



Analýza příčin rozdílné doby cyklu u duplicitní formy na vstřikování plastů

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

Autor práce: **Bc. Jan Vysokai**

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Master thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials
Author: **Bc. Jan Vysokai**
Supervisor: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld





Zadání diplomové práce

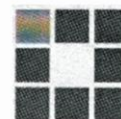
Analýza příčin rozdílné doby cyklu u duplicitní formy na vstřikování plastů

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Jan Vysokai
<i>Osobní číslo:</i>	S16000278
<i>Studijní program:</i>	N2301 Strojní inženýrství
<i>Studijní obor:</i>	Strojírenská technologie a materiály
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2018/2019

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše poznatků v oblasti konstrukce vstřikovacích forem.
2. Výběr vstřikovací formy pro analýzu.
3. Simulace procesu vstřikování.
4. Experimentální měření na základě výsledků ze simulace.
5. Diskuse výsledků a závěr.

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



Seznam odborné literatury:

- [1] ŠAFAŘÍK M. *Nástroje pro tvárění kovů a plastů I.* /skripta / VŠST Liberec, 1987.
- [2] STOECKHERT, K. *Mold-Making Handbook*, Carl Hanser Verlag, 1998.
- [3] GASTROW, H. *Injection Moulds*, 130 Proven design, Hanser, 2002.
- [4] BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. Dostupné na www.etul.publi.cz, 2015. ISBN Android: 978-80-88058-64-9.

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Katedra strojírenské technologie
Datum zadání práce: 31. října 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



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

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

2. 5. 2019

Bc. Jan Vysokai

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Petr Lenfeldovi za cenné rady při jejím zpracování. Chci také poděkovat své rodině za jejich psychickou podporu během mého studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá porovnáním dvou forem na výrobu stejného dílu. Práce analyzuje obě formy a poukazuje na problematické části, které způsobují rozdíly ve výrobních cyklech a kvalitě dílů. Analýza rozebírá jednotlivé části výroby dílu a zjišťuje nutné změny k celkové optimalizaci formy. Doporučené optimalizace obsahují odvzdušnění formy, konstrukce chladících kanálů, průtoku chladiva, změny výrobních parametrů – vstřiku a dotlaku.

Klíčová slova

Vstřikovací forma, vyhazovací systém formy, vtokový systém formy, chladicí systém formy, odvzdušňovací systém formy.

Annotation

The thesis deals with the comparison of two molds for the production of the same part. The thesis analyzes both molds and points to problematic places that cause differences in production cycles and quality of parts. The analysis goes through the individual parts of the part production and determines the necessary changes to the overall mold optimization. Recommended optimizations include venting the mold, cooling channel design, coolant flow, changing production parameters - injection and pressure.

Key words:

Injection mold, ejection mold system, runner system, mold cooling system, mold vent system.

OBSAH

1. Úvod	12
2. Teoretická část	14
2.1. Úvod do teoretické části	14
2.2. Proces vstřikování	14
2.3. Návrh vstřikovací formy	15
2.4. Dělicí rovina/plocha	21
2.5. Vyhazovací systém formy	22
2.6. Vtoková soustava formy	26
2.7. Odvzdušnění formy	31
2.8. Čištění chladících kanálů	34
2.9. Simulační software - Autodesk Moldflow 2018	34
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
3.1. Úvod do experimentální části	35
3.2. Analýza výrobního procesu	36
3.3. Analýza konstrukce vstřikovacích forem	37
3.3.1. Tvorba modelu analýzy	37
3.3.2. Proces vstřiku	40
3.3.3. Proces dotlaku	44
3.3.4. Proces chlazení	44
3.3.5. Rozbor horkého systému	47
3.3.6. Rozbor chlazení formy	49
3.3.7. Rozbor odvzdušnění formy	55
3.4. Modifikace konstrukce formy - za účelem sjednocení doby cyklu	55
3.4.1. Modifikace odvzdušnění	55
3.4.2. Úprava chlazení	56
3.5. Modifikace obou forem za účelem zkrácení doby cyklu	56
3.5.1. Modifikace odvzdušnění	56
3.5.2. Modifikace chlazení	58
4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	61
4.1. Sjednocení výrobních časů forem	61
4.2. Dodatečné úpravy forem	61
4.2.1. Odvzdušnění	65
4.3. Ekonomické zhodnocení	72
5. Závěr	73

6. Seznam použitých zdrojů.....	76
---------------------------------	----

OBRÁZKY

Obr. 1 Vstřikován plastů – princip procesu [6]	15
Obr. 2 Odformovací úkosy na díle [1] [6]	15
Obr. 3 Systém horkého rozvodu taveniny ve formě [6].....	16
Obr. 4 Schéma: stroj – forma [6]	16
Obr.5 Dosed vtoková vložka formy – špička trysky stroje [1], [6]	17
Obr. 6 Vedení vyhazovacích desek [23]	18
Obr. 7 Navádění formy [23]	19
Obr. 8 Středící elementy formy [23]	20
Obr. 9 Středící kroužky vstřikovací formy [23]	20
Obr. 10 Kompletní sestava vstřikovací formy K2500 od firmy HASCO [13], [23].....	21
Obr. 11 Dělicí rovina.....	22
Obr. 12 Vyhazovací systém – stírací deska.....	22
Obr. 13 Šikmý vyhazovač – odformování clipu (podkosu).....	23
Obr. 14 Vozík vyhazovacího systému.....	23
Obr. 15 Výpočet kinematického systému pro šikmé vyhazovače – CUMSA [19]	24
Obr. 16 Kinematika systému pro šikmé vyhazovače – CUMSA [19].....	24
Obr. 17 Kinematika šikmého vyhazovače – uhýbající do formy	25
Obr. 18 Kinematika odformovacího systému - čelisti.....	25
Obr. 19 Kinematika pružného vyhazovače – CUMSA [19]	26
Obr. 20 Filmový / štěrbinový vtok [5].....	27
Obr. 21 Tunelový vtok [5]	27
Obr. 22 Banánový vtok [5].....	28
Obr. 23 Rozvod studeného vtoku [6].....	29
Obr. 24 Melt Flipper [22].....	29
Obr. 25 Horký systém vedení taveniny ve formě [23].....	30
Obr. 26 Ústí trysek horkého systému	30
Obr. 27 Torpédové ústí v řezu.....	31
Obr. 28 Doporučená max. odvzdušňovací mezera v dělení.....	31
Obr. 29 Porcerax-pórovitá ocel [17]	32
Obr. 30 Odvzdušňovací ventily SGD [20]	33
Obr. 31 Systém vákua pro vstřikovací formy - Cumsa [18]	33
Obr. 32 Čistící jednotka pro čištění chladících okruhů formy [15]	34
Obr: 33 Simulační software	34
Obr. 33 Vstřikovaný díl	35
Obr. 35 Chyby sítě.....	37

Obr. 36 Druhy použitých sítí.....	38
Obr. 37 Analýza tloušťky stěny dílu.....	39
Obr. 38 Výpočetní model pro simulaci – bez zadané formy	39
Obr. 39 Výpočetní model pro simulaci 25 cyklů – model obsahuje cca 8 milionů elementů....	40
Obr. 40 Vzhledové vady při zvýšené rychlosti vstřiku Formy B	41
Obr. 41 Vzduchové šmouhy na díle	41
Obr. 42 Výkon jednotlivých trysek horkého systému	42
Obr. 43 Vada studeného spoje na vnitřních žebrech dílu	43
Obr. 44 Průběh plnění formy A vs forma B	43
Obr. 45 Rozdílné plnění dílu.....	44
Obr. 46 Deformace bočních stěn výlisku	45
Obr. 47 Pozice měření teplot formy / dílu.....	45
Obr. 48 Grafy průběhů teplot formy ve výrobním cyklu, od náběhu výroby	46
Obr. 49 Porovnání průměrné teploty dílu z formy A a B	47
Obr. 50 Řez tryskou horkého systému.....	48
Obr. 51 Koncepce rozvodu taveniny horkého systému formy	48
Obr. 52 Použité průměry pro distribuci taveniny v horkém systému formy	49
Obr. 53 Okruhy chlazení formy A.....	50
Obr. 54 Pohyblivá strana – simulační analýza chlazení	51
Obr. 55 Trubičkový systém chlazení tvárníků	52
Obr. 56 Otevřená forma - ukázka jednotlivých tvárníkových vložek formy.....	52
Obr. 57 Pevná strana- simulační analýza chlazení.....	53
Obr. 58 Vrtání chlazení v čelisti.....	54
Obr. 59 Pevná strana: analýza průtoku jednotlivými chladícími okruhy	54
Obr. 60 Pevná strana: Reynoldsovo číslo	55
Obr. 61 Vylvložkování čelistí	56
Obr. 62 Oblast určená k vložkování – změna materiálu na Porcerax [17]	57
Obr. 63 SGD odvzdušňovací ventily [20]	58
Obr. 64 Chlazení pohyblivé strany formy: průtok, reynoldsovo číslo.....	59
Obr. 65 Připojení okruhů přes pneumatický standard.....	59
Obr. 66 Rozvod trubičkového/fondánového chlazení pohyblivé strany formy.....	60
Obr. 67 Zapojení chlazení u formy A – pevná strana	60
Obr. 68 Změny v průtoku a Reynoldsovo číslo před a po zapojení externího zařízení	62
Obr. 69 Průměrná teplota stěny formy – plošné porovnání	63
Obr. 70 Průměrná teplota stěny formy – bodové měření.....	64
Obr. 71 Plnění dílu – objemu materiálu, který proteče skrze jednotlivé trysky	66
Obr. 72 Porovnání tlaků v dutině formy během plnění dílu, při změně rychlosti plnění	67
Obr. 73 Pozice studených spojů na díle.....	69
Obr. 74 Tlak na ztuhlé části dílu.....	70

Obr. 75 Celková deformace dílu, závislá na všech efektech	71
---	----

TABULKY

Tab.1 Časový rozbor vstřikovacího cyklu formy A	36
Tab. 2 Časový rozbor vstřikovacího cyklu formy B	36
Tab. 3 Ekonomické zhodnocení	72

1. Úvod

Proces zpracování plastů vstřikováním je nejrozšířenější způsob zpracování, který se dnes používá. Pokud si výrobní proces idealizujeme a budeme uvažovat, že výrobu neovlivňují žádné další vstupy, jako je stav stroje, formy, prostředí, lze říci, že výrobní proces je založen pouze na kvalitě technologického nastavení výroby. Technologické nastavení vychází z fyzikálních principů, které určují vlastnosti zpracovávaného polymeru. Pokud se kvalita zpracovávaného polymeru během výroby nebude měnit, lze s jistotou říci, že nastavený proces bude stabilní, tedy kvalita vyrobených dílů, během celkové produkce, nebude vykazovat žádné změny, nebude nutné, zasahovat do výrobních parametrů.

Reálně se lze zcela stabilnímu procesu výroby pouze přiblížit. Výroba je znatelně ovlivňována strojem, polymerním materiálem, výrobním prostředím, formou.

Stroj může ovlivňovat proces výroby svou neschopností udržet stejné výrobní parametry či nedosahováním hodnot, nastavených výrobních parametrů. Velikost nestability je u stroje dána jeho stářím, kvalitou zpracování, druhem pohonů.

Polymerní materiál je do výroby dodáván v různých šaržích, změny v jednotlivých šaržích mohou mít znatelný vliv a pro udržení kvality dílu musí být uzpůsobeny technologické parametry. Vzniklý odpad při výrobě, rozjezdové kusy a vtoky je snaha znovu zpracovat. Materiál v tomto případě již nemá vlastnosti originálního materiálu a v závislosti na % míchání s originálním materiálem a míře degradace je nutná korekce technologických parametrů.

Výrobní prostředí může měnit svou okolní teplotu a vlhkost vzduchu, v závislosti na ročním období. Změna teploty vzduchu může být znatelná zvláště u hliníkových forem, kdy při otevírání formy dochází k rychlejšímu chlazení. Vlhkost vzduchu, při nízkých teplotách formy, kondenzuje a díl vykazuje vzhledové vady.

Vstřikovací forma může obsahovat vlastní kinematické mechanismy, okruhy topení/chlazení, horké rozvody taveniny a není tuhým tělesem, ale deformuje se v závislosti na průběhu výrobního procesu. Jednotlivé části formy lze navrhnout různými způsoby a tím měnit jejich charakter. Například chladicí okruhy nemusí vykazovat stejnou intenzitu chlazení v průběhu celého okruhu nebo nemusí být schopny ustálit výrobní teplotu formy. Na stabilitu výrobního procesu mají vliv nejen návrhy jednotlivých částí formy, ale i jejich následná údržba.

Všechny tyto vstupy vytváří nestabilitu výrobního procesu, která mění kvalitu vyrobeného dílu. V závislosti na předepsaných parametrech dílu je nutné více, či méně neustále zasahovat do výrobního procesu a upravovat technologické nastavení tak, aby byla dodržena předepsaná kvalita dílu.

Diplomová práce se zaměřuje na konstrukci vybraných forem, kde se snaží analyzovat a odstranit problematické části, které zvyšují nestabilitu systému. Vybrané formy byly zadány pro výrobu duplicitního dílu, parametry výroby a kvalita dílů by měly být shodné. Formy ale vykazují problémy se stabilitou a kvalitou výroby, nedosahují předpokládaných hodnot a vykazují značné rozdíly při vzájemné porovnání výroby.

Analýza obsahuje technologické a konstrukční změny. K analýze byly využity poznatky z reálného nastavování výrobního procesu, výstupy z analytického software Autodesk Moldflow a kontrola 3D dat v Autodesk Inventor.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. ÚVOD DO TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část obsahuje vysvětlení vstřikovacího procesu a postup návrhu vstřikovací formy. Rozepsaný postup návrhu se postupně zabývá jednotlivými částmi, které je nutno analyzovat a optimalizovat, tak by bylo možné navrhnout formu. Dále aby navržená forma podporovala co největší rozsah technologický parametrů, pro výrobu dílu (technologické okno). Jednotlivé části návrhu jsou podrobněji probrány v kapitolách, následujících po kapitole Návrh vstřikovací formy. Teoretická část dále obsahuje popis chemického čištění chladících okruhů a seznámení s analytickým softwarem Autodesk Moldflow Insight.

2.2. PROCES VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je proces zpracování plastů, při kterém se roztavený materiál, tavenina, za vysokých rychlostí a tlaků vstřikuje do dutiny formy. Výrobní proces vstřikování se rozděluje do 4 technologických fází viz (obr. 1), 1. fáze příprava materiálu, 2. fáze vstřik, 3. fáze dotlak, 4. fáze chlazení.

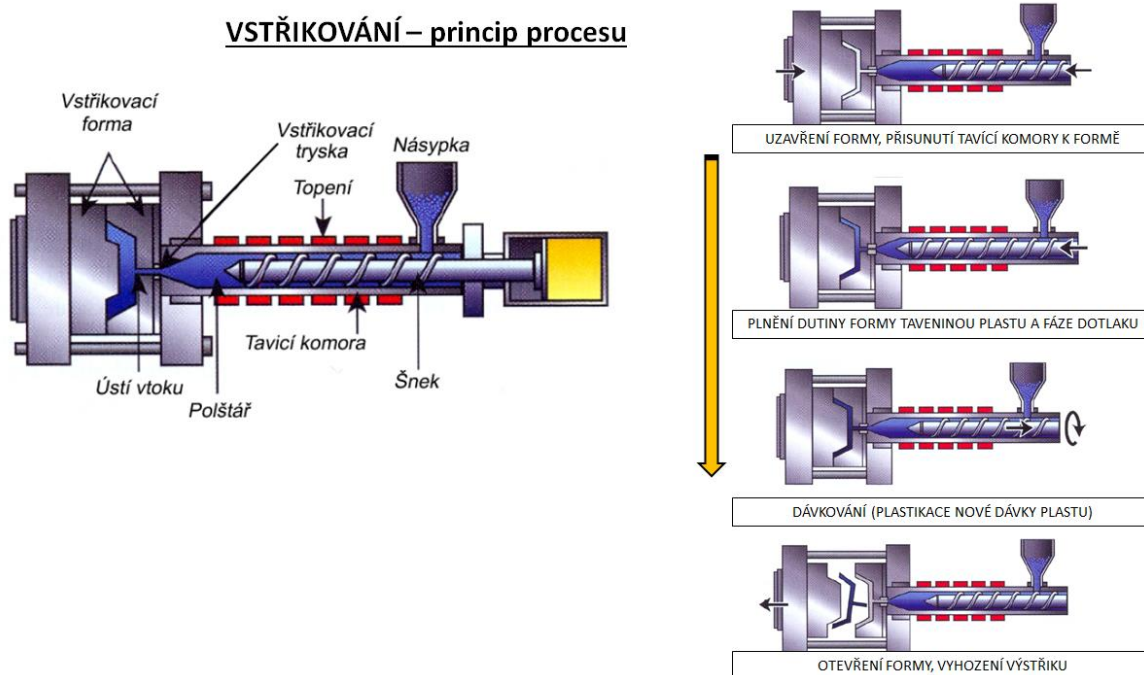
První fáze, fáze přípravy materiálu, se označuje jako šnekování. Šnek, umístěný ve vyhřáté komoře, provádí rotační pohyb, dochází tak k nabírání granulátu a jeho tavení, tvorbě taveniny. Tavenina se pod tlakem shromažďuje před čelem šneku. Tlak taveniny následně působí na šnek a odtlačuje ho, tím se vytváří dávka. Stroj provádí šnekování tak dlouho, doku není šnek odsunut na nastavenou hodnotu.

Druhá fáze, fáze vstřiku, plní dutinu. Plnění dutiny probíhá za vysokých rychlostí, což vyžaduje vysoké tlaky v tavenině, před čelem špičky šneku. Během plnění dosahují tlaky, před špičkou šneku, jednotek tisíc barů. Vysoké tlaky, které se vytváří ve vstřikovací jednotce, se ale do dutiny formy nedostávají, během plnění vznikají ztráty, které znatelně snižují tlaky měřitelné v dutině formy. U většiny forem není dutina formy, dělení formy, konstruováno na takto vysoké tlaky a mohlo by dojít k zástřiku dělení, deformacím formy, prasknutí formy. Z tohoto důvodu je doporučeno zcela nedoplňovat dutinu formy vstřikovací fází, ale při cca 90% naplnění přejít na fázi dotlakovou. Pokud bychom dutinu naplnili vstřikem, došlo by k snížení rychlosti pohybu taveniny a tím se sníží tlakové ztráty. Bez tlakových ztrát by vysoké tlaky od vstřikovací jednotky prošli až do dutiny formy.

Třetí fáze, fáze dotlaku, neudává stroji za úkol dodat do dutiny materiál. Stroj má za úkol udržet nastavené tlaky, které víme, že vydrží dutina formy. Dotlak má za úkol doplnit zbytek dutiny a následně udržovat taveninu, v naplněné dutině, pod tlakem. Materiál v dutině během dotlaku chladne a formuje vnitřní strukturu materiálu, dochází tak ke smrštění, které je snaha dotlakem kompenzovat.

Čtvrtá fáze, fáze chlazení, následuje po dotlaku. Ztuhlý díl má stále příliš vysokou teplotu a je nutné počkat, až teplotu sníží, aby bylo možné provést odformování. Nejvyšší možná teplota je teplota tvarové stálosti, která je určena dle vstřikovaného materiálu. Výsledné teploty jsou

v praxi mnohem nižší, díl je při odformování namáhán vyhazovacím systémem, což vyžaduje mnohem vyšší tuhost, tedy chladnější díl.

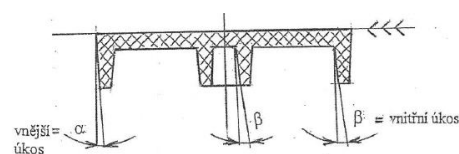
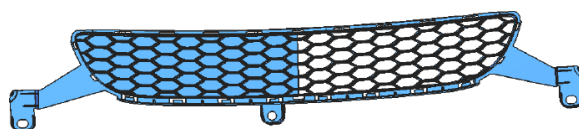


2.3. NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY

První je kontrola návrhu vstřikovaného dílu, díl se kontroluje z hlediska odformování. Díl musí obsahovat dostatečné odformovací úkosy, velikosti úhlů závisí na použitém materiálu, velikosti smrštění, a tvaru dílu viz (obr. 2). [3]

Obvyklé hodnoty odformovacích úhlů pro leštěné plochy:
30° až 2°

Vnitřní úkosy β > vnější úkosy α (kvůli smrštění)

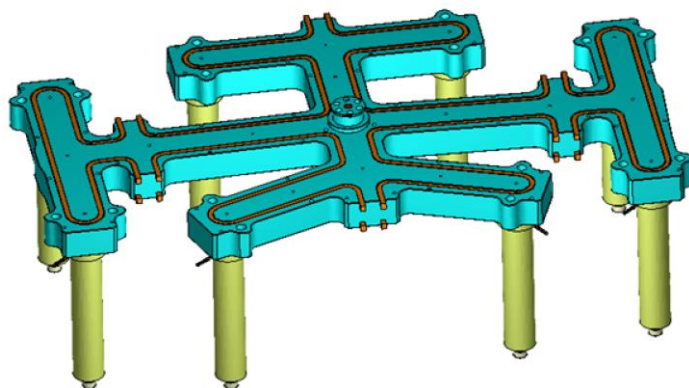


Pro mřížky se úkosy volí větší: 3° až 5°

Obr. 2 Odformovací úkosy na díle [1] [6]

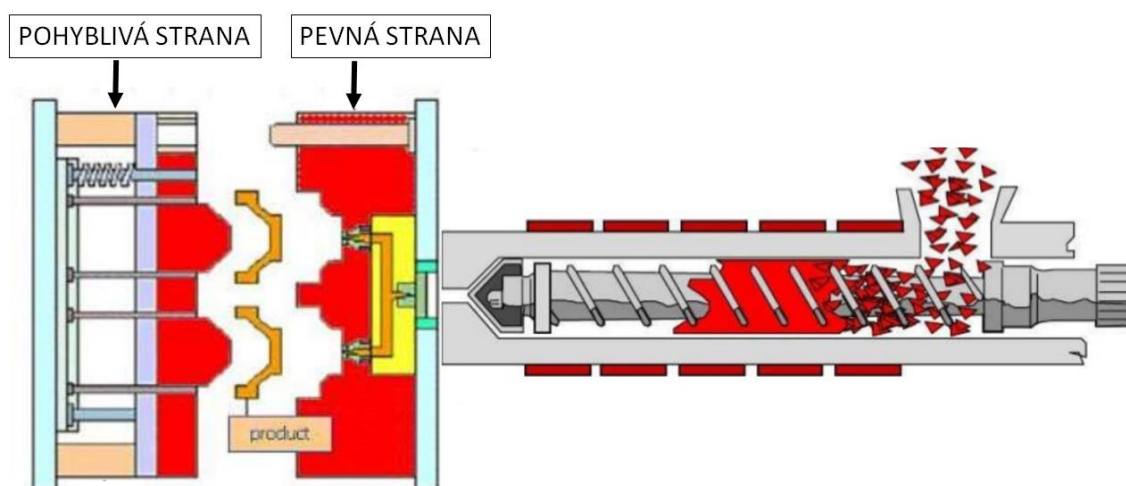
Kontrola odformování nehodnotí jen použité úkosy, ale i podkosy na díle. Podkos na díle je část tvaru, kterou nelze odformovat vysunutím výlisku v odformovacím směru, její pozice je v tomto směru kolizní, je tedy nutno provést úpravu formy, která kolizní část formy odstraní. Touto úpravou formy je myšlen šikmý vyhazovač viz kapitola 2.5 vyhazovací systém formy. Čím větší počet podkosů díl obsahuje, tím se zvyšuje výrobní cena formy.

Po provedené analýze odformování dílu a akceptaci výrobních tolerancí je provedena studie plnění. Hlavním výsledkem ze simulace, pro konstrukci formy, je pozice vtoků. Konstrukce vtokového systému viz kapitola 2.6 vtoková soustava formy. Pokud vtoková soustava obsahuje horký rozvod taveniny ve formě viz (obr. 3) vyžaduje dodavatel systému výkon jednotlivých trysek. Na základě zaslaných hodnot navrhne tvar a průměry desky horkého systému, trysek. [1], [9], [10], [11]



Obr. 3 Systém horkého rozvodu taveniny ve formě [6]

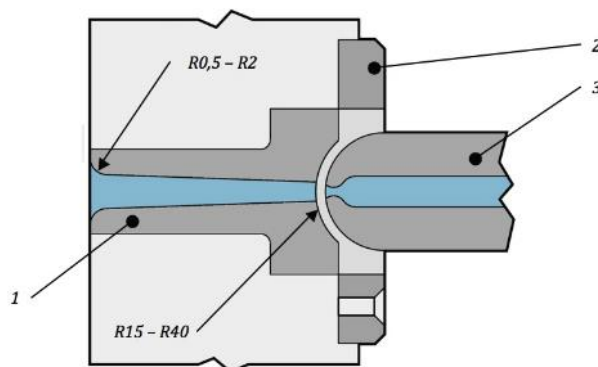
Výsledky z jednotlivých návrhů jsou implementovány do konstrukce formy, konstrukce formy lze rozdělit na pevnou a pohyblivou část formy. Při výrobě je nutné, aby do formy mohl vstoupit roztavený plast a po ztuhnutí se forma otevřela, pro odebrání dílu. Upínací část stroje tedy obsahuje pevnou a pohyblivou stranu, pevná strana je sousedící se vstřikovací jednotkou a pohyblivá otevírá formu pro odebrání dílu viz (obr. 4)



Obr. 4 Schéma: stroj – forma [6]

Pevná strana formy obsahuje oblast pro vstup taveniny do formy, vstupní část je obvykle řešena kalenou vložkou. Vtoková vložka dále obsahuje těsnící, středící plochy. Dosedový

systém trysky a vtokové vložky může být řešen dosedem rovných ploch nebo rádiusů. Při použití dosedu na rádius je nutné dodržet podmínku velikosti rádiusu, tedy vtoková vložka má stejný, nebo větší rádius než špička trysky vstřikovací jednotky viz (obr. 5). [2]



Obr.5 Dosed vtoková vložka formy – špička trysky stroje [1], [6]

1 – vtoková vložka, 2 – středící kroužek, 3 – špička trysky vstřikovací jednotky stroje

Pohyblivá strana formy má za úkol otevřít formu, aby mohlo dojít k odformování a odebrání dílu. Strana obsahuje možnost připojení k centrálnímu vyhazovači stroje.

Z hlediska vyhazovacího systému ve formě, je pohyblivá strana více využívána v závislosti na využití připojení vyhazování na centrální vyhazovač stroje. Není však nutností, aby pohyblivá strana obsahovala vždy vyhazovací systém formy. Pokud však vložíme vyhazovací systém do pevné části, je nutné dodat pohonný systém pro pohyb vyhazovací desky. Kinematika vyhazovací desky může být spojena s otevíráním formy, pružinami, nebo hydraulickými válci. Dále je nutné se s vyhazovacím systémem vyhnout systému rozvodu taveniny. [3]

Z hlediska pohledové a nepohledové strany dílu je to stejné, jako u pozice vyhazovacího systému, není pevně udána a lze ji použít jak na pevné, tak i na pohyblivé straně.

Z výše uvedených důvodů je upřednostnění terminologie „pevná“ a „pohyblivá“ strana nutné pro přesné určení konzultované části formy. Všechny ostatní označení s jistotou neurčují přesnou pozici.

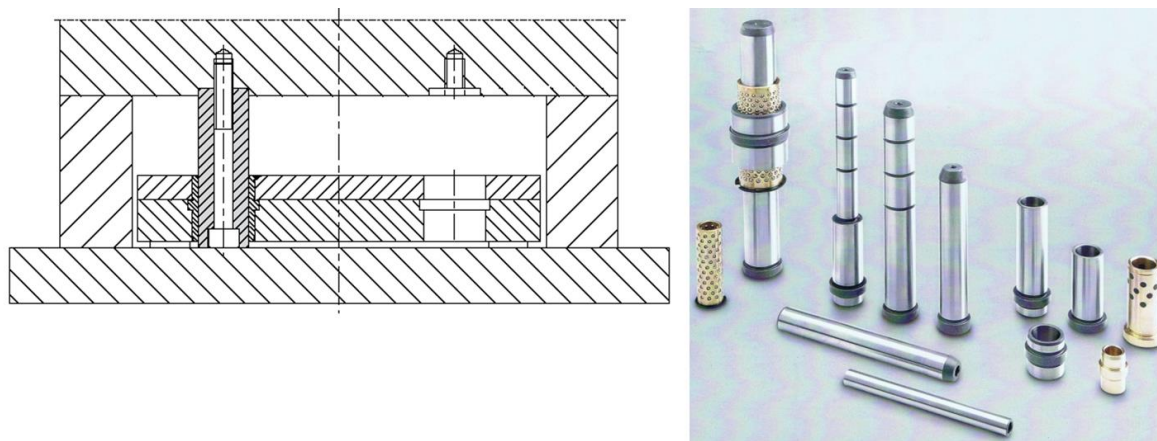
Forma dále musí obsahovat centrování formy, vedení formy, vedení vyhazovací desky aj. normativy potřebné ke správné funkci formy

Vedení vyhazovacích desek

Vyhazovací desky mohou být vedeny několika způsoby, ale rozmístění vodicích elementů musí být symetrické, aby nedošlo ke křížení vyhazovací desky během pohybu.

