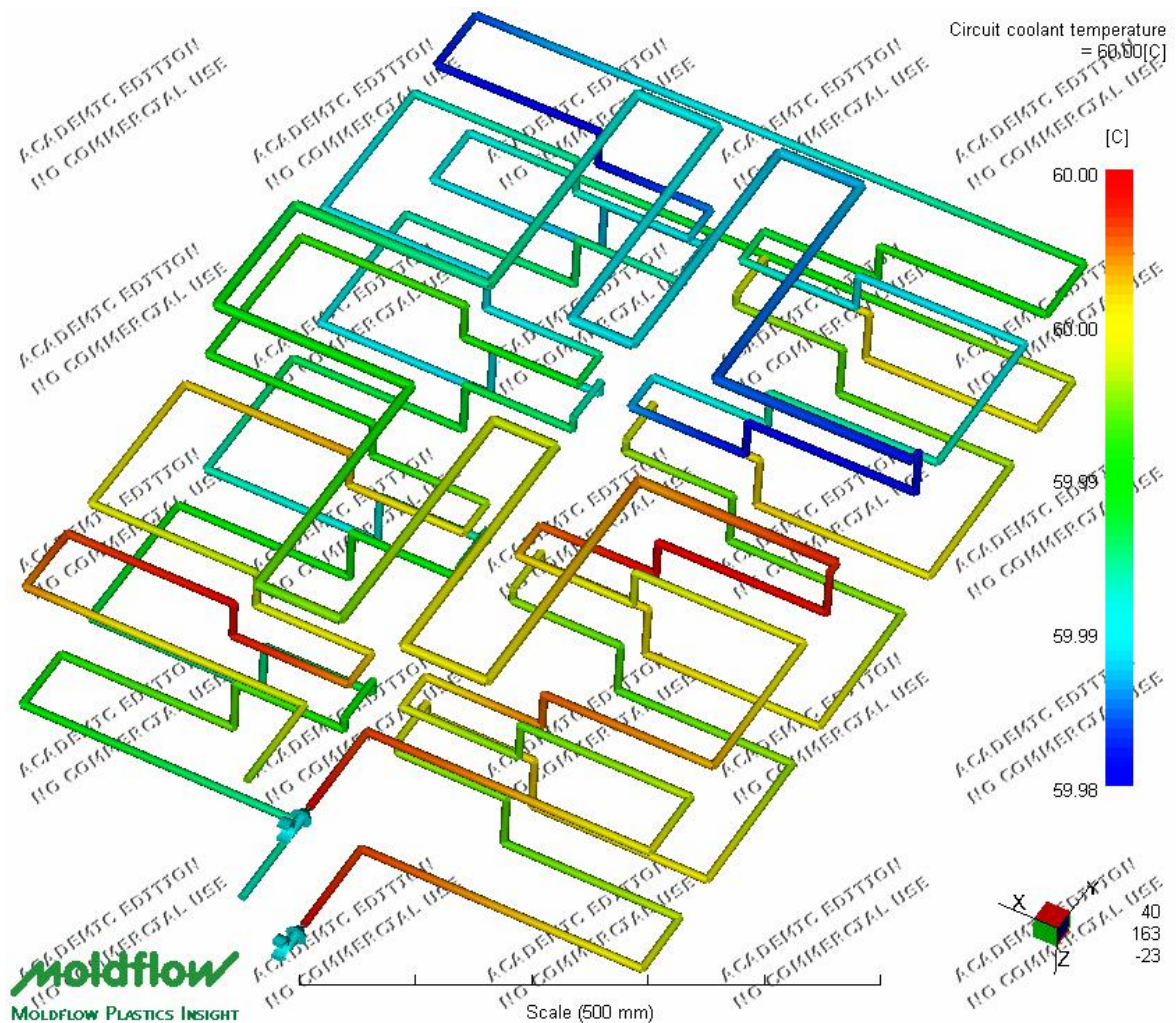


Obr. 47. Čas zatuhnutí výrobku

Ve skutečném případě se čas zatuhnutí rovná hodnotě 18,5 s. Namodelovaná situace vykazuje hodnotu 17,37 s. Rozdíl mezi skutečnou a namodelovanou hodnotou činí 1,13 s. Tento čas bude snahou v dalších variantách snížit na optimální hodnotu.

9.1.6 Průběh teploty v chladícím obvodu

Analýza teploty chladicího média v obvodu zobrazuje změnu teploty média od místa vstupu do místa výstupu v chladícím obvodu. Rozdíl teplot chladicího média na vstupu a výstupu v jednom temperačním obvodu by neměl překročit 5 °C.



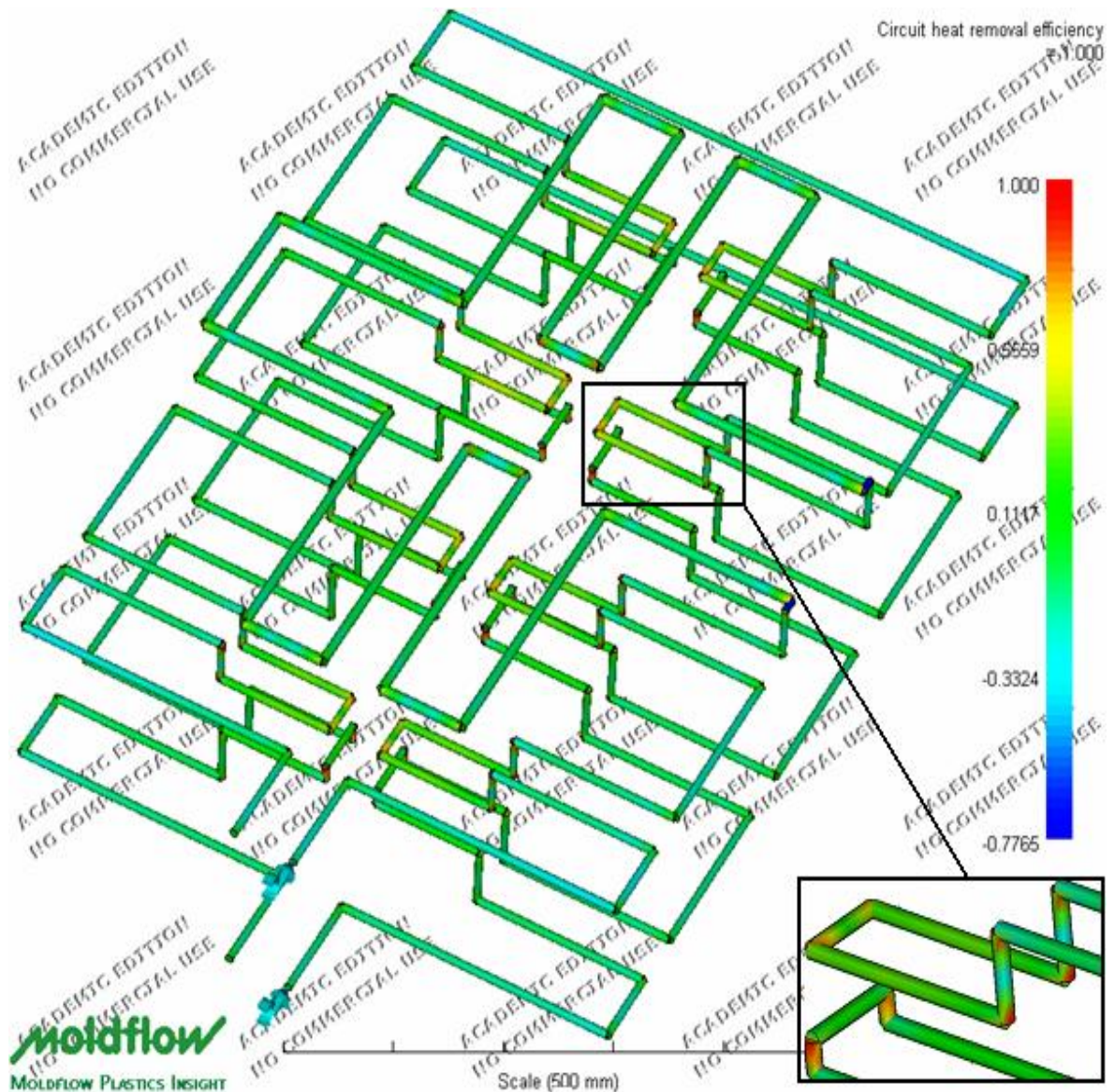
Obr. 48. Průběh teploty v chladícím obvodu

Na obr. 48. je vidět teplota chladicího média uvnitř chladicího obvodu. Rozdíl teplot na vstupu a výstupu je roven hodnotě 0,02 °C. Navržené chlazení je vyhovující.

Levý temperační okruh je realizován vrtanými otvory o průměru 8 mm. Pravý temperační okruh je také o průměru 8 mm, ale dále okruh kolem horkých trysek je redukován na průměr 10 mm. Jako temperační médium se užívá upravená voda.

9.1.7 Efektivita odvodu tepla

Schopnost jednotlivých temperačních okruhů odvádět teplo znázorňuje na obr. 49. Efektivita je závislá na vzdálenosti temperačních kanálů od modelu, Reynoldsově číslu, rozdílu teplot mezi chladícím médiem a formou v dané oblasti.

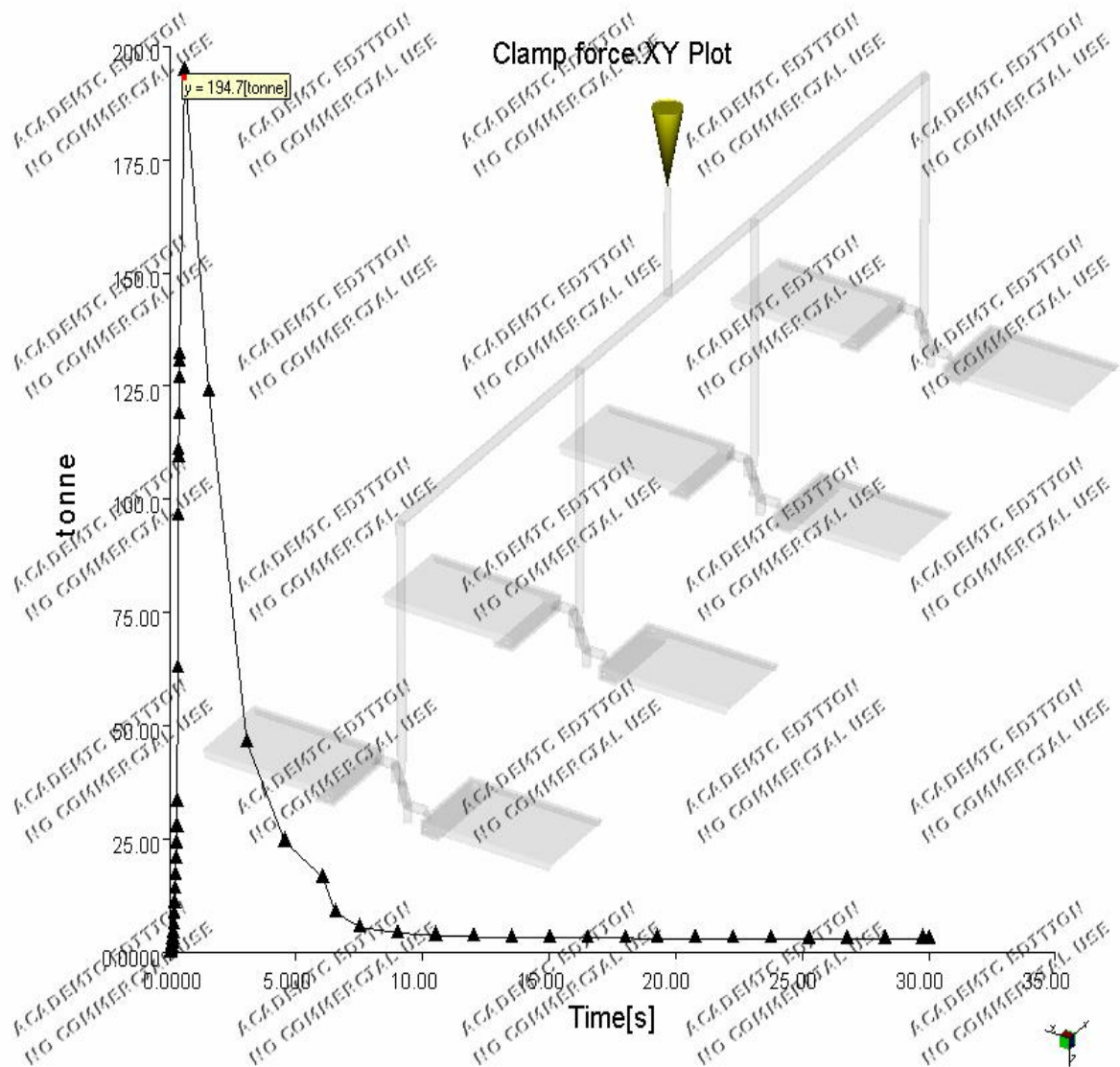


Obr. 49. Efektivita odvodu tepla

Na obr. 49. je znázorněn detail okruhu pro jeden výstřik. Části chladícího okruhu blízké se v barevné škále hodnotě 1 mají účinnost 100 % odvodu tepla. Ty části, které se pohybují v záporných hodnotách, formu spíše ohřívají, než chladí.

9.1.8 Průběh uzavírací síly

Tato závislost určuje změnu uzavírací síly během vstřikování. Maximální potřebná uzavírací síla pro vstřikovací formu by měla odpovídat 80 % maximální uzavírací síly vstřikovacího stroje. Zbývajících 20 % je považováno za bezpečnostní faktor.

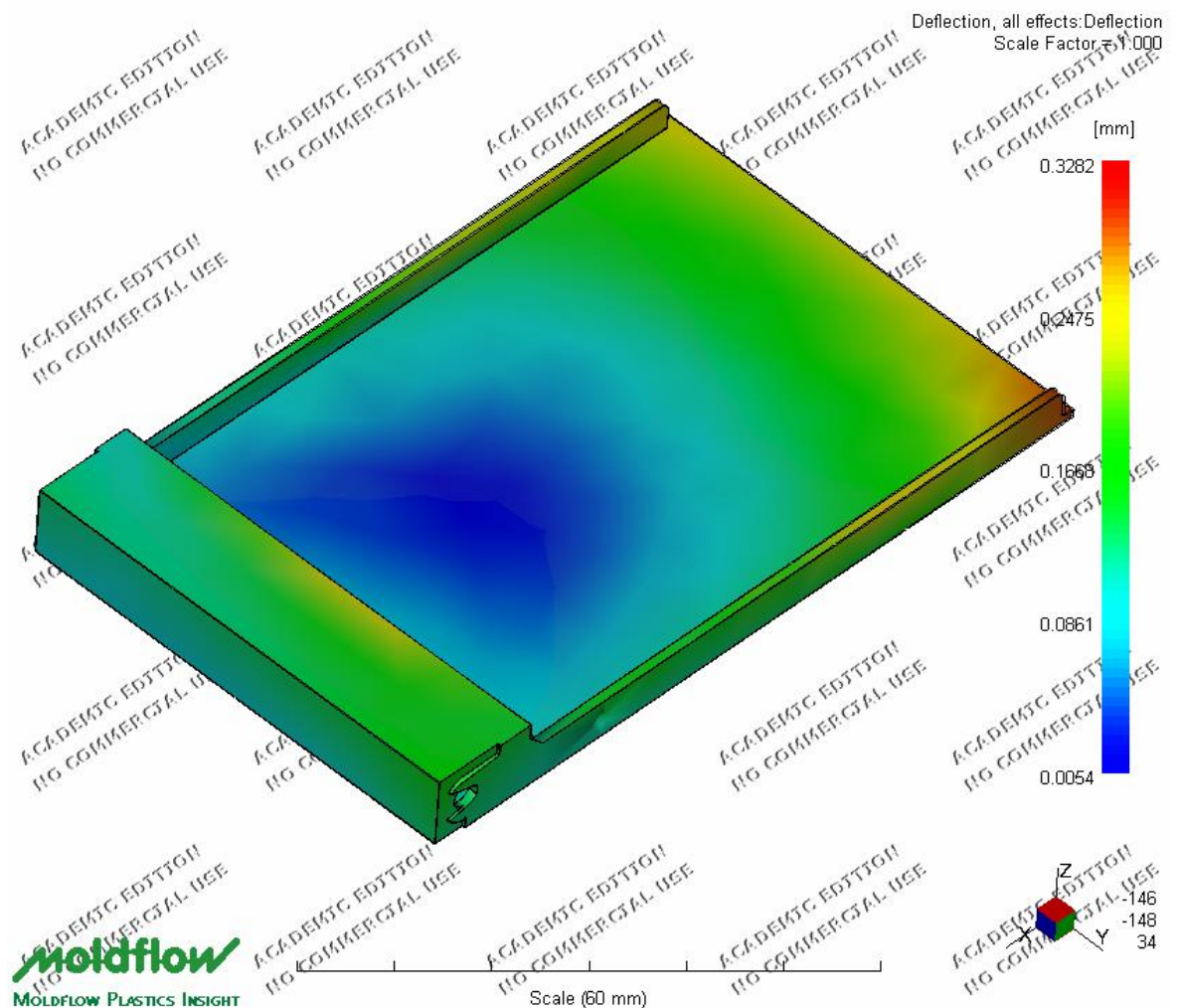


Obr. 50. Průběh uzavírací síly

Hodnota potřebné uzavírací síly činí 194,7 t. Dochází zde k překročení maximální potřebné uzavírací síly o 8,5 %. Této hodnoty se využívá především pro volbu vhodného vstřikovacího stroje.

