

Návrh moderní vstřikovací formy s využitím konformního chlazení

Bc. Jan Fatr

Diplomová práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jan Fatr
Osobní číslo:	T20783
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh moderní vstřikovací formy s využitím konformního 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: **3. ledna 2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 autorského zákona mohou 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 diplomová práce skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na 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 totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis studenta

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47b Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje bakalářské, diplomové, disertační a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy. Vysoká škola disertační práce nezveřejňuje, byla-li již zveřejněna jiným způsobem.

(2) Bakalářské, diplomové, disertační a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

(4) Vysoká škola může odložit zveřejnění bakalářské, diplomové, disertační a rigorózní práce nebo jejich částí, a to po dobu trvání překážky pro zveřejnění, nejdéle však na dobu 3 let. Informace o odložení zveřejnění musí být spolu s odůvodněním zveřejněna na stejném místě, kde jsou zveřejňovány bakalářské, diplomové, disertační a rigorózní práce, již se týká odklad zveřejnění podle věty první, jeden výtisk práce k uchování ministerstvu.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní vnitřní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

3) 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konstrukcí vstřikovací formy a optimalizací jejího temperačního systému s cílem zkrácení doby chlazení, což je nejdélší částí vstřikovacího cyklu. Optimalizace je dosaženo s pomocí konformní temperace, která zvyšuje efektivitu odvodu tepla z dutiny formy přesným kopírováním tvaru dutiny. Výrobu takového systému umožňuje využití aditivní technologie výroby součástí. Výsledky jsou podpořeny simulací procesu vstřikování různých temperačních systémů.

Klíčová slova: Vstřikování, konformní temperace, optimalizace chlazení, aditivní technologie, CAE simulace

ABSTRACT

The aim of this thesis is a design of injection mold and optimization of its cooling system to shorten the cooling time, which leads to shorter injection cycle. Optimization is done by using a conformal cooling which improves overall effectiveness of heat removal from mold cavity by exact copying of the cavity shape. Making such system is possible thanks to additive manufacturing. Results are approved by simulations of the injection process with various cooling systems.

Keywords: Injection molding, conformal cooling, cooling optimization, additive technology, CAE simulation

V první řadě bych rád poděkoval zejména Ing. Václavu Janoščíkovi, Ph.D. za jeho velice užitečné rady, přátelské vedení a spolehlivou komunikaci při tvorbě této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mi byla bez výjimky vždy oporou po celou dobu studia.

Děkuji i všem spolužákům a pedagogům, jež jsem měl tu čest za dobu svého studia potkat, kteří byli vždy velice ochotní s vysvětlováním komplikovaných předmětů.

A v neposlední řadě děkuji také fakultě technologické, za umožnění studia v příjemném a přátelském prostředí, které mne dovedlo až k psaní těchto řádků své diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ TERMOPLASTŮ	13
1.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	13
1.2 PROCES VSTŘIKOVÁNÍ	14
1.2.1 Vstřikovací cyklus.....	14
1.2.2 Vliv doby plnění.....	16
1.2.3 Procesní okno	16
1.2.4 pVT diagram	17
1.2.5 Fontánový tok.....	19
1.3 TERMOPLASTICKÉ POLYMERY PRO VSTŘIKOVÁNÍ.....	20
1.3.1 Amorfnní termoplasty	20
1.3.2 Semikrystalické termoplasty	21
1.3.3 Charakteristické teploty termoplastů.....	22
1.4 REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN	22
1.4.1 Viskozita	23
1.4.2 Debořino číslo	24
1.4.3 Newtonské kapaliny	24
1.4.4 Neneutonské kapaliny	25
1.4.5 Viskoelastické chování.....	27
1.4.6 Index toku taveniny (ITT).....	28
1.5 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	28
1.5.1 Vtokový systém.....	29
1.5.2 Vyhazovací systém.....	32
1.5.3 Odvzdušňovací systém.....	34
2 TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM	35
2.1 TEPELNÁ BILANCE.....	36
2.2 KONSTRUKČNÍ ZÁSADY TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU	40
2.2.1 Prvky temperačního systému	41
2.2.2 Rozložení temperačního systému.....	42
2.2.3 Temperační médium.....	44
2.2.4 Temperace jader	45
2.3 KONFORMNÍ TEMPERACE	48
2.3.1 Rozložení konformního systému.....	49
2.3.2 Koncepty konformních systémů tvořené sítí kanálků.....	51
2.3.3 Série přepážek	53
2.3.4 Konformní fontánová přepážka.....	53
2.3.5 Temperační systém Contura.....	54
2.3.6 Frézovaný konformní systém.....	55

3	VÝROBA NÁSTROJŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ ADITIVNÍMI METODAMI.....	56
3.1	LASER POWDER BED FUSION	57
3.1.1	Zbytková napětí.....	59
3.1.2	Materiály	60
3.1.3	Dokončovací operace temperačních systémů	60
4	SIMULACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ.....	62
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	64
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	65
6	VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK.....	66
6.1	MATERIÁL VÝROBKU	67
7	KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	69
7.1	TVAROVÉ VLOŽKY	70
7.2	ROZLOŽENÍ VÝROBKŮ VE FORMĚ	71
7.2.1	Násobnost.....	71
7.2.2	Dělicí rovina.....	71
7.3	RÁM FORMY	72
7.3.1	Desky formy.....	72
7.3.2	Spojovací, vodící a středící prvky	73
7.3.3	Uložení posuvných čelistí	75
7.4	VTKOVÝ SYSTÉM	76
7.4.1	Analýza umístění vtoku.....	77
7.4.2	Umístění a typ vtoku	77
7.4.3	Horký vtokový systém	79
7.5	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	81
7.5.1	Prvky temperačního systému	82
7.6	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	83
7.6.1	Odformování a vyhození výrobků	85
7.7	TRANSPORTNÍ A MANIPULAČNÍ PRVKY	88
8	NAVRŽENÉ TEMPERAČNÍ SYSTÉMY	89
8.1	ZÁKLADNÍ PARAMETRY TEMPERAČNÍCH SYSTÉMŮ.....	89
8.2	KONFORMNÍ SYSTÉM 1 – CIK CAK.....	89
8.3	KONFORMNÍ SYSTÉM 2 – SPIRÁLOVÝ	91
8.4	KONFORMNÍ SYSTÉM 3 – OPTIMALIZOVANÝ	92
8.4.1	První návrh.....	92
8.4.2	Finální úpravy tvárníku	94
8.5	KONVENČNÍ SYSTÉM	95
9	NASTAVENÍ TOKOVÝCH ANALÝZ.....	97

10	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZ CHLAZENÍ.....	98
10.1	POROVNÁNÍ KONFORMNÍCH SYSTÉMŮ.....	98
10.1.1	Teplotní pole kanálků.....	98
10.1.2	Tlak kanálků.....	99
10.1.3	Teplotní pole tvarových vložek.....	100
10.2	POROVNÁNÍ KONVENČNÍHO A KONFORMNÍHO SYSTÉMU	101
10.2.1	Teplotní pole kanálků.....	102
10.2.2	Tlak kanálků.....	103
10.2.3	Teplotní pole tvarových vložek.....	103
10.2.4	Čas vyhození	105
11	VÝSLEDKY ANALÝZ PLNĚNÍ, DOTLAKU A DEFORMACÍ.....	107
11.1	ČAS PLNĚNÍ	107
11.2	TLAK PŘI PŘEPNUTÍ NA DOTLAK	107
11.3	TEPLOTA NA ČELE TAVENINY	108
11.4	TLAK V MÍSTĚ VTOKOVÉHO ÚSTÍ.....	109
11.5	UZAVÍRACÍ SÍLA	110
11.6	RYCHLOST SMYKOVÉ DEFORMACE.....	110
11.7	VZDUCHOVÉ KAPSY & STUDENÉ SPOJE.....	111
12	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE	113
	DISKUZE VÝSLEDKŮ A VYUŽITÍ KONFORMNÍ TEMPERACE.....	114
	ZÁVĚR	115
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	116
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	120
	SEZNAM OBRÁZKŮ	122
	SEZNAM TABULEK.....	127
	SEZNAM PŘÍLOH.....	128

ÚVOD

Technologie vstřikování polymerů je cyklický proces, který můžeme rozdělit na čtyři hlavní fáze. Těmi jsou plnění, dotlak, chlazení (temperace) a vyhození, kde tvoří doba chlazení téměř ve všech případech vstřikování termoplastů přes 50 % cyklu. Přirozeně tak vyvstává snaha o maximální zefektivnění a tím zkrácení této fáze.

S vývojem technologií jsou dlouho známé procesy neustále zlepšovány a jsou tak překročeny dříve nemyslitelné hranice. V posledních letech zažívají velký boom aditivní technologie, známé jako 3d tisk, jimiž lze tisknout širokou škálu materiálů zahrnující i kovy. A právě tisk kovů je technologie, která nachází čím dál větší uplatnění ve výrobě vstřikovacích forem a především pak jejich tvarových částí. Jelikož aditivní technologie jsou pouze minimálně omezeny geometrií vyráběných součástí, nabízí se možnost vytvářet tzv. konformní temperační systémy vstřikovacích forem, které zaručují zkrácení doby chlazení v řádu až desítek procent.

Klasicky vrtané temperační systémy neumožňují udržení konstantní vzdálenosti od dutiny formy, což je faktor potřebný pro zajištění homogenního teplotního pole, bez kterého není chlazení ve výrobku rovnoměrné, a vznikají tak deformace výrobku. Navíc v místech, kam temperační systém nedosáhne, vznikají tzv. hot spoty s mnohem vyšší teplotou formy, které značně prodlužují dobu chlazení. Oproti tomu tištěné temperační systémy mohou být vedeny přesně podél dutiny formy, díky čemuž je tato temperace nazývána právě jako konformní. Konformní temperace tak zajišťuje nejenom kratší vstřikovací cyklus, ale obecně zvyšuje kvalitu vstřikovaných dílů zajištěním homogenní teploty povrchu formy vedoucí k rovnoměrnému ochlazování výrobků v celém jejich objemu.

Další relativně nová technologie, která má zásadní vliv na vstřikování je tzv. CAE, tedy simulace procesu vstřikování. Spolu s vývojem konformní temperace tak může být celý vstřikovací cyklus maximálně optimalizován již před výrobou formy, což vede k úsporám konstrukčního času a materiálu. Přes své zjevné výhody je ovšem výroba kovových součástí s pomocí aditivní technologie vysoce energeticky náročná. Je proto nutné zjistit, především s pomocí simulací, zdali je využití konformní temperace pro daný výrobek skutečně užitečné.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ TERMOPLASTŮ

Technologie vstřikování je cyklický proces produkující výrobky pomocí vstřikování materiálu, nejčastěji taveniny termoplastu, do vytvarovaných dutin kovové vstřikovací formy tvořící negativ požadovaného výrobku. Jedná se o nejrozšířenější metodu zpracování polymerů, což je způsobeno výhodou této technologie umožňující vysokou produkci čítající až miliony kusů. Technologie vstřikování se taktéž vyznačuje vysokou tvarovou a rozměrovou přesností a jakostí povrchů výstupních produktů s možností kompletní automatizace výroby. Vstupní náklady jsou ovšem vysoké a velikost stroje i nástroje mnohonásobně převyšuje velikost výrobků. Proto se tato technologie uplatňuje především u velkosériové výroby. [1]

1.1 Vstřikovací stroj

Historie vstřikování sahá s vývojem strojů pro tuto technologii až do roku 1872, kdy byl patentován velice jednoduchý vstřikovací stroj na principu přetlačovacího válce. Zásadní změnou bylo nahrazení pístu šnekovou vstřikovací jednotkou v roce 1946, která se stala dominantní variantou používanou dodnes. [2]

Požadavkem na vstřikovací stroj je kvalita parametrů zajišťující dokonalé řízení vedoucí k výrobě vysoce jakostních výstřiků. Dnešní vstřikovací stroje jsou děleny dle pohonu, a to na hydraulické, elektrické a hybridní. Konstrukce strojů je rozdělena na systémy vstřikovací a uzavírací jednotky, které spolupracují nezávisle na sobě. Tyto jednotky jsou ovládány pomocí řídicí jednotky stroje. Ovládací a řídicí prvky se nachází buď na panelu vstřikovacího stroje, nebo v elektrorozvodné skříni vybavené zásuvkami a vypínači. Ty umožňují připojení přídatných a pomocných systémů. Vstřikovací stroje dělíme také dle uspořádání na stroje horizontální, které jsou nejběžnější a jeho typická podoba je na *Obr. 1*, a na stroje vertikální. [3] [4]



Obr. 1 Dnešní podoba - vstřikovací stroj Allrounder od firmy Arburg [5]

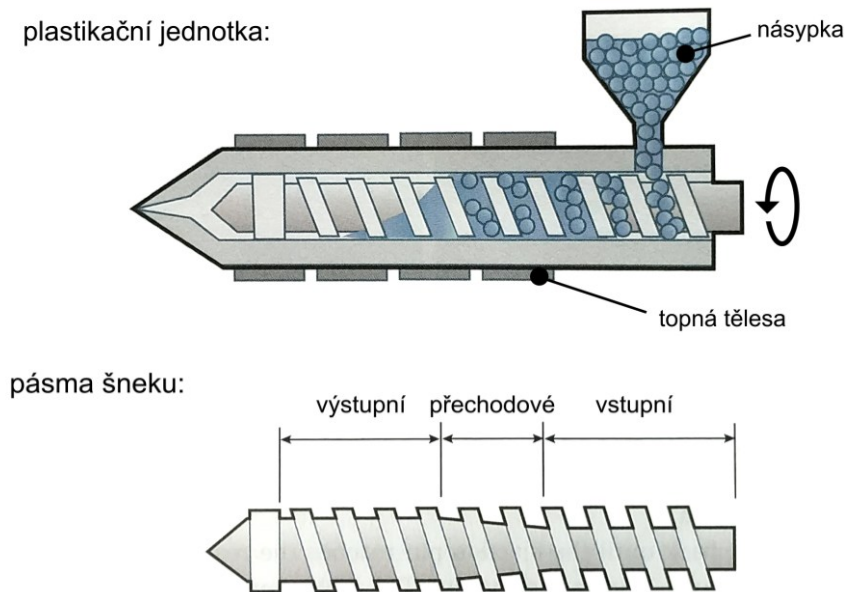
Výběr vstřikovacího stroje se odvíjí od parametrů potřebných pro úspěšné uskutečnění vstřikování daného výrobku. Mezi základní parametry patří objem vstřikované dávky jednoho vstřikovacího cyklu, vstřikovací a uzavírací tlak, dále jsou rozhodující také délka zdvihu a rozměr mezi vodícími sloupky stroje, mezi které musí být možné instalovat vstřikovací formu.

1.2 Proces vstřikování

1.2.1 Vstřikovací cyklus

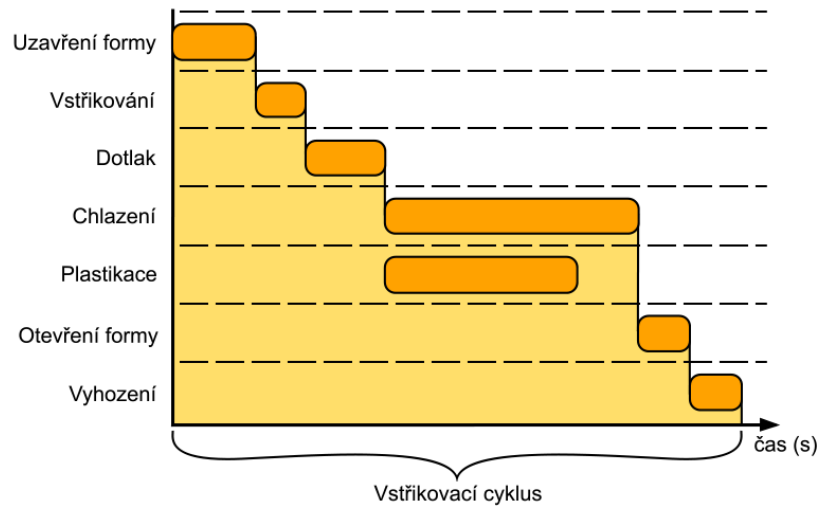
Jak již bylo zmíněno, technologie vstřikování je cyklický proces, který lze rozdělit na 5 hlavních kroků: [1]

- **Plastikace** – Tento krok se týká pouze plastikační (vstřikovací) jednotky, kam je nejprve granulát vstřikovaného materiálu dodáván pomocí násypky. Odtud granulát dopadá do válce se šnekem, kde je otáčením šneku dopravován směrem k vstřikovací trysce, přičemž se šnek také posouvá směrem od trysky pro nahromadění taveniny před čelem šneku. Na taveninu je granulát přeměněn postupně pomocí disipace, tedy přeměnou mechanické energie na tepelnou, a také pomocí tepla dodávaného tepelnými tělesy. Průměr šneku a závit šroubovice jsou standardně podél šneku proměnlivé, viz Obr. 2, „pásma šneku“. Jak ukazuje obrázek, šnek je rozdělen na 3 pásma. Vstupní pásmo šneku slouží pouze k dopravě materiálu z násypky směrem k čelu šneku. V přechodovém (kompresním) pásmu je granulát přeměněn na taveninu a ve výstupním pásmu je tavenina homogenizována. Po vytvoření potřebného množství taveniny se šnek zastaví.



Obr. 2 Plastikační (vstřikovací) jednotka a šnek vstřikovací jednotky [6]

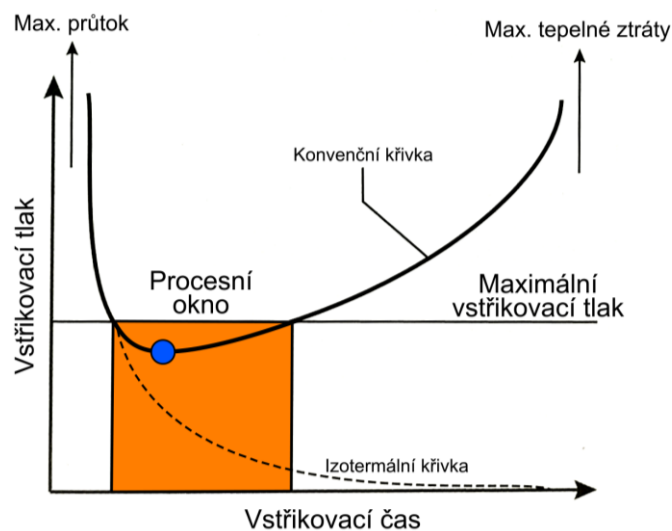
- **Plnění (vstřikování)** – Po uzavření formy pomocí uzavírací jednotky jsou dutiny formy rychle zaplněny vytvořenou taveninou polymeru, což je způsobeno dopředným axiálním pohybem šneku bez rotace. Šnekové vstřikovací jednotky jsou schopné vyvolat vstřikovací tlak o hodnotě až 250 MPa. Pohyb taveniny do dutiny formy je zajištěn zpětným ventilem šneku.
- **Dotlak** – Po zaplnění formy taveninou přechází stroj do dotlakové fáze, která probíhá až do zamrznutí vtokového ústí. Při fázi dotlaku je kompenzováno smrštění polymeru mírným pohybem šneku dopředu za stejného či nižšího tlaku, než je tlak vstřikovací. Při dotlaku již dochází k ochlazení výstřiku.
- **Chlazení** – Po zamrznutí vtokového ústí již nemá aplikovaný tlak vliv a dotlak je tak ukončen. Dochází již pouze k chlazení taveniny polymeru, což je z pravidla nejdelší fáze vstřikování. K urychlení chlazení jsou formy vybaveny sofistikovanými temperačními systémy. Během fáze chlazení již dochází k plastikaci taveniny ve vstřikovací jednotce pro následující vstřikovací cyklus.
- **Vyhození** – Po dostatečném zchladnutí výstřiku (po ztuhnutí taveniny) dochází k otevření formy s následným vyhozením výstřiků za pomoci vyhazovacího systému formy. Při této fázi následuje také případná příprava formy před započítím dalšího cyklu (odstranění vtoků, čištění, nanesení povlaku atp.).



Obr. 3 Časový průběh standartního vstřikovacího cyklu [2]

1.2.2 Vliv doby plnění

Doba plnění má kritický vliv na kvalitu výstřiků. Vztah mezi dobou plnění a vstřikovacím tlakem je vyobrazen na Obr. 4. Výhodou krátké doby vstříknutí je kromě kratšího vstřikovacího cyklu také nízký gradient teplot taveniny v dutině formy. Avšak při příliš krátkém čase rapidně stoupá potřebný vstřikovací tlak. Příliš vysoké vstřikovací rychlosti by také způsobovaly vznik dalšího tepla třením vedoucí k zvýšení teplotního gradientu taveniny.

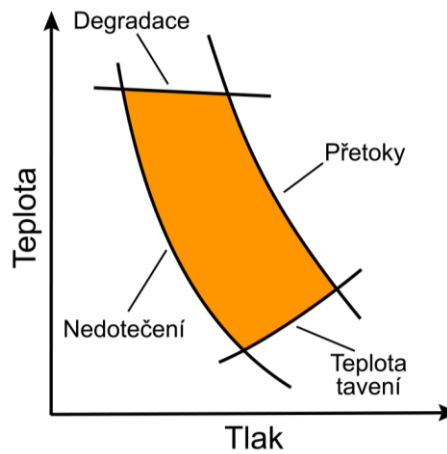


Obr. 4 Vliv doby plnění na potřebný vstřikovací tlak [6]

1.2.3 Procesní okno

Procesní okno je tvořeno grafem, který znázorňuje mezní hodnoty teploty a tlaku. Tyto hodnoty dohromady tvoří oblast vhodných procesních podmínek pro vstřikování

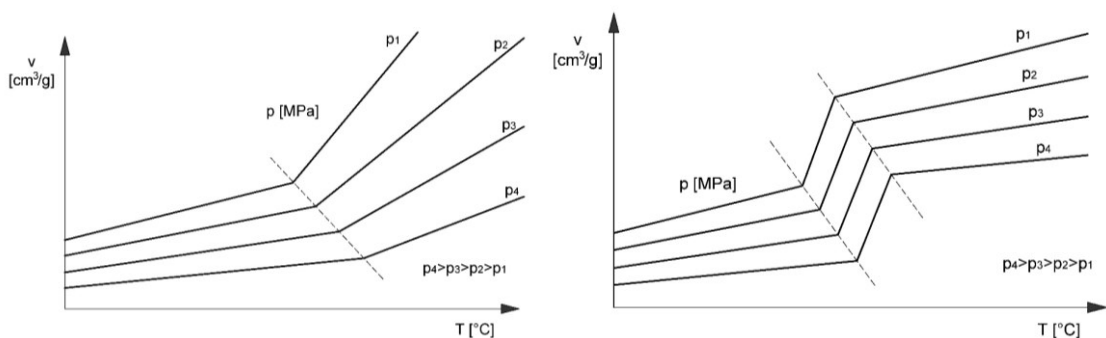
vyznačenou na *Obr. 5*. Při překročení hraničních parametrů dochází k defektům výstřiků. Všechny hodnoty tvořící procesní okno jsou obvykle dostupné v materiálovém listě. [6]



Obr. 5 Procesní okno [6]

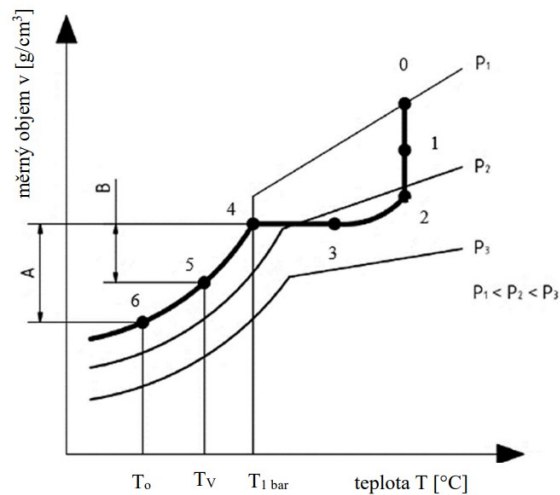
1.2.4 pvT diagram

pvT diagram sestává z měrného objemu v (cm^3/g), jakožto funkce tlaku p (MPa) a teploty T ($^{\circ}\text{C}$). Je mnoho důvodů, proč materiál mění svůj měrný objem, mezi něž patří změny teploty a tlaku, fázové přechody, skelný přechod, krystalizace, tavení a mnoho dalších. pvT diagram slouží jako pomůcka pro předpoklad chování polymerních materiálů potřebný pro správný průběh vstřikování, jako jsou stlačitelnost, modul objemové hmotnosti, teplotní roztažnost a další. pvT diagram je jediná prakticky využívaná metoda zahrnující variabilní tlaky. Právě proto nachází velké využití u technologií zpracování polymerů, které jsou na tlak citlivé. [7]



Obr. 6 pvT diagramy amorfních (vlevo) a semikrystalických (vpravo) polymerů

1.2.4.1 Vstřikovací cyklus v $p-v$ diagramu



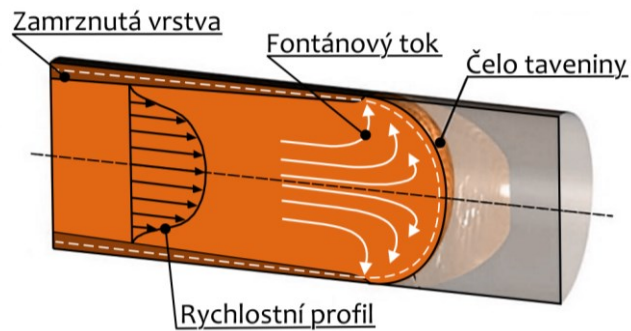
Obr. 7 Průběh vstřikovacího cyklu v $p-v$ diagramu [8]

Popis Obr. 7: [8]

- Bod 0 – Vstřikovací cyklus začíná stlačením taveniny čelem šneku v plastikační komoře, čímž je vyvolán vstřikovací tlak potřebný pro kompletní zaplnění dutin formy taveninou
- Bod 0–1 – Nyní dochází k objemovému naplnění dutin formy, kdy jsou v bodě 1 zcela zaplněny
- Bod 1–2 – Stále dochází k plnění dutin formy, ovšem nyní již dochází ke kompresi (stlačení) taveniny při zvyšování tlaku
- Bod 2 – V tomto bodě dochází k přepnutí na dotlak
- Bod 2–3 – Při dotlakové fázi již dochází k chlazení taveniny a snížení tlaku umožňuje objemovou kontrakci. Dotlakem je také doplněna další tavenin kompenzující smrštění výstřiku.
- Bod 3 – V tomto bodě je dotlak ukončen. Zamrzlo vtokové ústí a působení tlaku je již neúčinné.
- Bod 3–4 – V této fázi dochází k chlazení výstřiku za konstantního měrného objemu, dokud tlak v dutině nedosáhne atmosférického tlaku v bodě 4
- Bod 4–5 – V této fázi dochází k chlazení za konstantní atmosférického tlaku. Výstřik se smršťuje, oddaluje od stěny formy a klesá jeho měrný objem. V bodě 5 je výstřik vyhozen
- Bod 5–6 – Tato fáze se týká dodatečného chlazení mimo formu s dosažením konečného rozměru a tvaru a trvá obvykle 16 až 48 hodin po vyhození z formy

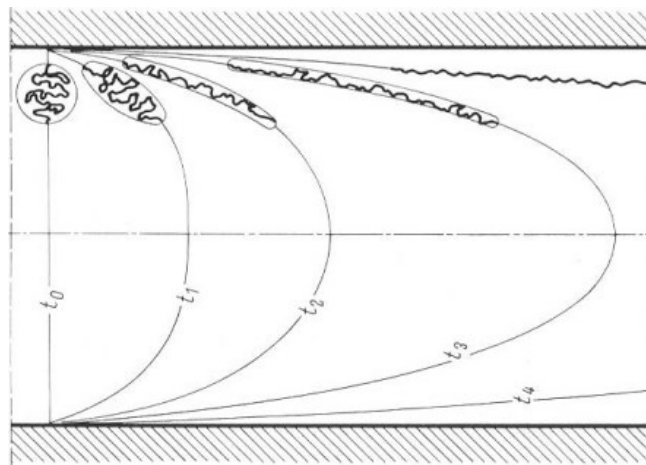
1.2.5 Fontánový tok

Kvůli vysoké viskozitě polymerních tavenin vzniká při vstřikování laminární tok, jehož rychlost je vyšší ve středu kanálu a nižší u stěn. Tím dochází k rozdělení centrálního toku, viz *Obr. 8*. Tavenina, která se dostává do styku se stěnou dutiny formy, již při toku zamrzá v rostoucí vrstvě.



