

Návrh moderní vstřikovací formy pro zvýšení účinnosti chlazení

Bc. Tomáš Zvoníček

Diplomová práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Tomáš Zvoníček
Osobní číslo:	T19541
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh moderní vstřikovací formy pro zvýšení účinnosti chlazení

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Proveďte konstrukci 3D modelu vstřikovaného plastového dílu.
3. Navrhněte moderní vstřikovací formu pro zadaný díl pro zvětšení účinnosti chlazení.
4. Návrh a funkčnost ověřte pomocí tokových analýz.
5. Nakreslete 2D řez vstřikovací formou včetně příslušných pohledů a kusovníku.

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

Seznam doporučené literatury:

1. ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 978-80-271-0614-1.
2. OSSWALD, Tim A., Lih-Sheng TURNG a Paul J. GRAMANN. Injection molding handbook. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Publishers, c2008, xvii, 764 s. ISBN 978-1-56990-420-6
3. BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2007, xvi, 308 s. ISBN 978-1-56990-421-3.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Janošík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

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

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá optimalizací části chlazení ve vstřikovacím cyklu. Při aplikaci konformního systému chlazení lze potenciálně dosáhnout jednotné distribuce tepla ve formě, snížit chladicí čas a dosáhnout lepší kvality výrobku. Návrh tohoto typu chlazení je konstrukční a technologickou výzvou, kvůli komplexnosti geometrie a prostupu tepla.

V diplomové práci jsou rozebrány tři typy temperačních systému, vytvořené různými technologiemi. Tyto systémy jsou podrobeny 3D FEM Cool analýze a na základě výsledků vybrán nejeftektivnější způsob, pro který je navržena dvounásobná vstřikovací forma.

Výsledek v této práci potvrzuje, že konformní systém chlazení snižuje čas chladicího cyklu, v tomto případě o cca 56%, a proto je tento systém použit při návrhu tvářecího nástroje.

Klíčová slova: Technologie vstřikování, reologie, optimalizace, chlazení forem, konformní chlazení, energetika, DMLS

ABSTRACT

This thesis deals with optimization of cooling factor in injection molding cycle by using conformal cooling channels. Conformal cooling is considered as a potential solution for obtaining a uniform temperature distribution in the mold, which results in a shorter cooling time and a better quality of a molded part. Designing and manufacturing of such system is a challenge due to their complex geometry and heat transfer. The solution in this thesis presents a method to maximize the efficiency of a conformal cooling channel made by 3D printing technology (DMLS).

This thesis takes three types of cooling channels made with three different technologies. These cooling systems undergo a CAE simulation.

Study is introduced to demonstrate the benefit of the conformal cooling channels. The cooling time is reduced by 56% and an injection mold is designed using conformal cooling channels.

Keywords: Injection molding technology, Rheology, Design optimization, Cooling, Conformal cooling channel, Energy saving, DMLS

Děkuji Ústavu výrobního inženýrství, Fakulty technologické, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně za umožněné vzdělání, které vedlo ke vzniku této diplomové práce. Velmi děkuji zejména Ing. Václavu Janoščíkovi, Ph.D. za jeho čas, ochotu a rady poskytnuté při tvorbě této diplomové práce. Z jeho přístupu si rád vezmu příklad při dalším vzdělávání sebe samotného.

“The science of today is the technology of tomorrow.” – Edward Teller

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN A VSTŘIKOVÁNÍ	12
1.1 NEWTONSKÁ KAPALINA.....	12
1.2 NENEWTONSKÁ KAPALINA.....	12
1.2.1 Viskozita	13
1.2.2 Index nenewtonského chování a koeficient konzistence	15
1.3 TOK TAVENINY DO DUTINY FORMY	15
1.3.1 Tavenina ve vtokovém systému a ve vtokovém ústí	16
1.4 TAVENINA V DUTINĚ FORMY.....	17
1.4.1 Fontánový tok.....	17
1.4.2 Studený spoj.....	19
1.4.3 Jetting.....	21
1.5 INDEX TOKU TAVENINY (ITT).....	21
1.6 CARREAU – YASUDA VISKOZITNÍ MODEL	22
1.7 VLIV RŮZNÝCH PARAMETRŮ NA VISKOZITU.....	23
1.8 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	24
1.9 PVT DIAGRAM.....	25
1.10 PROCESNÍ OKNO – MAD.....	26
2 TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM	28
2.1 ODVOD TEPLA A POŽADAVKY TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU.....	29
2.1.1 Temperační jednotka	30
2.1.2 Temperační médium	30
2.1.3 Výpočet chladicího času podle parametrů temperačního systému.....	30
2.1.4 Topologická optimalizace chladících kanálů.....	33
2.1.5 Metoda optimalizace konformního chlazení ve vstřikovací formě.....	35
2.2 KONSTRUKCE TEMPERAČNÍCH SYSTÉMŮ	36
2.2.1 Vrtané kanály	36
2.2.2 Systém ploché přepážky - Baffle.....	37
2.2.3 Systém spirálové přepážky – Spiral Baffle	38
2.2.4 Systém fontánové přepážky – Bubbler	39
2.2.5 Temperační systém Contura.....	40
2.2.6 Konformní chlazení	41
3 VÝROBA NÁSTROJŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ S KONFORMNÍM CHLAZENÍM	44
3.1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING	44
3.2 DIRECT METAL LASER SINTERING	44

3.2.1	Oblasti použití	46
3.3	MATERIÁLOVÁ KOMPATIBILITA	46
3.3.1	Direct Metal 20.....	47
3.3.2	Aluminum AlSi10Mg.....	47
3.3.3	Cobalt Chrome MP1	47
3.3.4	Maraging Steel MS1	47
3.3.5	Nickel Alloy IN718	48
3.3.6	Stainless Steel GP1	48
3.3.7	Stainless Steel PH1	48
3.3.8	Titanium Ti64.....	48
3.3.9	Srovnání vlastností vybraných materiálů.....	48
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	50
4	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	51
5	CHARAKTERISTIKA VÝROBKU.....	52
5.1	MATERIÁL VÝROBKU.....	52
6	TOKOVÁ ANALÝZA.....	53
6.1	ANALÝZA VHODNOSTI POLOHY VTOKU (GATE LOCATION).....	53
6.2	PŘEDBĚŽNÁ ANALÝZA PLNĚNÍ (FILL)	54
7	KONSTRUKCE TEMPERAČNÍCH KANÁLŮ PRO ANALÝZU.....	55
7.1	VRTANÁ TEMPERACE.....	55
7.2	SYSTÉM CONTURA	56
7.3	SYSTÉM KONFORMNÍHO CHLAZENÍ.....	57
8	NASTAVENÍ PROCESNÍCH PODMÍNEK PRO ANALÝZY	58
9	VÝSLEDKY ANALÝZY CHLAZENÍ A SMRŠTĚNÍ.....	59
9.1	VRTANÁ VERZE	59
9.1.1	Čas potřebný pro vyhození	59
9.1.2	Rychlost proudění v kanálu.....	60
9.1.3	Teplotní pole v chladicím kanálu	61
9.1.4	Teplotní pole tvarové vložky	61
9.1.5	Deformace výrobku	62
9.2	VERZE CONTURA	63
9.2.1	Čas potřebný pro vyhození	63
9.2.2	Rychlost v kanálu	63
9.2.3	Teplotní pole v chladicím kanálu	64
9.2.4	Teplotní pole tvarové vložky	65
9.2.5	Deformace výrobku	65
9.3	VERZE SYSTÉMU KONFORMNÍHO CHLAZENÍ.....	66
9.3.1	Čas potřebný pro vyhození	66
9.3.2	Rychlost v kanálu	66
9.3.3	Teplotní pole v chladicím kanálu	67
9.3.4	Teplotní pole tvarové vložky	68

9.3.5	Deformace výrobku	68
9.4	VOLBA CHLADÍČÍHO SYSTÉMU PRO KONSTRUKCI FORMY	69
10	VÝSLEDKY 3D ANALÝZY VERZE KONFORMNÍHO SYSTÉMU	70
10.1	ČAS PLNĚNÍ.....	70
10.2	TLAK PŘI PŘEPNUTÍ NA DOTLAK.....	71
10.3	TLAK VE VTOKOVÉM ÚSTÍ.....	71
10.4	RYCHLOST SMYKOVÉ DEFORMACE.....	72
10.5	VZDUCHOVÉ KAPSY.....	73
10.6	UZAVÍRACÍ SÍLA.....	74
10.7	OBJEMOVÉ SMRŠTĚNÍ	74
10.8	STUDENÉ SPOJE	75
11	KONTROLNÍ ANALÝZA PEVNOSTI TVAROVÝCH ČÁSTÍ	77
12	KONSTRUKCE FORMY.....	80
12.1	MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO SESTAVU VSTŘIKOVACÍ FORMY	80
12.2	ZAFORMOVÁNÍ A TVAROVÉ ČÁSTI.....	81
12.3	VTOKOVÝ SYSTÉM	82
12.4	TEMPERAČNÍ SYSTÉM	82
12.5	RÁM VSTŘIKOVACÍ FORMY	83
12.5.1	Pevná část formy	83
12.5.2	Posuvná část formy.....	84
12.5.3	Vyhazovací systém	85
13	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	87
13.1	ROZHODUJÍCÍ PARAMETRY PRO VOLBU STROJE	87
13.2	VOLBA STROJE	88
	ZÁVĚR.....	89
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	90
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	92
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	94
	SEZNAM TABULEK	96
	SEZNAM PŘÍLOH	97

ÚVOD

Technologie vstřikování je nejpopulárnější metodou zpracování plastů pro velkosériovou výrobu. Doba vstřikovacího cyklu je základním ukazatelem energetické efektivity výrobního procesu vstřikování. Procesy ve vstřikovací formě se dělí do čtyř stádií – plnění, dotlak, chlazení a vyhození. Nejdéle z těchto procesů trvá chlazení, a právě zkrácení a celkové optimalizaci tohoto děje se věnuje tato diplomová práce. Proces chlazení ovlivňuje kvalitu vyrobené součásti, jelikož nerovnoměrné chlazení součásti způsobuje odlišné smrštění a reziduální napětí v částech výrobku, proto mají chladicí kanály velmi podstatnou úlohu ve vstřikovací formě.

Optimalizace chlazení v této práci probíhá porovnáním konvenčních metod, jako jsou výrobně jednodušší vyvrtávané kanály oproti konturovým a konformním chladicím systémům. Pro optimální návrh je navržena vstřikovací forma včetně 3D modelové a výkresové dokumentace.

Technologie konformního chlazení potenciálně dosahuje jednotné distribuce tepla ve formě, díky které zkracuje čas potřebný pro chlazení a zároveň zajišťuje vysokou kvalitu hotového dílu.

Návrh tohoto typu chlazení je konstrukční a technologickou výzvou, kvůli komplexnosti geometrie a prostupu tepla. Řešení v této práci bude prezentováno za účelem dosažení maximální efektivity konformního chlazení za použití technologie 3D tisku.

Optimalizace procesu chlazení je prováděna za pomoci CAE simulací v programu Autodesk Moldflow 2016. V analýze je zahrnuta efektivita chlazení a vyrobitelnost. Analýza má za úkol přirovnat technologii konformního chlazení ke konvenčním metodám. [1], [11], [9]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN A VSTŘIKOVÁNÍ

Polymerní taveniny vykazují od nízkomolekulárních kapalin odlišné chování, které je při zpracování nutno znát. Nízkomolekulární kapaliny vykazují newtonské chování a chování polymerních kapalin je definováno jako nenewtonské, konkrétněji pseudoplastické. K popisu polymerního toku tavenin slouží empirický vztah nazvaný mocninový zákon.

Tokové vlastnosti polymeru jsou popsány v základním charakteristickém grafu závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace. Tyto grafy jsou nazývány jako tokové křivky a nejlépe vyjadřují tokové vlastnosti polymeru, jsou sestavovány experimentálně.

Účinkem vnější síly dochází k přeskokům částic a tím změně tvaru. Práce spojená s tímto jevem se obecně mění v teplo. Tento jev se nazývá disipace mechanické energie na energii tepelnou. Při toku taveniny k tomuto dochází neřízeně a je jen otázkou kvantitativních poměrů, kdy se projeví dodatečným zvýšením teploty v daném místě. Disipační výkon je v daném místě úměrný součinu smykového napětí a smykové rychlosti. V místě s největším zúžením tokové dráhy bude dosaženo nejrychlejšího proudění, a tedy k reálnému ohřevu polymerní taveniny při jejím toku. Ohřev může způsobit dosažení příliš vysokých teplot a degradovat zpracovávaný materiál. Při vstřikování má stěna tokového kanálu nižší teplotu než teplota tání, resp. tečení. Proto dochází k časově neustálenému toku, kdy tavenina tuhne postupně v rostoucí vrstvě na stěně tokového kanálu. Rychlost tuhnoucí taveniny na povrchu chladnoucí vrstvy je nulová a směrem ke středu se zvyšuje. Takový tok se nazývá fontánový a je to nejvhodnější způsob toku při plnění tvarových dutin forem. [1]

1.1 Newtonská kapalina

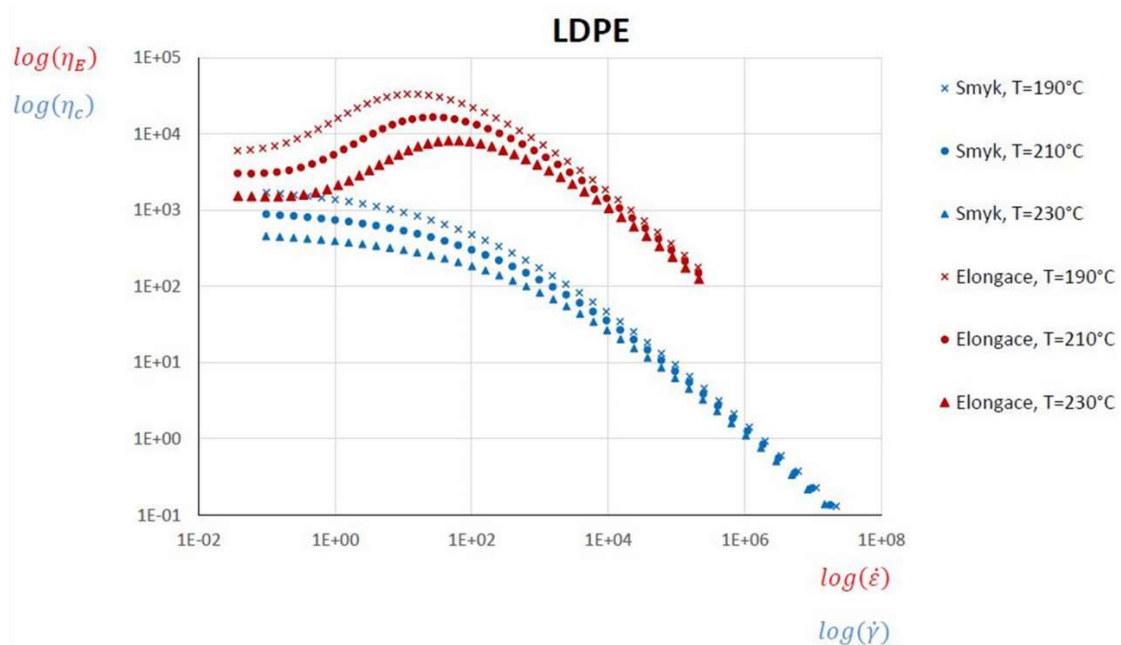
Newtonská kapalina je charakterizována Newtonovým zákonem o viskozitě. Newtonské kapaliny mají viskozitu konstantní vzhledem k času a rychlosti smykové deformace a je udávána jako materiálová vlastnost. Viskozita se mění s teplotou, tlakem a je závislá na molekulárních parametrech dané látky. [30]

1.2 Nenewtonská kapalina

Většina polymerních tavenin se během toku chová newtonsky pouze při velmi nízkých rychlostech smykové deformace a v grafu tokové křivky je tato oblast označena jako první newtonské plató. Se zvyšující se rychlostí smykové deformace se smyková viskozita polymerní taveniny mění. Pro polymerní taveniny je typické snižování odporu proti tečení při zvýšení rychlosti smýkání. Tuto oblast označujeme jako přechodovou a směrnice křivky

závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace se postupně ustaluje do konstantní hodnoty, která určuje stupeň neneutonského chování – index n . V poslední části grafu se nachází tzv. druhé newtonské plató, které je charakterizováno ustálením viskozity nezávisle na stále se zvyšující rychlosti smykové deformace. [30]

Graf na Obr. 1 zobrazuje průběh smykové a tahové viskozity materiálu LDPE pro tři různé teploty. Materiál dle grafu vykazuje větší odpor vůči tahové deformaci než vůči smykové deformaci. Tahová viskozita je tedy větší než smyková. Křivka zobrazující průběh elongační (tahové) viskozity zobrazuje v oblasti menších rychlostí tahové deformace tzv. překmit. Tento překmit je způsoben tím, že LDPE je z makromolekulárního hlediska tvořen dlouhými větvemi na základním řetězci a je považován za materiál s širokou distribucí molárních hmotností (obsahuje různě dlouhé i krátké řetězce). Materiály tohoto typu mají vysokou pravděpodobnost tvorby zapletenin polymerních řetězců při menších rychlostech tahové deformace, což způsobuje zvýšení odporu proti tečení při přechodu do vyšších rychlostí tahové deformace. Tedy dlouhé řetězce mají tendenci se plést dohromady s vedlejšími větvemi a ztěžují tak tečení taveniny. Se zvyšující se rychlostí tahové deformace se zapleteniny nestíhají vytvářet, až postupně vymizí.

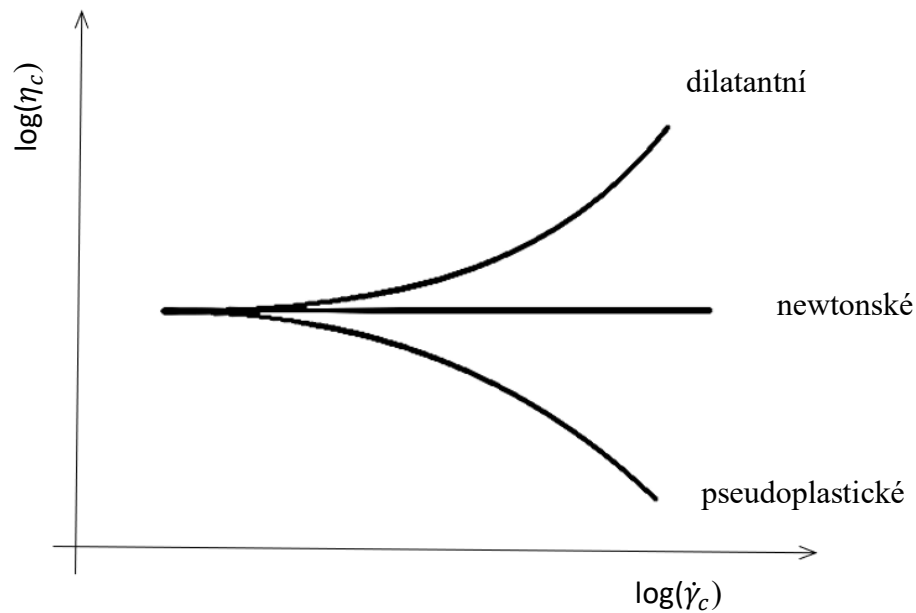


Obr. 1.: Graf závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace a tahové viskozity na rychlosti tahové deformace pro materiál LDPE a teploty 190°C, 210°C, 230°C [5]

1.2.1 Viskozita

Viskozita je odpor kladený vůči toku taveniny. Index neneutonského chování značí míru odklonu od newtonského chování kapaliny, index konzistence vyjadřuje fluiditu materiálu.

Obr. 2 zobrazuje průběh smykové viskozity pro různé druhy kapalin.



Obr. 2.: Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace typů kapalin [5]

Matematický popis viskozity jako odporu proti tečení se liší v závislosti velikosti rychlosti smykové deformace. Při nízkých rychlostech smykové deformace platí tzv. Newtonův zákon o viskozitě:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

η – smyková viskozita

τ – smykové napětí

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace

Se zvyšující se rychlostí smykové deformace pseudoplastické tekutiny ztrácí na viskozitě, a to je nejčastěji popisováno modelem zvaným mocninový zákon (Power Law):

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

m – koeficient konzistence

n – index nenewtonského chování

Rovnice (2) je v grafu v logaritmickém měřítku přímkou. Hodnotu koeficientu konzistence m lze dostat z průsečíku $\dot{\gamma} = 1$. Exponent $n-1$ způsobuje nakloněnou přímkou, ve které lze použít model mocninového zákona, protože:

$$\log \eta = \log m + (n - 1) \log \dot{\gamma} \quad (3)$$

Z toho vyplývá, že tento model lze použít pouze v určitých rychlostech smykové deformace, protože při nízkých rychlostech smykové deformace se viskozita limitně blíží nekonečnu. [5]

Pro $n > 1$ je kapalina dilatantní, pro $n=1$ newtonská, pro $n < 1$ pseudoplastická – což platí pro většinu polymerních tavenin. [30]

Pokles smykové viskozity s rostoucí rychlostí smykové deformace je charakteristická vlastnost pro pseudoplastické tekutiny. Pseudoplasticita je ze zpracovatelského hlediska dobrou vlastností, protože snižuje energetickou náročnost při proudění kapalin v potrubí nebo při míchání. Princip pseudoplasticity je ustalování rovnováhy mezi nesouměrnými částicemi nebo molekulami. V klidu jsou částice náhodně promíchány, ale při pohybu se pozvolna orientují hlavními osami do směru pohybu. [30]

1.2.2 Index neneutonského chování a koeficient konzistence

Indexem neneutonského chování se rozumí míra odklonu od chování newtonské kapaliny.

Pro $n = 1$ je mocninový zákon redukován na Newtonův zákon konstantní viskozity. S klesajícím indexem neneutonského chování klade pseudoplastická kapalina menší odpor vůči deformaci. [5]

Index n se u komerčně používaných polymerů pohybuje v rozmezí 0,8 (různé typy polykarbonátů) do 0,2 (kaučukové směsi). Pro modifikace polyethylenu je rozmezí $0,3 < n < 0,6$. Je závislý na molekulové hmotnosti a uspořádání řetězců. Se změnou teplot se index neneutonského chování podstatně nemění. [5]

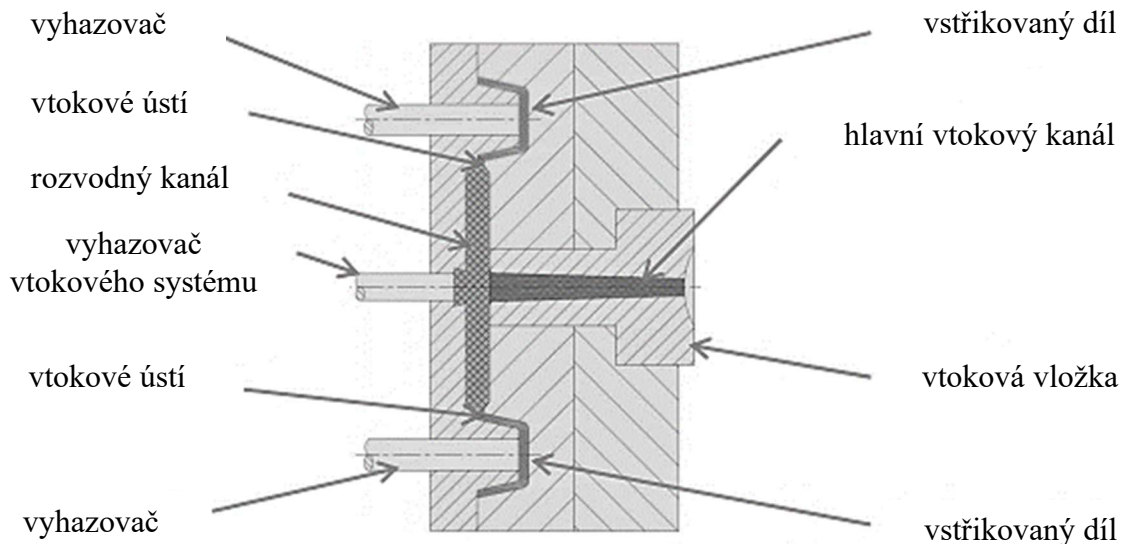
Koeficient konzistence se podstatně mění se změnou teplot a v procesních podmínkách se jeho hodnoty pohybují mezi $1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ a $100\,000 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$. Hodnota závisí na molekulové hmotnosti a ohebnosti řetězců polymerního systému. [5]

Vysoká hodnota koeficientu konzistence m znamená vysokou viskozitu. [30]

1.3 Tok taveniny do dutiny formy

V procesu vstřikování je cílem produkovat zcela zatečený výrobek bez propadlin, který nepodléhá smrštění a má požadovanou pevnost a tuhost. K tomuto je potřeba volný pohyb taveniny do dutiny formy tak, aby nevznikalo ve formě reziduální napětí a zároveň zůstal

nízký čas vstřikovacího cyklu, což snižuje procesní náklady. Reologie polymerních tavenin je podstatnou rolí v produkci kvalitních dílů a v udržení nákladů na minimum. [27]



Obr. 3.: Schématické zobrazení toku taveniny do dutiny formy [31]

Na Obr. 3 jsou zobrazeny jednotlivá místa, kde dochází k toku taveniny. Pohyb začíná pohybem často šnekového vstřikovacího stroje dopředu, který před sebou tlačí taveninu do trysky, vtokové vložky a dále do vtokového systému. Rozvodný kanál rozkládá původně jeden proud taveniny do několika vzhledem k násobnosti formy tak, aby tavenina dorazila do vtokových ústí na výrobcích ve stejnou dobu (v případě stejných dutin forem). Vtokové ústí je malý otvor, který usnadňuje oddělení zamrzlého vtokového systému od výrobku a zároveň minimalizuje množství taveniny, které by se z dutiny formy vracelo zpět do vtokového systému po ukončení působení tlaku. Jakmile polymerní tavenina doteče do dutiny formy, kde je v kontaktu s chladným povrchem formy, začne tuhnout. Po zaplnění formy dochází k dotlaku, který kompenzuje objemové smrštění. [27]

1.3.1 Tavenina ve vtokovém systému a ve vtokovém ústí

Rozvodné kanály vtokového systému jsou navrhovány tak, aby dopravily taveninu do dutiny formy a zároveň způsobovaly co nejmenší tlakovou ztrátu a zamrzalo v nich co nejméně materiálu, který zůstává jako odpad. Tavenina ve vtokových kanálech obvykle zamrzá současně s taveninou v dutině formy a po otevření formy je zamrzlý polymer odstraněn do odpadu. Alternativou pro snížení odpadu jsou horké rozvodné systémy, které jednak snižují odpad a jednak zkracují vstřikovací cyklus. [27]

Nejmenší tlakovou ztrátu pro danou vstřikovací rychlost lze dosáhnout návrhem kanálů s kruhovým průřezem, ale obvykle se používá jiných tvarů v průřezu z důvodu snadnějšího odstranění zamrzlé taveniny z vtokového systému. Vstřikovací tlak k zaplnění vtokového systému dosahuje obecně spíše nižších hodnot, avšak tlaková ztráta v kanálech je dostatečně podstatná právě u vícenásobných forem kde, pokud jsou dutiny identické, je nutno zaplnit tyto dutiny ve stejný čas, tudíž zajistit ve vtokovém ústí stejný a vhodný tlak.

Jedním přístupem k tomuto problému je zkrátka návrh kanálu stejné délky a rozměrů ke vtokovým ústím. Problémem takto balancovaného systému často bývá velká tlaková ztráta a odpad kvůli přílišné délce vtokových kanálů. [27]

Jiný přístup je nalezení geometrických parametrů ze vztahu průtoku jako funkce tlakové ztráty: [27]

$$Q = \pi R^3 \left(\frac{n}{3n + 1} \right) \left(\frac{-\Delta P R}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Q – průtok

n – index newtonského chování

ΔP – tlakový spád

R – poloměr kapiláry (kanálu)

K – empirická konstanta reometrické geometrie

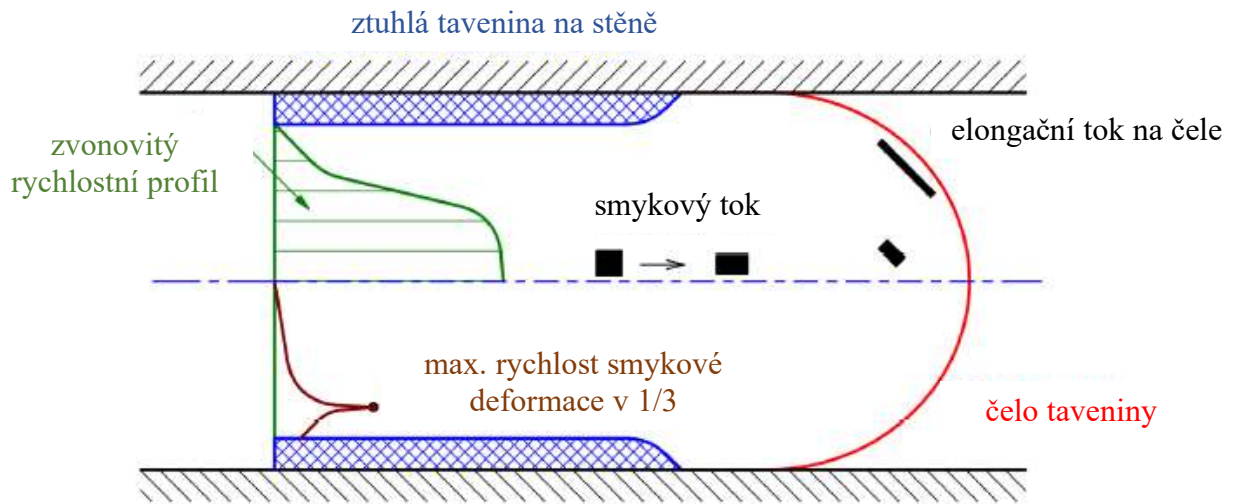
Dle rovnice (4) klesá průtok za daného tlaku se zvyšující se délkou L a stoupá poměrně ostře se zvyšujícím se poloměrem R . Pokud je průtok definován jako průřez násobený rychlostí čela taveniny, pak lze z této rovnice odvodit závislost délky kanálu na čase. To definoval Tadmor a Gogos tak, že $L(t)$ je úměrné poloměru R a největší průnik taveniny je na začátku cyklu. Pro konstantní průtok by měl být tlak lineární funkcí času. [27]

1.4 Tavenina v dutině formy

1.4.1 Fontánový tok

Fontánový tok je označení pro vhodný způsob plnění tvarových dutin forem. Rychlost tuhnoucí taveniny na povrchu chladnoucí vrstvy je nenulová a směrem ke středu se zvyšuje. [1]

Tok v dutině formy nelze modelovat jako tlakem řízený mezi dvěma paralelními deskami, protože tavenina okamžitě zamrzá na stěně dutiny formy a tavenina má ve středu toku nižší viskozitu, kvůli vyšší teplotě a tím se vzdálenost mezi dvěma paralelními deskami s časem mění. Maximální smyková rychlost není na rozhraní se zamrzlou vrstvou, ale o krátkou vzdálenost dál od stěny. [27]



Obr. 4.: Fontánový tok v dutině formy [30]

Fontánový tok je způsoben absencí skluzu na stěně mezi taveninou a stěnou. Rychlostní profil není parabolický, ale zvonovitý – mění se zde křivka z konkávní na konvexní (Obr. 4). Rychlost smykové deformace dosahuje maximální hodnoty v $1/3$ vzdálenosti od stěny směrem k ose toku.