9.1.9 Celková deformace vstříkované části

Byla provedena analýza deformace (Warp), pomocí které je zobrazena celková deformace výrobku způsobená různými vlivy, kterými jsou: chlazení, smrštění, orientace. Každý z výsledků je zobrazován celkově i ve třech osách (x, y, z). Nejvyšší vliv na celkové deformace má smrštění.



Obr. 51. Celková deformace vstříkované části

Každý polymerní materiál má definované smrštění v podélném a kolmém směru. S ohledem na toto smrštění je třeba navrhnout dutinu formy o danou velikost smrštění větší, z důvodu aby výrobek po ochlazení dosahoval požadovaných parametrů. V tomto případě celkové smrštění je o velikosti 0,33 mm.

9.2 Varianta 2. – regulace teplot taveniny a temperačního média

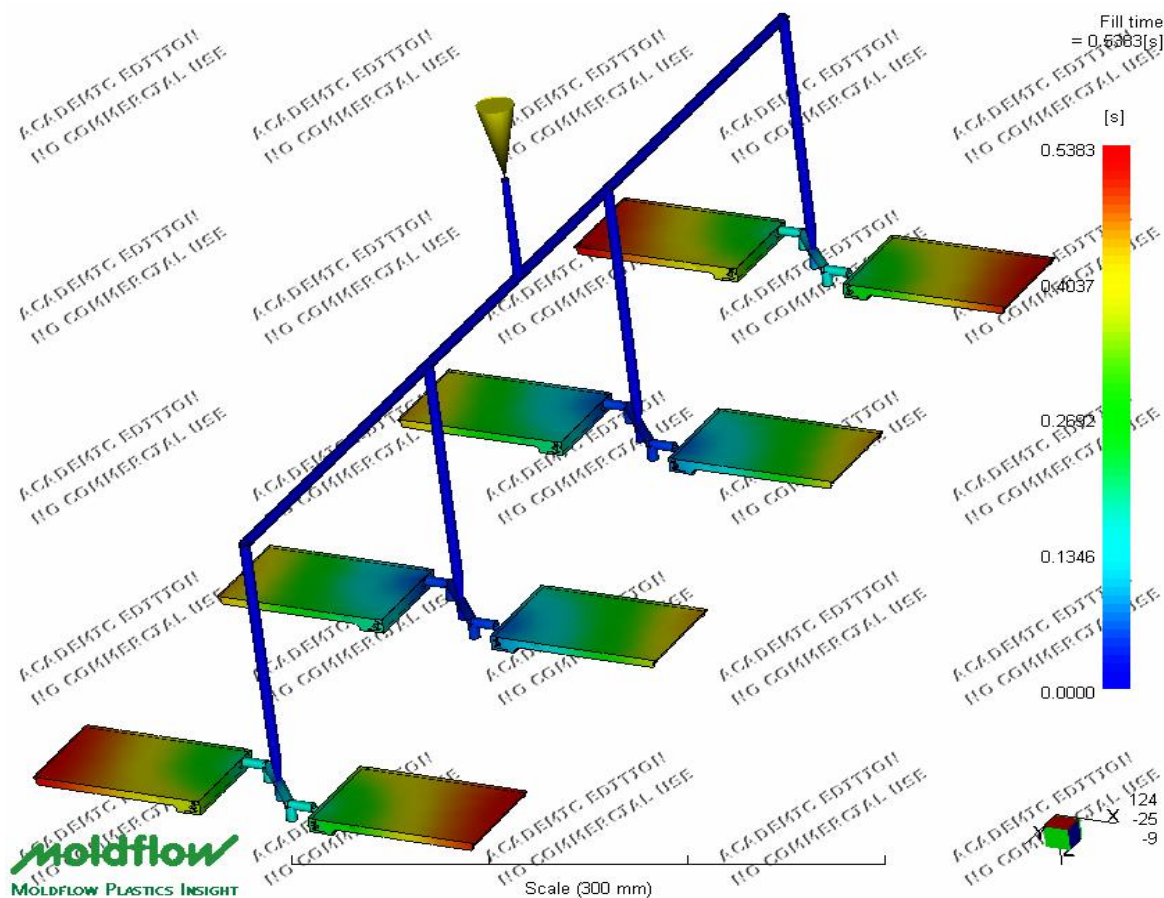
9.2.1 Procesní podmínky při regulaci teplot současného vstřikování

Nyní byla upravena hodnota teploty temperačního média, ale také teplota taveniny ve vstřikovacím stroji a v horkých tryskách. V tab. 8. jsou uvedeny změněné hodnoty pro vstřikování při této regulaci teplot. Dále budou použity i v následujících variantách, aby mohlo dojít ke srovnání výsledků a vybrání nejvhodnější varianty.

Tab. 8. Procesní podmínky pro následující tři varianty

Teplota formy	°C	30
Teplota taveniny	°C	245
Teplota horkého vtoku	°C	255
Teplota temperačního média	°C	30

9.2.2 Plnění dutiny formy

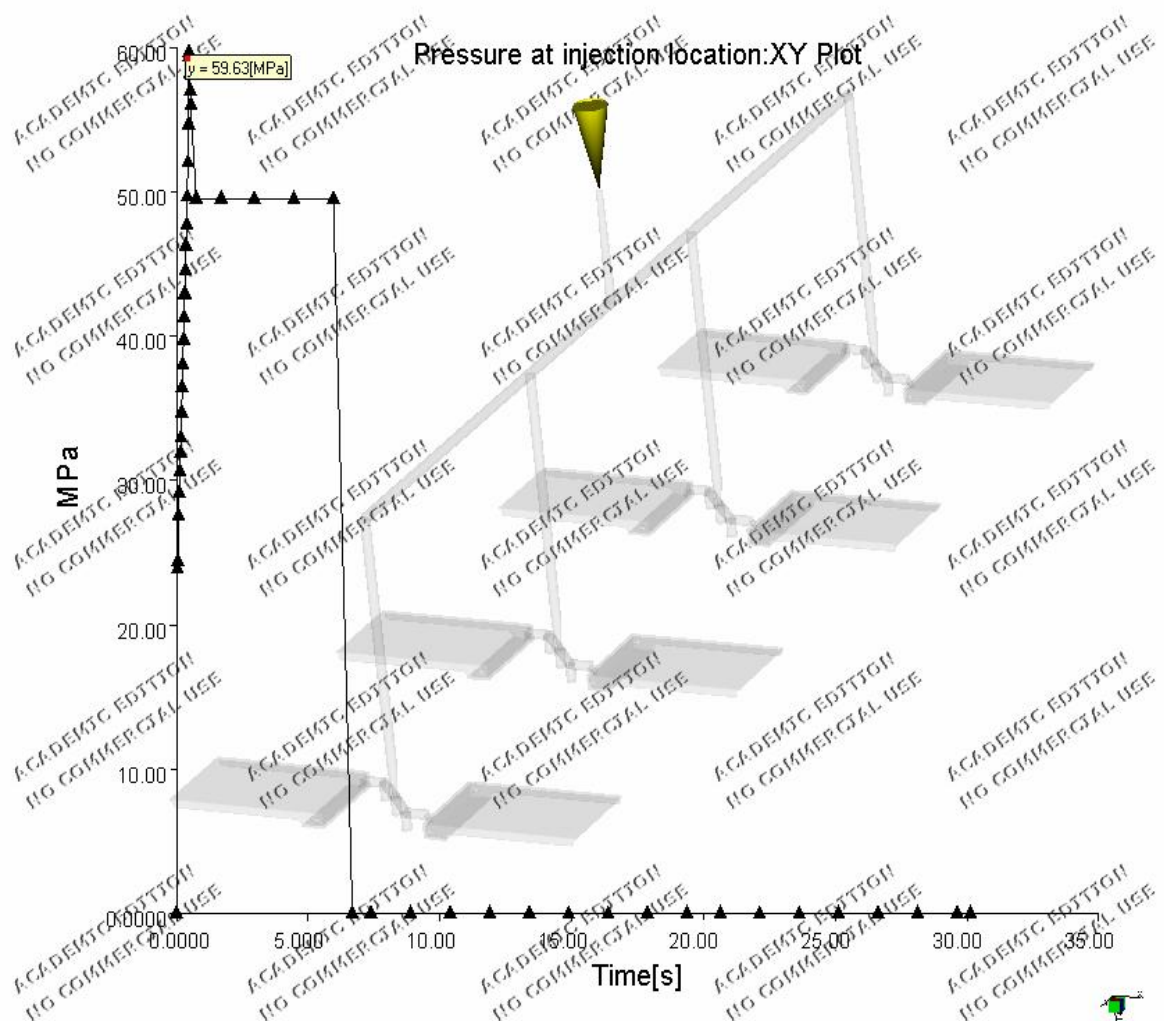


Obr. 52. Plnění dutiny formy

Při regulaci teplot taveniny a temperačního média čas pro zaplnění dutiny formy polymerní taveninou se zvýšil o hodnotu 0,15 s. V celkovém vstřikovacím cyklu je však tato hodnota zanedbatelná.

9.2.3 Průběh tlaku v místě vstřiku

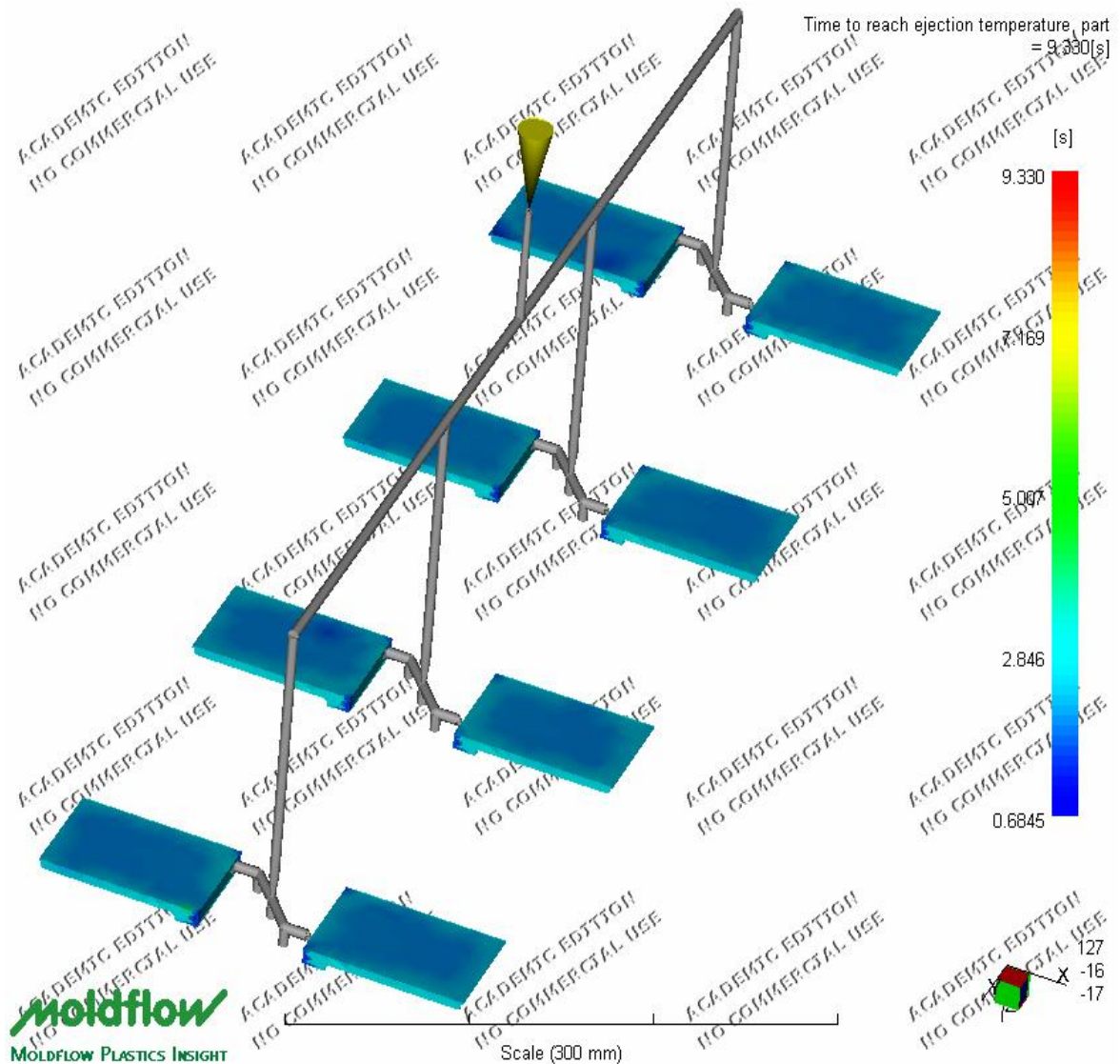
Hodnota maximálního tlaku je rovna hodnotě 59,63 MPa. Tento tlak vzrostl oproti variantě 1. o 8,47 MPa, což je pravděpodobně způsobeno vyšší viskozitou polymerní taveniny.



Obr. 53. Průběh tlaku ve formě

9.2.4 Čas zatuhnutí výrobku

Tento čas udává dobu od konce plnění až k vyhazovací teplotě která, která je nastavena na hodnotu 90 °C.



Obr. 54. Čas zatuhnutí výrobku

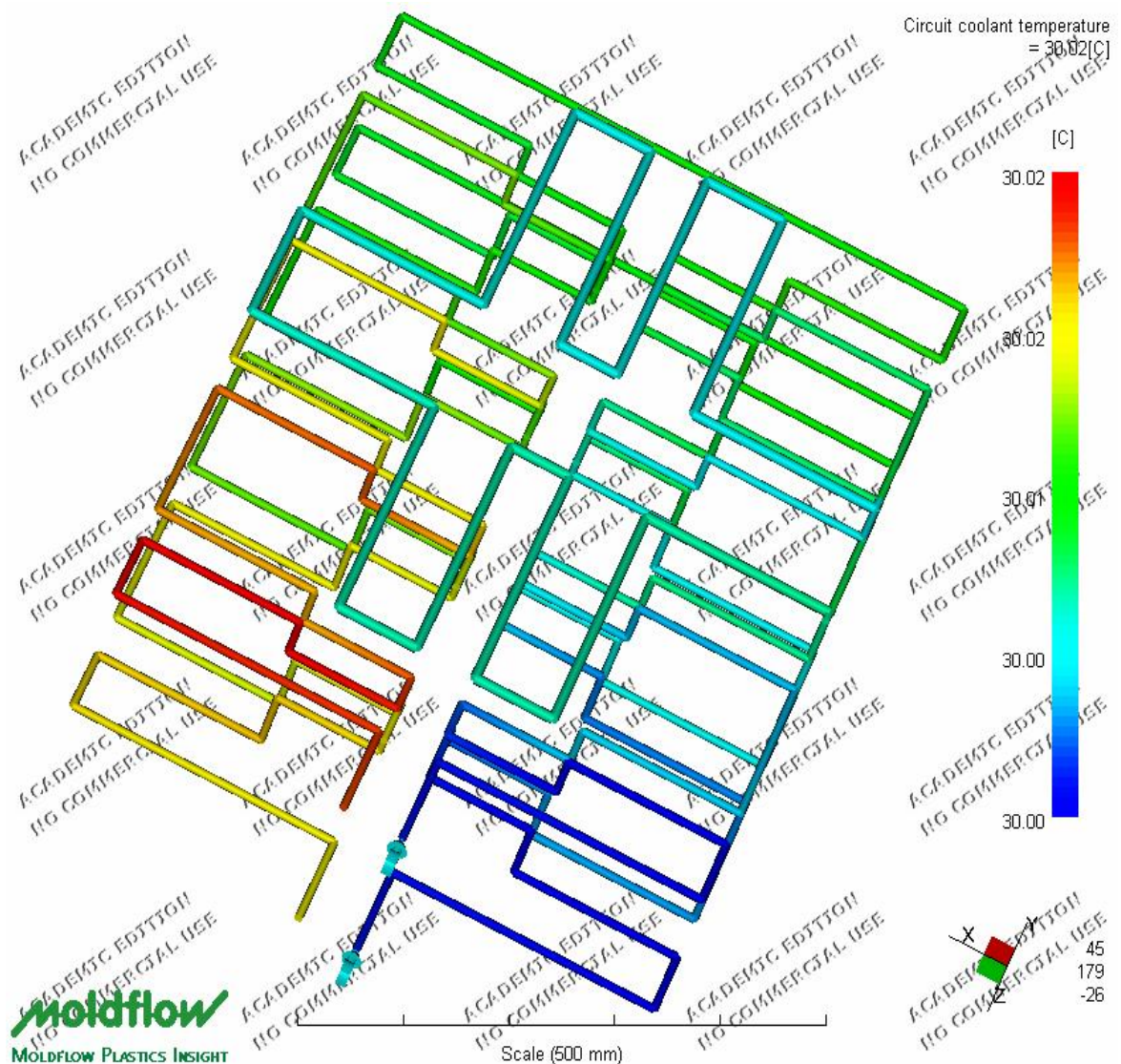
Čas při regulaci teplot je roven hodnotě 9,3 s. Oproti současným podmínkám došlo ke zlepšení o 8,07 s.