Obr. 8 Fontánový tok [9]

Při plnění dutiny fontánovým tokem dochází ke vzniku určitého množství tzv. tokově indukovaného reziduálního napětí. Tato napětí nestihnou zcela zrelaxovat z důvodu rychlého ochlazení u stěny formy a jsou představována orientací makromolekul, viz *Obr. X*. [10]



Obr. 9 Orientace makromolekul polymeru ve směru toku taveniny [10]

Takto vzniklá reziduální napětí jsou poměrně malá. Jejich následkem je ovšem vysoká orientace makromolekul, což ovlivňuje mechanické a optické vlastnosti výstřiků a je také příčinou anizotropie smrštění. [10]

1.3 Termoplastické polymery pro vstřikování

Termoplasty jsou materiály, které zahříváním měknou a přechází do plastického stavu, kdy je lze snadno tvářet. Tohoto stavu nabývají po zahřátí nad teplotu tání. Během zahřívání se nemění chemická struktura a nedochází k chemické reakci. Reakce probíhající v termoplastech mají pouze fyzikální charakter a jsou tedy opakovatelně tavitelné. Termoplasty rozdělujeme na amorfnní a semikrystalické. Dále je můžeme dělit na standardní, konstrukční a high-tech, neboli vysoce odolné plasty.

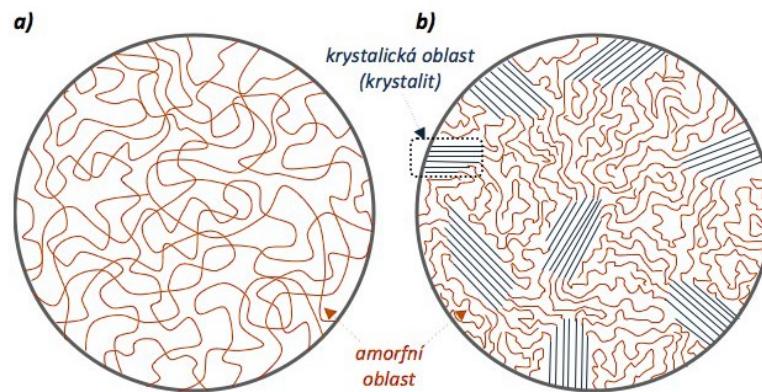
Polymery jsou pro zpracování technologiemi jako je vstřikování dodávány v podobě granulátu, který je na *Obr. 10*.



Obr. 10 Polymery v podobě granulátu pro následné zpracování [11]

1.3.1 Amorfnní termoplasty

Amorfnní termoplasty vytváří řetězce prostorově nepravidelné a nahodilé, viz *Obr. 11 a*). Vyznačují se vysokou pevností a křehkostí. Jejich index lomu je nízký a jsou tedy většinou transparentní v jejich přirozené formě. Díky neuspořádanosti řetězců je smrštění amorfnních polymerů malé, spadá pod 1% objemu a jsou tedy vhodné pro výrobu rozměrově přesných dílů. Mezi amorfnní termoplasty patří např. Polyvinylchlorid (PVC), Polystyren (PS), Polykarbonát (PC).

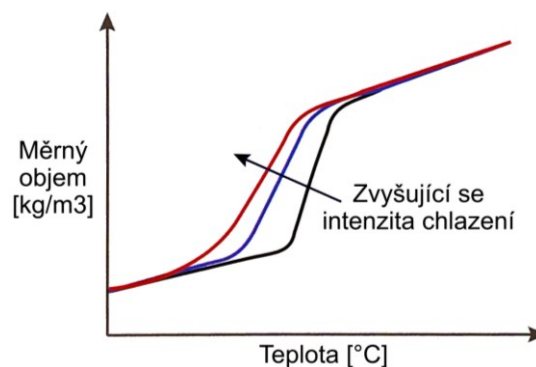


Obr. 11 a) amorfní polymer, b) semikrystalický polymer [12]

1.3.2 Semikrystalické termoplasty

Semikrystalické termoplasty se oproti amorfním vyznačují určitým stupněm uspořádání tak, že při tuhnutí vytvářejí oblasti s krystalickou strukturou uvnitř amorfních oblastí, viz *Obr. X b*). Kvůli tvorbě krystalické struktury nemohou být transparentní. Toto uspořádání má za následek větší smrštění až 2,5% objemu, které je ovlivněno také rychlostí chlazení. Tyto polymery se vyznačují zejména vyšší houževnatostí, než jakou vykazují amorfní termoplasty. Mezi semikrystalické termoplasty patří např. polyetylen (PE), polypropylen (PP), Polyamid (PA).

Krystalizace polymeru nenastane okamžitě po dosažení krystalizační teploty, ale dochází k ní postupně. Důvodem je potřeba určitého času pro seřazení řetězců molekul, díky čemuž může být rychlostí chlazení ovlivněn stupeň krystalinity. Tento jev je vyobrazen na *pvT* diagramu semikrystalického polymeru na *Obr. 12*. S intenzivnějším chladnutím se krystalinita polymeru snižuje. [6]



Obr. 12 Vliv chlazení na tvorbu krystalické složky v *pvT* diagramu za konstantního tlaku [6]

1.3.3 Charakteristické teploty termoplastů

Částice hmoty všech materiálů konají různé pohyby a jejich intenzita a amplituda se odvíjí od dané teploty. Tyto pohyby se nazývají „mikrobrownův pohyb“. U polymerů dochází k pohybu řetězců, jimiž jsou tvořeny. [8]

Při zvyšování teplot se intenzita pohybu zvyšuje, což má za následek změnu chování polymerů. První mezní teplotou u polymerů je teplota skelného přechodu označována T_g . Nad touto teplotou je polymer ve viskoelastickém stavu. Při této teplotě intenzita pohybu segmentů řetězců převyšuje mezimolekulární síly a segmenty se začnou pohybovat. Po dalším zvyšování teploty nastává teplota tečení T_f , kdy se již, především aplikací vnější síly, vůči sobě pohybují celé řetězce. Tato teplota je charakteristická pouze pro amorfní polymery, které se nad touto teplotou nachází ve viskózním stavu. [8]

U krystalické fáze semikrystalických polymerů působí podstatně větší mezimolekulární síly, díky čemuž při zvyšování teploty k pohybu segmentů v krystalických oblastech nedochází. K pohybu dochází až při ještě vyšších teplotách, při nichž dojde k rozpadu těchto krystalických struktur přímo do stavu viskózní taveniny. Tato teplota se nazývá teplota tání krystalického podílu T_m . [8]

Při dalším zvyšování teploty již dochází k degradaci polymeru, což je způsobeno rozpadem řetězců na fragmenty značně intenzivními pohyby makromolekul. Tato teplota se nazývá teplota rozkladu polymeru T_c . [8]

1.4 Reologie polymerních tavenin

Reologie je nauka zabývající se tokem a deformací polymerů v tekutém (viskózním) i tuhém (elastickém) stavu v reakci na aplikované síly. Reologie se zabývá viskozitou tekutin, vztahy mezi molekulární strukturou, tlakem a teplotou. Zabývá se také vlivy plniv a dalších aditiv na tokové vlastnosti materiálů. Taveniny polymerů jsou nazývány neneutronské, jelikož se neřídí newtonovým zákonem viskozity. Je to způsobeno především vysokou molekulární hmotností 10^5 až 10^8 g/mol vzniklou dlouhými řetězci molekul. [6]

Právě u technologie vstřikování hraje reologie důležitou roli. Při vstřikování taveniny polymeru do dutiny formy určují jeho reologické vlastnosti odpor proti tečení, tedy způsob plnění, podle čehož se odvíjí konstrukce dutin a vtokového systému, velikosti vstřikovacích tlaků, teplot apod.

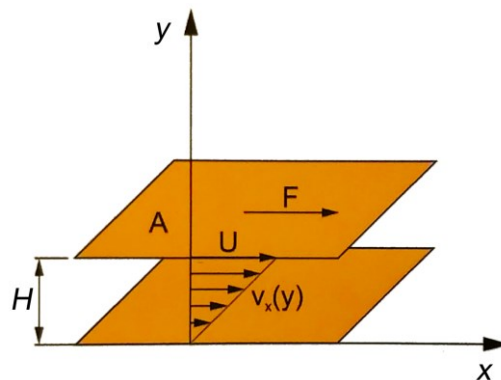
Rozměrová stabilita, kvalita povrchu a další vlastnosti jsou hlavními parametry požadovanými pro kvalitní vstřikování. Pro zkoumání těchto problémů je nutné chápat následující vztahy a efekty: [1]

- Vztahy mezi deformací, lokální teplotou a aplikovaným napětí v materiálu
- Vliv termo-mechanické historie materiálu na jeho vnitřní strukturu
- Působení zpracováním vyvolané vnitřní struktury na tokové chování finálních vlastností materiálu

Všechny tyto efekty spadají do problematiky, které se věnuje reologie.

1.4.1 Viskozita

Viskozita je fyzikální veličina vyjadřující odpor tekutin proti tečení. Viskozita je charakterizována vnitřním třením a závisí na vnitřních silách mezi částicemi materiálu. Jednoduché vyjádření viskozity je kapalina mezi dvěma deskami o ploše A , viz *Obr. 13*.



Obr. 13 Vyjádření viskozity mezi deskami [13]

Jedna deska je statická a druhá se pohybuje rychlostí U aplikovanou silou F . Při předpokladu, že nedochází ke skluzu, je kapalina statická ve styku se statickou deskou a pohybuje se rychlostí U ve styku s pohyblivou deskou. Distribuce rychlostí mezi deskami je ve většině případů lineární. Aplikovaná síla F je úměrná rychlosti U a plocha A je nepřímo úměrná vzdálenosti mezi deskami H : [13]

$$F \sim A \frac{U}{H} \quad (1)$$

Poměr síly F k ploše A vyjadřuje smykové napětí $\tau = \tau_{xy}$ a poměr mezi rychlostí U a vzdáleností H je roven gradientu rychlosti v_x ve směru y :

$$\tau_{xy} \sim \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

Tuto úměrnost lze transformovat na rovnost zavedením koeficientu úměrnosti, což je dynamická viskozita η :

$$\tau_{xy} = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (3)$$

Tato rovnice vyjadřuje Newtonův zákon viskozity. [13]

1.4.1.1 Vliv teploty a tlaku

Viskozita všech tekutin roste se zvyšující se teplotou, k čemuž dochází zvýšením pohybu makromolekul a volného prostoru mezi nimi. Vliv teploty na viskozitu je významný při nízkých smykových rychlostech blízcích se nule. Křivky viskozity mají při různých teplotách podobný tvar a jsou vůči sobě pouze posunuté. Závislost viskozity na teplotě je významnější u amorfních polymerů, spíše než u polymerů semikrystalických. [13]

Na druhou stranu se zvyšujícím se tlakem se viskozita polymerů snižuje, což je způsobeno snižováním volného prostoru pro pohyb makromolekul. Vliv tlaku je ovšem zaznamenatelný až při překročení hranice 35 MPa. [13]

1.4.2 Debořino číslo

Při posuzování deformačního chování materiálů je nutné rozhodovat, zda se jedná o látky elastické či viskózní. Všechny materiály, i ty zdánlivě pevné (např. sklo), vykazují viskózní chování při dostatečně dlouhé době pozorování. Kromě doby pozorování rozhoduje o chování materiálu také rychlost deformace, kdy se při vysokých rychlostech materiál chová více elasticky (např. při pádu z výšky do vody působí voda jako beton). Pro řešení tohoto problému bylo zavedeno kritérium Debořina čísla: [13] [14]

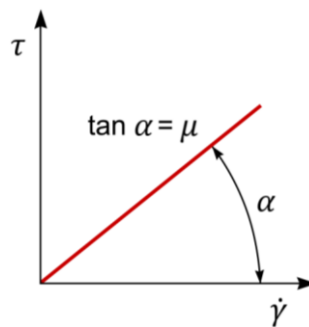
$$De = \frac{\lambda}{\theta} \quad (4)$$

Tato rovnice se skládá z podílu relaxačního času materiálu λ a času procesu neboli času pozorování θ .

1.4.3 Newtonské kapaliny

Kapaliny lze rozdělit dle Newtonova zákona o viskozitě na newtonské a nenewtonské. Newtonův zákon viskozity vyjadřuje lineární závislost mezi smykovým napětím a

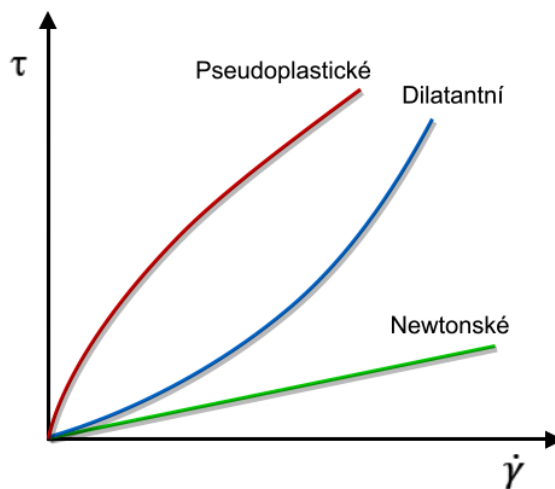
smykovou rychlostí. Tento zákon je aplikovatelný na významnou část kapalin a plynů, mezi které patří například i roztavené kovy, a obecně sem patří látky s nízkou molekulovou hmotností. Graf vyjadřující newtonské chování je na *Obr. 14*, jehož průběh je v tomto případě lineární s počátkem v 0. Tangenciál úhlu je roven dynamické viskozitě η (μ). [2] [13]



Obr. 14 Toková křivka newtonské kapaliny [6]

1.4.4 Nenewtonské kapaliny

Nenewtonské jsou kapaliny, které nevykazují jednoduchý vztah Newtonova zákona a toková křivka těchto polymerů není lineární, viz *Obr. X*.



Obr. 15 Tokové křivky nenewtonských kapalin

Tyto nenewtonské kapaliny dále dělíme na pseudoplastické, charakteristické poklesem smykové viskozity s rostoucí rychlostí smykové deformace a dilatantní, u kterých smyková viskozita s rostoucí rychlostí smykové deformace roste. Pseudoplastické látky zahrnují většinu nenewtonských látek a patří sem všechny polymerní materiály. Dilatantní materiály se vyskytují spíše výjimečně. [13]

Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace popisuje model zvaný mocninový zákon (anglicky power law model):

$$\tau = m \cdot \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Kde je m koeficient konzistence ($Pa \cdot s^n$) a n je index neneutonského chování (-).

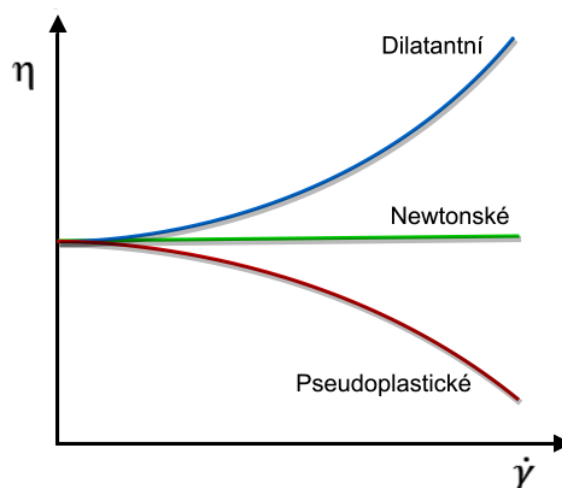
Pokud platí $n < 1$, zákon vyjadřuje pseudoplastické kapaliny. Pokud platí $n > 1$, zákon vyjadřuje dilatantní kapaliny a pokud platí $n = 1$, zákon je transformován na model Newtonova zákona kdy se $\eta = m$.

Rovnice pro mocninový zákon ovšem není zcela přesná po celé délce rychlosti smyk. def., a proto slouží pouze jako přibližná hodnota. Důvodem využívání je jednoduchost této rovnice. Smykové napětí a rychlost smykové deformace mohou být určeny z pouhých dvou parametrů materiálu (m a n). [13]

1.4.4.1 Zdánlivá viskozita

Pro neneutonské kapaliny neplatí koncept viskozity dle Newtonova zákona. Pro tyto kapaliny, u kterých se viskozita mění s rychlostí smykové deformace, byl představen koncept zdánlivé (smykové) viskozity, který definuje poměr smykového napětí a rychlosti smykové deformace:

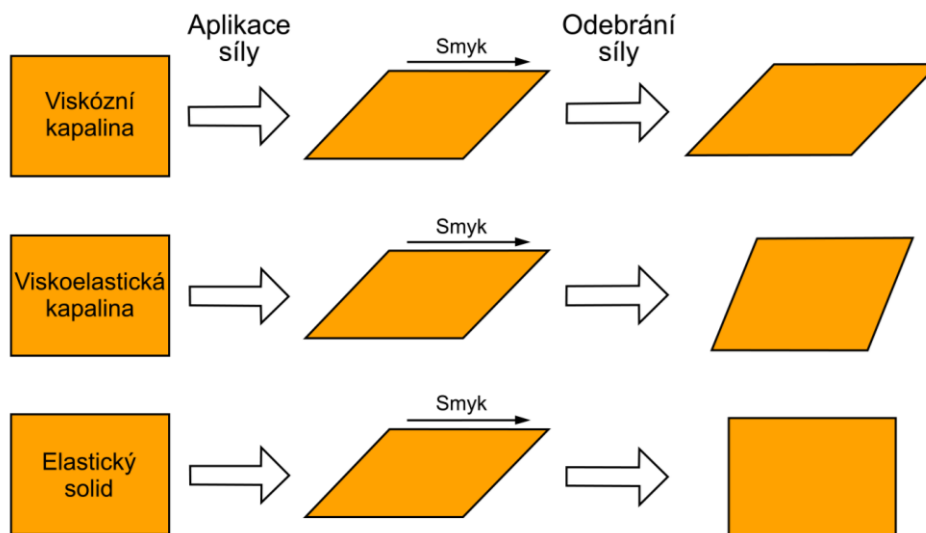
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6)$$



Obr 16 Zdánlivá viskozita v závislosti na rychlosti smykové deformace

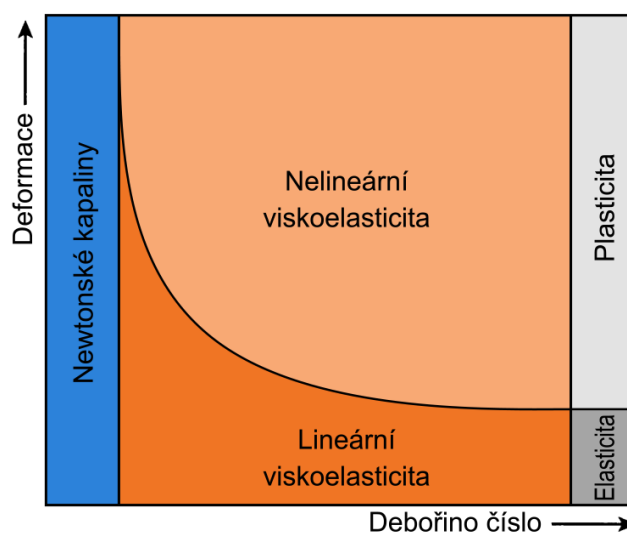
1.4.5 Viskoelastické chování

Viskoelastická zahrnuje průběžné projevy viskózního a elastického chování daného materiálu. Viskózní vlastnosti souvisejí s výskytem nevratných deformací, jejichž stupeň se při působení určité síly v čase neustále zvyšuje. Elastické vlastnosti souvisejí s výskytem elastických (vratných) deformací, které se po ukončení aplikace síly vytratí. [13]



Obr. 17 Chování materiálů po odstranění aplikované síly [2]

Na Obr. 18 se nachází vizualizace vztahu mezi Debořiným číslem a velikostí deformací, díky čemuž lze vyjádřit chování určitého materiálu. [14]



Obr. 18 Schéma znázorňující oblasti newtonského, elastického, plastického, lineárně a nelineárně viskoelastického a newtonského chování látek v závislosti na velikosti deformací a Debořině čísle [14]

Oblast viskoelasticity, na Obr. 18 mezi newtonskými kapalinami a elastickými/plastickými solidy, je rozdělena na lineární a nelineární. Lineární viskoelastická nastává při malých

deformacích a nelineární při deformacích vyšších. Při zpracování polymerů vznikají velice silné deformace, tudíž je pro tyto operace nelineární viskoelasticita podstatnější. [14]

1.4.6 Index toku taveniny (ITT)

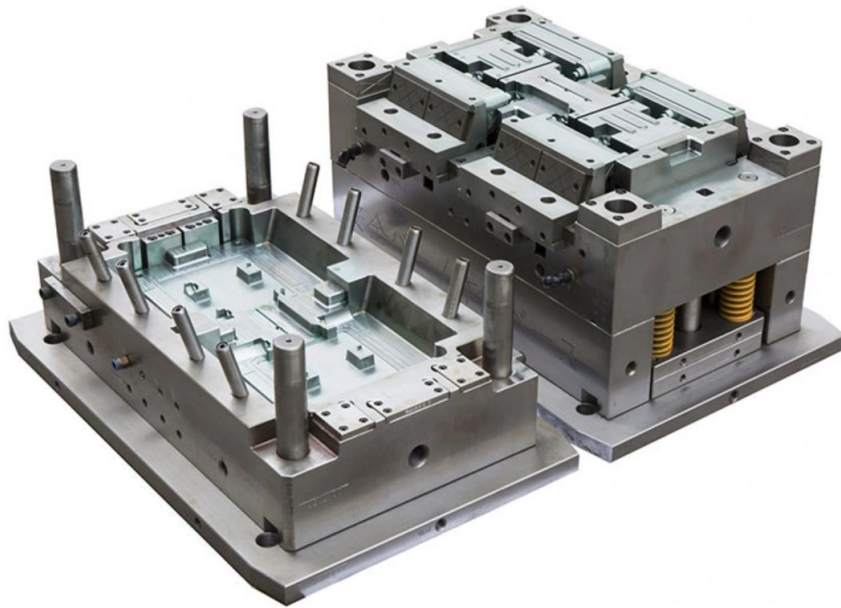
Index toku taveniny je hodnota, kterou lze nalézt v materiálovém listu polymerů. Jedná se o metodu měření, kdy je zjišťováno, kolik taveniny polymeru proteče otvorem o dané velikosti za 10 minut při určitém zatížení. Měření je tak vyjádřeno v jednotkách $g/10 \text{ min}$. Tato metoda je popsána normou ISO 1133. [15]

1.5 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma je nástroj technologie vstřikování, který zastává funkci tvarování taveniny polymeru do výsledné podoby požadovaného výrobku. Forma proto musí být schopna odolávat vysokým uzavíracím a vstřikovacím tlakům, musí zaručovat nejvyšší možnou přesnost a jakost jak tvarových, tak i funkčních ploch. Konstrukce formy je náročný proces vyžadující mnoho konstrukčního a výrobního času.

Velikost a komplexnost formy se odvíjí od požadavků na výrobek, jehož velikost, tvar a kvalita jsou směrodatné. Vstřikovací formy se dělí dle násobnosti, což udává počet tvarových dutin formy neboli počet vyrobených produktů na jeden vstřikovací cyklus. U jednonásobných forem je vyroben pouze jeden výstřik na vstřikovací cyklus a tyto formy se využívají u rozměrných výstřiků a při velmi přesném vstřikování. Se zvyšující se násobností formy roste efektivita a rentabilita formy, ovšem s vyšším počtem dutin roste také složitost formy, což vede k jak vyšším vstupním nákladům, tak i k vyšším výdajům pro údržbu, komplikovanějšímu vývoji i dosažení požadovaných přesností atd. [3] [16]

Vstřikovací forma je rozdělena dělicí rovinou na dvě části, a to na pohyblivou a nepohyblivou část, viz *Obr. 19*. Nepohyblivá část se nachází na straně se vstřikovací jednotkou stroje a obsahuje mimo jiné vtokový systém a tvárnice. Pohyblivá strana je spojena s uzavírací jednotkou stroje a obsahuje mimo jiné vyhazovací systém a tvárníky, popř. pohyblivá jádra pro boční odformování. [3] [19]



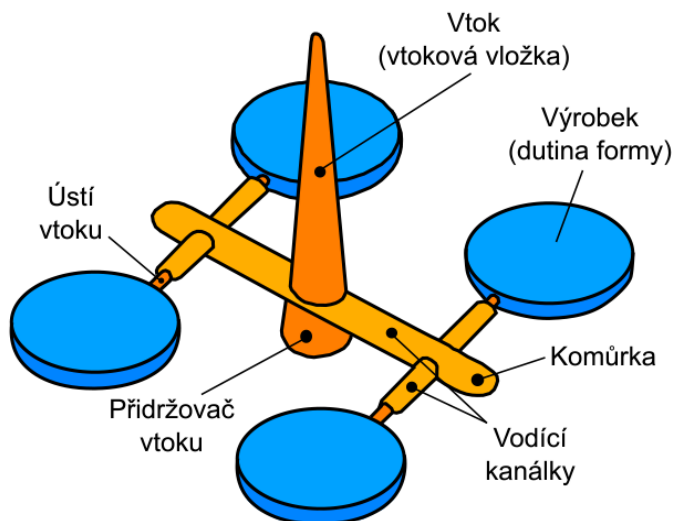
Obr. 19 Pevná (vlevo) a pohyblivá (vpravo) část vstřikovací formy rozdělena v dělicí rovině [17]

1.5.1 Vtokový systém

Funkcí vtokového systému je dopravení taveniny ze vstřikovací jednotky do dutin formy. Vtokový systém musí zajišťovat rovnoměrné plnění všech tvarových dutin v nejkratším možném čase a s minimálními odpory. Umístění a typ vtokového systému přímo ovlivňuje způsob a kvalitu plnění tvarových dutin včetně následných deformací. Umístění vtokového ústí definuje orientaci plnění, čímž může být ovlivněna tvorba a umístění studených spojů, místa uvíznutí vzduchu apod. [3]

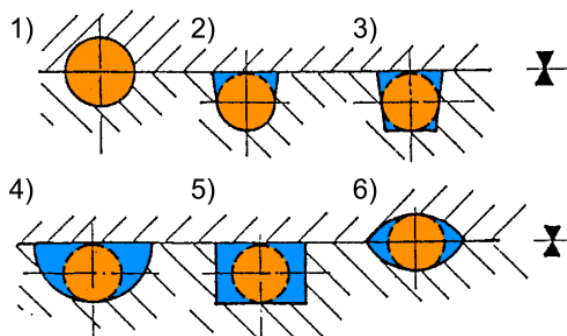
Jelikož je tavenina vstřikována do formy s mnohem nižší teplotou, začíná tavenina při průtoku vtokovým systémem okamžitě zamrzat. Tato zamrzlá vrstva následně funguje jako tepelná izolace, která umožňuje další proudění materiálu v jádru vtokových kanálků. [3]

Vtokový systém se skládá z vtokové vložky, rozvodných kanálků, vtokových ústí, případně i přídržovače vtoku a zachytávacích komůrek. Celý vtokový systém je znázorněn na *Obr. 20*.