V povrchové vrstvě vzniká reziduální napětí vlivem rychlého tuhnutí taveniny na stěně, kde makromolekula nemá dostatek času zrelaxovat.

Tahové a tlakové složky napětí jsou tvořeny následným ztuhnutím a teplotním smrštěním jádra výstřiku. Vysoce neuniformní rozdělení teploty po průřezu stěny výstřiku zapříčiňuje, že každý element polymeru ztuhne v různém čase. To vede k různému smrštění vyvolávajícímu teplotně indukované reziduální napětí. [33]

Biaxiální orientace (elongace + smyk) při fontánovém toku vede ke vzniku anizotropních vlastností.

Struktura vlákna se zde v každé vrstvě od kraje mění. V zamrznuté vrstvě je orientace nahodilá, ve vzdálenosti $1/3$ od stěny je orientace vláken radiální (paralelní se směrem toku) v důsledku smykového toku. Pod touto vrstvou je orientace vláken obvodová, jelikož zde dominuje tangenciální složka rychlosti. [30]

Při vstřikování materiálů s plnivý vzniká anizotropní struktura, která se dá částečně ovlivnit rychlostí vstřikování a významně polymerní maticí. S klesajícím indexem newtonského chování je rychlostní profil hladší, a tedy oblast vysokého smýkání užší, a tak vzniká menší tloušťka vrstev s radiální orientací (paralelně ke směru toku) vláken. [30]

V dutině formy převažuje elongační tok, který významně ovlivňuje zatékavost polymeru. Čím je elongační viskozita větší, tím polymerní tavenina hůře zatéká a je potřeba vyššího tlaku na vyplnění dutiny formy. [30]

Smyková viskozita má vliv na tvar čela taveniny:



Obr. 5.: Vliv smykové viskozity na tvar čela taveniny [30]

K dosažení úspěšně vstřikované součásti bez vad a špatných mechanických vlastností je potřeba zajistit dopravu správného množství taveniny do dutiny formy za správného tlaku, bez teplotního zatížení. [27]

Správné plnění formy se zajistí volbou procesních parametrů podle navržené formy a zpracovávaného polymeru. [27]

1.4.2 Studený spoj

Při obtékání překážky ve formě dochází k rozdělení taveninového proudu a opětovnému spojení, čímž vzniká tzv. studený spoj. Jakmile je taveninový proud rozdělen, ztrácí strukturální integritu v místě rozdělení a následné spojení trvá delší dobu vlivem difuzního procesu řízeného Brownovým pohybem. V místě studeného spoje dochází ke ztrátě pevnosti a tím je to nejslabší místo na vstřikovaném výrobku a je nutno se zde vyhnout koncentraci napětí při používání, nebo fungování výrobku či součásti. Zvýšením teploty taveniny se zvyšuje pevnost v místě spojení taveninových proudů, protože při vyšší teplotě je intenzita tepelného pohybu vyšší a pohyb molekulárních řetězců v tomto místě rychlejší. Pro tento jev byl definován pojem „čas potřebný pro zapletení“ z anglického „reentanglement time.“

Čas potřebný pro zapletení říká, jak dlouho trvá spojení rozdělených taveninových proudů vzhledem k použitému materiálu a jeho molekulové hmotnosti. [27]

$$RT = 100 \cdot \lambda \quad (5)$$

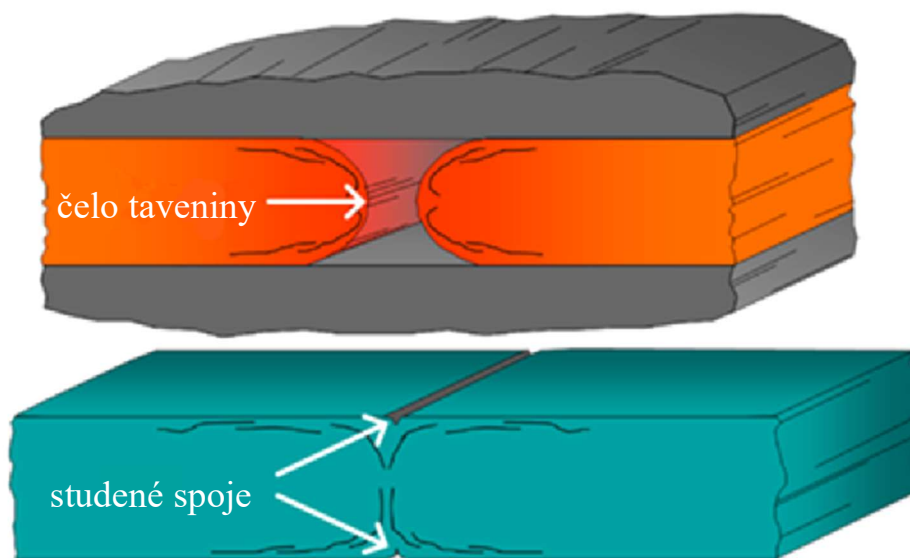
RT – reentanglement time (čas znovuzapletení)

λ – relaxační čas

Faktory způsobující snížení pevnosti v místě studeného spoje:

- nedostatečný čas pro zapletení makromolekulárních řetězců v místě spojení taveninových proudů,
- zamrznutí molekulární orientace řetězců,
- vruby tvaru V na hranici studeného spoje způsobené vzduchem, který je tlačěn taveninovými proudy a nemá kam uniknout při kolizi těchto proudů.

Vztah v rovnici (5), udává dobu potřebnou pro zapletení makromolekulárních řetězců tak, že studený spoj je stejně pevný, jako jiná místa na výrobku.



Obr. 6.: Čelní spojení taveninových proudů a vznik studeného spoje [28]

Effektivní techniky pro zvýšení pevnosti studeného spoje:

- tepelná úprava,
- vystavení rozpouštědлу,
- odstranění vrubu obráběním.

Například při vstřikování polystyrenu dochází k zapletení poměrně rychle za předpokladu, že je teplota nad T_g . V praxi to znamená, že čas pro zapletení je funkcí teploty taveniny a od doby vzniku studeného spoje je potřeba udržet teplotu taveniny nad T_g po dobu RT , aby se zajistilo co největší pevnosti studeného spoje. [27]

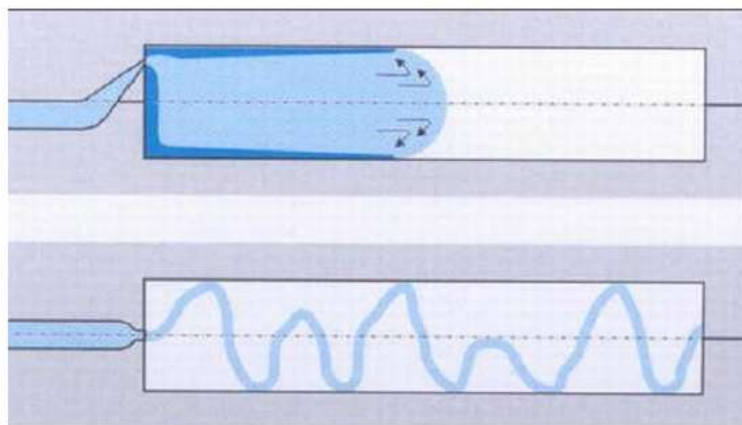
Pokud je tvarová dutina tvořena více vtoky, pak se čela taveniny spojují buď čelně, nebo tangenciálně. Čelní spojení dvou ochlazených čel tavenin je náchylnější na tvorbu pevnostně slabých míst v důsledku studeného spoje. [30]

1.4.3 Jetting

Na výrobku se může dále vyskytovat opakující se několika násobný studený spoj bez nutnosti obtékání překážky. Fenomén nazvaný tryskový tok (anglicky jetting). [27]

Tryskový tok je způsoben špatným plněním formy už od vtokového ústí. Tavenina má tendenci vytrysknout do dutiny formy bez toho, aniž by obtekla stěny okolo vtokového ústí. Výsledkem je plnění formy od konce, místo toho, aby se plnila plynule a hladce od vtokového ústí. Jetting může nastat, když se vtokové ústí nachází moc daleko od stěny formy a když je vstřikovací rychlost příliš velká. [27]

Odstranění tohoto jevu lze úpravou formy tak, že vtokové ústí je naproti bližší stěny, nebo zvětšením či modifikací vtokového ústí. [27]



Obr. 7.: Úprava polohy vtokového ústí k odstranění jevu Jetting [30]

1.5 Index toku taveniny (ITT)

Schopnost tečení taveniny je popsána indexem toku taveniny, označujícím se například: ITT, MI, MFI, MFR. Je definován jako hmotnost materiálu v gramech, které proteče danou

geometrií za 10 minut. ITT se stanovuje experimentálně, je důležitým popisem polymerního materiálu pro zpracování a je bodem tokových křivek. [5]

Metoda je popsána například normou ISO 1133. [6]

Nízká hodnota ITT znamená vysokou molekulovou hmotnost a vysoce viskózní polymer. Materiály ITT <1 se používají pro vytlačování fólií a některé fólie mohou mít dokonce ITT < 0,1. [5]

Pro vstřikování se hodnoty ITT obvykle pohybují v rozmezí $5-50 \frac{g}{10 \text{ min}}$. [5]

1.6 Carreau – Yasuda viskozitní model

Viskozitní modely popisují chování viskozity ve větším rozsahu rychlostí smykové deformace než mocninový zákon. Pro popis viskozity pro vstřikování je velmi často používán Carreau – Yasuda model:

$$\eta = \eta_0 \left(1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right)^{\frac{n-1}{a}} \quad (6)$$

η_0 – viskozita při nulovém smykovém napětí

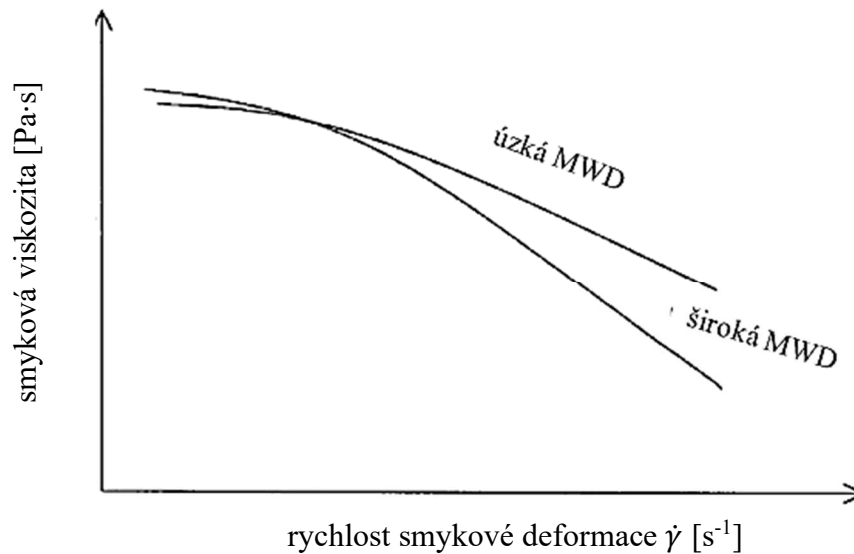
λ – relaxační čas

a – ostrost přechodu z newtonské do pseudoplastické oblasti

n – index neneutonského chování

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace

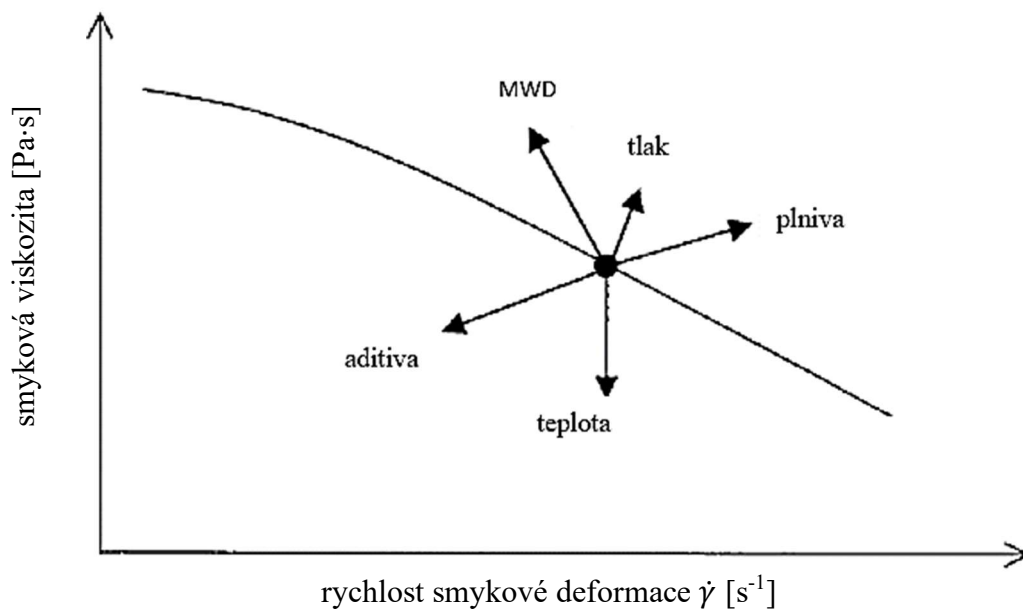
1.7 Vliv různých parametrů na viskozitu



Obr. 8.: Vliv distribuce molekulární hmotnosti (MWD) na viskozitu [5]

Polydisperzita je mírou různorodosti délek makromolekulárních řetězců, označuje se také jako distribuce molekulární hmotností MWD.

S větší polydisperzitou viskozita klesá rychleji s rostoucí rychlostí smykové deformace tzn. má – li polymer širokou distribuci molárních hmotností (různě dlouhé a krátké řetězce), klade vůči deformaci nižší odpor ve vyšších rychlostech smýkání. [5]

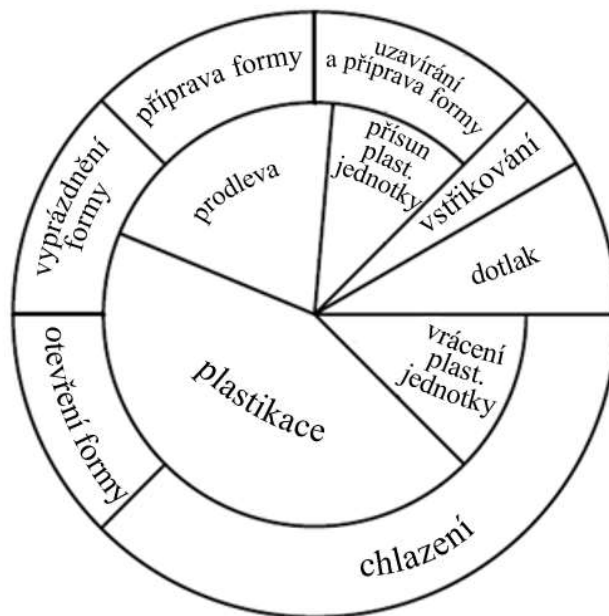


Obr. 9.: Vliv různých parametrů na viskozitu materiálu [5]

Na Obr. 9 lze vidět vliv různých parametrů ovlivňujících odpor materiálu vůči deformaci. Z grafu vyplývá, že pokud roste MWD, tlak, nebo přítomnost plniv v systému, roste i viskozita, a tedy odpor vůči zpracování. Při zvýšení teploty či přidání aditiv se viskozita snižuje a materiál se lépe deformuje, zpracovává. [5]

1.8 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus se skládá z několika postupných procesů.



Obr. 10.: Vstřikovací cyklus popsáný grafem [29]

1) Plnění a plastikace

Materiál ve formě prášku nebo granulátu je přiveden do násypky vstřikovacího stroje, kde je postupně zahříván do podoby viskózní taveniny. Před vstříknutím do dutiny formy má tavenina jednotné složení, hustotu, viskozitu a teplotu.

2) Vstřikování

Tavenina je pod vlivem vysokého tlaku přiváděna do dutiny formy vtokovým systémem a přes trysku vstřikovacího stroje.

3) Dotlak

Po určitém zaplnění dutiny formy následuje dotlak, kdy se šnek vstřikovacího stroje pohybuje pomalu dopředu a vyvíjí tlak na taveninu za účelem následného doplnění formy a snížením smrštění vstřikovaného výrobku.

4) Chlazení

Vstříknutý výrobek je chlazený v dutině formy, aby získal potřebnou tvrdost a tuhost a mohl být úspěšně vyhozen z formy vyhazovacím systémem.

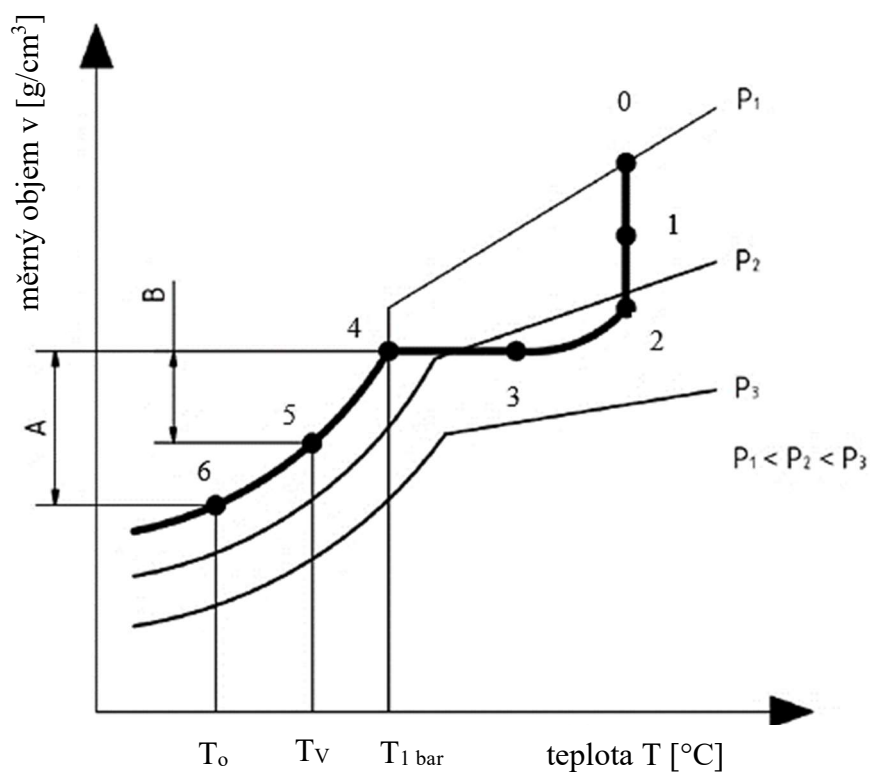
5) Vyhození z formy

Po dosažení vyhazovací teploty výrobku dostane vyhazovací systém výrobek z formy.

Ve vstřikovacím cyklu tvoří proces chlazení obvykle 70 až 80% času celého cyklu. Z experimentálních studií vyplývá, že 95% tepla odvedeného z formy je chladicím médiem temperačního systému. Tím pádem temperační systém má přímý dopad na kvalitu výrobku a celkovou výrobní efektivitu. Konstrukční návrh temperačního systému je tedy velmi podstatná část při navrhování vstřikovací formy. Cílem je dosáhnout jednotného teplotního pole na povrchu vstřikovaného výrobku a dosáhnout tak co nejnižšího smrštění a deformace a zároveň snížit čas procesu chlazení. [11]

1.9 PvT diagram

Vliv termodynamických přechodů v dutině formy popisuje pvT diagram. Zobrazuje kompresibilitu a tepelné chování, tj. změnu objemu v závislosti na tlaku a teplotě.



Obr. 11.: PvT diagram vstřikovacího cyklu [2][30]

P – tlak

v – měrný objem

T – teplota

Popis:

Bod 0 – tavenina je stlačena v plastikační komoře vstřikovacího stroje a za vstřikovacího tlaku se tavenina dopravuje do vtokového ústí na vstřikovaném dílu

Bod 0-1 – probíhá plnění dutiny formy, v bodě 1 je dutina objemově naplněna

Bod 1-2 – tavenina je v dutině formy stlačována, v bodě 2 dosahuje vnitřní tlak při optimálním procesu svého maxima

Bod 2 – změna ze vstřikovacího tlaku na dotlak

Bod 2-3 – dotlaková fáze – tavenina se chladí, tlak a objem se zmenšují, dotlak přivádí malý objem nové taveniny, aby vykompenzoval objemovou ztrátu vlivem smrštění

Bod 3 – zamrznutí vtokového ústí, zde už dotlak ztrácí smysl, jelikož přes zamrznutí vtokového ústí, není možné dodat další taveninu

Bod 3-4 – tlak klesá beze změny objemu v počátku, v bodě 4 dosahuje tlak v dutině atmosférického tlaku, povrch dílu se smršťuje a tím se oddělí od stěn dutiny formy

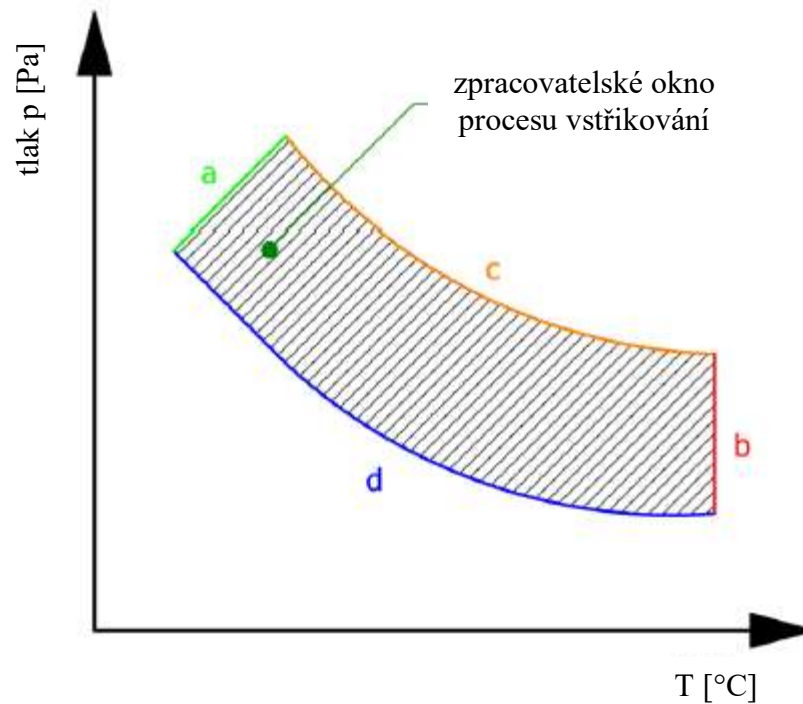
Bod 4-5 – za konstantního tlaku se vstřikovaný díl chladí, aby v bodě 5 mohl být vyhozen z formy.

Bod 5-6 – chlazení vstřikovaného dílu mimo formu [1]

1.10 Procesní okno – MAD

Molding Area Diagram (MAD) charakterizuje proces vstřikování pro zhotovení daného výrobku. Diagram je stanoven experimentálně, ovšem analýzy vstřikování mohou významně pomoci.

Diagram je sestaven zobrazením limitních faktorů:



Obr. 12.: Pracovní diagram vstřikovacího stroje [30]

- Úsečka A limituje spodní hranici teploty - charakterizuje zpracovatelské podmínky, při kterých je nízká teplota a dochází k rychlému ztuhnutí,
- úsečka B limituje horní hranici teploty – charakterizuje zpracovatelské podmínky, při kterých dochází k degradaci materiálu v důsledku vysoké teploty,
- úsečka C limituje horní hranici tlaku – charakterizuje zpracovatelské podmínky při kterých je tlak maximálně vysoký a může docházet k otevření formy,
- úsečka D limituje dolní hranici tlaku – charakterizuje zpracovatelské podmínky, při kterých je tlak nízký a může docházet k nedotečení do dutiny formy.

Tyto limitní úsečky dávají dohromady oblast, která zobrazuje zpracovatelské podmínky pro úspěšnou výrobu tvaru. [30]

2 TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM

Teplota vstřikovací formy, tj způsob a podmínky temperace jsou významným faktorem ovlivňujícím výrobní proces vstřikování plastů a jsou velmi významné na celkové efektivitě procesu. Temperační podmínky mají;

- přímý vliv na kvalitu vyráběných dílů,
- přímý vliv na jednotkové náklady vstřikovaného dílu,
- schopnost reprodukovat požadovaný a správný povrch,
- přímý vliv na velikost výrobního a dodatečného smrštění.

Požadované kvality výrobku lze v praxi dosáhnout správnou teplotou formy, vhodnou volbou temperačního prostředku a také konstrukcí temperačního systému. Kvalitou výrobku se rozumí jeho rozměrová přesnost, kvalita povrchu, dosažení požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností bez deformace. Kvalitou procesu se rozumí zkrácení doby vstřikovacího cyklu a optimální náklady na výrobu se zachováním kvality výrobku.

V praxi je třeba nalézt rovnováhu mezi ekonomickou částí výroby a konstrukčně optimalizovaným procesem, jelikož stav dosahující ideální kvality výrobku za dosažení ideálního procesu je ekonomicky náročnější a v některých případech může výrobu uvést do nerentabilního stavu.

Naopak levnější metody ne vždy poskytují adekvátní řešení z hlediska kvality výrobku a vyšší složitost výrobku, který požaduje složité tvary temperačního systému, zvyšuje náklady na výrobu.

Snahou je tedy najít takové konstrukční řešení, které dosáhne požadované kvality výrobku a příliš nezatíží výrobu ekonomicky již při menších sériích, což by vedlo ke zvýšení ceny výrobku a tím snížení jeho konkurenceschopnosti.

Úlohou temperačního systému formy je ustavit požadovanou teplotu dutiny formy v krátkém časovém okamžiku a udržet tuto teplotu v minimálním rozsahu. Temperace formy zahrnuje činnost odvodu tepla při chlazení výrobku tak, aby mohl být bez porušení vyhozen z formy, popřípadě také činnost zahřívání dutiny formy s cílem dosáhnout vhodné teploty pro plnění plastem. Teplota i její časový průběh ovlivňuje chování taveniny, resp. výrobku během výroby a také po vyhození z formy. Ovlivňuje tak výsledné vlastnosti, smrštění, kvalitu povrchu, velikost vnitřního napětí a u semikrystalických plastů také stupeň krystalinity, související s hmotností a hustotou výstřiku. Délka chlazení je tedy ovlivněna provedením

temperačního systému a typem vstřikovaného materiálu. V materiálovém listu lze najít doporučenou teplotu taveniny, formy a teplotu pro odformování, což jsou v analýze jedny ze základních vstupních parametrů. [10]

Tab. 1.: Doporučené teploty pro vybrané materiály [9]

Materiál	Doporučená teplota formy [°C]	Teplota taveniny [°C]	Doporučená teplota dílu při odformování [°C]
PA	80 - 120	260 - 300	110 - 130
PC	80 - 100	280 - 320	140
ABS	60 - 80	220 - 260	80 - 100
SAN	50 - 80	230 - 260	80 - 95
PBT	80 - 100	250 - 270	140
PP	30 - 60	200 - 250	70 - 90
PE	30 - 60	180 - 230	60 - 90

2.1 Odvod tepla a požadavky temperačního systému

Přenos tepla z taveniny do dutiny vstřikovací formy je závislý na tepelné vodivosti materiálu použitého při výrobě dílů formy. Materiály, jako např. měď a její slitiny mají mnohonásobně vyšší tepelnou vodivost než oceli a jsou tedy schopné odvést teplo mnohonásobně rychleji. Pro přenos tepla je nutný teplotní gradient, což prakticky znamená, že rychlost přenosu tepla může být zvýšena umístěním temperačních kanálů blíže k povrchu dutiny formy. Ovšem investice spojená s použitím vysoce tepelně vodivých materiálů nemusí být vždy efektivním řešením. Důvodem je, že přenos tepla není tak limitován vedením tepla formou, ale zejména nízkou tepelnou vodivostí plastu a omezenou schopností temperačního média pojmout určité množství tepla. Použití vysoce tepelně vodivých materiálů je v některých případech efektivní a také jejich obrábění je relativně snadné, nelze ale říct, že jsou univerzálně nejlepším řešením. Složitější systémy temperačních kanálů vyžadují složitější metody obrábění, složitější postupy, těsnění a údržbu. Konstrukční volbou tedy zůstává, zda je investice do komplexnějšího a dražšího systému efektivní, anebo zda dostačuje pro danou aplikaci jednodušší řešení. [10]

Při návrhu temperačního systému je významným aspektem vztah s ostatními komponenty formy a je potřeba zohlednit umístění vůči vyhazovačům, pohyblivým jádrům apod. Prvotní návrh tedy tvoří kompromis mezi ideálním počtem a pozicí pro umístění kanálů. Čím je více

temperačních kanálů přiléhajících dutině formy, tím je vyšší temperační účinek, ale menší prostor pro umístění vyhazovačů, vtoků, či dalších komponentů vstřikovací formy. Menší průměry kanálů v tomto smyslu nezabírají tolik místa, ovšem jsou složitější na výrobu a temperační účinek je dosahován vyšším počtem těchto kanálů. Výhodou temperačních kanálů s menším průměrem je rovnoměrné rozložení teplot dutiny vstřikovací formy.