Nejdéle však dochází k zatuhnutí v okolí pantů krabíčky, kde je také největší tloušťka stěny. Při vyhazování výstřiku z formy však není nijak namáhané a tudíž by mohlo dojít k vyhození i v dřívějším čase, což je okolo hodnoty 3 s.

9.2.5 Průběh teploty v chladícím obvodu

Při variantě 2. nedošlo k žádným konstrukčním zásahům do vstřikovací formy, tudíž temperační okruhy jsou shodné s variantou 1.

Analýza teploty chladicího média v obvodu zobrazuje rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem, který je roven hodnotě 0,02 °C. Z toho vyplývá že navržený temperační okruh splňuje dané podmínky.



Obr. 55. Průběh teploty v chladícím obvodu

9.2.6 Efektivita odvodu tepla

Na obr. 56. je znázorněn detail okruhu pro jeden výstřík. Z něj je zřejmé, že některé části okruhu dosahují účinnosti téměř 100 %.

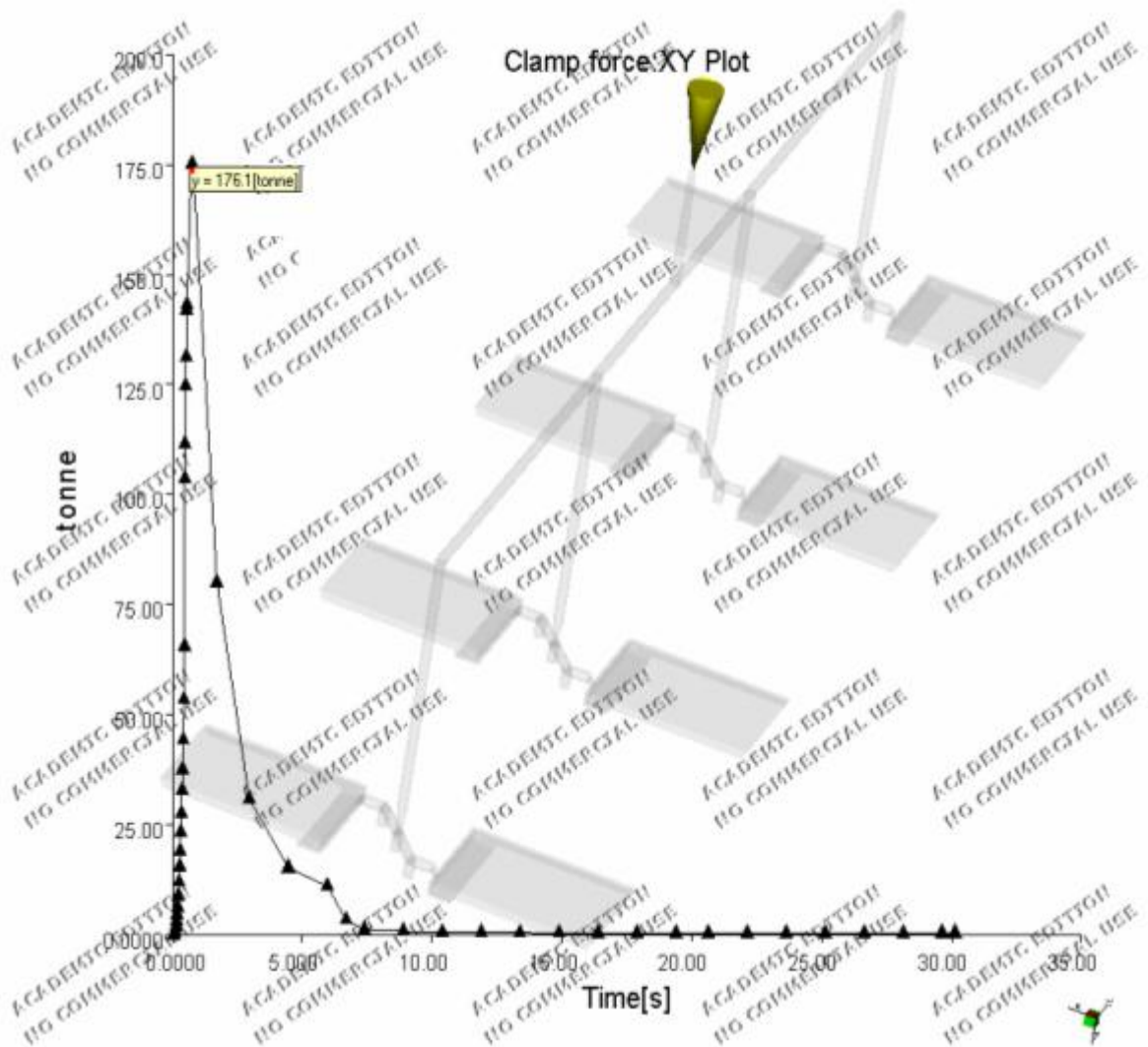


Obr. 56. Efektivita odvodu tepla

Části chladicího okruhu blížící se v barevné škále hodnotě 1 mají účinnost 100 % odvodu tepla. Ty části, které se pohybují v záporných hodnotách, formu spíše ohřívají než chladí.

9.2.7 Průběh uzavírací síly

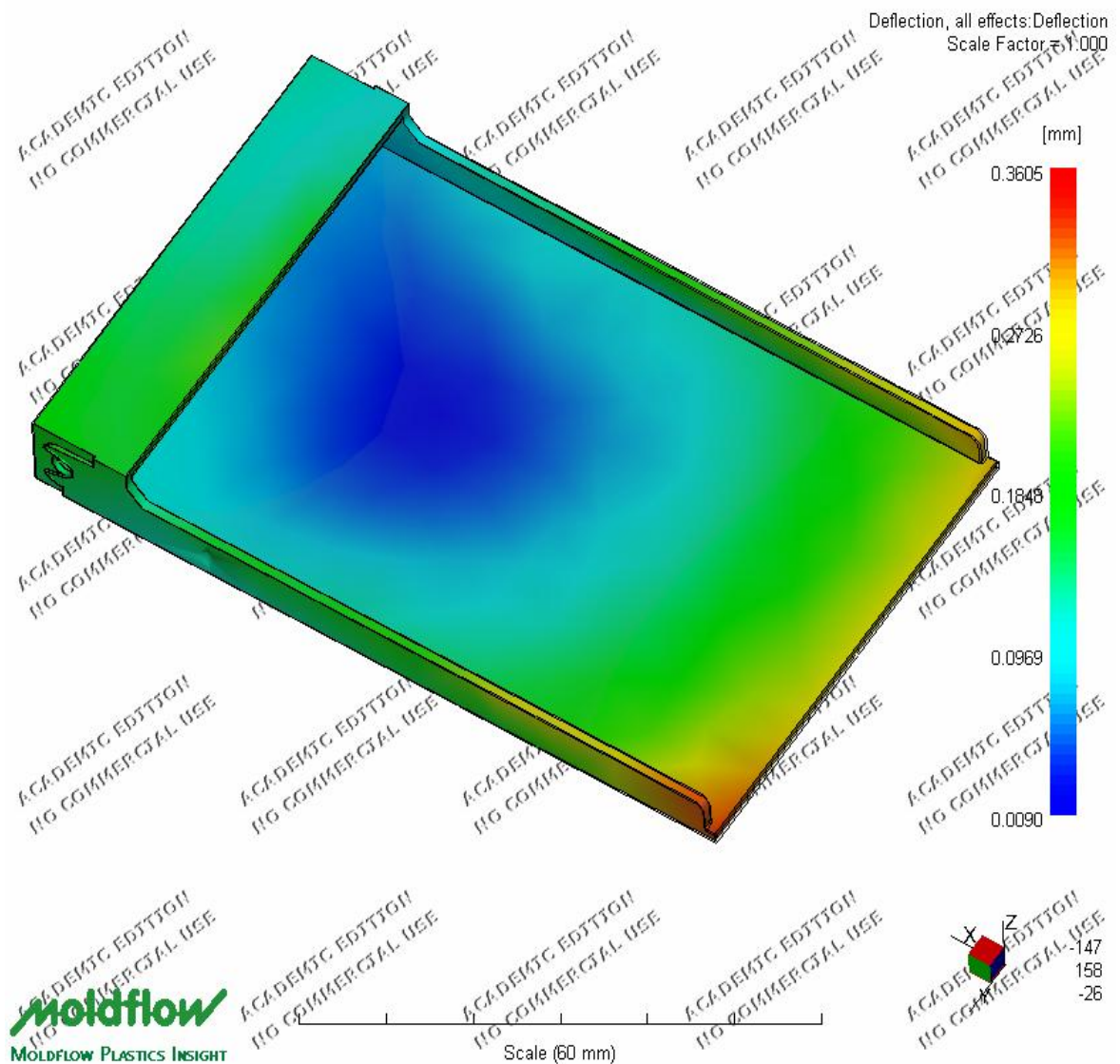
Výsledek analýzy uzavírací síly je znázorněn v podobě grafu, který nám udává průběh změny uzavírací síly během vstřikování. Maximální potřebná uzavírací síla je rovna hodnotě 176,1 t. Této hodnoty je využito především při volbě vhodného vstřikovacího stroje.



Obr. 57. Průběh uzavírací síly

Hodnota potřebné uzavírací u varianty 2. je menší než při současném vstřikování o 18,6 t, avšak činí 80% maximální potřebné uzavírací síly.

9.2.8 Celková deformace vstříkované části



Obr. 58. Celková deformace vstříkované části

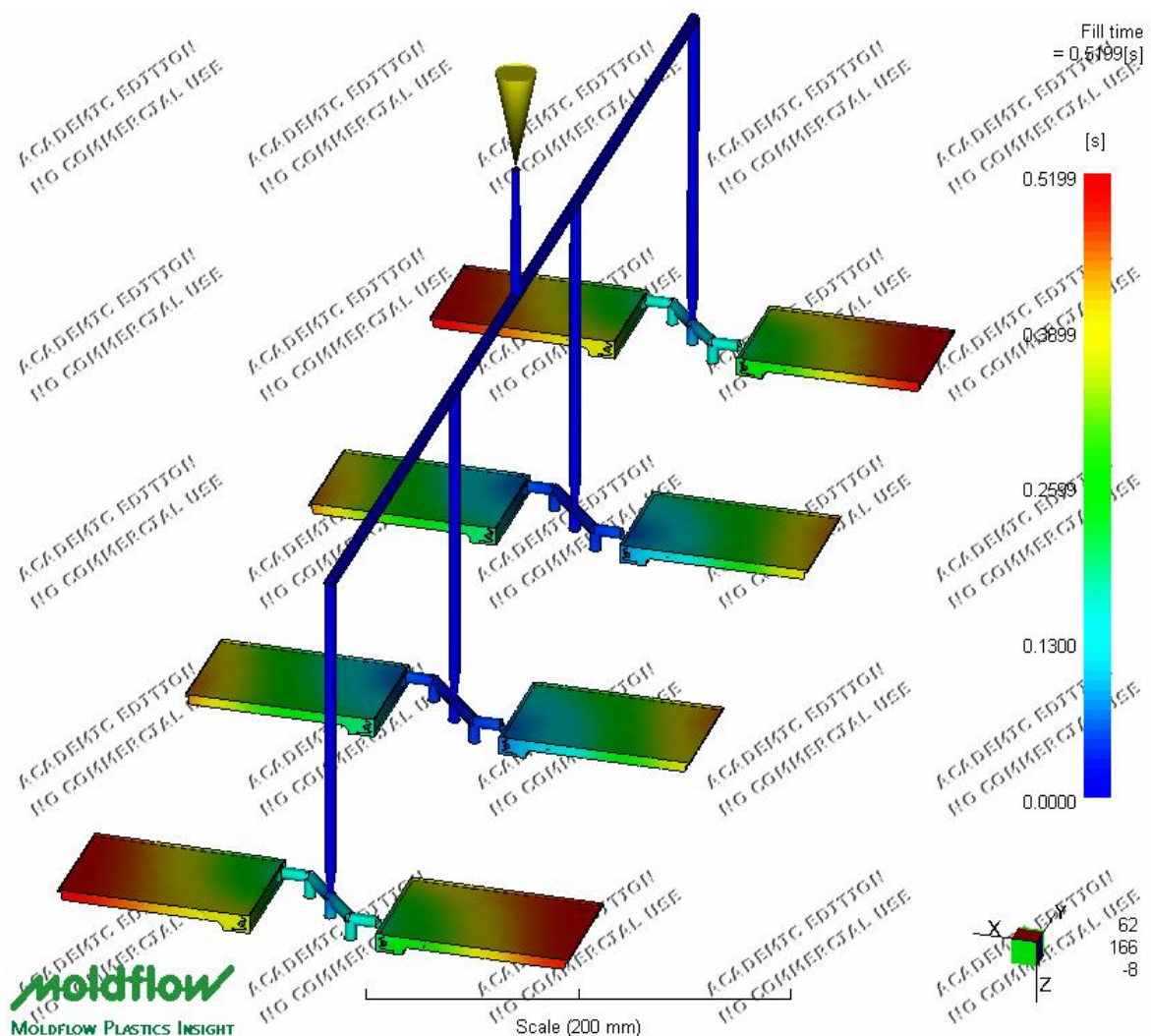
Celková deformace je rovna hodnotě 0,36 mm. Tato deformace je o 0,03 mm větší než pro vstříkování v současné době. Tento rozdíl hodnot je však zanedbatelný.

9.3 Varianta 3. – vytvoření nových temperačních kanálků v současné formě

9.3.1 Procesní podmínky při vytvoření nových temperačních kanálků

Do současné vstřikovací formy byl proveden konstrukční zásah a to takový, že byly vyvrtány další temperační kanálky o průměru 8 mm a byly napojeny na nový okruh. Průtok v tomto okruhu byl navržen taktéž 60 lit/min. Hodnoty temperačních medií byly stanoveny jak u varianty 2. V tab. 8. jsou uvedeny základní teploty pro nastavení parametrů vstřikování.

9.3.2 Plnění dutiny formy

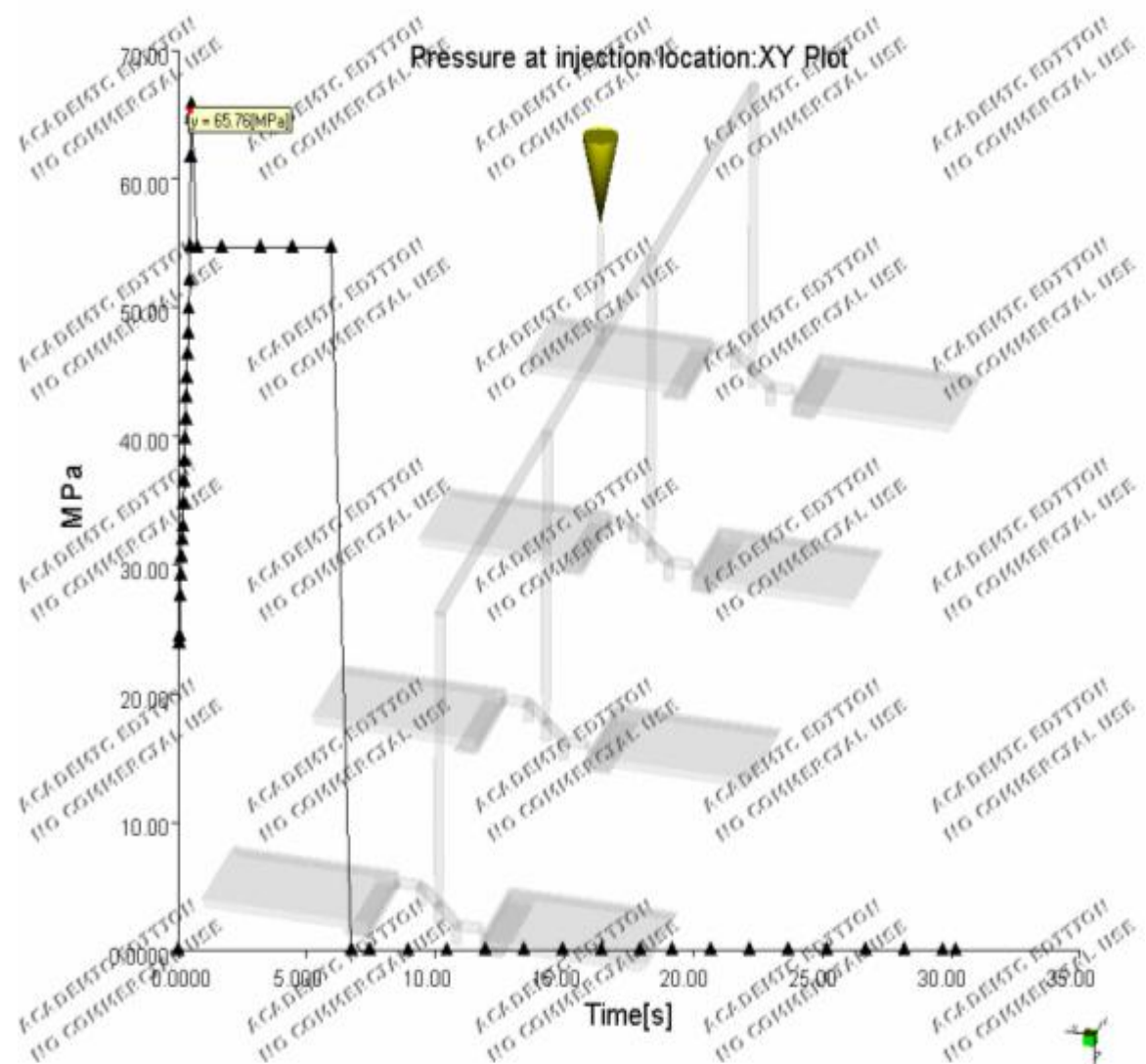


Obr. 59. Plnění dutiny formy

Při konstrukčním zásahu přidání temperačních kanálků se snížila doba plnění dutiny formy taveninou ve srovnání s variantou 2. o zanedbatelnou hodnotu 0,02 s. V tomto případě tedy k výraznému zlepšení nedošlo.