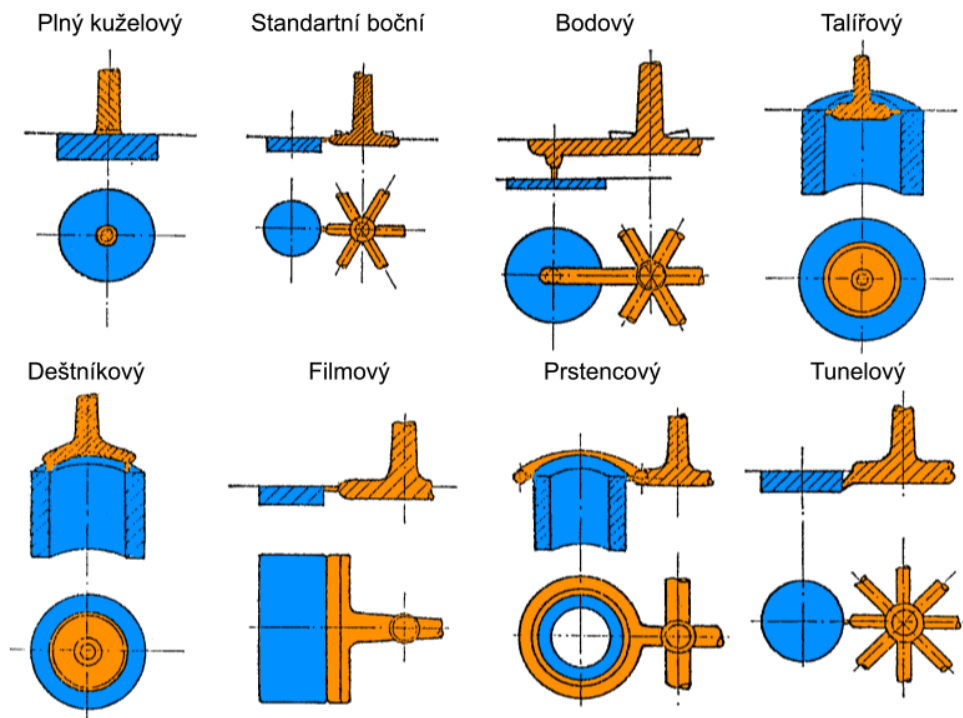
Obr. 20 Vtokový systém

Vtokovou vložkou vstupuje roztavený polymer ze vstřikovací jednotky do formy a musí zajišťovat dobré spojení bez úniku polymeru. Na vtokovou vložku jsou napojeny rozvodné kanálky, které zaručují rovnoměrné rozvedení taveniny k dutinám formy. Průřezy kanálků mohou mít rozličné tvary, které se nachází na Obr. 21. [3]



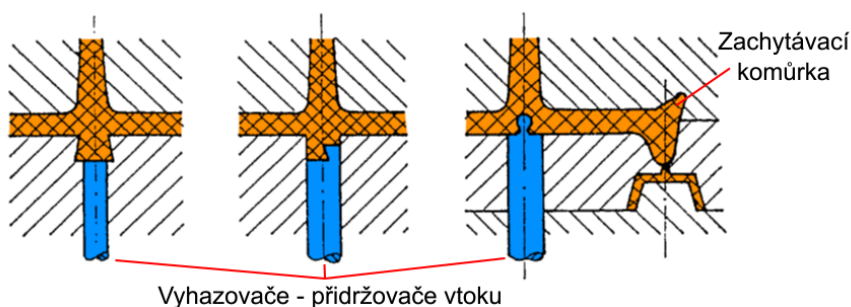
Obr. 21 Vhodné průřezy vtokových kanálků – 1, 6 výrobně nevýhodné;
2, 3, 4, 5 výrobně výhodné [3]

Mezi rozvodnými kanálky a dutinami formy se nachází vtoková ústí, která mohou mít různé funkční tvary v závislosti na geometrii dutin formy či dle zadaných technických požadavků. [3]



Obr. 22 Vybrané typy vtokových ústí [3]

Přidržovače vtoku jsou součástí vyhazovacího systému a zajišťují přidržení zamrzlého vtokového systému na pohyblivé straně formy při otevření, aby mohl být vyhozen spolu s výstřikou. Řešení přidržovačů vtoku je vyobrazeno na Obr. 23. Na tomto obrázku lze také vidět zachytávací komůrku, která slouží k zachycení chladnějšího čela taveniny na počátku fáze plnění a také k oddělení ústí vtoku od výstřiku při otvírání formy. [3]



Obr. 23 Přidržovače vtoku [3]

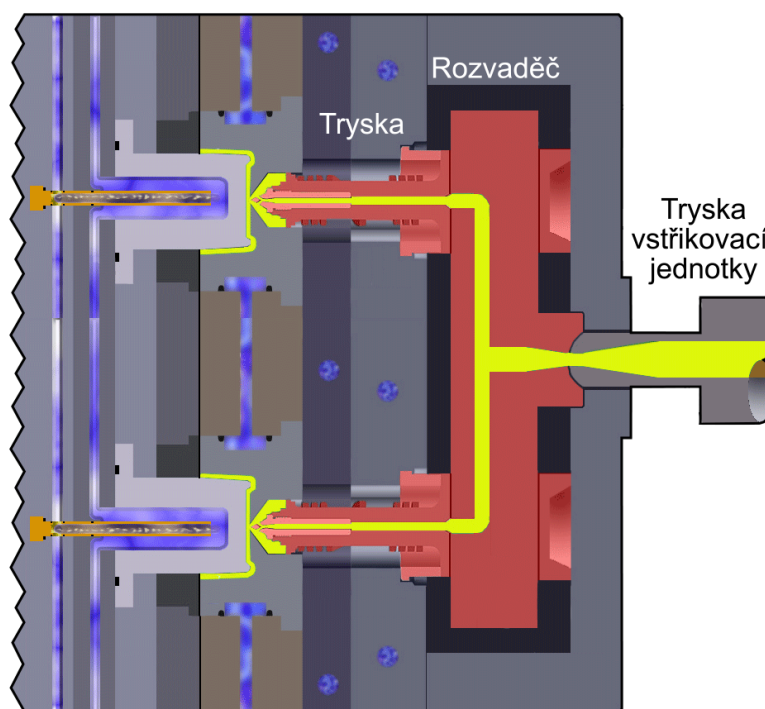
Důmyslné řešení formy, například formy s třideskovým systémem, umožňuje automatické oddělení vtokového systému od výstřiku již při otvírání formy (Na Obr. 23 vpravo).

1.5.1.1 vyhříváný vtokový systém

Klasické studené vtokové systémy se potýkají s mnoha problémy, mezi něž patří limitovaná vzdálenost dutin u vícenásobných forem, zvýšené tlaky taveniny potřebné pro proudění taveniny vtokovým systémem a vysoký podíl odpadu, který může dokonce převyšovat

množství materiálu produktu. Řešení těchto a dalších problémů nabízí implementace vyhřívaného vtokového systému, který udržuje polymer ve stavu taveniny až k vtokovému ústí dutin formy. Výhodou vyhřívaných systémů je minimální, či dokonce žádný odpad, vyšší kvalita vstříkovaných dílů, redukce objemu vstříkované dávky vedoucí k možnosti využití menší vstříkovací jednotky, zkrácení vstříkovacího času a obecně zvyšují kvalitu vstříkovaných výrobků. S implementací vyhřívaného systému ovšem rostou pořizovací a provozní náklady formy. Jelikož teplota vyhřívaného systému značně převyšuje teplotu formy, je nutné tento systém dostatečně odizolovat a zabránit úniku tepla do formy. [3]

Vyhřívané vtokové systémy se obvykle skládají kompletně z normálních od specializovaných dodavatelů. Hlavními součástmi vyhřívaných vtokových systému jsou vtoková vložka, rozvodný blok a vyhřívané vtokové trysky, které jsou červeně zvýrazněny na *Obr. 24*. Všechny prvky jsou samostatně vyhřívány.

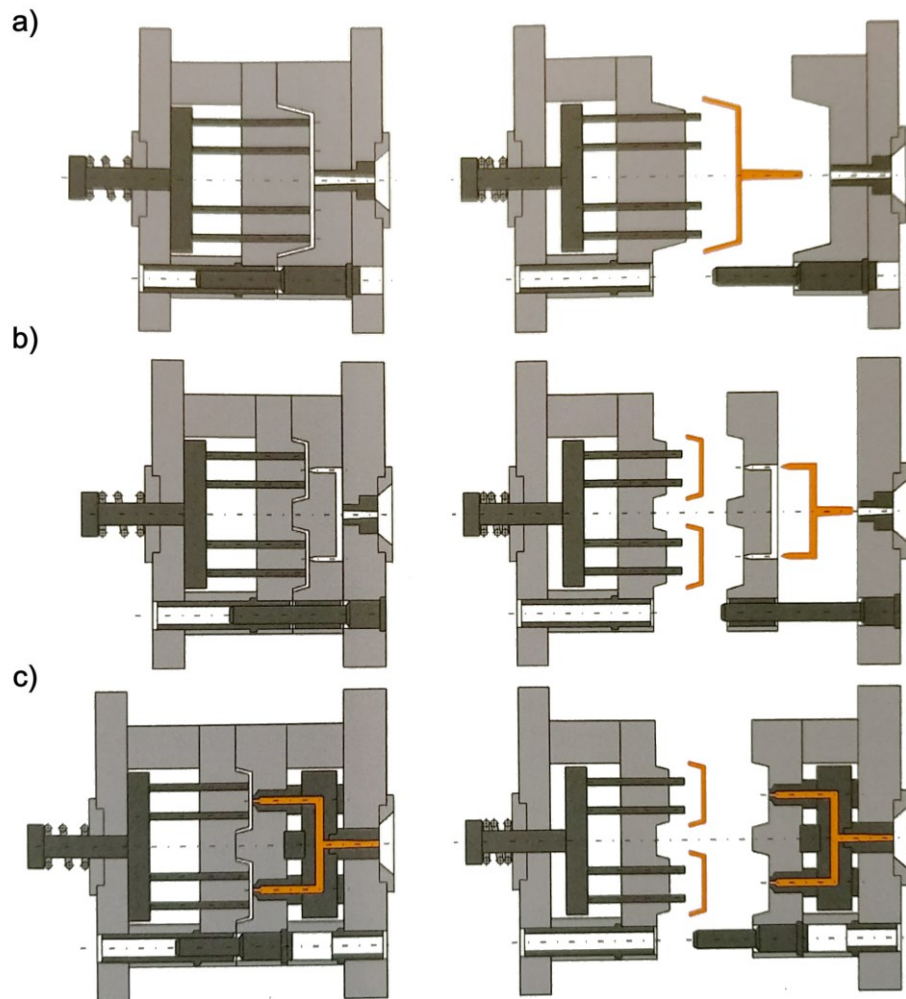


Obr. 24 Vyhřívaný vtokový systém ve formě, na obrázku vyznačen červeně [18]

1.5.2 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém zajišťuje vyhození výstřiku z dutiny formy po jejím otevření, k čemuž dojde po dostatečném zchlazení výstřiku na stanovenou vyhazovací teplotu. Přestože je princip vyhození jednoduchý, provedení vyhazovacích systémů může být vysoce komplexní a odvíjí se od geometrie výstřiku. Základní problematikou vyhození je rozložení vyhazovačů, které přirozeně zanechávají na výstřiku otisky a musí se tedy umístit na

nepohledové straně výstřiku. K dispozici je více způsobů vyhození, kdy se nejčastěji používá mechanický systém vyhazovacích kolíků, stíracích desek, či pružných vyhazovačů. K vyhození dojde vysunutím vyhazovačů tak, že vstříkovaný výrobek již nemá mechanickou vazbu s formou a působením gravitace odpadává. Pro zvýšení produkce se k vyjmutí z formy používají robotická ramena. Vyhazovací systémy některých typů forem jsou na *Obr. 25* [3] [16]



Obr. 25 Vyhazovací systémy: a) jednonásobné formy, b) třídeskové formy, c) formy s vyhříváním vtokovým systémem [6]

Základní podmínkou pro úspěšné vyhození výstřiků je hladký povrch a úkosovitost stěn výstřiků. Úkos stěny musí být alespoň $0^{\circ}30'$. Vyhazovače jsou uloženy ve vyhazovacím paketu na pohyblivé straně formy, a proto je nutné zajistit, aby výstřík po otevření formy zůstal právě na této straně. [3] [16]

1.5.3 Odvzdušňovací systém

Před fází plnění dutin vstřikovací formy obsahují tyto dutiny vzduch, který je při plnění vytlačován čelem taveniny. Při uvíznutí tohoto vzduchu v dutině by došlo k poškození výrobku tvorbou bublin, či spálených míst (diesel efekt). Z těchto důvodů je kladen důraz na umožnění úniku vzduchu z dutin formy pomocí odvzdušňovacího systému. Kromě přirozených možností jako je dělicí rovina a otvory vyhazovačů jsou také ve formě tvořeny odvzdušňovací kanálky. Tyto kanálky mají maximální rozměr obvykle 0,03 - 0,05 mm, což je rozměr, kterým již nemůže uniknout tavenina polymeru. [16]

Odvzdušnění se umísťuje především v místech, která jsou zaplněna taveninou jako poslední. Jedná se obvykle o místa s největší vzdáleností od ústí vtoku, či místa s menší tloušťkou stěny. Výrobky musí být konstruovány tak, aby bylo možné dutiny formy maximálně odvzdušnit. Místa, kde může docházet k uvíznutí vzduchu, lze indikovat pomocí tokových analýz simulace plnění. [16]

2 TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM

Během procesu vstřikování se forma nepodílí pouze na výsledné kvalitě výrobku, ale stejně tak představuje i významný faktor při posuzování rentability celé výroby. Vstřikovací forma musí být velmi dobře zkonstruována a promyšlena nejen z hlediska mechanických prvků, ale stejně tak i prvků temperačního systému. Ekonomická návratnost celého procesu vstřikování je poté úzce spojena s hodinovou produkcí, kterou je forma schopna dosáhnout. S ohledem na tuto skutečnost je vyžadován co možná nejkratší vstřikovací cyklus, ovšem při zachování požadované kvality výrobků. Této rovnováhy může být dosaženo pouze v případě zajištění dobré výměny tepla mezi vstřikovaným polymerem a formou a rovnoměrného rozložení teploty na stěnách formy během procesu vstřikování. [16]

Temperace formy je neodmyslitelnou součástí vstřikovacího procesu, která má přímý vliv na ekonomičnost výroby, výslednou jakost výrobků ad. Principem temperace je ohřev formy na požadovanou teplotu před zahájením výroby a udržení této teploty rovnoměrně po celém povrchu dutiny formy. Temperační systém musí být dále schopen udržovat teplotu v minimálním rozsahu při cyklickém vstřikování taveniny polymeru. Chlazení výstřiku na vyhazovací teplotu je obvykle nejdelší částí vstřikovacího cyklu. Hlavním cílem je tedy dosáhnout maximálního zkrácení při dodržení technických požadavků na výsledný výrobek. Od schopnosti odvádět teplo z dutiny se odvíjí efektivita temperačního systému. [16] [19] [20]

Teplota a její časový průběh přímo ovlivňuje chování taveniny i výsledné vlastnosti výrobku. Při nerovnoměrném odvodu tepla dochází k anizotropnímu průběhu chlazení, což vede k zvětšení rozměrových a tvarových deformací výstřiku, vyššímu množství vnitřních napětí, či snížení kvality povrchu. Těmto problémům je nutné se vyvarovat a řešení vyrovnaného temperačního systému je tak kritickou složkou pro úspěšné navržení funkční formy. Podle publikací je až 60% vad způsobeno právě nesprávnou temperací. Je mnoho faktorů, které je nutné brát v potaz. Především je nutné dimenzovat temperační systém podle druhu zpracovávaného polymeru, jelikož jejich zpracovatelské teploty a další podmínky se mohou zásadně lišit, viz *Tab. 1*. [16] [19] [20]

Tab. 1 Zpracovatelské teploty pro vstřikování vybraných materiálů [12]

TYP MATERIÁLU	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
PC + SKLENĚNÁ VLÁKNA	80 - 130	310 - 330	150
ABS	60 - 80	220 - 260	80 - 100
SAN	50 - 80	230 - 260	80 - 95
PBT	80 - 100	250 - 270	140
PBT + SKLENĚNÁ VLÁKNA	80 - 100	250 - 270	150
PP	30 - 60	200 - 250	70 - 90
PE	30 - 60	180 - 230	60 - 90

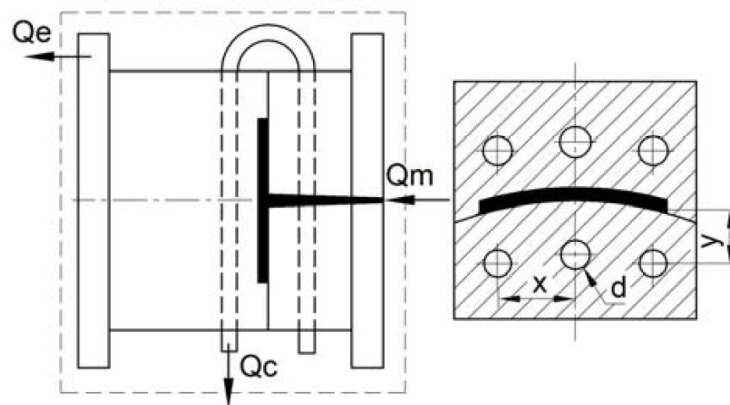
2.1 Tepelná bilance

Proces temperace je u vstřikování komplexní problém přestupu tepla. K zjednodušení matematického modelu jsou proto aplikovány některé předpoklady. Cílem tepelné analýzy formy je zjistit distribuci teplot vstřikovaného dílu a povrchu dutiny formy při fázi chlazení. K výpočtům se využívá průměrná teplota formy, která se dostane do ustáleného stavu po několika vstřikovacích cyklech i přesto, že opravdová teplota stále periodicky roste a klesá během vstřikovacího procesu. [21]

Obecná tepelná vodivost zahrnující problém tepelného přestupu je řízená parciální diferenciální rovnicí. Distribuce průměrné teploty může být reprezentována ustáleným stavem Laplaceovy rovnice vedení tepla. Pro sestavení tepelné bilance platí zásada, při které se musí teplo dodané taveninou rovnat teplu odvedenému z formy temperací a dalšími ztrátami. Vzniká tak rovnice:

$$\dot{Q}_m + \dot{Q}_c + \dot{Q}_e = 0 \quad (7)$$

Kde je \dot{Q}_m tepelný tok taveniny, \dot{Q}_c je tepelný tok chladicího média a \dot{Q}_e je tepelný tok okolního prostředí. [21]



Obr. 26 Schéma tepelných toků ve vstřikovací formě (vlevo) a konfigurace temperačního systému (vpravo) [21]

Teplo roztaveného polymeru je odebíráno pomocí temperačního média prostřednictvím proudění temperačním systémem a také prostředím obklopujícím formu. Výměna tepla s médiem se uskutečňuje nucenou konvekcí. S prostředím je výměna tepla uskutečněna konvekcí a radiací vnějšími stěnami formy. Těmi dochází také k vedení tepla do vstřikovacího stroje. Při aplikaci je ovšem možné brát exteriér formy jako adiabatický, protože tepelné ztráty těmito procesy jsou menší než 5 % celkové výměny tepla. V praxi se tedy počítá pouze s výměnou tepla mezi taveninou polymeru a chladícím médiem. Rovnice je tak zjednodušena na tvar: [21]

$$\dot{Q}_m + \dot{Q}_c = 0 \quad (8)$$

Tepelný tok taveniny je možné vypočítat následující rovnicí:

$$\dot{Q}_m = 10^{-3} [c_p (T_M - T_E) + i_m] \rho \frac{S}{2} x \quad (9)$$

Tepelný tok chladícího média lze vypočítat dle rovnice:

$$\dot{Q}_c = 10^{-3} t_c \left(\frac{1}{10^{-3} \alpha \pi d} \right)^{-1} \left(\frac{1}{k_{st} S_e} \right)^{-1} (\bar{T}_W - T_C) \quad (10)$$

Ve skutečnosti by měl celkový čas, během kterého je teplo taveniny odvedeno, zahrnovat čas plnění t_f , čas chlazení t_c a také čas pro otevření formy t_o . Porovnáním výsledků získaných použitím rovnice pro \dot{Q}_c , s analýzami získanými simulačním softwarem, výsledky rovnice \dot{Q}_c udávají nižší hodnotu tepelného toku oproti skutečnosti. Ovšem při nahrazení t_c za součet t_f , t_c a t_o výsledky reálnou hodnotu převyšují. Důvodem je nižší teplota formy na začátku plnění fáze a při otevření oproti ostatním fázím. Rozdíl hodnot je poté značný v případě, že doba plnění a doba pro otevření formy netvoří pouze malou část ve srovnání

s dobou chlazení. Takový případ nastává především u velkých výstřiků s malou tloušťkou stěny. Z tohoto důvodu může být rovnice pro \dot{Q}_c upravena na základě analýzy teploty stěny formy obdélníkových plochých dílů pomocí praktického analytického modelu a numerické simulace: [21]

$$\dot{Q}_c = 10^{-3} \left(\frac{1}{2} t_f + t_c + \frac{1}{3} t_o \right) \left(\frac{1}{10^{-3} \alpha \pi d}^{-1} \frac{1}{k_{st} S_e} \right)^{-1} (\bar{T}_W - T_C) \quad (11)$$

Vliv pozice chladících kanálů na vedení tepla může být brán v potaz aplikací faktoru tvaru:

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

Součinitel prostupu tepla vody je vypočítán ze vztahu:

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

Reynoldsovo číslo:

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

Čas chlazení vstříkované součásti je vypočítán:

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_M - \bar{T}_W}{T_E - T_W} \right) \right] \quad (15)$$

Tepelná difuzivita polymeru:

$$a = \frac{k_p}{\rho c_p} \quad (16)$$

Kde je k_p tepelná vodivost polymeru a c_p měrná tepelná kapacita

Ze vztahu pro čas chlazení t_c lze určit čas chlazení pouze z termálních vlastností, tloušťky stěny výstřiku a procesních podmínek. Čas chlazení nezávisí přímo na konfiguraci temperačních kanálů. Na té ovšem závisí teplota stěny formy \bar{T}_W , takže je čas chlazení ovlivněn nepřímo. Kombinací rovnic $\dot{Q}_m + \dot{Q}_c = 0$ a \mathbf{a} je získána následující rovnice:

$$\frac{[c_p(T_M - T_E) + i_m]\rho \frac{s}{2} x}{\bar{T}_W - T_C} \left\{ \frac{1}{2\pi k_{st}} \ln \left[\frac{2x \sinh\left(2\pi \frac{y}{x}\right)}{\pi d} \right] + \frac{1}{0,0319\pi Re^{0,8}} \right\} \quad (17)$$

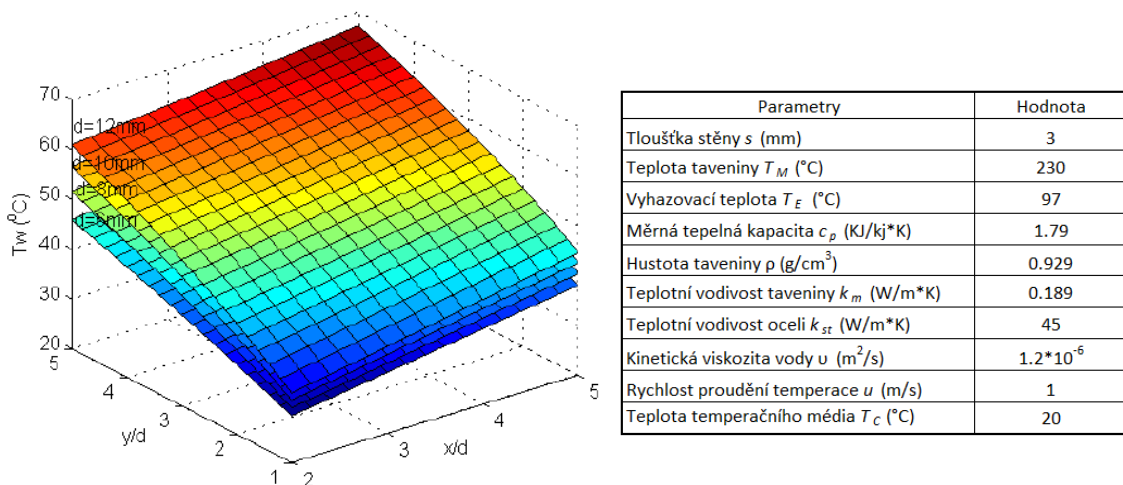
$$= \frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_M - \bar{T}_W}{T_E - T_W} \right) \right] + \frac{1}{2} t_f + \frac{1}{3} t_o$$

Matematicky, použitím daných hodnot T_M , T_E a \bar{T}_W , předdefinovaných t_f a t_o a dalších termálních vlastností materiálu, rovnice (17) představuje vztah mezi časem chlazení t_c a proměnnými souvisejícími s konfigurací temperačních kanálků zahrnující vzájemnou vzdálenost kanálků x , vzdálenost kanálků od dutiny y a průměr kanálků d . [21]

Tato rovnice obsahuje tři neznámé x , y a d , což dává nekonečně velké množství výsledků a v praxi se proto zavádí omezení:

$$\begin{cases} x = \beta_1 d \\ y = \beta_2 d \end{cases}, \text{ kde } \begin{cases} 8 \text{ mm} \leq d \leq 14 \text{ mm} \\ 2 \leq \beta_1 \leq 5 \\ 1 \leq \beta_2 \leq 5 \end{cases} \quad (18)$$

Obr. 27 zobrazuje graficky vliv konfigurace kanálků na teplotu stěny formy pro určitou tloušťku stěny výrobku. Termální vlastnosti materiálu a procesní podmínky jsou v tabulce téhož obrázku. Tento graf je vytvořen na základě rovnice (17) spolu s omezeními (18). Graf znázorňuje zvýšení teploty stěny formy při zvýšení hodnot x a y . Jinak řečeno, pokud jsou kanálky blíže u sebe a/nebo blíže u stěny formy, teplota stěny formy se tak snižuje. Z grafu lze také vyčíst, že vzdálenost kanálků od stěny má na výsledek větší vliv než vzdálenost mezi jednotlivými kanálky.



Obr. 27 Vliv konfigurace temperačních kanálků na teplotu stěny formy při daných zpracovatelských podmínkách [21]

Pokud je hodnota Re vyšší než 10 000, dochází k rapidnímu navýšení poklesu tlaku. Tepelná konvekce je však ovlivněna jen málo, což způsobuje snížení celkové teplotní vodivosti. Re je tedy doporučeno udržet v hodnotách mezi 4 000 – 10 000, přičemž 10 000 je považováno za optimální. [22]

Pokles tlaku se odvíjí od podmínek toku dle rovnice:

$$\Delta p = \frac{L}{2d} \rho v^2 C_f \quad (19)$$

Kde je L délka kanálku, ν kinematická viskozita a C_f faktor povrchového tření. Pro turbulentní tok platí vztah:

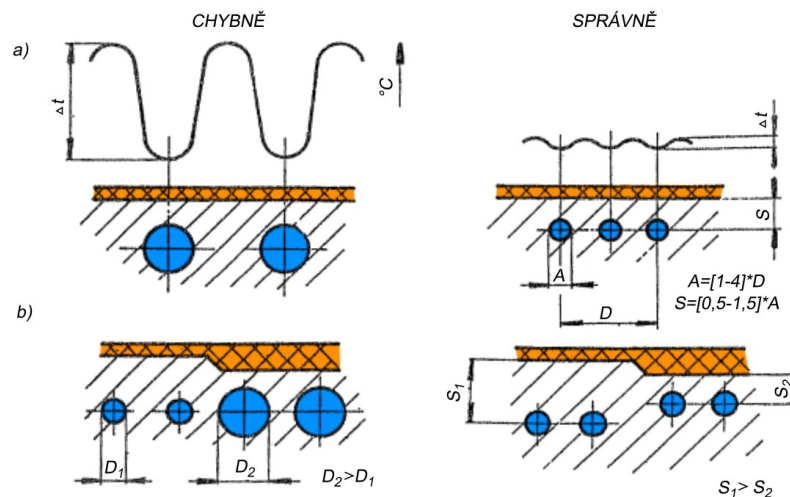
$$C_f = \frac{0,25}{1,8^2} \left\{ \log_{10} \left[\left(\frac{R_a}{3,7d} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \right\}^{-2} \quad (20)$$

R_a je hodnota dosažené drsnosti povrchu kanálků.

Přestože je vyšší průtok média výhodný pro redukci maximální a průměrné teploty, zaznamenává také vyšší pokles tlaku a vyžaduje tak silnější pumpu pro temperační obvod vedoucí ke zvýšení ekonomické náročnosti formy. Úspěšné redukování požadovaného toku snižuje cenu a zajistí také adekvátní chlazení, a to především u vícenásobných forem.