Způsoby vedení vyhazovací desky viz (obr. 6)

- a) vyhazovacím čepem v kluzném pouzdře (rotaci zabraňují vyhazovače, vratné kolíky vedené ve tvarové desce)
- b) vodicími kolíky a kluznými pouzdry (kolíky lícované jedno/oboustranně, nejčastěji cementované kolíky a bronzová pouzdra)
- c) kuličkové vedení

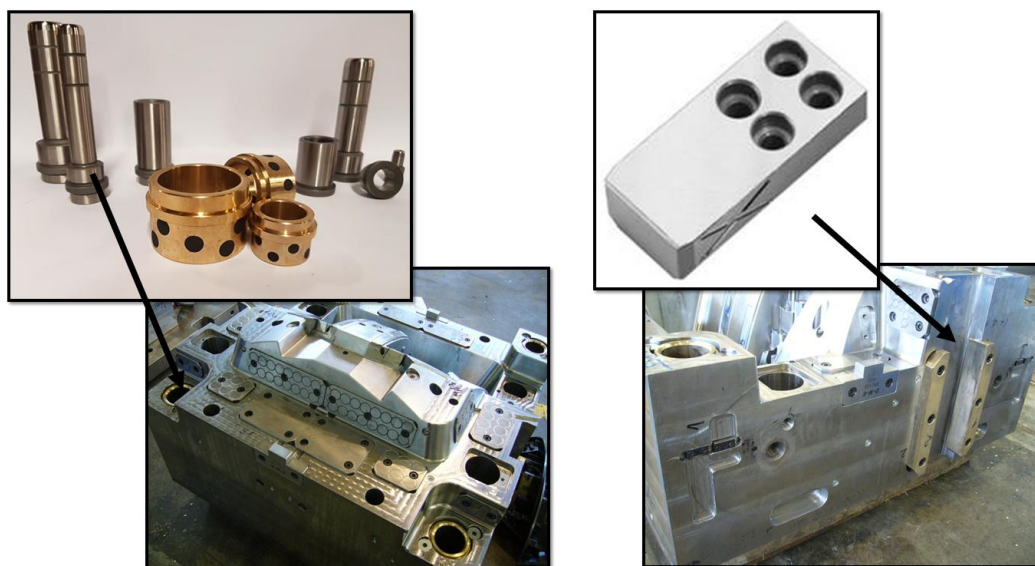


Obr. 6 Vedení vyhazovacích desek [23]

Vedení formy

Vedení formy lze rozdělit do dvou částí, navedení formy a středění. Navedením formy je myšleno počáteční centrování formy při uzavírání. Finální vystředění se provádí v jednotkách milimetrů až desetin milimetrů, zdvihu formy, před uzavřením formy.

Navedení formy lze provádět vodicími sloupky s pouzdry nebo kameny s kluznými destičkami a ložisky viz (obr. 7). Systém navádění musí být dostatečně dlouhý, aby ochránil tvary formy před možnou kolizí, navedení musí být provedeno dříve, než systém dosedne na středění. Použití naváděcích prvků je závislé na velikosti nástroje, malé formy mohou disponovat pouze středícími prvky, které provedou navedení a vystředění zároveň (formy pro Babyplast). Střední formy nejčastěji disponují naváděcími sloupky a velké formy obsahují oba systémy, vodicí sloupky i ploché kameny.



Obr. 7 Navádění formy [23]

Vlevo - vodící sloupek

Vpravo – plochý kámen

Středění formy slouží k finálnímu vycentrování. Je důležité, aby dosed dělících ploch byl přesný, bez možnosti posuvu. Pokud by dělení nedosadalo přesně stále do stejné pozice, mohlo by docházet k vymačkání lícovaných ploch, tvorbě zástříku, nebo problémům s plněním dílu. Pokud by forma neobsahovala středění, mohla by se díky posuvu měnit tloušťka stěny vylisku, což by mělo za následek nestabilní výrobní proces, docházelo by ke změně průběhu plnění dutiny. Problém se změnou tloušťky stěny je nejvíce zřetelný u tenkostěnných dílů, díly v takovémto případě mají problém s naplněním dutiny. [1], [12]

Ke středění polovin formy se používají dosedové zámky/kameny, centrovací klíny viz (obr. 8). Středící elementy pro obě poloviny nástroje se často konstrukčně řeší nesymetricky, pro zamezení nesprávného sesazení půlek formy. Dosedové zámky/kameny se nejčastěji používají jako normativ, ale v určitých případech, nejčastěji u tenkostěnných vylisků s kruhovou dosedovou plochou, se i vyrábí. Centrovací klíny jsou vyfrézované zámky, které jsou osazeny kalenými destičkami. Destičky se používají pod úhlem dosedu 15° - hrubé středění, 1° - finální středění. Středící tvary osazené destičkami nejen středí dosed formy, ale jsou schopny rozvádět vysoké boční síly, kterými se plast snaží deformovat formu.



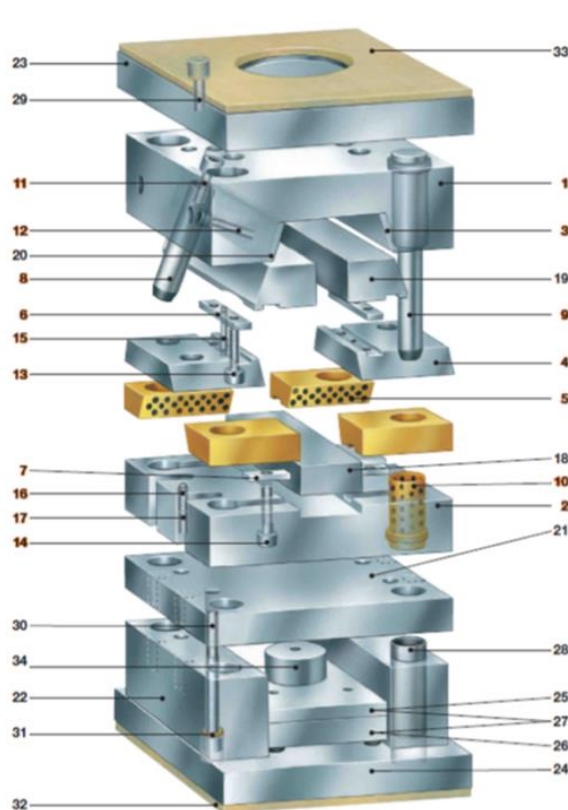
Obr. 8 Středící elementy formy [23]

Formu je dále nutno vystředit na vstřikovacím stroji, správné vystředění znamená souosost vstřikovací jednotky a vtokové vložky formy. Vystředění je nutné, aby nedocházelo k úniku taveniny mezi tryskou a formou. K vystředění lze použít jakýkoliv systém, který bude dané lisovně vyhovovat, zavedenými standardy je použití středících kroužků viz (obr. 9), nebo kombinace podpěrných bot a bočního vedení, tento systém se používá při automatické výměně forem. [1]



Obr. 9 Středící kroužky vstřikovací formy [23]

Forma se tedy skládá z jednotlivých desek, tvarových částí a normativů, které mají za úkol středit formu, odformovat díl, tepelně izolovat, aj.. Rozklad sestavy vstřikovací formy HASCO viz (obr. 10).



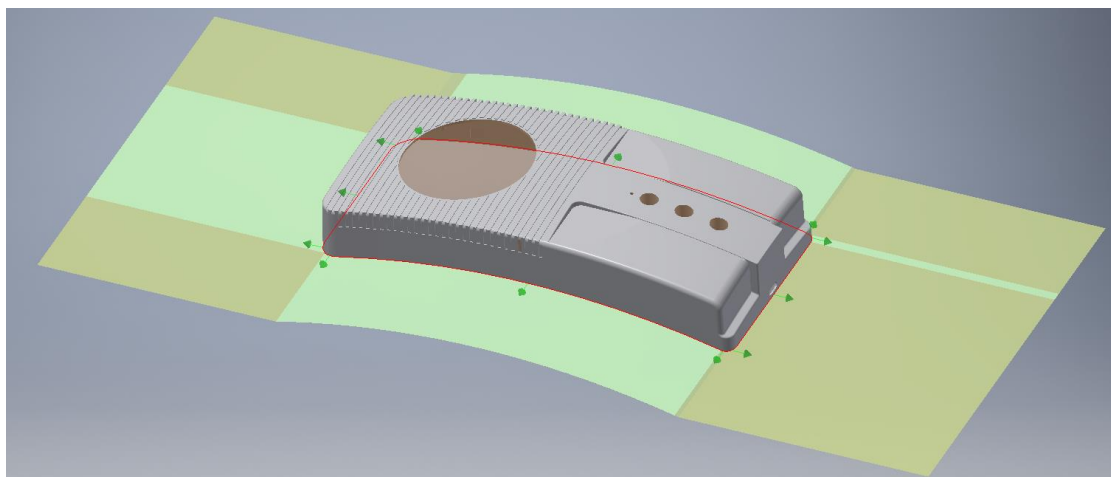
Pozice	Označení	Počet kusů	Normálle	Materiál
1	Kotevní deska horní	1	K2500	1.2312
2	Kotevní deska dolní	1		1.2312
3	Otěrúzdorná vložka	2		1.2842
4	Kleštiny	2		1.2767
5	Vodící lišta	4		2.0492
6	Paralelní zámek, dlouhý	2		1.2312
7	Paralelní zámek, krátký	4		1.2312
8	Úhlový vodící čep	4	Z010	1.0401
9	Vodící sloupek	4	Z04	DIN16761-A
10	Vodící pouzdro	4	Z1000W	DIN16761-C
11	Šroub s válcovou hlavou	4	Z31	10.9
12	Šroub s válcovou hlavou	4	Z31	10.9
13	Šroub s válcovou hlavou	4	Z31	10.9
14	Šroub s válcovou hlavou	8	Z31	10.9
15	Střední kolík	2	Z26	
16	Pružící přitlačný kus	2	Z371	1.4305
17	Závitový kolík	2	Z35	-
18	Přidrůvací vstřikovací jádra	1	K2531	1.2767
19	Čelisti	2	K2528	1.2767/1.2343
20	Otěrúzdorná vložka, náhradní díl		K2526	1.2842
21	Opěrná deska	1	K30	1.1730
22	Lišty	2	K45/K40	1.1730
23	Vrchní upínací deska	1	K10/K12	1.1730
24	Spodní upínací deska	1	K13/K11	1.1730
25	Opěrná deska vyhazovače	1	K65/K60	1.1730
26	Základní deska vyhazovače	1	K75/K70	1.2312
27	Sada vyhazovacích desek	1	K65/75	1.1730
28	Středící pouzdro	4	Z20	DIN 16759
29	Šroub s válcovou hlavou	4	Z31	10.9
30	Šroub s válcovou hlavou	4	Z31	10.9
31	Uzavírací zapuštěná podložka	8	Z691	DIN 17221
32	Teplotně izolační vložka	1	Z121	
33	Teplotně izolační vložka	1	Z121	
34	Opěrný sloup	1	Z57	

Obr. 10 Kompletní sestava vstřikovací formy K2500 od firmy HASCO [13], [23]

2.4. DĚLÍCÍ ROVINA/PLOCHA

Dělicí rovina je oblast, kde dochází ke styku jednotlivých komponent formy, tato oblast musí zaručovat utěsnění, vůči průchodu plastu skrze ni viz (obr. 11).

Vstřikovací forma musí být schopna odformovat díl, který je v ní vyráběn, tedy díl má určenou dělicí oblast, která určuje, která část dílu bude tvořena v pevné a která v pohyblivé straně formy (tvárníku, tvárnici). Dále forma může obsahovat pohyblivé elementy, které mají také svou plochu dělení. Forma také může obsahovat nepohyblivé vložky a tedy i jejich dělicí roviny.



Obr. 11 Dělicí rovina

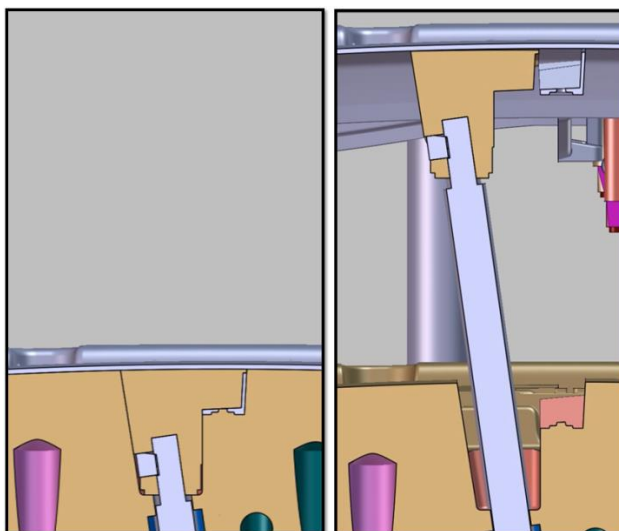
2.5. VYHAZOVACÍ SYSTÉM FORMY

Po výrobě musí být vstřikovaný díl z formy odebrán, aby se uvolnila dutina pro další výrobek. Pro účely vysunutí výrobku z dutiny formy, aby mohl být odebrán, se mohou použít například válcové vyhazovače nebo stírací deska viz (obr. 12). [2], [4]



Obr. 12 Vyhazovací systém – stírací deska

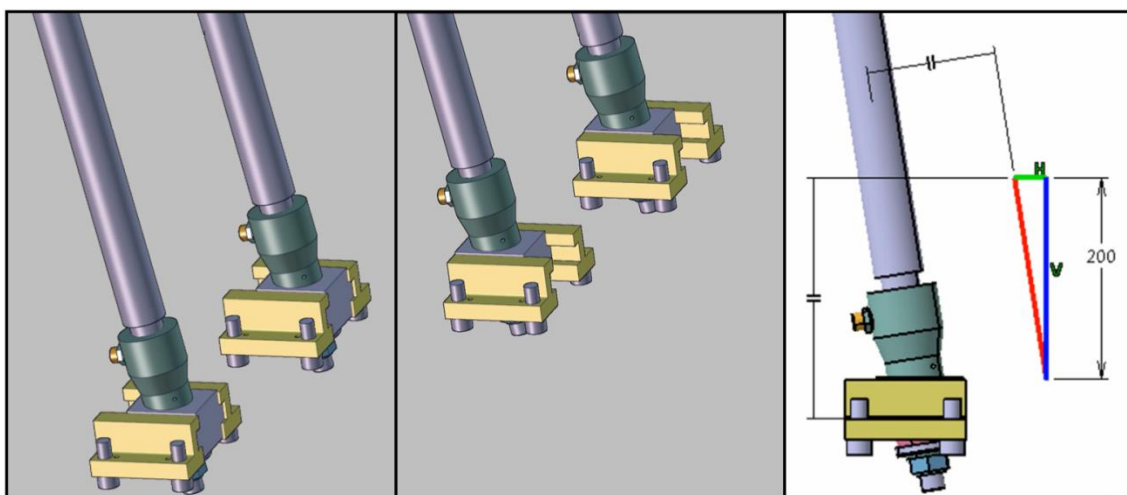
Pokud díl obsahuje podkoso, části které jsou v kolizi s formou ve směru vyjímání dílu, je nutné do formy implementovat odformovací systém, který tento problém řeší. Jednou z možností je odformování pomocí šikmého vyhazovače viz (obr. 13). [4]



Obr. 13 Šikmý vyhazovač – odformování clipu (podkosu)

Provedení šikmého pohybu, lze provést systémem vodící tyče, která aretuje výsuv tvarové vložky pod daným úhlem. Posuv tyče je přenášen přímo od vyhazovací desky nebo pomocí další vodící tyče, která pomáhá převádět rovný pohyb vyhazovací desky na šikmou vodící tyč. [8]

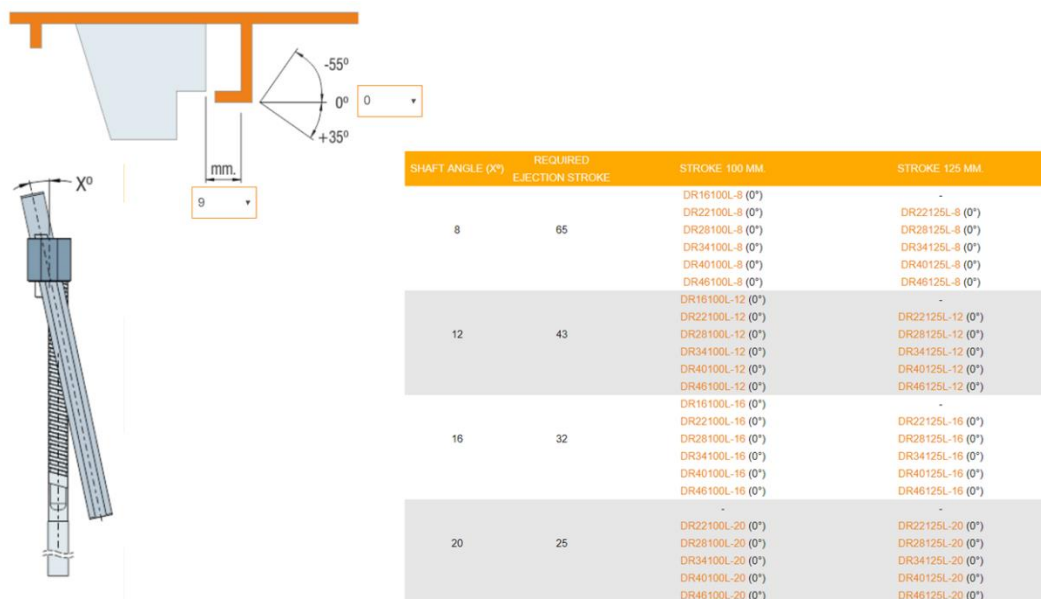
Přenášení posuvu přímo od vyhazovací desky je provedeno za pomoci vozíku, umožňujícího pohyb příčný vůči směru výsuvu vyhazovací desky viz (obr. 14). Tímto mechanismem, který se skládá z bronzového/kaleného vedení a vodícího kamene, lze převést kinematiku vyhazovací desky na šikmou tyč vyhazovače, aniž by došlo ke kolizi, ohnutí tyče.



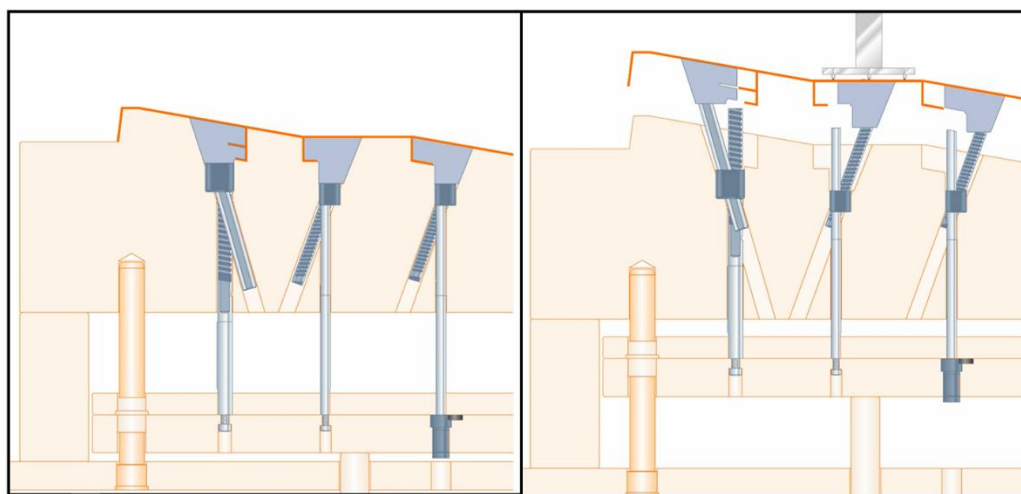
Obr. 14 Vozík vyhazovacího systému

Další možností převedení výsuvu vyhazovací desky na šikmou tyč vyhazovače je použití systému CUMSA, výpočet se provádí přímo na stránkách viz (obr. 15), konstruktér tedy není

zatížen výpočty potřebného úhlu k odformování a dále neřeší tuhost systému, aplikace ihned ukáže možné úhly v závislosti na délce výsuvu. Kinematika mechanismu viz (obr. 16). [19]

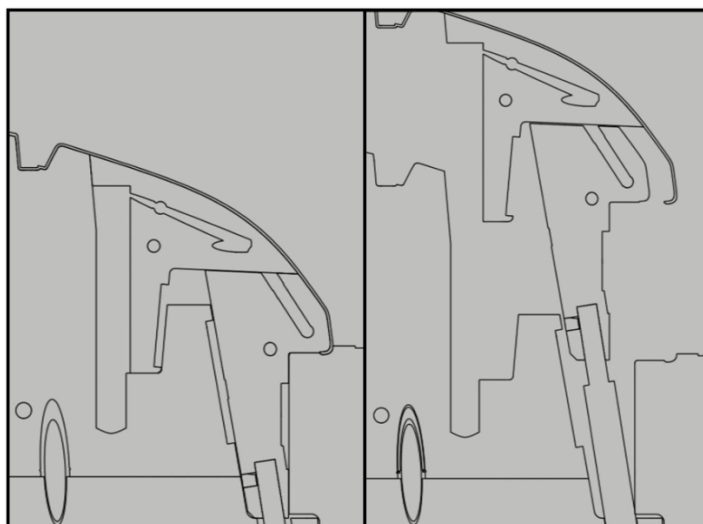


Obr. 15 Výpočet kinematického systému pro šikmé vyhazovače – CUMSA [19]



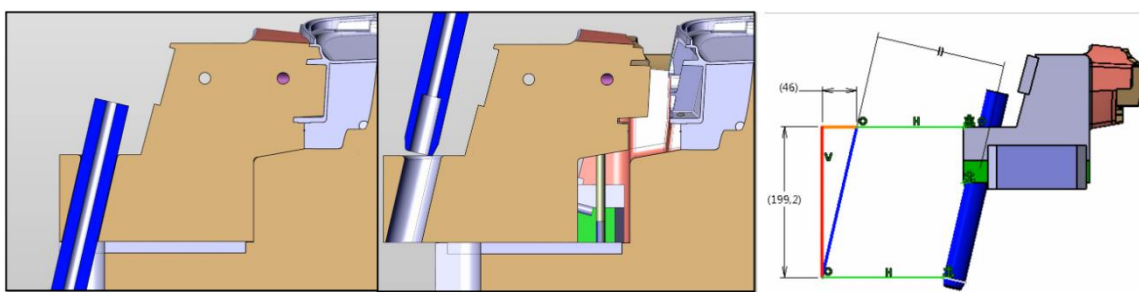
Obr. 16 Kinematika systému pro šikmé vyhazovače – CUMSA [19]

Pokud vzhledová část dílu nemůže nést stopy po dělicí rovině, je dělení posunuto do podkosu. V takovémto případě je nutné s kolizní částí formy uhnout směrem do středu formy, což znamená, že forma musí v této oblasti mít dutinu, nebo se zde dutina musí vytvořit během průběhu odformování viz obr. (17). [4]



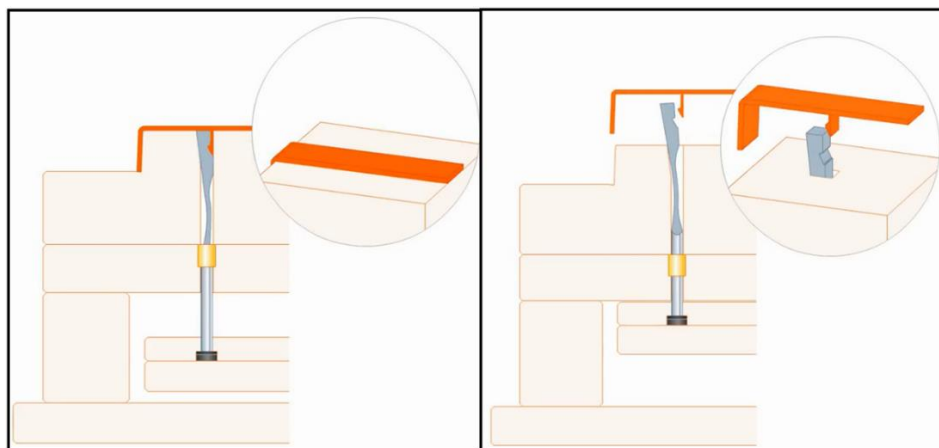
Obr. 17 Kinematika šikmého vyhazovače – uhýbající do formy

Odformování podkosů lze také provést čelistmi viz (obr. 18). Čelistí je myšlen druh odformovacího systému, je to tvarová vložka, jejíž suvný pohyb, který odformovává daný podkos, je prováděn přes kulisy, nebo kluzně přes dosedové plochy. Pohyb je přenášen od pohybu formy, otevírání formy, pružinami, nebo přes poháněnou pístní tyč.



Obr. 18 Kinematika odformovacího systému - čelisti

Pokud musí být vyhazovací systém instalován s minimálními zástavbovými rozměry, lze použít pružné vyhazovače, které tuto podmínku splňují viz (obr. 19). [19]



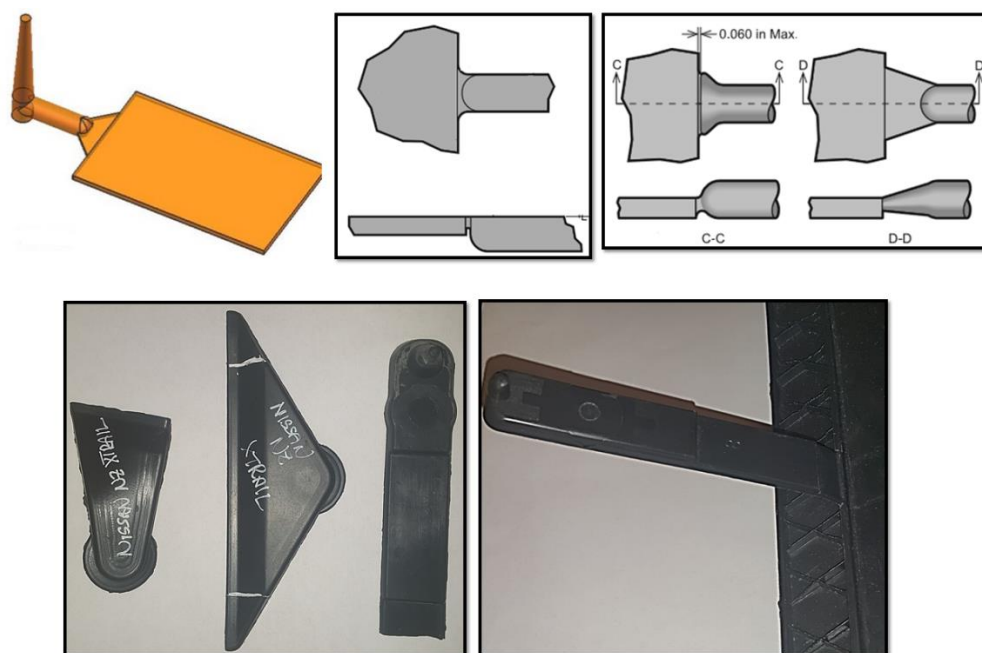
Obr. 19 Kinematika pružného vyhazovače – CUMSA [19]

2.6. VTOKOVÁ SOUSTAVA FORMY

Návrh vtokové soustavy formy je závislý na kvalitativních požadavcích na díl a ekonomických požadavcích na výrobu formy, dílu. Kvalitativní požadavky na díl určují, zda může být na díle stopa po vtoku nebo pozici vtoků v závislosti na plnění dílu a jeho výsledných deformacích. Ekonomické zhodnocení se snaží využít nejlevnější alternativu systému dostačující pro výrobu dílu. Vtoková soustava lze rozdělit na část řešící vyústění na díl a část, která řeší rozvod taveniny ve formě a jeho dopravu k danému vyústění. [7]

Jednotlivé typy vyústění na díl lze rozdělit do dvou kategorií, dle způsobu oddělení vtoku od dílu.