9.3.3 Průběh tlaku v místě vstříku

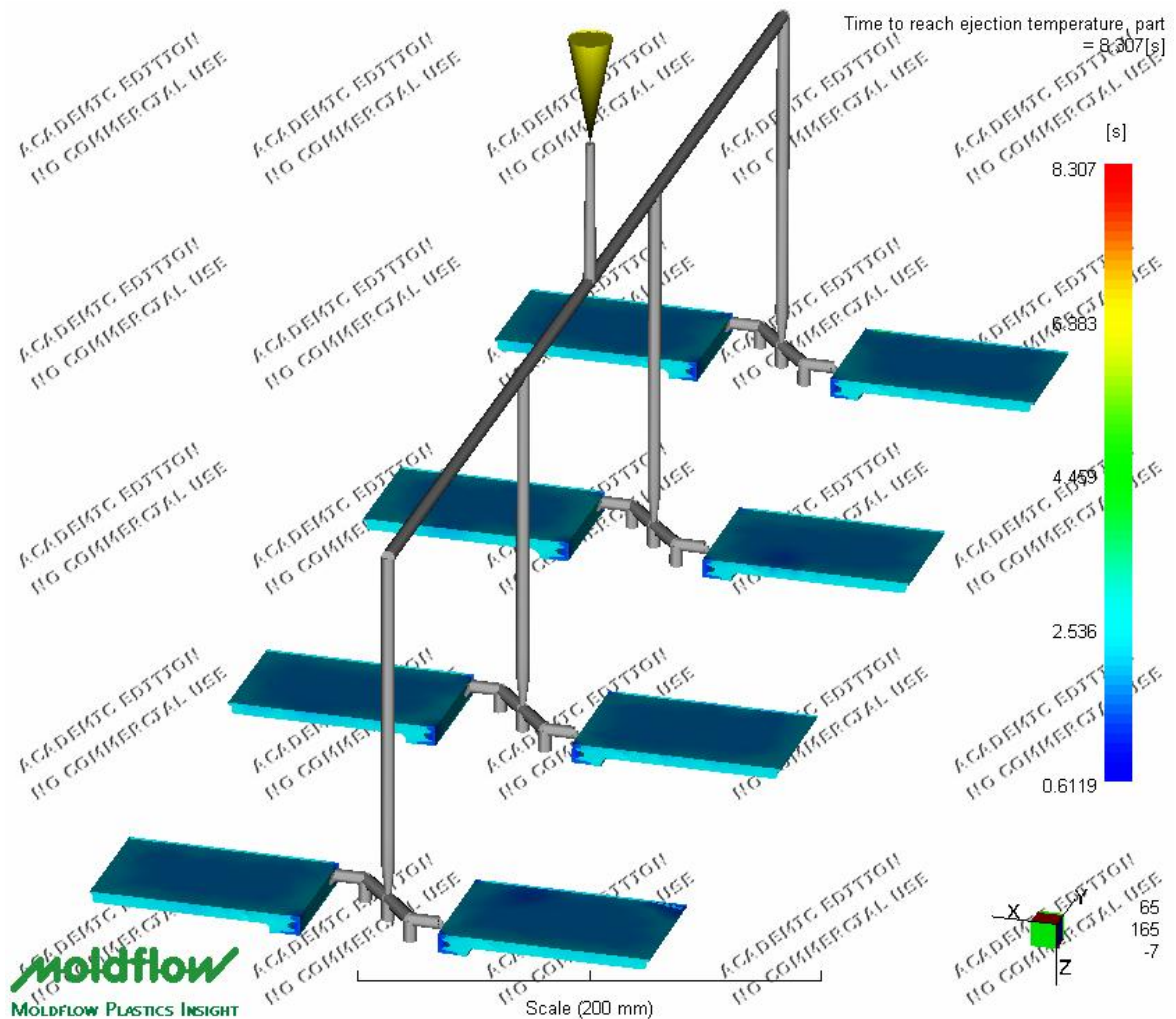
Graf znázorňuje změnu průběhu tlaku v místě vstřikování. Maximální hodnota činí 65,76 MPa. Jak je z obr. 60. zřejmé, tlak pro vstříknutí taveniny se zvýšil oproti variantě 2. o 6,13 MPa. Tato hodnota vzrůstá především se zvyšující se viskozitou.



Obr. 60. Průběh tlaku ve formě

9.3.4 Čas zatuhnutí výrobku

Při navýšení temperačních kanálků je hodnota zatuhnutí výrobku rovna 8,31 s. Což je oproti variantě 2. zlepšení o 1,02 s. Ovšem tato varianta vede ke konstrukčnímu zásahu do vstřikovací formy a tímto zásahem by vedla k určitým finančním nákladům a zlepšení je téměř zanedbatelné vůči nákladům na úpravu formy.



Obr. 61. Čas zatuhnutí výrobku

Nejdelší čas potřebný k zatuhnutí je v oblasti pantů dílu, kde je největší stěna. Jelikož pro vyhazování výstřiku je použito robotu s přísavkami, které se přísají na horní plochu dílu, opět není nutné čekat na zatuhnutí částí, které by se při vyhazování jinak deformovaly. Plocha sloužící pro vyjmutí výstřiku je ochlazena na vyhazovací teplotu přibližně za 2,5 s.

9.3.5 Průběh teploty v chladícím obvodu

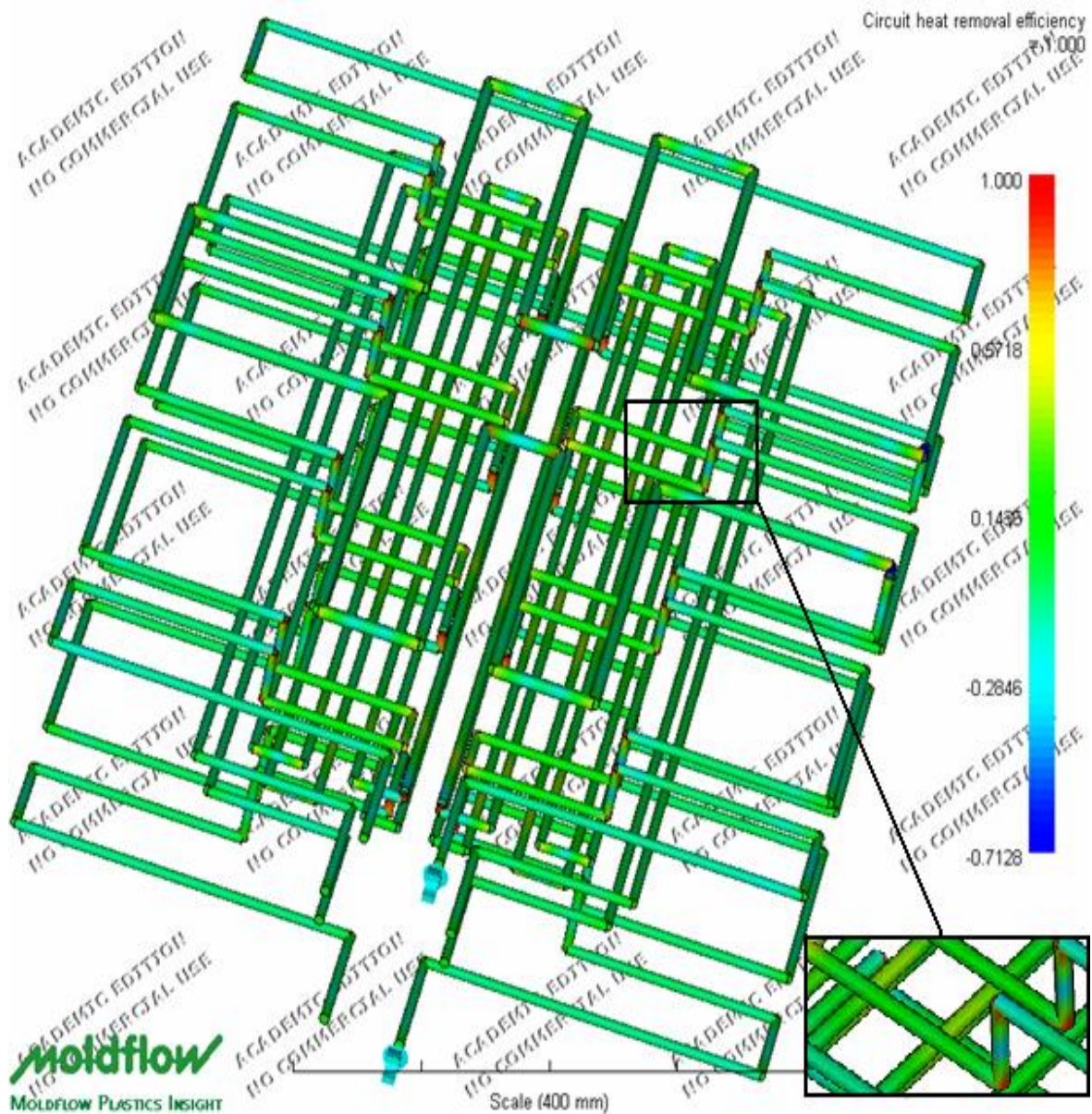
Při současné úpravě formy mají nově navržené přídatné temperační kanálky průměr 8mm. Vstupující médium má teplotu 30 °C. Na výstupu dle obr. 62. dosahuje temperační médium teploty 30,02 °C, což činí rozdíl 0,02 °C. Maximální rozdíl teplot mezi vstupním a výstupním médiem by měl dosahovat maximálně 5 °C. Navržené okruhy tuto podmínku splňují.



Obr. 62. Průběh teploty v chladícím obvodu

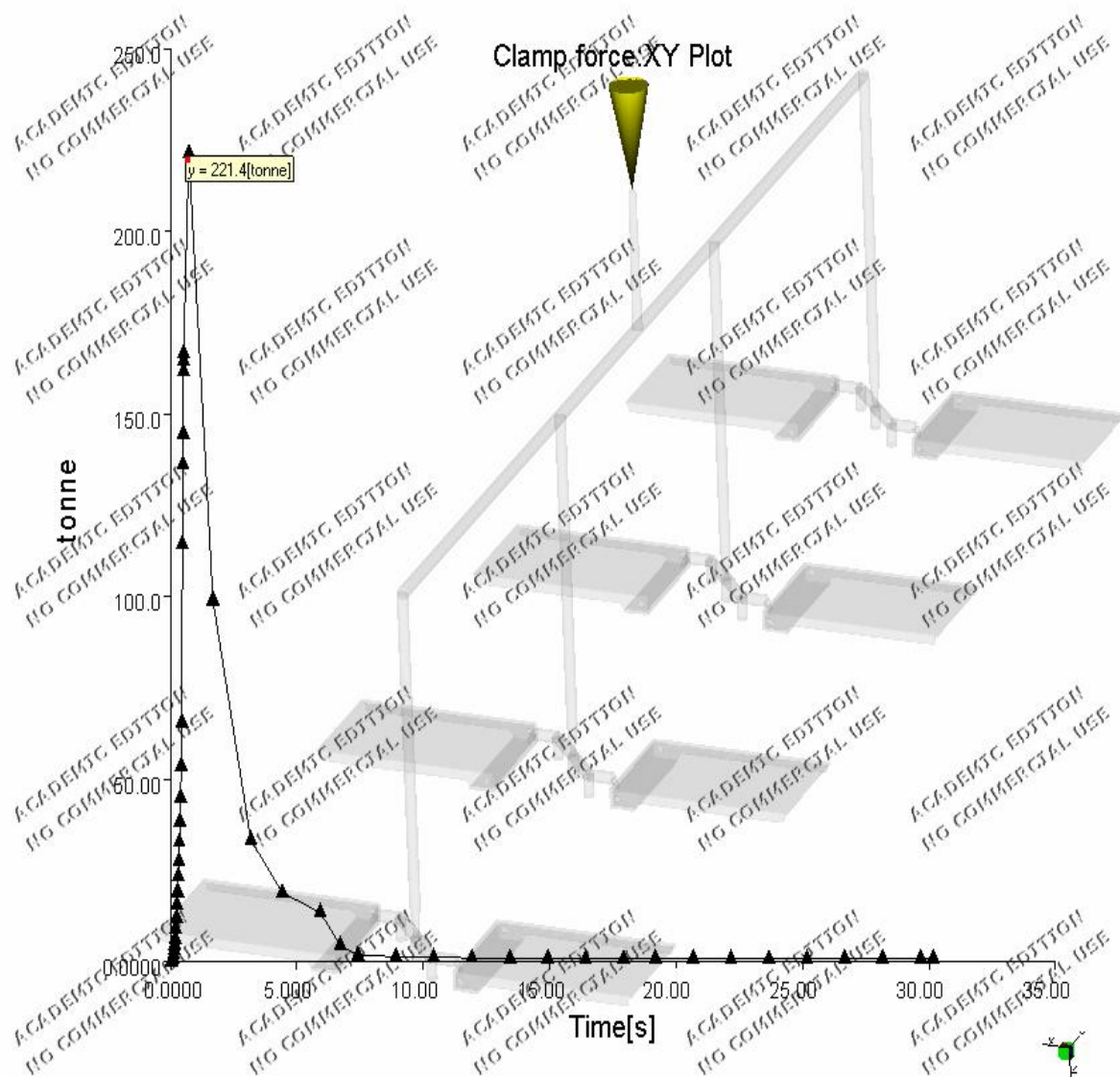
9.3.6 Efektivita odvodu tepla

Znázornění schopnosti jednotlivých temperačních okruhů odvádět teplo. Temperační okruh má průměrnou efektivitu přibližně 35 %. V místech, kde je hodnota záporná, dochází k ohřívání výstřiku a tím se efektivita chlazení v daném místě snižuje.