2.2 Konstrukční zásady temperačního systému

Konvenční, tedy běžný temperační systém je nejčastěji tvořen vrtanými kanálky, jimiž proudí temperační médium. Tomuto médiu je předáváno teplo z dutiny formy vytvořené taveninou polymeru. Velikost a rozložení kanálků jsou řešeny s ohledem na celkové řešení formy. Kolem dutiny formy musí být kanálky rozmístěny rovnoměrně a ve stejné vzdálenosti od dutiny (pokud se jedná o stejnou tloušťku stěny). Je také doporučeno volit vyšší počet kanálků o menším průměru s menší vzájemnou vzdáleností, viz *Obr. 28*. Jedná se obvykle o kruhový průřez s rozměrem 6 až 12 mm. Stěny výstřiku s větší tloušťkou by měly chladnout stejně rychle, jako stěny s menší tloušťkou. To je zajištěno změnou velikosti kanálků, či změnou vzdálenosti od dutiny. Při nedodržení dochází k anizotropii chlazení a tudíž i výsledných vlastností, zejména smrštění vedoucí k deformacím a vzniku zmetků. [19] [20]

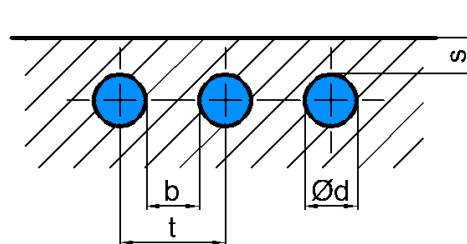


Obr. 28 a) vliv rozmístění kanálků na průběh teploty povrchu dutiny,
b) způsoby chlazení výstřiků o různé tloušťce stěny [19]

Temperační kanálky se umísťují v co nejmenší vzdálenosti od dutin forem. Tato vzdálenost se odvíjí od pevnosti a tuhosti použitého materiálu a také od vstřikovacího tlaku. Tab. 2 uvádí minimální vzdálenost kanálků od dutiny v případě oceli s $E = 2,1 \times 10^5$ MPa a vstřikovacího tlaku 100 MPa.

Tab. 2 Minimální vzdálenosti temperačních kanálků v milimetrech [19]

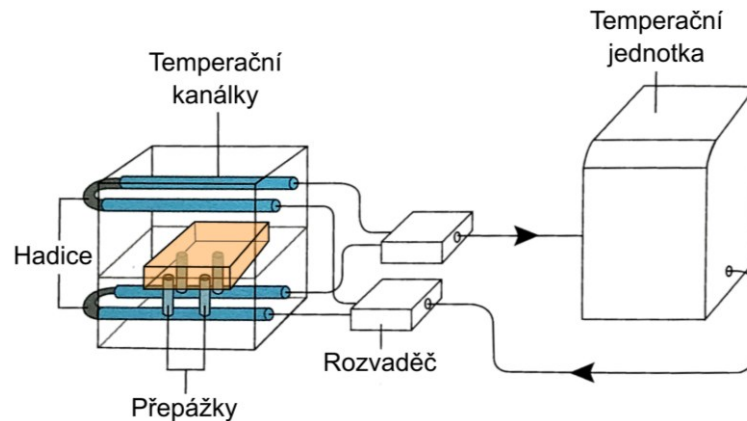
$\varnothing d$	6	8	10	12	14	16	18	20
s	4	6	8	12	15	20	25	30
t	10	14	17	20	24	27	30	34
b	4	6	7	8	10	11	12	14



Obr. 29 Schéma k Tab. 2 [19]

2.2.1 Prvky temperačního systému

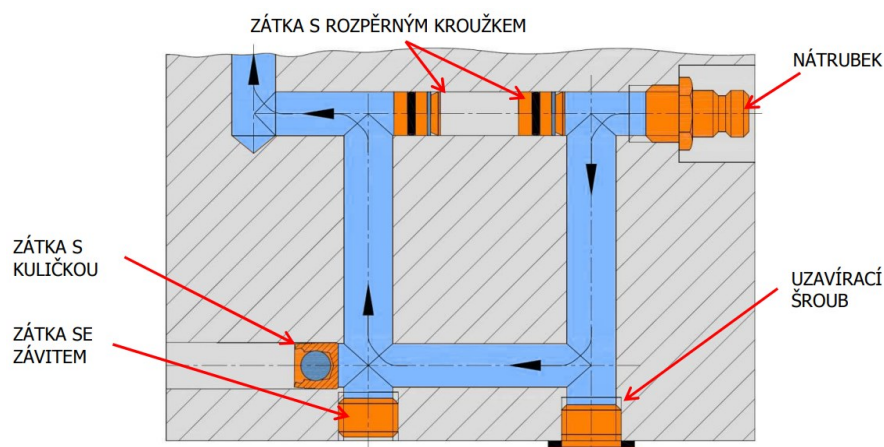
Obr. 30 zobrazuje schéma typického temperačního systému pro vstřikování, který je obvykle tvořen temperační jednotkou monitorující teplotu média zajišťující jeho ochlazování, popř. ohřev na temperační teplotu. Dále je temperační systém tvořen pumpou pro proudění média, rozvaděči pro rozdělení a svádění média ze všech temperačních systémů formy, hadicemi a samotnými temperačními kanálky formy.



Obr. 30 Temperační systém [6]

2.2.1.1 Doplnkové prvky temperačního systému

Temperační systém formy tvořený vrtanými kanálky je nutné osadit prvky pro správné proudění temperačního média a pro zamezení jeho úniku. Na vstupu a výstupu musí být namontovány přípojky pro instalaci hadic přivádějících temperační médium z a do temperační jednotky. Otvory po vrtání musí být poté utěsněny záplečkami, které kromě zamezení úniku udávají trasu proudění média. V případě přechodu kanálků mezi jednotlivými prvky formy (např. deska/tvarová vložka) je nutné tyto spoje opatřit těsníci kroužky. Je nutné zamezit vzniku slepých míst, kde by jinak docházelo k zatékání a médium by zde zůstávalo. Tím poté dochází k usazování nečistot a k zvýšenému riziku koroze.

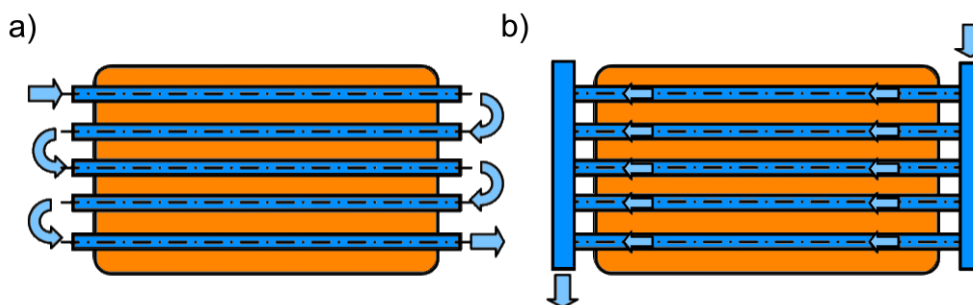


Obr. 31 Umístění prvků temperačního systému [23]

2.2.2 Rozložení temperačního systému

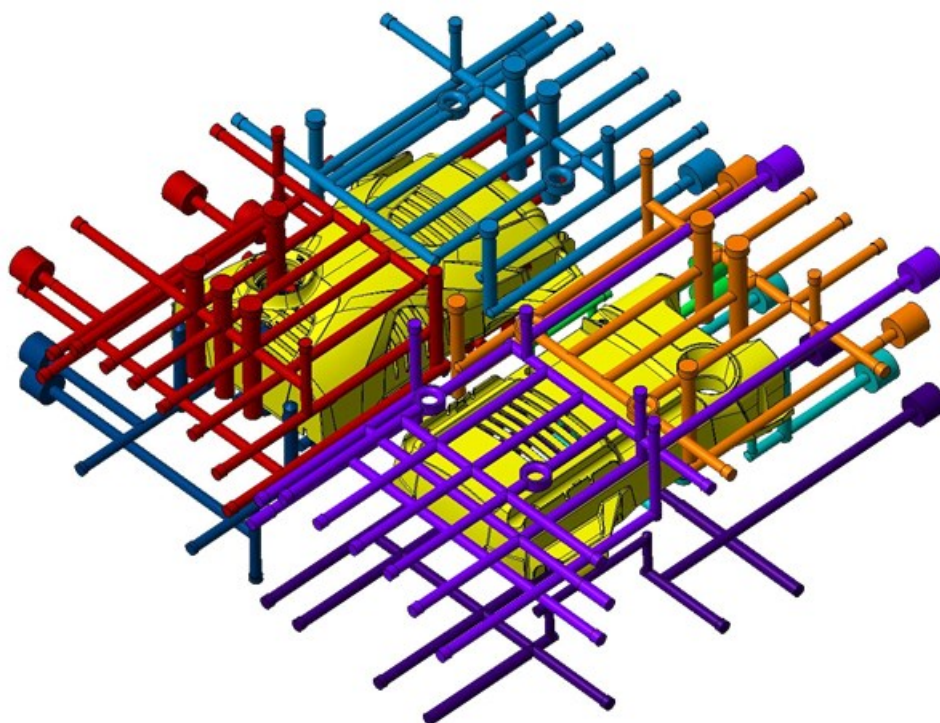
Systém rozmístění temperačních kanálků se dá klasifikovat na sériové a paralelní, viz Obr. 32. Sériové uspořádání je nejjednodušší a také nejběžněji používaná metoda, kdy jsou všechny kanálky propojeny jednou trasou. Paralelní systém představuje uskupení více

kratších kanálků, které sdílejí přívodný a odvodný kanál. Tepepační médium putuje jednotlivými kanály zvlášť, a proto je průtok těmito kanály spolu s odporem proti tečení na sobě nezávislý. V porovnání se sériovým systémem je tak flexibilnější při konfiguraci rychlosti chlazení a teploty média. [19] [22]



Obr. 32 Sériové a) a paralelní b) rozložení tepepačního systému

U velkých forem se můžeme setkat také s rozdělením tepepačního systému na více jednotlivých podsystémů pro zmenšení rozdílu mezi vstupní a výstupní teplotou tepepačního média vedoucí k zajištění rovnoměrnější tepepařice celé formy. Takový případ se nachází na *Obr. 33*. [22]



Obr. 33 Rozdělení tepepačního systému na podsystémy [24]

2.2.3 Temperační médium

2.2.3.1 Aktivní temperace

Mezi aktivní temperaci se zařazuje použití cirkulující teplotnosné kapaliny či plynu, které proudí temperačními kanálky. V případě plynů se využívá vzduchu a to za buď volného či nuceného proudění. Vzduch je ovšem špatný vodič a využívá se tak pouze v místech, kde není možné dovést kapalinu.

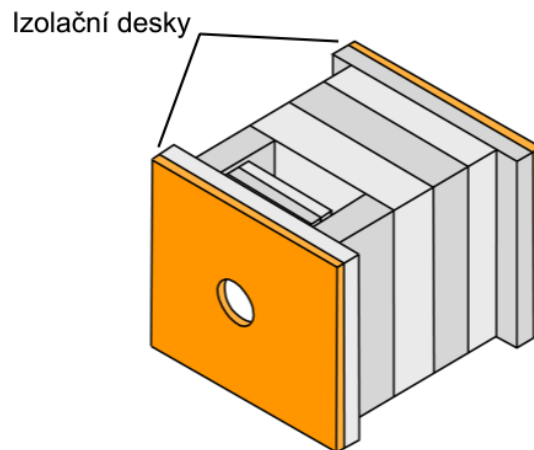
Nejběžněji používanou kapalinou je voda, která zajišťuje vysoký přestup tepla, vyžaduje nízké náklady a je ekologicky nezávadná. Je ovšem použitelná pouze při teplotách do 90°C (u tlakových okruhů až do 200°C) a bez její úpravy dochází ke korozi a také k usazování kamene v kanálcích. Při vyšších teplotách se využívají oleje, které se ale vyznačují horším přestupem tepla a vyžadují vyšší náklady na následnou likvidaci. Využívají se také glykoly a to většinou v kombinaci s vodou pro omezení koroze a ucpávání systému. U glykolů ovšem dochází ke stárnutí a nutnosti likvidace. [19]

Efektivita odvodu tepla závisí na několika faktorech. Je nutné dosáhnout turbulentního proudění média, které vzniká při Re nad 2300. Turbulenci napomáhá také geometrie kanálků. Odvedené teplo je také závislé na množství proteklého média a na teplotním spádu mezi vstupním a výstupním bodem, který by měl být max. 3 až 5°C. [19]

Kromě obvyklého průběžného chlazení je možné využít i sofistikovanější dynamické metody pro zintenzivnění odvodu tepla. Jednou z možností je pulzní temperace, kdy při pohybu formy, vyhazování výstřiku a vstřikovací fáze není dopravováno do formy temperační médium. To začne proudit až ve fázi dotlaku, díky čemuž dochází k lepšímu zatečení. Výsledkem je zlepšení požadované kvality výstřiku. [20]

2.2.3.2 Pasivní temperace

Pasivní temperační prostředky působí na formu svými fyzikálními vlastnostmi. Lze je rozdělit na tepelně izolační a tepelně vodivé materiály. Tepelně izolační materiály se využívají především pro zabránění přestupu tepla přes upínací desky do vstřikovacího stroje, viz *Obr. 34* [19]. O využití vodivých materiálů pojednává kapitola 2.2.4.5: Jádra z vysoce tepelně vodivých materiálů.



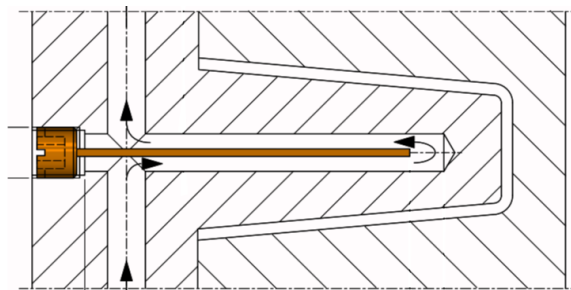
Obr. 34 Umístění izolačních desek [25]

2.2.4 Temperace jader

V případě konvenčních způsobů je temperace jader bez porušení stěny dutiny nemožná, a proto se v těchto případech využívá vkládání různých přepážek a tepelně vodivých materiálů.

2.2.4.1 Ploché přepážky – Baffle

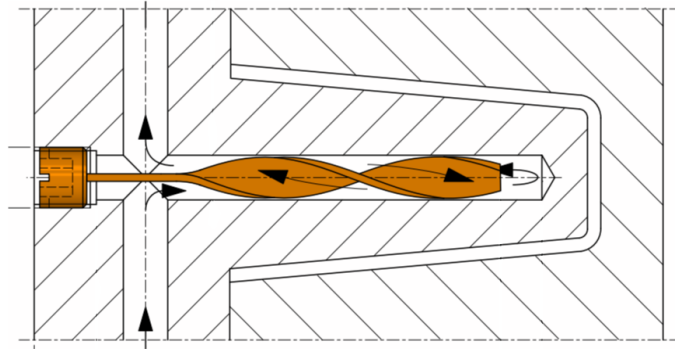
Plochá přepážka je nejběžnějším typem. Pro její uložení je kolmo k hlavnímu temperačnímu kanálku vyvrtán kanálek vedlejší směrem do jádra, viz Obr. 35. Přepážka je v otvoru upevněna pomocí závitů, nebo je vložena mezi dvě desky opatřené těsnícím kroužkem. Kanálek je takto rozdělen na dvě poloviny, což vede k proudění temperačního média do nitra jádra. Díky geometrii přepážky médium rychle mění směr toku, což vede ke zvýšení turbulence proudění spolu se zvýšením efektivity odvodu tepla. Na druhou stranu dochází k zvýšení poklesu tlaku a je tak nutné zajistit vyšší výkon pumpy [22] [26].



Obr. 35 Plochá přepážka [27]

2.2.4.2 Systém spirálové přepážky – Spiral baffle

Spirálová přepážka je oproti ploché opatřena dvojitým závitem. Tato úprava zajišťuje téměř zcela homogenní teplotní pole v oblasti použití tohoto systému. Spirálová přepážka navíc tvoří komplexní geometrii, díky které klade menší nároky na centrování uložení v kanálku oproti přepážce ploché [26].



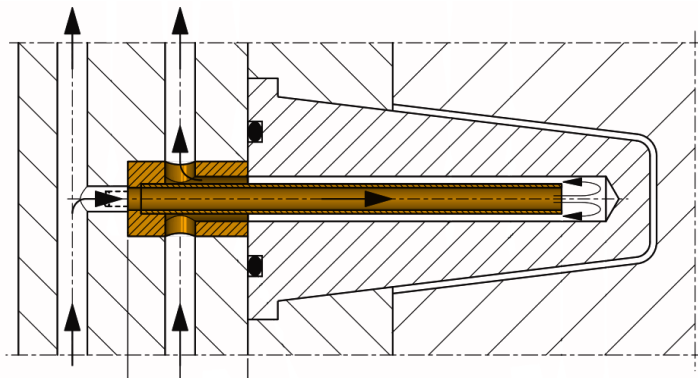
Obr. 36 Spirálová přepážka [27]

2.2.4.3 Systém fontánové přepážky – Bubbler

Dalším variantou temperace vnitřních prostor jader je fontánová přepážka. Do temperačního kanálku je oproti předchozím variantám vložena trubička, která zajišťuje přívod média. Tím je médium přiváděno až na konec kanálku na Obr. 37, odkud putuje zpět po jeho stěnách.

U štíhlých jader dosahují fontánové přepážky nejlepšího účinku. Průměry trubičky a kanálku musí být vyrovnané tak, aby byl průtokový odpor v obou průřezech stejný. Pro tuto rovnost je aplikována rovnice: [6]

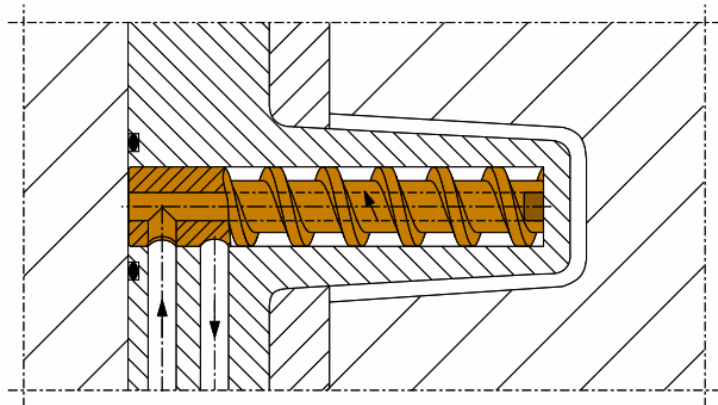
$$\frac{\text{vnitřní průměr}}{\text{vnější průměr}} = 0,707 \quad (21)$$



Obr. 37 Fontánová přepážka [27]

2.2.4.4 Spirálové trny

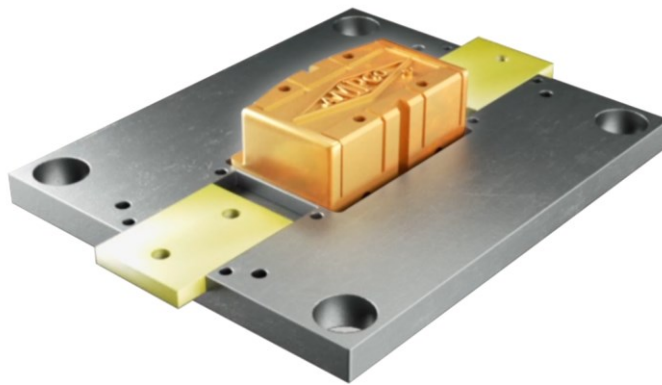
Další variantou pro přivedení temperačního média do jader jsou spirálové trny. Ty nachází uplatnění u rozměrnějších jader. Spirálové trny mohou být jednochodé a dvouchodé. U jednochodého trnu se nachází ve středu otvor pro odvod či přívod média a tento typ trnu je vyobrazen na *Obr. 38*. U dvouchodé varianty dochází k přívodu a odvodu temperačního média pouze pomocí drážek. [23]



Obr. 38 Spirálový trn [27]

2.2.4.5 Jádra z vysoce tepelně vodivých materiálů

Materiály jako především měď a její slitiny mají zásadně vyšší tepelnou vodivost, než běžně používané oceli. Nástrojové oceli mají tepelnou vodivost mezi 12 až 25 W/m*K, kdežto měď téměř 400 W/m*K. Samotná měď je ovšem příliš měkká a tedy nevhodná pro odolání tlaků vzniklých při vstřikování, a tak se využívají její slitiny s tepelnou vodivostí okolo 100 W/m*K. Vhodným využitím slitin mědi může být proces vstřikování zkrácen o 15 až 40% [28]. Využití tepelně vodivých materiálů jako temperační médium spadá do kategorie pasivní temperace. S využitím temperace pomocí vysoce tepelně vodivých materiálů stoupá cena a z ekonomických důvodů se tak většinou nevyrábí celé formy, ale pouze její tvarové části (tvárníky, tvárnice, jádra, vložky). [29]



Obr. 39 Jádro z vysoce tepelně vodivé slitiny mědi [28]

Výhody vysoce tepelně vodivých materiálů se využívají především u výroby drobných vložek jader tvárníků, výztužných žebér či dlouhých tvárníků, kde již nezbývá prostor pro přivedení temperačního média dostatečně blízko k dutině formy. Takový případ je na *Obr. 40*.



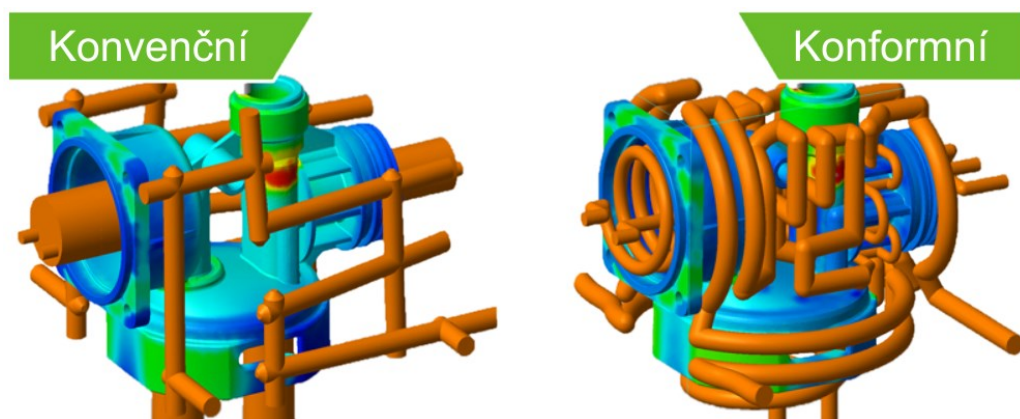
Obr. 40 Tvarové vložky z vysoce tepelně vodivé slitiny mědi [30]

Při návrhu formy s kombinací materiálů je velice důležité dbát na jejich různé teplotní roztažnosti, jejichž rozdíl by mohl mít vliv na vzhled výstřiku.

2.3 Konformní temperace

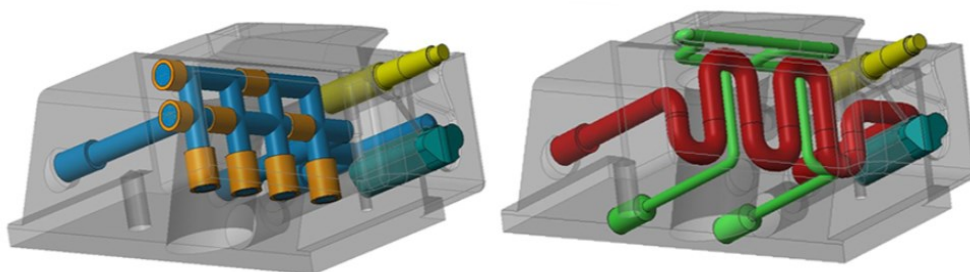
Zkracování doby chlazení a tím i vstřikovacího cyklu je klíčem k zvyšování efektivity a ekonomičnosti formy, díky čemuž dochází k snižování výsledné ceny výstřiku. Použití konformní temperace, kterou lze jinak definovat jako shodnou či přizpůsobenou, nabízí značnou výhodu oproti konvenčním metodám, jelikož při této metodě dochází k přesnému

kopírování tvaru dutiny formy. Výrobek je tedy nejenom ochlazen na vyhazovací teplotu rychleji, ale také rovnoměrněji, což znamená menší náchylnost na deformace, smrštění a další závady způsobené nehomogenním teplotním polem [31]. Použití konformního chlazení bylo prvně navrženo již v devadesátých letech a zaznamenává vysoký zájem v posledních letech především díky rozšíření a dostupnosti aditivních technologií pro zpracování kovů [22]. Mnoho studií se zabývá nahrazením vrtaných kanálků konformní technologií, které zaznamenávají zkrácení doby chlazení mezi 20 až 80% [22] [32], a celkové doby vstřikovacího cyklu o 15 až 70% [33] [34].



Obr. 41 Konvenční (vlevo) vs. konformní (vpravo) temperační systém [35]

Značnou výhodou v případě konformní temperace vyrobené aditivní technologií je tvorba kanálků již při výrobě tvarových částí formy. Odpadá tak nutnost druhotných operací v podobě vrtání kanálků a vkládání ucpávek, což vede ke zkrácení času výroby spolu s jejím usnadněním a tím pádem také ke snížení nákladů. U vrtaných systémů dochází také k ostrým zatáčkám, které vedou k poklesu tlaku a oslabení chladícího účinku, čemuž může být díky aditivní technologii také zabráněno tvorbou rádiusů [22].

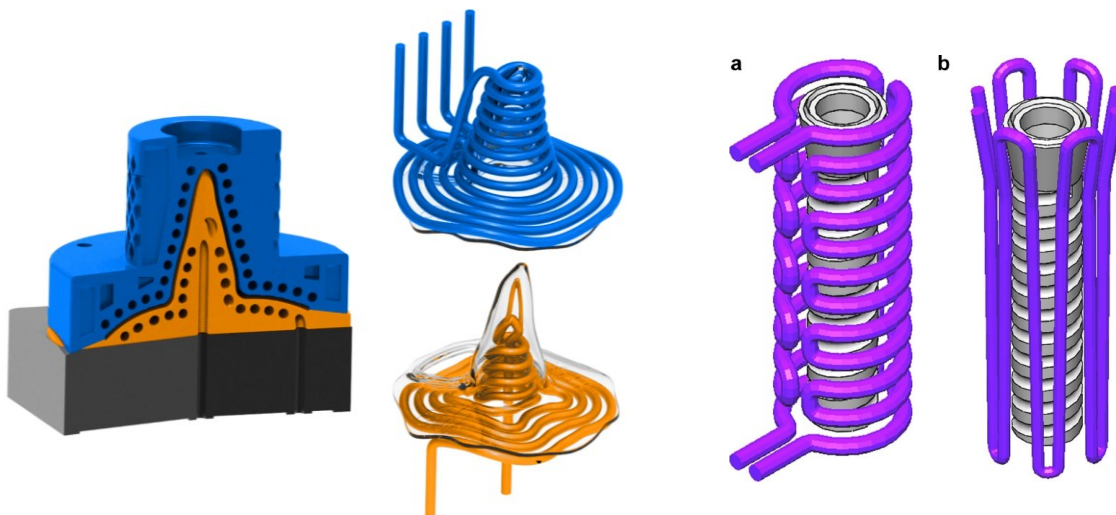


Obr. 42 Konvenční (vlevo) vs. konformní (vpravo) temperace čelisti [24]

2.3.1 Rozložení konformního systému

Základním způsobem vedení chladících kanálků je do spirály, viz Obr. 43 vlevo. Dalším způsobem vedení je tzv. cikcak, na stejném obrázku vpravo. U této metody se nachází mnoho

ostrých zatáček, ve kterých médium rychle mění svůj směr a je tím navíc podpořena turbulence proudění. Na druhou stranu díky tomu dochází ke značnému poklesu tlaku, který způsobuje snížení průtoku s případným snížením efektivity chlazení. Dále mohou být tyto typy rozložení rozděleny na podsystemy, a to na sériové a paralelní stejně jako konvenční systémy [22].



Obr. 43 Rozložení konformní temperace typu spirála (vlevo) [36] a cik-cak (vpravo) [22]

2.3.1.1 Průřez kanálků

U konvenčních metod výroby je průřez temperačních kanálků obvykle kruhový, což je zapříčiněno limitací způsobu jejich výroby vrtáním. Temperační systémy vyrobené aditivní technologií ovšem nemají v tomto ohledu žádná omezení, viz Obr. 44. Průřez tak může být například půlkruhový, obdélníkový, trapézový, či komplexnějších tvarů. Tvar kanálků může být podle potřeby i proměnlivý. Tyto variace nabízejí zvýšení plochy konformní se stěnou dutiny formy, čímž se zvedá homogenita a efektivita odvodu tepla. Při implementaci je ovšem nutné dbát také na případnou klesající pevnost tvarových vložek při použití těchto variací.



Obr. 44 Variabilní průřez konformních kanálků [37]

2.3.2 Koncepty konformních systémů tvořené sítě kanálků

Hlavními charakteristikami těchto systémů je komplexní topologie, či rozličné průměry temperačních kanálků. V důsledku toho by se při navrhování síťově topologického konformního systému měla věnovat větší pozornost distribuci průtoku a poklesu tlaku, protože obvyklá pravidla návrhu jsou odvozena pro jednodušší topologie s jednotnými průměry a tvary kanálků. Dále, odpovídající dovolenému poklesu tlaku, existuje minimální průměr kanálků, pod kterým kanálky nelze dále dělit na dílčí větve [22].