Přítomnost temperačních kanálů snižuje mechanickou únosnost formy, která je značně namáhána vysokým tlakem taveniny při vstřikování a dotlaku jelikož každý temperační kanál vznikne odebráním materiálu daného dílu formy a kanál tak působí jako koncentrátor napětí. Tento aspekt je významnější u forem plněných velmi vysokým vstřikovacím tlakem, což se týká zejména tenkostěnných vstřikovaných dílů s tloušťkou stěny do 0,6 mm.

Namáhání formy je cyklické, což dále zvyšuje požadavky na maximální únosnost dílů vstřikovací formy a odolnost proti únavě materiálu a vzniku únavových lomů.

Temperační systém musí být dále navržen tak, aby byl do provozu zapojitelný co možná nejintuitivněji a nejjednodušeji. To znamená adekvátní počet připojení a jasné označení. [10]

2.1.1 Temperační jednotka

Kontrola chlazení a vyhřívání v uzavřeném okruhu zajišťují temperační přístroje s čerpadly s možností regulace výkonu. Výkon čerpadla musí být dostatečný k zajištění turbulentního proudění vody v kanálech vstřikovací formy [1]

Vodní temperační systém je při teplotách do 95°C beztlakový, anebo při teplotách do 400°C přetlakový. [1]

2.1.2 Temperační médium

Jako teplonosné médium se používá voda, vzduch, olej, glykoly nebo pára. Tato temperační média proudí vytvořenými kanály ve formě. Dle potřeby temperují obě části formy (pohyblivou i nepohyblivou). [34]

2.1.3 Výpočet chladicího času podle parametrů temperačního systému

Délka chladicího cyklu závisí na tloušťce vstřikovaného výrobku, materiálových vlastnostech a na procesních podmínkách. [2]

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) \right] \quad (7)$$

s – tloušťka

T_M – teplota tání

T_W – průměrná teplota formy

T_E – vyhazovací teplota

a – tepelná difuzivita polymeru

$$a = \frac{k_p}{\rho c_p} \quad (8)$$

ρ – hustota polymeru

k_p – tepelná vodivost polymeru

c_p – měrná tepelná kapacita

Teplota tání a teplota pro vyhození závisí na tepelných vlastnostech vstřikovaného materiálu a lze vyčíst z materiálového listu. Teplota formy i vyhazovací teplota jsou doporučené hodnoty dodavatelem materiálu. Tedy T_M a T_E jsou dané veličiny a tím tedy T_W je závislá na geometrii a uspořádání chladících kanálů a na teplotě chladícího média.

K určení vztahu mezi chladícím časem a parametry chladícího systému se uvažuje tepelná rovnováha ve formě. Teplo přidané z polymeru se musí rovnat teplu odebranému chladící kapalinou (tepelná výměna s okolím je zanedbána). [1]

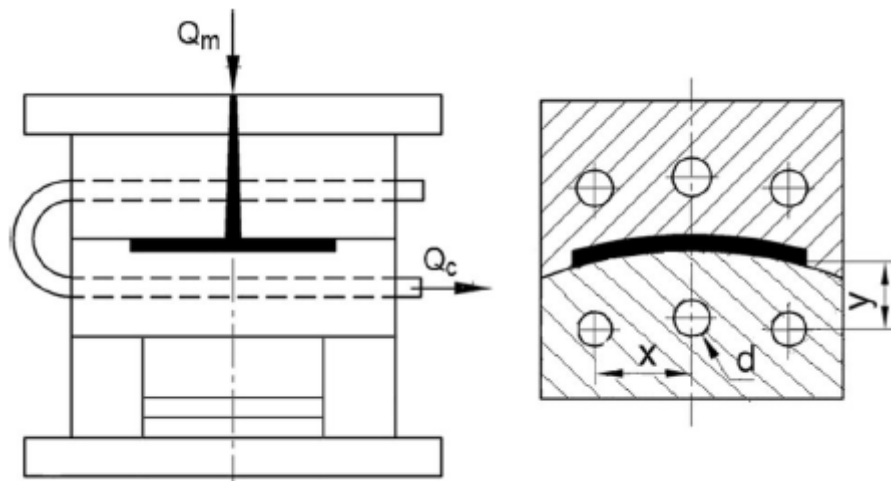
$$\dot{Q}_M + \dot{Q}_C = 0 \quad (9)$$

Tepelný tok \dot{Q}_M z plastu do chladícího média lze vypočítat dle [1]:

$$\dot{Q}_M = 10^{-3} [c_p(T_M - T_E) + i_m] \rho \frac{s}{2} x \quad (10)$$

i_m – latentní teplo

x – vzdálenost mezi chladícími kanály



Obr. 13.: Model tepelného toku (vlevo) a schéma chladicího systému ve formě (vpravo) [2]

Tepelný tok \dot{Q}_c chladicího média lze vypočítat dle:

$$\dot{Q}_c = 10^{-3} t_c \left(\frac{1}{10^{-3} \alpha x d} + \frac{1}{k_{st} S_e} \right)^{-1} (T_W - T_c) \quad (11)$$

k_{st} – tepelná vodivost materiálu formy

d – průměr chladicího kanálu

S_e – geometrický faktor tvaru

T_c – teplota chladicího média

Vliv pozice chladicího kanálu na tepelnou vodivost je zohledněna ve tvarovém faktoru [2]:

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln \left[\frac{2x \sinh \left(2\pi \frac{y}{x} \right)}{\pi d} \right]} \quad (12)$$

y – vzdálenost od středu kanálu k povrchu formy

Součinitel přestupu tepla chladicího média je spočítán ze vztahu:

$$\alpha = \frac{31,395}{d} Re^{0,8} \quad (13)$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = u \frac{d}{\nu} \quad (14)$$

u – rychlost proudění chladícího média

ν – kinematická viskozita

Kombinací rovnic (7) až (14) lze odvodit následující rovnici [2]:

$$\frac{[c_p(T_M - T_E) + i_m]\rho \frac{s}{2} x}{T_W - T_C} \left\{ \frac{1}{2\pi k_{st}} \ln \left[\frac{2x \sinh\left(2\pi \frac{y}{x}\right)}{\pi d} \right] + \frac{1}{0,0319\pi Re^{0,8}} \right\} \quad (15)$$

$$= \frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) \right]$$

V rovnici (15) lze nalézt tři geometrické parametry: x , y a d . Rovnice se třemi neznámými skrývá nekonečně mnoho řešení. Ke snížení počtu proměnných se zavádí následující omezení [2]:

$$x = \beta_1 d$$

$$y = \beta_2 d$$

Kde:

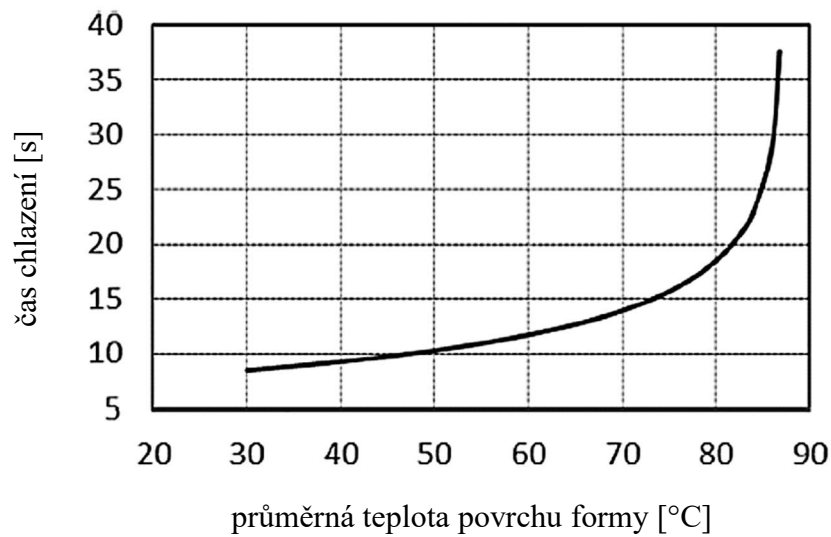
$$2 \leq \beta_1 \leq 5$$

$$1 \leq \beta_2 \leq 5$$

Rovnice (15) je ukázkou analytické metody, kterou lze použít při návrhu chladících kanálů ve vstřikovací formě. [2]

2.1.4 Topologická optimalizace chladících kanálů

Hlavním faktorem, který zohledňuje efektivitu použití konformního chlazení vyráběného technologií 3D tisku, je procentuální vyjádření úspory času vůči konvenčně zhotoveným chladícím systémům. [2]



Obr. 14.: Příklad závislosti chladicího času na teplotě formy [2]

Graf zobrazuje, že chladicí čas se zvyšuje exponenciálně s teplotou formy. Z toho vyplývá, že pokud je teplota formy vysoká, je vysoký i potenciál pro zkrácení doby chlazení. A opačně jinými slovy, pokud je teplota formy nízká, procento zkrácení chladicího času bude nízké.

Příklad:

Předpokládejme, že teplota formy je cca 84°C a chlazení je konvenčně přímými vyvrtanými kanály. Vyhazovací teplota je 87°C, tloušťka výrobku je 2,5 mm a teplota taveniny $T_M = 240^\circ\text{C}$. Materiál je polypropylén s měrnou tepelnou kapacitou $1454 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}}$ a tepelnou vodivostí $0,168 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot^\circ\text{C}}$.

V tomto případě je ideální čas chlazení 23 s.

Pokud teplota formy klesne na 44°C, čas chlazení klesne na 10 s, čímž je procento zkrácení chladicího času přibližně 56,5%.

Chladicí čas lze redukovat na minimum za předpokladu, že se povede ochladit povrch formy na spodní hranici hodnot doporučených pro teplotu formy. Ovšem pokud je teplota formy příliš nízká a teplota chlazení vysoká, lze předpokládat vysoké reziduální napětí a nedotečená místa ve vstřikovaném výrobku. [2]

2.1.5 Metoda optimalizace konformního chlazení ve vstřikovací formě

Při optimalizaci temperačního systému je cílem minimalizovat čas chlazení a teplotní deviaci ve formě. Pokud není teplotní pole ve formě rovnoměrně distribuováno, lze očekávat různé smrštění vstřikovaného výrobku a prodloužení chladicího času. Avšak pro daný výrobek dané tloušťky a procesních podmínek závisí chladicí čas pouze na teplotě formy. Tudíž minimalizace chladicího času je zároveň snaha o udržení teploty formy na co nejnižší hodnotě konstantně a zároveň udržení minimální deviace teplotního pole.

K navržení konformního systému chlazení lze pro odhad použít rovnice v sekci 2.1.3, avšak konformní kanály jsou komplexnější z hlediska geometrie a přestupu tepla, tudíž se používá simulací metody konečných prvků (FEM). Cílem těchto simulací je strategickými změnami geometrických parametrů chladicích kanálů dosáhnout výsledku nejmenší teplotní deviace formy. [2]

Distribuce teploty ve formě lze modelovat rovnicí:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (16)$$

Parciální diferenciální rovnici (16) lze řešit metodou konečných prvků.

Na hranici polymeru a formy je zavedena konvekční okrajová podmínka což předpokládá, že teplo vstupující z polymeru do formy musí být stejné jako teplo přijaté formou konvekčně ve stejném směru.

$$h_c [T_{ps} - T_M] = -k_p \frac{\partial T}{\partial z} \quad (17)$$

h_c – koeficient přestupu tepla na rozhraní formy a polymeru

T_{ps} – teplota povrchu vstřikovaného výrobku

Tepelný tok na rozhraní polymeru a formy je zapsán:

$$q = -k_p \frac{\partial T}{\partial n} \quad (18)$$

n – normálový vektor povrchu

Průměrovaný cyklus tepelného toku:

$$\bar{q} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} q dt \quad (19)$$

Kde t_c je čas chlazení z rovnice (7) v sekci 2.1.3. [2]

2.2 Konstrukce temperačních systémů

Temperační systém se skládá z následujících částí:

- temperační a řídicí jednotka,
- temperační kanály,
- spojovací prvky,
- temperační médium.

2.2.1 Vrtané kanály

Doporučené umístění temperačních kanálů vzhledem k povrchu dutiny formy a ve vztahu k tloušťce stěny vstřikovaného dílu je uvedeno v tabulce. Výsledné řešení spočívá v kompromisu mezi doporučenými rozměry a reálnými podmínkami formy dané například umístěním vyhazovačů, vtoků apod. [4] [10]

Tab. 2.: Doporučené rozměry temperačního kanálu [10]

Tloušťka stěny vstřikovaného dílu [mm]	Vzdálenost osy temperačního kanálu od dutiny vstřikovací formy [mm]	Vzájemná vzdálenost os sousedních temperačních kanálů [mm]	Průměr temperačního kanálu [mm]
0-1	10-14	10-12	5-6
1-2	10-20	12-16	6-8
2-4	20-25	16-22	8-10
4-6	25-35	22-28	10-12
6-8	32-42	28-36	12-16
8-12	42-55	36-50	16-20

Případy, které nedovolují osazení standardními temperačními kanály:

- vstřikovací forma určená k výrobě jednostranně dutých výrobků s poměrem hloubka:průměr větším než 3:4,

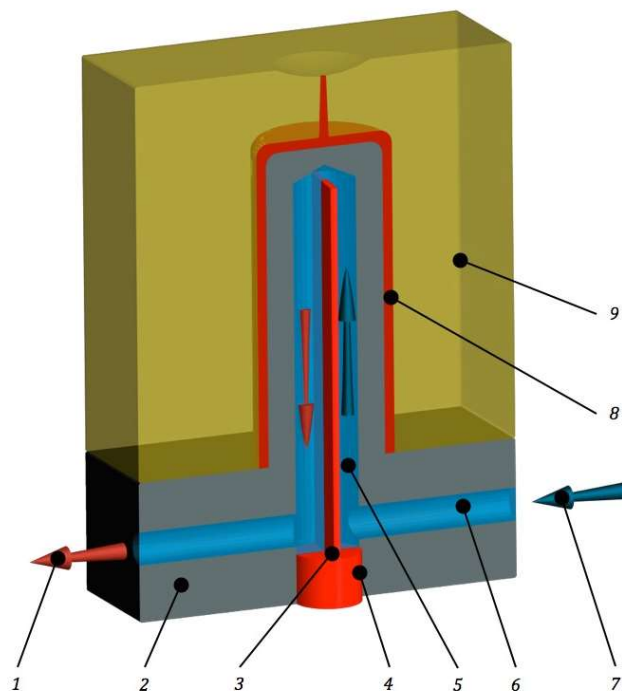
- výrobky s žebrováním, kde jednotlivá žebra jsou od sebe vzdálena méně než trojnásobek tloušťky stěny, na kterou žebra přiléhají,
- výrobky, kde lze najít kombinaci zmíněných konstrukčních prvků.

Vnitřní tvar takovými typům nejčastěji dávají dlouhé a úzké tvarové části. Tavenina vstřikována pod vysokým tlakem a rychlostí je příčinou ohybového a smykového namáhání tvárníku – jádra a zvětšující se poměr mezi podélným a příčným průřezem tvárníku zvyšuje nároky na pevnost. Pevnost nejčastěji používaných nástrojových ocelí je tedy limitujícím faktorem pro minimální rozměry tvarových částí formy. Přirozený odvod tepla prostým sdílením z takovýchto typů tvárníků by znamenal několikanásobné prodloužení výrobního cyklu a dosahovaná kvalita výrobků by byla neopakovatelná či nedostačující. Proto se tvárníky osazují nejrůznějšími temperačními prostředky, pomocí kterých lze nejen zrychlit odvod tepla, ale i zajistit kontrolu nad teplotním polem. [4] [10]

2.2.2 Systém ploché přepážky - Baffle

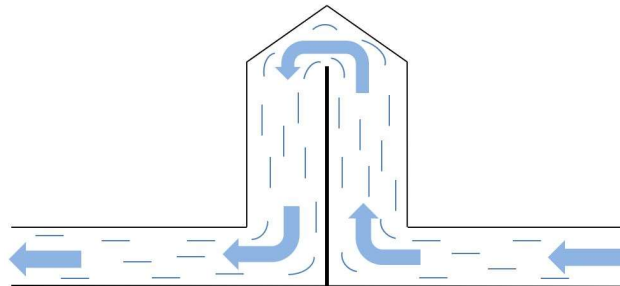
Přepážka je umístěna do vedlejšího vrtaného temperačního kanálu, který je veden kolmo k hlavnímu temperačnímu kanálu. Přepážka potom vytváří další dva kanály půlkruhového průřezu.

Nevýhodou přepážkové metody je vysoký nárok na přesnost uložení přepážky tak, aby byl průřez vedlejšího kanálu rozdělen přesně v polovině. Při nedodržení této podmínky dochází k rozdílnému temperačnímu efektu a tím pádem k rozdílné distribuci tepla ve tvárníku. Méně významnou nevýhodou je, že se zvětšující se délkou přepážky se postupně zvyšuje teplota temperačního média směrem od vstupu k výstupu. Výhodou tohoto systému je konstrukční jednoduchost a jedná se o často využívaný systém tam, kde nejsou kladeny příliš velké nároky na rozměrové přesnosti. Přepážka je obvykle nakupovaným dílem, který je uložen pomocí závitů v příslušném dílu formy, nebo se dá také ukotvit mezi dvě desky tvořící těleso formy a opatřit těsníci pryžovými „O“ kroužky. [4] [10]



Obr. 15.: Systém plochých přepážek a princip funkce [4]

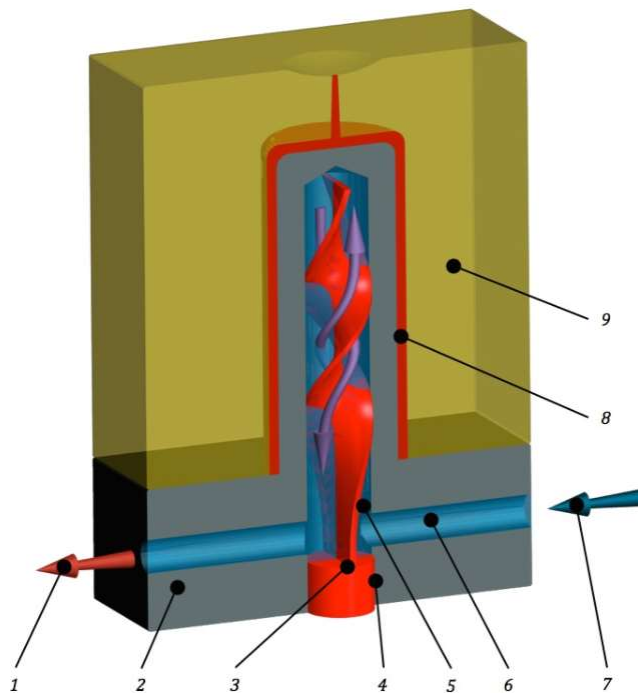
- 1 – výstup temperačního média; 2 – těleso pohyblivé části vstřikovací formy;
 3 – plochá/spirálová přepážka; 4 – úložná plocha přímé přepážky; 5- vedlejší temperační kanál;
 6 – hlavní temperační kanál; 7 – vstup temperačního média; 8 – vstřikovaný díl;
 9 – těleso pevné části vstřikovací formy.



Obr. 16.: Schématické znázornění funkce přepážky – Baffle [4]

2.2.3 Systém spirálové přepážky – Spiral Baffle

Systém spirálových přepážek funguje na stejném principu, ale vedlejší temperační kanál je rozdělen na dva závity. Na konci přepážky změni proud temperačního média svůj směr a pokračuje druhým závitem zpět do hlavního temperačního kanálu. Použitím spirálové přepážky je dosaženo takřka homogenního teplotního pole v přilehlé oblasti temperované tímto systémem. Limitujícím faktorem je rozměr vedlejšího temperačního kanálu a výrobci doporučují nevolit systém s menším průměrem, než je 6 mm. [4] [10]

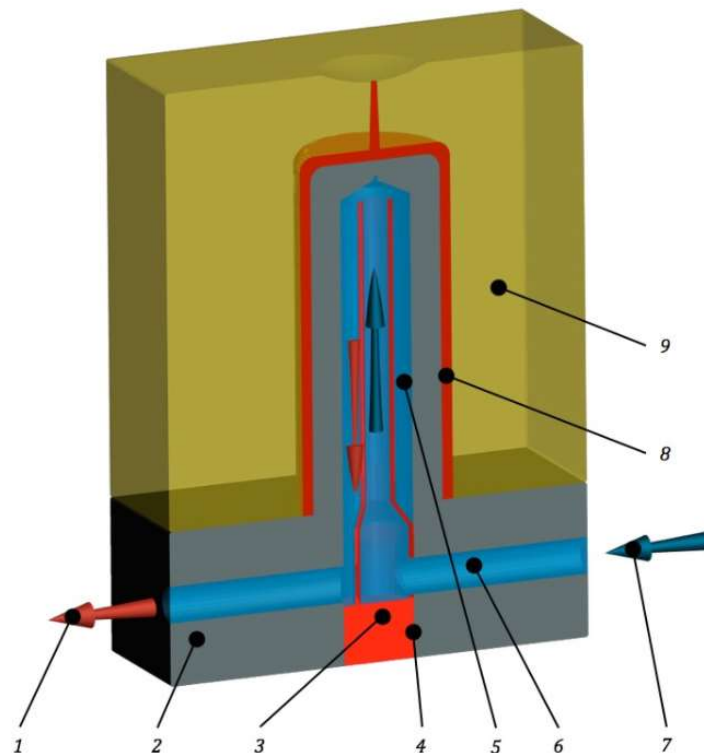


Obr. 17.: Systém spirálových přepážek a princip funkce [4]

- 1 – výstup temperačního média; 2 – těleso pohyblivé části vstřikovací formy;
 3 – spirálová přepážka; 4 – úložná plocha spirálové přepážky; 5- vedlejší temperační kanál;
 6 – hlavní temperační kanál; 7 – vstup temperačního média; 8 – vstříkovaný díl;
 9 – těleso pevné části vstřikovací formy

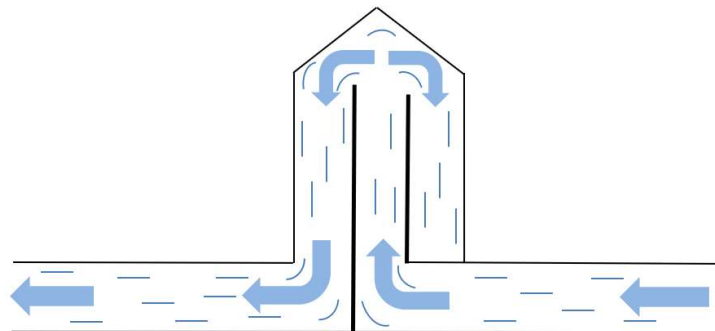
2.2.4 Systém fontánové přepážky – Bubbler

Fontánka je druh přepážky umístěný do vedlejšího temperačního kanálu stejně jako předchozí typy. Přepážka je zde tvořena malou trubičkou, kde jedním koncem vstupuje temperační médium a na konci vedlejšího temperačního kanálu médium změni směr proudění a zpět proudí po stěnách do hlavního temperačního kanálu. [4] [10]



Obr. 18.: Systém fontánek a princip funkce [4]

- 1 – výstup temperačního média; 2 – těleso pohyblivé části vstřikovací formy; 3 – fontánová přepážka; 4 – úložná plocha spirálové přepážky; 5- vedlejší temperační kanál;
6 – hlavní temperační kanál; 7 – vstup temperačního média; 8 – vstřikovaný díl;
9 – těleso pevné části vstřikovací formy



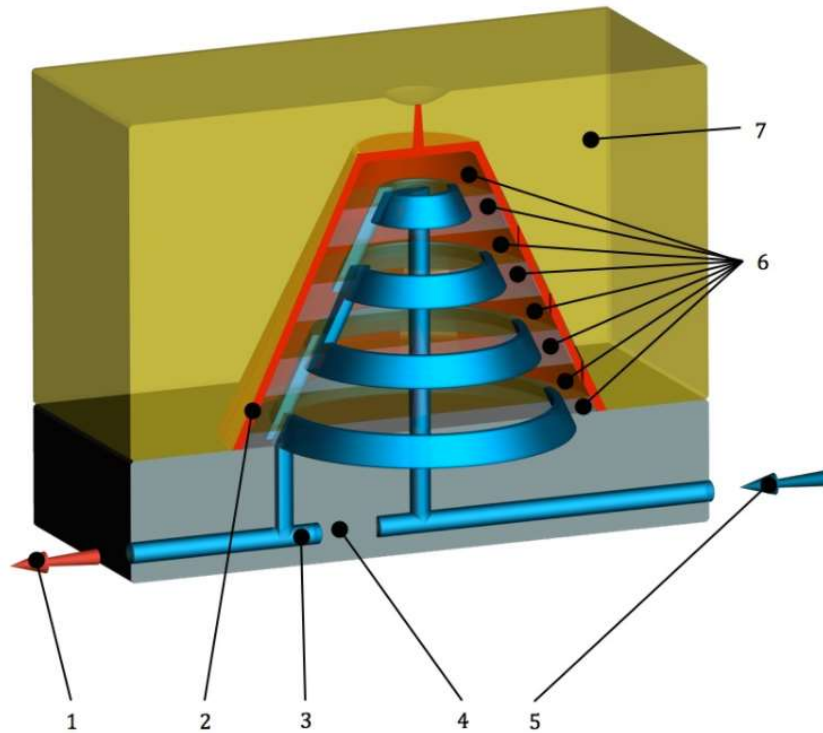
Obr. 19.: Schématické znázornění funkce fontánky [4]

2.2.5 Temperační systém Contura

Princip temperace systémem Contura je přesné kopírování tvaru výrobku temperačními kanály v určité vzdálenosti od povrchu. Tvárník je rozdělen na několik vrstev, na jejichž stykových plochách jsou následně, nejčastěji frézováním, vytvořeny temperační kanály. Tyto vrstvy jsou pak spojeny zpět k sobě pájením na tvrdo, dle původního tvaru tvárníku.

Před uvedením do provozu je nutno zařadit dokončovací metody k vyhlazení vzniklého tvárníku (leštění, broušení). [4] [10]

Druhou možností výroby tohoto typu temperačního systému je technologií 3D tisku založené na laserové sintraci kovu. [4] [10]



Obr. 20.: Systém Contura a princip funkce [4]

- 1 – výstup temperačního média; 2 – vstřikovaný díl; 3 – temperační kanál;
 4 – těleso pohyblivé části vstřikovací formy; 5 – vstup teplotnosného média;
 6 – jednotlivé vrstvy pohyblivé části formy; 7 – těleso pevné části vstřikovací formy

Výhodou systému Contura je rovnoměrné rozložení teplotního pole i v případě složitějších tvarů, což umožňuje odstranění problému vyskytujících se u tohoto typu výrobků (smrštění, deformace). [4] [10]

Nevýhodou jsou náklady na výrobu, a to jak metodou 3D tisku, tak metodou tvrdého pájení a proto se s použitím této metody lze setkat při výrobě větších sérií nebo speciální výrobě s vysokým nárokem na kvalitu výrobku. [4] [10]

2.2.6 Konformní chlazení

Pomocí konformního chlazení je prakticky možné se dostat chladícími kanály do míst kde by to jinak nebylo možné. [11]

Konformní systém chlazení přesně kopíruje jakýkoliv tvar výrobku, aby bylo docíleno co nejlepšího odvodu tepla. Vzdálenost pro vedení tepla je o dost menší oproti klasickým vrtaným kanálům. [11]

Technologie konformního chlazení vykazuje nejefektivnější výsledky z pohledu vedení tepla v porovnání s tradičními metodami. Nejpodstatnější výhodou použití této technologie je snížení smrštění, nebo deformace, snížení času potřebného pro chlazení vstříkovaného výrobku a rovnoměrnost teplotního pole. [11]

Výroba tohoto typu chlazení je realizována pomocí technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS), kde principem 3D tisku je vytvořen libovolný typ kanálů. [11]



Obr. 21.: Příklady aplikace konformního chlazení [12]

Při návrhu konformního chlazení se rozhoduje pro několik parametrů výrobku. Tvar, velikost a tloušťka stěn (velmi často se tloušťka nachází v rozmezí do 6 mm). Konstrukční volba se týká vzdálenosti od středu kanálu k povrchu formy, vzdálenosti mezi chladícími kanály a tvaru průřezu kanálu. Různé tvary, tloušťky stěn a velikosti výrobku vyžadují jiné parametry optimálního konformního kanálu, proto se výrobek a technologie důsledně testuje v CAE analýzách před zadáním tvářicího nástroje do výroby. Studie napovídají že nejefektivnější průřez chladícího kanálu je obdélník. [32]

Po návržení systému konformního chlazení je potřeba zkontrolovat formu na pevnost. Očekává se, že strukturní pevnost formy bude při volbě konformního systému chlazení nižší, kvůli většímu volnému prostoru v tělese oproti přímým, vrtaným kanálům. [32]

Formu je tedy potřeba analyzovat pro predikci deformací a distribuci napětí Von Mises. Pokud je maximální Von Mises pod limitní hranicí meze kluzu materiálu formy, forma se považuje za stabilní a funkční. [32]

Forma se podrobuje jak strukturální, tak termální analýze pro predikci chování formy pod zatížením za pomoci simulačních technik v software. [32]

3 VÝROBA NÁSTROJŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ S KONFORMNÍM CHLAZENÍM

3.1 Aditivní technologie Rapid Prototyping

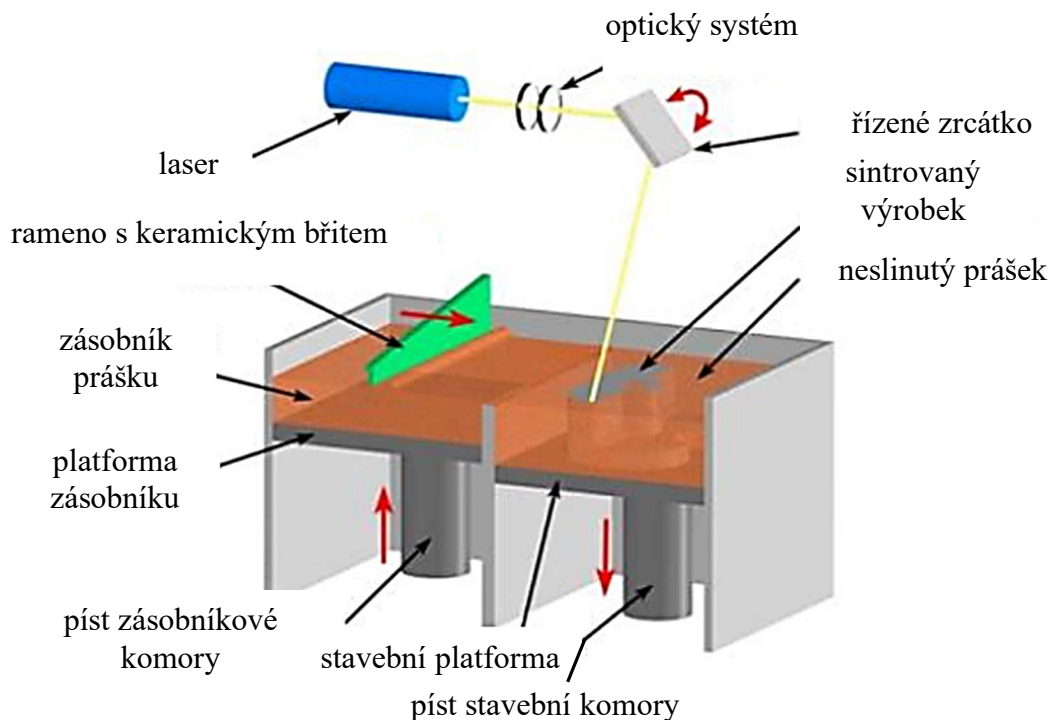
Rapid prototyping je metoda výroby modelů, prototypů a komponentů přímo na základě 3D dat z CAD. RP se rozšířilo v roce 1986, kdy americká společnost 3D systems představila technologii stereolitografie. Od té doby lze vytvářet modely z pryskyřice, termoplastu, vosku i kovového prášku vzhledem k oblasti použití a typu technologie.