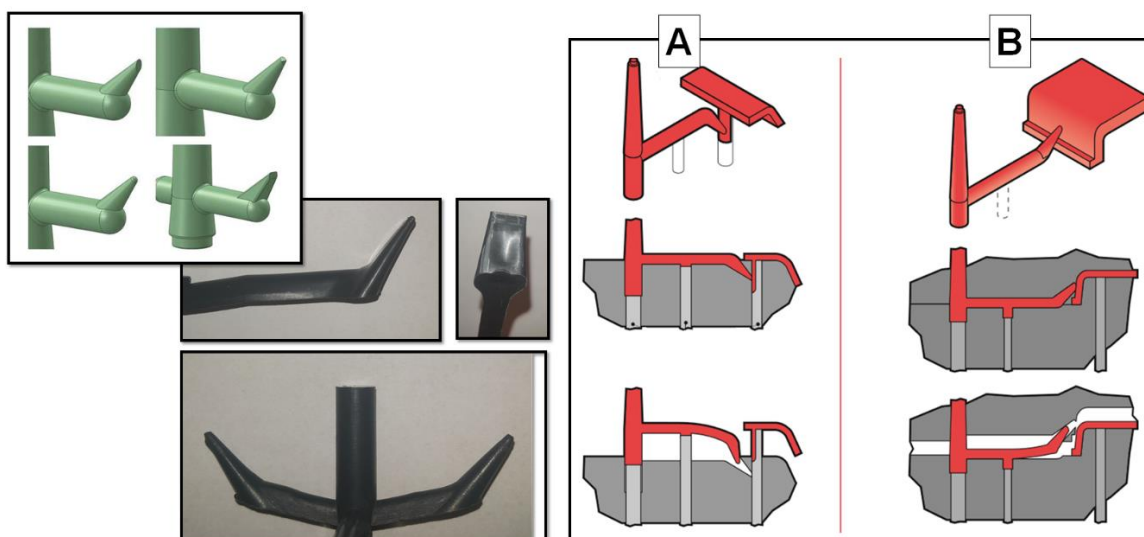
Pokud vtok po doformování zůstává na díle, je nutná dodatečná operace, která odtrhne, odřízne vtok od dílu. Vyústění vtoku je v tomto případě uloženo v dělicí ploše formy viz (obr. 20), používané názvosloví je: „filmový vtok / štěrbinový vtok“. Tento systém vyústění je technologicky nejpřívětivější, velikost používaných průřezů vyústění se pohybuje v násobcích ostatních variant. Nevýhodou vtoku je nutnost odstranění, tedy přidaná operace, která, pokud ji dělají operátoři, může navýšit cenu výroby.



Obr. 20 Filmový / štěrbinový vtok [5]

Další druhy vyústění již umožňují oddělení vtoku během otevírání formy, vyjetí vyhazovacího systému.

Tunelové vyústění umožňuje pozicovat vyústění mimo dělicí plochu. Tímto způsobem vyústěné jsme schopni plnit přes nepohledové části dílu a schovat tak stopu po vtoku. Vtok se automaticky odděluje během otevírání formy, nebo vyjetí vyhazovacího systému, průběh oddělení a odformování vtoku viz (obr. 21). Oddělení vtoku je provedeno odříznutím.



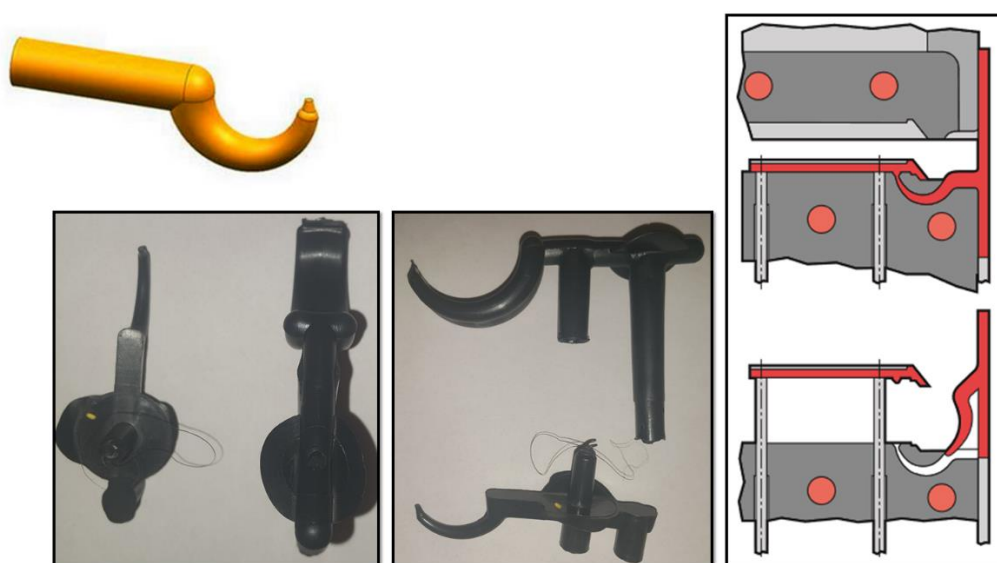
Obr. 21 Tunelový vtok [5]

Pravá část obrázku znázorňuje odformovací proces vtoku

A) Odformování je provedeno při vyjetí vyhazovacího systému formy

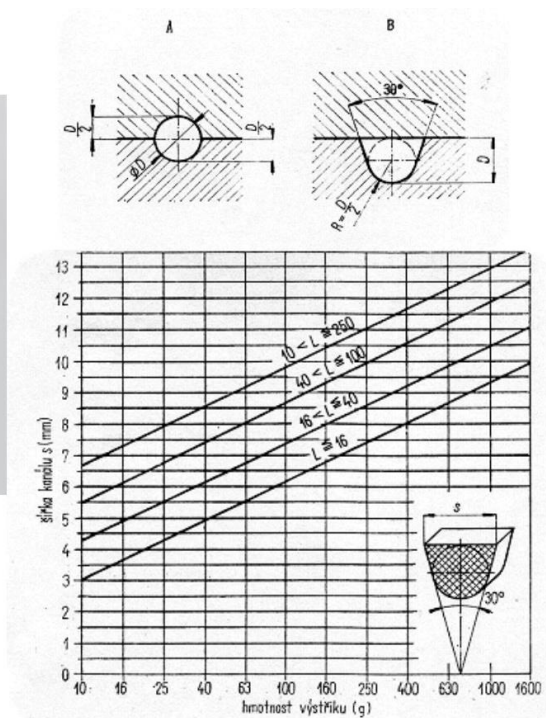
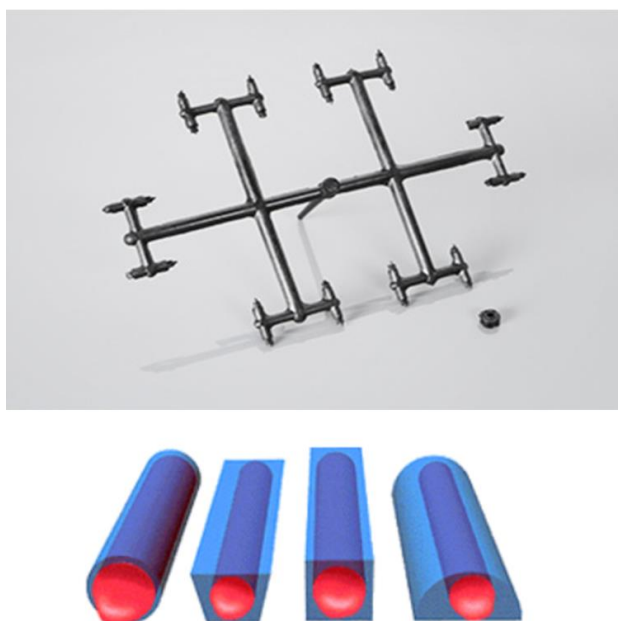
B) Odformování je provedeno při otevírání formy

Banánový vtok je charakterizován svým zaobleným průběhem, který připomíná banán. Tento vtok je druh tunelového ústí, které se neořezává, ale odtrhává. Z důvodu provedení oddělení vtoku od dílu, odtržením, je nutné, aby zakončení vyústění bylo zúženo mimo oblast dílu a tím nedocházelo k vytrhávání materiálu z dílu. Velikost vyústění je tedy limitována, dle materiálu, aby bylo možné vtok oddělit bez deformací dílu či jeho porušení. Banánový vtok, vložka, se nejčastěji pořizuje jako normálie od firem, které se vtoky zabývají. Je tak zaručen správný průběh, průřezy vtoku a lehká vyměnitelnost poničené vložky. Tvar a průběh odformování banánového vyústění vtoku viz (obr 22).



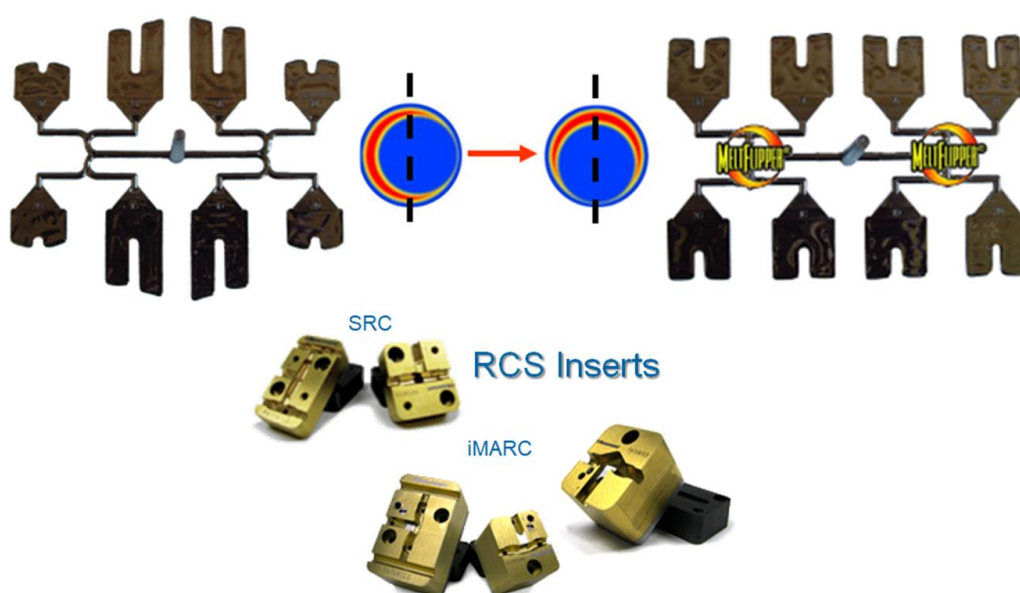
Obr. 22 Banánový vtok [5]

Studený rozvod - rozvod vtokového kanálu dopravuje taveninu od trysky horkého rozvodu, trysky stroje k místu vyústění na díl. Rozvodný kanál musí zaručit odloučení studeného čela taveniny a odloučení vstupních nečistot. Oba jevy se vylučují na čele taveniny při plnění rozvodu, proto při rozdělování toku „křížovatka“ obsahuje slepé pokračování rozvodu ve směru příchozí taveniny. Ve slepém rameni se zachytí čelo, které by mohlo obsahovat nežádoucí části. Rozvod dále musí zajišťovat dopravu taveniny k místu s minimální ztrátou tlaku a teploty během proudění rozvodem. Při plnění vtoku dochází k okamžité tvorbě povrchové ztuhlé vrstvy materiálu, tato vrstva dále funguje jako izolace pro další vstupující taveninu, která bude plnit díl. Správné dimenzování vtoku viz (obr. 23) určuje, jak velká izolační vrstva se vytvoří. [6]



Obr. 23 Rozvod studeného vtoku [6]

Rozvod taveniny dále zajišťuje balanc při plnění více kavitového systému. Pokud forma obsahuje více kavit, pro stejné či rozdílné díly, je nutné zajistit správné plnění dutiny. Rozvod musí zajišťovat balanc plnění dílů, díly se doplní ve stejný čas. Pro balancování rozvodu lze použít změnu rozměru kanálů, změna rozměru mění odpory při tečení a tím lze balancovat plnění jednotlivých kavit. Další možností je využití systému Melt-Flipper od firmy Beaumont viz (obr. 24).



Obr. 24 Melt Flipper [22]

Rozvod taveniny ve formě může být veden tzv. horkým systémem viz (obr. 25). Horký systém se skládá z desky a trysek, které mají s deskou kluzný styk nebo jsou pevně spojeny přes závit.



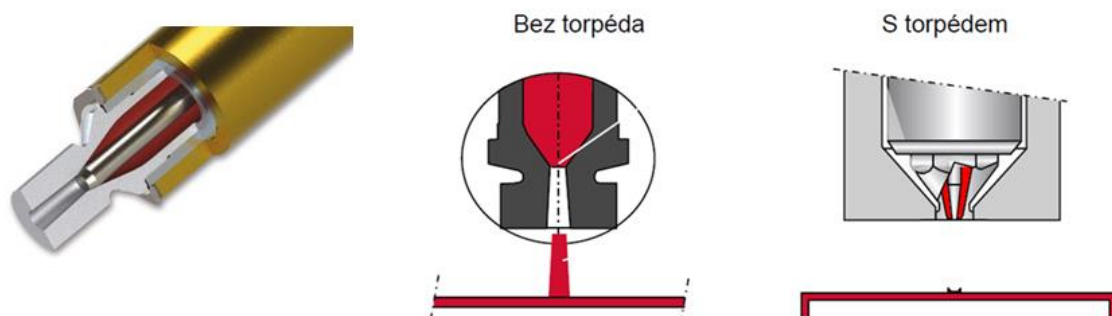
Obr. 25 Horký systém vedení taveniny ve formě [23]

Tryska horkého systému formy může být řízená, tedy má možnost otevírání a uzavírání ústí, nebo je stále otevřená.

Řízené trysky mají možnost uzavření vtokového ústí, toto uzavření se provádí jehlou umístěnou v trysce. Jehla může utěsnit ústí dvěma způsoby, přes válcovou plochu, špička trysky je válcová a zajištěním do přesného ústí dojde k utěsnění, nebo přes kuželovou dosedací plochu viz (obr. 26). Pohyb jehly je prováděn přes hydraulický, nebo pneumatický válec, v některých případech i elektromotorem.

Otevřená tryska vyžaduje vtokový zbytek, zbytek materiálu vytažený z kuželového ústí vtoku viz (obr. 26). Vtokový zbytek je nutný z důvodu tuhnutí dílu v oblasti vtoku.

Otevřená tryska s torpédovým vyústěním viz (obr. 27) se používá, pokud není třeba řízení trysky jehlou a není akceptovatelný vtokový zbytek na díle. Při použití torpéda, se vtokový zbytek zmenšuje na drobnou korunku v oblasti ústí vtoku (viz obr. 26).

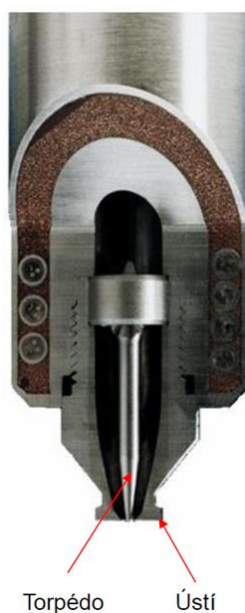


Obr. 26 Ústí trysek horkého systému

A: ústí řízené trysky, utěsnění dochází dosedem na kuželovou plochu

B: ústí otevřené trysky

C: ústí otevřené trysky s torpédem



Obr. 27 Torpédové ústí v řezu

2.7. ODVZDUŠNĚNÍ FORMY

Jako nejběžnější způsob lze označit odlehčení/odleštění dělicí roviny. Dělení, pokud je prováděno ručně, vykazuje mezeru v setinách milimetru. Tato mezera je dostatečná pro utěsnění oblasti proti vniku taveniny. Pokud je dělení prováděno strojně – elektroerozivní obrábění, mezera v dělení se zmenšuje na tisíce milimetru. Čím menší je mezera v dělení, tím hůře tudy odchází vzduch během plnění formy. Z takového důvodu se exponovaná místa prohlubují, tedy zvětšuje se mezera v dělení. viz (obr. 28).

plast	mezera [mm]
PS, ABS	do 0,05
PE, PP, PPO	do 0,04
PA	0,02 až 0,03
PBT	do 0,03
PC, POM	do 0,05
sklem vyztužený	0,05 až 0,08
strukturní pěny	do 0,1

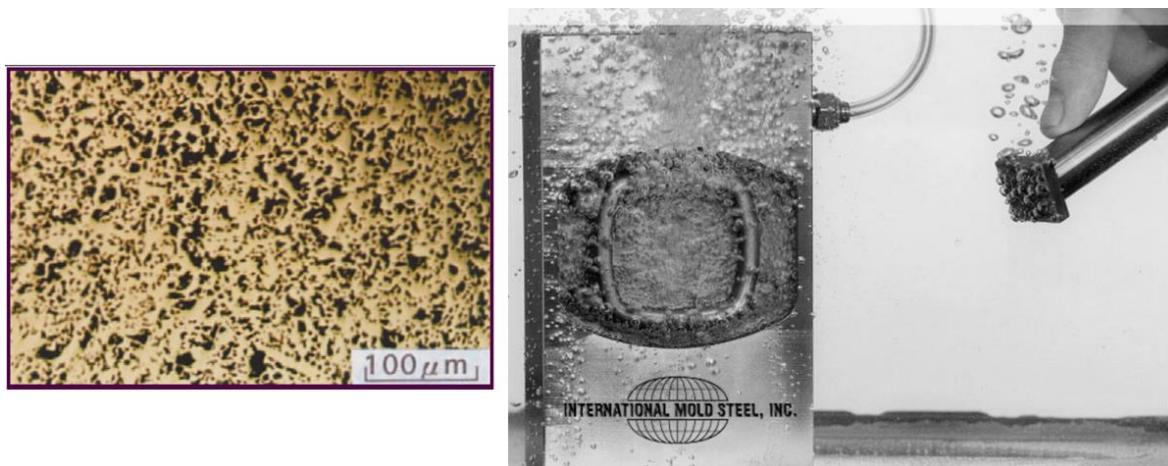
Obr. 28 Doporučená max. odvzdušňovací mezera v dělení

Odvzdušnění za pomoci vyvložkování tvarů

Další způsob odvzdušnění je záměrné tvoření dělicích ploch, tedy vložkování tvarů. Tento systém má nevýhodu v ceně a stabilitě procesu. Rozvložkování tvaru je nákladné a k udržení efektu odvzdušnění je nutné cyklické čištění dělení vložek. Čištění dělení je nutné v celé konstrukci formy, ale pokud je vložka nepohyblivá, tak je zanášení dělení rychlejší, nedochází k samočištění při pohybu vložky, odírání tvarů o sebe. [3]

Odvzdušnění za pomoci pórovitého materiálu

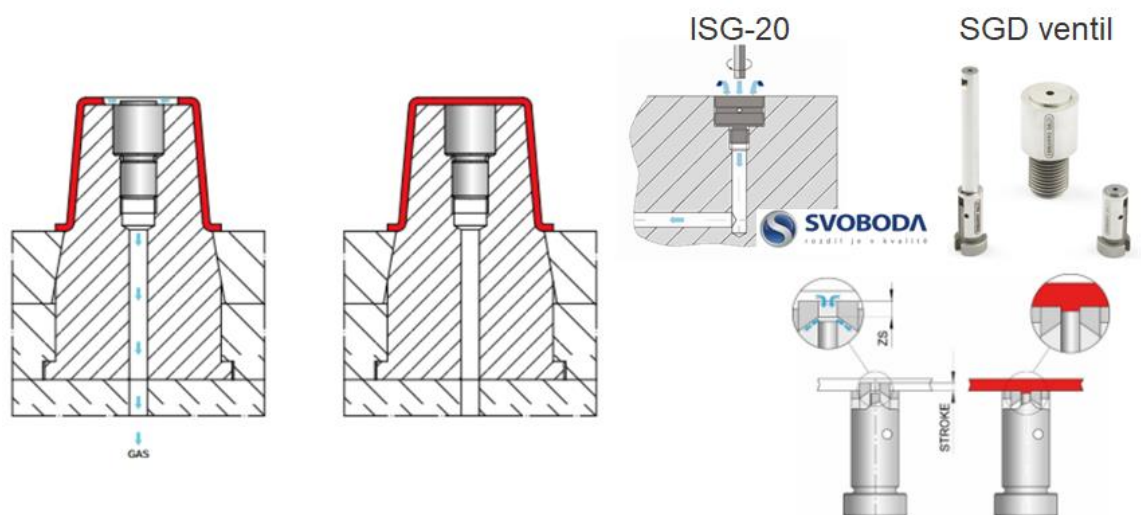
Tvorba vložek ze speciálního porézního materiálu je další možností k provedení odvzdušnění. Porcerax je pórovitá ocel, která dosahuje 38HRC. Póry, o průměru 7-20 μm , prochází skrze celý blok oceli a jsou tak schopny odvést značné množství vzduchu/plynu při plnění dutiny formy viz (obr. 29). [17]



Obr. 29 Porcerax-pórovitá ocel [17]

Odvzdušnění za pomoci ventilů

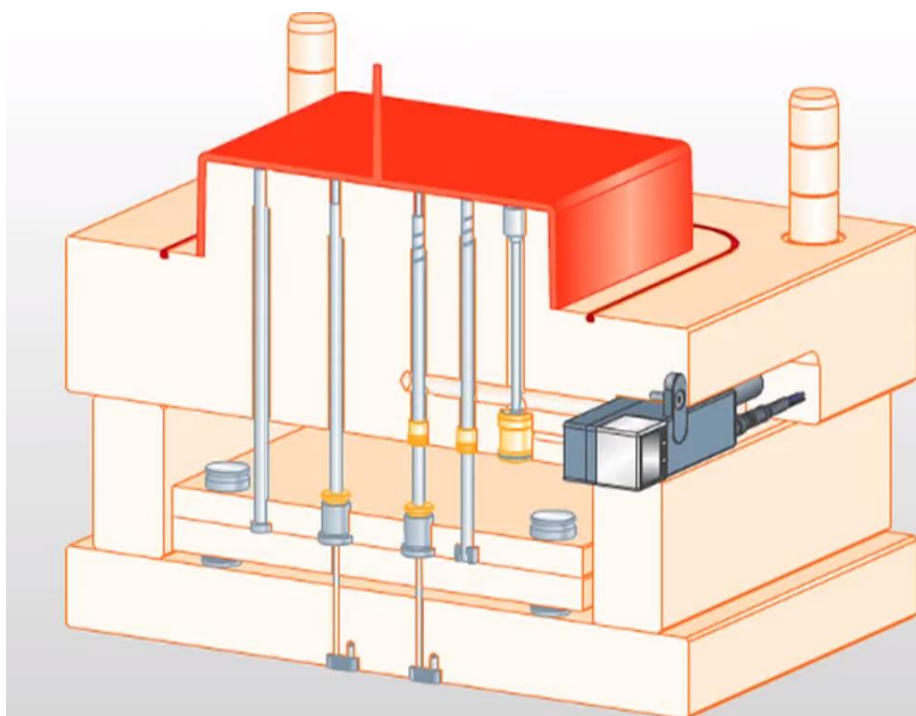
Během vstřikování udržuje pružina jezdec ventilu v otevřené pozici, takže vzduch může unikat otvorem v horní části ventilu. Ve chvíli, kdy tavenina dosáhne SGD ventilu, se jezdec pod tlakem plastu posune do uzavřené pozice, čímž se současně uzavře odvzdušňovací ventil viz (obr. 30). [20]



Obr. 30 Odvzdušňovací ventily SGD [20]

Odvzdušnění za pomoci vytvoření vakua

Tvorba vakua ve formě je podmíněna utěsněním veškerého průchozího dělení, tedy všech oblastí, které by mohli do kavity znovu přivést vzduch viz (obr. 31). Nutnost utěsnění je u složitějších forem nákladná a má problém se stabilitou utěsnění, vstřikování do vakua je ideální pro díly s jednoduchým dělením a hlavně s co nejmenším počtem vyhazovačů. [18]



Obr. 31 Systém vakua pro vstřikovací formy - Cumsa [18]

2.8. ČIŠTĚNÍ CHLADÍČÍCH KANÁLŮ

V chladících/ temperačních kanálech dochází, zejména při teplotách vyšších než 60°C, k tvorbě nánosů, koroze, vodní kámen. Vodní kámen, úsada z vodních minerálů, má nižší tepelnou vodivost a snižuje světlost kanálu, tedy snižuje průtočné množství chladiva. [16]

Čištění chladících kanálů lze provést mechanicky, tedy odvrtáním, nebo chemicky. K odstranění úsad a nánosů se nejčastěji používá technologie chemického čištění kanálů forem viz (obr. 32). Pro její využití jsou vyráběny a používány různá, obvykle mobilní zařízení, s nucenou cirkulací pomocí čerpadla. Zařízení mají obvykle dvě nádrže, jednu na čistící chemický roztok, může být i vyhřívaná, a druhou na pasivační kapalinu. Pasivační kapalina má, po skončení čištění, za úkol zrušit rozpouštěcí účinky čistící kapaliny a umožnit její neutralizaci – na pH 6 až 7 – a ekologické zneškodnění. Jednotka pracuje výhradně se stlačeným vzduchem a je vybavena zařízením se vzduchovou tryskou pro vyprázdnění a vysušení okruhů forem. [14] [15]



Obr. 32 Čistící jednotka pro čištění chladících okruhů formy [15]

2.9. SIMULAČNÍ SOFTWARE - AUTODESK MOLDFLOW 2018

Autodesk Moldflow je simulační software, který poskytuje nástroje pro vývoj, optimalizaci a kontrolu plastového dílu, vstřikovací formy, procesu vstřikování. V Diplomové práci byl využit pro nasimulování celého výrobního procesu v 20 cyklech.

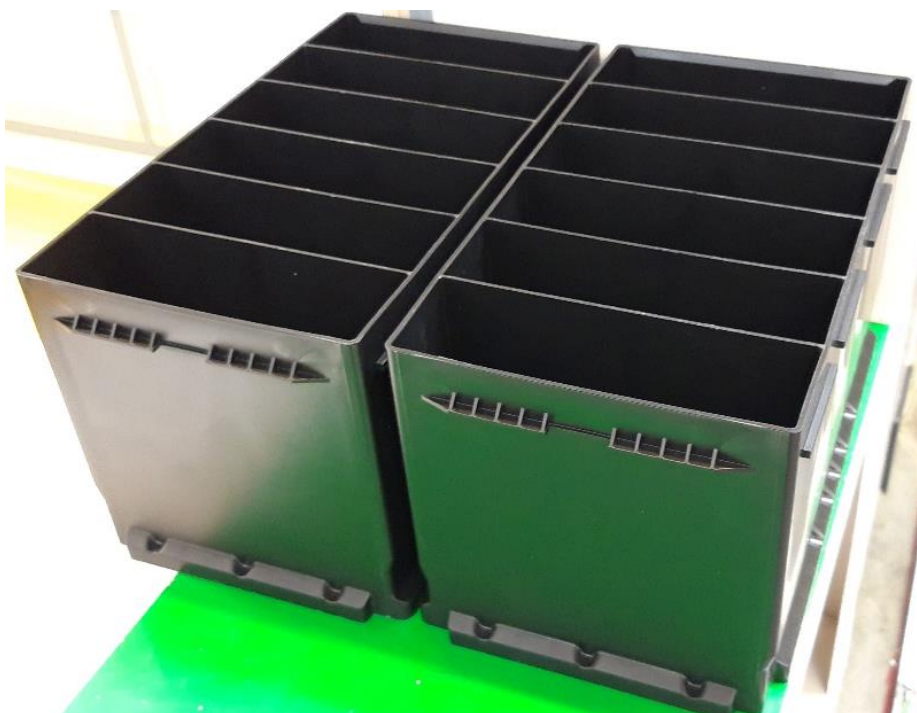


Obr. 33 Simulační software

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Experimentální část obsahuje postup simulační analýzy a analýzy příčin rozdílné doby cyklu u dvou duplicitních forem na vstřikování plastů. Vyráběným dílem je vnější obal automobilové baterie viz. (obr. 33), který je vyráběn vstřikováním z materiálu PP + 20TF.



Obr. 33 Vstřikovaný díl

Druhá forma byla zadána jako duplicita s povolenými drobnými konstrukčními změnami formy, které nebudou mít vliv na kvalitu dílu a výrobní cyklus. V realitě však tato forma nebyla schopna dosáhnout stejných výsledků.

Cílem analýzy je určit příčiny rozdílné doby cyklu. Analýza proběhla z hlediska procesních vstřikovacích parametrů, konstrukce formy a z hlediska konstrukce výlisku.

Výstupné výsledky jsou popsány ve vztahu doby vstřikovacího cyklu ke kvalitě dílu, a to konkrétně k deformaci dílu, vzhledovým šmouhám a bublinám.

Podpůrným programem pro analýzu byl využit simulační program Autodesk Moldflow Insight.

3.2. ANALÝZA VÝROBNÍHO PROCESU

V první fázi určení příčiny rozdílné doby cyklu byla provedena analýza vstřikovacího cyklu. První forma, označena jako Forma A, má celkovou dobu cysklu 62 vteřin. V (tab. 1) je uveden časový rozpad cyklu.