2.3.2.1 Voroného diagram

Použitelnost základních typů jako spirálové či cik-cak systémy klesá se zvyšující se komplexností geometrie dutiny formy [22]. Proto vyvstává snaha o vytvoření alternativních systémů, jejichž příkladem je systém sítě kanálků založeného na principu Voroného diagramu. Generace tohoto systému probíhá automaticky podle uzpůsobeného algoritmu tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné teplotní pole. Je pouze nutné zadat vstupní parametry, jako je např. průměr kanálků. Výsledkem je zkrácení doby chlazení a redukce deformací. Problematický je ovšem velký tlakový spád spolu s významným poklesem Re. [34]



Obr. 45 Proces tvorby temperačního systému dle Voroného diagramu [34]

2.3.2.2 Biomimetrický systém

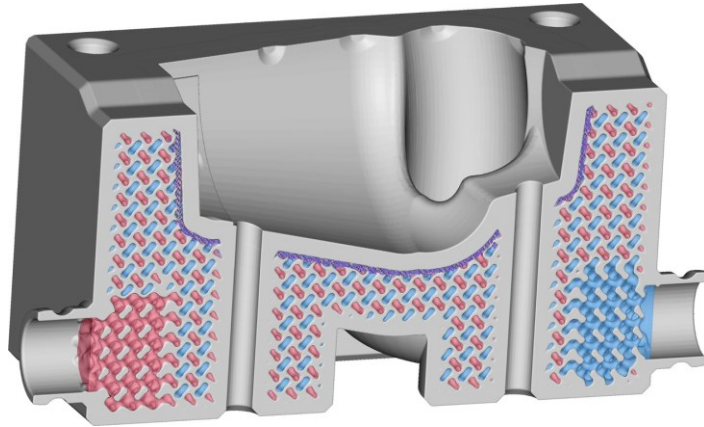
Další typ temperačního systému tvořeného sítí kanálků je inspirován krevním řečištěm. Tento vaskulární systém byl navržen k eliminaci hot spotů u komplexních výrobků s úzkými, hlubokými štěrbinami, jako je na *Obr. 46*. Zde se hlavní kanál jako tepna rozděluje na sub artérie, které se mohou dále dělit na menší kapiláry, čímž se eliminuje lokální akumulace tepla a je tak dosaženo rovnoměrného rozložení teploty [38]. Dodržením stejných délek kanálků je zajištěn konstantní průtok média a minimální tlakové rozdíly [39].



Obr. 46 Vaskulární systém s průměry kanálků 3, 2,12 a 1,5 mm. [39]

2.3.2.3 Porézní systém

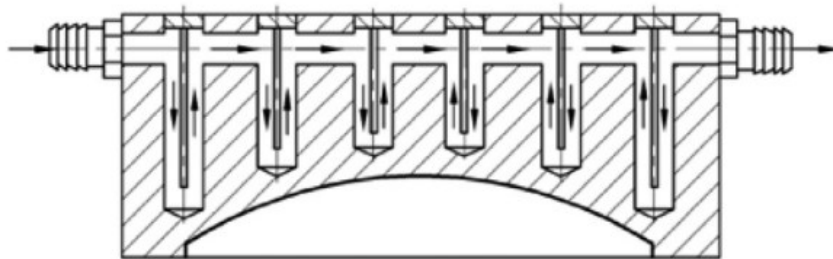
Hlavním cílem tohoto systému je zásadní snížení hmotnosti tvarové vložky tvorbou porézní struktury, a to až o 40 - 50%. Touto porézní strukturou je následně tvořen temperační systém, jímž tak temperačním médiem konformně putuje po téměř celém objemu vložky, viz *Obr. 47*. Avšak díky takovému odlehčení dochází také k zásadnímu snížení tuhosti, a je proto před aplikací zvolit optimální strukturu a podrobit ji podrobné analýze [22].



Obr. 47 Porézní temperační systém [40]

2.3.3 Série přepážek

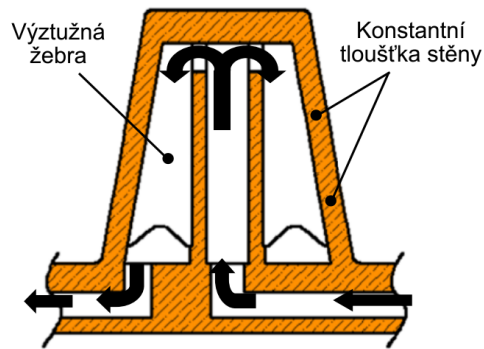
Kromě temperace jader se přepážky používají také pro temperaci ploch tak, že jsou uspořádány v sériích, viz Obr. 48. Díky jejich principu výroby směřují ke stěně dutiny formy a oproti klasickým, podélně vrtaným kanálkům tak mohou lépe kopírovat tvar dutiny a mohou tak mnohem lépe dosáhnout homogenního odvodu tepla. Tato metoda konformní temperace je zaměřena na střední a velké formy, jelikož je její provedení finančně velmi úsporné v porovnání s metodou tisku, která je také více omezena rozměrově podle velikosti 3D tiskárny. [26] [41]



Obr. 48 Konformní temperační systém tvořený sérií přepážek [26]

2.3.4 Konformní fontánová přepážka

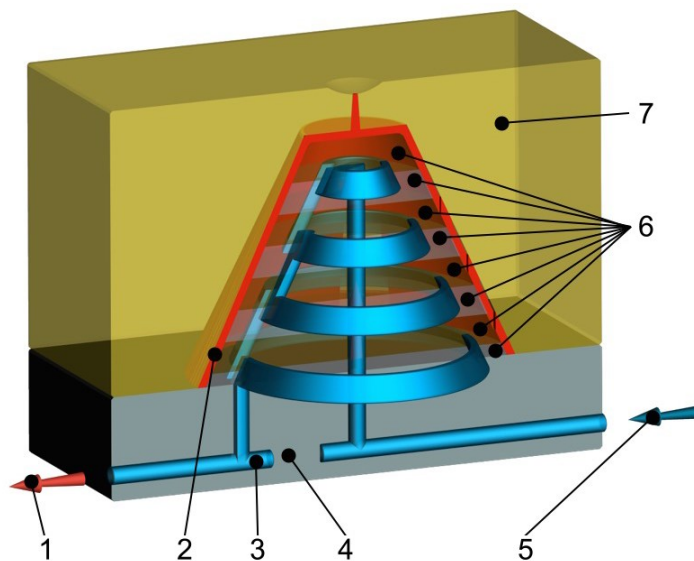
Typické fontánové přepážky mají kvůli principu vrtaného otvoru konstantní průměr a nemohou tak zajistit konformní vzdálenost od dutiny formy v případě proměnlivého průměru, nebo u jiných než válcových jader. U konformní varianty je udržována konstantní vzdálenost od dutiny formy pro zajištění maximálně rovnoměrného odvodu tepla. Je ovšem nutné dutiny přepážky vybavit žebry tak, aby snesla tlaky způsobené vstřikováním taveniny. [22] [42]



Obr. 49 Konformní fontánová přepážka [42]

2.3.5 Temperační systém Contura

Tato metoda přesně kopíruje tvar dutiny formy a jedná se tak již o metodu konformní, avšak vyrobenou konvenčními metodami. Princip je založen na rozdělení jádra na 2 či více vrstev, na jejichž styčných plochách jsou následně frézovány temperační kanálky. Po vyfrézování jsou vrstvy opět pevně spojeny pájením. Před uvedením do provozu je také nutné aplikovat dokončovací operace v podobě broušení a leštění. Kvůli náročnosti výrobního procesu se značně zvyšuje cena a také čas potřebný pro výrobu tohoto systému. [16] [43]

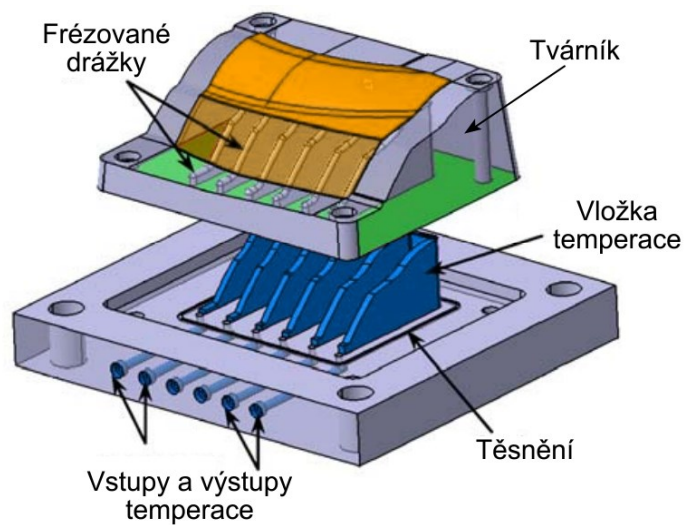


Obr. 50 Schéma temperačního systému Contura [16]

1 – výstup temperačního media, 2 – vstřikovaný díl, 3 – temperační kanál, 4 – tvárník, 5 – vstup temperačního media, 6 – jednotlivé části jádra, 7 - tvárnice

2.3.6 Frézovaný konformní systém

Konformní temperační systém je možné vyrobit i zcela konvenčními způsoby frézování. Pro výrobu takového systému je stejně jako u systému Contura nutné tvárník či tvárnici rozdělit, a to na 2, případně více částí. Do 1. části se stěnou dutiny formy se z druhé strany obrobí chladičí kanálky s konformním odstupem od stěny dutiny. Z 2. části je poté obrobena negativ 1. části tvořený žebry kopírujícími tvar temperačních kanálků s odsazením tak, aby vznikl konstantní průřez kanálků podél celého systému, viz *Obr. 51*. Jednotlivé části jsou poté spojeny mechanicky a opatřeny těsněním.



Obr. 51 Frézovaný konformní systém [21]

3 VÝROBA NÁSTROJŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ ADITIVNÍMI METODAMI

Aditivní metody (Additive Manufacturing - AM) výroby označované také jako 3d tisk a Rapid Prototyping jsou procesy, při nichž dochází k nanášení jednotlivých vrstev daného materiálu, které po dokončení procesu tvoří ucelený 3d výrobek. Touto metodou výroby lze zpracovat širokou škálu materiálů, kdy se uplatňují nejčastěji plasty a kovy, ale dále i beton, keramika, kompozity, biologické materiály a další. Vstupní struktura materiálu je nejčastěji ve formě struny (plasty), drátu, prášku či kapaliny. Jedná se o poměrně novou technologii zpracování materiálů s počátky v 80. letech minulého století, která nyní zaznamenává boom, a to především díky vypršení jednoho z klíčových patentů v roce 2009. [44] [45] [46]

Princip AM díky svým možnostem mnohdy nahrazuje doposud tradiční technologie. Rozšiřuje se do všech odvětví průmyslu a stává se nepostradatelnou součástí výrobního procesu. Díky unikátnímu principu výroby přidáváním materiálu, na rozdíl od jeho typického ubírání, se nabízí výhody z jak ekonomického, tak i ekologického hlediska. Při výrobě není použit nadbytečný materiál a vzniká pouze minimální, či dokonce žádný odpad. Redukce nákladů vzniká také u výrobního nástroje, protože k tisku nám většinou stačí pouze jedna tryska, popř. laser podle konkrétní metody. Při výrobě aditivními technologiemi často vznikají již funkční, plnohodnotné výrobky a často tak odpadá nutnost dokončovacích operací.



Obr. 52 Výrobek aditivní technologie s komplikovanou geometrií [47]

V oblasti technologie vstřikování zaznamenává 3d tisk kovů významný úspěch ve výrobě funkčních částí forem. Oproti klasicky používaným třískovým metodám není potřeba různých nástrojů pro dosažení komplikované geometrie dutin a uzavřených kanálků temperačních systémů.

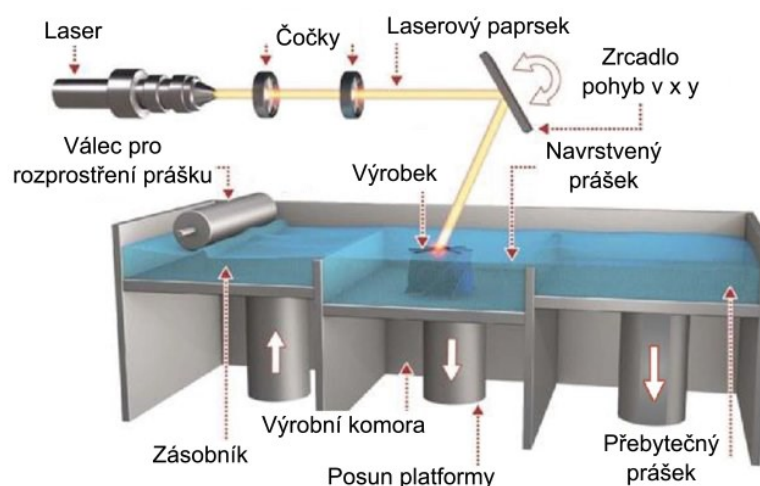
Dosahovaná kvalita povrchů 3d tisknutých částí je nižší než u konvenčních metod a je ovlivněna schodovitou strukturou vrstveného materiálu. Je proto nutné dodatečné obrábění pro dosažení hladkých stěn tvarových vložek vstřikovací formy.

Nevýhodou 3d tisku kovů jsou jeho vysoká energetická spotřeba a také omezení maximálních rozměrů (max. 250x250x300 mm u L-PBF). Většinou se tak nesetkáme s celými formami vyrobenými metodou AM, ale pouze s jádry. Někdy ani ta nemusí být kompletně z AM, ale pouze smontované z menších částí vyrobených různými metodami. Tímto kombinováním výrobních metod může být efektivita a ekonomičnost výroby zvýšena na maximum.

3.1 Laser Powder Bed Fusion

Existuje poměrně mnoho technologií pro tisk kovů, ovšem pro tisk vstřikovacích forem nejsou všechny vhodné. Proto se tato práce zabývá právě pouze touto technologií.

U této technologie dochází k vrstvení materiálu na platformě pomocí ramena, viz *Obr. 53*. Obvyklá tloušťka vrstev je 20 až 100 μm . Jakmile je na platformě rozprostřena vrstva prášku ze zásobníku, dochází k tavení materiálu paprskem koncentrované energie. Tyto operace se opakují, až dokud není celý výrobek hotov. Dosahovaná hustota materiálu je až 99,99% v případě oceli H13. Některé mechanické vlastnosti, jako tahové napětí a mez únavy jsou nižší, než u konvenčně zpracovávaného materiálu. Výrobní rychlost je obvykle 5-20 cm^3/h . [22] [48] [49]



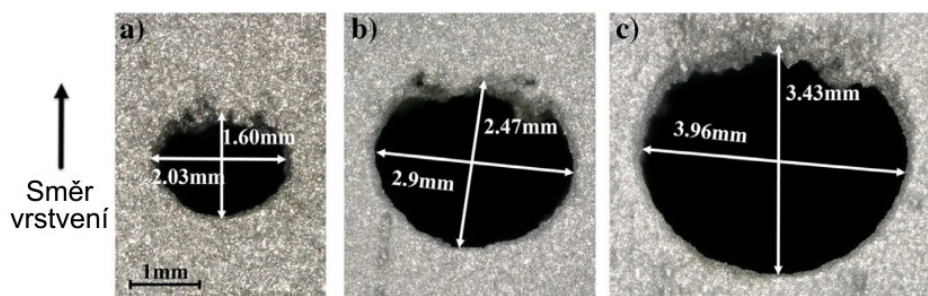
Obr. 53 Schéma technologie Laser Powder Bed Fusion [50]

K tavení materiálu se využívá převážně laserový paprsek (L-PBF), nebo i proud elektronů (E-PBF). Zdroj paprsku laseru je statický a je nasměrován do zrcadla, které jej dále

usměřuje po osách x a y. Pod L-PBF spadají technologie Selective Laser Melting (SLM) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS), s jejichž názvy se setkáváme častěji. Jedná se o obchodní značky a jejich metody se téměř shodují. Rozdíl je pouze na molekulární úrovni a to díky různým zpracovatelským teplotám. SLM využívá zpravidla vyšší teploty a materiál je tak zcela roztaven. U DMLS jsou teploty nižší a dochází spíše ke spékání neboli sintrování částic. Tavicí teploty SLM jsou vhodné spíše pro čisté materiály a sintrovací teploty DMLS jsou vhodné pro větší spektrum materiálů a jejich slitin. [51] [52] [53]

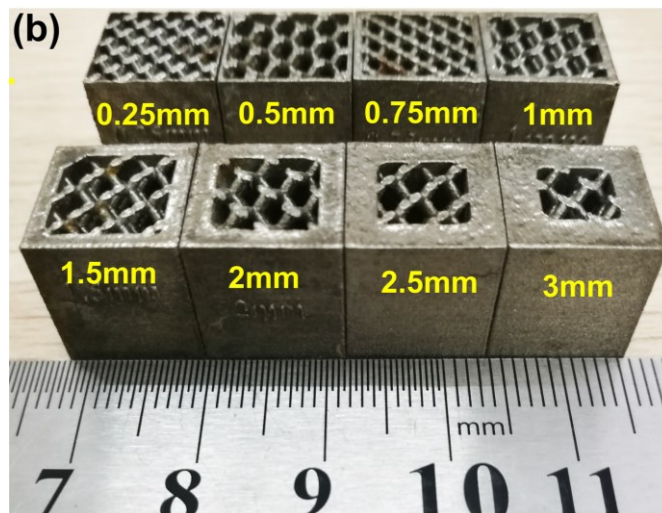
Po zhotovení výrobku je nutné jej zbavit přebytečného materiálu a případných podpurných struktur. Z temperačních kanálků je přebytečný prášek odstraněn pomocí stlačeného vzduchu.

Temperační systém vyrobený aditivní technologií vede ke zkrácení vstřikovacího cyklu a celkově zlepšuje kvalitu výstřiků, avšak dosahovaná kvalita povrchu a přesnost kanálků je horší, než u konvenčního systému. Rozměrová přesnost kanálků závisí na jejich orientaci vzhledem ke směru tisku. U horizontálních kanálků se mohou vyskytovat problémy především na horní části stěny, viz *Obr. 54*. [22]



Obr. 54 Rozměrové nepřesnosti u horizontálních kanálků vyrobených aditivní technologií [22]

K zamezení vzniku propadlin lze kanálky vyztužit podpurnou konstrukcí, viz *Obr. 55*, která kromě zlepšení kvality povrchu zvyšuje pevnost kanálků, což umožňuje vyrábět větší průřezy kanálků různých průřezů, přičemž podpurná struktura navíc zvyšuje kontaktní plochu temperačního média s formou, což vede k zvýšení efektivity temperace. Na druhou stranu taková struktura vyžaduje vyšší tlaky, které mohou příliš drobnou strukturu poškodit a vést k ulomení struktury. [49]



Obr. 55 Vyztužené temperační kanálky [49]

3.1.1 Zbytková napětí

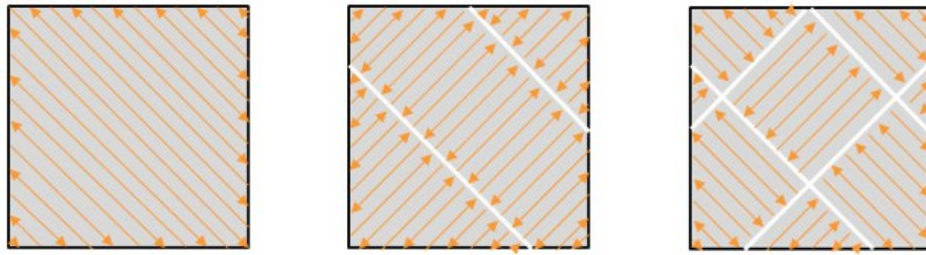
Zbytkové napětí je přirozený výsledek rapidního ohřevu a chlazení, která jsou přirozenou součástí L-PBF. Po tavení vrstvy kovu pro spojení mezi sebou a také s předešlou vrstvou dochází k chladnutí spojeného kovu, čímž dochází k smrštění vedoucí ke vzniku napětí. Vrstvením materiálu zbytkové napětí výrobku nabývá, čímž může docházet ke vzniku úchylek či dokonce k poškození výrobku jako na Obr 56. K těmto poškozením dochází především u výrobků s velkým průřezem, což mohou být například právě větší jádra vstříkovacích forem. [54]



Obr. 56 Vznik praskliny způsobené zbytkovým napětím [54]

3.1.1.1 Strategie tisku – minimalizace zbytkového napětí

Strategie tisku určuje průběh tavení vrstvy kovového prášku. Vhodná volba strategie tisku pro určitý výrobek slouží k optimalizaci jeho přesnosti, minimalizaci vzniku deformací a zbytkového napětí. Strategií tisku se mění délka tiskových vektorů, viz Obr. 57, a tím také velikost napětí. S kratšími trasami tisku vznikají menší zbytková napětí. Kromě délky lze měnit rotaci celkovou a také rotaci jednotlivých úseků vůči sobě. [54]

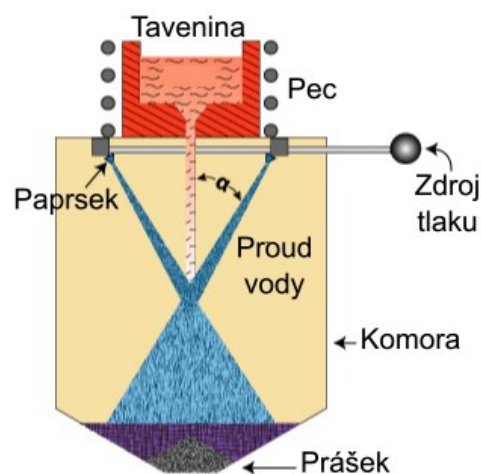


Obr. 57 Strategie tisku [54]

3.1.2 Materiály

Kovových materiálů, ze kterých se vyrábějí prášky pro aditivní technologie, je dnes široká škála a stále přibývají další. Nejběžněji se využívají ocel, nikl, chrom, kobalt, titanové slitiny, hliník a další. Mezi dostupnými prášky jsou všechny oceli často používané pro výrobu částí forem, jako jsou nástrojové oceli M300 (1.2709), H13 (1.2344), M2 (1.3343), P20 (1.2311) a nerezové oceli 316L (1.4404), 17-4 PH (1.4542) a mnoho dalších. [51] [55]

Kovové prášky jsou vyráběny pomocí atomizace. Kov se nejprve převede do taveniny a v tomto stavu je v podobě tenkého proudu rozložen na mikroskopické částice vystavením nárazu vysokoenergetických proudů plynu nebo vody. Touto technologií vznikají prášky kovů s částicemi o průměru 20 – 60 μm . [56] [57]

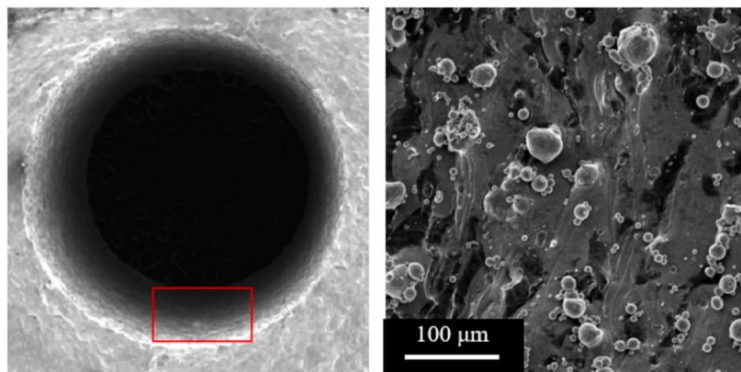


Obr. 58 Schéma výroby kovových prášků metodou atomizace [56]

3.1.3 Dokončovací operace temperačních systémů

Přestože drsná struktura stěny kanálků podporuje turbulentní tok a tím efektivitu chlazení, příliš vysoká drsnost může vést ke koncentraci napětí a tím snižovat únavovou životnost formy. Drsnost povrchu vyrobeného aditivní technologií dosahuje přibližně hodnoty Ra 10 μm . Dále aditivní technologie doprovází některé defekty, jako například uvíznutí částečně roztaveného prášku na stěnách. Povrch kanálků je proto potřeba upravit. Povrch kanálků

může být dokončen pomocí několika metod, mezi které patří nejčastěji využívaná technologie protlačování abrazivní suspenze, dále ultrazvuková kavitační abraze, laserové leštění, chemické leštění a elektrochemické leštění. [58]



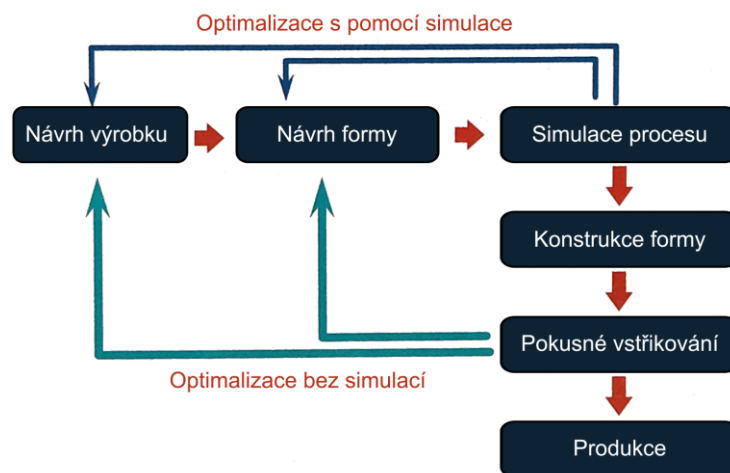
Obr. 59 Uvznutý, částečně roztavený prášek (vlevo) a detail povrchu kanálku (vpravo) [58]

3.1.3.1 Povlakování temperačních kanálků

Především konformní temperační systémy s jejich často komplexní geometrií a malými průměry kanálků mají zvýšenou tendenci k usazování nečistot a vodního kamene, či vzniku koroze. Pro předcházení těchto problémů je vhodné opatřit stěny temperačních kanálků ultra tenkým (50-100 μm), keramickým povlakem. Povlak může značně prodloužit životnost formy, a to nejen kvůli řešení již zmíněných problémů. Povlak tvoří povrch s nízkou drsností, čímž také schová jakékoliv případné defekty jako prasklinky, nerovnosti a případnou porozitu povrchu. Chrání také materiál formy v případě nutnosti čištění před agresivními chemikáliemi. [59]

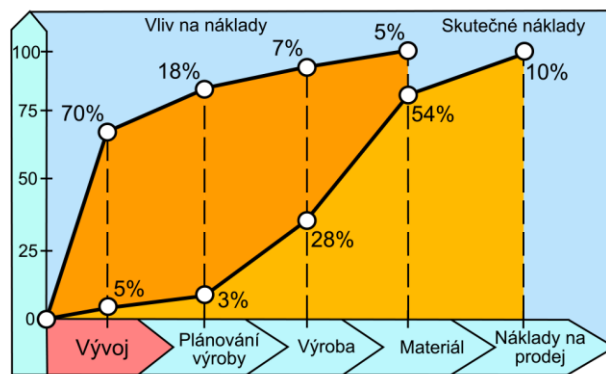
4 SIMULACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

U technologie vstřikování je možné setkat se s rozsáhlým množstvím vad výstřiků. Dříve bylo při setkání s těmito problémy a defekty tradičním řešením metoda pokus – omyl, při které se opakovalo testování a modifikování vstřikovací formy. Tato metoda spotřebovala významné množství času, pracovní síly, financí, vstřikovaného materiálu a dalších prostředků. [6] [60]



Obr. 60 Koncepty optimalizace bez a se simulací [6]

S nástupem CAE (Computer Aided Engineering) simulačních nástrojů, tedy softwarových analýz, se stal vývoj vstřikovacích forem mnohonásobně efektivnější. CAE dokáže implementovat složité reologické, termální a mechanické vlastnosti materiálů, čímž umožňuje konstruktérům posoudit a případně měnit design ještě před začátkem výroby formy. Použitím analýz je možné snižovat hmotnost výstřiků vedoucí k snížení hmotnosti, redukcii spotřeby polymeru, zkrácení vstřikovacího času a kvalita výstřiků je obecně zlepšena. Díky možné optimalizaci již před zahájením výroby je zredukován počet pokusných vstřikovacích procesů, což má pozitivní dopad na ekonomické i ekologické hledisko výroby. Díky těmto výhodám je možné výsledný produkt dodat značně rychleji a levněji na trh. [6] [60]



Obr. 61 Růst nákladů na uvedení výrobku na trh a vliv jednotlivých etap na růst nákladů [60]

Na Obr. 61 je znázorněn růst nákladů vzhledem k uvedení výrobku na trh spolu s vlivem jednotlivých etap. Hlavními parametry, které udávají cenu vstřikovaných dílů, jsou cena vstřikovací formy, cena vstřikovaného materiálu, hmotnost výstřiku včetně vtoků a délka vstřikovacího cyklu. Na grafu zahrnuje vývoj 70% celkových nákladů, což činí přibližně 5% výrobních nákladů. Vývoj zahrnuje návrh plastového dílu, konstrukci vstřikovací formy a nastavení podmínek vstřikovacího procesu. To vše jsou procesy, které lze optimalizovat pomocí CAE simulací. [60]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro tuto diplomovou práci byly stanoveny následující cíle:

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

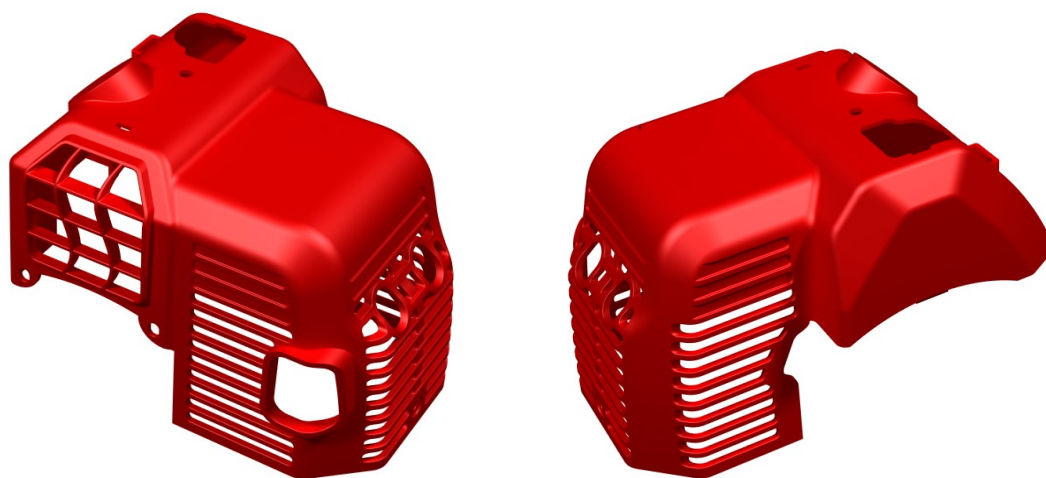
6 VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK

Výrobkem zvoleným pro vstřikování je kryt motoru strunové sekačky od firmy AL-KO, model BC 4125. Na *Obr. 62* je zvýrazněn tento kryt přimontovaný na motor sekačky. Na dalším *Obr. 63* se nachází CAD model vytvořený podle tohoto krytu. Místo originální černé barvy, kterou lze vidět na fotografiích, je model krytu zobrazen v červeném provedení pro lepší zřetelnost.