Volba vhodné technologie pro RP závisí na požadavcích na výsledné vlastnosti výrobku. [3]

3.2 Direct Metal Laser Sintering

Díky technologii DMLS je spousta možností, jak navrhnout temperační systém. Právě touto technologií lze dosáhnout efektivnějších chladících soustav, než je běžné. [12]

Technologie DMLS umožňuje výrobu tvarových částí s konformním chlazením přímo z 3D CAD dat. Je založena na postupném tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laseru. Omezení je dáno pracovním prostorem daného zařízení, obvykle 250x250x320 mm, tloušťka vrstvy 0,02 – 0,05 mm a výkon laseru 200/400 W. [12]



Obr. 22.: Schéma principu DMLS technologie [3]

Použití technologie DMLS začíná stejně jako u jiných aditivních technologií. CAD model je v příslušném software vertikálně rozdělen na 2D plochy a pro ty je pak naprogramována cesta spékána laserem. Tato metoda je nazvána Slicování. [3]

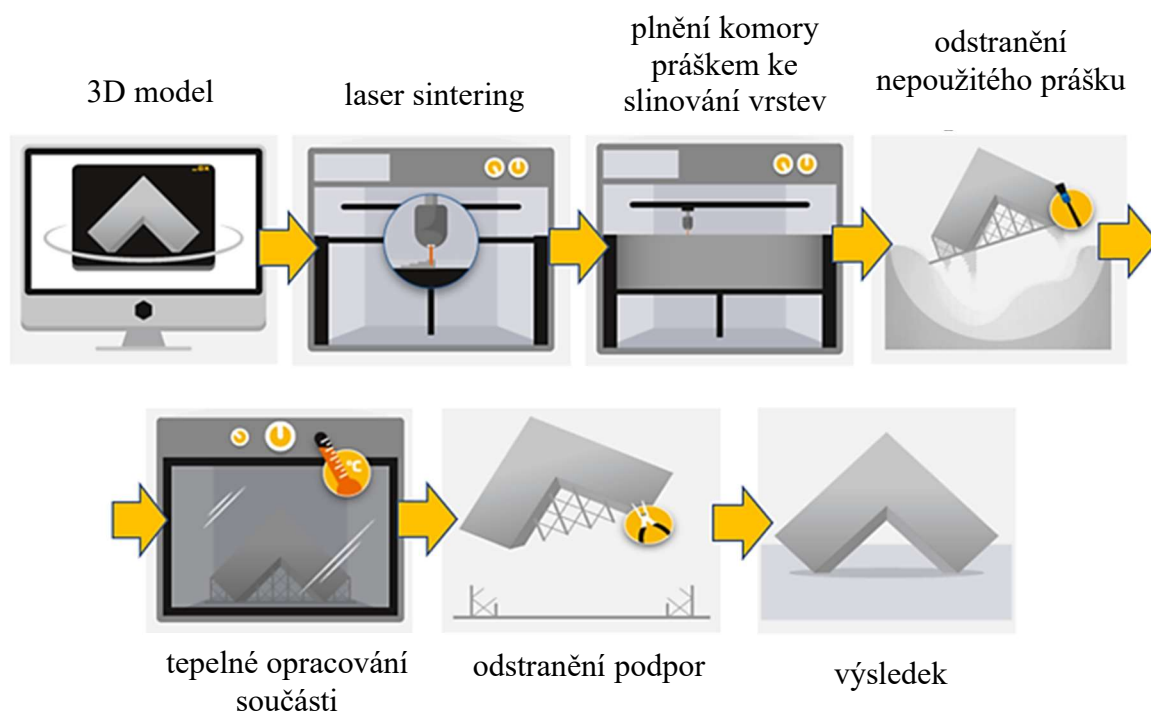
Dále se díl staví dle schématu na Obr. 22. Laser vytvoří vrstvu dílu na základě dat a píst stavební komory se posune dolů, píst zásobníkové komory se posune nahoru a rameno přisune potřebné množství kovového prášku tak, aby byla vytvořena souvislá hladina prášku pro další spékání vrstvy dílu. [3]

V průběhu stavby dílu je nutno správně fixovat polohu dílu pomocí podpor. Podpory vzniklé souběžně s výrobkem slouží zároveň pro odvod tepla, takže roztavený kov tuhne velmi rychle. [15]

Po dokončení tisku následuje odstranění podpor a různé dokončovací operace či tepelné a povrchové úpravy. [3]

Zbytek kovového prášku po výrobě lze bez problému znovu použít, což dělá tuto technologii nejen efektivní, ale i ekologickou. [3]

Vznik součásti technologií DMLS:



Obr. 23.: Postupné zobrazení vzniku součásti technologií DMLS [16]

3.2.1 Oblasti použití

Aditivní technologie DMLS má dnes široké uplatnění v prototypní výrobě, automobilním, leteckém i vesmírném průmyslu, elektronice, zdravotnictví, výrobě speciálních nástrojů a mnoho dalších. [3]

V oblasti vstřikovacích forem lze DMLS použít při výrobě složitých tvarových částí, ale hlavně je využívána pro tvorbu chladících kanálů libovolného tvaru, za účelem zlepšení odvodu tepla z dutiny formy. [3]

Tato technologie je relativně mladá (vznik 1995) a její potenciál ještě nebyl zcela prověřen. Stroje jsou schopny tisknout stále rychleji a škála použitelných materiálů se také stále rozšiřuje, což zvyšuje možnosti pro aplikaci této technologie. [3]

3.3 Materiálová kompatibilita

Materiály, které lze tisknout zpravidla vychází od doporučení výrobce 3D tiskárny.

Příklady výrobců 3D tiskáren pro technologii Direct Metal Laser Sintering:

- EOS
- Markforged
- DMG Mori
- SLM solutions
- Trumpf

Přehled materiálů:

- Hliníkové slitiny
- Chromové slitiny
- Martenzitické oceli
- Niklové slitiny
- Nerezové oceli
- Titanové prášky

U jednotlivých materiálů jsou dále popsány některé jejich typické vlastnosti a tiskové podmínky v tabulkách, hodnoty jsou orientační a závisí na přípravě vzorku, použité tiskárně, a tedy výrobcí zakázky. Tvrdost je udávána před tepelným zpracováním.

3.3.1 Direct Metal 20

Velmi jemný prášek na bázi bronzu s označením DM20. Tento materiál je speciálně vyvinut pro technologii DMLS. Výhodou je rychlá stavba materiálu a snadné dokončení povrchu. Výsledný díl má dobré mechanické vlastnosti s výborným rozlišením detailu a kvalitou povrchu. [8]

Tento materiál je typicky používán pro vstříkovací formy a jádra pro série dosahující až desítky tisíc kusů a pro funkční kovové prototypy. [8]

Tvrdość v *Tab. 3* je uvedena po laser sinteringu, následným tepelným zpracováním lze dosáhnout tvrdość větší než 2000 HV. [8]

3.3.2 Aluminum AlSi10Mg

Jedná se o typickou slitinu s dobrou zpracovatelností. Často se používá pro tenkostěnné součásti a složité geometrie. Nabízí dobré mechanické vlastnosti, pevnost, tvrdość i odolnost vůči dynamickému namáhání – lze využít pro velmi namáhané prvky. Tento materiál je skvělý pro užití v prostředí, kde se vyžadují dobré tepelné vlastnosti a nízká hmotnost. [17]

3.3.3 Cobalt Chrome MP1

Tento typ slitiny je používán pro jeho vysokou teplotní odolnost ve zdravotnictví, biomedicíně, v leteckém a kosmickém průmyslu.

Výrobky z Cobalt Chrome MP1 (CoCrMo) mají skvělé mechanické vlastnosti, korozivzdornost, ořezvzdornost a teplotní odolnost. [18]

3.3.4 Maraging Steel MS1

Výrobky z vysokopevnostní oceli Maraging Steel MS1 s martenzitickou mikrostrukturou jsou známé pro svou vysokou pevnost, houževnatost, rozměrovou stabilitu a lze je dobře svařovat. Pro tyto vlastnosti nachází tento materiál široké užití ve strojním a průmyslovém inženýrství, kde se vyžadují vysoké nároky na výkonost materiálu. [19] [26]

Používá se na výrobky pro letecký a kosmický průmysl, součásti do závodních aut, odlitky pro raketové motory, sklíčovadla.

Nízký obsah uhlíku snižuje riziko neočekávaného selhání součásti prasknutím, čímž představuje materiál Maraging Steel MS1 alternativu nástrojovým ocelím a zároveň vysoký obsah niklu snižuje náchylnost ke korozi. [19]

3.3.5 Nickel Alloy IN718

Ve slitině Nickel Alloy IN718 je značný přídavek množství niobu, molybdenu, hliníku a titanu, čímž má slitina extrémně vysokou pevnost a dobrou korozní odolnost. [21]

Aplikace pro součásti plynových turbín, součásti raketových motorů, pružiny, montážní prvky, kryogenní nádrže, čerpadla a ventily, nástrojové vybavení. [21]

3.3.6 Stainless Steel GP1

Tento typ oceli také disponuje vlastnostmi jako korozní odolnost a dobré mechanické vlastnosti. Odlišuje se vysokou houževnatostí při zpracování laserem.

Materiál je ideální pro malosériovou výrobu, kovové prototypy, zakázkové díly. [22]

3.3.7 Stainless Steel PH1

Ocel používaná v inženýrských aplikacích vyžadující vysokou tvrdost, pevnost, korozivzdornost. Vlastnostmi se liší od Stainless Steel GP1 dle tabulky níže. Používá se na součásti pro sterilní použití, prototypy, náhradní funkční díly, zakázkové malé série. [23]

3.3.8 Titanium Ti64

Velmi pevný materiál s odolností proti korozi, skvělá teplotní odolnost a možná další tepelná úprava.

Materiál je zároveň velmi lehký, a proto se používá pro složité geometrie v malosériové výrobě vysoce výkonnostních součástí v leteckém, kosmickém průmyslu, v součástech do závodních aut a v biomedicíně. [24]

3.3.9 Srovnání vlastností vybraných materiálů

V Tab. 3 jsou srovnány vybrané vlastnosti zmíněných materiálů. Hodnoty jsou přibližné a mohou se lišit dle výrobce či finální úpravy.

Tab. 3.: Přibližné hodnoty vybraných materiálů [8] [17-19] [21-24] [26]

	Minimální tloušťka vrstvy [μm]	Dosažitelná přesnost [μm]	Minimální tloušťka stěny [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tvrдость
Direct Metal 20	20	±50	0,6	až 400	200	80	400 HV
Aluminiu m AISi10Mg	30	±50	0,5	300	190	70	100 HV
Cobalt Chrome MP1	30	±50	0,3	1300	1000	200	370 HV
Maraging Steel MS1	30	±50	0,3	1150	1000	150	350 HV
Nickel Alloy IN718	40	±50	0,3	1040	710	170	350 HV
Stainless Steel GP1	20	±50	0,3	1020	520	170	230 HV
Stainless Steel PH1	20	±50	0,4	1200	1000	140	300 HV
Titanium Ti64	60	±50	0,3	1075	970	115	330 HV5

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Proved'te konstrukci 3D modelu vstřikovaného plastového dílu.
3. Navrhněte moderní vstřikovací formu pro zadaný díl pro zvětšení účinnosti chlazení.
4. Návrh a funkčnost ověřte pomocí tokových analýz.
5. Nakreslete 2D řez vstřikovací formou včetně příslušných pohledů a kusovníku.

Cíle diplomové práce jsou:

- vypracování literární studie na dané téma,
- provedení konstrukce 3D modelu vstřikovaného plastového dílu,
- navrhněte moderní vstřikovací formu pro zadaný díl pro zvětšení účinnosti chlazení,
- návrh a funkčnost ověřte pomocí tokových analýz,
- nakreslete 2D řez vstřikovací formou včetně příslušných pohledů a kusovníku.

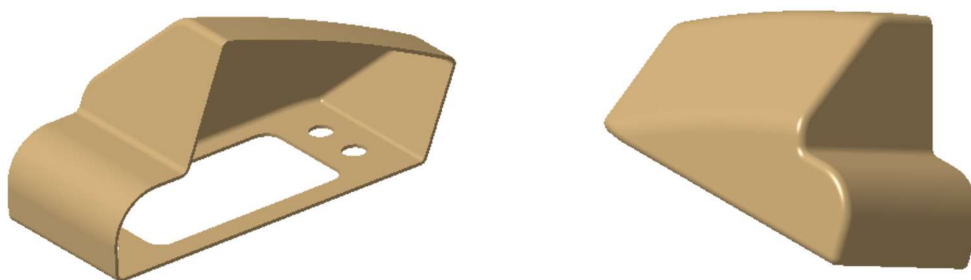
Teoretická část této diplomové práce rozebírá problematiku vstřikovacích forem pro polymery. Pozornost je věnována hlavně reologii vstřikování a chladicímu procesu.

Praktická část obsahuje vypracování na základě zadaných cílů práce. Pro plastový díl jsou navrženy tři různé systémy temperačních kanálů, a to od technologicky nejjednoduššího a nejlevnějšího až po pokročilé a ekonomicky náročnější typy. Je zkoumána efektivita vstřikovacího procesu v závislosti na chlazení, a pro nejúčinnější řešení je navržena kompletní vstřikovací forma. K realizaci diplomové práce bylo využito několika programů:

- CATIA V5R19,
- Autodesk Inventor 2021,
- Autodesk Moldflow Synergy 2016,
- Offline knihovny normálíí HASCO a Meusburger.

5 CHARAKTERISTIKA VÝROBKU

Pro experimentální účely byl vybrán díl automotive, jde o relativně tlustostěnný díl. Jedná se o prototypní kryt automobilového zrcátka. Pro odformování je nutné použití více dělicích rovin. Na tomto tvaru lze dobře demonstrovat rozdíl účinnosti jednotlivých navrhovaných temperačních okruhů. Hlavní rozměry: 233 x 118 x 100 mm. Objem 107,75 cm³. Hmotnost cca 113 g.



Obr. 24.: Vstřikovaný výrobek

5.1 Materiál výrobku

Pro výpočtové účely byl zvolen materiál ABS, který se vyznačuje vysokou nárazovou odolností, vysokým leskem. Materiál, který je typický pro jeho poměr mezi fyzikálními vlastnostmi, tepelnou stabilitou a skvělou zpracovatelností, ideální pro zpracování vstřikováním.

Materiál INEOS Lustran® ABS Elite HH 1827 je neplněný materiál s vysokou tepelnou stabilitou a odolností, vhodný pro vstřikování krytů a pouzder s dobrou mechanickou odolností a možností vysokého lesku. Smrštění materiálu podle ISO 294-4 je 0,4 – 0,7%, což bude zohledněno při návrhu tvarových částí.

Tab. 4.: Vlastnosti zvoleného materiálu ABS Elite HH1827

Vlastnost	hodnota	jednotka
Hustota	1,05	g/cm ³
Teplota taveniny	220-280	°C
Teplota formy	60-85	°C
Vyhazovací teplota	89	°C
Modul v tahu	2240	MPa
Maximální rychlost smykové deformace	50000	1/s
Index toku taveniny	13	g/10 min

6 TOKOVÁ ANALÝZA

Pro podporu konstrukce nástroje se provádí tokové analýzy, na základě kterých, lze predikovat problémová místa ještě před samotným uvedením nástroje do provozu. Podle výsledků lze dimenzovat vtoková i temperační soustava tak, aby byla co možná nejlepší. V této kapitole jsou představeny předběžné tokové analýzy, které slouží k výběru vhodného umístění polohy vtoku a analýza plnění, která zhodnotí, zda zvolená poloha vtoku vyhovuje a výrobek bude zcela zatečen.

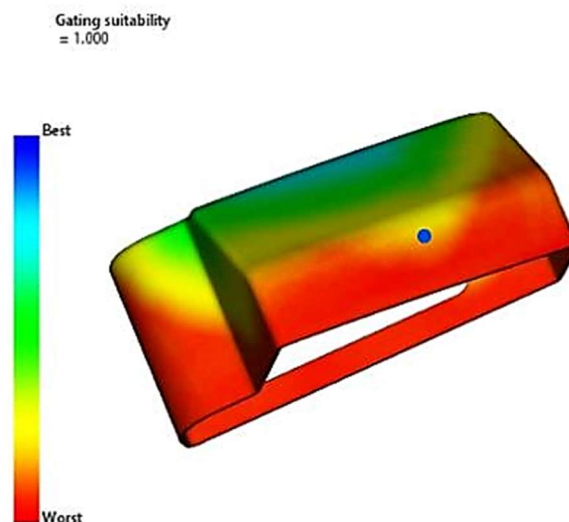
6.1 Analýza vhodnosti polohy vtoku (Gate Location)

Gate Location přibližně stanoví vhodnost umístění vtoku vůči geometrii vstřikovaného výrobku tak, aby došlo k rovnoměrnému vyplnění dutiny formy. Konečná volba je ovlivněna konstrukčními možnostmi při návrhu samotného dílu.

Analýza pracuje na základě odporu proti tečení. Polymer teče cestou nejmenšího odporu a analýza polohy vtoku tedy ukazuje, kam umístit vtok, aby polymeru nebyl kladen příliš velký odpor proti tečení.

Barevná škála ukazuje vhodnost od červeného, nejhoršího (Worst) místa po modré, nejlepší (Best).

Z důvodu možností konstrukce je vtok volen do žluté oblasti z vrchu součásti, jelikož následná kontrolní analýza plnění vychází v pořádku. Volba je ovlivněna zejména polohou výrobku ve formě.

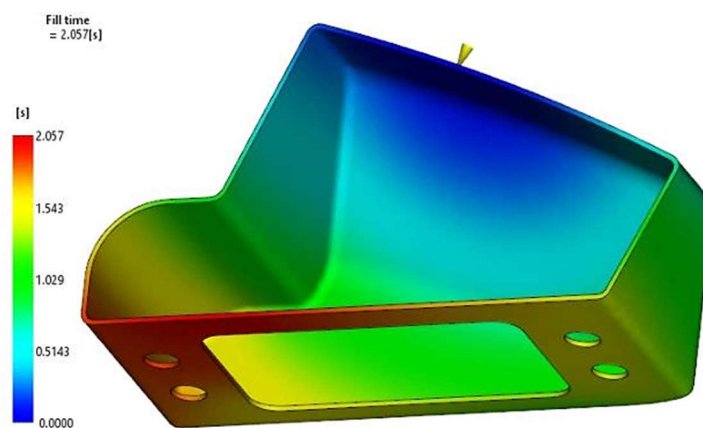


Obr. 25.: Výsledek analýzy polohy vtoku a zobrazení volby umístění

Žlutá oblast odpovídá vhodnosti umístění polohy vtoku v rozmezí 15 – 30%, na okraji s červenou barvou je to blíže 15%.

6.2 Předběžná analýza plnění (Fill)

Tato analýza zobrazuje, že ačkoliv umístění vtoku z pohledu geometrie součásti (viz. výsledek Gate Location) lze zvolit do výhodnější pozice, je zvolené umístění dostatečné pro úspěšné dotečení polymeru do plného tvaru.



Obr. 26.: Výsledek analýzy plnění na základě umístění vtoku

7 KONSTRUKCE TEMPERAČNÍCH KANÁLŮ PRO ANALÝZU

Konstrukční návrh je realizován pro dvounásobnou formu.

Při návrhu temperačních kanálů se postupuje na základě komplexnosti tvaru výrobku. Je kladen důraz na stanovené požadavky, jako je například vzdálenost a průměr kanálu od vstřikovaného výrobku, detailněji rozebrané v teoretické části této diplomové práce. Čím je tvar složitější, tím je obtížnější tyto kanály efektivně navrhnout.

Program pro konstruktéry Catia V5 nabízí modul Generative Shape Design, který je ideální pro tvorbu komplexních geometrií. Tento modul byl využit při návrhu všech typů temperačních okruhů, jelikož na pokročilé úrovni, umožňuje efektivně pracovat s plochami a jejich odsazeními o danou vzdálenost. Při složitém tvaru je zároveň nutno udržet tvar kanálu co nejjednodušší, aby při ostrých přechodech nedocházelo ke tvarovým chybám, ale zároveň udržet osu kanálu ve stanovené vzdálenosti od výrobku.

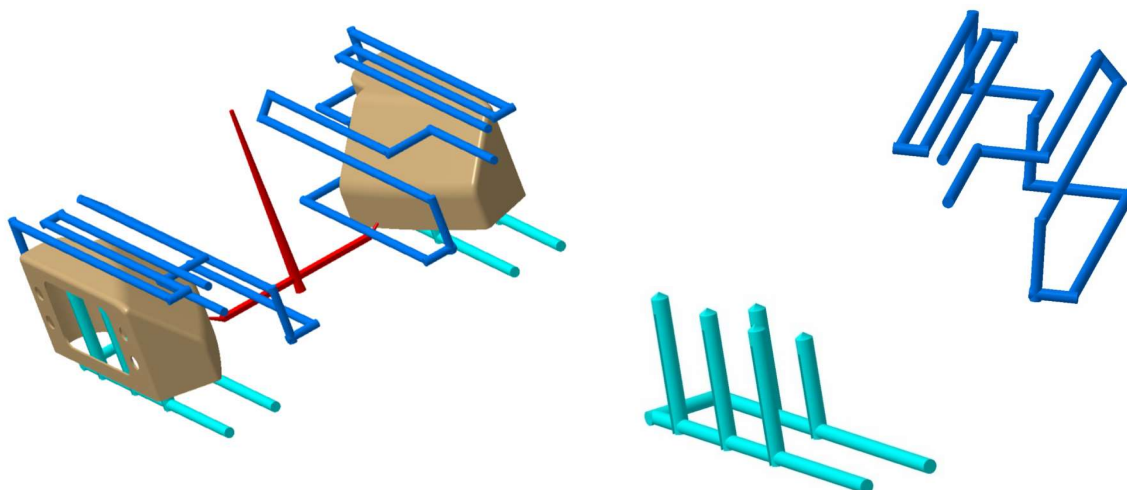
7.1 Vrtaná temperace

Ve tvárnici je navržen systém temperačního okruhu použitím vyvrtávaných kanálů za dodržení geometrických principů, detailně rozebrané v kapitole 2.2.1 Vrtané kanály.

Byly použity prvky, typické pro vysoké tvárníky.

Ve tvárníku je temperační okruh vytvořen s pomocí plochých přepážek. Temperace tvárníku je zobrazena tyrkysovou (světlejší modrou) barvou. Průměr kanálu je 10 mm, plocha průřezu je $78,5 \text{ mm}^2$, ploché přepážky jsou průměru 12 mm a liší se délkou, a to 3x95 mm, 1x80 mm, 1x70 mm.

Temperační okruh ve tvárnici je zhotoven pouze vyvrtáváním a pomocí ucpávek a propojovacích hadic. Temperace tvárnice je zobrazena tmavě modrou barvou. Průměr kanálu je 8 mm, plocha průřezu je $50,3 \text{ mm}^2$.



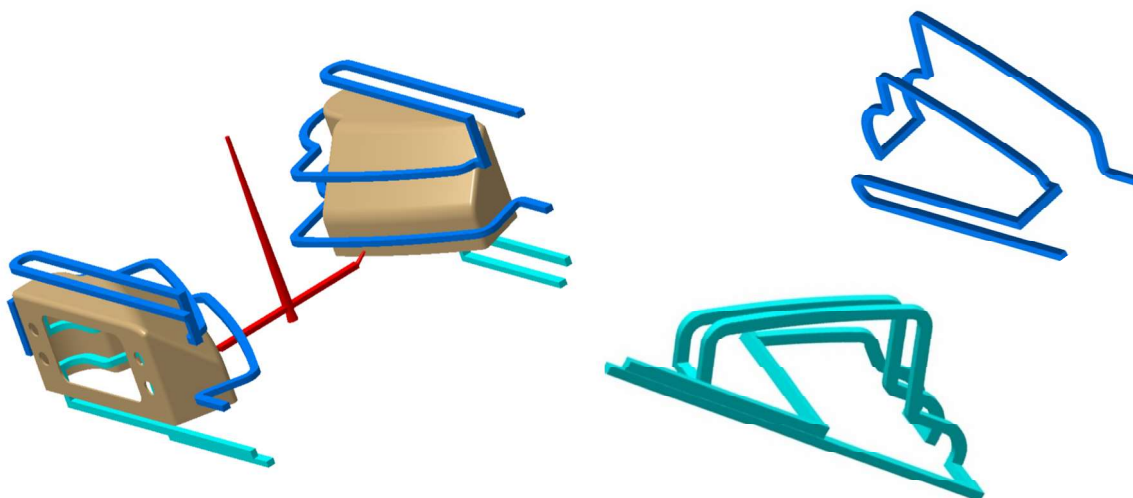
Obr. 27.: Konstrukce temperačního okruhu zhotoveného vrtáním

7.2 Systém Contura

Druhá varianta temperačního systému je tvořena dvěma kanály. Kanál má obdélníkový průřez ve vrstvách tvarových částí. Průřezem je obdélník o rozměrech 6x8 mm. Rozměry byly voleny tak, aby plocha byla ideálně stejná s plochou průřezu vrtané, či později konformní verze. Plocha průřezu je tedy 48 mm².

Tvarové vložky jsou rozděleny na tři vrstvy a v každé vrstvě je frézováním vytvořen kanál. Tyto vrstvy jsou následně spojeny pájením na tvrdo tak, aby byl zpětně vytvořen původní tvárník/tvárnice.

Průtočné množství je na vstupu do obou kanálů stanoveno shodně 20 l/min.



Obr. 28.: Konstrukce temperačních kanálů systémem Contura

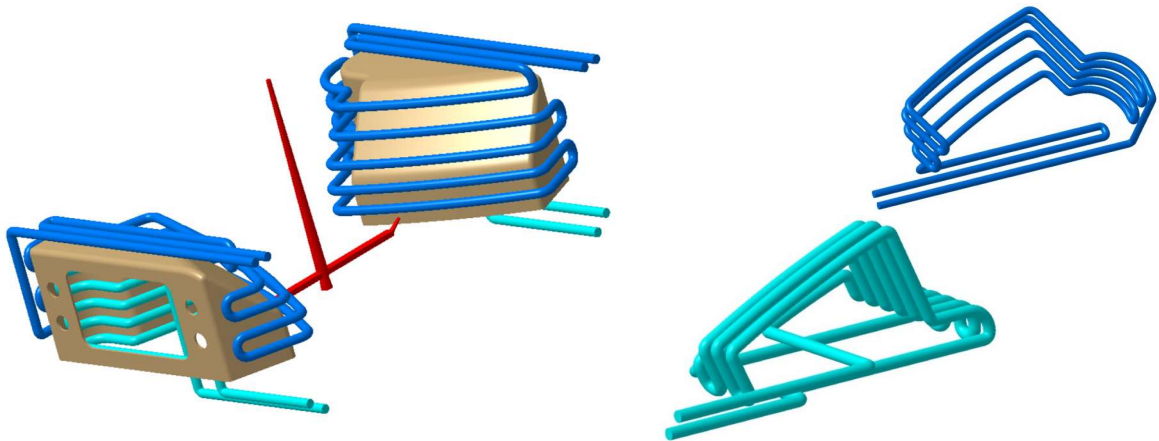
7.3 Systém konformního chlazení

Systém konformního chlazení je navržen tak, aby s dodržением geometrických principů, zejména vzdálenost kanálu od stěny a průměru kanálu, bylo dosaženo co nejpřesnějšího kopírování tvaru vstřikovaného výrobku.