Vstřikovací cyklus - Forma A

Uzavření formy							5,5
Vstřik taveniny							7,2
Dotlak							4,0
Chlazení							35,0
Otevření formy							4,5
Odebrání dílu							5,8

Vstřikovací cyklus 62,0sec

Tab.1 Časový rozbor vstřikovacího cyklu formy A

Druhá forma, označena jako Forma B, má celkovou dobu vstřikovacího cyklu 75 vteřin. Je tedy pomalejší, a to o 13 vteřin. V (tab. 2) je zobrazen rozpad cyklu.

Vstřikovací cyklus - Forma B

Uzavření formy							5,5
Vstřik taveniny							10,2
Dotlak							6,0
Chlazení							43,0
Otevření formy							4,5
Odebrání dílu							5,8

Vstřikovací cyklus 75,0sec

Tab. 2 Časový rozbor vstřikovacího cyklu formy B

Při porovnání procesu obou forem bylo zjištěno, že rozdílný cyklus není závislý na odformování, pohybech formy, odebírání dílu. Rozdíly v cyklech jsou způsobeny pouze rozdílnými technologickými časy v jednotlivých fázích výroby vstřikovaného dílu. Konkrétně se jedná o čas vstřiku taveniny, který je delší o 3 vteřiny, dotlak o 2 vteřiny a chlazení je delší o 8 vteřin. Zejména doba chlazení má největší vliv na celkový rozdíl cyklů.

3.3. ANALÝZA KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍCH FOREM

K analýze vstřikovací forem byl využit simulační program Autodesk Moldflow Insight. Pomocí tohoto programu bylo možné detailně analyzovat konstrukci vylisku i obou vstřikovacích forem. Ty pak bylo možné porovnat. Nejprve však bylo nutné připravit síť modelu vylisku, síť rozvodných chladících kanálů a formy.

3.3.1. TVORBA MODELU ANALÝZY

Model vylisku

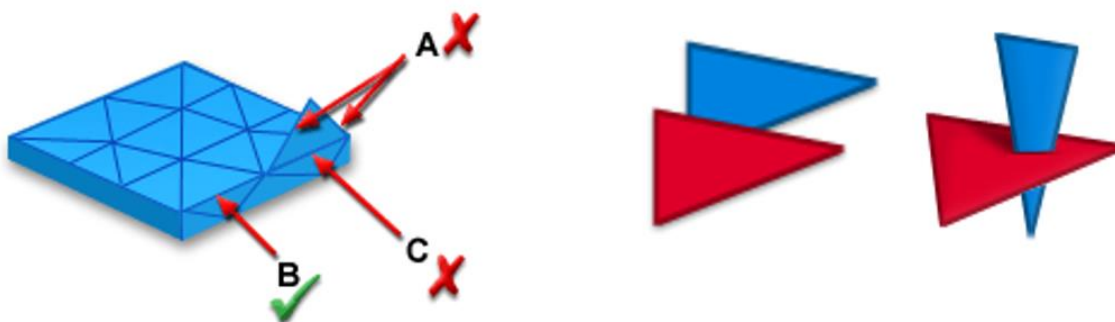
- 1) Vytvoření povrchové sítě modelu plastového dílu, síť „2.5D“

Při velikosti elementu sítě 4mm, krok sítě zajišťující dostatečnou přesnost výpočtu, díl obsahuje 145 000 elementů. Následuje úprava sítě tak, aby mohla být převedena do 3D. [21]

- 2) Úpravy sítě

Díl nesmí obsahovat nespojené části, tzv. volné plochy či hrany dle (obr. 35). Pokud je vytvořená síť obsahuje, je nutné, pomocí ručních operací v programu, části odstranit, nebo ručně upravit jejich napojení.

Průniky či překrytí jednotlivých elementů sítě jsou neakceptovatelné pro výpočet simulace, nejčastější tvorba je, když dochází k aproximaci povrchu dílu. Některé části, např. malé rádiusy, fazetky, břity jsou při síťování zdeformovány a je nutné síť manuálně opravit. [21]

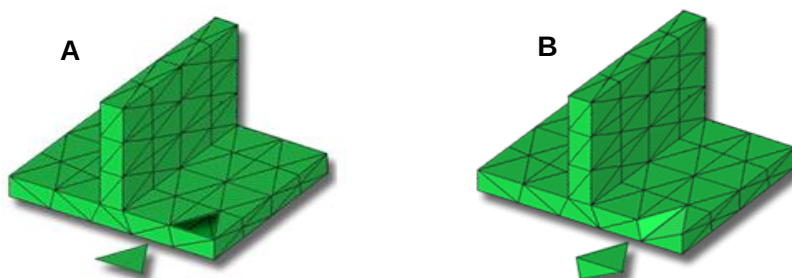


Obr. 35 Chyby sítě

Vlevo – volné plochy, hrany

Vpravo – překrytí, průniky

Po úpravě je síť z 2.5D převedena na 3D, rozdíl v síti je vidět na (obr. 36). Tedy převod z povrchové trojúhelníkové sítě na prostorovou tetraedrální síť. [21]



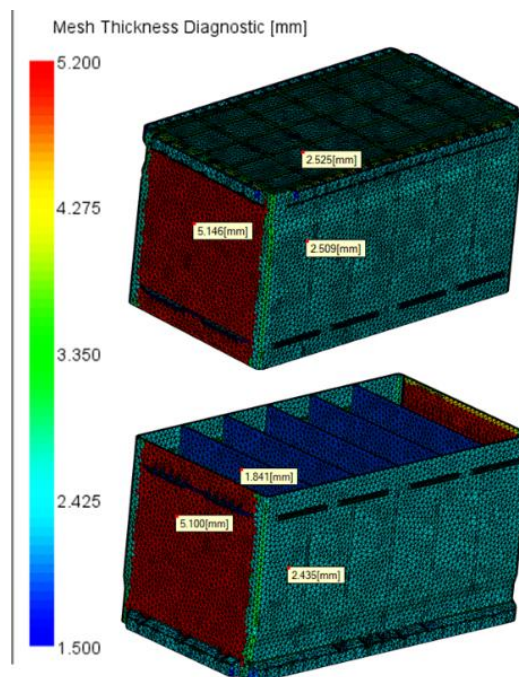
Obr. 36 Druhy použitých sítí

A – povrchová síť

B – 3D síť

Díl nemá uniformní tloušťku stěny viz (obr. 37). Dno a boční dlouhé stěny mají tloušťku 2,5mm. Krátké boční stěny mají tloušťku 5,1mm. Uvnitř baterky se nachází pět úzkých žebírek o tloušťce stěny cca 1,8mm. Nestejnoměrná tloušťka stěny generuje problémy s průběhem plnění a dotlaku.

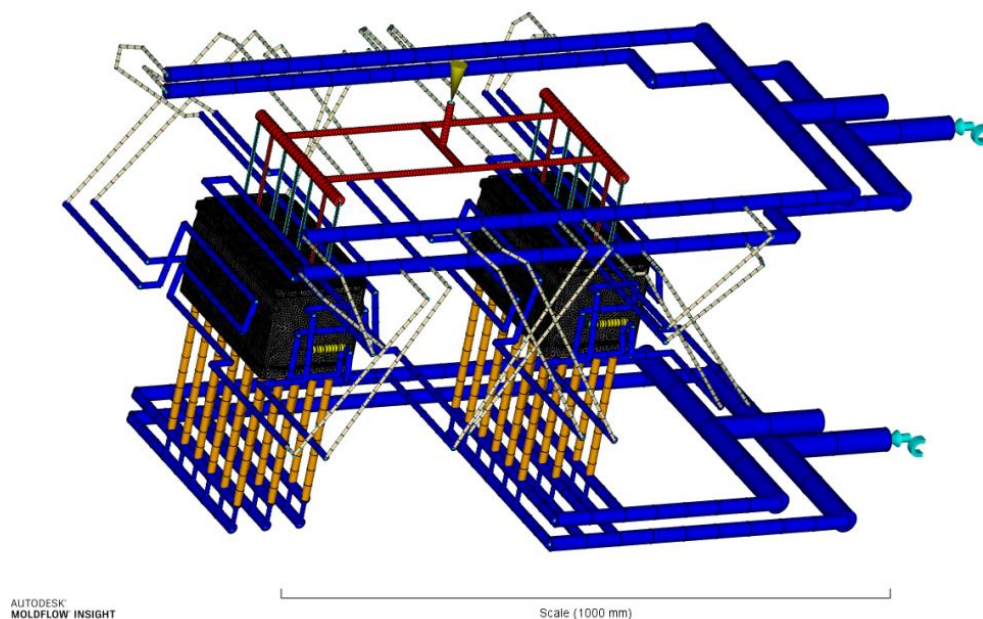
Úzká žebra vyžadují vysokou rychlost plnění, která ale podporuje vznik vzhledových vad viz (obr. 40), (obr. 41), (obr. 43) a problémy s uzavřením vzduchu, nedolitím dílu. Rozdílná tloušťka stěny má vliv na průběh plnění dílu, tavenina jde cestou nejmenšího odporu. Při plnění dochází k zastavení plnění žebírek a tavenina postupuje do bočních silných stěn, to má za následek problémy s tlaky uvnitř formy, deformacemi, studenými spoji a odformováním. Rozměry tloušťky stěny nelze změnit, je tedy nutné řídit plnění rychlostí vstříku.



Obr. 37 Analýza tloušťky stěny dílu

Model chlazení vstřikovací formy

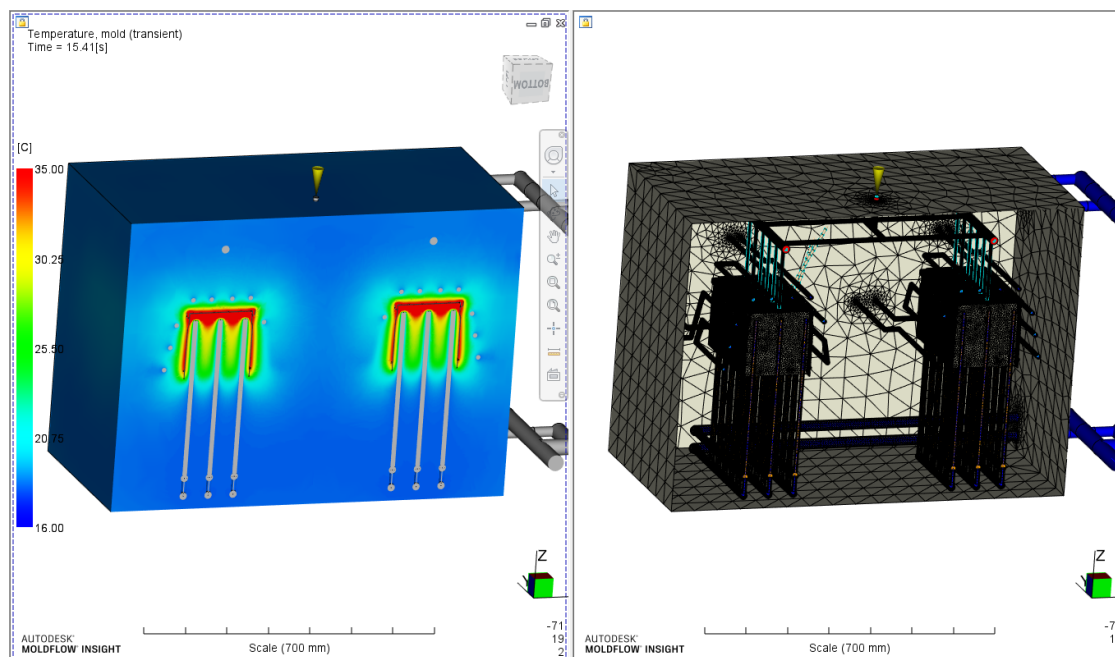
Chlazení je vytvořeno z os kanálů formy. Jednotlivým osám jsou udány vlastnosti a je provedeno vysítování. Forma obsahuje svůj vlastní distributor pro rozvod vody do jednotlivých okruhů, je tedy nutno vymodelovat celý systém včetně distributoru viz (obr. 38), aby bylo možné porovnat výsledky s reálnými hodnotami.



Obr. 38 Výpočetní model pro simulaci – bez zadané formy

Pro nejpřesnější přiblížení se reálným hodnotám je nutno provádět simulaci v několika, po sobě jdoucích cyklech, simulace počítá 25 po sobě jdoucích výrobních cyklů. Tento druh výpočtu je nutný pro korektní eliminaci výstupů z najížděcí fáze výroby. Postupné navyšování teploty formy se během cyklů snižuje a vede k ustálení teploty.

Výsledky z ustáleného cyklu jsou následně použity k porovnání reálných a simulačních hodnot a k optimalizaci forem. Pro umožnění cyklického výpočtu je nutno přidat výpočetní síť pro oblast formy viz (obr. 39).

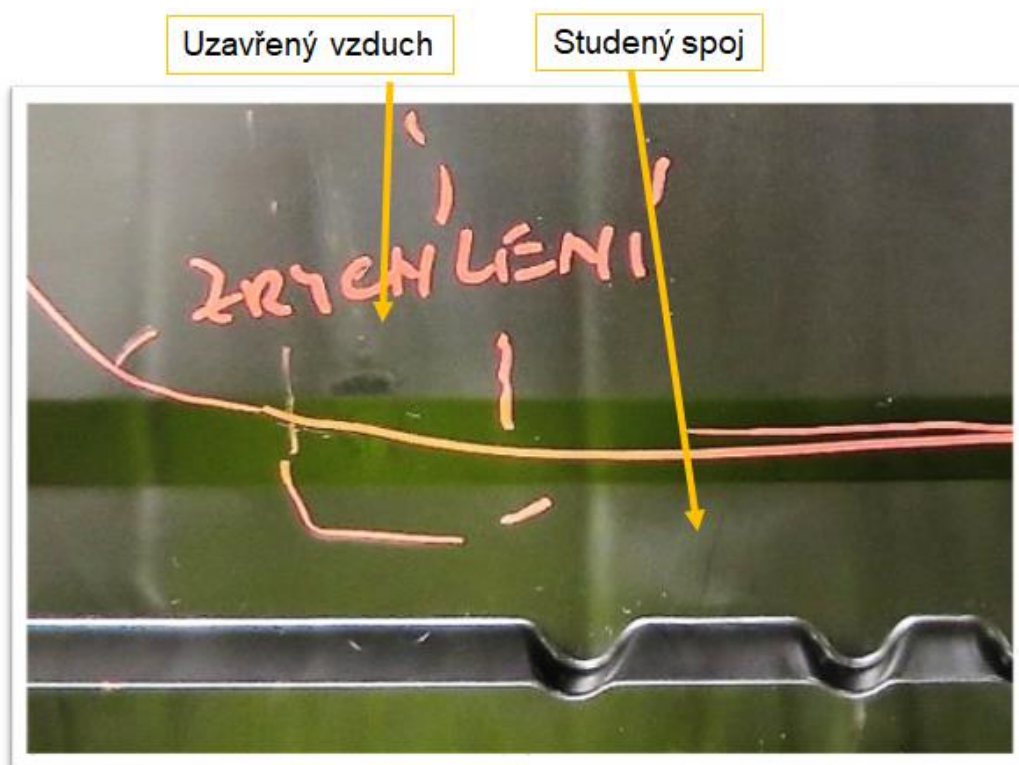


Obr. 39 Výpočetní model pro simulaci 25 cyklů – model obsahuje cca 8 milionů elementů

3.3.2. PROCES VSTŘIKU

Jak již bylo zmíněno výše, kapitola 3.2 analýza výrobního procesu, rozdíl v době vstřiku činí 3 vteřiny. Při analyzování problému u vstřikovacího stroje, snaze zkrátit dobu vstřiku na požadovaných 7,2 vteřiny bylo zjištěno, že při změně rychlosti plnění dochází k tvorbě vzhledových vad, uzavírání vzduchu a tvorbě bublin viz (obr. 40) a (obr. 41). Dále díl vykazoval větší deformace krátkých bočních stěn s vyšší tloušťkou stěny a problémy při odformování.

I přesto, že díl není považován za vzhledový, je zde požadavek na kvalitu povrchu. Povrch by měl obsahovat co nejméně viditelných studených spojů a vad způsobených vzduchem.



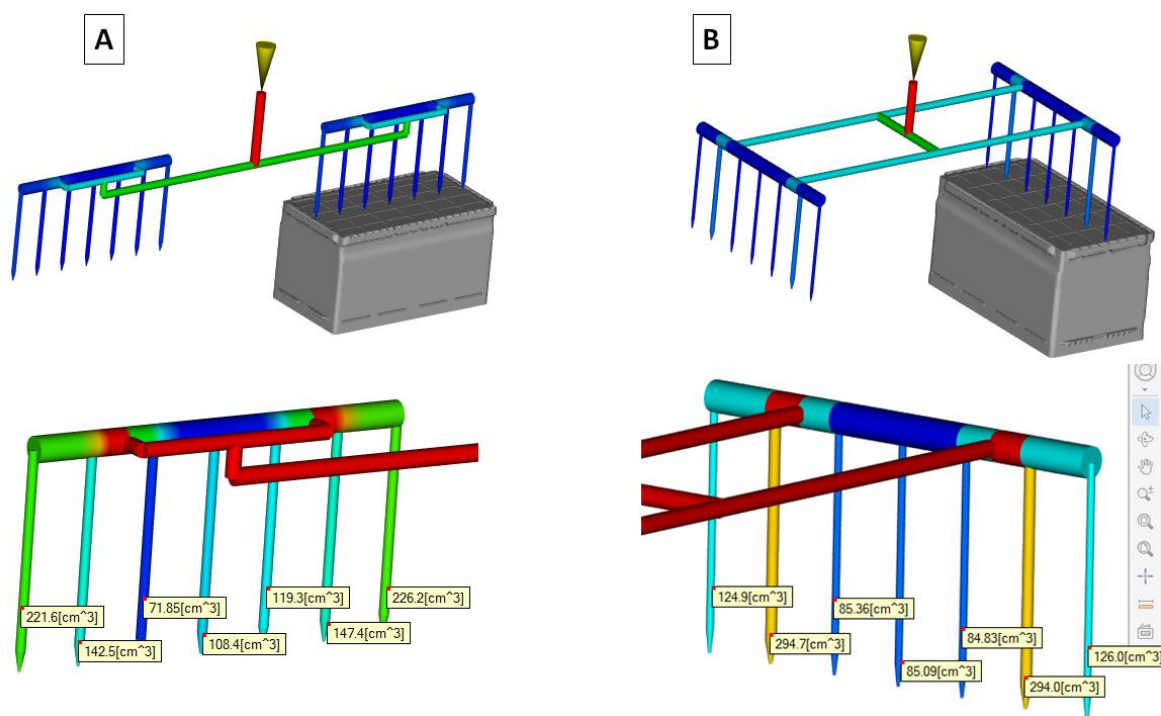
Obr. 40 Vzhledové vady při zvýšené rychlosti vstřiku Formy B



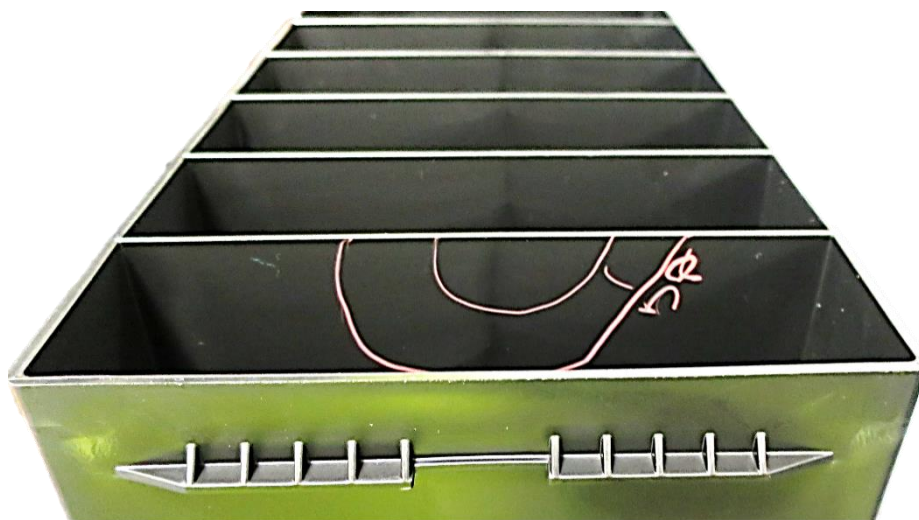
Obr. 41 Vzduchové šmouhy na díle

Zvýšení rychlosti vstřiku vedl k deformacím dílu vzniklým při odformování dílu. Díl měl problémy vysunout z tvárníku vnitřní žebra. Při porovnání plnění dílů je vidět, že změna průměru trysek viz (obr. 42) a konstrukce horkého systému u formy B mění plnění dílu, díl tak při přechodu na dotlak vykazuje jinou distribuci tlaku v dutině formy. Forma A vykazuje menší tlaky v oblasti žeber, což napomáhá při odformování. Z hlediska distribuce tlaku má vliv i samotná rychlost plnění. Při porovnání plnění dílu A a B, tedy rychlostí 7.2s a 10.2s, je vidět, že při pomalejším vstřiku dochází k zatuhnutí části žeber ještě před fází dotlaku.

Zamrzání žeber způsobuje vznik dlouhých studených spojů viz (obr. 43), které snižují nejen mechanickou únosnost žeber, ale zvyšují i nestabilitu procesu. Nestabilita procesu se v tomto případě projeví jako nedolitý díl, vznik děr v díle, nebo tvorba bublin. Části, které zamrznou během plnění, jsou následně namáhány tlakem, který je může vzpříčit, rozteumat v dané oblasti. Z toho důvodu nastal problém s odformováním žeber při pomalém vstřiku.

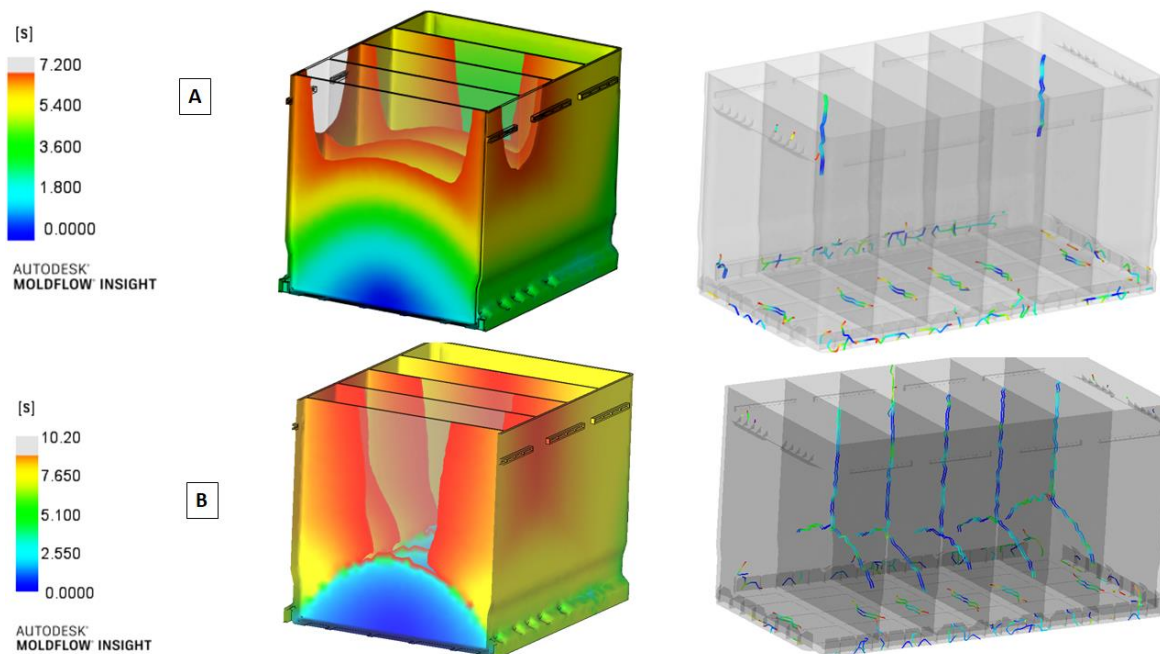


Obr. 42 Výkon jednotlivých trysek horkého systému

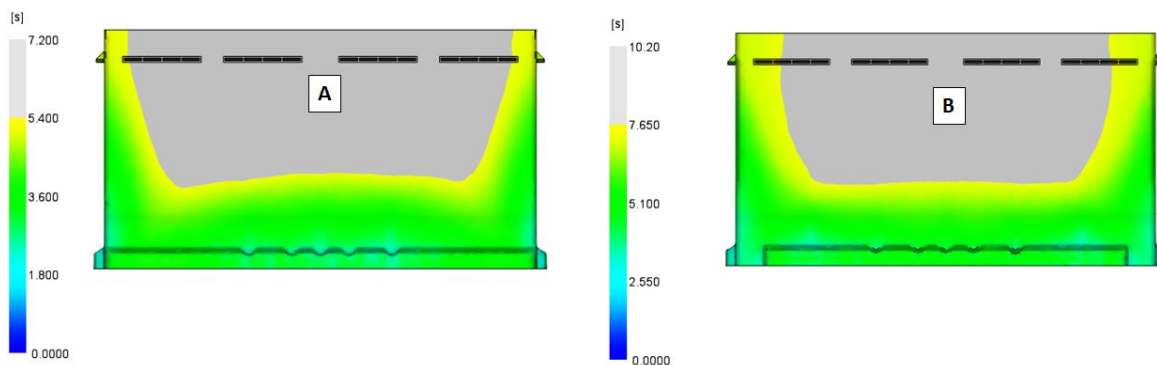


Obr. 43 Vada studeného spoje na vnitřních žebrech dílu

Délka studeného spoje je závislá na rychlosti plnění viz (obr. 44), při rychlejší plnění dochází ke kontinuálnímu plnění žebra přes střed, při pomalejší plnění je díl plněn přes boční stěny viz (obr. 45), plnění středem žebra se zastaví a to vede ke vzniku dlouhého studeného spoje, nebo uzavření vzduchu v díle.



Obr. 44 Průběh plnění formy A vs forma B



Obr. 45 Rozdílné plnění dílů

(plnění je nastavené na reálné parametry, tedy hlavní vliv má rozdíl v rychlosti plnění, dalším vlivem je balanc trysek systému)

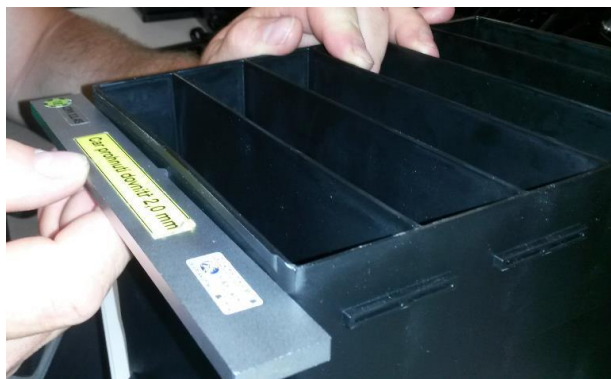
3.3.3. PROCES DOTLAKU

Doba dotlaku je závislá na tloušťce stěny vylisku a množství taveniny, které proteče přes danou oblast. Změna průběhu plnění snižuje množství taveniny, které proteče přes boční krátké stěny. Snižuje se tak množství tepla, které je nutné odvést během cyklu z dané oblasti. Zvyšuje se rychlost chlazení, což ovlivňuje dobu dotlaku a chlazení, dochází ke snížení. Při zrychlení vstřiku se žebra plní kontinuálně od středových trysek, nikoliv od bočních stěn, tedy přes krátké boční stěny viz (obr. 44).

3.3.4. PROCES CHLAZENÍ

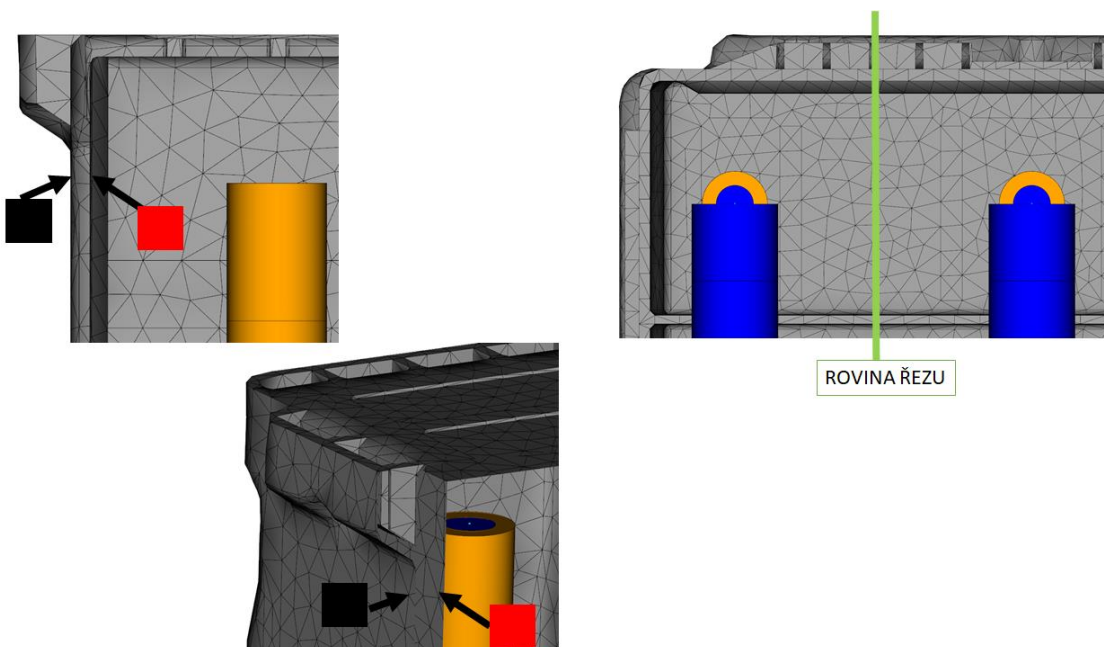
Doba chlazení je u projektu B větší z důvodu borcení silných stěn. Stěny vytváří tzv. lopaty, tedy prohýbají se dovnitř. Dále je problém s odformováním dílu, žebra se při odformování trhají a zůstávají ve formě. Při prodloužení délky chlazení dojde k prodloužení cyklu, tedy klesne teplota formy. Dochází ke stabilizaci rozměru a zlepšení odformování dílu. Rozdíl v době chlazení může být způsoben rozdílnou intenzitou chlazení ve formách, ale také i průběhem plnění a dotlaku.