Obr. 63. Efektivita odvodu tepla

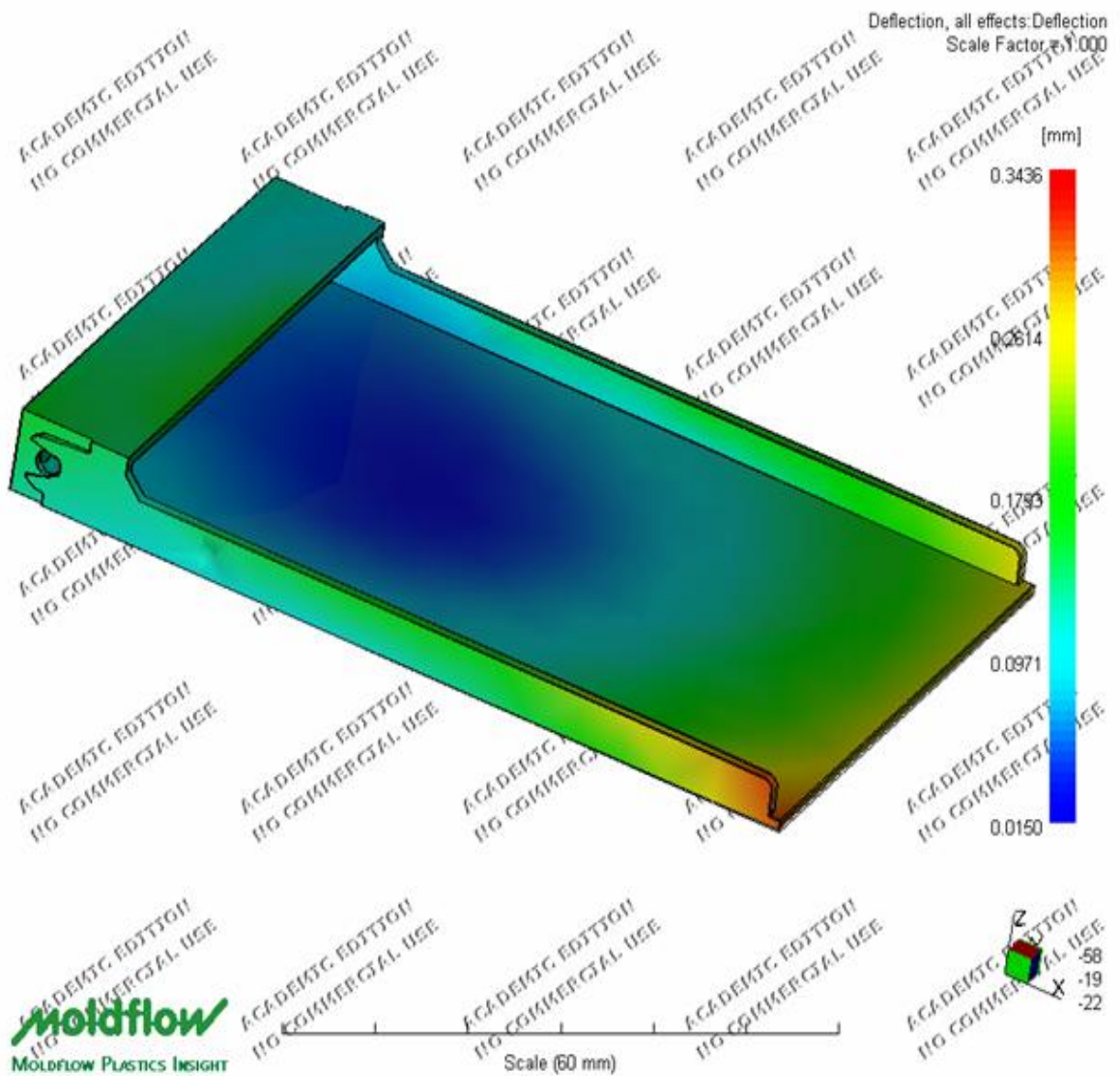
9.3.7 Průběh uzavírací síly



Obr. 64. Průběh uzavírací síly

V tomto případě je potřebná uzavírací síla rovna hodnotě 221,4 t. Tato hodnota je vyšší od varianty 2. o 45,3 t. a překračuje hodnotu uzavírací síly použitého vstřikovacího stroje. Především z tohoto důvodu jí není možno použít pro současný vstřikovací stroj.

9.3.8 Celková deformace vstříkované části



Obr. 65. Celková deformace vstříkované části

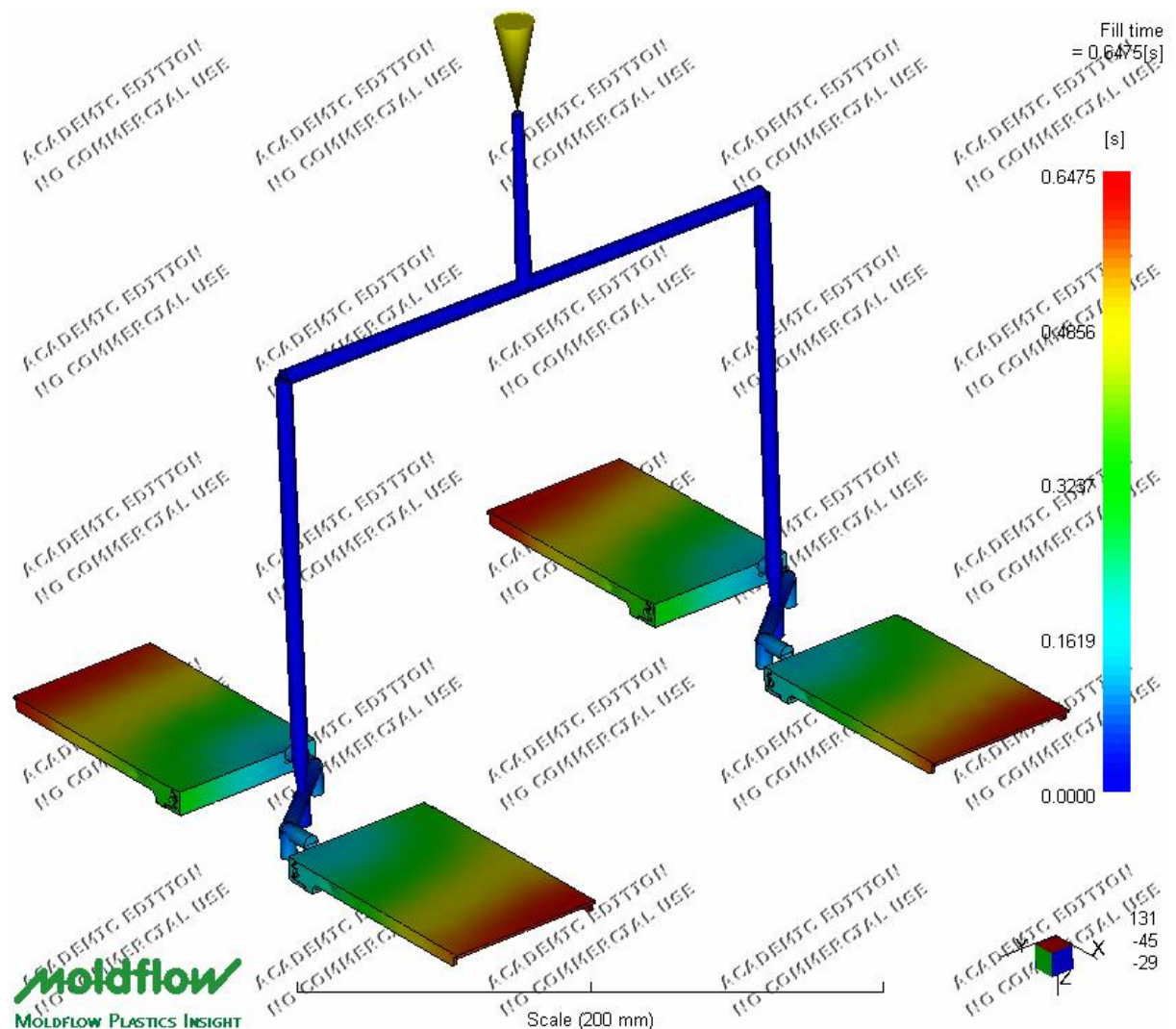
Celková deformace je rovna hodnotě 0,34 mm. Tato deformace je o 0,02 mm menší než pro vstříkování v současné době. Rozdíl hodnot je však zanedbatelný.

9.4 Varianta 4. – vytvoření čtyř násobné vstřikovací formy

9.4.1 Procesní podmínky při úpravě teplot a temperačních kanálků

Pro spodní díl byla navržena nová, čtyřnásobná vstřikovací forma, která obsahuje dvě horké trysky vstupující do dvou rozvodných kanálků. Temperační kanálky byly navrženy dle výrobních výkresů pro původní osminásobnou formu. Byly pouze zkráceny pro teplotu čtyř dutin vstřikovací formy. Hodnoty pro vstřikování jsou shodné s variantou 2 a jsou uvedeny v tab. 8..

9.4.2 Plnění dutiny formy

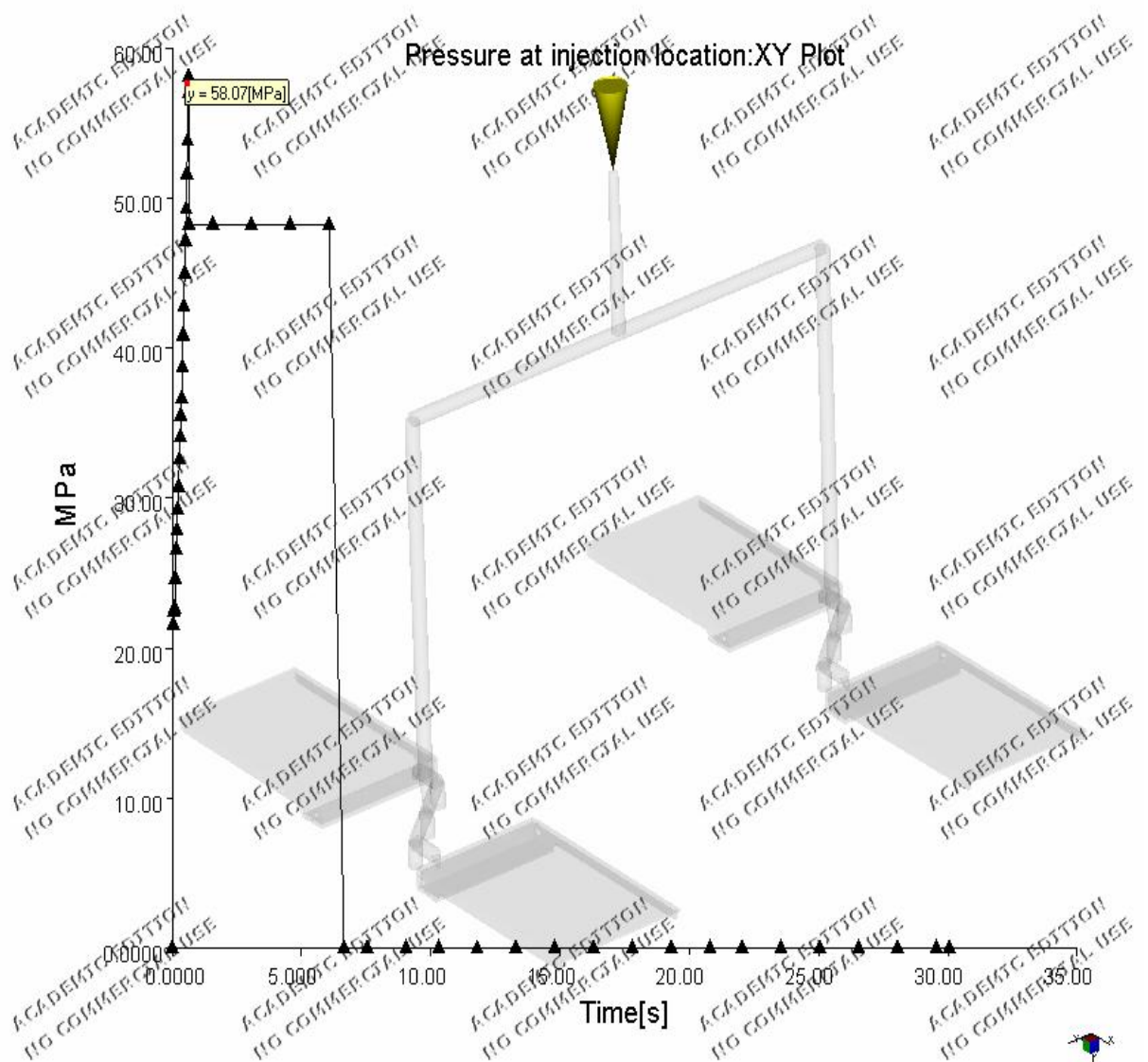


Obr. 66. Plnění dutiny formy

Při návrhu nové formy je čas pro zaplnění formy taveninou roven hodnotě 0,65 s.

9.4.3 Průběh tlaku v místě vstříku

Křivka znázorňuje změnu tlaku v tomto kritickém místě při průběhu fází: vstřík, do-tlak, chlazení.

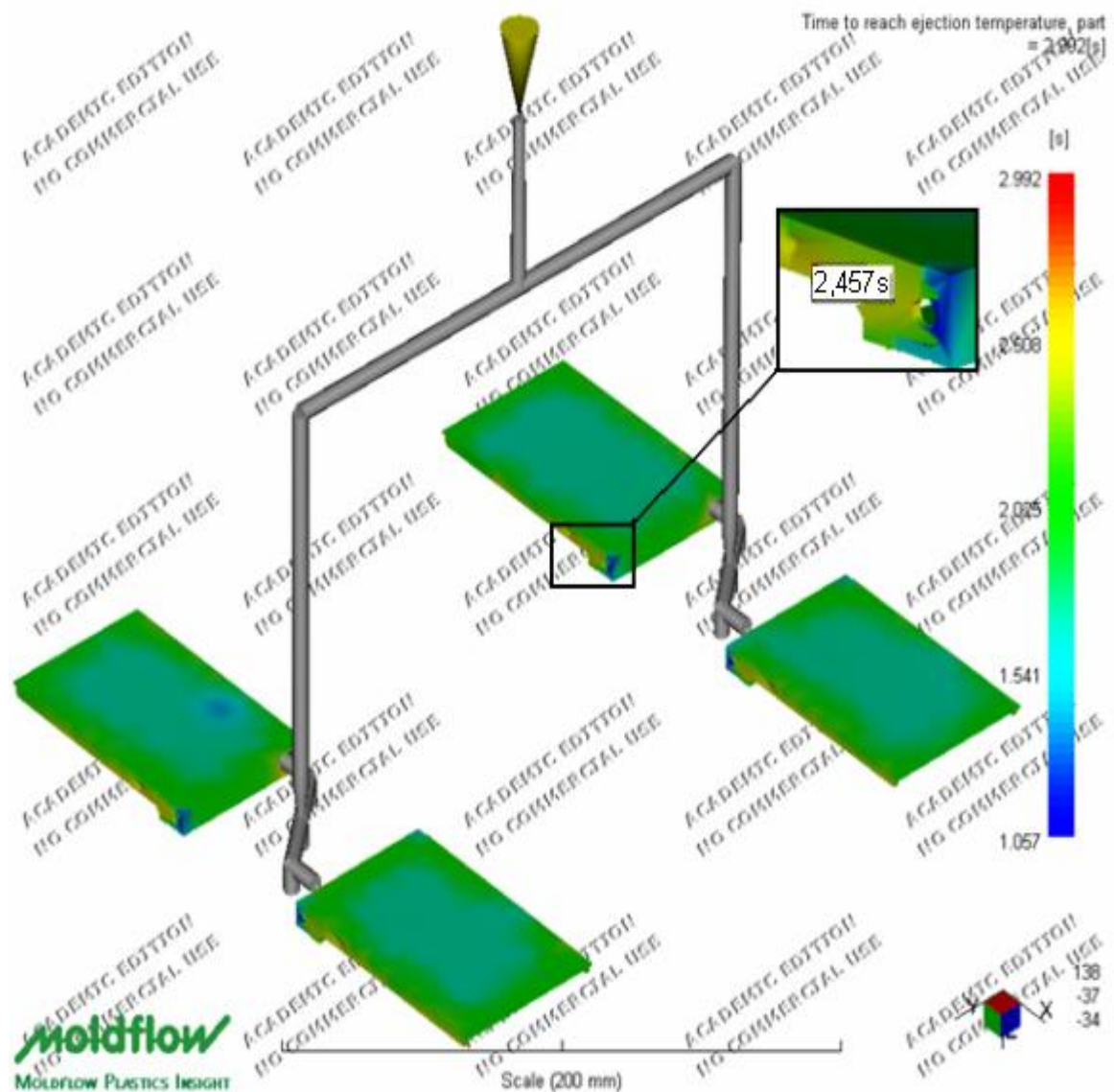


Obr. 67. Průběh tlaku ve formě

Graf na obr. 67. znázorňuje průběh změny tlaku během vstříkování. Hodnota maximálního tlaku v místě vstříku je rovna 58,07 MPa. Ve srovnání s osminásobnou formou u varianty 2. dochází ke zvýšení tlaku 3,24 MPa

9.4.4 Čas zatuhnutí výrobku

Při návrhu čtyřnásobné formy je čas potřebný k zatuhnutí všech vrstev roven hodnotě 3,0 s. Jak již bylo zmiňováno, nejdéle tuhne část v okolí pantů, kde je tloušťka stěny výrobku největší. Pro vyhození výstřiku z formy je však použit robot s přísavkami a tak tato část nebude nijak deformována. Z tohoto důvodu výstřik z formy může být vyhozen již při zatuhnutí plochy, na kterou dosedají přísavky robotu. Pomocí barevného spektra je zřetelné, že doba potřebná k zatuhnutí horní plochy výstřiku je přibližně rovna 2 s.