Oproti vyvrtávanému okruhu lze eliminovat ostré přechody a dosáhnout tak plynulého proudění chladícího média.

Výroba tohoto systému předpokládá využití technologie DMLS, detailněji popsanou v kapitole 3.2 Direct Metal Laser Sintering.

Průměr kanálu je 8 mm a plocha průřezu 52,3 mm². Průtočné množství chladící kapaliny je na vstupu do obou kanálů stanoveno shodně 20 l/min.



Obr. 29.: Konstrukce temperačních kanálů systémem konformního chlazení

8 NASTAVENÍ PROCESNÍCH PODMÍNEK PRO ANALÝZY

Stanovení procesních podmínek je pro všechny typy chladících okruhů shodné, aby odlišné výsledky byly závislé pouze na změně geometrie kanálu.

Procesní parametry jsou voleny na základě parametrů okrajových podmínek daného materiálu a uvážení na základě zkušeností. Cílem je dosažení optimálního vstřikovacího procesu při zvýšené efektivitě chlazení.

Nastavení probíhá v programu Autodesk Moldflow Synergy v okně Process Settings Wizard.

Tab. 5.: Nastavení procesních parametrů – krok chlazení

Cool settings	Hodnota	Jednotka
Teplota taveniny	260	°C
Doba otevření vstřikovací formy	5	s
Čas vstřikování + dotlak + chlazení	Automatic	-
Teplota formy	60	°C
Vyhazovací teplota	89	°C
Minimální procento zamrzlých vrstev	90	%

Tab. 6.: Nastavení procesních parametrů – krok plnění

Fill + Pack	Hodnota	Jednotka
Kontrola podle času plnění	1,1	s
Přepnutí na dotlak podle objemového zaplnění	98	%
Kontrola fáze dotlaku	podle relativního plnicího tlaku	-

V posledním kroku se nastavují parametry pro výpočet smrštění. Typ analýzy se stanovuje podle předpokladu deformace výrobku. Pokud se očekává, že výrobek zůstane stabilní v rámci deformací, volí se analýza malých deformací, která poskytne finální deformovaný tvar.

Pro výrobky, u kterých se příliš nemění tloušťka, se doporučuje použít agregaci sítě, která zrychluje analýzu a redukuje potřebnou paměť pro výpočet.

Agregace sítě je technika, která snižuje množství vrstev elementů v tetrahedrální síti na dva. Pro tenkostěnné výrobky je dosaženo kvalitních výsledků smrštění a analýza je značně urychlena v důsledku snížení počtu elementů.

9 VÝSLEDKY ANALÝZY CHLAZENÍ A SMRŠTĚNÍ

V této kapitole se nachází výsledky 3D FEM analýzy navržených chladících systémů. Ke komentáři byly vybrány výsledky, na základě kterých, se rozhodne o efektivitě.

- Čas potřebný pro vyhození (Time to reach ejection temperature, part),
- rychlost v kanálu (Velocity, Channel (3D)),
- teplotní pole v chladícím kánálu (Temperature, Channel (3D) (averaged)),
- teplotní pole tvarové vložky (Temperature, mold insert (averaged)),
- deformace vstřikovaného výrobku (Deflection, all effects: Deflection).

Vstup temperačního média je čistá voda teploty 55°C, průtoku 20 l/min.

9.1 Vrtaná verze

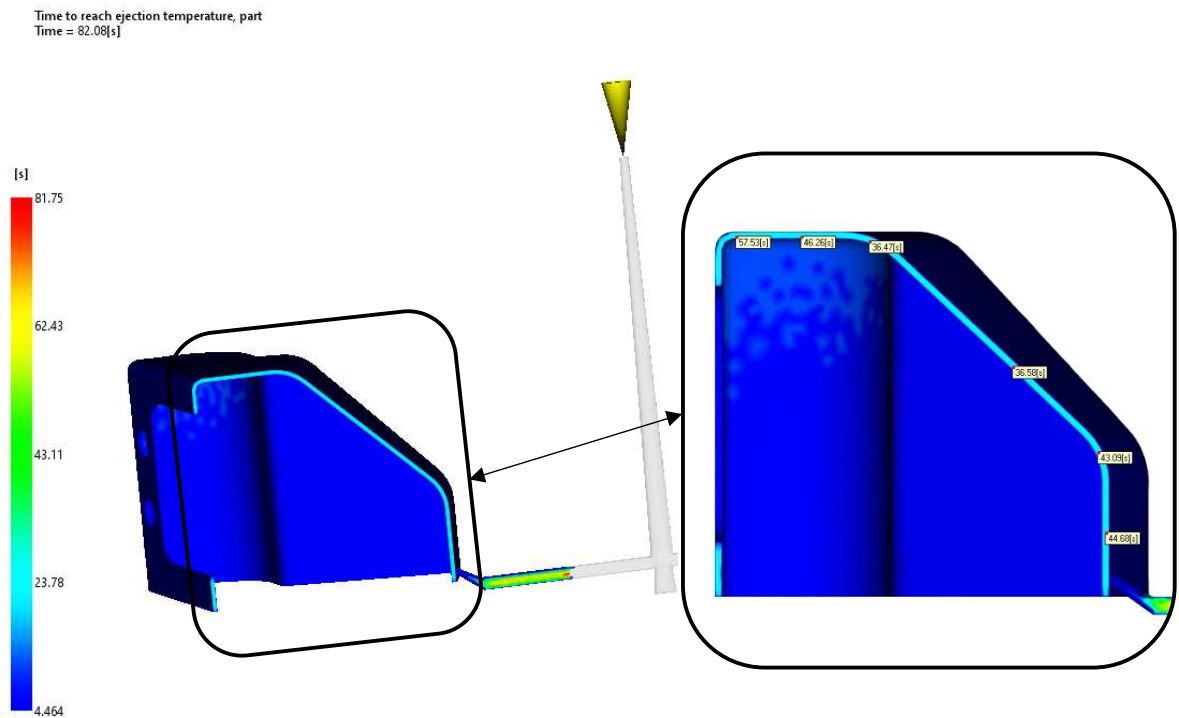
V této kapitole jsou rozebrány výsledky analýzy chlazení týkající se chladícího okruhu zhotoveného vrtáním. Chladící okruhy jsou detailně popsány v kapitole 7.1 Vrtaná temperace.

9.1.1 Čas potřebný pro vyhození

Maximální hodnota času potřebného pro vyhození dosahuje 81,75 sekund dle horní hodnoty barevné škály.

Na modelu je proveden řez rovinou ZX, aby se dalo posoudit, v kterých částech potřebuje tavenina více času k dosažení vyhazovací teploty.

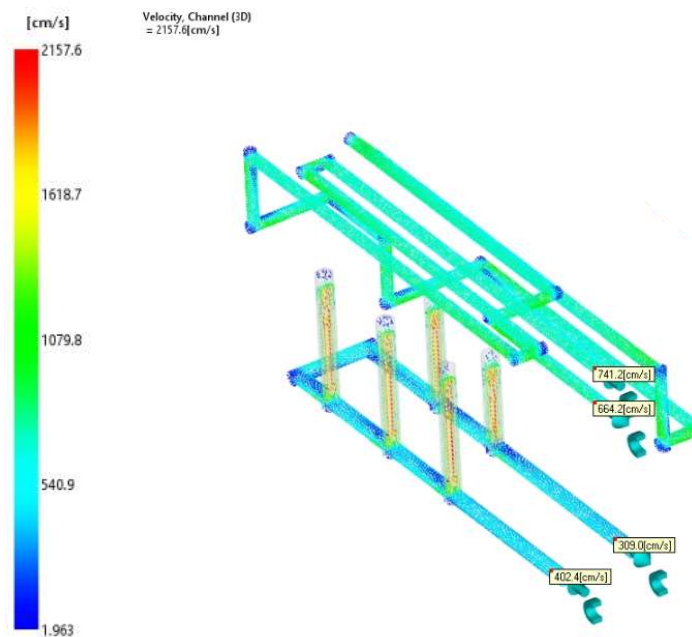
V detailu modelu lze vidět, v jakých časech dosahuje tloušťka výrobku vyhazovací teploty. Hodnoty se pohybují v rozmezí 36 – 57 sekund. Vyšší hodnoty se zobrazují ve vtokovém systému, kde není nutné ochlazení na vyhazovací teplotu.



Obr. 30.: Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – vrtaná verze

9.1.2 Rychlost proudění v kanálu

Tento výsledek slouží jako kontrola proudění v chladicím kanálu. Rychlost kanálu na straně tvárníku se mění s průřezem v plochých přepážkách a na výstupu je tedy nižší než na vstupu v důsledku tlakové ztráty způsobené použitými přepážkami a přechody.



Obr. 31.: Rychlost proudění v chladicím kanálu – vrtaná verze

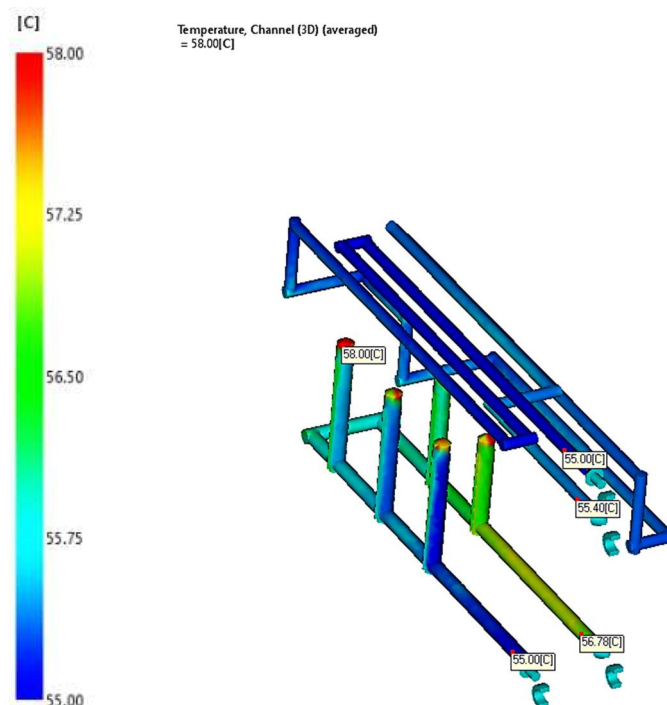
Rychlost v kanálu ve tvárnici je plynulá a nejhůře se pohybuje v ostrých přechodech, vznikajících tvorbou dalších větví chlazení, vrtáním.

Vnější přechody okruhů by byly prakticky nahrazeny krátkými spojovacími hadicemi mimo formu, a tím by se eliminovalo zpomalování toku.

9.1.3 Teplotní pole v chladicím kanálu

Dovolená hodnota změny teploty na vstupu a výstupu je maximálně 5°C.

Rozdíl teplot v obou případech nepřesahuje mezní hodnotu. Na straně tvárníku lze vidět rozdíl 1,78°C a na straně tvárnice je to 0,4°C.

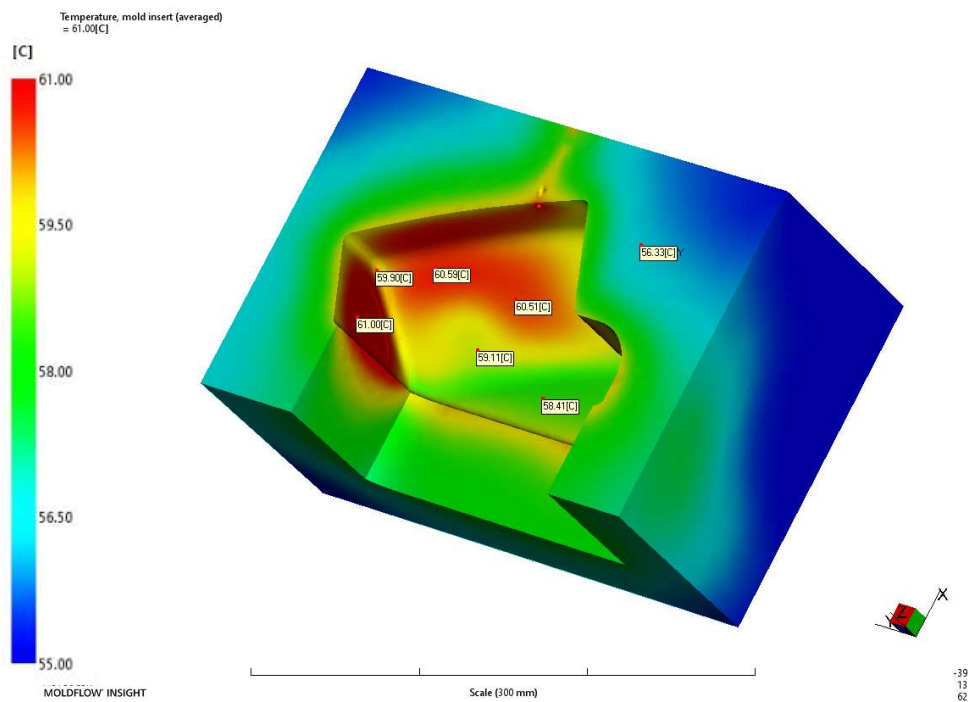


Obr. 32.: Teplotní pole chladicího kanálu – vrtaná verze

9.1.4 Teplotní pole tvarové vložky

Barevná škála zobrazuje teplotní rozdělení od 55 do 61°C. Lze poznat poměrně vysoký rozdíl teplot na plochách. Nerovnoměrnost teplotního pole tvarové vložky způsobuje větší deformace výrobku.

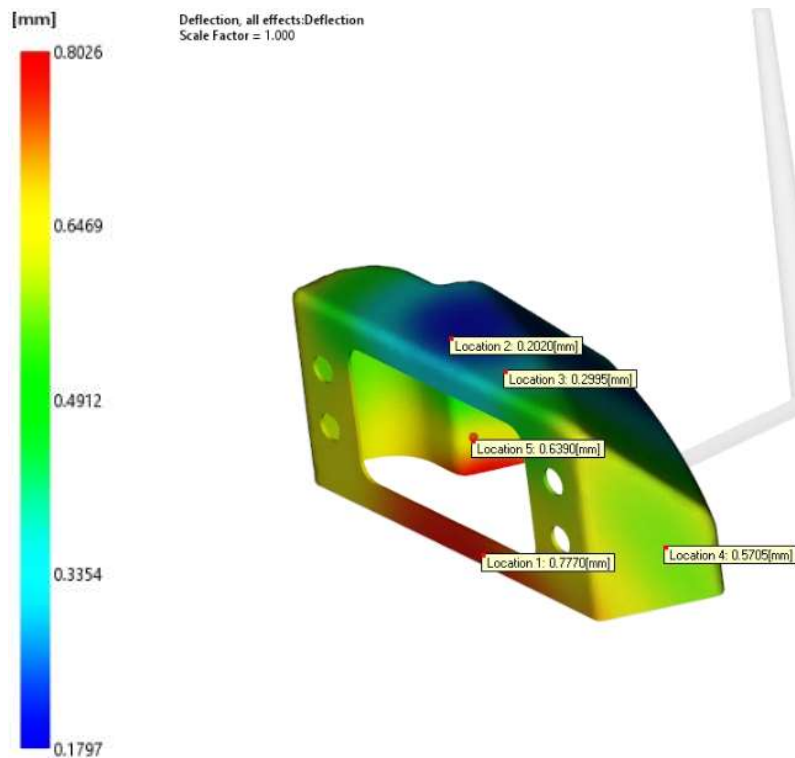
Lokálně vyšší teploty zobrazené červenou barvou jsou způsobeny nerovnoměrným či nedostatečným chlazením.



Obr. 33.: Teplotní pole pravé tvarové vložky – vrtaná verze

9.1.5 Deformace výrobku

Maximální deformace dosahuje hodnoty 0,80 mm, dle barevné škály a nachází se v nejdálčenějším místě od vtokového ústí.



Obr. 34.: Deformace výrobku – vrtaná verze

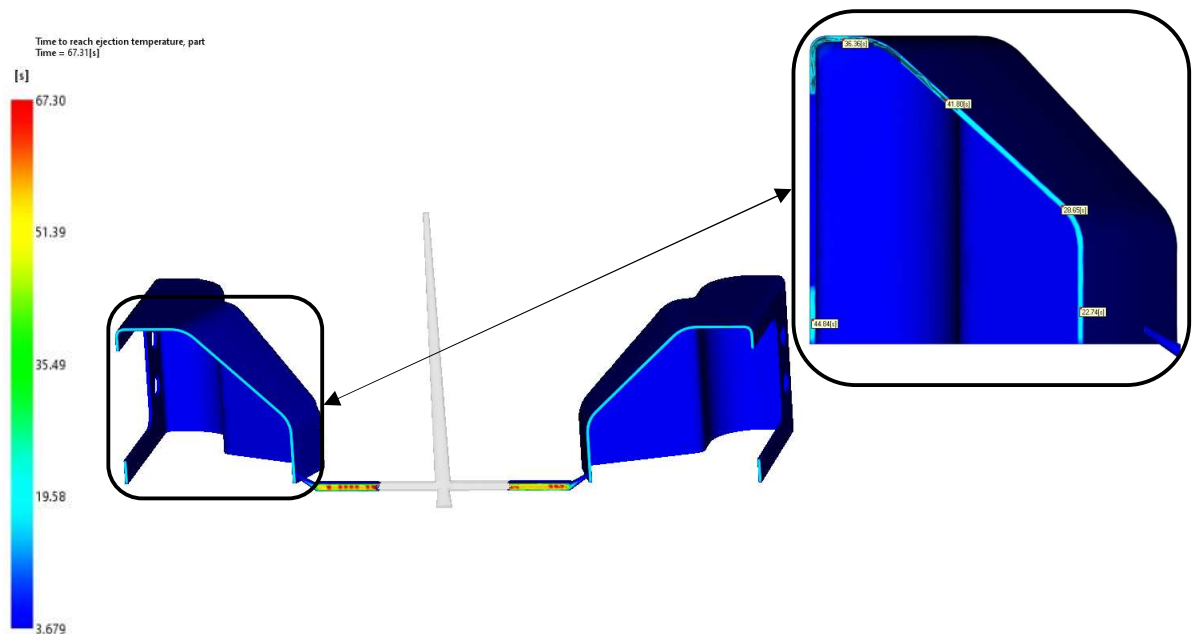
Velikosti deformace se odvíjí od rozložení teplotního pole na tvarových vložkách a na intenzitě chlazení.

9.2 Verze Contura

V této kapitole jsou rozebrány výsledky týkající se chladicího okruhu realizovaného systémem Contura. Systém Contura se zhotovuje rozdělením tvarových částí do několika řezů, ve kterých se frézuje navrhovaný okruh a následným pájením na tvrdo se dosahuje původní podoby tvarové vložky. Detailně je tento systém popsán v teoretické části této práce.

9.2.1 Čas potřebný pro vyhození

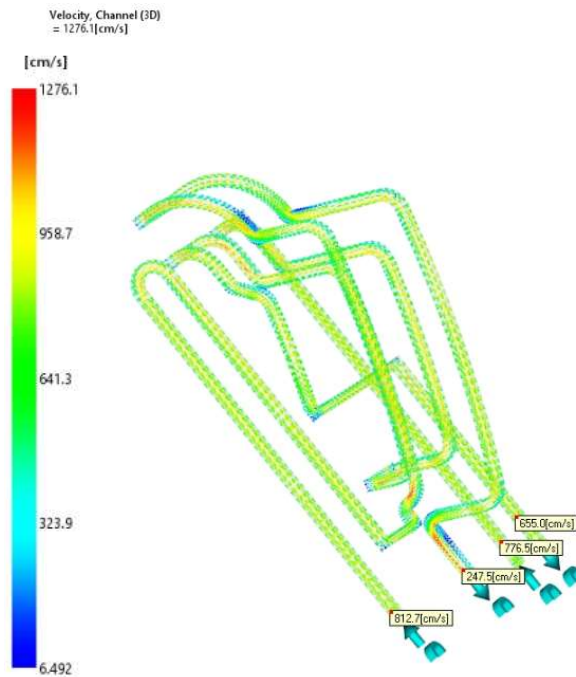
Maximální hodnota času potřebného pro vyhození dosahuje 67.3 sekund dle horní hodnoty barevné škály. Na modelu je proveden řez rovinou ZX, aby se dalo posoudit, ve kterých částech potřebuje tavenina více času k dosažení vyhazovací teploty. Výrobek dané tloušťky dosahuje vyhazovací teploty v rozmezí 20 – 44 sekund, maximální časové hodnoty zobrazené na škále nabývají ve vtokovém systému, kde není nutné dosažení vyhazovací teploty.



Obr. 35.: Čas potřebný pro vyhození – verze Contura

9.2.2 Rychlost v kanálu

Rychlost proudění v obou kanálech je plynulá a rovnoměrná. Zpomalení lze pozorovat v ostrých rozích a přechodech vzniklých frézováním.

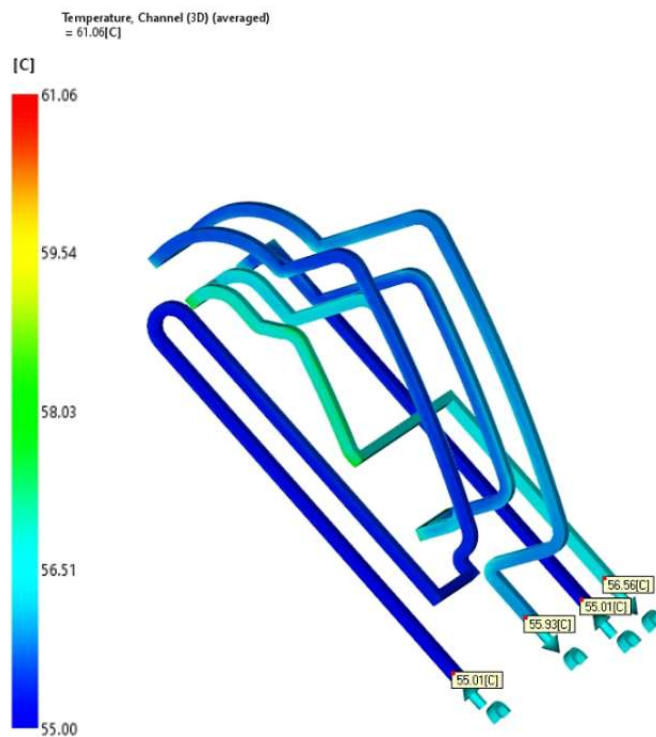


Obr. 36.: Rychlost proudění v kanálu – verze Contura

9.2.3 Teplotní pole v chladicím kanálu

Dovolená hodnota změny teploty na vstupu a výstupu je maximálně 5°C.

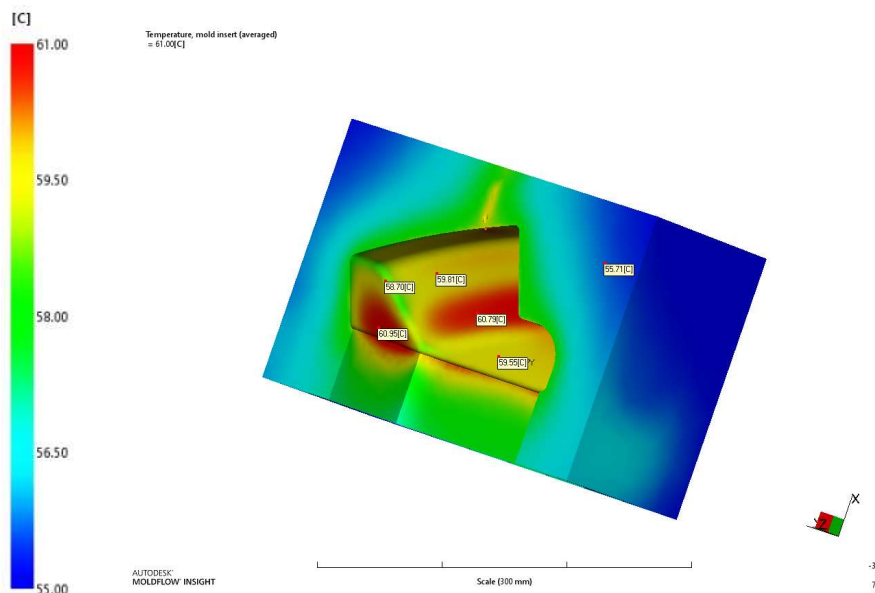
Rozdíl teplot v obou případech nepřesahuje mezní hodnotu. Na straně tvárníku lze vidět rozdíl přibližně 1,53°C a na straně tvárnice je to 0,8°C.



Obr. 37.: Teplotní pole v chladicím kanálu – verze Contura

9.2.4 Teplotní pole tvarové vložky

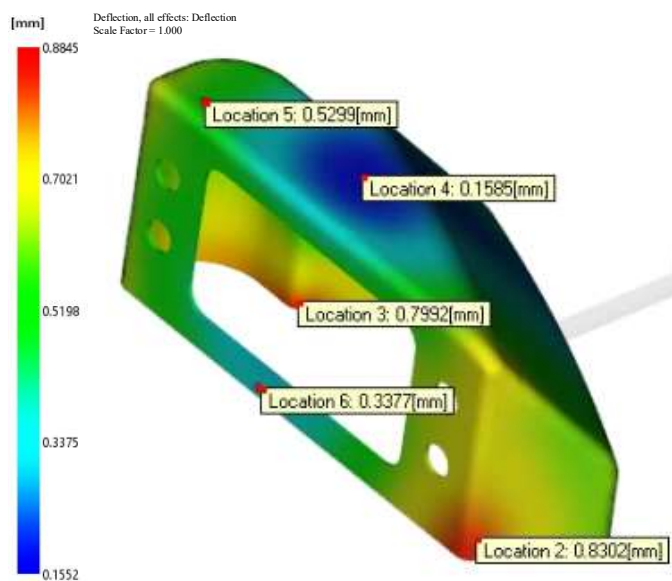
Barevná škála zobrazuje rozdíly teplot od 55 do 61°C. Lze usoudit rovnoměrnější rozložení a malé změny teplot na plochách oproti vrtané verzi. V zaoblených oblastech na velkých plochách výrobku dochází k mírnému lokálnímu přehřátí zobrazeném červenou barvou a v rozích lze naopak pozorovat intenzivnější ochlazení.



Obr. 38.: Teplotní pole pravé tvarové vložky – verze Contura

9.2.5 Deformace výrobku

Maximální deformace dosahuje 0,89 mm a nachází se v zaobleném okraji blízko dělicí roviny.



Obr. 39.: Deformace výrobku – verze Contura

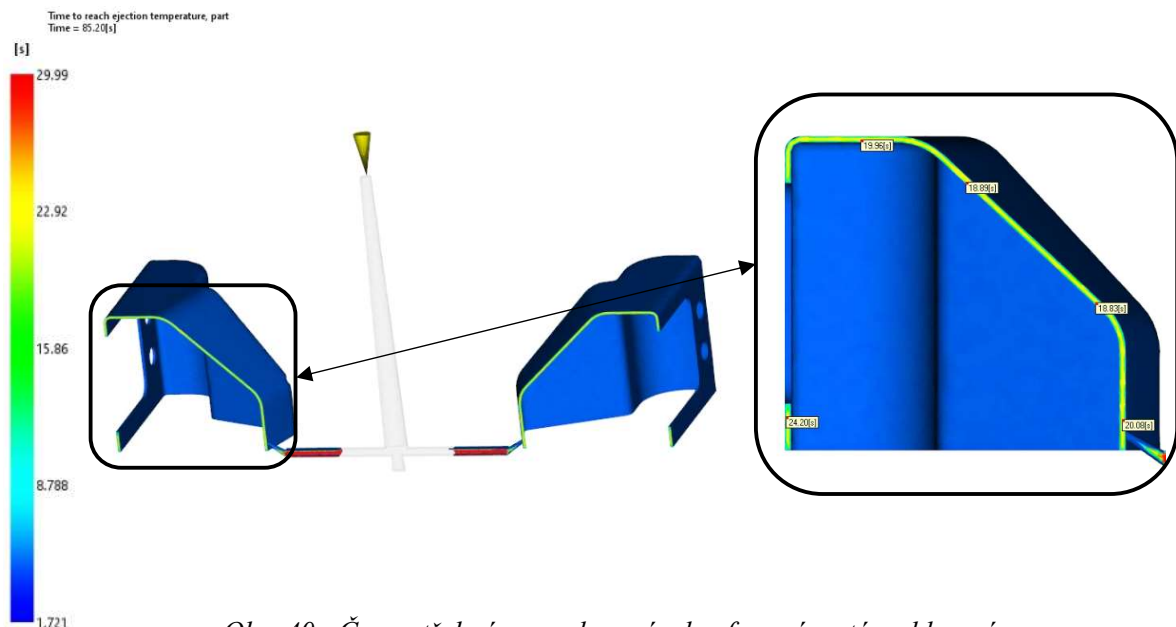
Minimální deformace se pohybuje kolem hodnoty 0,15 mm značené modrou barvou ve výsledku analýzy.

9.3 Verze systému konformního chlazení

V této části jsou rozebrány výsledky týkající se chladicího okruhu zhotoveného technologií DMLS, nazývaného Konformní systém.