Jedná se o výrobek jak funkční, tak pohledový. Jeho funkcí je ochrana proti styku s motorem, který při práci dosahuje vysokých teplot vedoucích k možnému popálení. Na tuto skutečnost poukazuje žluté značení na krytu motoru. Dále kryt chrání motor před možným poškozením případnými nárazy. V neposlední řadě zvyšuje tento kryt také estetičnost stroje.



Obr. 62 Zvolený výrobek pro vstřikování – kryt motoru strunové sekačky AL-KO

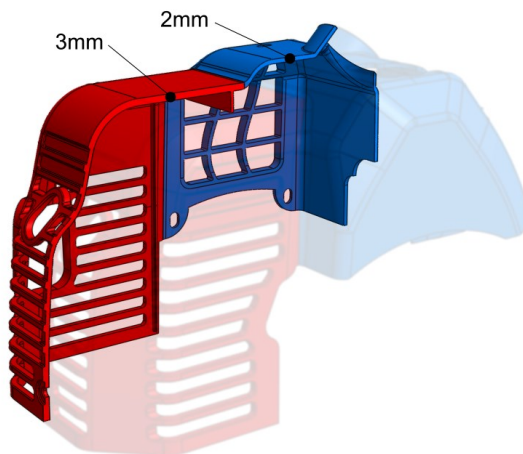


Obr. 63 CAD model krytu motoru

Tvar výrobku tvoří dutinu s komplexní geometrií, u kterých konvenční temperace strádají při snaze o dosažení homogenního teplotního pole, což značně snižuje efektivitu temperace.

Právě proto byl tento výrobek vybrán pro prokázání zvýšené efektivity chlazení použitím konformní temperace.

Rozměry výrobku jsou 210 x 142 x 148 mm (délka, šířka, výška). Výrobek je rozdělen na dvě části dle tloušťky stěny, což je znázorněno v řezu na *Obr. 64*. Červeně zvýrazněná část výrobku má tloušťku stěny 3 mm, kdežto modře zvýrazněná část má pouze 2 mm. Dá se předpokládat vliv rozdílu tloušťky na dosažitelnost rovnoměrného chlazení.



Obr. 64 Řez výrobkem poukazující na rozdílné tloušťky stěny 2 mm (modře) a 3 mm (červeně)

6.1 Materiál výrobku

Dle funkce uvedené v *Kapitole 6* jsou u tohoto výrobku kladeny nároky především na tepelnou stabilitu, pevnost, pružnost a také dosažení kvalitního povrchu. Na vnitřní straně krytu je vyznačen použitý materiál, viz *Obr. 65*. Materiálem je Polyamid 6 (PA6) plněný 30 % skelných vláken (GF30 – Glass Fibers). Bylo rozhodnuto o použití stejného materiálu i v této práci.

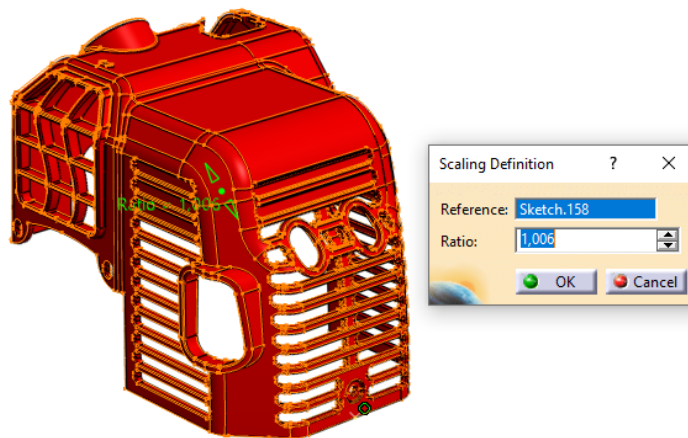


Obr. 65 Značka materiálu vyznačená na vnitřní straně výrobku

Konkrétním materiálem vybraným pro tuto práci je Zytel® 73G30T NC010 od firmy DuPont. Tento materiál se vyznačuje vysokou mechanickou pevností, vynikajícím poměrem tuhosti a houževnatosti a tepelnou stabilitou [61]. Tyto a další vlastnosti materiálu jsou

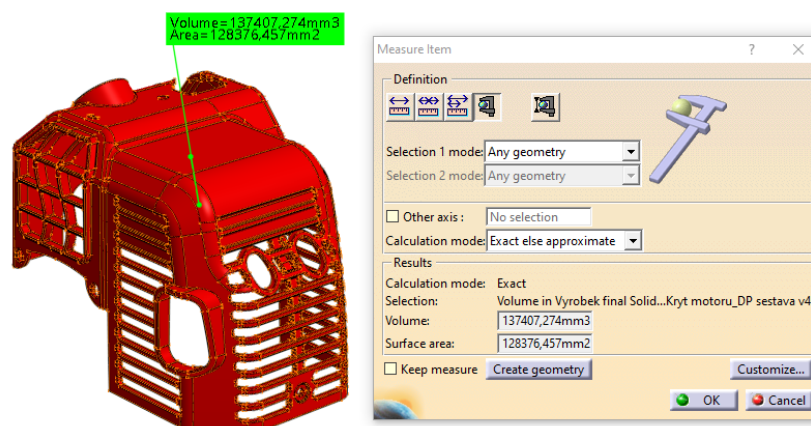
perfektní pro splnění požadovaných vlastností u krytu motoru. Jedná se o semikrystalický polymer.

V materiálovém listu, který je na konci této práce připojen jako *Příloha I*, je uvedeno smrštění 0,2 % ve směru vstřikování a 1 % ve směru kolmém. Jelikož není možné určit přesné smrštění, byl zvolen přibližný průměr a celý model výrobku byl zvětšen o 0,6 %, viz *Obr. 66*. Sketch.158 je vztažný bod pro zvětšení.



Obr. 66 Zvětšení výrobku o smrštění

Na *Obr. 67* se nachází měření výrobku pomocí modulu Measure Item programu Catia pro zjištění objemu po zvětšení o smrštění. Tento údaj je třeba znát pro výpočet množství materiálu potřebného pro kompletní vyplnění dutiny a také pro správnou volbu vstřikovacích trysek.



Obr. 67 Objem výrobku po zvětšení

Objem výrobku je $V = 137\,407,274\text{ mm}^3 = 1,37 \cdot 10^{-4}\text{ m}^3$, z čehož je možné s pomocí hustoty vybraného materiálu vypočítat hmotnost vstřikované dávky na jeden výrobek:

$$m = \rho \cdot V = 0,184\text{ kg} \quad (22)$$

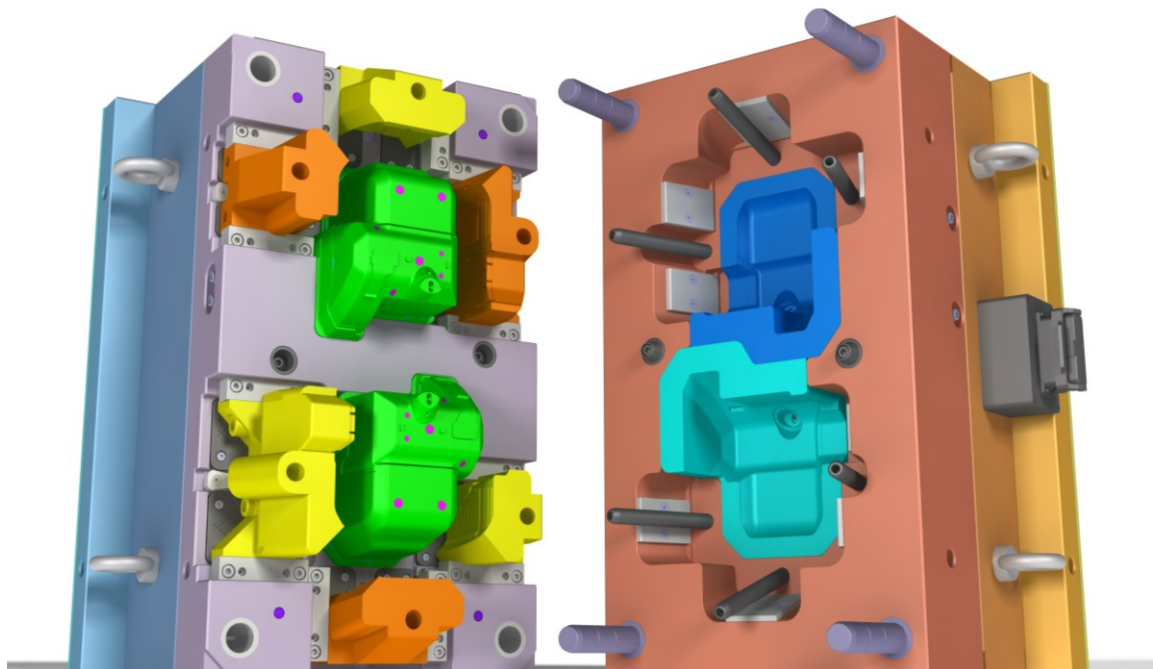
7 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací forma byla zkonstruována s ohledem na rozměry a složitost výrobku, od kterých se odvíjí dělicí rovina, počet posuvných čelistí, násobnost a další.

Výsledek této práce, tedy zhotovenou vstřikovací formu lze vidět na vyrenderovaném *Obr. 68*. Forma je zde rozdělena v dělicí rovině. Jasnými barvami jsou zde zvýrazněny tvarové vložky a vyhazovače a bledými barvami rám formy. Na levé straně se nachází pohyblivá polovina a na pravé straně polovina nepohyblivá, tedy pevná.

Všechny tvarové vložky jsou vyrobeny aditivní technologií pro umožnění aplikace konformního chlazení. Všechny ostatní prvky této vstřikovací formy jsou poskládány z normálií od firmy HASCO a Meusburger, které jsou dle potřeby upraveny (např. délka vyhazovačů). Aplikace normálií vede k urychlení a zefektivnění konstrukčního procesu. V průběhu práce jsou jednotlivé normálie popsány spolu s jejich normami (značkami) daného výrobce. Značení K a Z používá firma HASCO, značení E firma Meusburger.

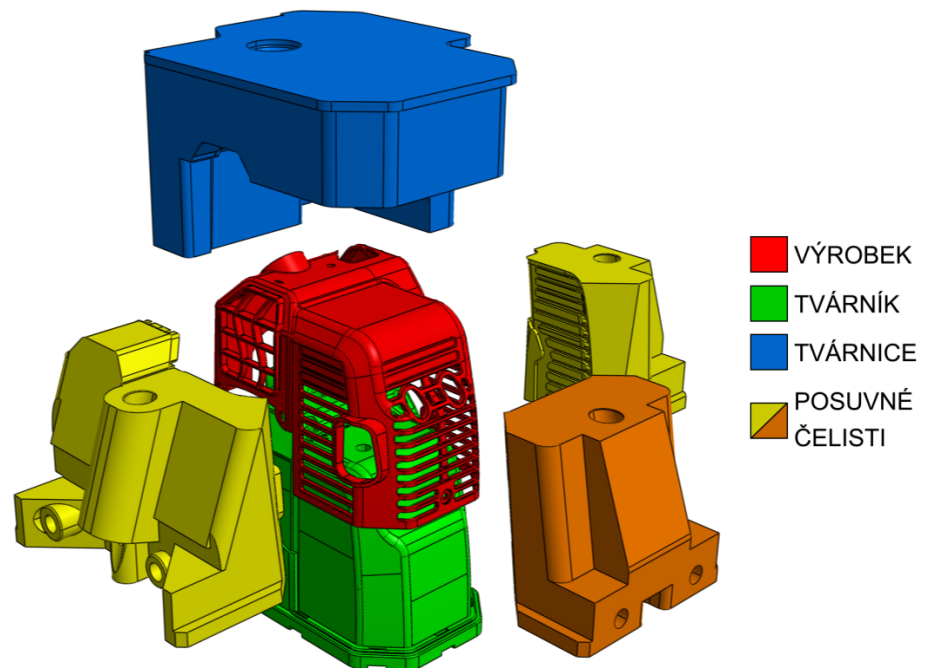
Forma byla konstruována především s ohledem na minimalizaci jejích rozměrů. I přes velikost výrobku je tak forma poměrně kompaktní.



Obr. 68 Render kompletní vstřikovací formy rozdělené v dělicí rovině, vlevo pohyblivá část, vpravo nepohyblivá

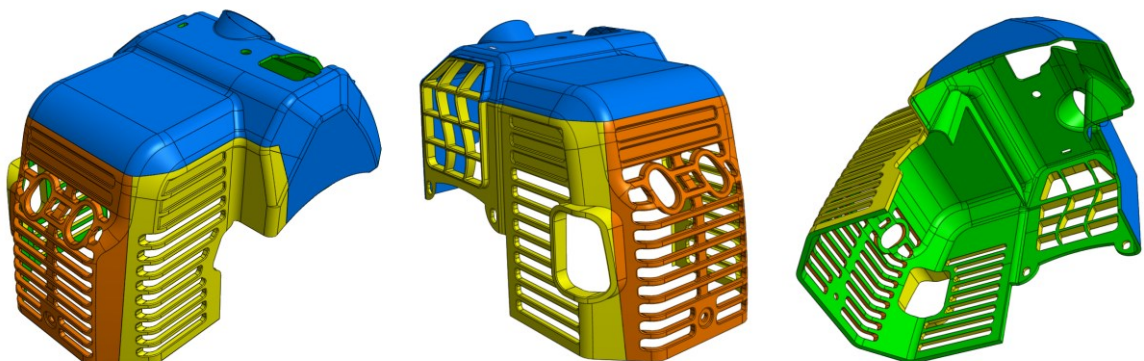
7.1 Tvarové vložky

Výrobek obsahuje velký počet žebrování a dalších otvorů, které zajišťují ventilaci a montáž výrobku k motoru sekačky. Tyto otvory vyžadují boční odformování, díky čemuž jsou u tohoto výrobku zapotřebí hned tři posuvné čelisti obklopující tři ze čtyř bočních stěn výrobku. Jejich rozložení spolu s tvárníkem a tvárnici se nachází na *Obr. 69*.



Obr. 69 Tvarové vložky vzhledem k výrobku

Na dalším *Obr. 70* jsou na výrobku dle barev předešlého obrázku zvýrazněny plochy připadající na jednotlivé tvarové vložky.



Obr. 70 Plochy jednotlivých tvarových vložek vyznačených barevně na výrobku

Jak již bylo uvedeno, tvarové vložky jsou navrženy pro výrobu aditivní technologií. Ta je ovšem energeticky vysoce náročná, a proto bylo třeba dbát na minimalizaci rozměrů

tvárových vložek. Výrobní prostor stroje pro aditivní výrobu je také omezen, a to na max. 250x250x500 mm.

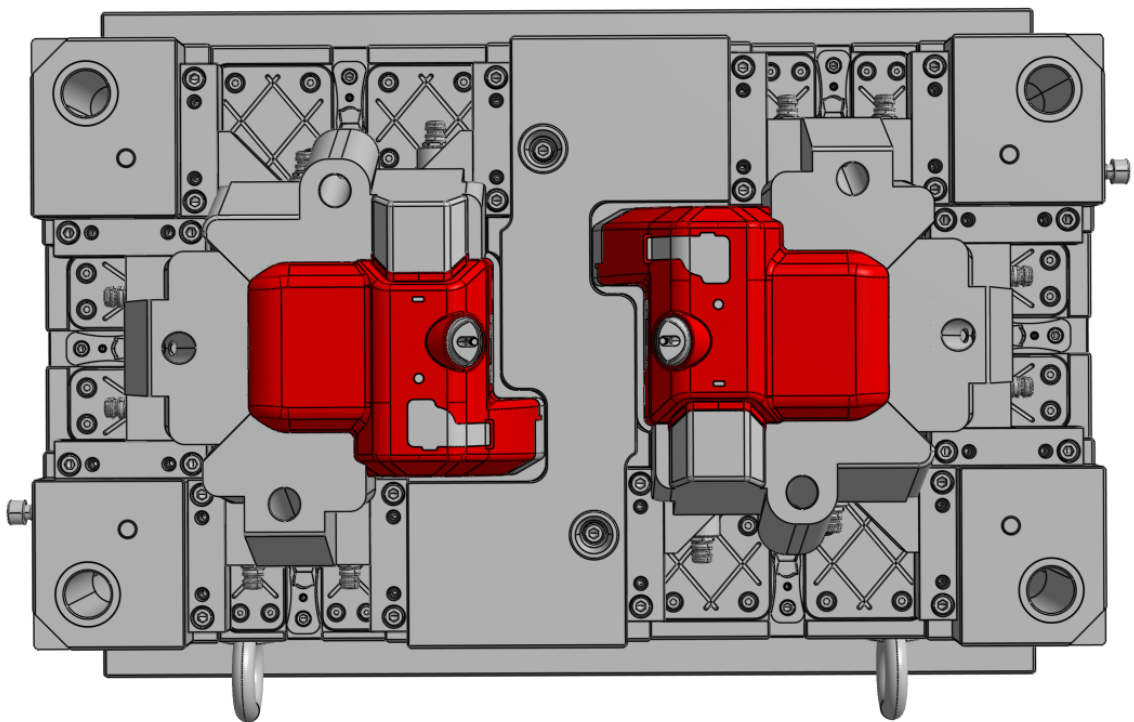
Materiálem tvarových vložek je ocel EN 1.2311 označovaná také jako P20.

7.2 Rozložení výrobků ve formě

7.2.1 Násobnost

Násobnost formy je vždy zvolena s ohledem na velikost a tvaru výrobku, požadované kvalitě a ekonomičnosti výroby. S vyšší násobností zásadně roste rentabilita výroby, ale na druhou stranu klesá kvalita a roste složitost formy.

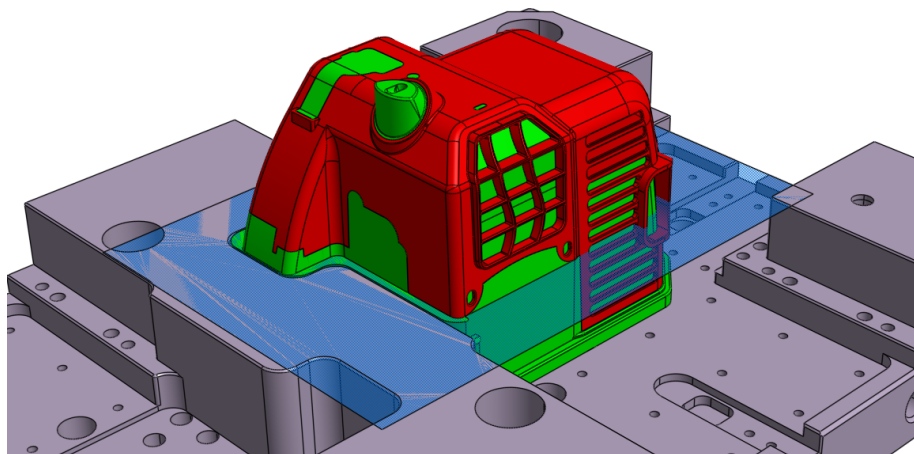
V tomto případě byla zvolena násobnost 2, což vychází především z geometrie výrobku a rozložení posuvných čelistí. Vyšší násobnost by neúměrně zvětšila rozměry formy potřebné pro umístění všech prvků. Na *Obr. 71* je zvýrazněna pozice výrobku na pohyblivé polovině formy.



Obr. 71 Rozložení výrobků ve formě z pohledu do pohyblivé strany formy

7.2.2 Dělicí rovina

Modře vyznačená dělicí rovina na *Obr. 72* se týká vstřikovací formy a zvýrazňuje umístění výrobku vůči formě. Jak lze vidět, výrobek tak zasahuje do obou polovin formy, čímž je redukována maximální potřebná výška kotevních desek.



Obr. 72 Dělicí rovina (modře) formy vůči výrobku s tvárníkem

7.3 Rám formy

Rám formy je celek, který je tvořený deskami spolu se spojovacími, vodícími a středícími prvky. Rám je rozdělen na pevnou a pohyblivou (či pravou a levou) stranu, viz *Obr. 68* výše.

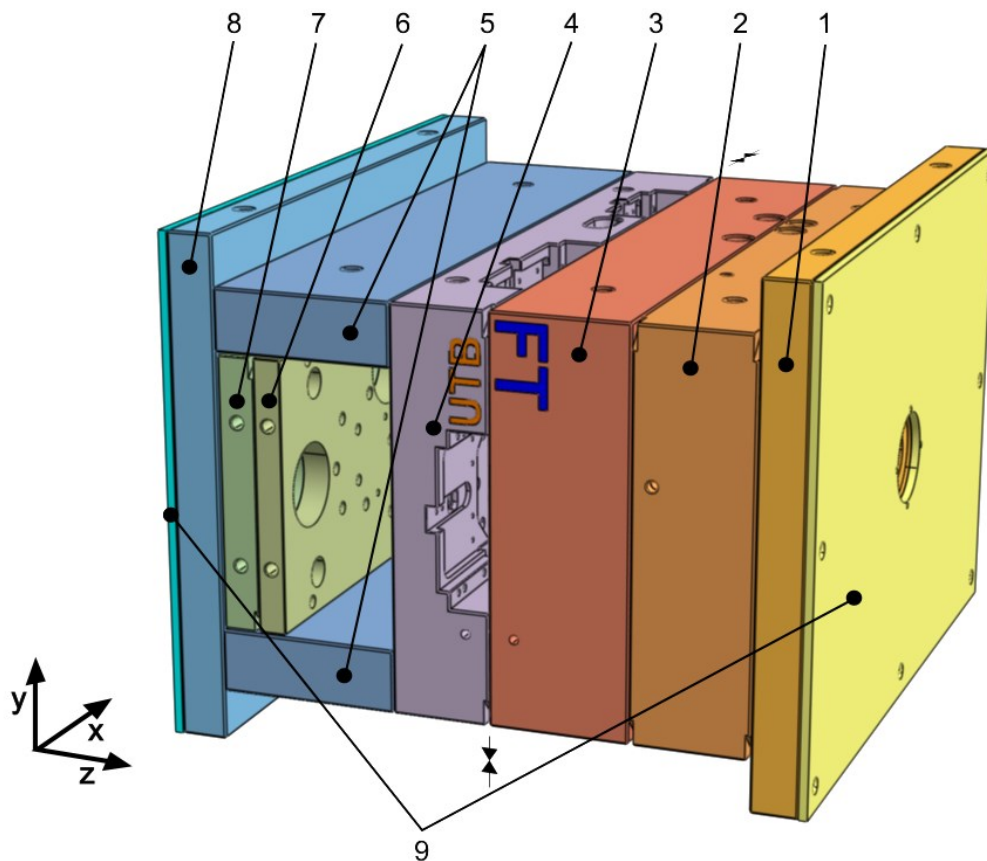
7.3.1 Desky formy

Vstříkovací forma se skládá celkem z 11 desek a jejich sestava se nachází na *Obr. 73*, kde je také vyznačena dělicí rovina. Desky formy tvoří dohromady rozměry 696 x 496 x 633 mm (délka, šířka, výška; na *Obr. 73* X, Y, Z)

Pevná strana formy je na obrázku vyznačena odstíny červené a žluté. Obsahuje upínací desku pro upnutí formy ke stroji, rozvodnou desku obsahující rozvaděč vtokového systému, kotevní desku obsahující tvárnice a také desku izolační pro zamezení přestupu tepla z formy na vstříkovací stroj.

Pohyblivá strana je vyznačena odstíny modré a sestává z kotevní desky obsahující tvárníky a posuvné čelisti, rozpěrných desek, které vytváří prostor pro vyhazovací systém, upínací desky a izolační desky, stejně jako u pevné strany. Do vyhazovacího systému vyznačeného odstíny zelené patří vyhazovací desky kotevní a opěrná. Díky výšce výrobků vyžadující vysoký zdvih vyhazovačů je nutné rozpěrné desky vyrobit na míru, jelikož výrobce pro tyto rozměry formy nedodává rozpěrné desky o požadované výšce. Maximální dodávaný rozměr je 156 mm, kdežto pro vyhození výrobků je potřeba 176 mm.

Konstrukční desky jsou vyrobeny z oceli EN 1.730 a izolační desky jsou vyrobeny z vláknitého kompozitu GRP.

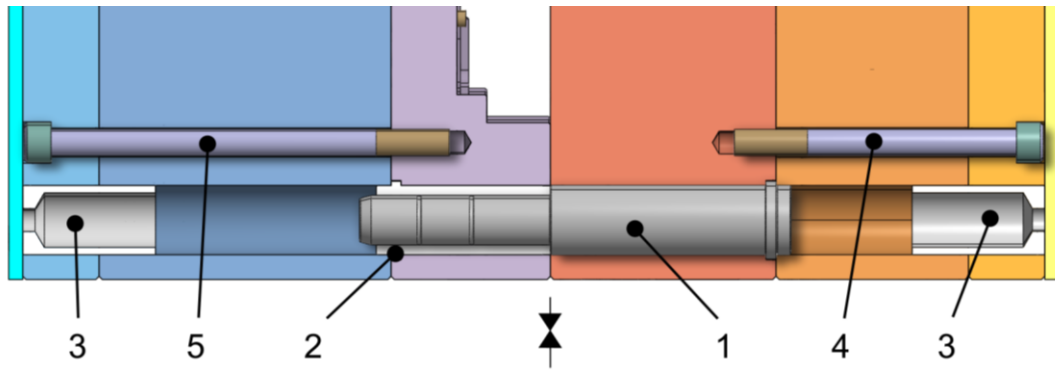


Obr. 73 Samostatné desky vstříkovací formy

1 – upínací deska pravá (K10), 2 – rozvodná deska (K20), 3 – kotevní deska pravá (K20), 4 – kotevní deska levá (K20), 5 – 2x rozpěrná deska (K40), 6 – kotevní deska vyhazovací (K60), 7 – opěrná deska vyhazovací (K70), 8 – upínací deska levá (K10), 9 – 2x izolační deska (Z121)

7.3.2 Spojovací, vodící a středící prvky

Desky pevné a pohyblivé strany jsou spojeny imbusovými šrouby M16, viz řez formou na Obr. 74. Dále jsou desky jednotlivých částí vystředěny středícími trubkami, vodícími sloupky a pouzdry. Vodící sloupky a pouzdra dále slouží k vzájemnému, hrubému středění pevné a pohyblivé strany formy.