Rozdíly v době cyklu jsou v době dotlaku a době chlazení. Snížením doby dotlaku nebo chlazení dochází k deformacím krátkých bočních stran, stran s největší tloušťkou stěny viz (obr. 46).



Obr. 46 Deformace bočních stěn výlisku

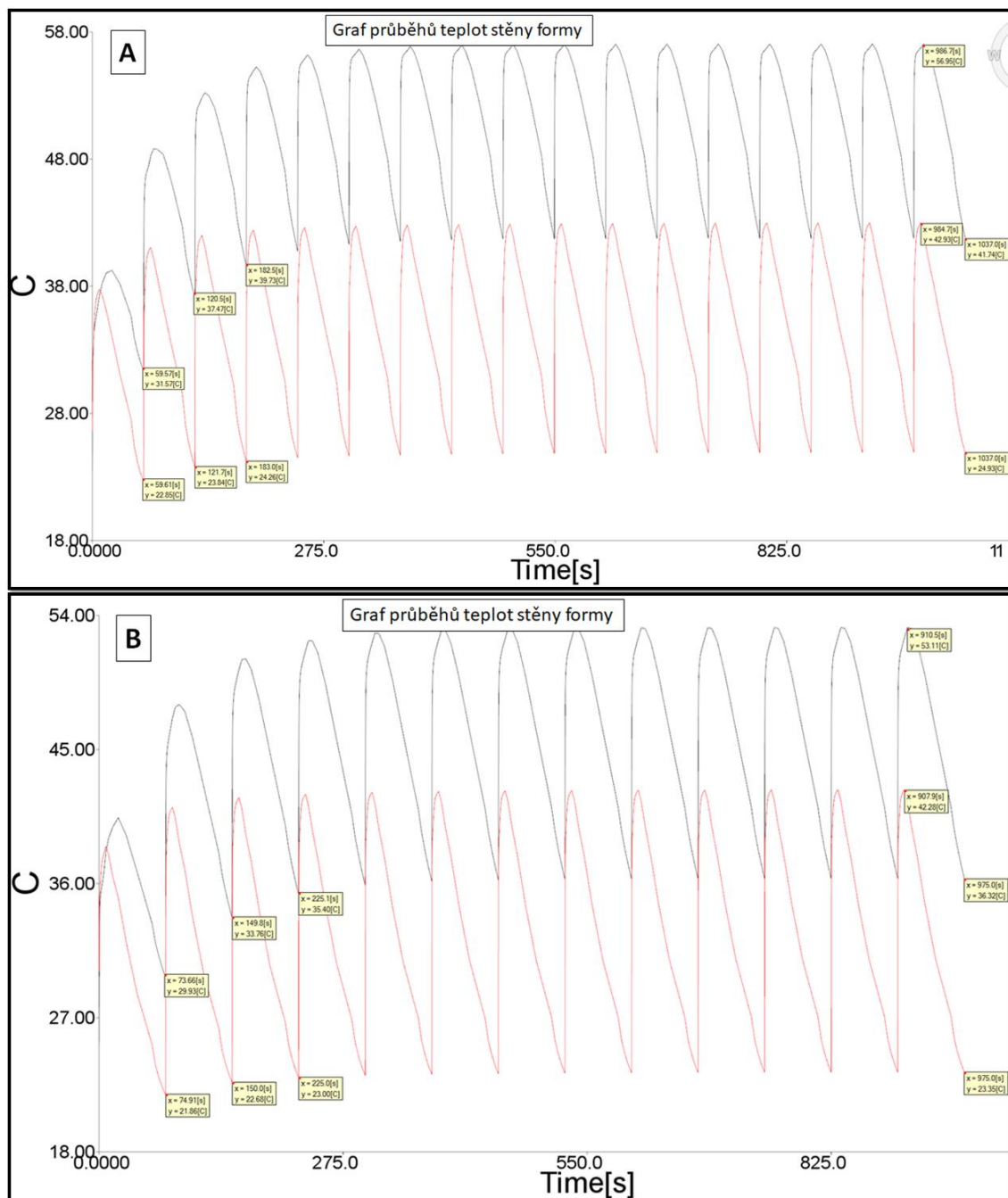
Při provedení simulace chlazení dle výrobních parametrů bylo zjištěno, že chlazení formy A je účinnější. Porovnání teplot formy prokazuje, že forma A je při rychlejším cyklu schopna snížit teplotu stěny formy na podobnou hodnotu jako forma B viz (obr. 48), která vyžaduje delší cyklus výroby.



Obr. 47 Pozice měření teplot formy / dílu

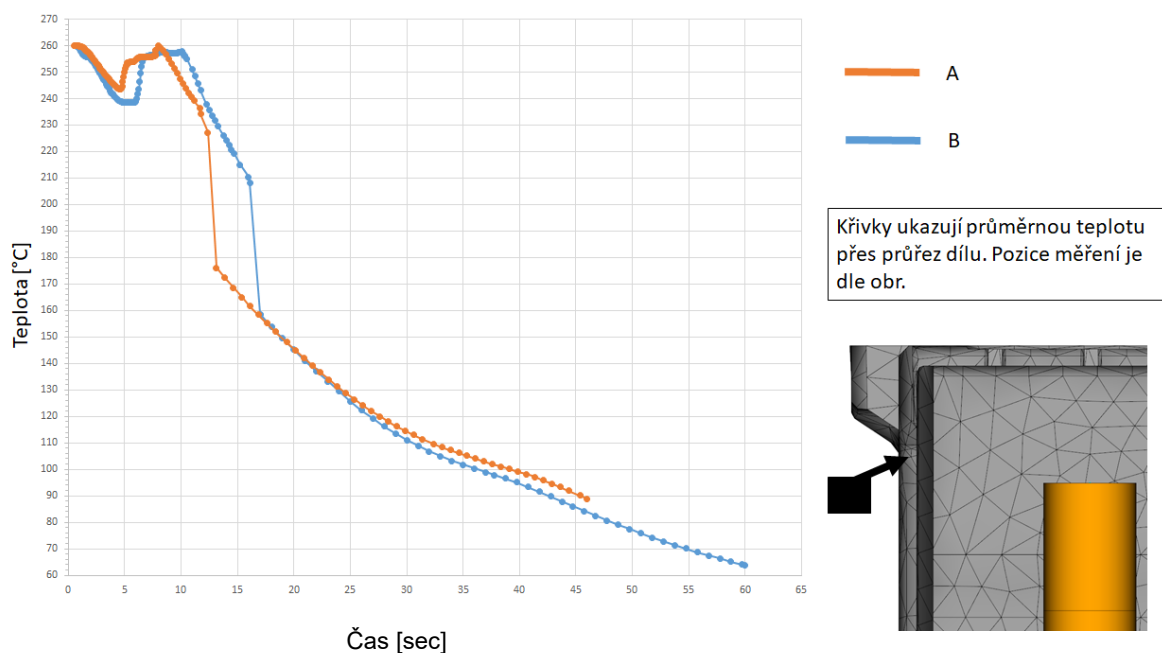
Aktuální výsledky průběhu teplot jsou nastaveny podle výrobních parametrů, vzhledem k tomu, že každá forma má jinak dlouhý cyklus, nelze přesně říci, jaké jsou rozdíly v intenzitě chlazení.

Graf průběhů teplot stěny formy A vykazuje vyšší hodnoty, než u B viz (obr. 48). Tyto hodnoty jsou v tomto případě nejvíce ovlivněny délkou cyklu. Lze tedy říci, že A vykazuje vyšší intenzitu chlazení. Měřené body jsou viz (obr. 47).



Obr. 48 Grafy průběhů teplot formy ve výrobním cyklu, od náběhu výroby

Průměrná teplota na díle v daném bodě, skrz tloušťku dílu, prokazuje vyšší intenzitu chlazení formy A viz (obr. 49).

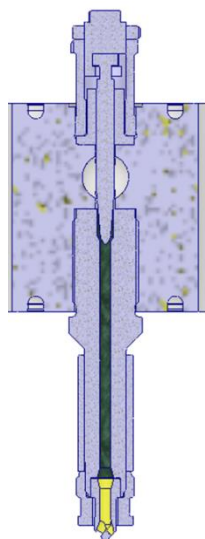


Obr. 49 Porovnání průměrné teploty dílu z formy A a B

3.3.5. ROZBOR HORKÉHO SYSTÉMU

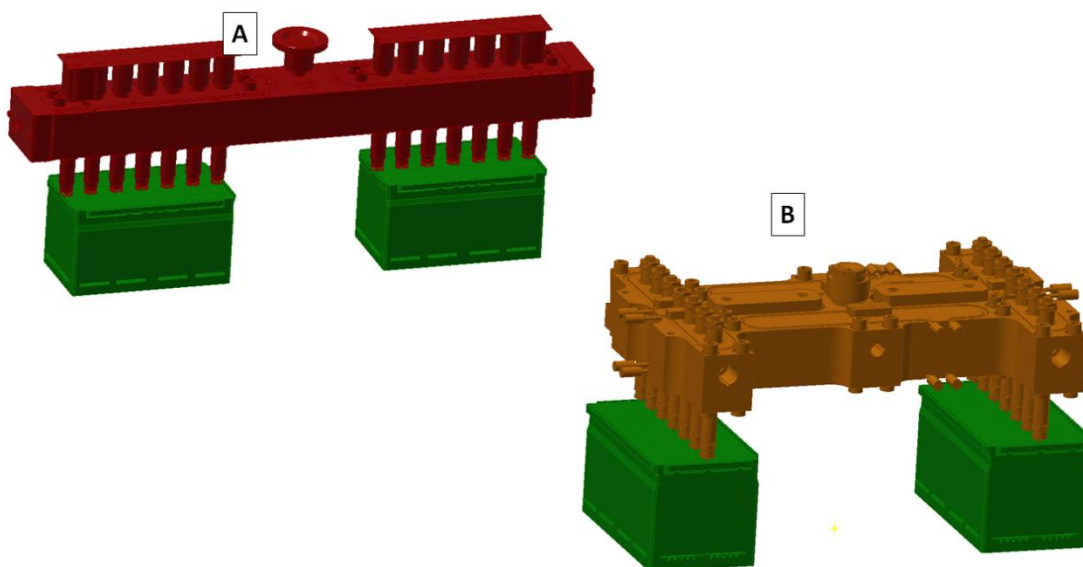
Každý díl je plněn 7 tryskami s vyústěním přímo na díl. Trysky jsou otevřené s torpédovým ústím.

Trysky není možné řídit během procesu výroby, ale každá tryska má mechanismus umožňující regulaci změny průtoku zmenšením průřezu vrtání v desce horkého systému a to v oblasti přechodu mezi tryskou a deskou systému viz (obr. 50). Tryskou jsou do desky horkého systému šroubované.

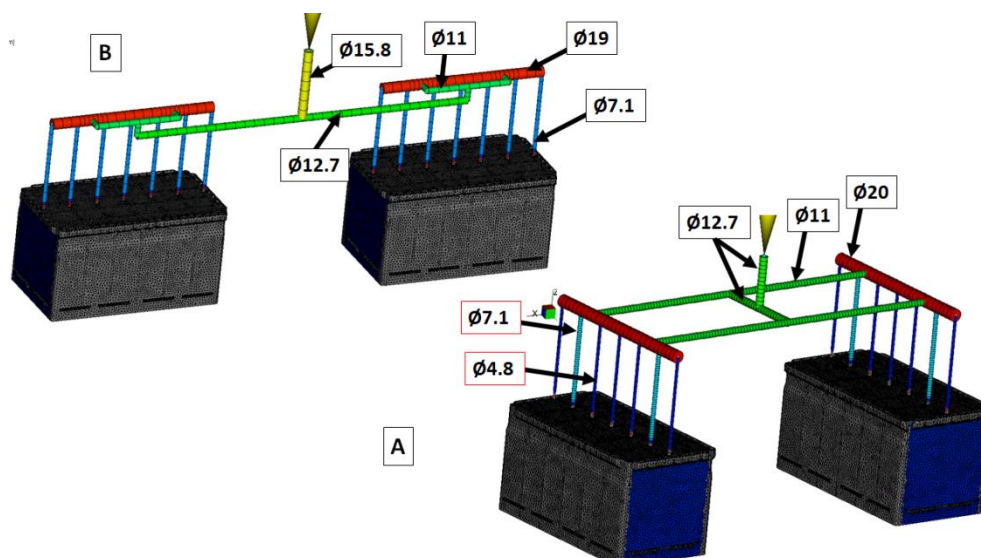


Obr. 50 Řez tryskou horkého systému

Konstrukce horkého systému vykazuje rozdíly v koncepci rozvodu taveniny viz (obr. 51). Průměry použité pro vrtání desky systému a průměry trysek se liší viz (obr. 52).



Obr. 51 Koncepce rozvodu taveniny horkého systému formy

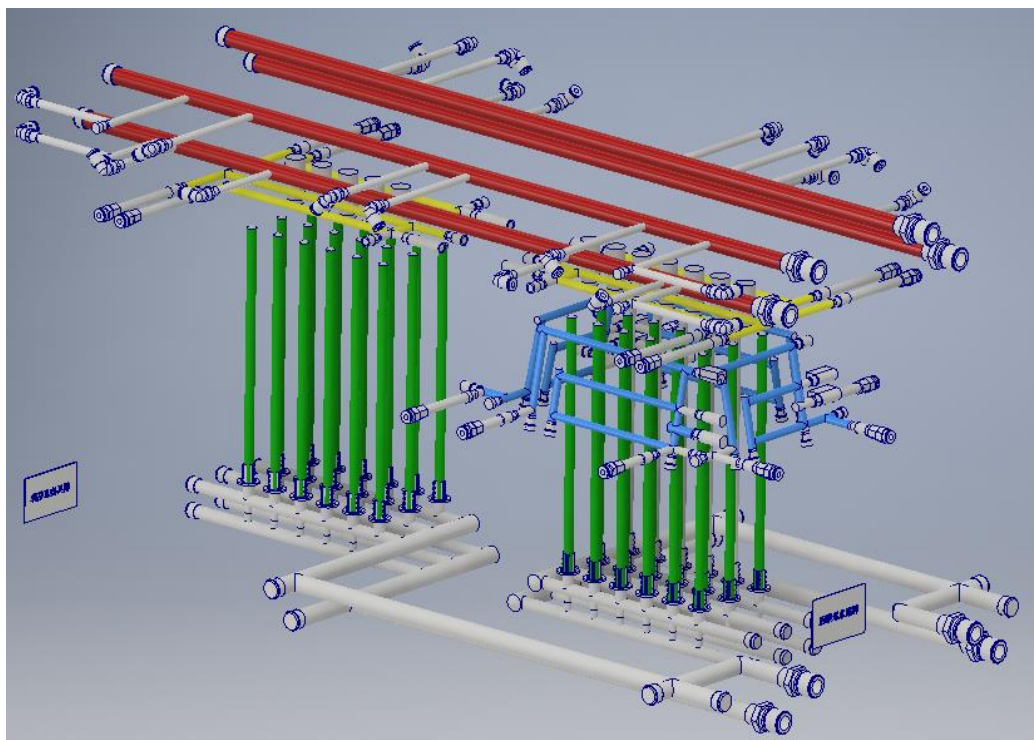


Obr. 52 Použité průměry pro distribuci taveniny v horkém systému formy

3.3.6. ROZBOR CHLAZENÍ FORMY

Chlazení je prováděno vodou o vstupní teplotě 16 °C a tlaku 3bar. Voda je přiváděna z centrálního rozvodu od chladicího zařízení. U stroje je centrální rozvod napojen 1 hadicemi a přiveden na distribuční válec formy. Dále je chlazení rozvedeno hadicemi do jednotlivých okruhů formy.

Pevná strana formy disponuje 10 okruhy, pohyblivá strana 36 chladicími otvory. Okruhy na pohyblivé straně chladí tvárníky žeber dílu, je to systém fontánového chlazení, každé vrtání je samostatně zapojeno do distribuční větve, zapojení je tedy paralelní viz (obr. 53).



Obr. 53 Okruhy chlazení formy A

červená: distribuční rozvod pevné strany formy

Šedivá: distribuční okruh pohyblivé strany

Žlutá : rozvod chlazení špiček trysek horkého systému

Modrá: 4x okruh chlazení čelistí

Zelená : chlazení tváří pohyblivé strany, chlazení je provedeno jako trubičkové/fondánové. Zapojení systému je paralelní

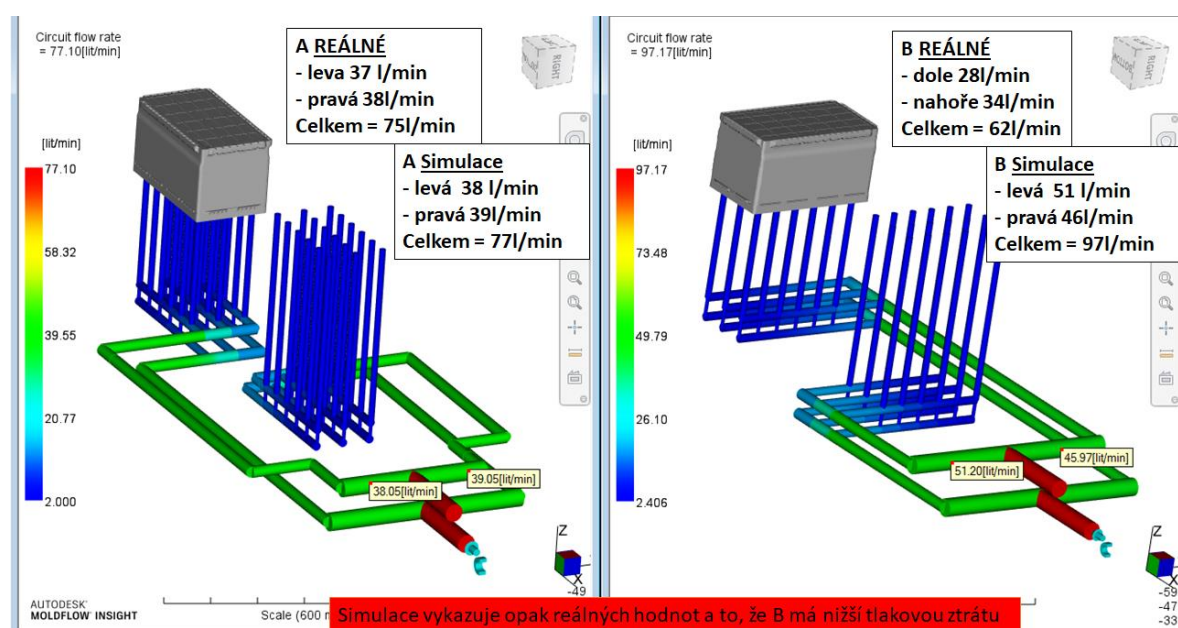
Pro první analýzu chlazení byly zvoleny okrajové podmínky shodné pro obě formy, tedy teplota vody 40°C , $Re=10000$ a doba vstřiku 9s. Za těchto podmínek nebyl zjištěn znatelný rozdíl, který by měl mít vliv na délku cyklu. Tímto bylo dokázáno, že pokud bude zaručen vypočítaný průtok v jednotlivých větvích, není důvod, proč by měli mít formy rozdílné doby chlazení.

Pokud stejné okrajové podmínky neprokazují znatelný rozdíl, znamená to, že konstrukce chlazení je svou intenzitou srovnatelná a formy by měly být schopny udržet stejnou dobu chlazení. V reálu však forma B vykazuje delší dobu chlazení o 8s. Pokud se tato doba sníží, dochází k deformacím, které jsou způsobeny odformováním dílu. Problém s odformováním je způsoben vyšší teplotou dílu, tedy v reálu má, za stejných vstupních podmínek chladicího média, díl B vyšší teplotu. Při měření teploměrem byla zjištěna difference 10°C .

Druhá analýza chlazení neporovnává chladicí účinky jednotlivých forem vůči sobě, ale její snahou je zjistit příčiny rozdílných teplot formy, lokalizovat problém v chlazení. Druhá simulace tedy je provedena za reálných podmínek, vstupní teplota je 40°C , ale průtočné množství je nastaveno podle reálných, naměřených hodnot. Vzhledem k tomu, že systém

chlazení je komplikovaný, obsahuje distribuční větev, přes kterou se následně rozvádí tlak do jednotlivých okruhů, byl zvolen systém nasimulování celého systému i s distribuční větví. Pro přesnější zjištění změn průtoku byly měřeny nejen průtoky celkové ale i vstupní do pravé a levé distribuční větve.

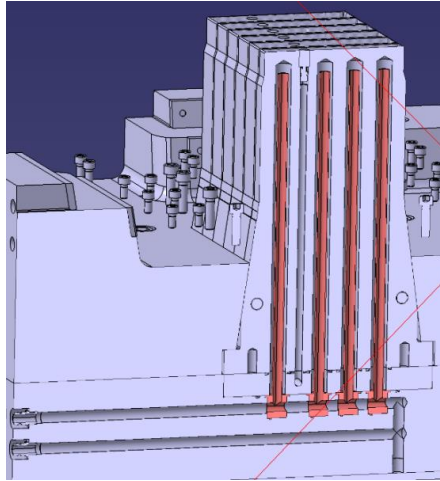
Protože forma A vykazuje stabilní proces a vyšší chladicí účinek, je zvolena jako etalon pro vstupní okrajové podmínky analýzy chlazení. Po naměření hodnot průtoku byla provedena na formě A simulační analýza, která určila s jakým vstupním tlakem počítat v simulaci. Tlaky na vstupu jsou 0,8bar pevná strana a 0,09bar pohyblivá strana. Z hlediska průtoku je výhodnější nastavit vstupní tlak a kontrolovat proudění systémem, tím můžeme určit, jakých hodnot proudění by měla forma v reálu dosahovat a pokud nedosahuje, tak lokalizovat místo problému.



Obr. 54 Pohyblivá strana – simulační analýza chlazení
(pro simulace - zatížení chladicího systému vstupním tlakem 0,09bar)

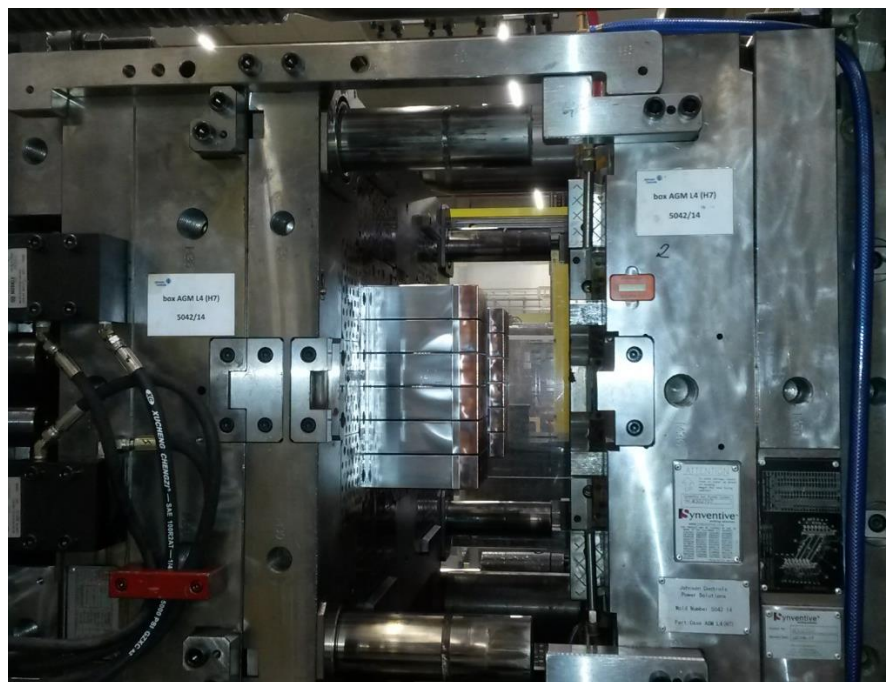
Při kontrole druhé analýzy, bylo zjištěno, že průtoky jednotlivými větvemi u formy A odpovídají skutečnosti, tedy simulace má správně nastavené okrajové podmínky. Při kontrole formy B bylo však zjištěno, že při stejných vstupních parametrech do rozvodu formy je průtok vyšší než naměřený, což znamená, že forma B aktuálně disponuje polovičním průtokem. Toto zjištění tedy poukazuje na problém v chladicím systému formy, přicpáním systému, nebo špatnou instalací chladicích elementů viz (obr. 54).

Pohyblivá strana provádí chlazení tvárnků formy – tvárnkových vložek viz (obr 56), které utváří žebra na díle. Toto chlazení je prováděno fontánovým způsobem, tedy voda proudí skrze trubičky a při výstupu omývá protější plochu, následně chladí stěny při vracení se zpět do výstupní části kanálu viz (obr. 55).



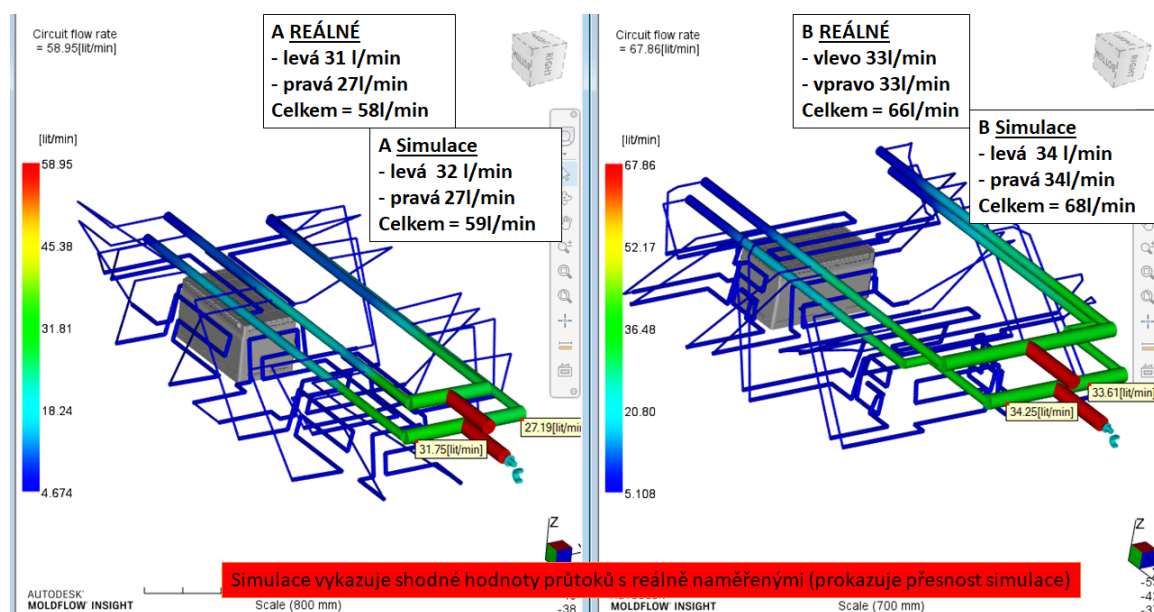
Obr. 55 Trubičkový systém chlazení tvárníků

Vzhledem k tomu, že forma B vykazuje měřitelné změny v průtoku a tedy znatelné změny teplotních polí na formě, je nutné provést kontrolu montáže chladicího systému, údržbu.



Obr. 56 Otevřená forma - ukázka jednotlivých tvárníkových vložek formy

Kontrola simulace pevné strany formy také prokázala správnost nastavených tlaků, tedy forma A vykazuje v simulaci stejné tlaky, jako z reálného měření viz (obr. 57).