9.3.1 Čas potřebný pro vyhození

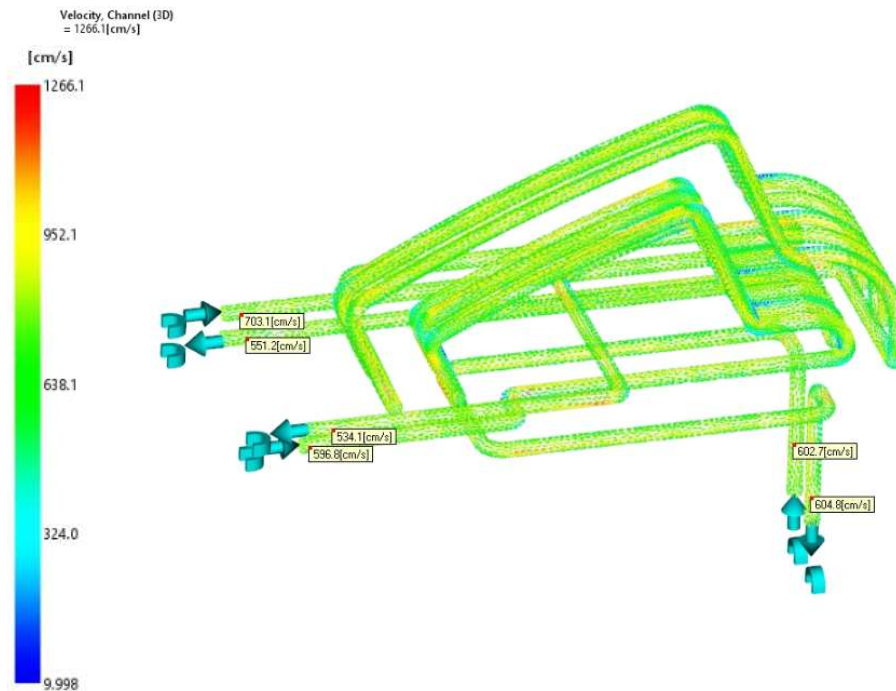
Maximální čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty dosahuje 29,99 sekund. Ve výsledku je zobrazen řez rovinou ZX k nahlédnutí do tloušťky stěny výrobku, kde se vyhazovací teplota pohybuje v rozmezí 18 – 25 sekund.



Obr. 40.: Čas potřebný pro vyhození – konformní systém chlazení

9.3.2 Rychlost v kanálu

Rychlost v chladicích kanálech je plynulá díky technologicky možným zaoblením v přechodech do dalších větví chladicího okruhu. Zpomalení lze pozorovat v okrajích průřezu chladicího kanálu v nejostřejších místech.

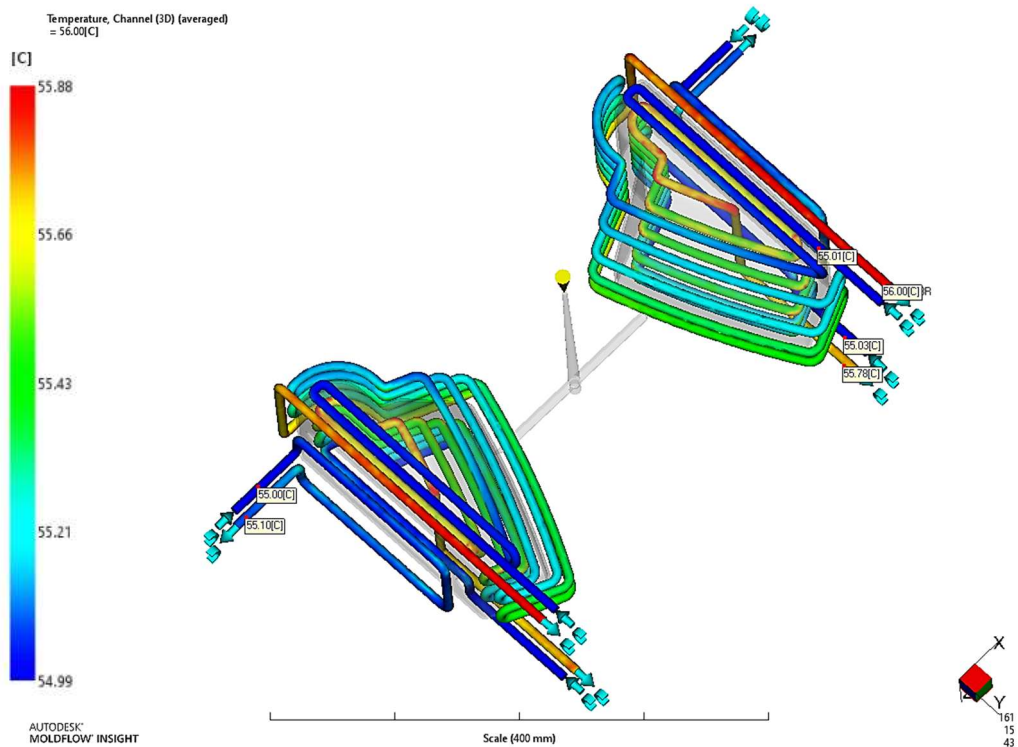


Obr. 41.: Rychlost v kanálu – konformní systém chlazení

9.3.3 Teplotní pole v chladicím kanálu

Rozdíl teploty na výstupu na straně tvárnice je 1°C , na straně tvárníku $0,78^{\circ}\text{C}$ a v boční tvarové části $0,1^{\circ}\text{C}$.

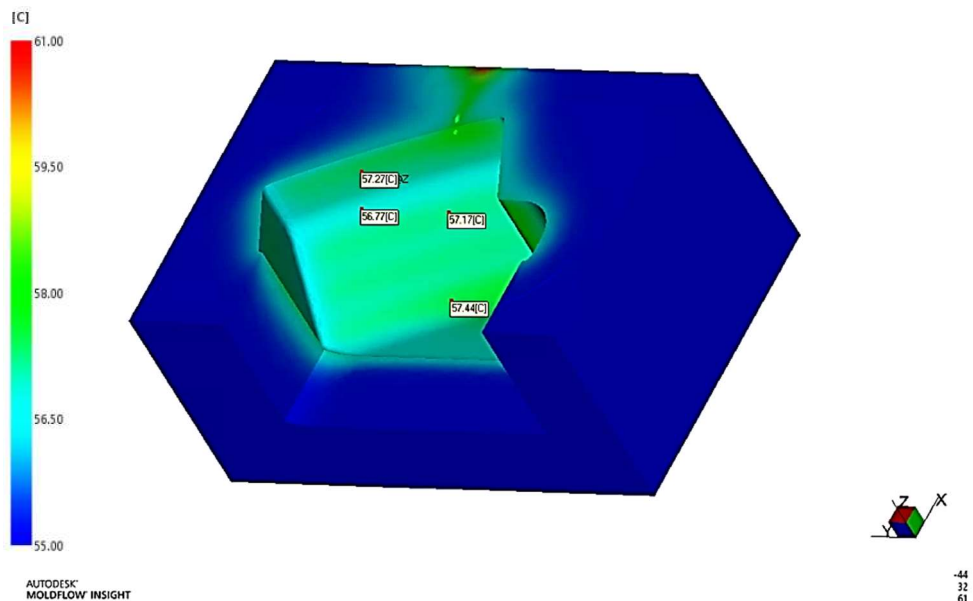
Rozdíly teplot nepřesahují dovolenou hodnotu 5°C .



Obr. 42.: Teplotní pole v chladicím okruhu – konformní systém chlazení

9.3.4 Teplotní pole tvarové vložky

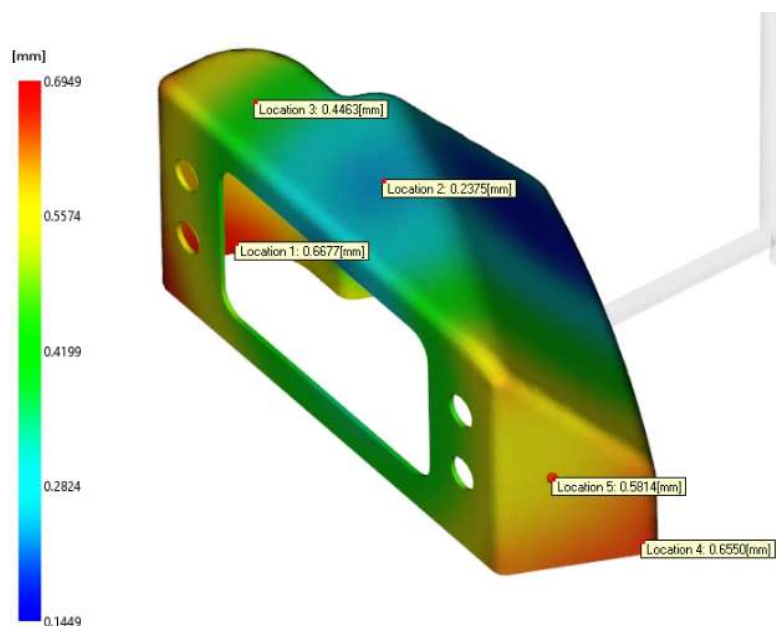
Teplotní škála byla stanovena stejně jako u předchozích variant od 55 stupňů do 61 stupňů a lze zde vidět největší vyrovnanost barevných přechodů, značící velmi malé rozdíly teplot na plochách. Největší lokální ochlazení lze zpozorovat opět v zaoblení na hranici ploch, zobrazené světle modrou barvou.



Obr. 43.: Teplotní pole pravé tvarové vložky – verze konformního chlazení

9.3.5 Deformace výrobku

Největší hodnota deformace dosahuje hodnoty 0,70 mm a nachází se na hraně výrobku blízko dělicí roviny.



Obr. 44.: Deformace výrobku – verze konformního chlazení

V porovnání s ostatními typy se jedná o nejmenší maximální deformaci vstřikovaného výrobku.

9.4 Volba chladicího systému pro konstrukci formy

Na základě vybraných výsledků z analýzy chlazení je nejefektivnějším způsobem z hlediska procesního cyklu i kvality konformní systém chlazení.

Tab. 7.: Srovnání parametrů zkoumaných systémů

	Čas potřebný pro vyhození [s]		Deformace výrobku [mm]	
	max	výrobek	min	max
Vrtaná	81,8	57,0	0,18	0,80
Contura	67,3	44,0	0,16	0,89
Konformní	30,0	25,0	0,15	0,70

Při použití systému Contura dochází ke snížení potřebného času pro vyhození výrobku o 23% oproti vrtanému způsobu chladicího okruhu.

Při použití systému konformního chlazení dochází ke snížení potřebného času pro vyhození výrobku o 56% oproti vrtanému způsobu realizace chladicího okruhu.

V důsledku rovnoměrného rozložení teplotního pole tvarové vložky lze očekávat nižší deformace výrobku u konformního systému, a to dle analýzy o cca 0,1 mm při porovnání maximálních hodnot.

Systém konformního chlazení bude dále použit pro konstrukční návrh vstřikovací formy.

V další kapitole se nachází kompletní CFPW analýza tohoto systému a následně kapitola týkající se samotných konstrukčních voleb a prvků.

10 VÝSLEDKY 3D ANALÝZY VERZE KONFORMNÍHO SYSTÉMU

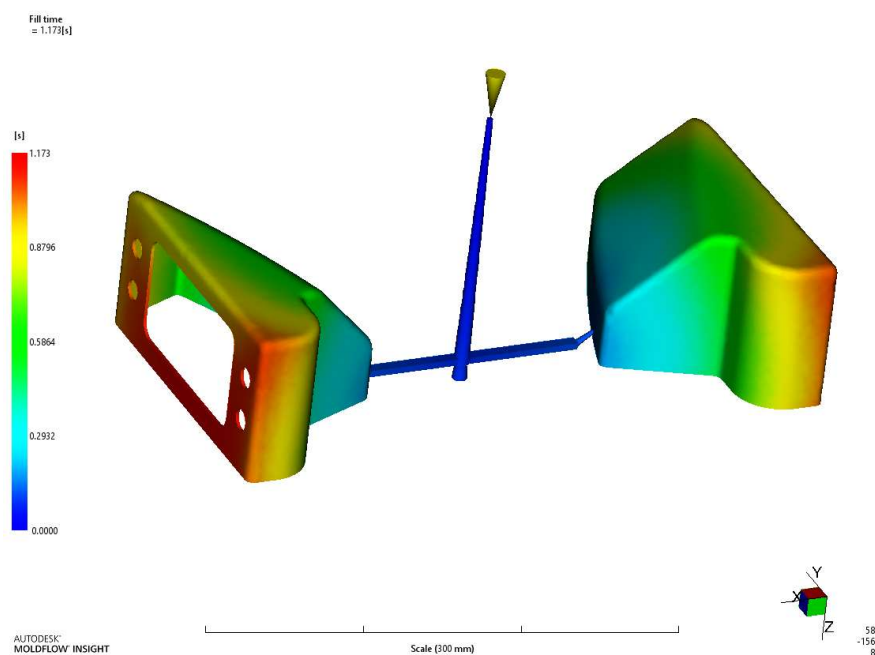
Ke komentáři byly vybrány následující výsledky:

- čas plnění (Fill time),
- tlak při přepnutí na dotlak (Pressure at V/P switchover),
- tlak ve vtokovém ústí (Pressure at injection location: XY Plot),
- rychlost smykové deformace (Shear rate),
- vzduchové kapsy (Air traps),
- uzavírací síla (Clamp force: XY Plot),
- objemové smrštění (Volumetric shrinkage),
- studené spoje (Weld Lines).

10.1 Čas plnění

Výsledek analýzy času plnění je grafické zobrazení doby potřebné pro úplné zaplnění dutiny formy. Při špatném návrhu vtokového systému nemusí k zaplnění formy vůbec dojít. Hodnotí také vyváženost vtokového systému. V ideálním případě by měla tavenina dotéct do všech dutin ve stejný čas.

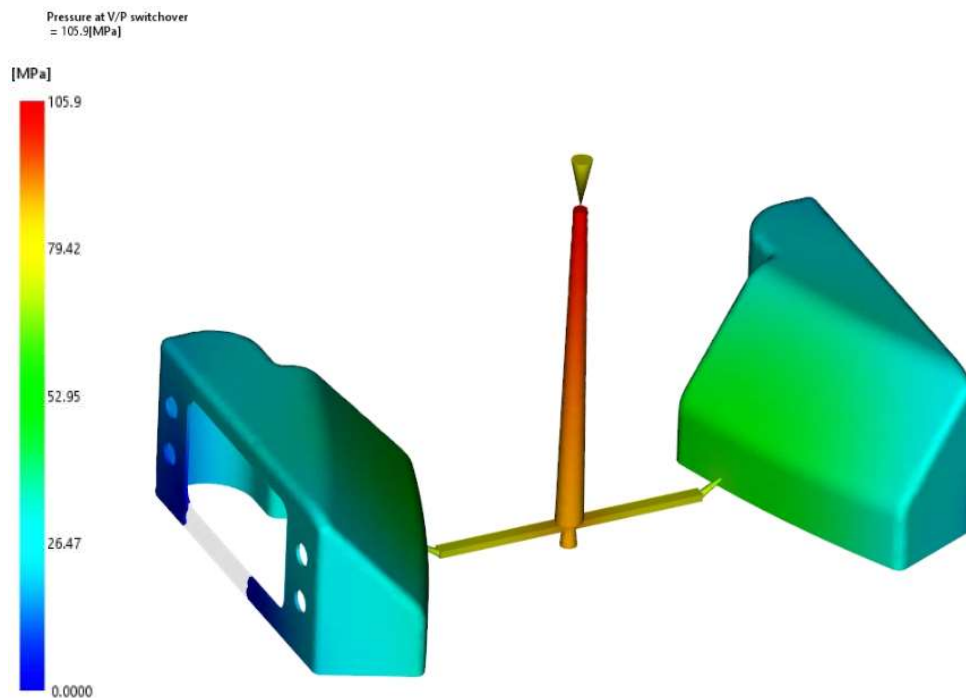
Dutina formy je zcela zaplněna v čas 1,173 s, což je zobrazeno červenou barvou.



Obr. 45.: Čas plnění

10.2 Tlak při přepnutí na dotlak

Výsledek ukazuje hodnotu tlaku při přepnutí na dotlak. Hodnota tlaku dosahuje hodnoty 105,9 MPa. Nejvyšší tlak je na začátku vtokového ústí. Pokud bude v dutině umístěn tlakový senzor, bude na začátku plnění zobrazovaná hodnota tlaku nulová a po zaplnění dutiny se začne zvyšovat. Tento výsledek analyzuje různé hodnoty tlaku v daných místech při přepnutí na dotlak, který je dle nastavení analýzy řízen procentem zaplnění dutiny.



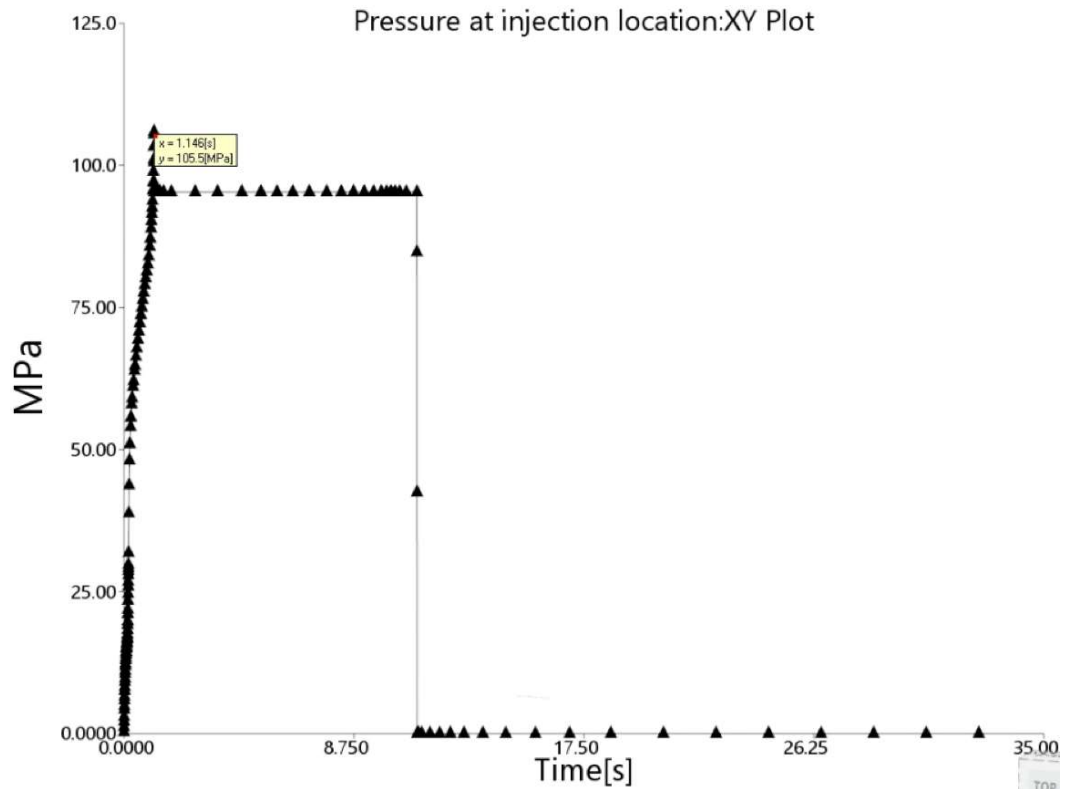
Obr. 46.: Tlak při přepnutí na dotlak

10.3 Tlak ve vtokovém ústí

Výsledek této analýzy zobrazuje průběh tlaku ve vtokovém ústí během celého cyklu vstřikování.

Ve vstřikovacím cyklu trval dotlak za zadaných podmínek 10 sekund. V čase 1,1 dochází k přepnutí na dotlak a hodnota tlaku dosahuje maxima 105,9 MPa (cca 1059 bar).

Většina vstřikovacích strojů pracuje v barech (1MPa = 10 bar).



Obr. 47.: Závislost tlaku na čase během celého cyklu vstřikování

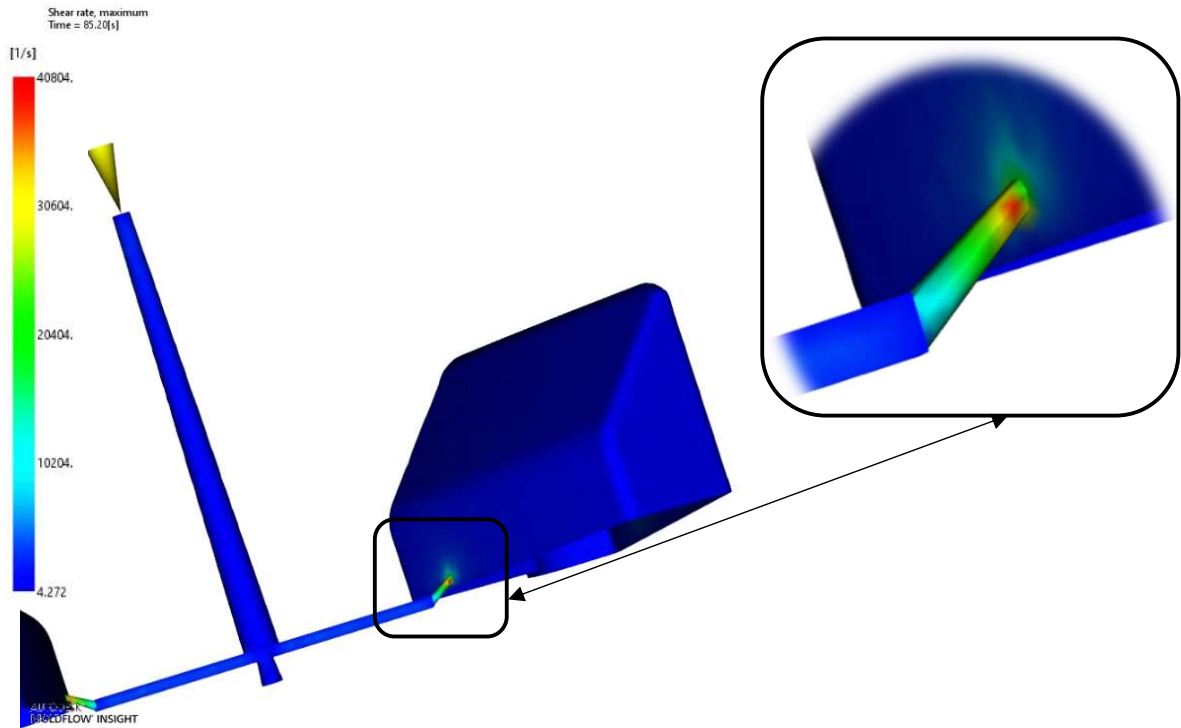
10.4 Rychlost smykové deformace

Hodnotu rychlosti smykové deformace lze v tomto výsledku sledovat v čase. Důležitá je ale maximální hodnota, ta dosahuje 40804 s^{-1} a nachází se ve vtokovém ústí.

Použitý materiál stanovuje maximální dovolenou hodnotu 50000 s^{-1} .

Překročením této hodnoty lze očekávat nechtěné vlivy během vstřikování (degradace, vady, apod).

Snížení této hodnoty dosahujeme ideálně změnou procesních podmínek (snížení rychlosti vstřikování, snížení tlaku, zvýšení teploty taveniny i formy), případně konstrukčními úpravami.

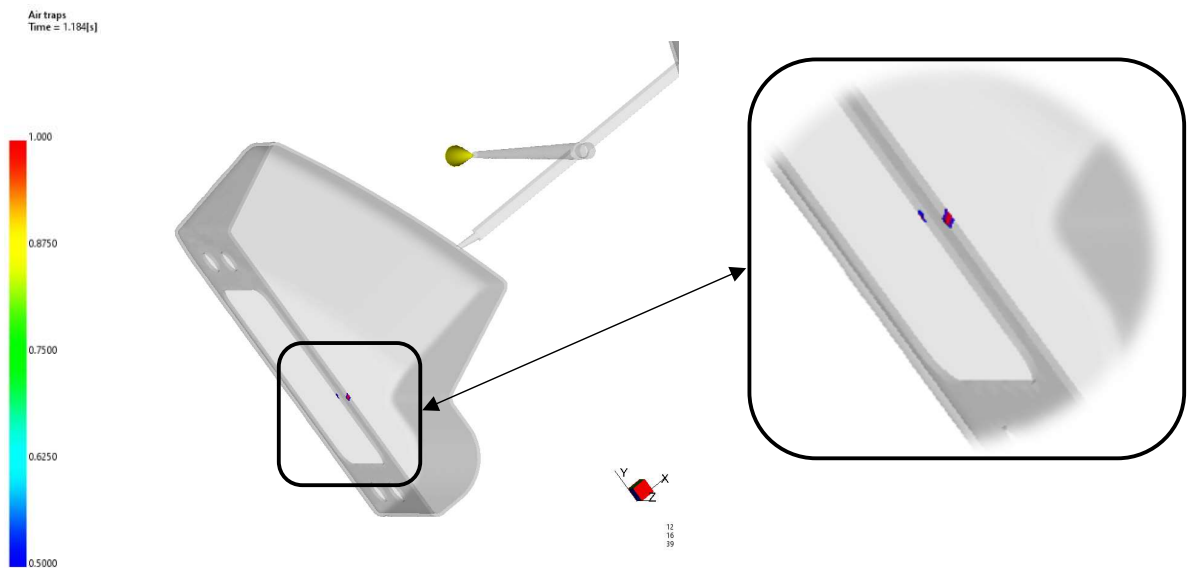


Obr. 48.: Rychlost smykové deformace

10.5 Vzduchové kapsy

Výsledek analýzy předvídá výskyt nahromadění vzduchu. V daných místech je pak na uvážení zařazení odvzdušnění.

Jelikož tato místa jsou blízko dělicí roviny, dá se předpokládat, že vzduch bude unikat právě dělicí rovinou.



Obr. 49.: Vzduchové kapsy

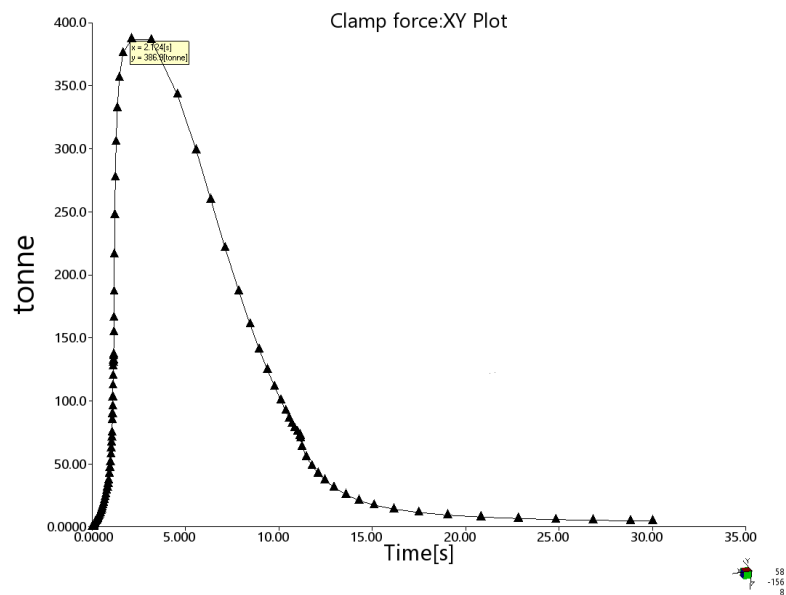
Tyto místa vznikají spojením taveninových čel, která před sebou nesou vzduch a při vzájemném spojení vzniká nejen studený spoj, ale i vzduchová kapsa, která při špatném řešení může způsobovat s tím spojené vady (např.: Dieselův efekt, nedotečená místa)

10.6 Uzavírací síla

Výsledkem této analýzy je průběh uzavírací síly v čase. Graf se podobá průběhu tlaku ve formě. Čím větší tlak je ve formě, tím je potřeba větší uzavírací sílu.

Na ose Y se nachází hodnoty v tunách. Při volbě stroje se připočítává bezpečnostní rezerva 10 – 20% z této maximální hodnoty.

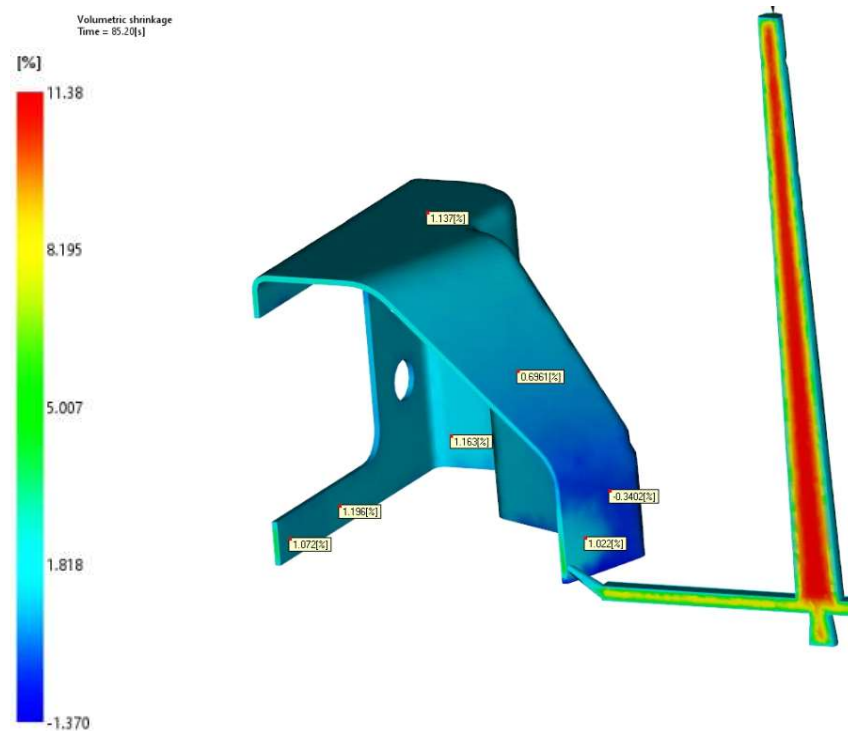
Maximální hodnota dosahuje 386,9 tun (cca 3869 kN), tedy volený stroj musí být schopen vyvinout uzavírací sílu alespoň 4643 kN (při rezervě 20%).



Obr. 50.: Průběh uzavírací síly v čase

10.7 Objemové smrštění

Předpokládané smrštění z hlediska materiálu je do 0,7%. Z tohoto výsledku lze predikovat smrštění výrobku. Největší hodnoty na výrobku se pohybují kolem 1,1%, vyšší pak ve vtokovém systému. Velikost dutiny formy byla zohledněna tímto faktorem a oproti reálným rozměrům zvětšena o horní doporučenou hranici 0,7%.