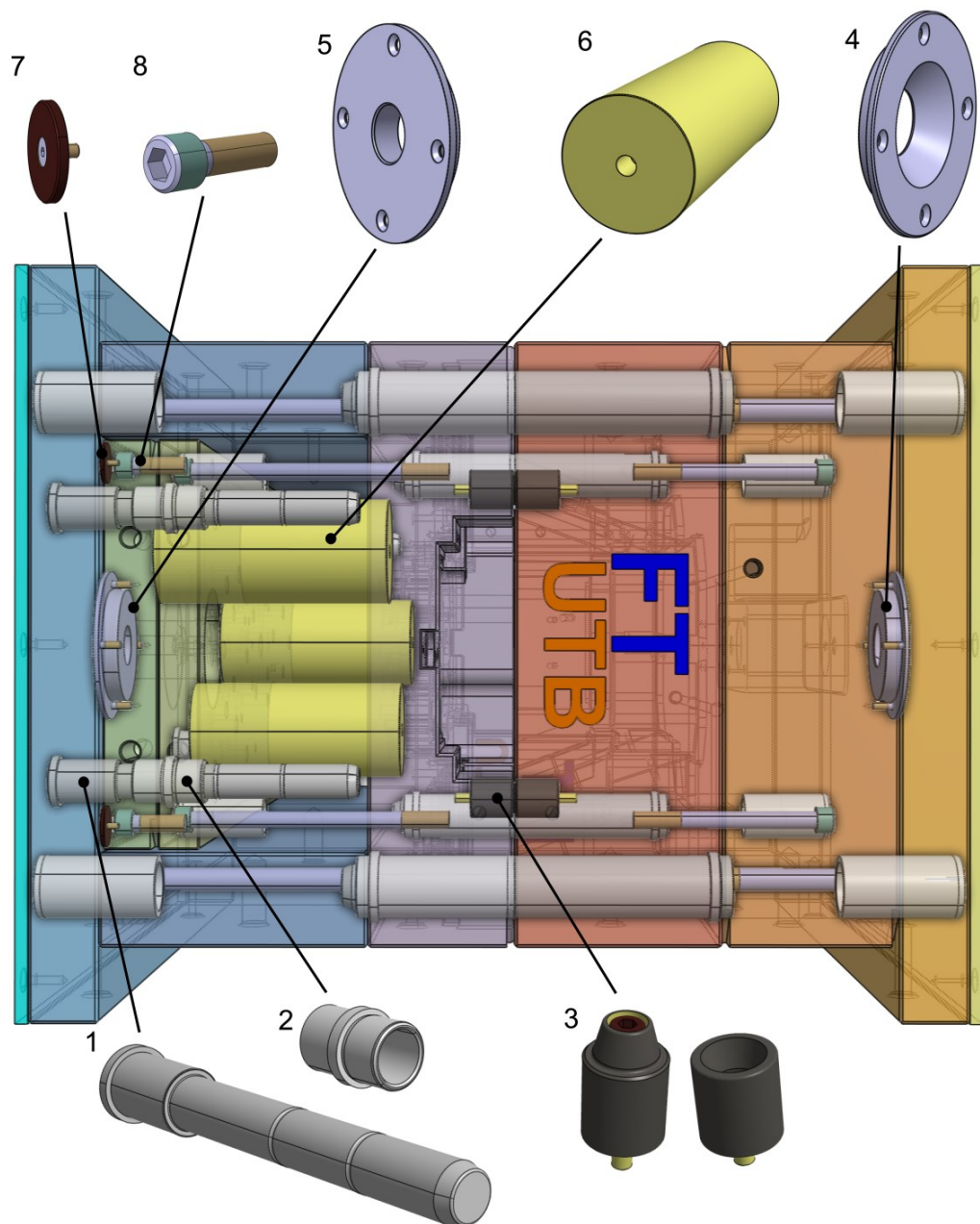


Obr. 74 Řez formou v rovině spojovacích, vodících a středících prvků jednotlivých stran formy
 1 – 4x vodící sloupek (Z00), 2 – 4x vodící pouzdro (Z10), 3 – 8x středící trubka (Z20),
 4 – 4x šroub M16x170 (Z32), 5 – 4x šroub M16x240

Další Obr. 75 zobrazuje veškeré spojovací, vodící a středící prvky formy. Na obrázku se nachází forma, kde tyto prvky prosvítají pro vizuální představu jejich umístění a počtu. Prvky se ve formě vyskytují obvykle po čtyřech kusech. To platí pro vodící sloupky, pouzdra, šrouby M12x35 a dosedky (dorzazové podložky) vyhazovacího systému a také pro podpěrné válce (na obrázku je jeden válec skrytý pro viditelnost). Forma je vybavena podpěrnými válci pro kompenzaci možného prohnutí způsobeného vstřikovacím tlakem. Zajišťují také zvýšení celkové tuhosti formy.

Pevná i pohyblivá strana formy jsou vybaveny středícími kroužky o vnějším průměru 160 mm, které slouží k vystředění polohy formy na vstřikovacím stroji. Zvolený průměr se odvíjí od typu použitého vstřikovacího stroje.

Forma je také vybavena dvěma páry kónického, koncového středění.



Obr. 75 Rám formy s vyznačenými spojovacími, vodícími a středícími prvky

1 – 4x vodící sloupek (Z03), 2 – 4x vodící pouzdro (Z13W), 3 – 2x koncové středění (Z051),
 4 – středící kroužek pravý (Z7511), 5 – středící kroužek levý (Z7520), 6 – 4x podpěrný
 válec (Z57), 7 – 4x dosedka (Z55), 8 – 4x šroub M12x35 (Z32),

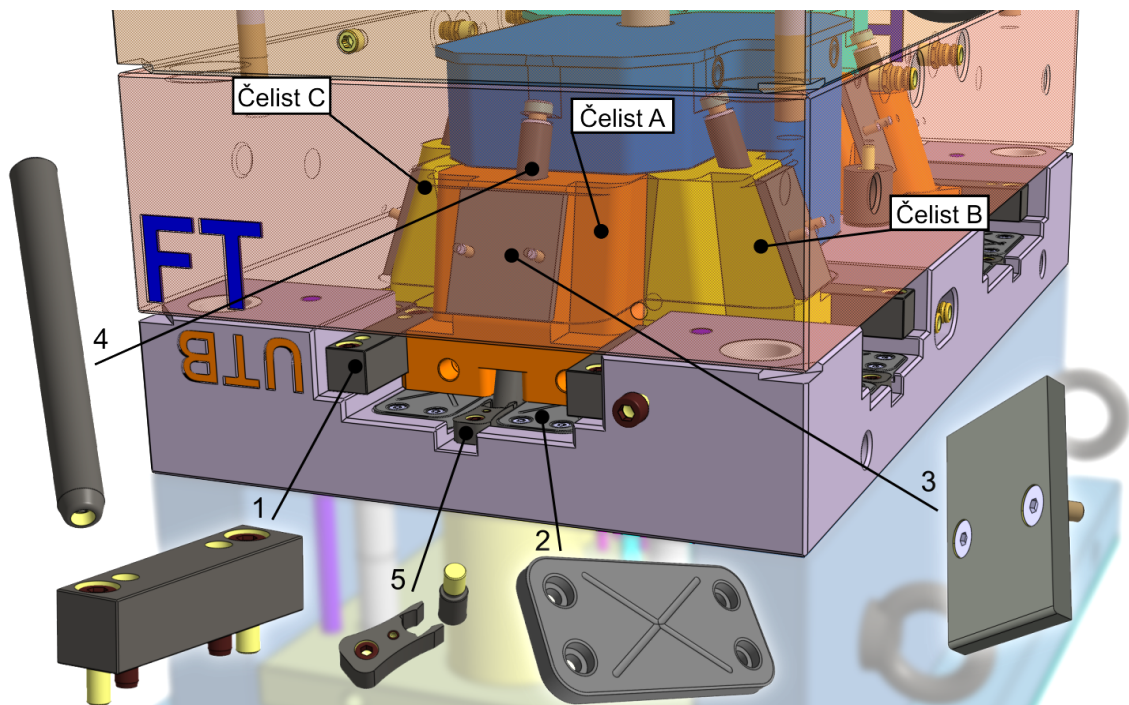
7.3.3 Uložení posuvných čelistí

Uložení se u všech čelistí shoduje a liší se pouze velikost kluzných a opěrných desek podle velikosti čelisti. Na Obr. 76 jsou tedy popsány prvky pouze jedné čelisti, které platí i pro ostatní. Jediný rozdíl je přítomnost dvou opěrných desek namísto jedné u čelisti C.

K zajištění polohy čelisti v zavřeném stavu formy slouží vodící lišty vybavené kolíky pro přesné uložení a opěrné desky, které přenáší působení vstřikovacího tlaku z čelisti na formu. Při otevírání formy jsou čelisti vedeny pomocí šikmých kolíků mezi kluznými deskami a již zmíněnými vodícími lištami. V koncové poloze při otevřené formě zajišťuje polohu čelisti aretace, která zachytí čep namontovaný do čelisti. Šikmé kolíky a opěrné desky jsou namontovány na pevné straně formy a vodící lišty, kluzné desky a aretace na pohyblivé straně formy.

Použitím normálií je zde zabráněno opotřebení desek formy, což zajišťuje vyšší životnosti.

Princip pohybu čelistí při otevírání je dále popsán v *Kapitole 7.6.1 „Odformování“*.



Obr. 76 Prvky pro uložení a vedení posuvných čelistí

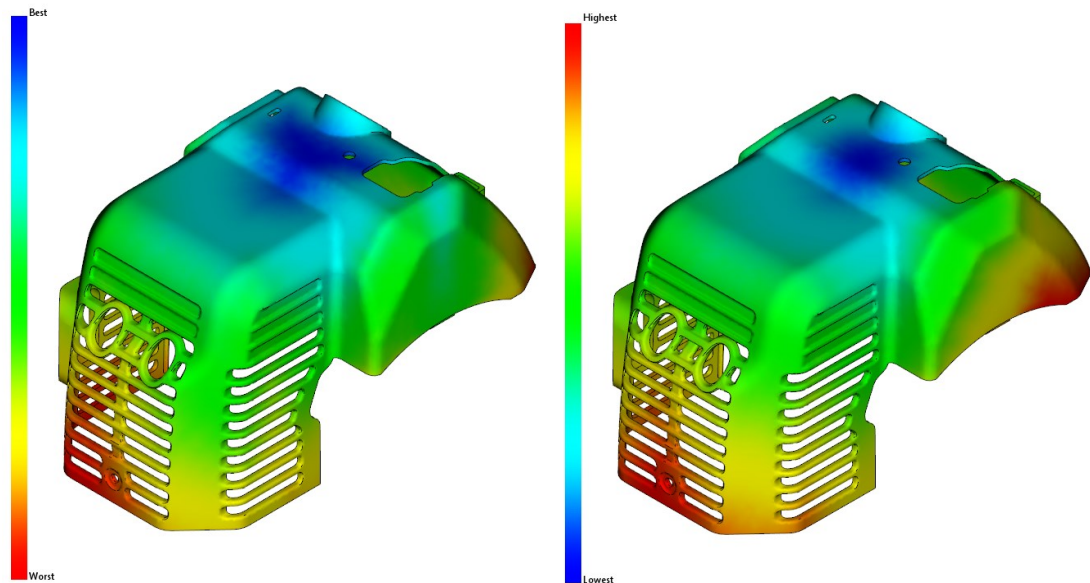
1 – 2x vodící lišta (Z1850), 2 – 2x kluzná deska (E 3174), 3 – opěrná deska (Z1831),
4 – šikmý kolík (Z010), 5 – aretace čelisti (Z1898)

7.4 Vtokový systém

Při volbě vtokového systému je možné vybírat ze dvou základních variant, a to studený, nebo horký (vyhříváný). Tato volba se odvíjí od geometrie a velikosti výrobku, požadavků na kvalitu a další. V tomto případě byl zvolen kombinovaný systém, který bude podrobně popsán v následujících kapitolách.

7.4.1 Analýza umístění vtoku

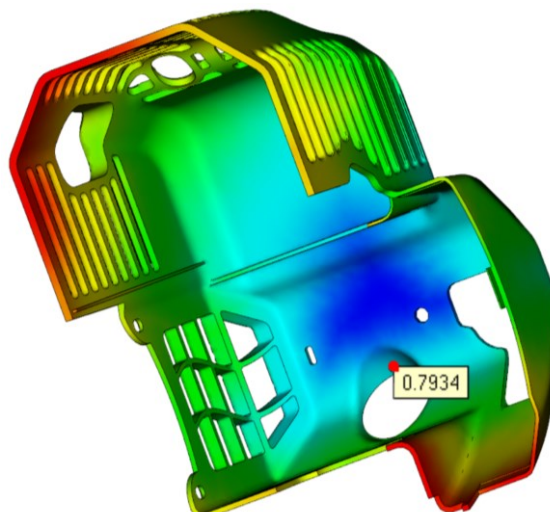
Pro vhodné umístění vtoku byla provedena analýza výrobku v programu Moldflow, která se zaměřuje právě na tuto problematiku. Výsledky této analýzy jsou Gating suitability (GS), tedy vhodnost umístění vtoku, a také Flow resistance indicator (FRI), tedy indikátor odporu proti tečení. Na *Obr. 77* jsou výsledky těchto analýz, kdy GS i FRI indikují modrou barvou nejvhodnější místo umístění.



Obr. 77 Výsledek analýz Gating suitability (vlevo) a Flow resistance indicator (vpravo)

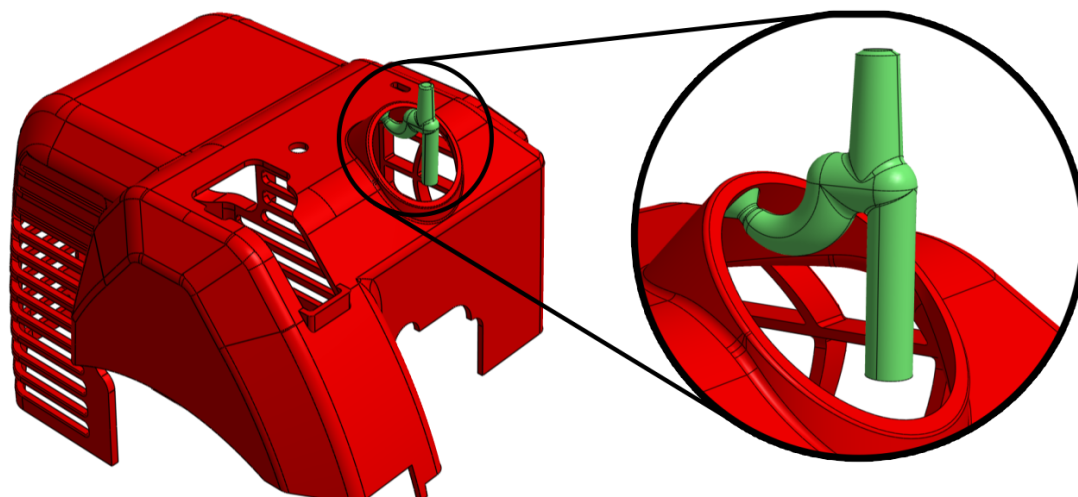
7.4.2 Umístění a typ vtoku

Z výsledků analýz byl vybrán bod, který je vyznačen na *Obr. 78*. Hodnoty analýzy jsou od 0 – 0% (červeně – nejhorší) do 1 – 100% (modře – nejlepší). Vybraný bod má hodnotu necelých téměř 80% a značí tedy velice vhodné místo. Důvodem pro volbu takového umístění, namísto oblasti s hodnotou 1, je možnost přemístit vtok z pohledové strany výrobku. Tím je také vyžadován krátký studený vtok, který bude vyvažovat rozdílné teploty mezi vyhřívanou tryskou a dutinou formy (vstříkovaná tryska nebude v kontaktu s dutinou formy).



Obr. 78 Zvolený bod vtokového ústí

Na *Obr. 79* je již model studené části vtokového systému. Jedná se o tzv. banánový vtok, který jak již bylo uvedeno, přemístí vtokové ústí mimo pohledovou stranu výrobku. Navíc tento typ vtoku umožňuje díky své geometrii oddělení od výrobku již při vyhazování a odpadá tak nutnost dodatečného oddělování. Princip oddělení bude popsán v následujících kapitolách. Přestože část ústí na výrobku zůstává, není to v tomto případě problém. Otvor, jímž vtok prochází, slouží k připojení zapalovací svíčky k motoru sekačky a je zde dostatečný volný prostor.

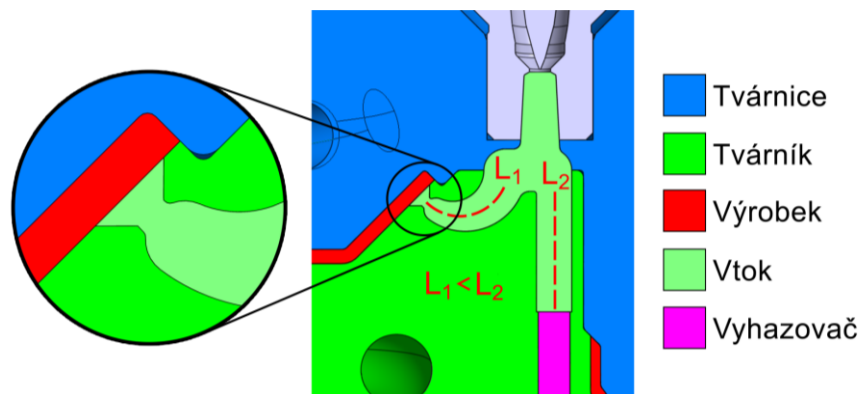


Obr. 79 Model studené části vtokového systému

Průměr ústí vtoku je doporučen 1,5 – 2,6 mm pro objem výstřiku 100 – 300 cm³ [19]. Výrobek má objem 137,407 cm³ (viz *Obr. 67*) a průměr ústí je tak zvolen 1,6 mm. Banánový vtok je doporučen pouze pro pružné materiály a tuto podmínku zvolený materiál PA6 i přes obsah plniva splňuje. Na *Obr. 80* se nachází řez formou v místě vtoku. Díky nakloněné stěně

výrobku o 45° v místě vtoku, nemusí vést vtok při vyhození tak dlouhou trasu (135° namísto běžných 180°), což opět zajišťují jistotu správné funkce a omezuje šanci na ulomení a uvíznutí vtoku.

Výroba banánového vtoku je obvykle náročný proces a do forem se tak vkládají nakupované banánové vložky s předem vyrobenou drážkou. Tento problém zde ovšem odpadá díky využití aditivní technologie. Na druhou stranu zde bude nutné podrobit vtok dokončovací operací pro snížení drsnosti povrchu, která je u aditivních technologií jinak vysoká. Při vysoké drsnosti povrchu vtoku by hrozilo uvíznutí zbytkového materiálu.



Obr. 80 Řez formou v místě vtoku

7.4.3 Horký vtokový systém

Horký vtokový systém pro tuto formu byl vytvořen pomocí konfigurátoru od firmy Meusburger, který umožňuje získat velice snadno systém na míru. Zadané vstupní parametry se nachází na Obr. 81 obsahující snímky z průběhu nastavení. Hmotnost vstříkované dávky je uvedena 220 g, což je hodnota s doporučenou 20 % rezervou.

Plast

PA6

Dodatečná protipožární ochrana

Přídavní plnicí látka

Hmotnost vstřikované dávky na tlisku

220 g (0,5 ... 240)

Materiál rozvaděče

1.2316

Váš dosavadní výběr

Typ rozvaděče **IMT2**

Koordináty **Vzdálenost - úhel**

x 0 mm A 60,000 mm

y 60 mm W 0,0000 °

Váš dosavadní výběr

Typ rozvaděče **IMT2**

Plast **PA6**

Hmotnost vstřikované **220**

Materiál rozvaděče **1.2316**

Vzdálenost (A) **60,000**

Úhel (W) **0,0000**

R 16

S 46

S = 116,00

T 20 (20 ... 160)

76

l = 60,00

$l \geq \frac{A}{2} - 19$

d 37

A

Typ trysky

E 4010

Sestava ústí

E 400 RE (++)

++ ... well suited
+ ... suitable
- ... Not suitable

Vinujte pozornost dobré regulaci teploty v ústí vtoku a naproti nímu; Důsledkem skleniných vláken může být mírný nárůst náličky;

Váš dosavadní výběr

Typ rozvaděče **IMT2**

Plast **PA6**

Hmotnost vstřikované **220**

Materiál rozvaděče **1.2316**

Vzdálenost (A) **60,000**

Úhel (W) **0,0000**

Rádus (R) **16**

Upínací deska (S) **46**

Přesah trysek (T) **20**

Vtoková vložka **E 4100/53/16/12**

E 4010
Tryska horkých vtoků smartFILL šroubovaná

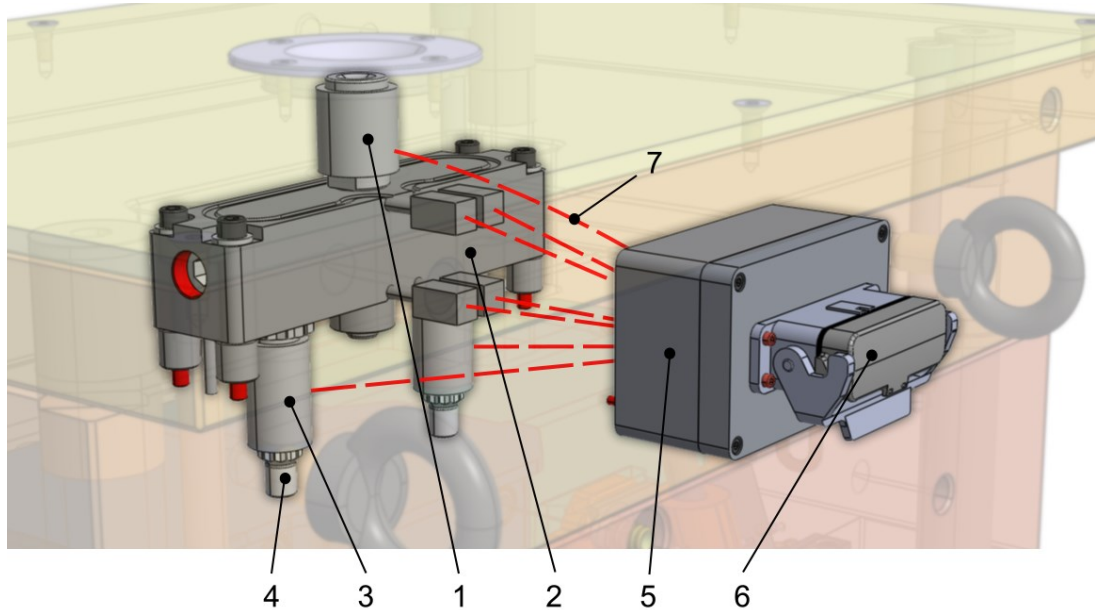
d 37 l 60

E 400 RE
Sestava ústí, smartFILL válcové ústí, zapuštěná s prodloužením

d 37 d2 3,0

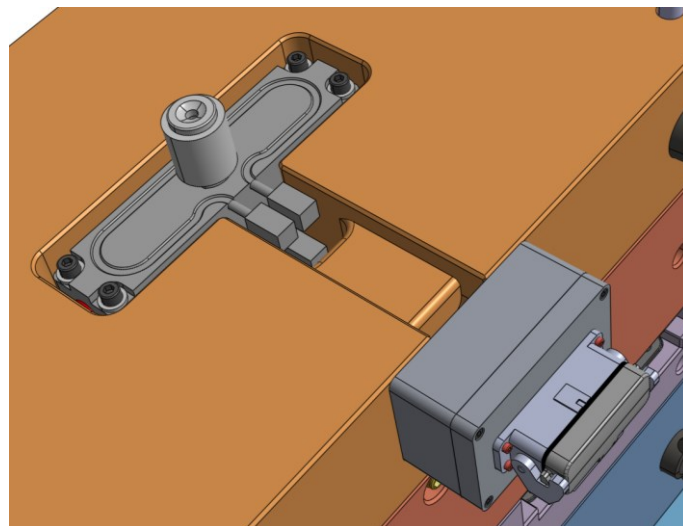
E 400 ISO Izolační kryt smartFILL

Obr. 81 Snímky konfigurátoru firmy Meusburger pro návrh vyhřívaného vtokového systému
 Na Obr. 82 je již vtokový systém zakomponovaný ve formě včetně zásuvky. Napájení je zde naznačeno zjednodušeně. Vyhřívány jsou vstřikovací trysky, rozvodný blok a vtoková vložka.



*Obr. 82 Umístění vtokového systému včetně zásuvky ve formě
 1 – vtoková vložka (E 4100), 2 – rozvodný blok (E 4500), 3 – 2x vstříkovací tryska
 (E 4010), 4 – 2x vtokové ústí s prodloužením (E 400 RE), 5 – kryt kabelů (E 2730),
 6 – zásuvka 16A (E 2702, 2712, 2744), 7 – napájecí kabeláž*

Kabeláž je ze zásuvky k vyhřívanému vtokovému systému vedena drážkou rozvodné desky na Obr. 83.



*Obr. 83 Drážka pro vedení kabeláže
 vyhřívaného temperačního systému*

7.5 Temperační systém

Návrh temperačního systému je prioritou této práce. Pomocí simulací vstříkovacího procesu byl temperační systém optimalizován pro dosažení maximálně homogenního teplotního pole

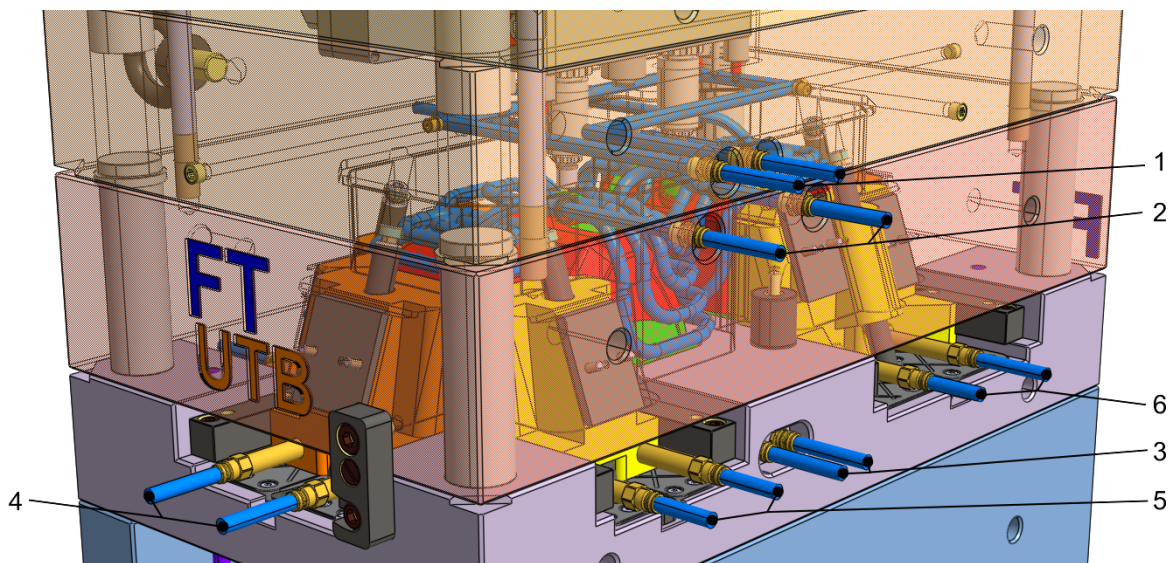
na stěnách tvarových vložek. Procesu optimalizace a porovnání temperačních systémů se věnuje *Kap. 8*. Zde bude popsán pouze finální temperační systém a jeho prvky.