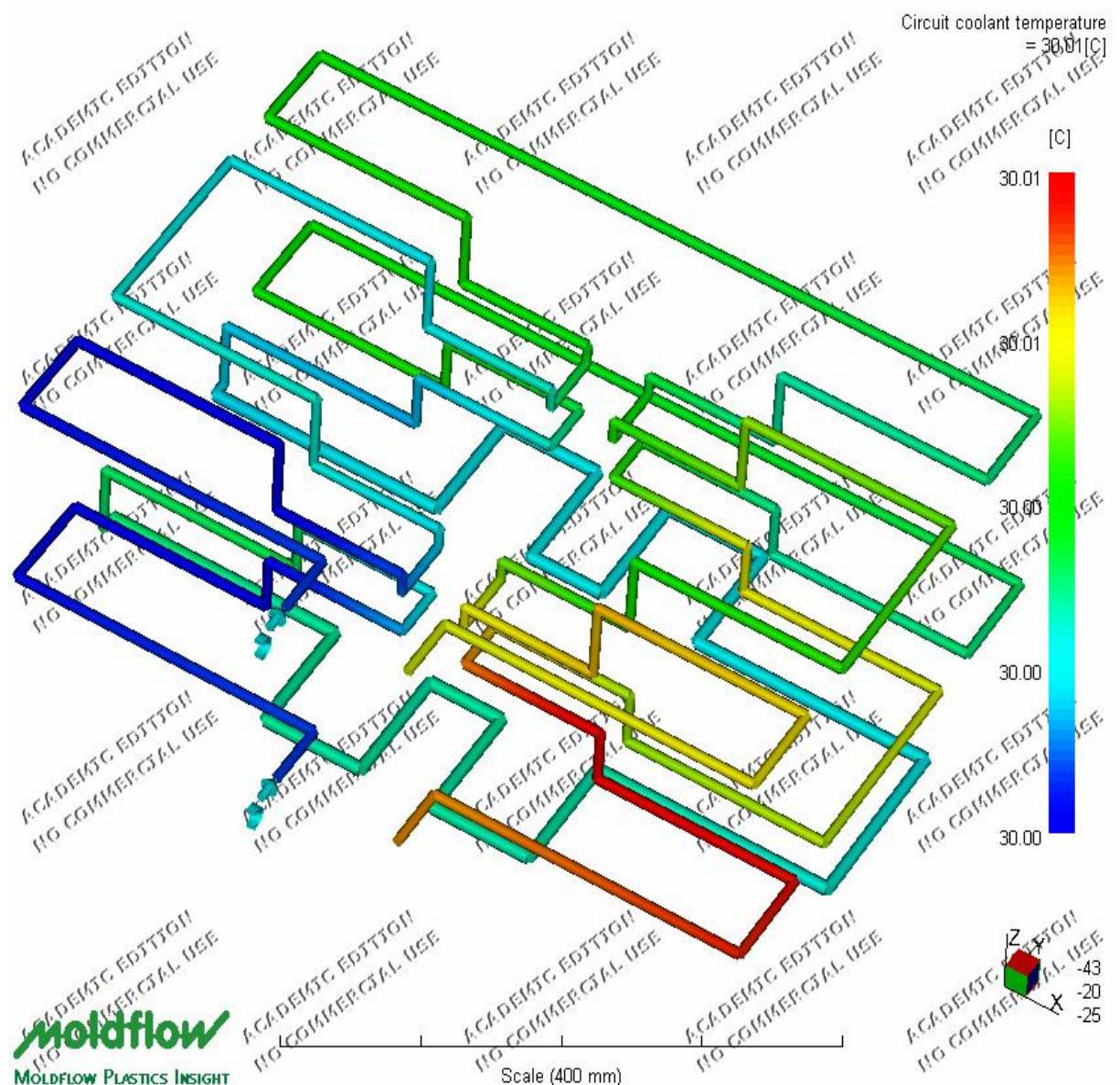


Obr. 68. Čas zatuhnutí výrobku

9.4.5 Průběh teploty v chladícím obvodu

Rozdíl teplot mezi vstupní a výstupní teplotou je 0,01 °C. Z toho plyne, že chladicí okruh vyhovuje.

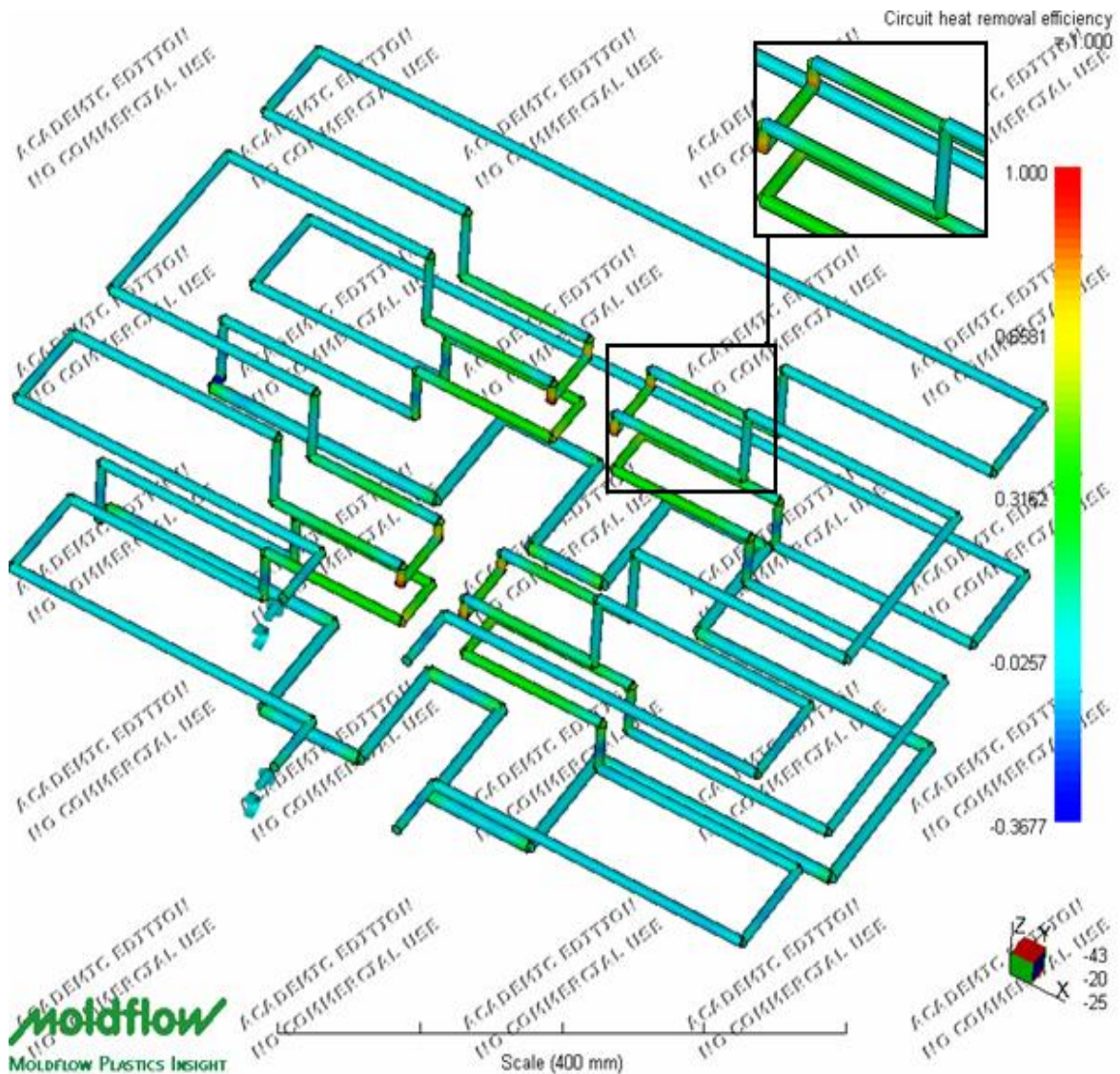
Při návrhu nové čtyřnásobné formy, byly okruhy temperačních kanálků zachovány dle současné formy, pouze však zúženy z osminásobné formy, na čtyřnásobnou. Jako temperační médium je použita upravená voda.



Obr. 69. Průběh teploty v chladícím obvodu

9.4.6 Efektivita odvodu tepla

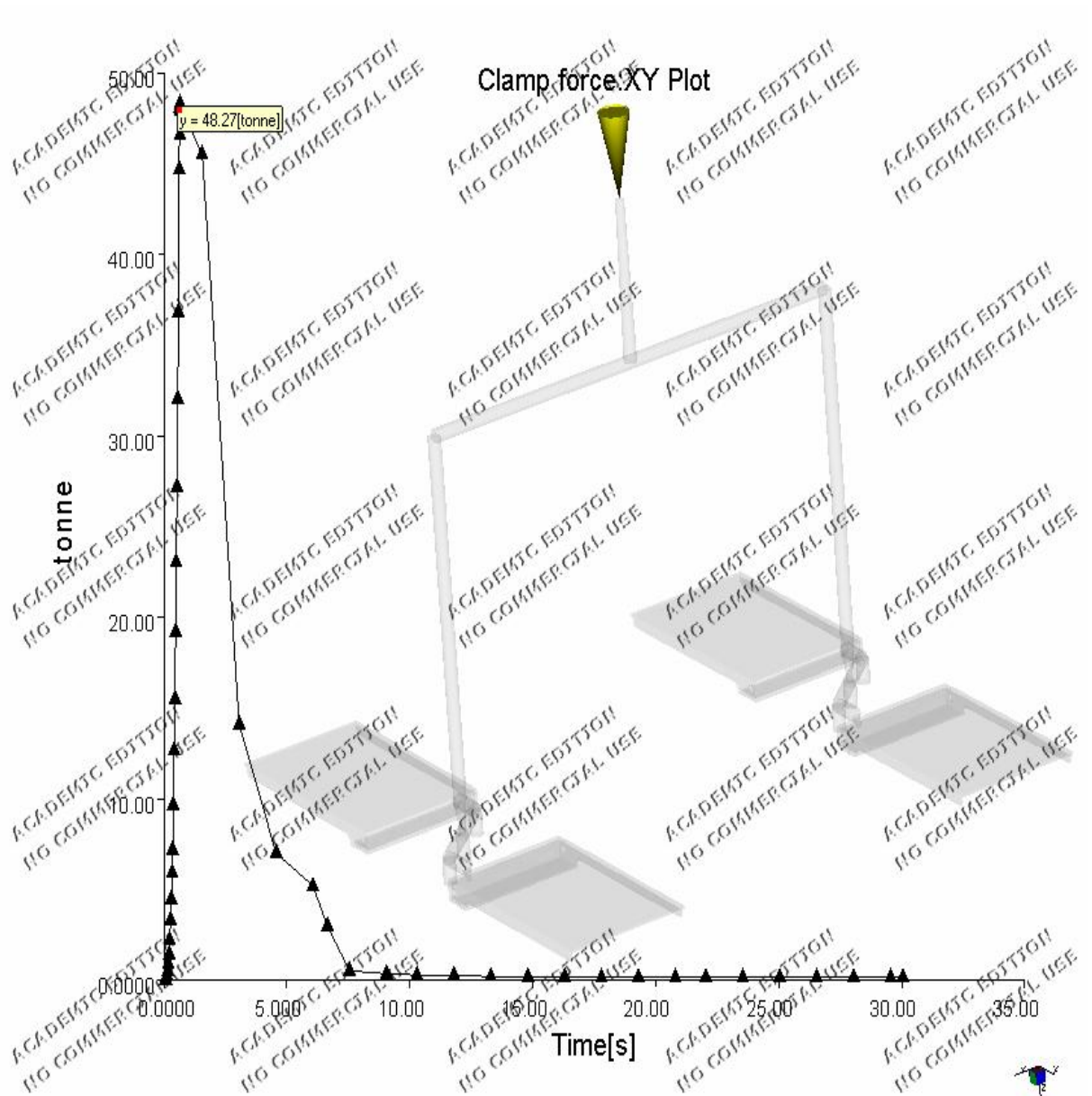
Znázornění schopnosti jednotlivých temperačních okruhů odvádět teplo. Efektivita je závislá na vzdálenosti temperačních kanálů od modelu, Reynoldsově číslu, rozdílu teplot mezi chladicím médiem a formou v dané oblasti.



Obr. 70. Efektivita odvodu tepla

Na obr. 70. je znázorněn detail efektivitu odvodu tepla pro jeden dílec. Pomocí barevného spektra zřejmé, že dochází ve větší části okruhu k mírnému ohřevu a tím efektivita odvodu tepla klesá, avšak v určitých místech je dosahováno téměř 100 %. Průměrná efektivita odvodu tepla v celém okruhu činí přibližně 30%.

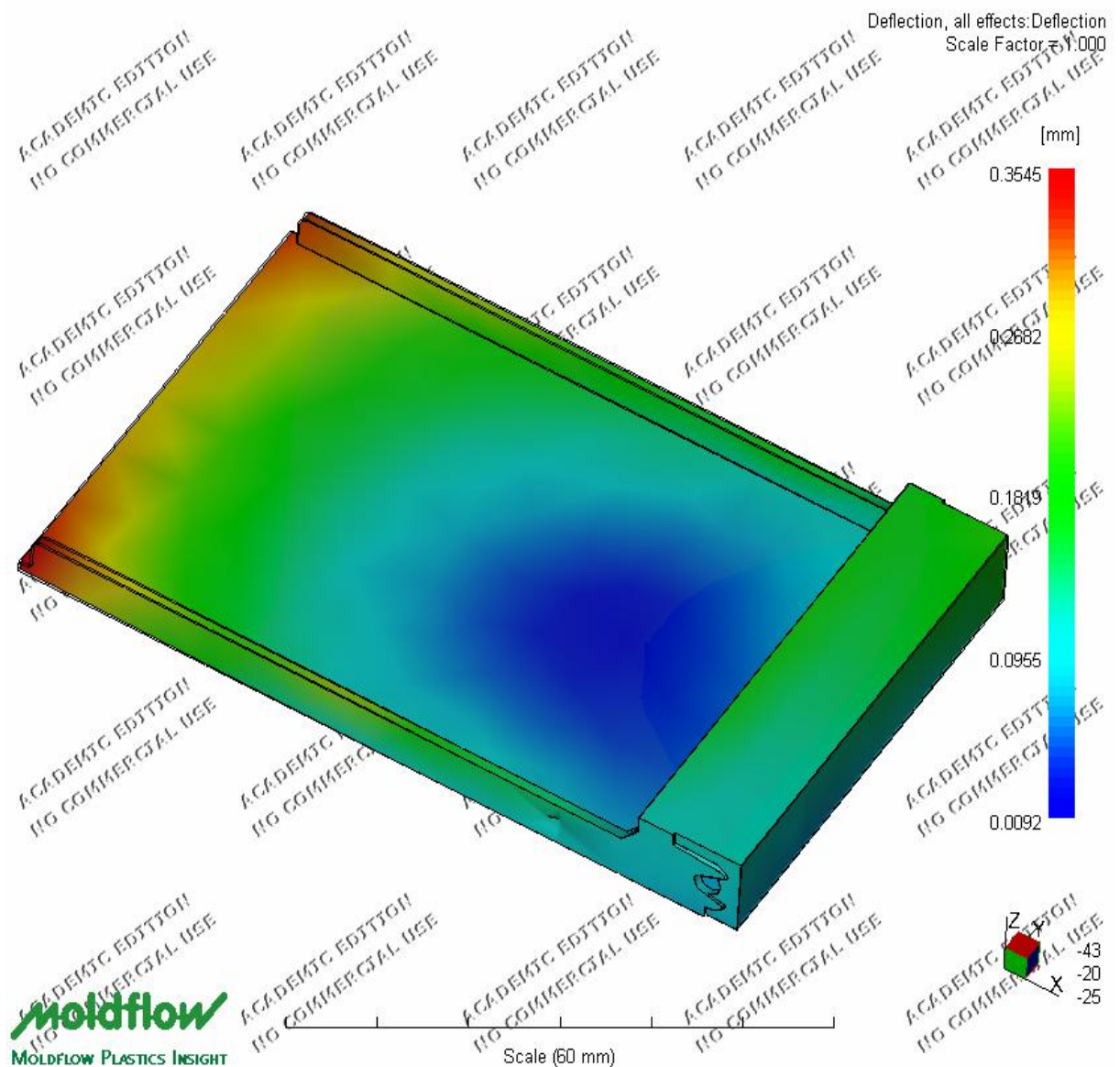
9.4.7 Průběh uzavírací síly



Obr. 71. Průběh uzavírací síly

Při návrhu nové čtyřnásobné formy je zapotřebí uzavírací síly přibližně 48,27 t. V tomto případě se jedná téměř o třetinu síly než při použití osminásobné formy. Výhodou je použití menších a tím pádem levnějších vstřikovacích strojů.

9.4.8 Celková deformace vstříkované části



Obr. 72. Celková deformace vstříkované části

Celková deformace je rovna hodnotě 0,36 mm. Tato deformace je o 0,01 mm menší než pro vstříkování ve variantě 2. Rozdíl hodnot je však zanedbatelný.