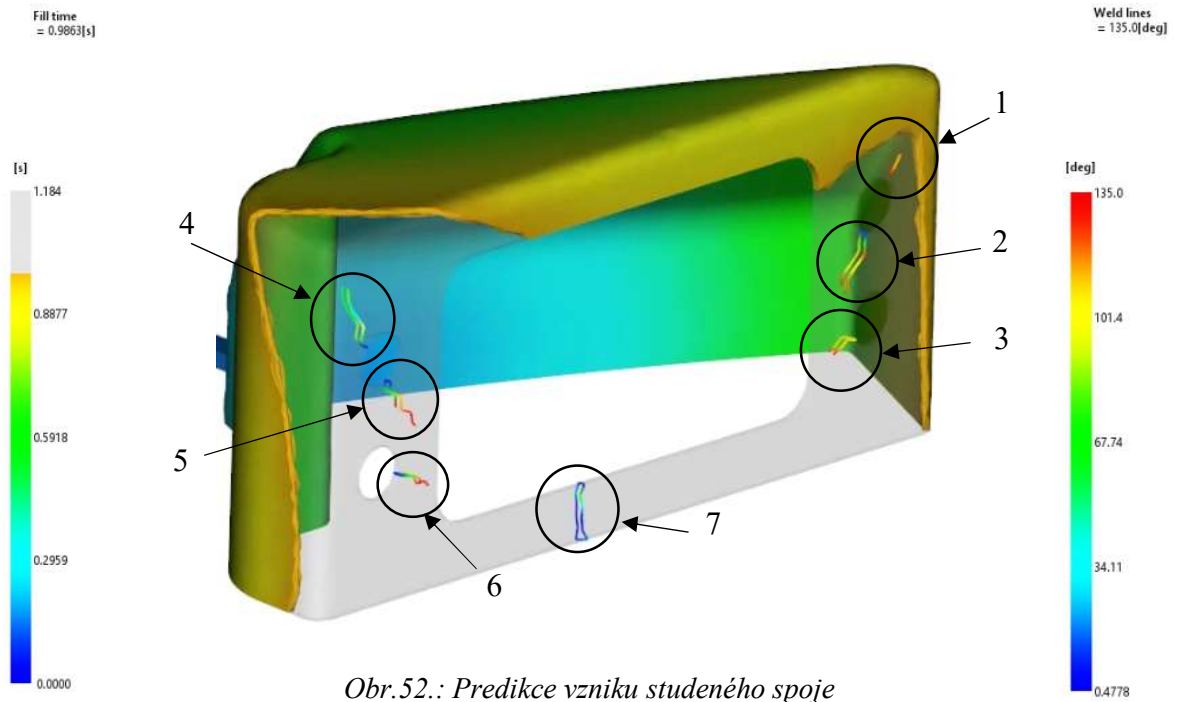
Obr. 51.: Výsledek analýzy objemového smrštění

10.8 Studené spoje

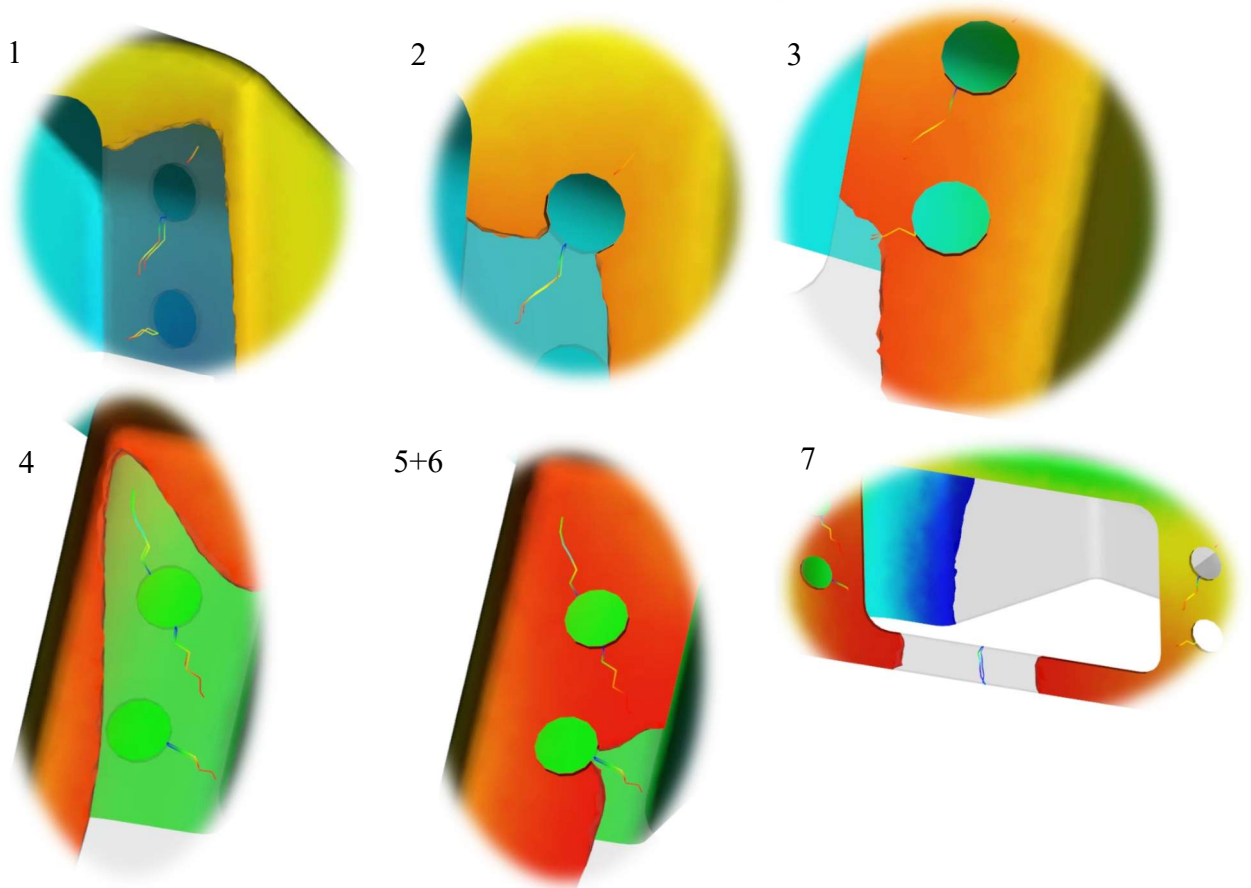
Analýza studených spojů předpovídá vznik mechanicky nejslabších míst v oblasti spojení taveninových čel. Modrá barva na barevné škále ve výsledku studených spojů odpovídá přímému čelnímu střetu. Na obrázku je plnění dutiny v čase 0,98 sekund a zobrazení očekávaných studených spojů. Studené spoje, jak šlo očekávat, vzniknou po obtečení otvorů a poté na konci celého cyklu.

Taveninová čela se spojují buď čelně, nebo tangenciálně.

V místě studeného spoje dochází ke ztrátě pevnosti a tím je to nejslabší místo na vstřikovaném výrobku a je nutno se zde vyhnout koncentraci napětí. Zvýšením teploty taveniny se zvyšuje pevnost v místě spojení taveninových proudů, protože při vyšší teplotě je intenzita tepelného pohybu vyšší a pohyb molekulárních řetězců v tomto místě rychlejší. Princip vzniku a eliminace studených spojů je detailně popsán v kapitole 1.4.2 Studený spoj této diplomové práce.



Obr. 52.: Predikce vzniku studeného spoje



Obr. 53.: Detail na vznik jednotlivých studených spoju

11 KONTROLNÍ ANALÝZA PEVNOSTI TVAROVÝCH ČÁSTÍ

Při návrhu formy s konformním systémem chlazení je zohledněna pevnost formy. Analýza pevnosti je závislá na použitém materiálu. Typické materiály pro technologii DMLS jsou detailně popsány v Tab. 3 a pro tvarové vložky forem je potřeba zvolit odolnější typy.

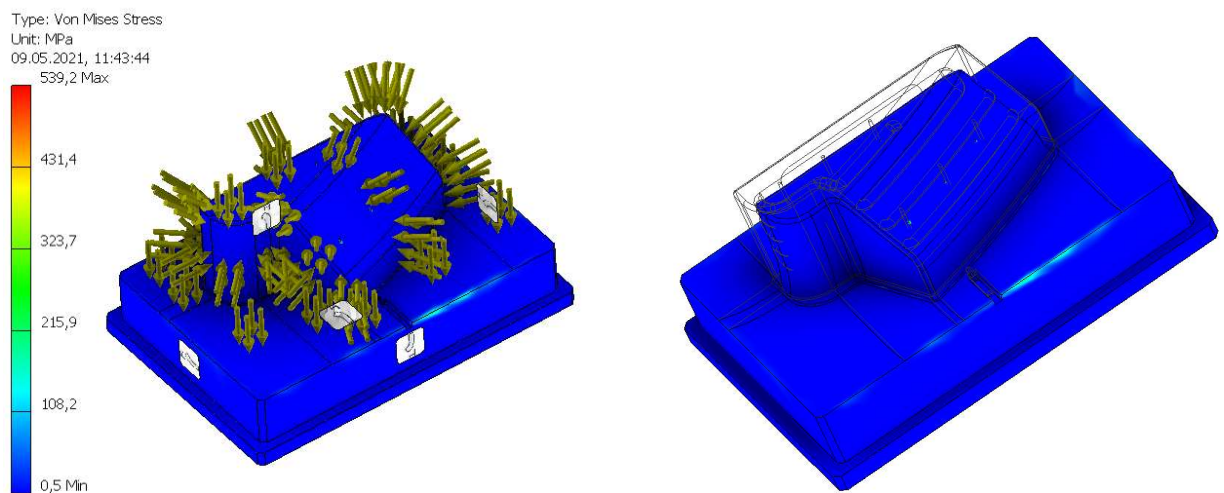
Pro následující analýzu byl použit materiál nástrojové oceli P-20, který je použit i pro experimentální výpočty v analýze Moldflow. Výrobce materiálu P-20 uvádí mez kluzu v rozmezí 827 – 862 MPa. Ve výsledcích bude zohledněn bezpečnostním přídatkem na Von Mises napětí, a to až do 20%.

Pro technologii DMLS je skvělou náhradou nástrojové oceli například Maraging Steel MS1, nabízející mez kluzu >1000 MPa.

Pevnostní analýza byla provedena v programu Autodesk Inventor 2021 za těchto podmínek:

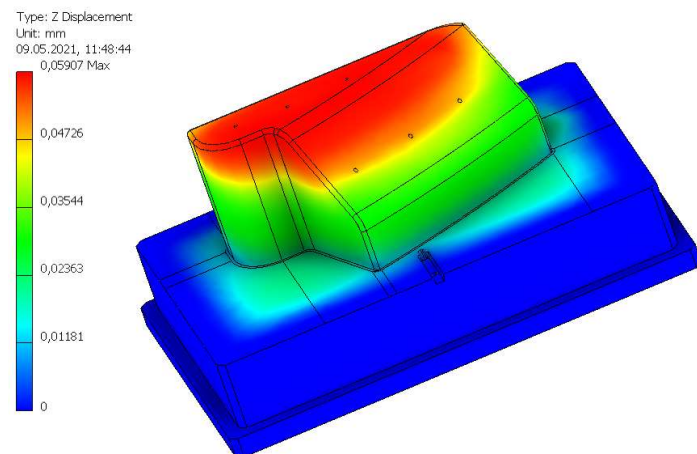
- Materiál: Nástrojová ocel P-20
- Zatížení: Maximální tlak 106 MPa.

Výsledné Von Mises napětí nesmí překročit mez kluzu zvoleného materiálu.

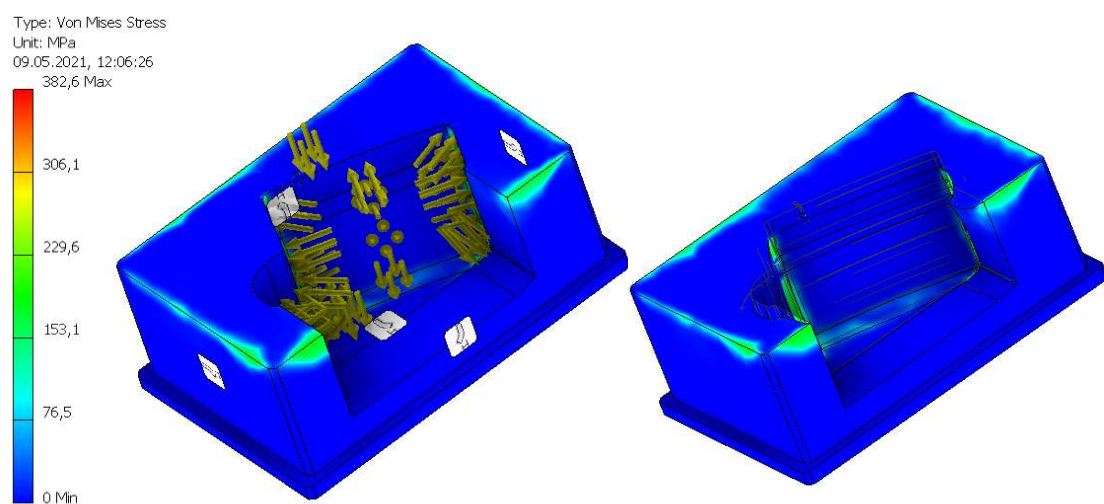


Obr. 54.: Pevnostní analýza tvárníku, zobrazení uchycení a zatížení a celková deformace (1x zvětšeno)

Maximální Von Mises je ve tvárníku 539,2 MPa (bezpečně ~650 MPa).

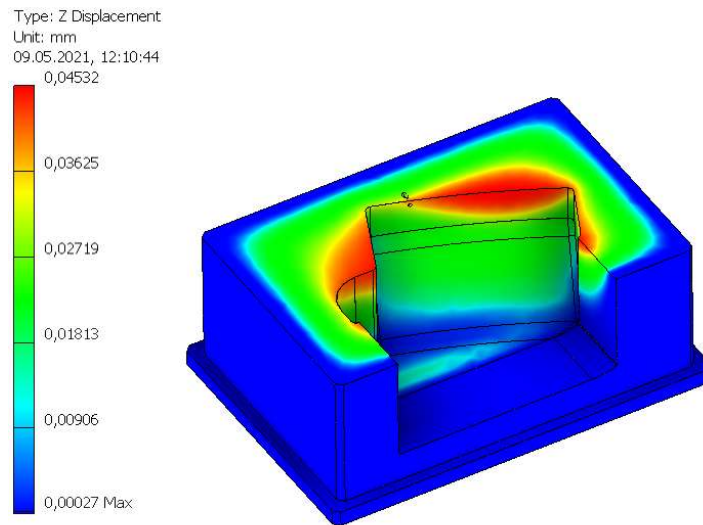


Obr. 55.: Zobrazení posunutí v ose Z tvárniku s konformním chlazením
Maximální posunutí je v ose směru vstřikování (osa Z) ve tvárniku 0,059 mm.



Obr. 56.: Pevnostní analýza tvárnice, zobrazení uchycení a zatížení a celkové deformace (zvětšeno 1x)

Maximální Von Mises je ve tvárnici 382,6 MPa (bezpečně ~460 MPa).



Obr. 57.: Zobrazení posunutí v ose Z tvárnice s konformním chlazením

Maximální posunutí je v ose směru vstřikování (osa Z) ve tvárnici 0,045 mm.

Tvarové části s konformním chlazením prošly pevnostní analýzou za dodržení podmínky i včetně bezpečnostního přírůstku 20%.

Materiál, který je skvělou alternativou k nástrojové oceli a zároveň je kompatibilní s technologií zpracování 3D tisku kovu je martenzitická ocel Maraging Steel MS1 s mezí kluzu >1000 MPa. Při volbě tohoto typu se dá se očekávat ještě větší odolnost než u nástrojové oceli P-20.

Von Misesova podmínka plasticity srovnává různé druhy napjatosti podle deformační energie potřebné na změnu tvaru.

12 KONSTRUKCE FORMY

Konstrukce formy se v této diplomové práci odvíjí od navrženého chladicího systému. Byly analyzovány tři typy chladicích systému a vybrán ten nejefektivnější, který bude součástí navrhovaného technologického zařízení pro tváření plastů. Návrh sestavy je realizován v programu Catia V5.

Forma má dvě dutiny, které se plní zvlášť ve stejný čas, pomocí vyváženého, rozvodného, studeného, vtokového systému. Zvolený vstříkovaný výrobek je na jeden cyklus produkován jako levý a pravý.

12.1 Materiály používané pro sestavu vstříkovací formy

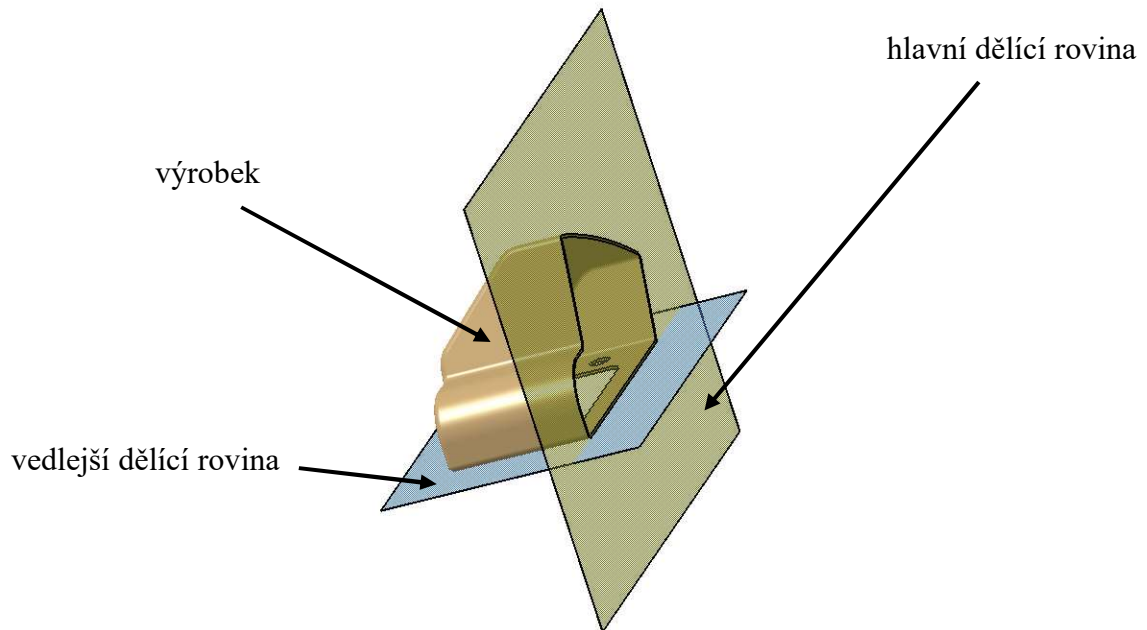
Formy jsou nákladné nástroje sestavené z funkčních a pomocných dílů. Mezi základní nároky na výrobu vstříkovací formy patří kvalita výrobku, vysoká životnost a nízké pořizovací náklady. Materiály použité pro konstrukci formy musí dále splňovat nároky jako odolnost proti určitým tlakovým silám vzniklých během procesu, odolnost proti opotřebení, dobré tepelné vlastnosti pro tepelnou výměnu a dobrou obrobiteľnosť. Proto je běžné, že různé části formy jsou z rozdílných ocelí. Tvárník a tvárnice musí být vyrobeny z oceli vhodné jakosti – nejčastěji z oceli třídy 19. Rám formy může být vyroben z nižších tříd oceli, jelikož potřebuje pouze vysokou tvrdost a obrobiteľnosť – například třída 12.

Materiál tvarových vložek je v tomto případě značen odlišně, jelikož musí být kompatibilní s technologií DMLS.

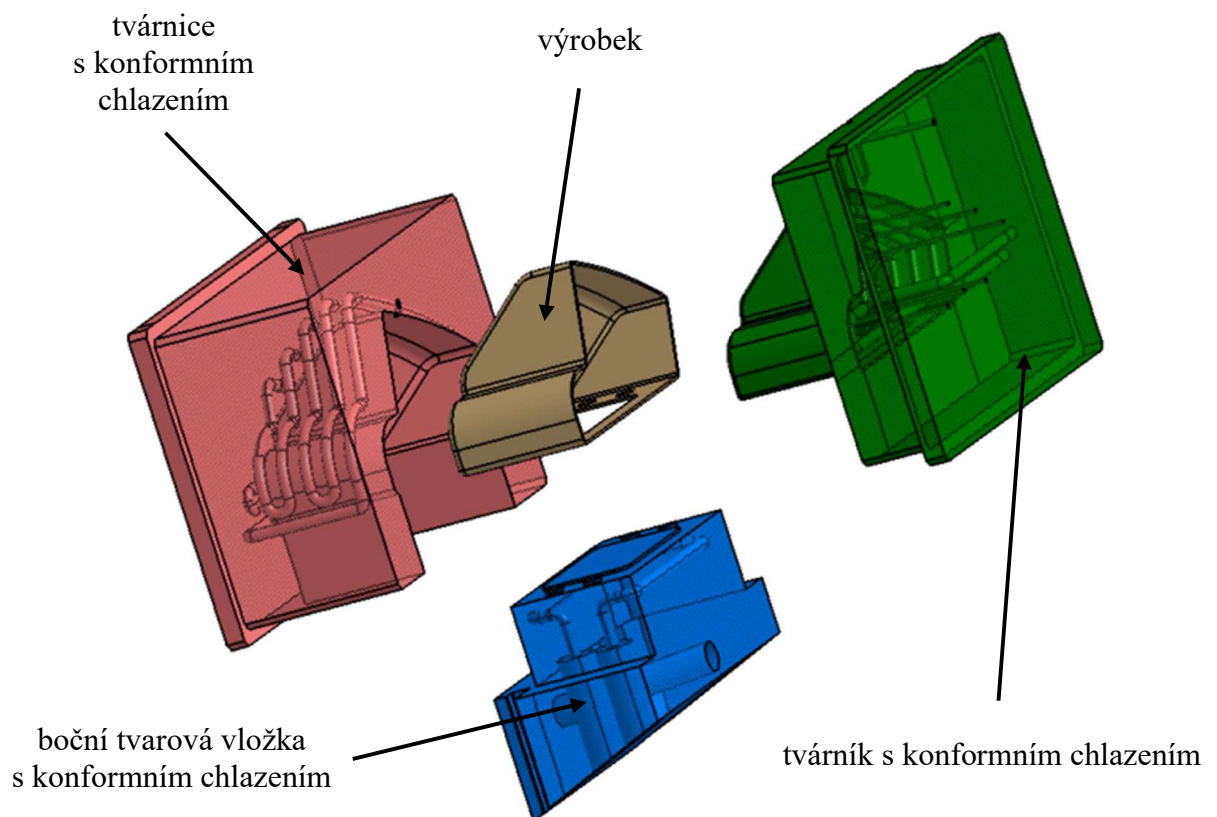
Jak již bylo zmíněno, je potřeba volit materiál s vyšší mezí kluzu, aby tvarové vložky odolaly generovanému tlaku v dutině formy.

Ideálním materiálem jako alternativa k nástrojové oceli a zároveň DMLS kompatibilitu je Maraging Steel MS1. Martenzitická ocel, detailně popsána výše v kapitole Materiálová kompatibilita.

12.2 Zaformování a tvarové části



Obr. 58.: Zobrazení hlavní a vedlejší dělicí roviny výrobku

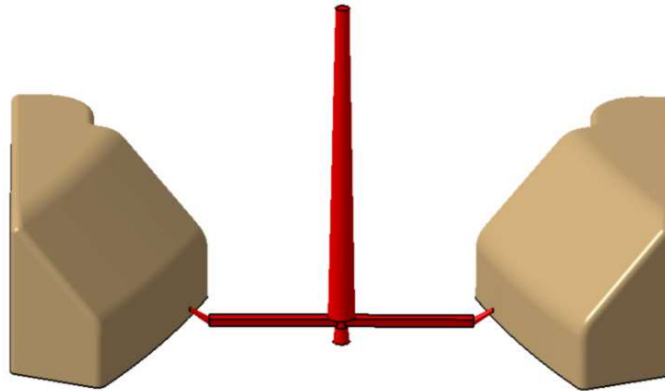


Obr. 59.: Vytvoření dutiny formy tvarovými částmi

Dutina vstřikovací formy definuje tvar vstřikovaného výrobku, velikost dutiny formy je zvětšena o velikost smrštění, které je doporučeno z materiálového listu podle ISO 294-4 0,4 – 0,7%. Na základě uvážení a výsledků z Moldflow analýzy o objemovém smrštění je zvolena horní hranice 0,7%.

12.3 Vtokový systém

Vtokovou vložkou je přiváděn polymer ze vstřikovacího stroje do rozvodného kanálu lichoběžníkového průřezu a dále přes kuželové vtokové ústí do dutiny formy. Za použití normalizovaného přídržovače vtoku, zůstává vtokový systém po otevření formy na pohyblivé straně a pomocí vyhazovačů vypadává z formy.



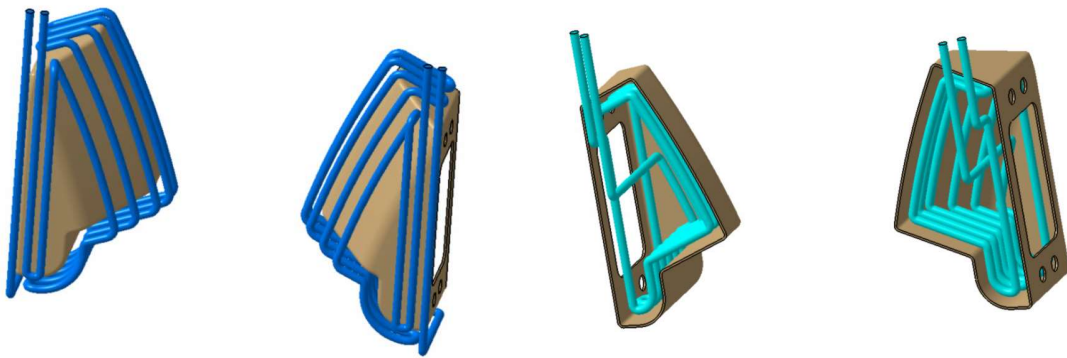
Obr. 60.: Navržený studený vtokový systém

12.4 Temperační systém

Temperační systém je několik chladících kanálů kruhového průřezu o průměru 8 mm navržených tak, aby co nejlépe kopíroval tvar výrobku.

Tvarové vložky jsou tedy zhotoveny technologií DMLS a chladící médium je přiváděno přes normalizované přípojky HASCO.

Použití pokročilé technologie jako je DMLS k výrobě tvarových částí pro vstřikovací formy je moderním způsobem k optimalizaci procesu vstřikování. Navržení optimálního konformního systému je konstrukční výzvou, jelikož je oproti konvenčním způsobům o dost méně technologických omezení. Průřez kanálu, rozměry i zaoblení různých přechodů jsou téměř libovolné. Zvýšená opatrnost je kladena na umístění vůči vyhazovačům a na celkové pevnosti formy.



Obr. 61.: Rozložení konformních temperačních kanálu kolem výrobku

12.5 Rám vstřikovací formy

Rám vstřikovací formy se skládá ze tří částí:

- nepohyblivá (pravá) část,
- pohyblivá (levá) část,
- vyhazovací systém.

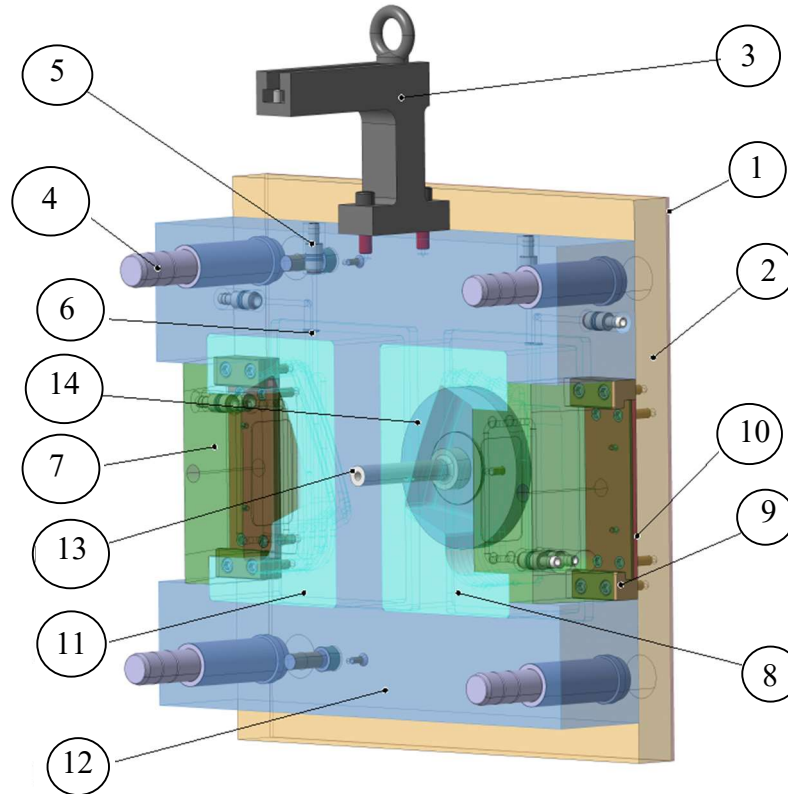
12.5.1 Pevná část formy

Pevná část vstřikovací formy se také označuje jako pravá strana. Skládá se z izolační, upínací a kotevní desky. V kotevní desce jsou umístěny tvarové vložky, které jsou zasazeny vsuvně až po osazení zaručující snadnou montáž a demontáž. Upínací deska slouží jako pojistný prvek proti posunutí tvárnice. Součástí pevné strany jsou vodící čepy, které zajišťují středění k pohyblivé straně formy. Desky jsou spojeny šroubovým spojením.

Dopravu taveniny do studeného vtokového systému a dále do dutiny formy zajišťuje vtoková vložka, která je pojištěna středícím kroužkem. Středící kroužek je upevněn šroubovým spojením v upínací desce a jeho funkce je dále středění vůči vstřikovacímu stroji.

V kotevní desce je umístěn posuvný mechanismus zajišťující boční odformování. Boční tvarová část je opatřena osazením k přesnému doléhání a zajištěna mechanismem kuličky a pružiny v koncové poloze při otevření formy. Pro snížení opotřebení je třecí plocha opatřena kluznou deskou, která je šrouby připevněna k upínací desce.