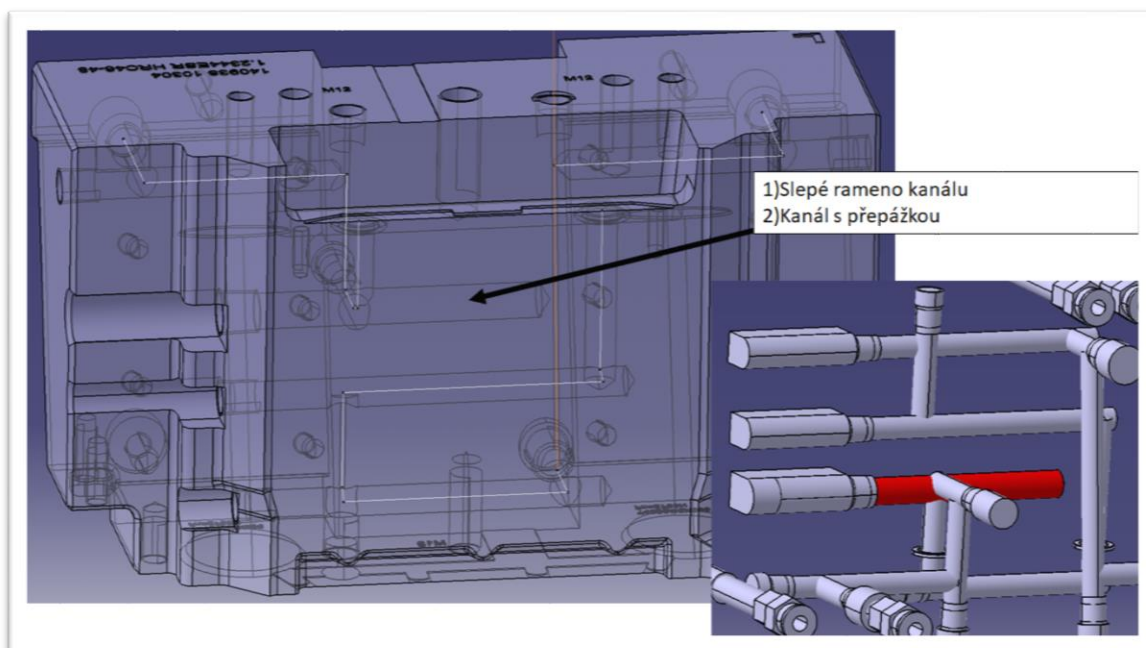


Obr. 57 Pevná strana- simulační analýza chlazení

Analýza se ale liší v intenzitě chlazení bočních stěn, čelisti v této oblasti v reálu vykazují vyšší teplotu cca o 10°C. Při analyzování CAD dat bylo zjištěno, že v dané oblasti, u projektu B, se nachází kanál s přepážkou, nebo je to chyba a kanál je jen slepé rameno viz (obr. 58).

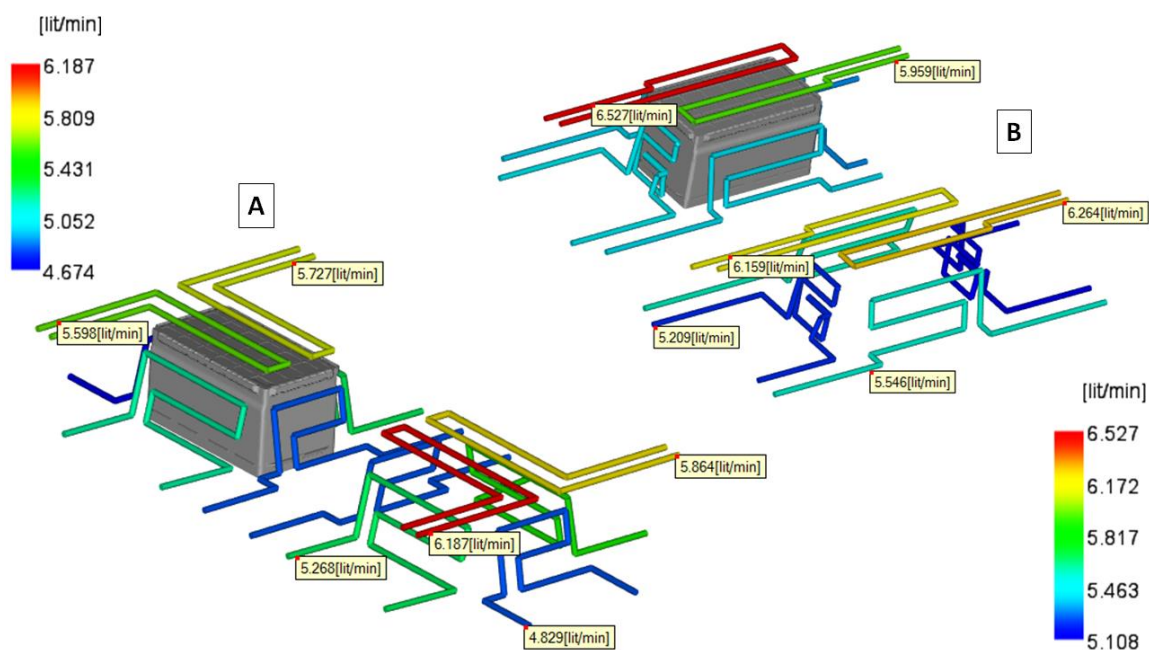
Průměr kanálu a ani poloha vstupního a výstupního vrtání, nejsou zcela optimální pro tento druh chlazení. Kanál má stejný průměr jako vstupní a výstupní vrtání do něj. To v reálu znamená, že tato větev bude mít větší odpor a proudění chladiva bude tak pomalejší.

Kanál dále musí obsahovat správně orientovanou přepážku, pokud přepážka přesně neodděluje vstup a výstup do kanálu, dochází k zastavení výměny vody v kanálu, voda protéká přímo mezi vstupem a výstupem bez nutnosti proběhnout celým kanálem.

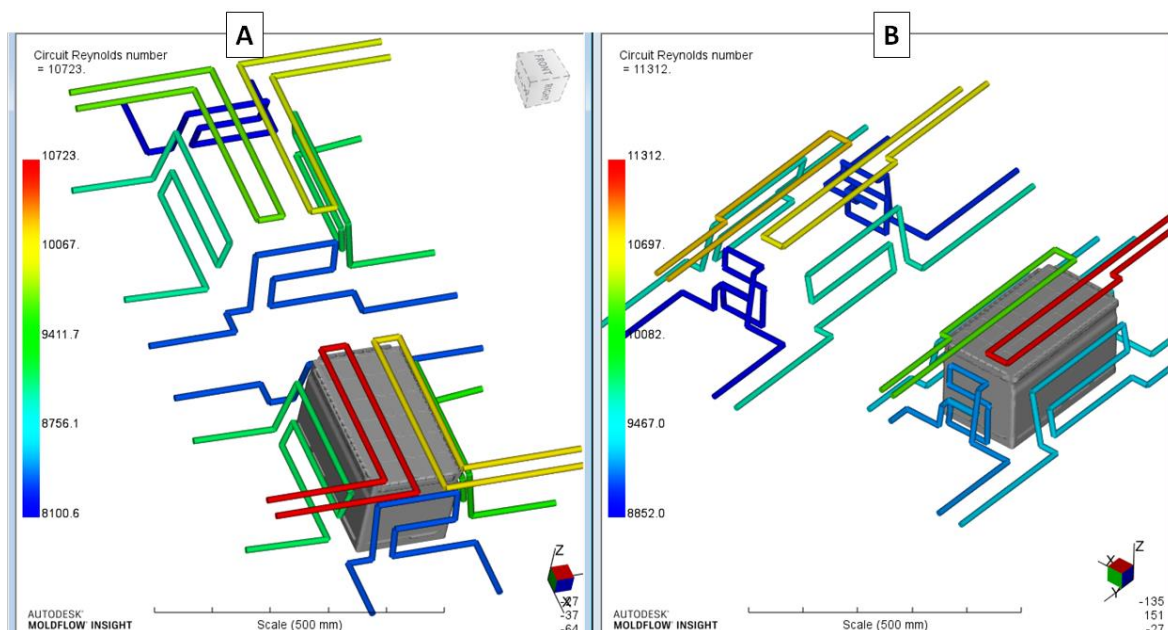


Obr. 58 Vrtání chlazení v čelisti

Výstupy průtoků ze simulace prokazují, že forma B disponuje vyšším průtokem viz (obr. 59) a (obr. 60), tedy měla by dosahovat kratší doby chlazení. Forma B dosahuje vyšších průtoků i přesto, že chladicí systém má stejné průměry okruhů. Rozdíl v průtoku pevné strany formy je způsoben tím, že forma A má chlazení středních čelistí spojeno v jeden okruh, tím je navýšen odpor dochází ke snížení průtoku.



Obr. 59 Pevná strana: analýza průtoku jednotlivými chladicími okruhy



Obr. 60 Pevná strana: Reynoldsovo číslo

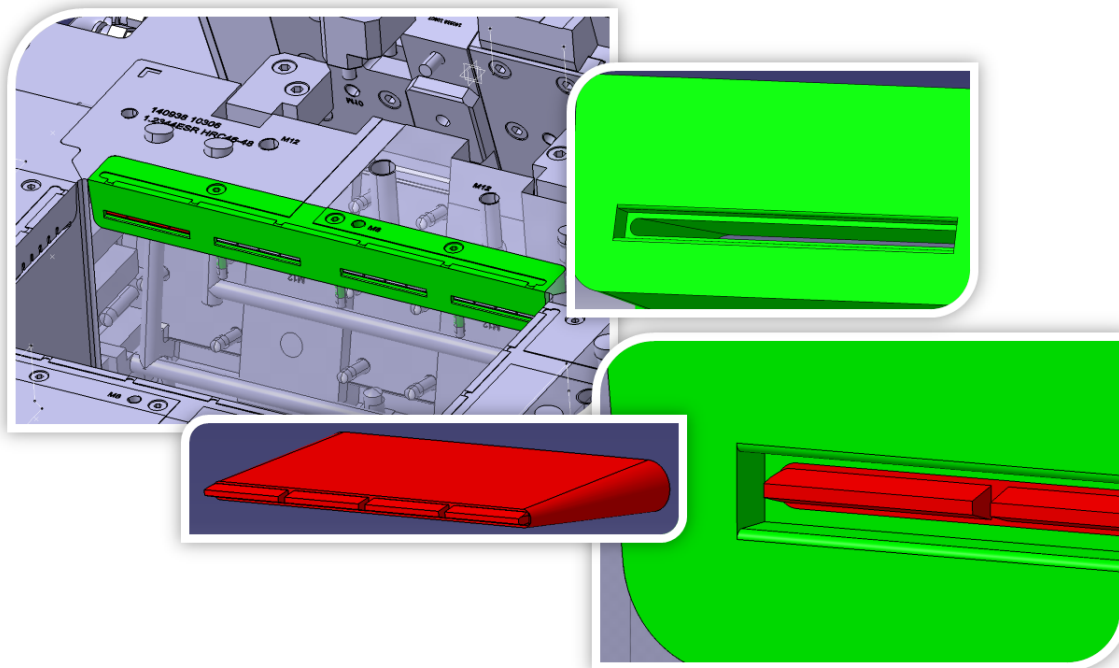
3.3.7. ROZBOR ODVZDUŠNĚNÍ FORMY

Odvzdušnění formy je provedeno pouze „odlehčením“ dělící roviny. V dělení formy jsou záměrně zvětšené mezery dosedacích ploch v určitých oblastech, tím je docíleno snazšího úniku vzduchu během plnění dutiny. Forma A disponuje navíc vložkovými tvary. Vložkované jsou vnější žebra na delších stranách boxu, tímto je navýšeno lokální odvzdušnění. Forma A tedy disponuje lepším odvzdušněním a lze díky tomu provádět rychlejší vstřikování.

3.4. MODIFIKACE KONSTRUKCE FORMY - ZA ÚČELEM SJEDNOCENÍ DOBY CYKLU

3.4.1. MODIFIKACE ODVZDUŠNĚNÍ

Forma A vykazuje možnost rychlejšího vstřiku, bez vzniku vzhledových vad způsobených vzduchem/plynem. Forma A obsahuje vyvložkování žebířů na bočních stěnách viz (obr. 61). Toto vyvložkování podporuje odvod vzduchu, zlepšuje odvzdušnění dutiny formy.



Obr. 61 Vyvložkování čelistí

Pro zrychlení vstřiku, které je důležité z hlediska průběhu plnění dílu a distribuci tlaku v dutině, je nutné lépe odvzdušnit formu.

Ve formě B bude optimalizováno odvzdušnění a to tak, že bude provedeno vyvločkování vnějších žebér dle formy A.

3.4.2. ÚPRAVA CHLAZENÍ

Při simulování procesu chlazení dle reálných hodnot, bylo zjištěno, že projekt B by měl vykazovat vyšší průtoky, tedy umožňovat kratší chladicí fázi. V reálu ale forma B vykazuje nižší hodnoty průtoků, nižší průtok znamená snížení intenzity chlazení, tedy díl B potřebuje delší dobu cyklu, aby stihl díl dochlazit na určenou teplotu pro odformování.

V závislosti na naměřených a vypočtených hodnotách je doporučeno provést údržbu chladících kanálů a to nejen chem. čištění, ale i kontrolu pozicování jednotlivých částí chladícího systému.

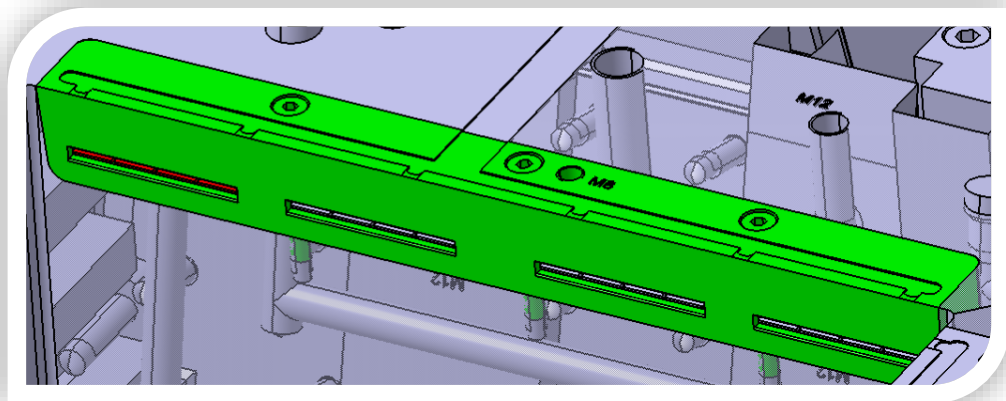
3.5. MODIFIKACE OBOU FOREM ZA ÚČELEM ZKRÁCENÍ DOBY CYKLU

3.5.1. MODIFIKACE ODVZDUŠNĚNÍ

Sjednocení způsobu, intenzity odvzdušnění, vedlo k sjednocení vstřikovací rychlosti. Bylo by však žádoucí vstřik ještě zrychlit. Zrychlení z hlediska stroje je stále možné, při zrychlení

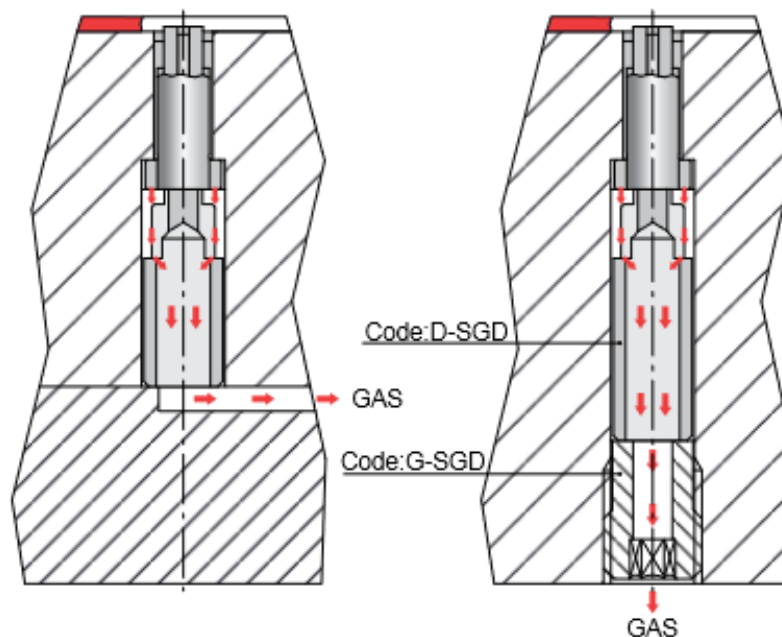
však dochází ke znovu objevování vad na díle způsobených špatným odvzdušněním formy. Pro možnost zrychlení vstřiku je tedy nutné více optimalizovat odvzdušnění formy.

Optimalizaci odvzdušnění formy lze provést dvěma způsoby. První způsob je zaměření se na lokální odvzdušnění, tedy odvzdušnění bude pozicováno jen do exponovaných míst, tedy míst s největší možností uzavírání vzduchu. Druhý způsob je typ odvzdušnění, který znatelně ovlivňuje odvzdušnění celé dutiny



Obr. 62 Oblast určená k vložkování – změna materiálu na Porcerax [17]

Lokální odvzdušnění lze provést prolešťováním dělicí roviny, tento způsob znatelně navyšuje nebezpečí vytváření zástřiku v místě proleštění. Další možností je vložkování tvaru, tento způsob je drahý a vyžaduje častou údržbu. Výměna materiálu za pórovitou ocel je účinná možnost lokálního odvzdušnění, je tedy doporučeno vytvořit žebrovanou část dílu z materiálu Porcerax a tím zajistit lokální odvzdušnění viz (obr. 62).



Obr. 63 SGD odvězdušňovací ventily [20]

Celkové odvězdušnění může být provedeno za pomoci vakua, nebo odvězdušňovacích ventilů. Z hlediska konstrukce formy je doporučeno zvolit odvězdušnění za pomoci ventilů SGD viz (obr. 63) které pomohou odvést většinu plynu z dutiny formy. [20]

3.5.2. MODIFIKACE CHLAZENÍ

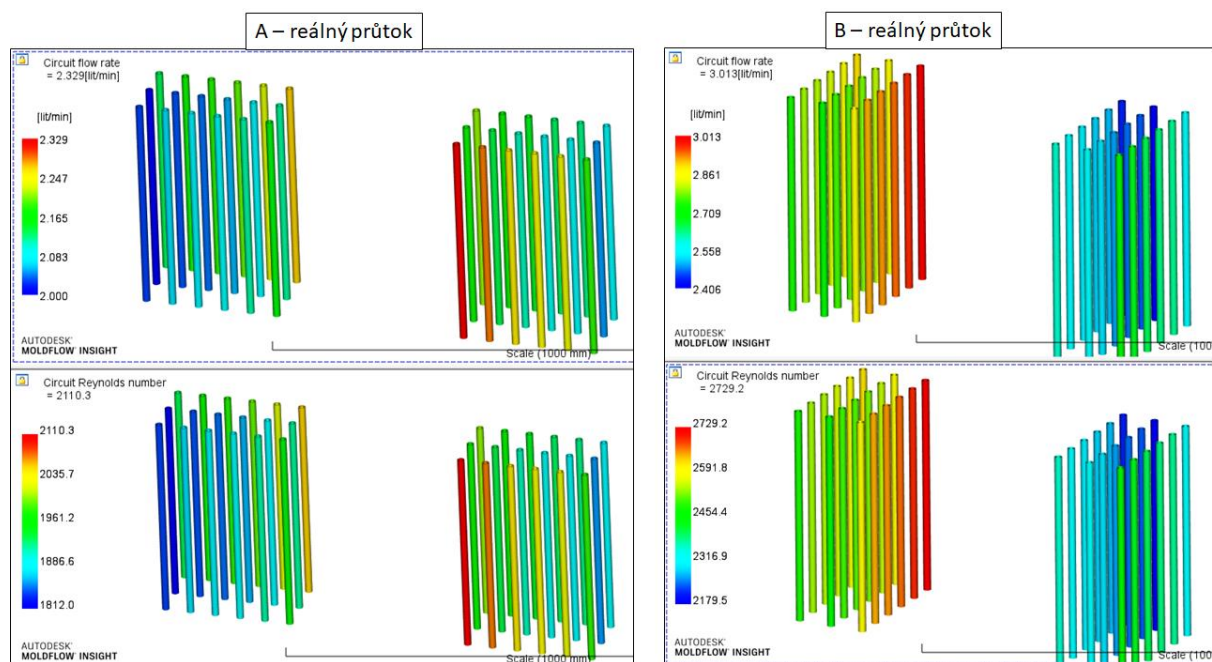
Intenzita chlazení, kterou aktuálně disponují formy je omezena dle vstupního tlaku z centrálního řádu. Tento řád není schopen dodat dostatečný tlak na vstupu do okruhů a formy tak nevyužívají plně potenciál navrženého chlazení. Pro určení zda je průtok dostatečný je zvoleno $Re=10000$.

Okruhy chlazení pevné části formy vykazují $Re=8100 \div 11000$, tedy chlazení zde může být optimalizováno zvýšením průtoku chladiva.

Okruhy chlazení pohyblivé části vykazují značné poddimenzování ze strany vstupního tlaku do okruhů, okruhy mají nízký průtok, $Re = 1800 \div 2700$ viz (obr. 64). Chlazení pohyblivé strany má značný potenciál v možnosti rapidního zvýšení chladicí intenzity.

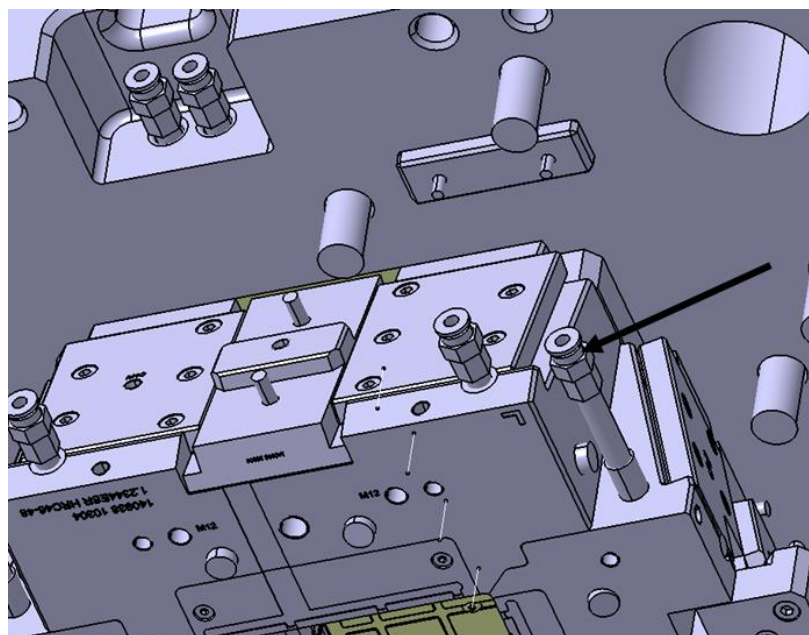
Je doporučeno připojit okruhy chlazení na externí temperační zařízení, které bude zaručovat vyšší vstupní tlak a tedy vyšší průtok v okruzích formy.

Provedená analýza na změnu průtoku chladiva v okruzích potvrzuje možné zrychlení cyklu o 11s. Jako nominální hodnota pro určení o kolik se zrychlí cyklus byla porovnána vypočítaná teplota dílce dle stávajících parametrů a následně byla porovnána s dobou potřebnou na vychlazení dílce při vyšším průtoku chladicího média.



Obr. 64 Chlazení pohyblivé strany formy: průtok, reynoldsovo číslo

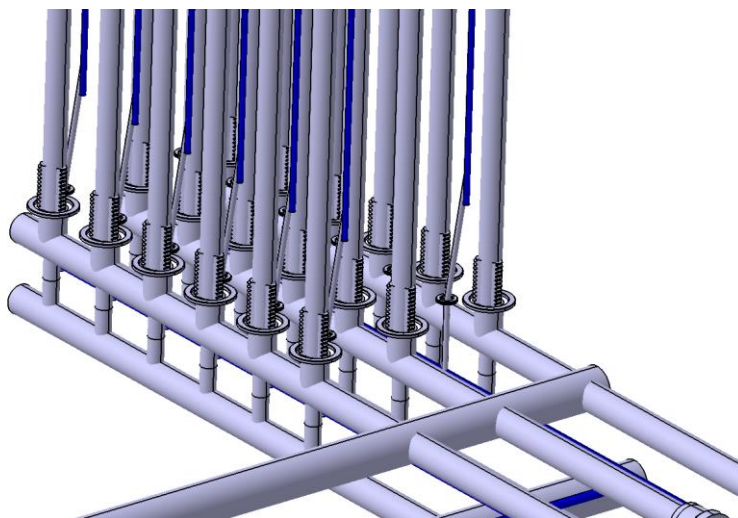
Připojení chladících okruhů je provedeno přes pneumatické rychlospojky viz (obr. 65), tento systém je aktuálně využíván v Ø8mm. Vzhledem k tomu, že kanály jsou většinou vrtány na Ø12mm, je doporučeno přejít na systém vodního rozvodu, konkrétně na hadice pro plastikářský průmysl se světlostí 13mm.



Obr. 65 Připojení okruhů přes pneumatický standard

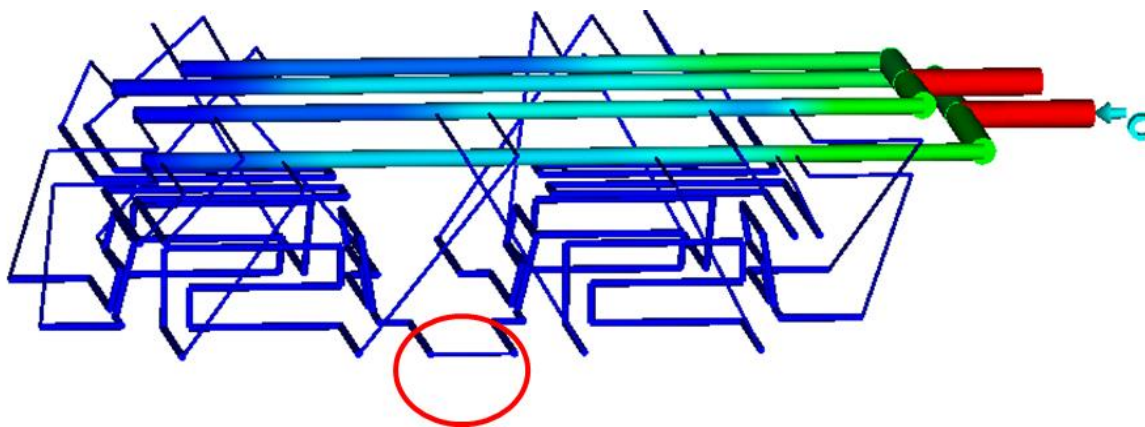
Chlazení tvarových vložek pohyblivé strany formy je prováděno skrze trubičkový/fontánový systém. Jednotlivé chladicí větve jsou zapojeny paralelně viz (obr. 66). Paralelní zapojení snižuje tlakovou ztrátu, tedy chladivo bude proudit vyšší rychlostí, což je žádoucí, dále pak jednotlivé větve okruhu se neovlivňují změnou příchozí teploty vody, která by se při sériovém zapojení ohřála v předešlé větvi.

Nevýhodou sériového zapojení je nejistota v reálném průtoku jednotlivými větvemi okruhů. Jednotlivé větve mohou být uzavřeny špatnou montáží trubiček, nebo utěsněny nečistotami. V takovémto případě okruh stále vykazuje dostatečné průtočné množství, ale nevyužívá ho pro všechny větve systému. Je doporučeno provést přerozdělení okruhů, z jednoho okruhu s paralelně napojenými větvemi udělat 6 okruhů s větvemi zapojenými do série.



Obr. 66 Rozvod trubičkového/fontánového chlazení pohyblivé strany formy

Forma A má okruhy vnitřních čelistí spojeny do série viz (obr. 67), dochází tím k navýšení odporu a okruh vykazuje menší průtok. Je doporučeno okruhy rozdělit a navýšit tak průtok, intenzitu chlazení.



Obr. 67 Zapojení chlazení u formy A – pevná strana

4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

4.1. SJEDNOCENÍ VÝROBNÍCH ČASŮ FOREM

První byla provedena kontrola chladicího systému formy B. Pohyblivá strana měla špatně instalovány jednotlivé prvky chlazení a některé okruhy nefungovali buď vůbec a nebo s minimálním průtokem. Dále bylo provedeno chemické čištění okruhů a výsledné průtoky se navýšily na hodnoty vypočítané dle simulace.

Forma B je tedy schopna vyrábět za stejné doby chlazení jako forma A, cyklus tím ale ještě není zcela srovnán, není možno zrychlit plnění dílu. Zvýšení rychlosti plnění vytváří neakceptovatelné vzhledové vady.