9.5 Porovnání variant pro návrh výroby horního dílu krabičky

Tab. 9. Porovnání variant pro spodní dílec

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	Jednotky
Doba plnění	0,39	0,54	0,52	0,65	[s]
Tl. v místě vstřiku	51,16	59,63	65,76	58,07	[MPa]
Čas zatuhnutí	17,37	9,33	8,31	2,46	[s]
Uzavírací síla	194,7	176,1	221,4	48,27	[t]
Deformace	0,33	0,36	0,34	0,36	[mm]

V tab.9. jsou vypsány základní hodnoty, pomocí kterých bude vybrána nejobtímnější varianta.

Varianta 1. – jedná se o vytvoření co nejpřesnějšího modelu podle výrobních výkresů a parametrů nastavení vstřikovacího stroje, které byly získány z firmy GM, spol. s r. o. Vyškov. Řešená součást byla namodelována v programu CATIA V5 v pracovní verzi a převedena do programu MPI. Byly provedeny potřebné analýzy pro srovnání se skutečností. V některých případech došlo k mírnému rozdílu od skutečného procesu. To však může být ovlivněno nepřesnostmi během vstřikování, teploty okolí, teplotní ztráty u temperačního média a jiné.

Varianta 2. – jedná se v podstatě o variantu 1., pouze došlo k regulaci teplot jak temperačního média, tak polymerní taveniny ve vstřikovacím stroji a horkých tryskách. Změněné hodnoty byly uvedeny v tab. 8. Tato varianta se jeví jako nejvhodnější z několika hlavních důvodů a to jsou především: snížení času zatuhnutí polymerní taveniny v dutině formy, snížení uzavírací síly a z důvodů finančních, jelikož se nejedná o žádný zásah do vstřikovací formy.

Varianta 3. – do stávající vstřikovací formy byl proveden konstrukční zásah a došlo k navýšení temperačních okruhů na levé i pravé straně. Tato varianta není vhodná vzhledem k překročení maximální potřebné uzavírací síly.

Varianta 4. – byla navržena nová čtyřnásobná forma. Jedná se o nejnákladnější variantu, která má výhodu použití menšího a tím pádem levnějšího vstřikovacího stroje. Doba zatuhnutí osmi dílů ve srovnání s variantou 2. je téměř poloviční, avšak pro firmu z důvodu ekonomického by se nová forma již nevyplatila.

10 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Dle hodnoty potřebné na výrobu 100 ks, zjištěné z firmy GM, spol. s r. o. Vyškov bylo vytvořeno přibližné vyhodnocení pro současný stav a nejlépe se jevící variantu 2.

10.1 Vyhodnocení pro horní díl

Tab. 10. Porovnání varianty současné s nejhodnější variantou

	Varianta 1.	Varianta 2.	Jednotky
Potřebný čas na výrobu 100 ks	0,111	0,071	[h]
Čas jednoho cyklu	31,8	20,4	[s]
Počet vyrobených kusů za 1 h	920	1408	[ks/h]

10.1.1 Vyhodnocení výhod použití varianty 2.

Za jednu hodinu vstřikování by se při zavedení varianty 2. vyrobilo o 488 ks více, než při současném vstřikování. Což za jednu směnu, která činí 8 h by byl rozdíl 3904 ks.

Varianta 2. oproti stávající je při zavedení do výroby o 53 % výkonnější, než současně používaná varianta.

10.2 Vyhodnocení pro spodní díl

Tab. 11. Porovnání varianty současné s nejhodnější variantou

	Varianta 1.	Varianta 2.	Jednotky
Potřebný čas na výrobu 100 ks	0,111	0,075	[h]
Čas jednoho cyklu	31,8	21,6	[s]
Počet vyrobených kusů za 1 h	920	1328	[ks/h]

10.2.1 Vyhodnocení výhod použití varianty 2.

Za jednu hodinu vstřikování by se při zavedení varianty 2. vyrobilo o 408 ks více, než při současném vstřikování. Což za jednu směnu, která činí 8 h by byl rozdíl 3264 ks.

Varianta 2. oproti stávající je při zavedení do výroby o 44,4 % výkonnější, než současně používaná varianta.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

V diplomové práci bylo řešeno využití simulace při návrhu a realizaci plastového dílce, který slouží jako krabička na vizitky. Tato krabička je složena ze dvou částí, horního a spodního dílu. Pomocí pantu je krabička spojena v celek. Každý z dílů byl namodelován v programu CATIA V5 a převeden do pracovní verze, která neobsahuje rádiusy a zkosení menší než 1 mm, aby nedošlo k zdoluhavým výpočtům. Poté byly v programu CATIA V5 navrženy temperační okruhy a vtokový systém a uloženy pod příslušnou koncovkou. Všechny tyto namodelované díly byly převedeny do programu Moldflow Plastics Insight 6.2. a byly vytvořeny tokové analýzy a analýzy průběhu chlazení. Nejprve byla namodelována současná verze a provedeny analýzy, aby mohlo dojít ke srovnání namodelované situace a skutečné. Při porovnání bylo zjištěno, že některé situace se lišily, ale pouze o nízké hodnoty, což může být ovlivněno skutečnými podmínkami vstřikování, různými nepřesnostmi a ztrátami. Další variantou, která se v závěru jeví jako nejvýhodnější, je varianta 2. Tato varianta byla sestavena dle současného vstřikování a došlo pouze k regulaci teplot polymerní taveniny ve vstřikovacím stroji, horkých tryskách, ale také v temperačních okruzích. Nejvhodnější se zdá především proto, že se nejedná o žádný zásah do formy, ale pouze o přednastavení hodnot. Pomocí této regulace se snížil čas zatuhnutí výrobku u obou dílů téměř o polovinu. Další variantou byla konstrukční úprava vstřikovací formy, do níž byly přidány další temperační okruhy. Tato varianta se však oproti variantě 2. lišila v zatuhnutí polymerní taveniny v dutině formy přibližně o 1 s, což je oproti nákladům na úpravu vstřikovací formy zanedbatelná hodnota, tudíž tato varianta by byla neekonomická. Jako poslední variantou byla navržena v programu Moldflow Plastics Insight 6.2. nová čtyřnásobná forma. Výhodou této formy je menší použitá uzavírací síla a tím pádem by bylo možné ji použít na menších a levnějších vstřikovacích strojích. Také výroba této formy by byla o polovinu levnější, jelikož obsahuje pouze dvě horké trysky a čtyři dutiny. Její velikost oproti osminásobné je poloviční. Avšak pro vytvoření osmi dílů by se vstřikovací cyklus přibližoval nově navržené variantě 2., proto by tedy v současné době, kdy jsou již vyrobeny osminásobné formy, nebylo finančně výhodné investovat do nových čtyřnásobných forem.

Jelikož v současné době je výrobků přebytek a forma není v provozu na vstřikovacím stroji, nemohla být nejlépe se jevící varianta 2. odzkoušena v praxi.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo využití simulace při návrhu a realizaci plastového dílce. Jedná se o krabičku na vizitky, která je složena ze dvou částí spojených pantem. Oba díly jsou vstřikovány do osminásobných forem na dvou vstřikovacích strojích propojených robotem s přísavkami, který nahrazuje vyhazovače a slouží pro vyhození výstřiků z formy. Po vyhození z formy robot uloží díly na dopravní pás, kde již obsluha z dílů vytvoří celek.

V první polovině praktické části byly vytvořeny v programu CATIA V5 přesné 3D modely jednotlivých dílů a rozmístěny podle výrobních výkresů formy. Dále byly namodelovány temperační okruhy a vtokový systém. Následovalo převedení připravených dílců a systémů do programu Moldflow Plastics Insight 6.2., kde byly provedeny potřebné analýzy, aby mohlo dojít jak ke srovnání se současnou situací, tak k její optimalizaci. Nejlépe se jeví varianta 2. Nedošlo by zde k žádnému zásahu do vstřikovací formy, ale pouze k regulaci teplot temperačního média a polymerní taveniny jak ve vstřikovacím stroji, tak v horkých tryskách.

Důležitý poznatek je však takový, že simulace není realita. Tudíž může dojít k určitým rozdílům a vadám, které nebyly pomocí programu MPI odhaleny.

Jelikož v současné době není zakázka na výrobu těchto dílců a formy nejsou v provozu na vstřikovacích strojích, nemohla být tato varianta v praxi odzkoušena a tudíž není jisté, že výstřiky nebudou obsahovat vady, které simulace neodhalila.

Z důvodu rozsahu práce nebylo možné vložit veškeré výsledky provedených variant. Kompletní výsledky jsou na přiloženém CD disku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NEUHÄUSL EMIL, ING., Vstřikování plastických hmot, vyd. Praha; SNTL 1973
- [2] NEUHÄUSL EMIL, ING. a kol., Využití technologie vstřikování plastů vstřikování plastů ve strojírenství, vyd. Dům techniky ČSVTS České Budějovice; 1988
- [3] HENDRYCH J. a kol. Standartizace rámců a součástí forem pro vstřikování termoplastů 1. vyd. Praha : SNTL 1986. 360s.
- [4] BOBČÍK, Ladislav. a Kol. Formy pro zpracování plastu I. díl – Vstřikování termoplastu. 2. opr. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999. 133 s.
- [5] TOMIS, František. HELŠTÝN, Josef. Formy a přípravky. Brno:VUT, 1985. 278 s.
- [6] Smartplast [online] <http://www.smartplast.cz/index.php>
- [7] HALAŠKA Petr, MAŇAS Miroslav, Význam Moldflow pro tepelnou a mechanickou analýzu vstřikovací formy, 2002.
- [8] Wikipedie [online] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polystyren>
- [9] BOBČÍK, Ladislav. a Kol. Formy pro zpracování plastu II. díl – Vstřikování termoplastu.1. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999. 214 s.
- [10] MAŇAS, M., HELŠTÝN, J. Výrobní stroje a zařízení, Gumárenské a plastikářské stroje II. Brno: VUT, 1990. 199 s. ISBN 80-214-0213-X.
- [11] MAŇAS, M., VLCEK, J. Aplikovaná reologie. Zlín: UTB, 2001. 144 s. ISBN 80 7318-039-1.
- [12] BRUMMEL, Michal. Rozměrově přesné výrobky z plastu. 1.vyd. Praha: VÚNM, 1977. 278 s.
- [13] ŠTEPEK, Jiří., ZELINGER, Jiří., KUTA, Antonín. Technologie zpracování a vlastnosti plastu. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. 637 s.
- [14] KOLOUCH, Jan. Strojírenské výrobky z plastu vyráběné vstřikováním. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986. 229 s.
- [15] TOMIS, F. Základy gumárenské a plastikářské technologie. 1. vyd. Praha : SNTL, 1975. 278 s. ISBN 414-33543.
- [16] BEAUMONT, J. P., NAGEL, R., SHERMAN, R. Successful injection molding. Munich: Hanser Publishers, 2002. 362 s. ISBN 3-446-19433-9.
- [17] LINDNER, E., UNGER, O. Injection molds. 3rd ed. Munich: Hanser Publishers, 2002. 249 s. ISBN 3-446-21448-8.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	milimetr
cm ³	centimetr krychlový
min ⁻¹	reciproká minuta
s	sekunda
bar	barometrický tlak
kN	kilo Newton
kW	kilo Watt
°C	stupeň Celsia
lit	litr
%	procento
MPa	mega Pascal
kg	kilogram
hod	hodina
Kč	koruna
atd.	a tak dále
např.	například
resp.	respektive
PS	polystyren
MPI	Moldflow Plastics Insight
3D	tří rozměrný prostor

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Průběh vstřikovacího cyklu</i>	14
<i>Obr. 2. Schéma tvaru makromolekul</i>	15
<i>Obr. 3. Schéma vstřikovacího stroje</i>	16
<i>Obr. 4. Dosednutí trysky stroje na vtokovou vložku</i>	17
<i>Obr. 5. Schematické znázornění uzavírací jednotky s kloubovým mechanismem ovládaným hydraulicky</i>	18
<i>Obr. 6. Hvězdicové a kruhové řešení rozváděcích kanálů násobných forem</i>	33
<i>Obr. 7. Řádkový vtok vícenásobných forem</i>	33
<i>Obr. 8. Další typy vtokových systémů</i>	34
<i>Obr. 9. Zatížení vstřikovací formy tlakem taveniny a uzavírací silou.</i>	36
<i>Obr. 10. Teplota formy při vstřikovacím cyklu.....</i>	37
<i>Obr. 11. Deformace formy v důsledku rozdílu teplot</i>	37
<i>Obr. 12. Horní díl krabička na vizitky</i>	40
<i>Obr. 13. Spodní díl krabička na vizitky.....</i>	40
<i>Obr. 14. Vstřikovací stroj ENGEL řady VICTORY 750 / 220 TECH, POWER.....</i>	44
<i>Obr. 15. Vhodné místo pro umístění vtoku.....</i>	46
<i>Obr. 16. Plnění dutiny formy.....</i>	47
<i>Obr. 17. Tlak v místě vstříku</i>	48
<i>Obr. 18. Čas zatuhnutí výrobku.....</i>	49
<i>Obr. 19. Průběh teploty v chladícím obvodu.....</i>	50
<i>Obr. 20. Efektivita odvodu tepla.....</i>	51
<i>Obr. 21. Průběh uzavírací síly.....</i>	52
<i>Obr. 22. Celková deformace vstřikované části.....</i>	53
<i>Obr. 23. Plnění dutiny formy.....</i>	54
<i>Obr. 24. Tlak v místě vstříku</i>	55
<i>Obr. 25. Čas zatuhnutí výrobku.....</i>	56
<i>Obr. 26. Průběh teploty v chladícím obvodu.....</i>	57
<i>Obr. 27. Efektivita odvodu tepla.....</i>	58
<i>Obr. 28. Průběh uzavírací síly.....</i>	59
<i>Obr. 29. Deformace vstřikované části.....</i>	60
<i>Obr. 30. Plnění dutiny formy.....</i>	61

<i>Obr. 31. Tlak v místě vstříku</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 32. Čas zatuhnutí výrobku</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 33. Průběh teploty v chladícím obvodu.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 34. Efektivita odvodu tepla.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 35. Průběh uzavírací síly.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 36. Deformace vstříkované části.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 37. Plnění dutiny formy.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 38. Tlak v místě vstříku</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 39. Čas zatuhnutí výrobku</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 40. Průběh teploty v chladícím obvodu.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 41. Efektivita odvodu tepla.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 42. Průběh uzavírací síly.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 43. Deformace vstříkované části.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 44. Vhodné místo pro umístění vtoku</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 45. Plnění dutiny formy.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 46. Průběh tlaku ve formě</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 47. Čas zatuhnutí výrobku</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 48. Průběh teploty v chladícím obvodu.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 49. Efektivita odvodu tepla.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 50. Průběh uzavírací síly.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 51. Celková deformace vstříkované části.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 52. Plnění dutiny formy.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 53. Průběh tlaku ve formě</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 54. Čas zatuhnutí výrobku</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 55. Průběh teploty v chladícím obvodu.....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 56. Efektivita odvodu tepla.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 57. Průběh uzavírací síly.....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 58. Deformace vstříkované části.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 59. Plnění dutiny formy.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 60. Průběh tlaku ve formě</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 61. Čas zatuhnutí výrobku</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 62. Průběh teploty v chladícím obvodu.....</i>	<i>95</i>

<i>Obr. 63. Efektivita odvodu tepla.....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 64. Průběh uzavírací síly.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 65. Deformace vstříkované části.....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 66. Plnění dutiny formy.....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 67. Průběh tlaku ve formě</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 68. Čas zatuhnutí výrobku.....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 69. Průběh teploty v chladícím obvodu.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 70. Efektivita odvodu tepla.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 71. Průběh uzavírací síly.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 72. Deformace vstříkované části.....</i>	<i>105</i>