Přenastavitelné transportní rameno, které se také nachází na pravé straně formy, musí mít dostatečnou únosnost, v tomto případě bylo voleno zařízení od Meusburger s únosností 1200 kg, což je dostatečné pro navrhovanou formu hmotnosti cca 905 kg.



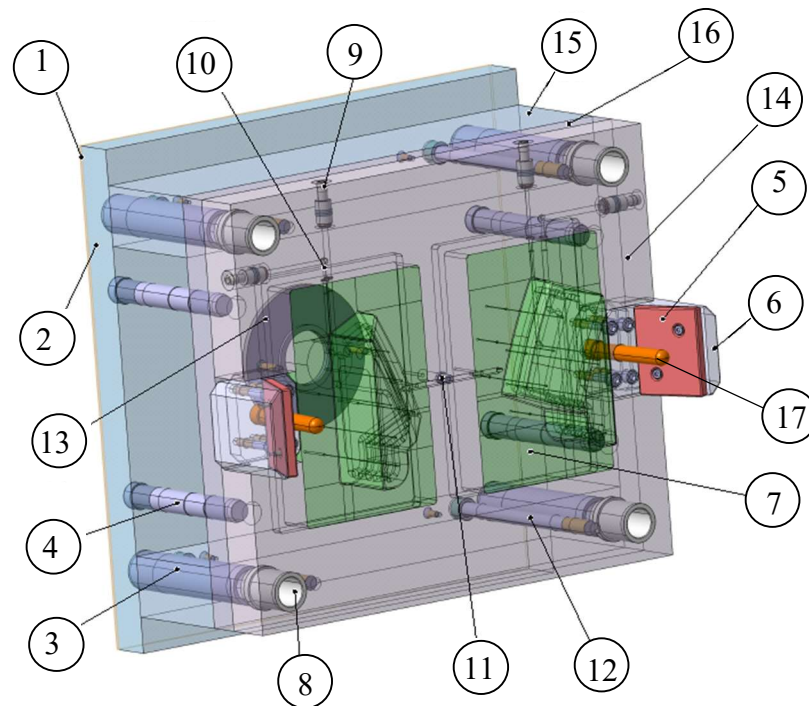
Obr. 62.: Pevná část formy

- 1 – izolační deska; 2- pravá upínací deska; 3 – nosné zařízení; 4 – vodící čep;
 5 – přípojka temperace; 6 – těsnění O – kroužek; 7 – boční posuvná tvarová vložka;
 8 – tvárnice pro výrobek pravé orientace; 9 – vodící lišta posuvného systému;
 10 – kluzná podložka posuvného systému; 11 – tvárnice pro výrobek levé orientace;
 12 – kotevní deska; 13 – vtoková vložka; 14 – pravý středící kroužek

12.5.2 Posuvná část formy

Na posuvné, nebo také levé straně vstřikovací formy se nachází izolační deska, upínací deska, dvě rozpěrné desky, opěrná a kotevní deska. Pro středění se používají vodící prvky a středící kroužek. Tvarové vložky jsou usazeny v kotevní desce stejným způsobem jako na straně pevné části formy. Jsou opatřeny osazením a jsou zajištěny opěrnou deskou vůči posunutí. Na levé straně se nachází normálie přidržovače vtoku. Nalisované vodící pouzdra slouží ke středění kotevní a opěrné desky a také středí vůči pravé straně formy. Průchozí otvory v opěrné desce jsou vrtané pro vedení válcových vyhazovačů. Temperační přípojky jsou zapuštěny v kotevní desce tak, aby bylo připojení temperační jednotky přístupné.

Rozpěrné desky vytváří funkční prostor pro vyhazovací systém. Desky jsou spojeny rozebíratelným šroubovým spojením. Středící kroužek na levé straně slouží ke středění formy vůči vstřikovacímu stroji. Na levé straně se nachází šikmý čep a kluzná podložka na posuvném systému, která zajišťuje plynulý pohyb posuvného mechanismu uvnitř formy.



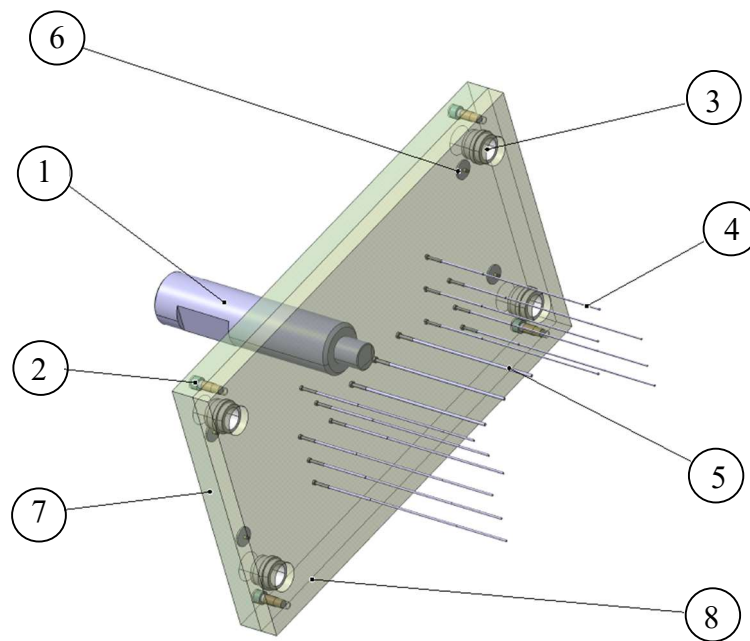
Obr. 63.: Posuvná část formy

- 1 – izolační deska; 2 - levá upínací deska; 3 – vodící čep; 4 – vodící čep vyhazovacího systému;
 5 – kluzná podložka posuvného mechanismu; 6 – posuvný mechanismus; 7 – tvárník;
 8 – vodící pouzdro; 9 – přípojka temperace; 10 – těsnění O – kroužek; 11 – přidržovač vtoku;
 12 – šroub; 13 – levý středící kroužek; 14 – levá kotevní deska; 15 – rozpěrná deska;
 16 – opěrná deska; 17 – šikmý čep

12.5.3 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém tvoří dvě desky, vodící prvky, táhlo, které zajišťuje pohyb a vyhazovače. V kotevní desce vyhazovacího systému jsou nalisovány prizmatické a válcové vyhazovače. Vyhazovačům, které tvoří tvarovou část, je zabráněno rotaci. Vodící pouzdro středí vyhazovací systém k pohyblivé straně formy a také vzájemně středí desky vyhazovacího systému. Spojení desek je pomocí šroubů. Dosedací podložky plní funkci dorazu.

Celkem bylo použito 16 vyhazovačů, z toho 3 jsou válcové a slouží k vyhození vtokového zbytku, zbytek jsou prizmatické.



Obr. 64.: Vyhazovací systém

1 – táhlo vyhazovacího systému; 2 – šroub; 3 – vodící pouzdro; 4 – válcový vyhazovač;

5 – válcový vyhazovač vtokového systému; 6 – dosedací podložka;

7 – opěrná deska vyhazovacího systému; 8 – kotevní deska vyhazovačů

13 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Volba vstřikovacího stroje se odvíjí od rozhodujících parametrů formy:

- rozměry mezi vodícími sloupky,
- množství vstřikovaného materiálu,
- velikost potřebné uzavírací síly,
- dostatečný vstřikovací tlak.

13.1 Rozhodující parametry pro volbu stroje

Vstřikovací stroj musí mít vzdálenost mezi sloupy větší než 696x696 mm.

Potřebné množství vstřikovaného materiálu je dle Moldflow 238 cm³ a stroj tedy musí mít kapacitu plastikační jednotky minimálně 262 cm³ (10% rezerva).

Potřebná uzavírací síla stroje je z analýzy Moldflow stanovena na 4643 kN (při rezervě 20%).

Vstřikovací tlak stroje je vyžadován minimálně 1166 bar (rezerva 10%).

Tab. 8.: Parametry potřebné pro volbu stroje

Analýza Moldflow a CAD data		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Uzavírací síla	4256	kN
Forma		
Šířka	696	mm
Délka	696	mm
Výška	536	mm
Násobnost	2	-
Objem a tlak		
Vtokový systém	22,5	cm ³
Výrobek	107,75	cm ³
Vstřikovací tlak	105,9	MPa

13.2 Volba stroje

Nejpodstatnějším faktorem ovlivňující volbu stroje je v tomto případě velikost uzavírací síly. Hodnotu 4643 kN je schopen udržet stroj Arburg Allrounder 920 H – 5000 – 3200 (70). Ostatní faktory jsou tímto strojem také dodrženy.

Tab. 9.: Volba stroje

Parametr	Forma	Stroj
Vzdálenost mezi sloupky [mm]	696	920
Uzavírací síla [kN]	4643	5000
Vstřikovací tlak [bar]	1166	2500
Objem vstřikovaného materiálu [cm ³]	262	1232
Minimální výška formy [mm]	536	400
Průměr středícího kroužku [mm]	200	200H7
Průměr šneku [mm]	-	70



Obr. 65.: Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 920 H

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo optimalizovat proces vstřikování z hlediska celkové efektivity, zejména zkrácením času cyklu a zlepšením kvality. Byl vybrán výrobek, pro který byly navrženy tři typy temperačních systémů. Od okruhů vyrobených vyvrtáváním, přes systém Contura, po technologicky pokročilý systém konformního chlazení, který se realizuje technologií 3D tisku kovu, přesněji DMLS. Pro navržené temperační systémy byla provedena 3D FEM Cool Fill Pack Warp analýza v programu Autodesk Moldflow Synergy 2016 a na základě jejich výsledků byla vybrána ta nejefektivnější možnost. S touto vybranou variantou se dále pracovalo při návrhu moderního tvářecího nástroje.

Teoretická část této práce rozebírá technologii vstřikování v pokročilé fázi a to tak, že je postupně rozebrána reologie vstřikování a s tím spojená problematika, poté se nahlíží do problematiky nejdelšího časového úseku vstřikovacího cyklu – chlazení.

Způsoby konstrukce chladících kanálů jsou detailně popsány a v pozdější části analyzovány v software.

Zkoumaným výrobkem je prototypní automobilový kryt zrcátka, který je vhodný pro tuto problematiku zejména kvůli komplexnímu tvaru, co se týče zaoblení, tloušťky a přechodům.

Materiálem pro zpracování je ABS Elite HH1827 od INEOS. Pro výrobní parametry byl zvolen vstřikovací stroj Arburg Allrounder 920H.

Byla navržena moderní vstřikovací forma pro výrobu zadaného dílu realizovaná s technologií konformního chlazení, což předpokládá výrobu tvarových částí pomocí pokročilé technologie DMLS. Materiál tvarových vložek je označen jako Maraging Steel MS1, který je kompatibilní s technologií DMLS a dosahuje vysoké meze kluzu.

Pro úspěšné dosažení požadovaného tvaru je ve formě umístěn posuvný mechanismus, který taktéž obsahuje konformní kanály chlazení a pohyb zajišťuje šikmý kolík umístěný v posuvné části formy.

Součástí této práce je 3D model sestavy vstřikovací formy včetně výkresové dokumentace s kusovníkem, 3D model výrobku a soubory jednotlivých Moldflow analýz.

Celkové rozměry navržené formy jsou 696 x 969 x 536 mm a hmotnost cca 905 kg.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 9788073002503. 247 s.
- [2] Hong-Seok Park, Xuan-Phuong Dang, Dinh-Son Nguyen, Saurabh Kumar, *Design of Advanced Injection Mold to Increase Cooling Efficiency*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology, 2020
- [3] J. Sedlak, V. Sekerka, M. Slany, K. Kouril, O. Zimcik, J. Chladil, L. Rozkosny. *Production of prototype parts using direct metal laser sintering technology*, Acta Polytechnica, 2015
- [4] *Temperace vstřikovacích forem* [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/08.html>
- [5] John Vlachopoulos, Nickolas D. Polychronopoulos, *Basic Concepts in Polymer Melt Rheology and Their Importance in Processing*, ResearchGate 2020
- [6] ČSN EN ISO 1133-1 (640861) *Plasty – Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů – Část 1: Standardní metoda* [online]. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/640861-csn-en-iso-1133-1_4_91023.html
- [7] *Capillary Rheometer* [online]. Dostupné z: <http://www.polymertechnology.it/bacheca/fluid/Esercitazione081105b.pdf>
- [8] *DirectMetal 20 material for EOSINT M 250 Xtended* [online]. Dostupné z: <https://www.3d-prototyp.si/files/directmetal-20.pdf>
- [9] BRYCE, Douglas M., *Plastic Injection Molding: manufacturing proces fundamentals*, Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c1996, 277s. ISBN 0872634728
- [10] CAMPO, Alfredo. *The Complete Part Design Handbook: For Injection Molding of Thermoplastics*. Mnichov: Hanser Gardner Publications, 2006, ISBN 1569903751.
- [11] Zhihao Wie, Jiakai Wu, Nan Shi, Lei Li, *Review of conformal cooling system design and additive manufacturing for injection molds*, AIMS. 18, 2020
- [12] *Konformní chlazení* [online]. Jaroměř. Dostupné z: <http://www.konformni-chlazení.cz/>
- [15] *Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering* [online]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [16] *DirectMetal and DirectSteel materials for EOSINT M 270* [online]. Dostupné z: https://www.innomia.cz/files/publishing/dm20-eng_642.pdf
- [17] *Aluminium AlSi10Mg* [online]. Dostupné z: <https://www.zare.it/en/materials/aluminium-alsi10mg>
- [18] *Cobalt Chrome MPI DMLS Additive Manufacturing Material* [online]. Dostupné z: <https://proto3000.com/materials/dmls-cobalt-chrome-mp1/>
- [19] K. Monkova, I. Zetkova, L. Kucerova, M. Zetek, P. Monka, M. Dana, *Study of 3D printing direction and effects of heat treatment on mechanical properties of MSI maraging steel*, Archive of Applied Mechanics, 2019.
- [20] *EOS MaragingSteel MSI Material Data Sheet* [online]. Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/werkzeugstahl_ms1_cx/ms1/ms-ms1-m280_m290_400w_material_data_sheet_05-14_en.pdf

- [21] *NeoNickel Slitina Alloy 718* [online]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-niklu/alloy-718/>
- [22] *EOS StainlessSteel GP1 for EOSINT M 270* [online]. Dostupné z: https://dmlstechnology.com/images/pdf/EOS_StainlessSteel_GP1.pdf
- [23] *EOS StainlessSteel PH1* [online]. Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/stainlesssteel/ss-ph1-m290_material_data_sheet_01-17_en.pdf
- [24] *EOS Titanium Ti64* [online]. Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/titan/ti64/eos_ti-ti64_9011-0014_m400-4_material_data_sheet_06-18_en.pdf
- [25] J. P. Beaumont, *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2007, xvi, 308s. ISBN: 978-1-56990-421-3.
- [26] K. Rubesova, S. Jenicek, J. Kana, I. Zetkova. *Microstructure of MSI Maraging Steel in 3D-Printed Products After Semi-Solid Processing*, ResearchGate, 2016.
- [27] DEALY, John M. a Kurt F. WISSBRUN. *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing* [online]. Boston, MA: Springer US, 1990 [cit. 2020-11-30]. ISBN 978-1-4615-9740-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4615-9738-4
- [28] *Understanding and optimizing weld lines in thermoplastic molding* [online]. Dostupné z: https://www.covestro.com/en/media/newsletters/healthcare-polymers/2018_10_understanding-and-optimizing-weld-lines-in-thermoplastic-molding.
- [29] TOMIS, František. *Gumárenská a plastikářská technologie: Zpracovatelské procesy*. 2. přepr. vyd. Brno: VUT, 1987. ISBN gumárenská a plastikářská technologie.
- [30] JANOŠTÍK, Václav. *Vliv pigmentů na vlastnosti plastového výrobku*. Zlín, 2019. Teze disertační práce. Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická. Vedoucí práce Michal Staněk.
- [31] HYNEK, Martin a kolektiv. *Studené a živé vtokové systémy*. Publikace fakulty strojní. Západočeská univerzita v Plzni. 2013.
- [32] Suchana Akter Jahan, Hazim El-Mounayri, *A Thermomechanical Analysis of Conformal Cooling Channels in 3D Printed Plastic Injection Molds*, Applied Sciences MDPI. 2018
- [33] *Vliv reziduálních napětí na kvalitu vstříkovaných dílů*. [online]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/vliv-rezidualnich-napeti-na-kvalitu-vstrikovanych-dilu.html/c/1713/>
- [34] HYNEK, Martin a kolektiv. *Temperace vstříkovacích forem*. Publikace fakulty strojní. Západočeská univerzita v Plzni. 2013.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Význam	Jednotka
s	Tloušťka	mm
T_M	Teplota tání	°C
T_w	Průměrná teplota formy	°C
T_E	Vyhazovací teplota polymeru	°C
a	Tepelná difuzivita polymeru	m ²
i_m	Latentní teplo	J/kg
x	Vzdálenost mezi chladicími kanály	mm
k_{st}	Tepelná vodivost materiálu formy	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
d	Průměr chladicího kanálu	mm
S_e	Geometrický faktor tvaru	-
T_c	Teplota chladicího média	°C
y	Vzdálenost od středu kanálu k povrchu formy	mm
Re	Reynoldsovo číslo	-
α	Součinitel přestupu tepla	W/m ²
u	Rychlost proudění chladicího média	mm/s
ν	Kinematická viskozita	m ² /s
p	Tlak	MPa
η	Dynamická viskozita	Pa·s
τ	Smykové napětí	MPa
ε̇	Rychlost tahové deformace	s ⁻¹
γ̇	Rychlost smykové deformace	s ⁻¹
n	Index neneutonského chování	-
m	Index konzistence	Pa·s ⁿ
ITT	Index toku taveniny	g/10min
γ̇_A	Zdnálivá rychlost smykové deformace	s ⁻¹
γ̇_C	Korigovaná rychlost smykové deformace	s ⁻¹
η₀	Viskozita při nulovém smykovém napětí	Pa·s
λ	Relaxační čas	s ⁻¹
a	Ostrost přechodu do pseudoplastické oblasti	-
v	Měrný objem	g/cm ³
K	Empirická konstanta reometrické geometrie	-
Q	Průtok	m ³ /s
RT	Čas pro znovu zapletení polymerních řetězců	s
c_p	Měrná tepelná kapacita	J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹
k_p	Tepelná vodivost polymeru	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
h_c	Koeficient přestupu tepla na rozhraní formy a polymeru	W·m ⁻² ·K ⁻¹

PA	Polyamid	-
PC	Polykarbonát	-
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren	-
SAN	Styren-akrylonitrilová pryskyřice	-
PBT	Polybutyltereftalát	-
PP	Polypropylen	-
PE	Polyetylen	-

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.: Graf závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace a tahové viskozity na rychlosti tahové deformace pro materiál LDPE a teploty 190°C, 210°C, 230°C [5]....</i>	13
<i>Obr. 2.: Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace typů kapalin [5]</i>	14
<i>Obr. 3.: Schématické zobrazení toku taveniny do dutiny formy [31]</i>	16
<i>Obr. 4.: Fontánový tok v dutině formy [30]</i>	18
<i>Obr. 5.: Vliv smykové viskozity na tvar čela taveniny [30]</i>	19
<i>Obr. 6.: Čelní spojení taveninových proudů a vznik studeného spoje [28].....</i>	20
<i>Obr. 7.: Úprava polohy vtokového ústí k odstranění jevu Jetting [30].....</i>	21
<i>Obr. 8.: Vliv distribuce molekulární hmotnosti (MWD) na viskozitu [5]</i>	23
<i>Obr. 9.: Vliv různých parametrů na viskozitu materiálu [5].....</i>	23
<i>Obr. 10.: Vstřikovací cyklus popsán grafem [29]</i>	24
<i>Obr. 11.: PvT diagram vstřikovacího cyklu [2][30]</i>	25
<i>Obr. 12.: Pracovní diagram vstřikovacího stroje [30]</i>	27
<i>Obr. 13.: Model tepelného toku (vlevo) a schéma chladicího systému ve formě (vpravo) [2]</i>	32
<i>Obr. 14.: Příklad závislosti chladicího času na teplotě formy [2]</i>	34
<i>Obr. 15.: Systém plochých přepážek a princip funkce [4]</i>	38
<i>Obr. 16.: Schématické znázornění funkce přepážky – Baffle [4].....</i>	38
<i>Obr. 17.: Systém spirálových přepážek a princip funkce [4]</i>	39
<i>Obr. 18.: Systém fontánek a princip funkce [4]</i>	40
<i>Obr. 19.: Schématické znázornění funkce fontánky [4]</i>	40
<i>Obr. 20.: Systém Contura a princip funkce [4]</i>	41
<i>Obr. 21.: Příklady aplikace konformního chlazení [12]</i>	42
<i>Obr. 22.: Schéma principu DMLS technologie [3].....</i>	44
<i>Obr. 23.: Postupné zobrazení vzniku součásti technologií DMLS [16].....</i>	45
<i>Obr. 24.: Vstřikovaný výrobek</i>	52
<i>Obr. 25.: Výsledek analýzy polohy vtoku a zobrazení volby umístění</i>	53
<i>Obr. 26.: Výsledek analýzy plnění na základě umístění vtoku.....</i>	54
<i>Obr. 27.: Konstrukce temperačního okruhu zhotoveného vrtáním</i>	56
<i>Obr. 28.: Konstrukce temperačních kanálů systémem Contura</i>	56
<i>Obr. 29.: Konstrukce temperačních kanálů systémem konformního chlazení.....</i>	57
<i>Obr. 30.: Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty – vrtaná verze.....</i>	60
<i>Obr. 31.: Rychlost proudění v chladicím kanálu – vrtaná verze</i>	60
<i>Obr. 32.: Teplotní pole chladicího kanálu – vrtaná verze.....</i>	61

<i>Obr. 33.: Teplotní pole pravé tvarové vložky – vrtaná verze</i>	62
<i>Obr. 34.: Deformace výrobku – vrtaná verze</i>	62
<i>Obr. 35.: Čas potřebný pro vyhození – verze Contura</i>	63
<i>Obr. 36.: Rychlost proudění v kanálu – verze Contura.....</i>	64
<i>Obr. 37.: Teplotní pole v chladicím kanálu – verze Contura</i>	64
<i>Obr. 38.: Teplotní pole pravé tvarové vložky – verze Contura.....</i>	65
<i>Obr. 39.: Deformace výrobku – verze Contura</i>	65
<i>Obr. 40.: Čas potřebný pro vyhození – konformní systém chlazení.....</i>	66
<i>Obr. 41.: Rychlost v kanálu – konformní systém chlazení.....</i>	67
<i>Obr. 42.: Teplotní pole v chladicím okruhu – konformní systém chlazení.....</i>	67
<i>Obr. 43.: Teplotní pole pravé tvarové vložky – verze konformního chlazení.....</i>	68
<i>Obr. 44.: Deformace výrobku – verze konformního chlazení.....</i>	68
<i>Obr. 45.: Čas plnění.....</i>	70
<i>Obr. 46.: Tlak při přepnutí na dotlak.....</i>	71
<i>Obr. 47.: Závislost tlaku na čase během celého cyklu vstřikování</i>	72
<i>Obr. 48.: Rychlost smykové deformace</i>	73
<i>Obr. 49.: Vzduchové kapsy</i>	73
<i>Obr. 50.: Průběh uzavírací síly v čase</i>	74
<i>Obr. 51.: Výsledek analýzy objemového smrštění.....</i>	75
<i>Obr.52.: Predikce vzniku studeného spoje</i>	76
<i>Obr. 53.: Detail na vznik jednotlivých studených spojů.....</i>	76
<i>Obr. 54.: Pevnostní analýza tvárniku, zobrazení uchycení a zatížení a celková deformace (1x zvětšeno)</i>	77
<i>Obr. 55.: Zobrazení posunutí v ose Z tvárniku s konformním chlazením</i>	78
<i>Obr. 56.: Pevnostní analýza tvárnice, zobrazení uchycení a zatížení a celkové deformace (zvětšeno 1x).....</i>	78
<i>Obr. 57.: Zobrazení posunutí v ose Z tvárnice s konformním chlazením.....</i>	79
<i>Obr. 58.: Zobrazení hlavní a vedlejší dělicí roviny výrobku</i>	81
<i>Obr. 59.: Vytvoření dutiny formy tvarovými částmi.....</i>	81
<i>Obr. 60.: Navržený studený vtokový systém</i>	82
<i>Obr. 61.: Rozložení konformních temperačních kanálů kolem výrobku</i>	83
<i>Obr. 62.: Pevná část formy.....</i>	84
<i>Obr. 63.: Posuvná část formy</i>	85
<i>Obr. 64.: Vyhazovací systém.....</i>	86
<i>Obr. 65.: Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 920 H.....</i>	88

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1.: Doporučené teploty pro vybrané materiály [9]</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 2.: Doporučené rozměry temperačního kanálu [10]</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 3.: Přibližné hodnoty vybraných materiálů [8] [17-19] [21-24] [26]</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 4.: Vlastnosti zvoleného materiálu ABS Elite HHI827</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 5.: Nastavení procesních parametrů – krok chlazení</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 6.: Nastavení procesních parametrů – krok plnění</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 7.: Srovnání parametrů zkoumaných systémů</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 8.: Parametry potřebné pro volbu stroje</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 9.: Volba stroje</i>	<i>88</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list

Příloha P II: Výkresová dokumentace:

- Řezy vstříkovací formou (formát A0),
- pohledy do stran formy (formát A3),
- kusovník (formát A4).

Příloha P III: CD:

- 3D model sestavy vstříkovací formy,
- 3D model výrobku,
- Moldflow analýzy chladících systémů.

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST 1/3



Lustran Elite 1827

Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

TECHNICAL
DATASHEET

DESCRIPTION

Lustran® Elite 1827 resin is an injection molding grade of ABS (acrylonitrile butadiene styrene) for high-heat applications in the automotive market. It provides high heat resistance, low gloss, toughness, and easy flow for processing molded-in color parts.

FEATURES

- SAE J1685: ABS0111
- High heat resistance
- Low gloss
- Easy flow
- UL 94 HB rated

APPLICATIONS

- AB pillars
- Door panels
- Console and console trim
- Lamp housings

Property, Test Condition	Standard	Unit	Values
Rheological Properties			
Melt Flow Rate, 230 °C/3.8 kg	ASTM D 1238	g/10 min	4
Melt Flow Rate, 220 °C/10 kg	ASTM D 1238	g/10 min	13
Mechanical Properties			
Izod Notched Impact Strength, 23 °C (73 °F)	ASTM D 256	ft-lb/in	3.4
Tensile Stress at Yield, 23 °C	ASTM D 638	psi	5700
Tensile Modulus	ASTM D 638	psi x 10 ⁹	-
Elongation, Failure	ASTM D 638	%	50
Flexural Modulus, 23 °C	ASTM D 790	psi x 10 ⁹	340
Flexural Stress at 5% Deflection	ASTM D 790	psi	10100
Thermal Properties			
Vicat Softening Temperature, B/1 (120 °C/h, 10N)	ASTM D 1525	°F	233
DTUL @ 264 psi - Unannealed	ASTM D 648	°F	181
DTUL @ 66 psi - Unannealed	ASTM D 648	°F	203
Coefficient of Linear Thermal Expansion	ASTM D 696	10 ⁻⁴ (-4)/°F	0.46
Other Properties			
Density	ASTM D 792	-	1.05

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST 2/3



Lustran Elite 1827 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

TECHNICAL DATASHEET

Property, Test Condition	Standard	Unit	Values
Processing			
Linear Mold Shrinkage	ASTM D 955	in/in	0.004 - 0.006
Drying Temperature		°F	175
Drying Time		h	2-4

Typical values for uncolored products

SUPPLY FORM

Lustran® ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) resins are available in bulk railcar, bulk truckload and 726kg box quantities.

REGULATORY COMPLIANCE

Please refer to Styrolution web site or contact Styrolution Technical Service for further information.

PROCESSING

A reciprocating screw injection molding machine is preferred. A general-purpose screw with a 2.5:1 compression ratio is suggested. A minimum L/D ratio of 20:1 will ensure melt homogeneity. For best part quality, use the lower range of the recommended melt temperature with minimum barrel residence time. To avoid excessive residence time in the barrel, volume and weight of the shot should be balanced against barrel capacity and injection stroke. A shot weight-to-machine capacity ratio of 0.5-0.75 is recommended. A mold temperature of 110°-150°F (45°-65°C) is recommended for development of maximum gloss and strength, with the hotter end of this range preferred.

PRODUCT SAFETY

Safety Data Sheets and product labels provide information concerning the health and safety precautions that must be observed when handling the Styrolution products mentioned in this publication. No adverse effects on the health of processing personnel have been observed if the products are correctly processed and the production areas are suitably ventilated. For styrene, acrylonitrile, alpha-methyl styrene, maleic anhydride and 1, 3-butadiene, the maximum allowable workplace concentrations must be observed according to current local and federal regulations. Before working with any of these products, you must read and become familiar with the available information on their hazards, proper use, and handling. This cannot be overemphasized. This information is available in safety data sheets and on product labels. If there are questions or concerns, consult your Styrolution representative or contact the Product Safety and Regulatory Affairs Department at Styrolution.

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST 3/3



Lustran Elite 1827

Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

TECHNICAL
DATASHEET

DISCLAIMER

The above information is provided in good faith. INEOS Styrolution is not responsible for any processing or compounding which may occur to product finished articles, packaging materials or their components. Further, INEOS Styrolution MAKES NO WARRANTY OR REPRESENTATION OF ANY KIND, REGARDING THE INFORMATION GIVEN OR THE PRODUCTS DESCRIBED, AND EXPRESSLY DISCLAIMS ALL IMPLIED WARRANTIES, REPRESENTATIONS AND CONDITIONS, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ALL WARRANTIES AND CONDITIONS OF QUALITY, MERCHANTABILITY AND SUITABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Responsibility for use, storage, handling and disposal of the products described herein is that of the purchaser or end user.