Z hlediska odvodu vzduchu bylo provedeno vyložkování žeber v čelistech pevné strany formy. Tímto bylo navýšeno odvodu vzduchu dutiny formy a lze provést rychlejší vstřik bez vzniku vzhledových vad.

Obě formy jsou nyní schopny vyrábět za shodného vstřikovacího cyklu 62s.

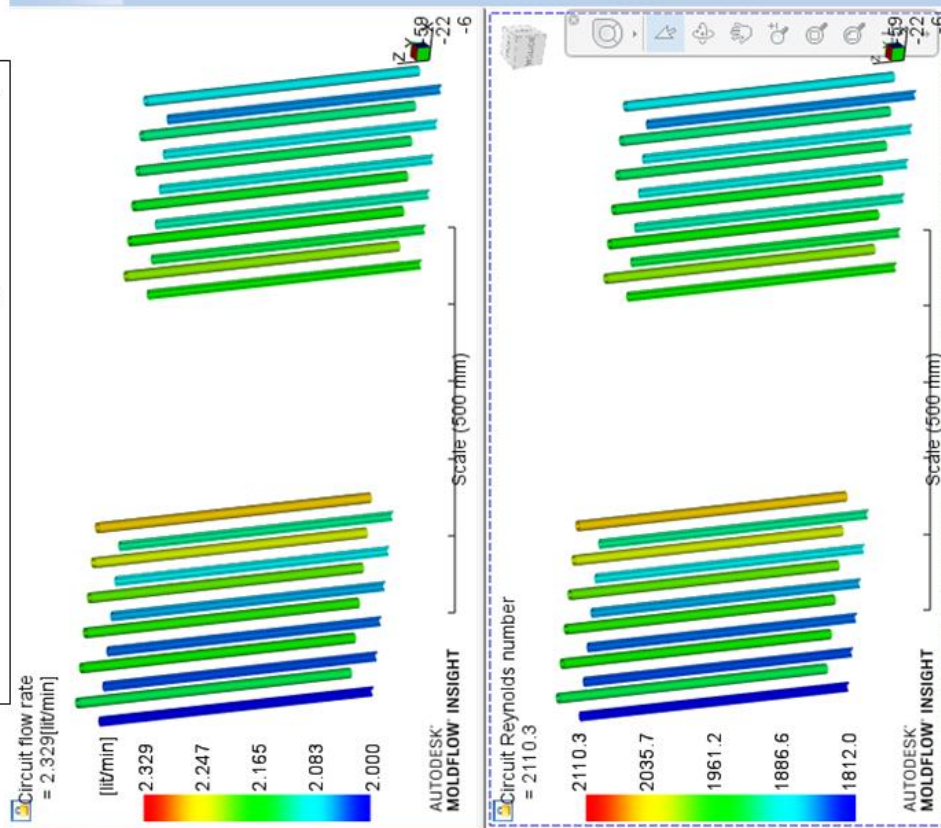
4.2. DODATEČNÉ ÚPRAVY FOREM

U forem byl simulací zjištěn nedostatečný průtok a to zejména v pohyblivé části formy. Pohyblivá část formy obsahuje vložky jejichž chlazení je prováděno přes trubičky vložené do vrtaného kanálu. Z hlediska intenzity chlazení vůči spotřebované energii je doporučeno udržovat takový průtok, aby bylo dosaženo $Re=10000$. Aktuální průtoky ale dosahují $Re=1800 \div 2100$. Navržené chlazení tedy v reálných hodnotách nevyužívá svůj předpokládaný potenciál a formy nedosahují předpokládaných časů cyklu.

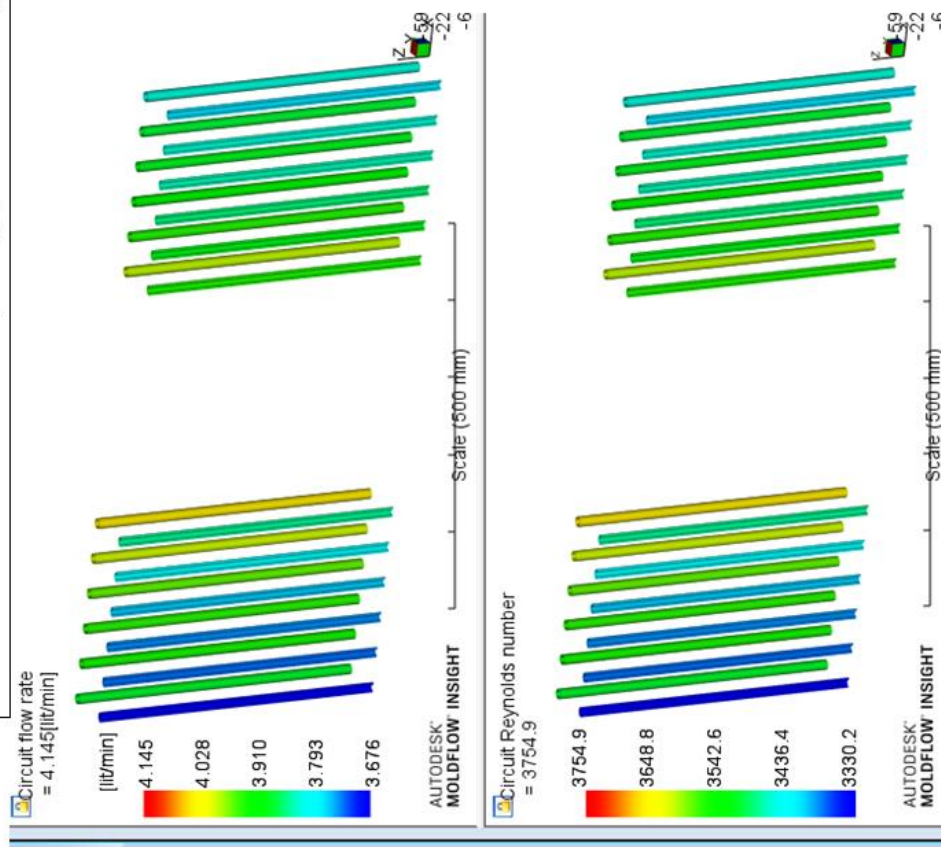
Dle doporučení bylo provedeno navýšení průtoku pohyblivé strany. Navýšení průtoku bylo provedeno připojením externího zařízení, které je schopno dodávat vyšší tlak než chlazení z centrálního řádu. Po zapojení bylo zjištěno, že průtočné množství se zdvojnásobilo, dle naměřených hodnot byla provedena simulace viz (obr. 68).

Výstup ze simulace potvrdil, že při dvojnásobném průtoku dojde k znatelnému navýšení Re čísla, tedy z 2100 na 3700. Simulace předpokládá možnost zrychlení cyklu o 6,8s. Určení možnosti zrychlení bylo provedeno dle výstupních teplot při běžném cyklu, následně bylo sledováno, po jaké době bude při intenzivnějším chlazení forma / díl dosahovat stejných hodnot viz (obr. 69), (obr. 70).

Forma A - standardní průtok vody

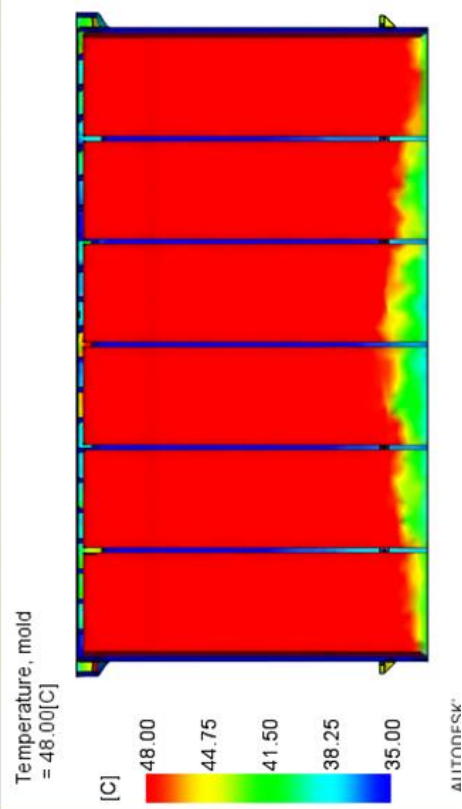
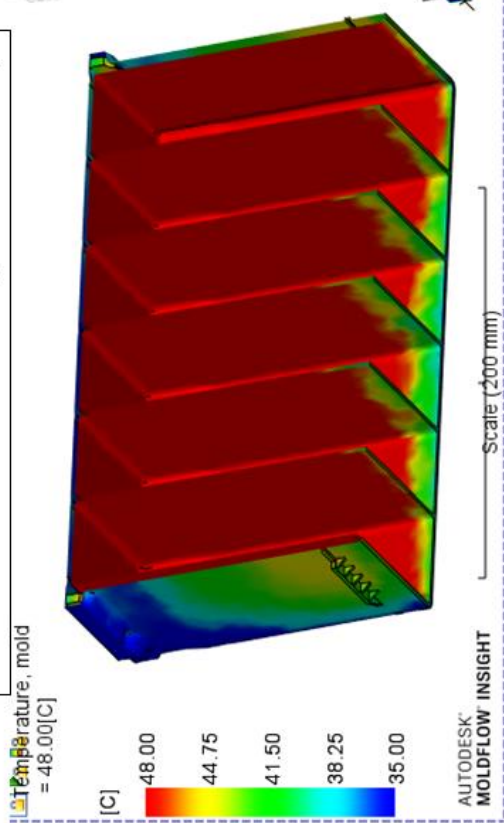


Forma A – cca 2x navýšený průtok vody

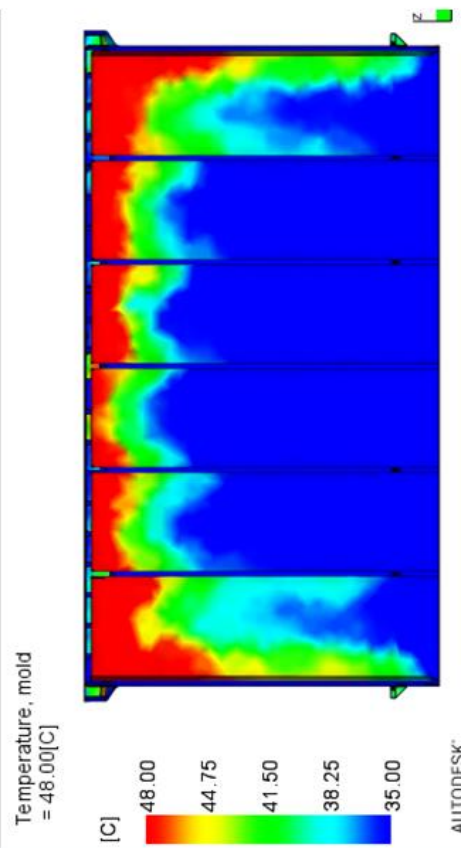
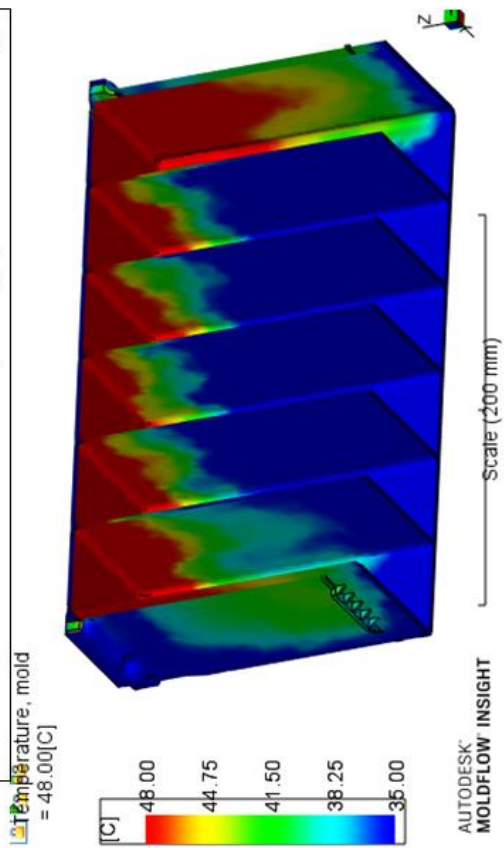


Obr. 68 Změny v průtoku a Reynoldsovo číslo před a po zapojení externího zařízení

Forma A - standardní průtok vody

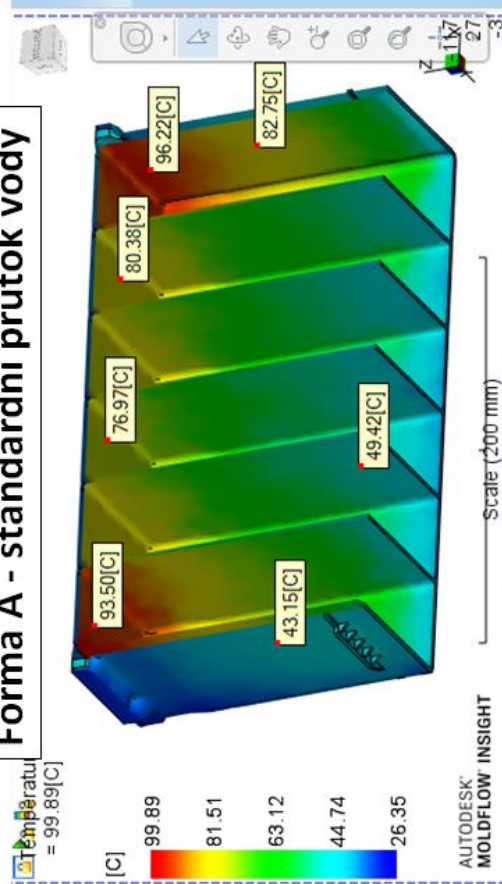


Forma A – cca 2x navýšený průtok vody

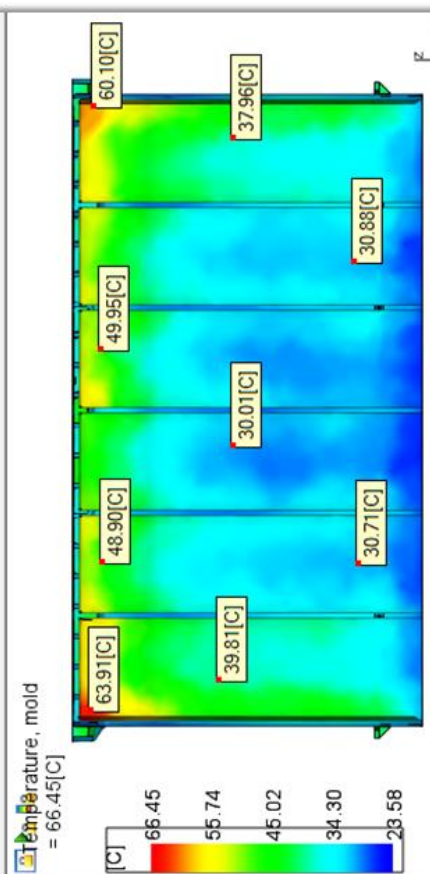
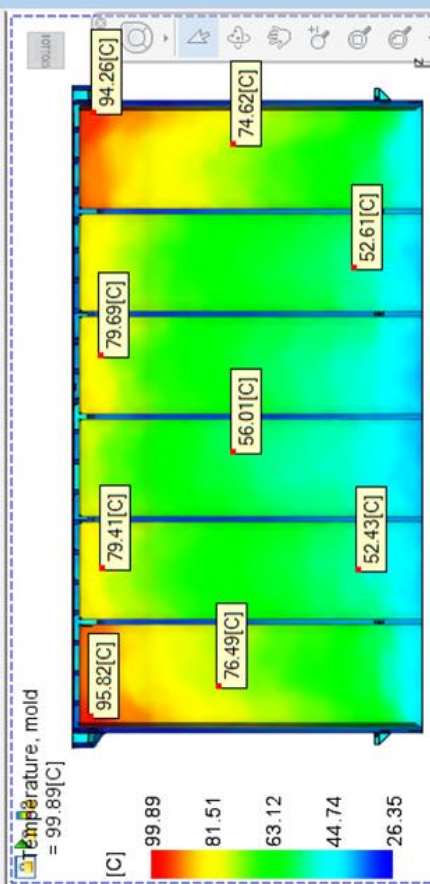
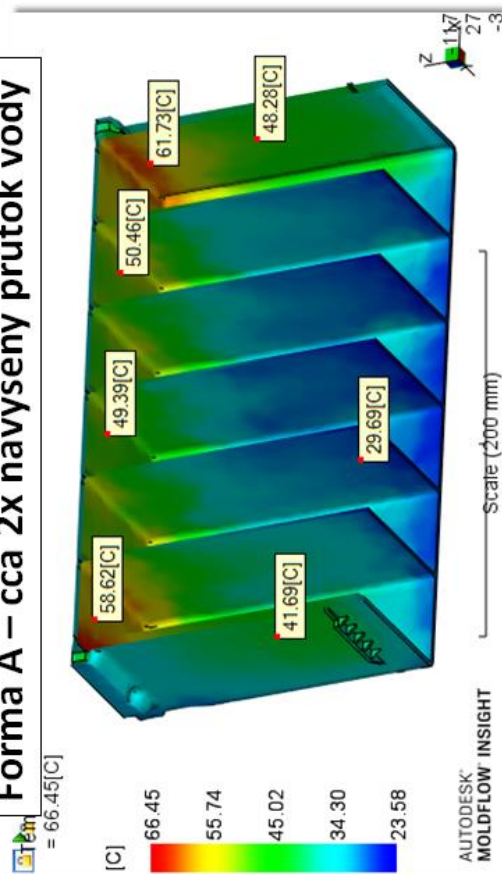


Obr. 69 Průměrná teplota stěny formy – plošné porovnání

Forma A - standardní průtok vody



Forma A - cca 2x navýšený průtok vody



Obr. 70 Průměrná teplota stěny formy – bodové měření

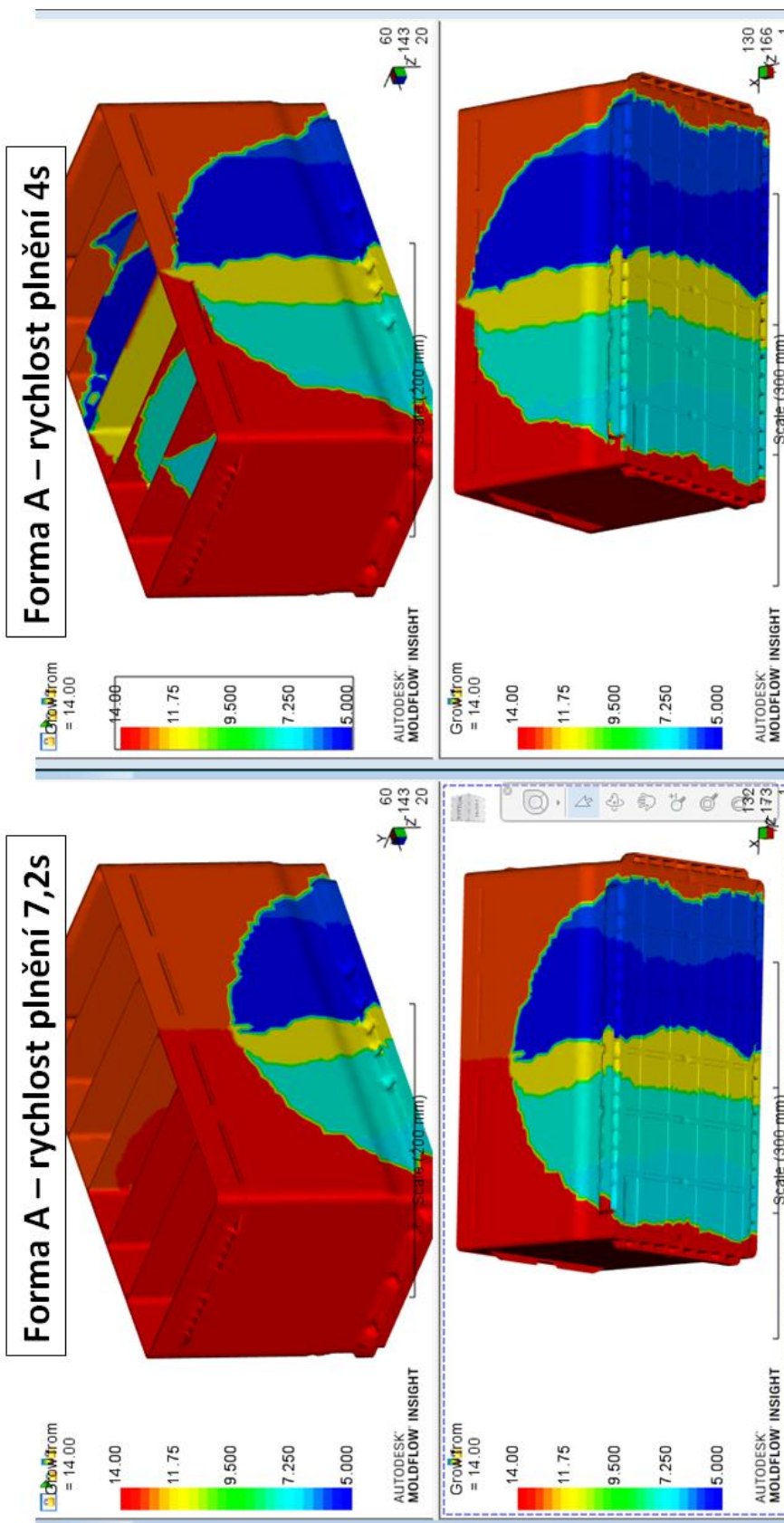
4.2.1. ODVZDUŠNĚNÍ

Odvzdušnění bylo optimalizováno za pomoci vložkování tvaru a použití odvzdušňovacích ventilů [20]. Díky tomuto řešení lze dosáhnout vyšší rychlosti plnění dosahující 4s, bez vzhledových vad.

Na vložkování tvaru nebyl použit materiál Porcerax z důvodu pořizovacích nákladů. Bylo rozhodnuto, že provedené vložkování tvaru bude provedeno nástrojovou ocelí. Při rozhodování dodatečných investic byla upřednostněna implementace odvzdušňovacích SG ventilů, které odvzdušňují celý díl. Po implementaci a provedených zkouškách bylo zjištěno, že aktuální systém odvzdušnění je dostačující pro danou rychlost plnění, 4s. Aktuálně lze tedy vstříkovat vyšší rychlostí bez nebezpečí vzniku neakceptovatelných vzhledových vad.

Zvýšená rychlost vstříku mění průběh plnění dílu tak, že oblast vysokých žeber není zatuhnutá již během vstříku, ale díl se plní stejnoměrněji viz (obr. 70).

Díky odvzdušnění díly nevykazují při vysoké rychlosti plnění vzhledové vady. Změna průběhu plnění napomáhá v lepším rozložení tlaku v dutině formy. Při zvýšené rychlosti plnění nedochází k tak znatelnému tuhnutí dílu během plnění a potřebné tlaky k naplnění dutiny jsou tak nižší viz (obr. 71). Při pomalejším plnění dutina vykazuje tlak při plnění 28MPa, pokud dojde ke zrychlení vstříku je plnicí tlak nižší, dosahuje hodnot 17MPa.

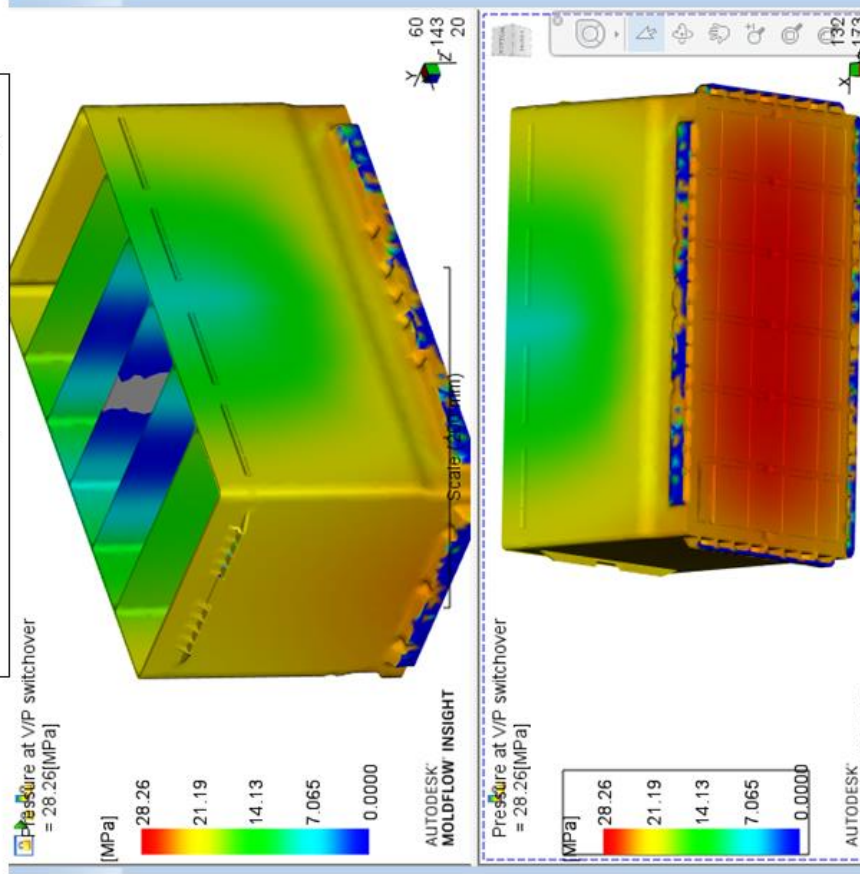


Obr. 71 Plnění dílu – objemu materiálu, který protéče skrze jednotlivé trysky

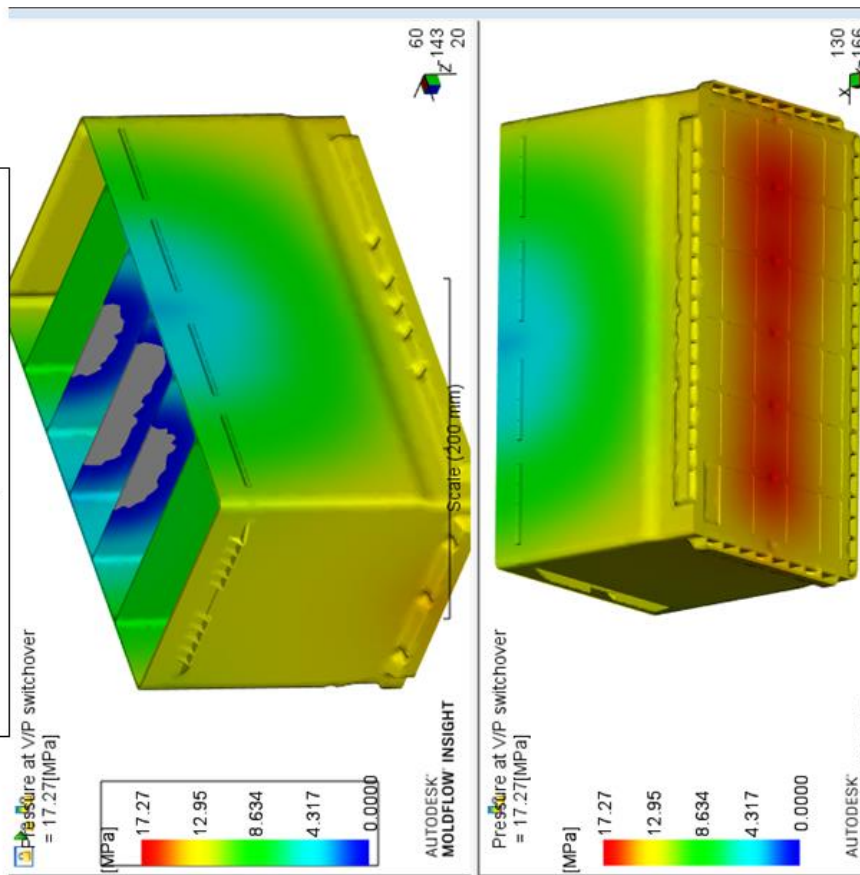
Vlevo: forma A při rychlosti plnění 7,2s

Vpravo: forma B při zvýšené rychlosti plnění 4s

Forma A – rychlost plnění 7,2s



Forma A – rychlost plnění 4s



Obr. 72 Porovnání tlaků v dutině formy během plnění dílu, při změně rychlosti plnění

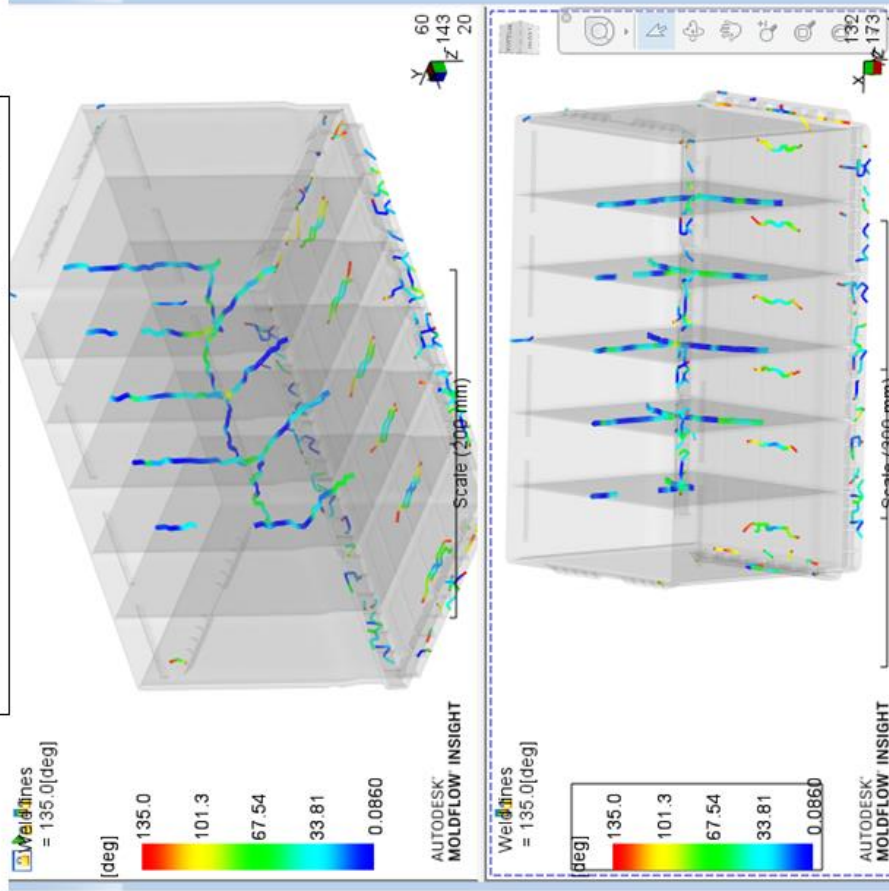
Zrychlení dále zvyšuje stabilitu procesu, studený spoj, který je vytvářen během plnění úzkého žebra, se při zvýšení rychlosti plnění minimalizuje až eliminuje viz (obr. 72). Studený spoj znamená uzavírání vzduchu, při tvorbě studeného spoje tak vzniká nebezpečí uzavření vzduchu v ploše, tedy vzduch není odveden dělením a v takovémto případě vznikají nedolitě díly, díry na výlisku, bubliny.