SEZNAM TABULEK

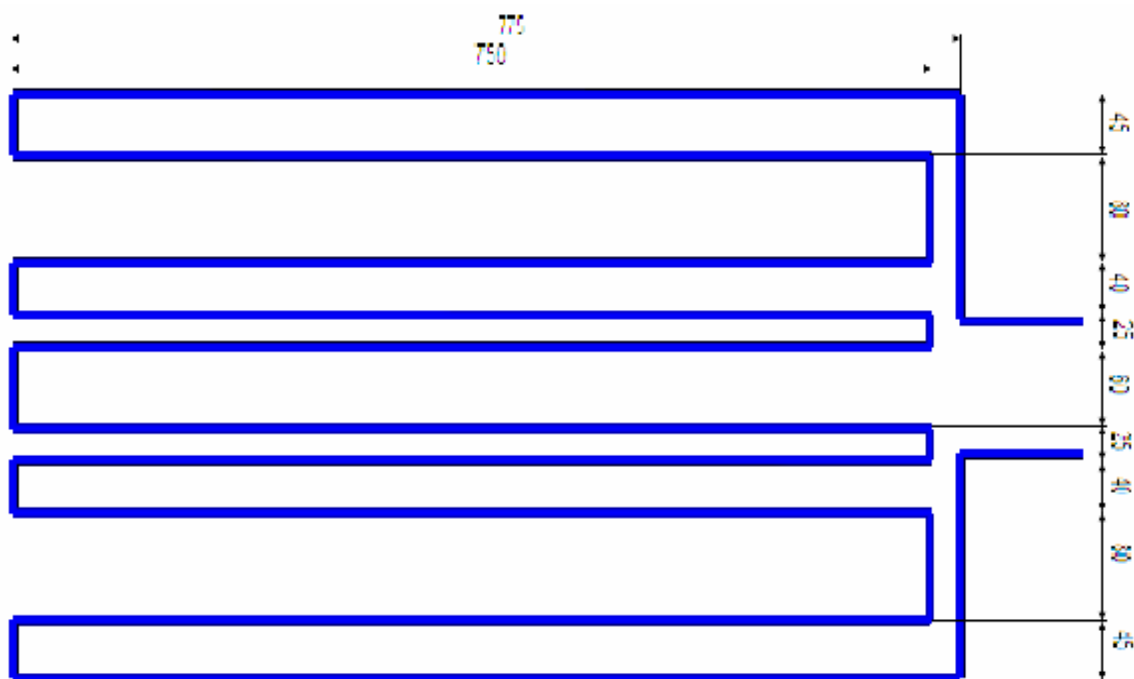
<i>Tab. 1. Základní vlastnosti materiálu PS Empera 251L.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 2. Základní charakteristika vstřikovacího stroje - vstřikovací jednotka</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 3. Základní charakteristika vstřikovacího stroje - uzavírací jednotka.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 4. Procesní podmínky při současném vstřikování.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5. Procesní podmínky pro následující tři varianty.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6. Porovnání variant pro spodní dílec</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 7. Procesní podmínky při současném vstřikování.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 8. Procesní podmínky pro následující tři varianty.....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 9. Porovnání variant pro spodní dílec</i>	<i>106</i>
<i>Tab. 10. Porovnání varianty současné s nejvhodnější variantou.....</i>	<i>107</i>
<i>Tab. 11. Porovnání varianty současné s nejvhodnější variantou.....</i>	<i>107</i>

SEZNAM PŘÍLOH

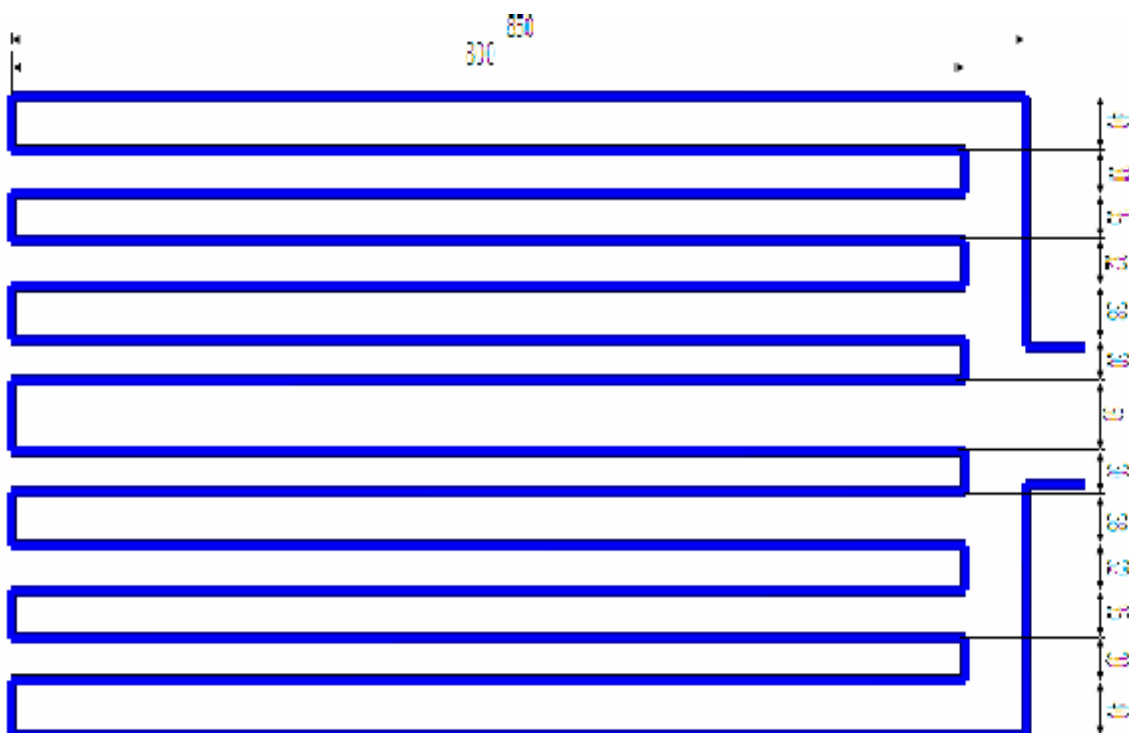
- P I. Nově navržené temperační okruhy pro horní díl
- P II. Nově navržené temperační okruhy pro spodní díl
- P III. Nově navržená čtyřnásobná forma pro horní díl
- P IV. Nově navržená čtyřnásobná forma pro spodní díl
- P V. CD disk obsahující:
 - 3D díly krabičky
 - Temperační a vtokové kanály
 - Analýzy vstřikovacího procesu
 - Dokumentace v MS Word

PŘÍLOHA P I.: NOVĚ NAVRŽENÉ TEMPERAČNÍ OKRUHY PRO HORNÍ DÍL

Pravý temperační okruh:

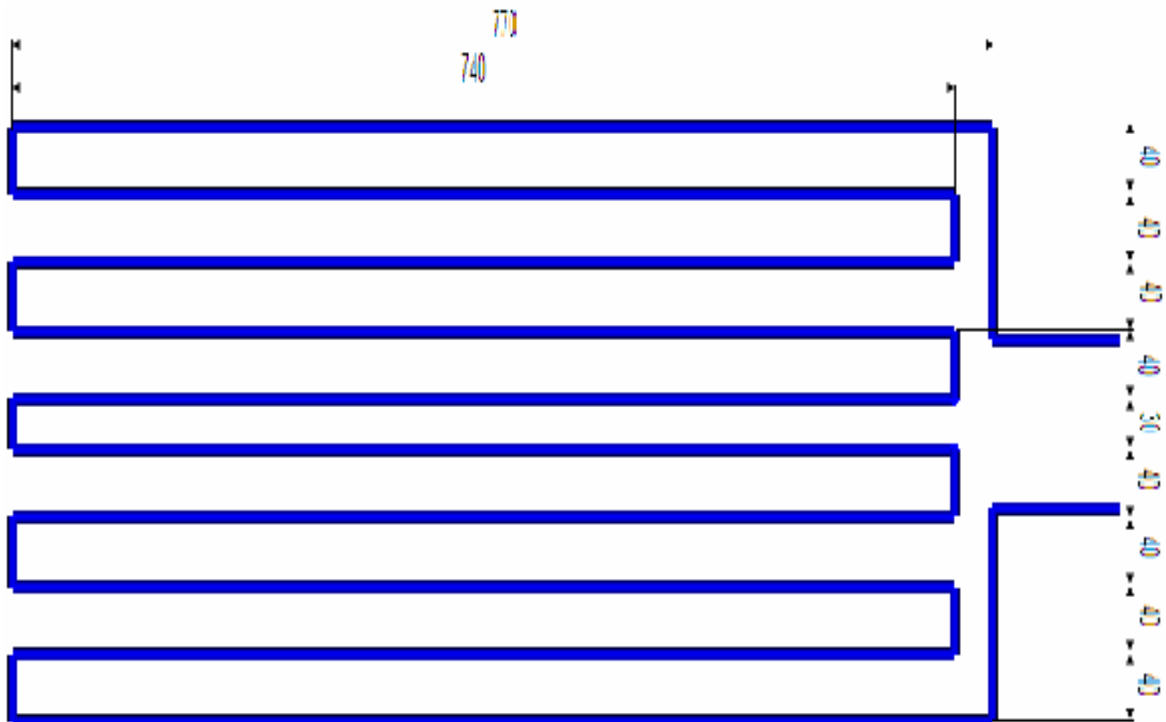


Levý temperační okruh:

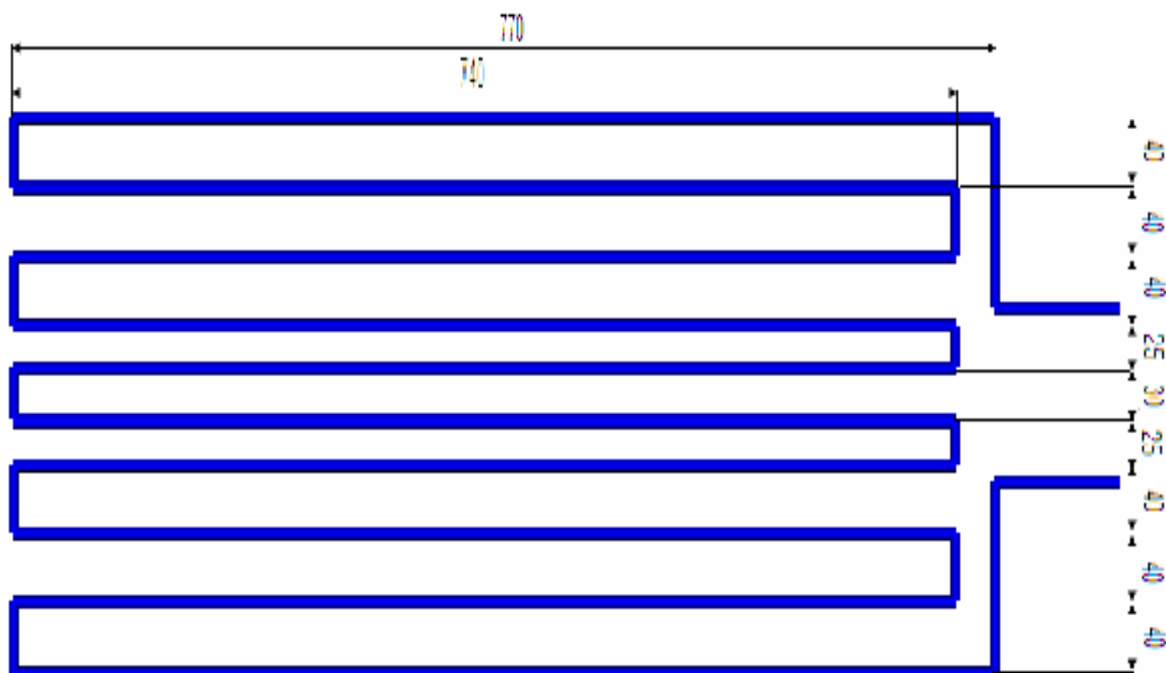


PŘÍLOHA P II.: NOVĚ NAVRŽENÉ TEMPERAČNÍ OKRUHY PRO SPODNÍ DÍL

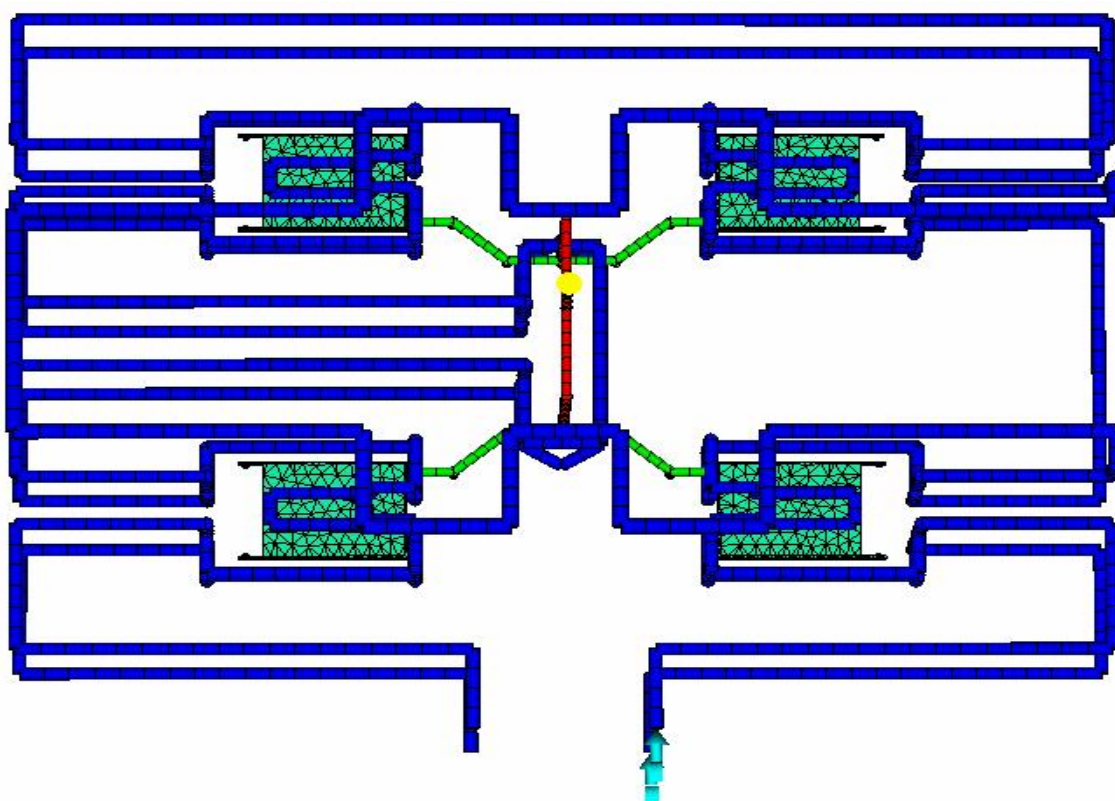
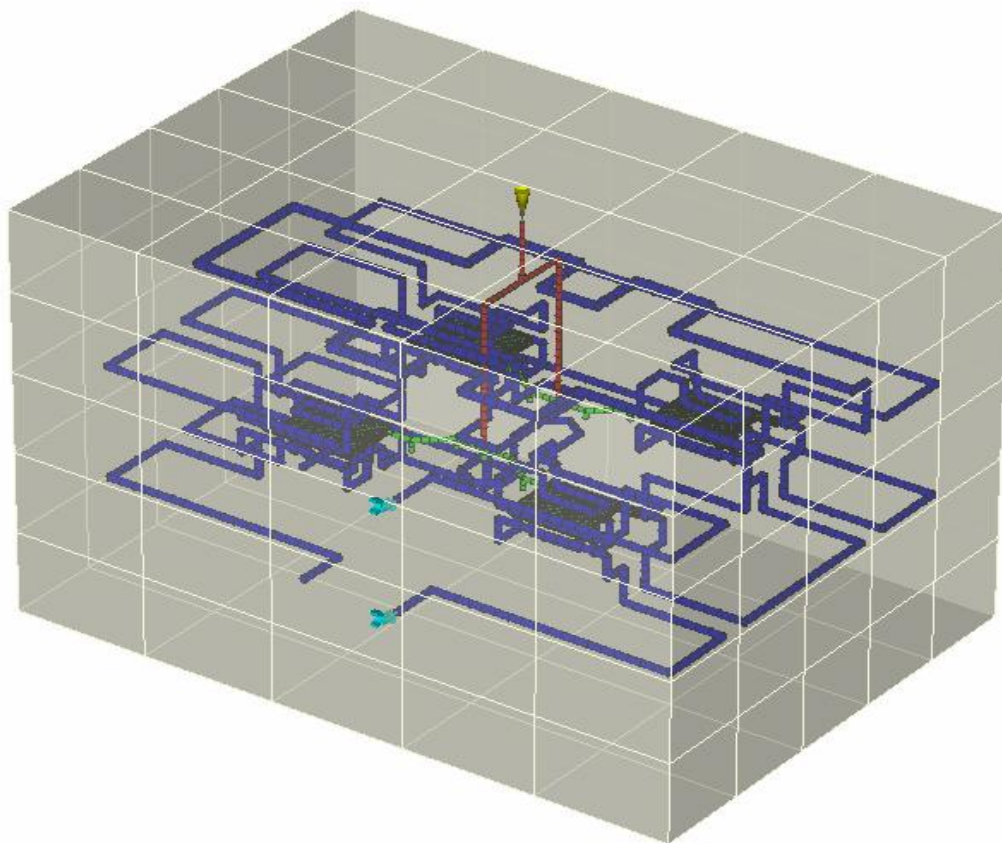
Pravý temperační okruh:



Levý temperační okruh:



PŘÍLOHA P III.: NOVĚ NAVRŽENÁ ČTYŘNÁSOBNÁ FORMA PRO HORNÍ DÍL



PŘÍLOHA P IV.: NOVĚ NAVRŽENÁ ČTYŘNÁSOBNÁ FORMA PRO SPODNÍ DÍL