Snížení potřebného tlaku v dutině formy zlepšuje stav žeber dílu, pokud jsou žebra již během vstřiku zatuhlá, tak lze zatuhlý plast tlakem utemovat. Žebra se v tokovém případě trhají a zůstávají ve formě. Při zvýšení rychlosti vstřiku se, v tomto případě, problém eliminuje viz (obr. 73).

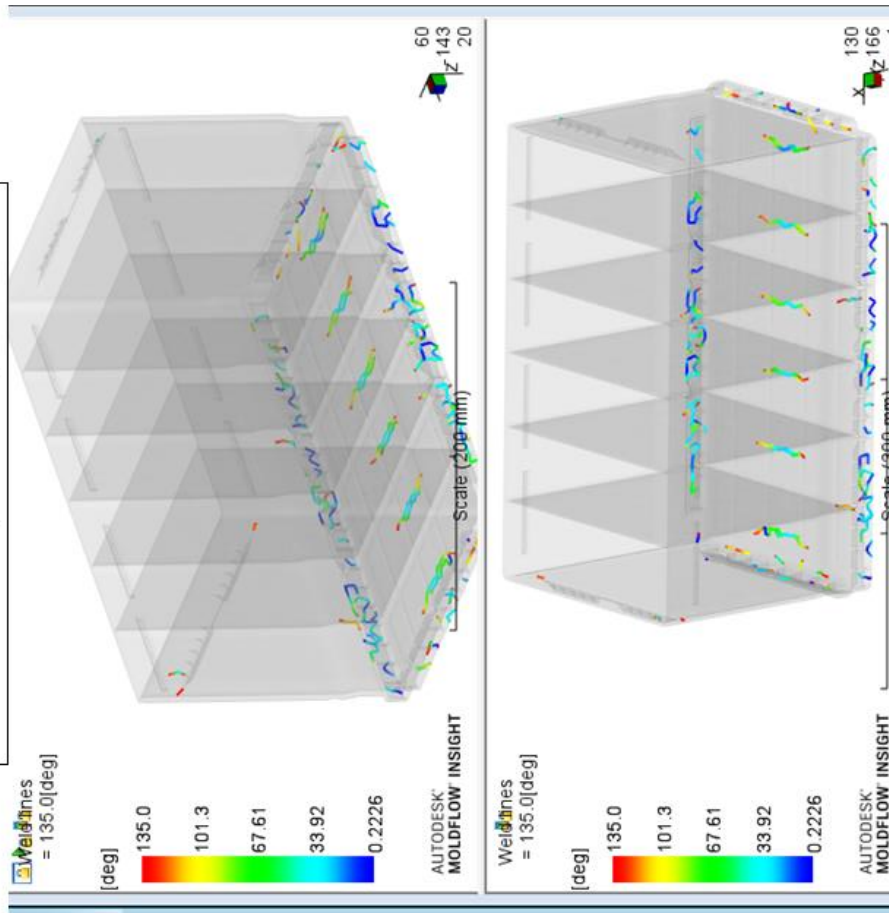
Díl má problémy s odformováním a deformacemi ze smrštění, aktuální nastavení vstřiku a dotlaku je kompromis, kdy lze vyrábět. Pro snížení deformací dílu je potřeba prodloužit dotlak, při prodloužení dotlaku ale dochází k trhání žeber, žebra jsou utemována mezi tvarové vložky viz (obr. 73). Při zvýšení rychlosti vstřiku se tento jev snižuje, díky zmenšení rozdílu v tunutí jednotlivých částí dílu.

Při použití vyšší rychlosti vstřiku můžeme použít delší dotlak. Provedená analýza neukazuje znatelnou změnu deformací v závislosti na rychlosti vstřiku viz. (obr. 74). Při zrychlení vstřiku a prodloužení dotlaku dochází ke snížení deformací dílu a zvýšení stability procesu.

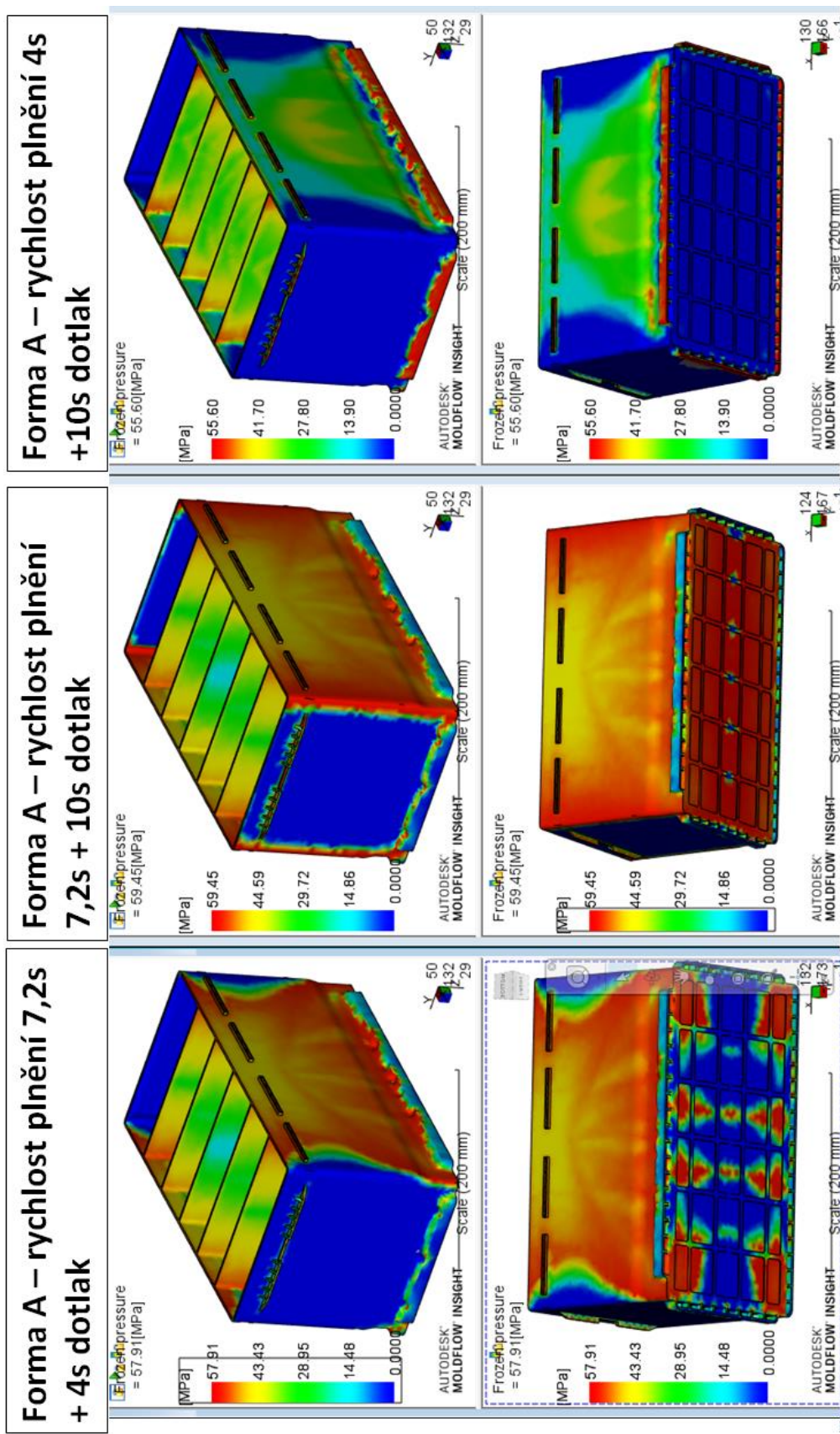
Forma A – rychlost plnění 7,2s



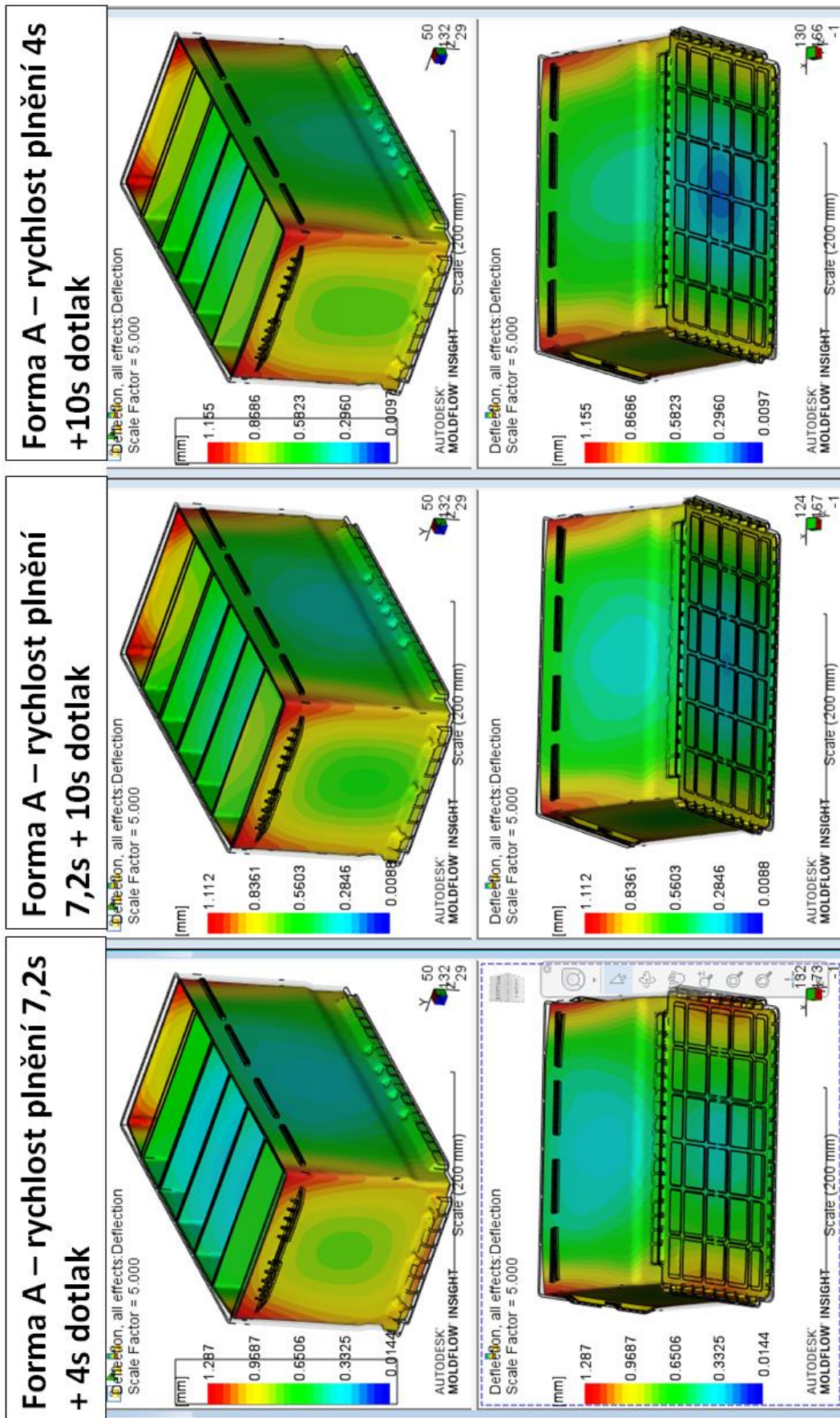
Forma A – rychlost plnění 4s



Obr. 73 Pozice studených spojů na díle



Obr. 74 Tlak na ztuhlé části dílu
ukazuje maximální tlak dosažený uvnitř formy od okamžiku zamrznutí prvku až do doby konce dotlakové fáze



Obr. 75 Celková deformace dílu, závislá na všech efektech

4.3. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.

Po provedených úpravách a údržbě na formě B, vložkování tvaru, čištění a údržba kanálů, bylo docíleno sjednocení cyklů obou forem. Forma B tedy snížila svůj výrobní cyklus o 13s. Což znamená úsporu na výrobních nákladech, při 1milionu zdvihů cca: 3 315 000 Kč.

Dodatečné úpravy, které mají za úkol dále snížit výrobní cyklus, byly provedeny jen na formě A, z důvodu vyzkoušení, zda je jejich účinek znatelný. Po reálných výsledcích bude rozhodnuto, zda se budou změny aplikovat i do formy B.

Dodatečné úpravy byly provedeny:

Úprava průtoku chladicího systému, větší průtok chladicího média znatelně navýšil intenzitu chlazení, což vedlo k možnosti zkrácení cyklu.

Úprava odvodu vzduchu formy, implementace 4 ks odvodu vzdušných ventilů, 2 ventily na díl, umožnila provedení rychlejšího vstřiku bez vzniku vad na díle. Rychlejší vstřik mění průběh plnění dílu, plnění je příznivější z hlediska distribuce tlaků v dutině formy. Maximální tlaky v dutině formy nelze změřit, forma není osazena tlakovým čidlem. Simulace však prokazuje znatelné snížení tlaků potřebných k doplnění dutiny formy, což je pro výrobu příznivé.

Po ekonomickém zhodnocení, porovnání ceny a přínosu, je doporučeno aplikovat dodatečné změny na formě A i na formu B. Ekonomické zhodnocení viz (tab. 3). Návrh investice do formy B pro srovnání cyklu je, při nákladu 152 400 Kč , cca 46 000 dílů. Investice vložené do formy A pro další snížení doby cyklu jsou 54 00 Kč a návratnost je cca 35 300 dílů.

Cena stroje: 920[Kč/hod] => 0.255[Kč/s]									
	Min. čas cyklu [s]	Cena stroje [Kč] pro 1cyklus	Úspora vůči Var1 [Kč] na jednom dílu	Úspora vůči Var2 [Kč] na jednom dílu	Úspora vůči Var1 [Kč] na 1 000 000 [ks]	Úspora vůči Var2 [Kč] na 1 000 000 [ks]	náklady na úpravu [Kč]	Návratnost investice [ks]	Celková úspora při 1 000 000 [ks]
Var1	75	0,255 x 75 = 19,125	0	0	0	0	0	0	0
Var2	62	0,255 x 62 = 15,81	3,315		3 315 000		152 400	45972	3 315 000 - 152 400 = 3 162 600
Var3	56	0,255 x 56 = 14,28	4,845	1,53	4 845 000	1 530 000	54 000	35 300	1 530 000 - 54 000 = 1 476 000

Tab. 3 Ekonomické zhodnocení

Var 1) forma B – původní dlouhý cyklus (před změnami)

Var 2) forma B – sjednocený cyklus s formou A

Var 3) forma A – po provedení dodatečných změn (krátký cyklus)

5. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat dvě formy na výrobu shodného dílu. Formy byly zadány dvěma různým nástrojárnám se shodným zadáním. Rozložení dílů ve formě není shodné, ale systém odformování, plnění, chlazení je srovnatelný a formy by měly být schopny vyrábět díly za podobných parametrů ve shodné kvalitě. Protože tento předpoklad není dodržen, byla provedena tato studie s cílem zjistit příčiny a navrhnout změny, které výrobní kvalitu forem sjednotí.

Začátek experimentální části obsahuje vysvětlení simulačních analýz, které byly pro kontroly forem použity. Nastavení jednotlivých simulací a okrajových podmínek. Pro porovnání byly použity ty nejkompexnější počítačové analýzy, analýzy kontrolující nejen celý výrobní cyklus, ale i náběh formy do sériových parametrů. Výpočty jsou prováděny a kontrolovány po dobu 25 cyklů.

Další část experimentální části prochází jednotlivými fázemi výroby dílu na vstřikovacím stroji, procesem vstřiku, dotlaku, chlazení. Výstupy z procesu vstřikování ukazují na problémy s vadami způsobenými vysokou rychlostí vstřiku. Protože jsou uvedené vady neakceptovatelné, je nutné udržet pomalý vstřik. Problém s rychlostí vstřiku je však nutné řešit, protože má pozitivní vliv na problémy s odformováním dílu. Pozitivním vlivem je myšlena změna průběhu plnění dutiny formy a s tím spojená distribuce tlaku v dutině. Při pomalé rychlosti vstřiku se plnění vnitřních žebér dílu zastaví cca v jedné třetině výšky žebra, zbytek dílu je doplněn přetékáním z bočních stěn. Jestliže žebra zatuhnou během plnění, dochází k namáhání zatuhlého dílu, což vede k utemování a následným problémům s odformováním. Pomalý vstřik tedy napomáhá trhání žebér utemovaných vstřikovacím nebo dotlakovým tlakem. Jako další bonus rychlého vstřikování je snížení tlaku v dutině formy, tento fakt nelze reálně zjistit, protože forma neobsahuje tlaková čidla, zjištění je provedeno pouze na základě simulační analýzy. Je tedy nutné najít možnost jak zrychlit, ale zároveň nevytvářet vzhledové vady.

Dle simulace bylo zjištěno, že díl vyžaduje delší dobu dotlaku, než která je výrobně nastavena. Při prodloužení doby dotlaku dochází k problémům s odformováním, konkrétně se trhají vnitřní žebra dílu. Aby bylo možné prodloužit dotlak, je nutné změnit průběh tuhnutí dílu během plnění. Pomalý vstřik zastavuje tečení v oblasti žebér a dotlak pak následně působí na tuhý materiál, který pak nelze z formy vytáhnout. Dle simulace, při zrychlení vstřiku cca na 4s se tyto problémy eliminují a lze provést delší dobu dotlaku bez trhání žebér. Delší dobou dotlaku se následně stabilizuje rozměr dílu, dojde se snížení smrštění a deformací, průhybu bočních stěn. Pro zrychlení je však nutno lépe odvzdušnit formu, aby nevznikaly vzhledové vady způsobené uzavřeným vzduchem.

Vzhledem k tomu, že vzhledové vady jsou všechny způsobeny uzavřeným vzduchem, je tedy nutné se zaměřit na způsob odvzdušnění dutiny formy. Odvzdušnění formy je prováděno odlehčením dělicí roviny na pohyblivé straně formy, mezi jednotlivými tvarovými vložkami utvářejícími středová žebra dílu. Tento systém odvzdušnění je však nedostačující a dochází

k jeho rychlému ucpání. Nutné modifikace systému odvodu odvětrání byly rozděleny do dvou oblastí a to se zaměřením na lokální odvětrání a odvětrání celé dutiny formy.

Lokální odvětrání bylo provedeno za pomoci vložkování tvaru, tedy tvar vnějších žeber, který byl frézován z jednoho kusu, byl nahrazen lištou se 4 výměnnými vložkami. Každá kavita obsahuje dvě tyto lišty. Lokální odvětrání bylo provedeno pouze na formě B, forma A jím disponoval již z výroby. Další možností bylo použití pórovité oceli Porcerax, z důvodu ceny a snahy sjednotit obě formy nebyl tento způsob použit. Jednotlivé vložky lze v budoucnu tímto materiálem snadno nahradit. Optimalizace lokálního odvětrání umožnila srovnat rychlosti plnění obou forem.

Pro celkové odvětrání kavity byly použity SGD odvětrávací ventily. Po implementaci odvětrávacích ventilů lze dosáhnout ještě rychlejšího vstříku a tím vyšší stability procesu. Vyšší rychlost znatelně změnila průběh plnění dílu, dochází k nepřetržitému plnění vnitřních žeber, kontinuálnímu plnění dílu ve všech směrech. Ventily byla osazena pouze forma A, dle pozitivních výsledků bude provedena implementace i do formy B.

Chlazení bylo porovnáno a kontrolováno jak fyzicky, tak v CAD datech a simulaci. Bylo zjištěno, že konstrukce chlazení forem je srovnatelná a formy by měly být schopny dosahovat shodných cyklů. Fyzicky byl však zjištěn rozdíl v průtoku chladicího média u pohyblivých stran forem. Forma B, forma s delším výrobním cyklem, vykazovala nižší průtoky. Po provedení analýzy chlazení bylo zjištěno, že pohyblivá strana formy B fyzicky disponuje o 36% nižším průtokem, než by měla dosahovat dle simulačního výpočtu. Okrajové podmínky simulace byly nastaveny dle výrobních parametrů vstříkovny, proto lze přesně určit, jakých průtoků by měla fyzicky dosahovat. Pohyblivá strana je chlazená systémem trubičkového/fontánového chlazení. Předpoklad špatného zamontování jednotlivých dílů chladicího okruhu, změna pozice jednotlivých částí systému během výroby nebo ucpání systému nánosy, vyžaduje demontáž a fyzickou kontrolu. Forma B tedy dle doporučení byla podrobena údržbě, která zahrnovala rozebrání kontrolu systému a chemické čištění okruhů, čištění bylo provedeno jen na pevné části formy. Po provedené údržbě byl průtok shodný s vypočteným a forma byla schopna snížit dobu chlazení na hodnotu formy A.

Po sjednocení chladicího účinku forem bylo ze simulace zjištěno, že průtoky nejsou dostatečné pro dosažení $Re = 10000$. Tato hodnota je doporučována jako kompromis mezi průtokem a spotřebovanou energií. V reálných podmínkách lze této hodnoty dosáhnout a proto s ní základní simulace počítají. Analyzované formy ale dosahovaly hodnot cca $Re=2100$, průtok chladiva byl tedy znatelně menší, než s jakým se počítalo ve vývojovém projektu. Průtok tedy není schopen vytvořit předpokládanou intenzitu chlazení a dodržet tak předpokládaný cyklus. Byla tedy provedena simulace, která počítala s možností cca 2x navýšení průtoku média. Výsledky prokázaly, že dojde k navýšení na $Re= 3700$ a navýšený chladicí účinek umožní snížit dobu cyklu o 6,8s. Po nasazení byla tedy forma připojena na externí zdroj, který byl schopen dodávat vyšší tlak.

Na zkoušení byla nasazena forma A, která již byla po provedených optimalizacích odvzdušnění. Forma byla schopna vstříkovat za vyšších rychlostí, rychlost vstříku byla 4s, což umožnilo bezpečně prodloužit dotlak. Díky navýšené intenzitě chlazení byla snížena i doba chlazení. Výsledný výrobní cyklus byl 52s, což znamená snížení doby cyklu o 6s.

Vyhodnocení výsledků obsahuje výstupy ze simulací, které ukazují provedené změny a jejich vliv na výrobu dílu. Výstup ze vstřikovací fáze ukazuje změnu v průběhu plnění dílu, distribuci tlaku při plnění, změnu pozic studených spojů. Fyzická kontrola nástřiku postupného plnění formy je velmi problematická z důvodu systému odformování dílu. Díl je vytahován ze žeber pohyblivé strany pomocí stírací desky, pokud ale díl není zcela naplněn, nemá se deska o co zachytit, dojde k deformaci dílu a jeho vzpříčení mezi tvarovými vložkami. Z tohoto důvodu nebyly nástřiky provedeny. Dotlaková fáze obsahuje výsledky porovnávající velikost tlaku na již ztuhlé části dílu. Porovnání prokazuje, že lze prodloužit dobu dotlaku bez znatelného přemáhání dílu tlakem. Prodloužená doba dotlaku má pozitivní vliv na deformace dílu, vyhodnocení obsahuje porovnání deformací, borcení stěn v závislosti na změně parametrů.

Poslední částí je ekonomické zhodnocení jednotlivých úprav na formách. Ke sjednocení doby cyklu a výrobní kvality dílů forem byla provedena investice 152 400Kč, sjednocení doby cyklu v tomto případě znamenalo snížení doby cyklu o 13s, tedy úspora při 1 milionu zdvihů je 3 162 000Kč, návratnost investice je cca po 46k dílů. Dále byla provedena optimalizace formy A za účelem dalšího zrychlení cyklu, cyklus se podařilo snížit o 6s. Náklady na úpravu byly 54 000Kč, návratnost cca 35k dílů, celková úspora pro 1milion zdvihů je 1 470 000Kč.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Lenfeld, P. Technologie II – 2. část (Zpracování plastů). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [2] Krebs, J. Teorie zpracování nekovových materiálů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3.
- [3] Kulharni, S. Robust Process Development and Scientific Molding – Theory and Practice, 2010. ISBN 978-3-446-42275-9
- [4] Shoemaker, J. Moldflow Design Guide – A Resource for Plastics Engineers, 2006. ISBN 13: 978-1+56990-403-9.
- [5] Tvorba vtokové soustav, [online],
https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Part_and_Mold_Design_Guide.pdf?docId=7701
- [6] vstřikovací formy pro zpracování termoplastů [online], <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [7] Řehulka, Z. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů, Brno 2013
- [8] Zeman, L. Vstřikování plastů. Praha: BEN – technická literatura, 2009. 248 s. ISBN 80-7300-023-1
- [9] Roseto, V. *Injection Molding Handbook*. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 2000. ISBN 0-7923-8619-1.
- [10] Gastrow, Hans Injection Molds: 108 Proven Designs Edited by K. Stoeckhert. Hanser Publishers, Munich Vienna New York 1993.
- [11] Menges, G. and Mohren, P. How To Make Injection Molds, 2nd Edition Hanser Publishers, Munich Vienna New York 1992.
- [12] skripta vutbr [online], http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/htn_tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy_zak.pdf
- [13] Jan Dluhoš, diplomová práce - Technologie výroby plastového tělesa clony: Vysoké učení technické v Brně, 2013
- [14] Zeman, L. Vstřikování plastů – teorie a praxe, 2018
- [15] chemické čištění chladících okruhů, [online], <https://www.jansvoboda.cz/Jednotka-na-odstraneni-vodniho-kamene-CDC-d1792159?cid=76329>
- [16] temperace vstřikovacích forem [online], <http://www.plasticportal.cz/cs/temperace-vstrikovacich-forem-dulezita-podminka-vyroby-vystriku-z-termoplastu-4-cast/c/3088>
- [17] materiál Porcerax [online], <http://www.porceraxmoldsteel.com/>
- [18] Odvzdušnění CUMSA – vakuum, [online], <https://www.cumsa.com/16-vacuum?p=2>
- [19] Vyahazovací systém CUMSA, [online], <https://www.cumsa.com/cs/18-produkty>
- [20] odvzdušňovací SGD ventily, [online], <https://www.jansvoboda.cz/SGD-ventil-c61201>
- [21] Autodesk. Manuál programu Autodesk Moldflow Insight. [online],
<http://help.autodesk.com/view/MFIA/2016/ENU/?guid=GUID-66B3B0E8-DB05-4DC5-8E8F-CCA29A11A7ED>

- [22] Melt flipper, [online], <http://www.beaumontinc.com/meltflipper/>
- [23] Normálie do forem – HASCO, [online], <https://www.hasco.com/cs/>