Na *Obr. 84* jsou modře vyznačeny veškeré temperační okruhy. Tvarové vložky jsou chlazeny konformně. Dále je tu temperační obvod nacházející se v rozvodné desce. Tento obvod je vyroben konvenčními metodami vrtání a zabraňuje šíření tepla do dutiny formy od rozvodného bloku a vstřikovacích trysek vtokového systému, které mají oproti požadované teplotě dutiny formy značně vyšší teploty.

Celkem se ve formě nachází 11 temperačních okruhů, kdy jsou všechny tvarové vložky obou tvarových dutin formy vybaveny vlastním temperačním okruhem, plus jeden okruh vtokového systému.

Cirkulujícím médiem je čistá voda, jejíž teplota je nastavena na 80°C. Tato teplota vychází z požadované teploty formy 85°C, což je hodnota určená z materiálového listu. Pro dosažení této teploty musí být teplota temperačního média o několik stupňů nižší.

Kanáčky jsou tvořeny kruhovým průřezem s konstantním průměrem 10 mm po celé délce.



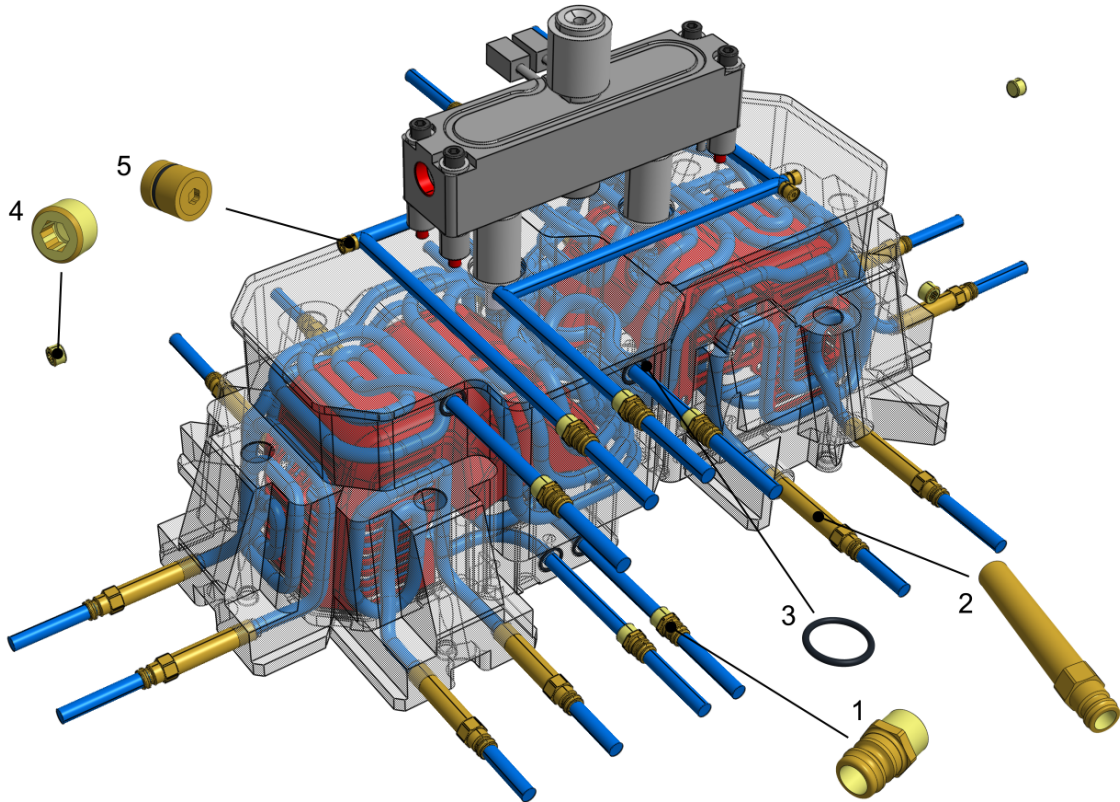
Obr. 84 Temperační okruhy formy

*1 – temperace vtokového systému, 2 - temperace tvárnice, 3 – temperace tvárniku,
4 – temperace čelisti A, 5 – temperace čelisti B, 6 – temperace čelisti C*

7.5.1 Prvky temperačního systému

Na *Obr. 85* je opět vyznačen kompletní temperační systém pod podobným úhlem pohledu, tentokrát ovšem bez rámu formy. Všechny okruhy jsou vybaveny přípojkami pro montáž hadic na přívod a odvod média, posuvné čelisti jsou vybaveny přípojkami prodlouženými.

Tím je zamezeno možnému zavadění hadic o formu při pohybu čelistí. Konvenční obvod je vybaven záslepkami pro usměrnění média, které jsou dále uzavřeny šrouby pro zajištění vrtaných kanálků. Tvárník a tvárnice jsou vybaveny těsnícími kroužky, aby nedocházelo k úniku média při přestupu mezi kotevními deskami a vložkami.



Obr. 85 Temperační systém a jeho prvky

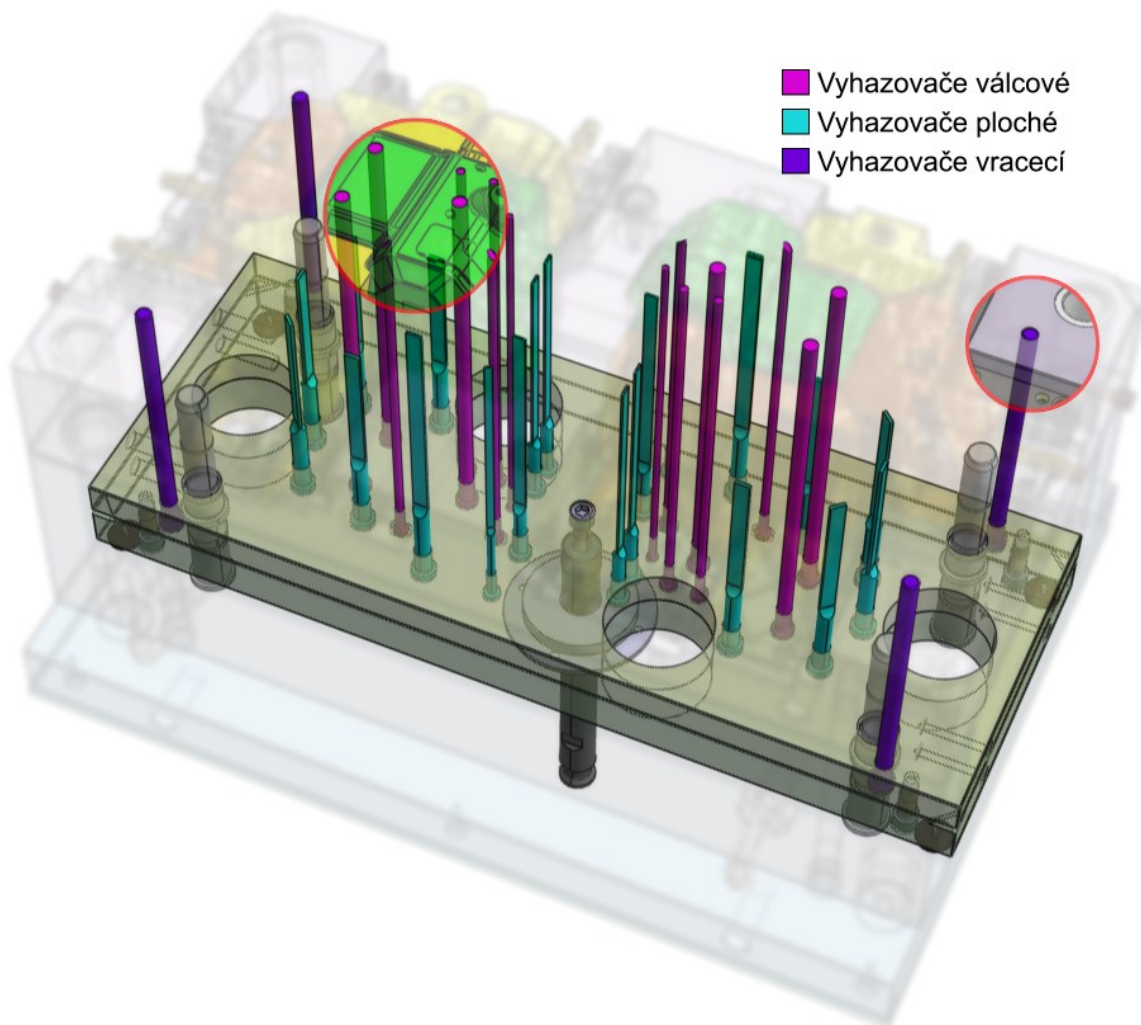
1 – 10x přípojka (Z81), 2 – 12x přípojka prodloužená (Z90), 3 – 4x těsnící kroužek (Z98),
4 – 3x uzavírací šroub (Z940), 5 – 3x záslepka (Z9425)

7.6 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém formy na Obr. 86 se skládá z válcových (kam patří i vraccí) a plochých vyhazovačů s rozličnými průměry, popř. délkou a tloušťkou a také s rozdílnou výškou v závislosti na umístění na výrobku. Celkem je vyhazovací systém tvořen čtyřiceti vyhazovači. Na obrázku je vyhazovací systém zobrazen spolu s průhlednou pohyblivou částí formy, kde jsou v červených kruzích zvýrazněny oblasti s konci vyhazovačů pro lepší představu jejich zakomponování a funkce.

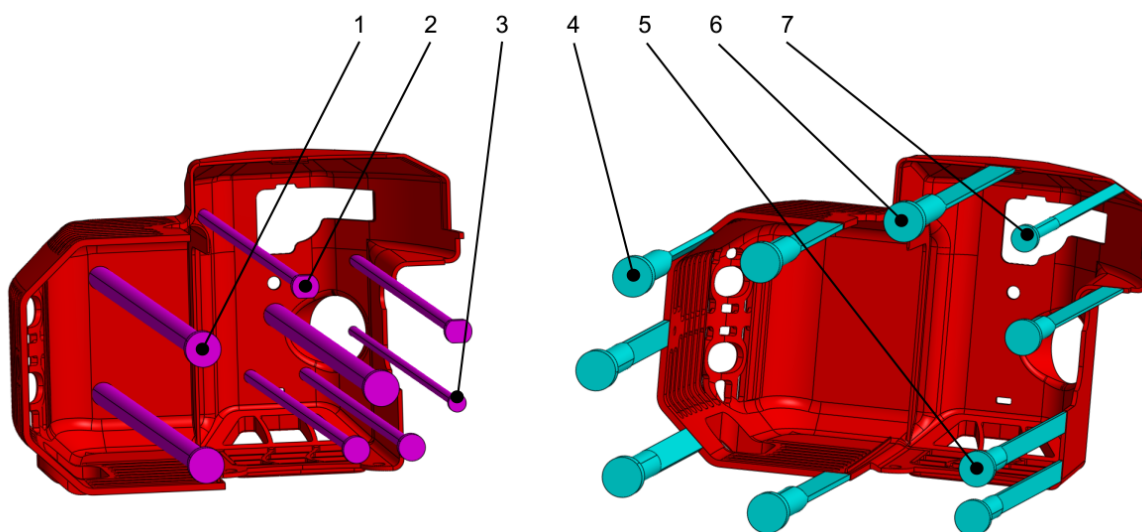
Vyhazovače jsou semknuty mezi kotevní a opěrnou deskou, které jsou spojeny čtyřmi imbusovými šrouby. Tyto desky jsou spojeny s uzavírací jednotkou vstřikovacího stroje pomocí táhla, které prochází středícím kroužkem a po otevření formy zajišťuje dopředný

pohyb vyhazovacího systému pro vyhození výrobků. Zpětný pohyb do počáteční pozice zajišťují vraccí kolíky, které se dostávají do styku s pravou kotevní deskou (pevná část formy) při zavírání formy. Nakonec se desky zastaví pomocí čtyř protilehlých dosedek (dorazových podložek). Přesné vedení je zajištěno pomocí čtyř vodících pouzder uložených mezi vyhazovacími deskami a vodícími sloupky upevněnými v upínací desce pohyblivé části formy.



Obr. 86 Kompletní vyhazovací systém

Umístění vyhazovačů bylo navrženo s přihlédnutím na zbývající prostor mezi temperačními kanálky. U konformní temperace je ovšem tento prostor značně omezený a významná část je tak umístěna na okraje výrobku s pomocí plochých vyhazovačů. Na Obr. X jsou vyhazovače rozděleny podle typu pro přehlednost. Na pozici 3 se nachází vyhazovač vtokového zbytku. Některé válcové vyhazovače jsou zajištěny proti pootočení a jedná se o vyhazovače, které jsou ve styku se šikmými plochami výrobku.



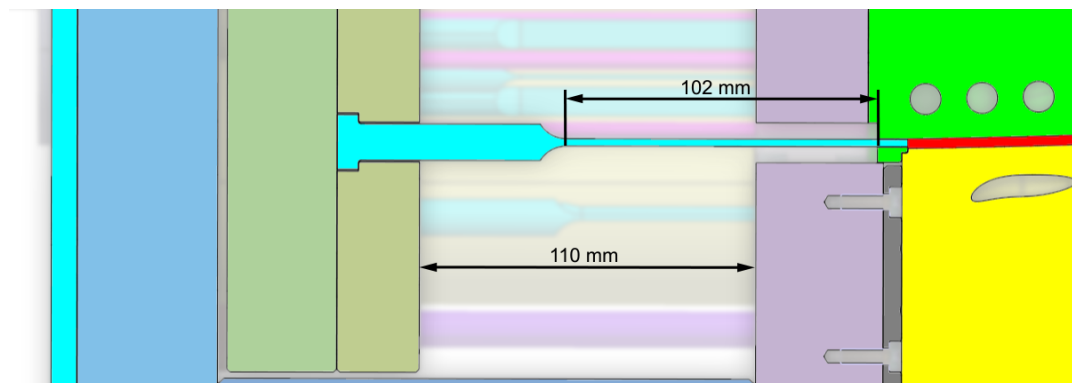
Obr. 87 Vyhadzovače výrobku válcové (vlevo) a ploché (vpravo)

Válcové vyhadzovače (Z40): 1 – 3x 10,5 mm; 2 – 4x 6 mm; 3 – 1x 4,5 mm

Ploché vyhadzovače (Z4670): 4 – 5x 11,5*2,5 mm; 5 – 3x 9,5*1,5 mm;

6 – 1x 11,5*2 mm; 7 – 1x 5,5*1 mm

Pro správné vyhození vysokého krytu motoru je třeba zajistit alespoň 100 mm zdvih vyhadzovačů. Bylo proto u plochých vyhadzovačů nutné zvolit speciální variantu se zkrácenou válcovou částí a upravit otvor pro vyhadzovač. Byl tak zajištěn max. zdvih vyhadzovačů s rezervou 2 mm, viz Obr. 88. Na obrázku je řez v místě plochého vyhadzovače s pozicí 4 na předchozím Obr. 87 a jedná se o kritický vyhadzovač s nejkratší vzdáleností od výrobku.

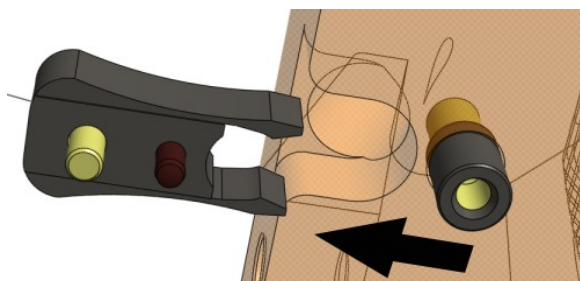


Obr. 88 Vyhadzovací prostor

7.6.1 Odformování a vyhození výrobků

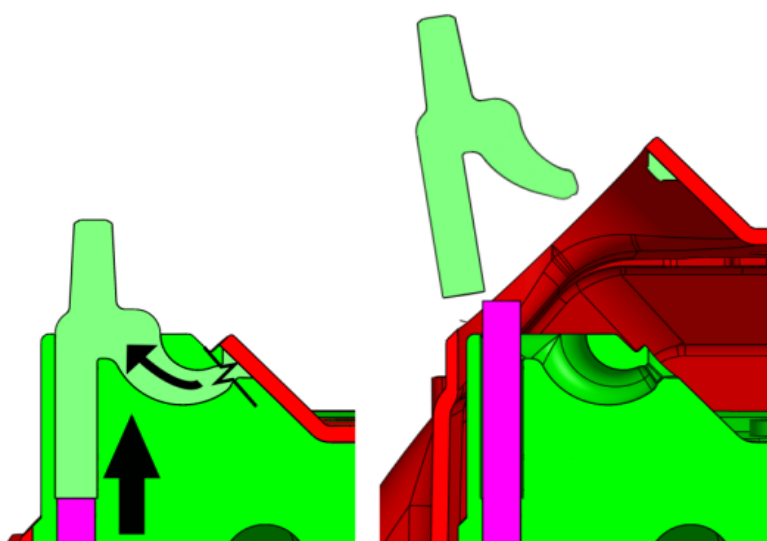
Proces odformování je vyobrazen na Obr. 91, kde se nachází pouze čtvrtina formy v řezu pro lepší přehlednost. Obrázek je rozdělen do tří částí:

- 1) V první části je forma uzavřena, došlo k zaplnění dutiny taveninou polymeru a probíhá chlazení taveniny na vyhazovací teplotu.
- 2) Po dosažení vyhazovací teploty se začne forma otevírat. Čas otevření formy je nastaven podle výsledků analýzy, kdy je zjištěno, za jak dlouho bude výrobek možné vyhodit bez poškození. Při otevírání formy se odsouvá levá, pohyblivá strana formy i se všemi jejími komponenty, kam patří i posuvné čelisti. Ty se pomocí šikmých kolíků připevněných na pravé, pevné straně formy začnou odsouvat od zhotoveného výrobku. V bodě, kdy jsou z čelistí šikmé kolíky zcela vytaženy, jsou aretační čepy posuvných čelistí ukotveny v aretačním pouzdře a pozice čelistí je tak zajištěna. Aretace čelistí se nachází na *Obr. 89*.

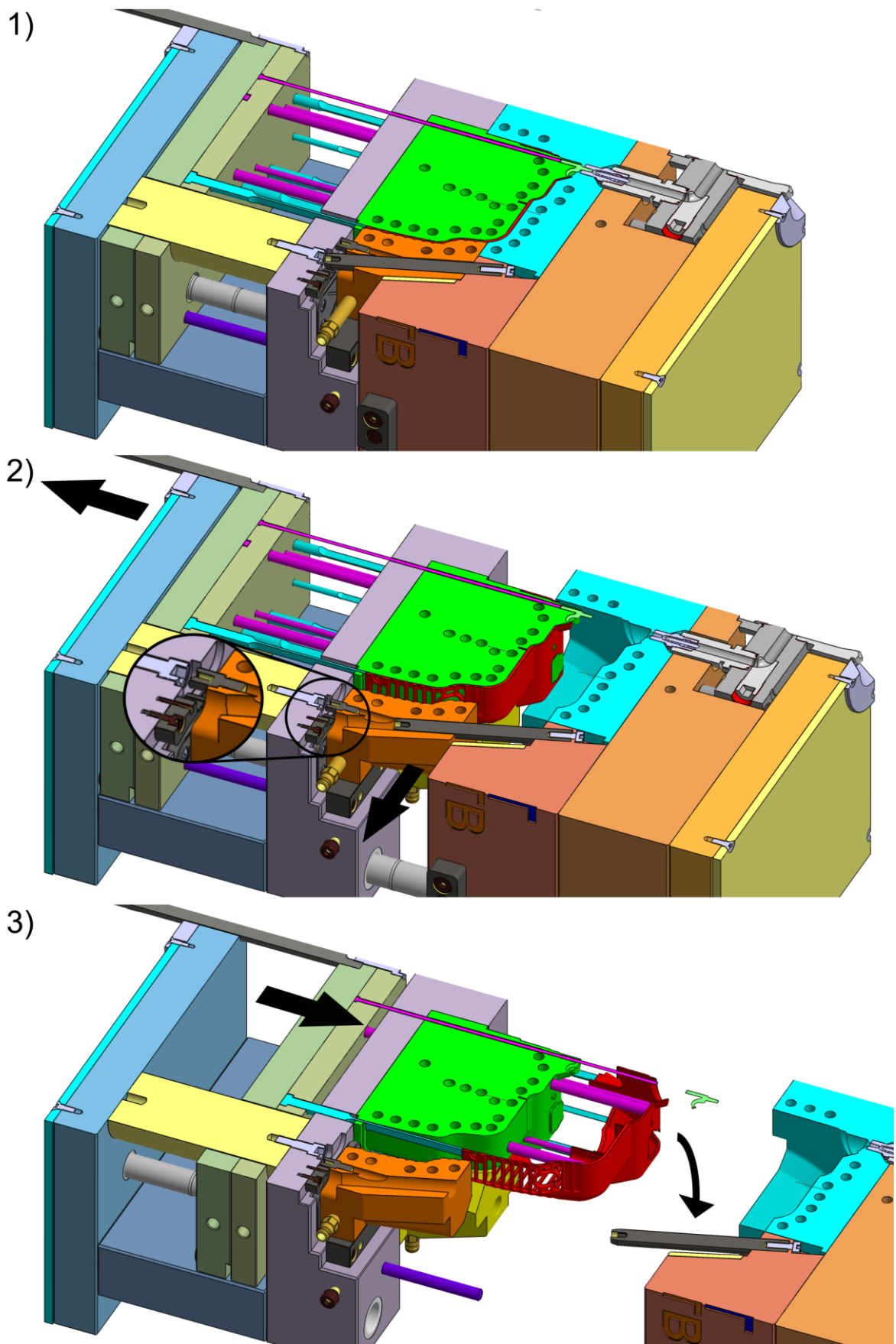


Obr. 89 Funkce aretace čelistí

- 3) Po úplném odjetí pohyblivé strany formy dochází k dopřednému pohybu vyhazovacího systému pomocí uzavírací jednotky skrze táhlo. Tím je výrobek vyhozen z tvárníku formy a jelikož s ním již výrobek nemá žádnou vazbu, odpadáva působením gravitace. Princip odpojení vtokového zbytku je znázorněn na *Obr. 90*. Následně je forma uzavřena a proces se opakuje.



Obr. 90 Princip oddělení vtokového zbytku při vyhazování



Obr. 91 Průběh odformování a vyhození výrobku ve třech krocích

7.7 Transportní a manipulační prvky

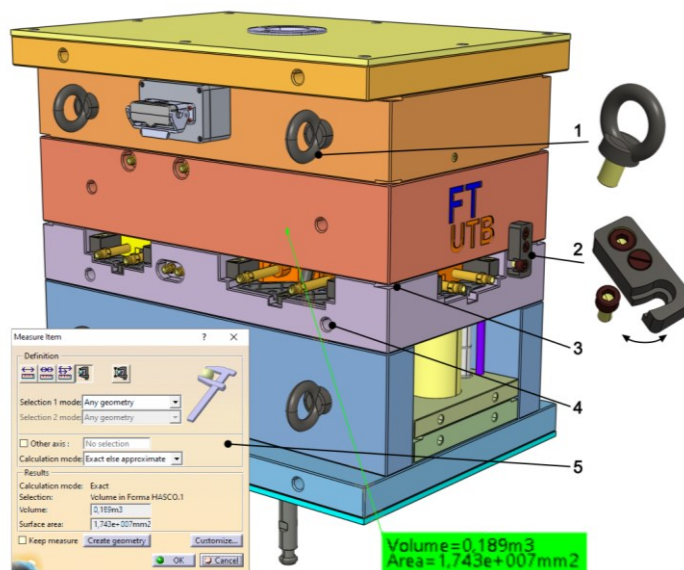
Pro umožnění instalace formy do vstřikovacího stroje a všeobecného manipulování je forma vybavena čtyřmi závěsnými oky. Závěsná oka jsou výrobcem dodávána s údajem o maximální možné zátěži. Na *Obr. 92* je forma s pozicemi transportních a manipulačních prvků, včetně modulu programu Catia pro zjištění objemu formy. Objem formy je na obrázku vyznačen zeleně a můžeme jej zaokrouhlit pro zvýšení bezpečnosti na $0,19 \text{ m}^3$. Pokud uvažujeme pro zjednodušení hustotu materiálu celé formy jako hustotu oceli 7850 kg/m^3 , získáváme hmotnost:

$$m = \rho \cdot V = 1491,5 \Rightarrow 1500 \text{ kg} \quad (23)$$

Pro formu tak byla zvolena závěsná oka M20 s nosností 860 kg v počtu 4 ks. Tím je zaručeno, že formu udrží v případě potřeby i pouhá dvě oka.

Dále je forma vybavena dvěma transportními pojistkami, které udržují obě strany formy pohromadě v případě manipulace. Vyhazovací paket je na místě zajištěn díky dosedkám a vraccím kolíčkům.

Dále jsou desky vybaveny sraženými hranami, které usnadňují oddělení jednotlivých desek. Všechny desky byly také vybaveny závity pro manipulaci v případě potřeby. Kromě vyhazovacích desek se jedná o závity M20, tudíž lze do otvorů dle potřeby namontovat závěsná oka.



Obr. 92 Transportní a manipulační prvky formy spolu s objemem vstřikovací formy

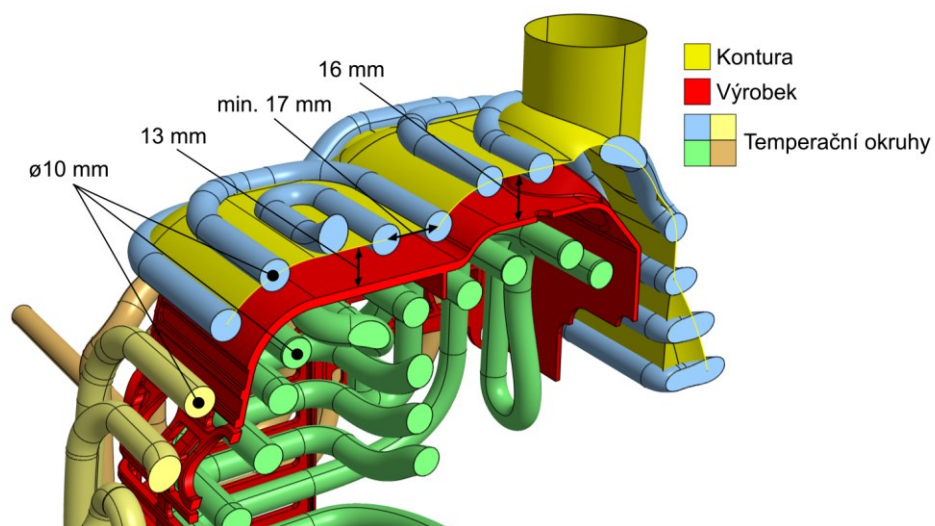
1 – 4x závěsné oko (Z710), 2 – 2x transportní pojistka (Z73),

3 – manipulační otvory, 4 – sražená hrana

8 NAVRŽENÉ TEMPERAČNÍ SYSTÉMY

8.1 Základní parametry temperačních systémů

Při tvorbě všech variant temperačních systémů byla dodržena určitá pravidla, která jsou shrnuta na *Obr. 93*. Rozložení temperačního systému se řídí minimálními hodnotami doporučenými v *Tab. 2, kap. 2.2 „Konstrukční zásady temperačního systému“* v teoretické části práce. Všechny temperační kanálky jsou tvořeny kruhovým průřezem o průměru 10 mm. Tento průměr byl zvolen s ohledem na životnost, jelikož se kanálky postupně zanáší a jejich průměr se postupem času zmenšuje. U příliš malých průměrů tak dochází po určité době ke značně vyššímu snížení efektivity. Přestože by např. obdélníkové průřezy nabídly lepší odvod tepla, kruhové průřezy zaručují mnohem vyšší pevnost. Mezi temperačními kanálky je také dodržována minimální vzdálenost 17 mm. Upřednostněno je ovšem rovnoměrné rozmístění, a vzdálenost se tak nejčastěji pohybuje v rozmezí 18 – 22 mm. Kvůli geometrii výrobku a rozdělení tvarových vložek se ovšem vzdálenost místy liší. Všechny temperační systémy a jejich okruhy byly vytvořeny vynesemím jejich středových os na plochách, které tvoří konturu výrobku se vzdáleností 13 mm v místě tloušťky stěny výrobku 3 mm, a 16 mm v místě tloušťky 2 mm. Tento rozdíl částečně kompenzuje rozdílné rychlosti chlazení různých tlouštěk.



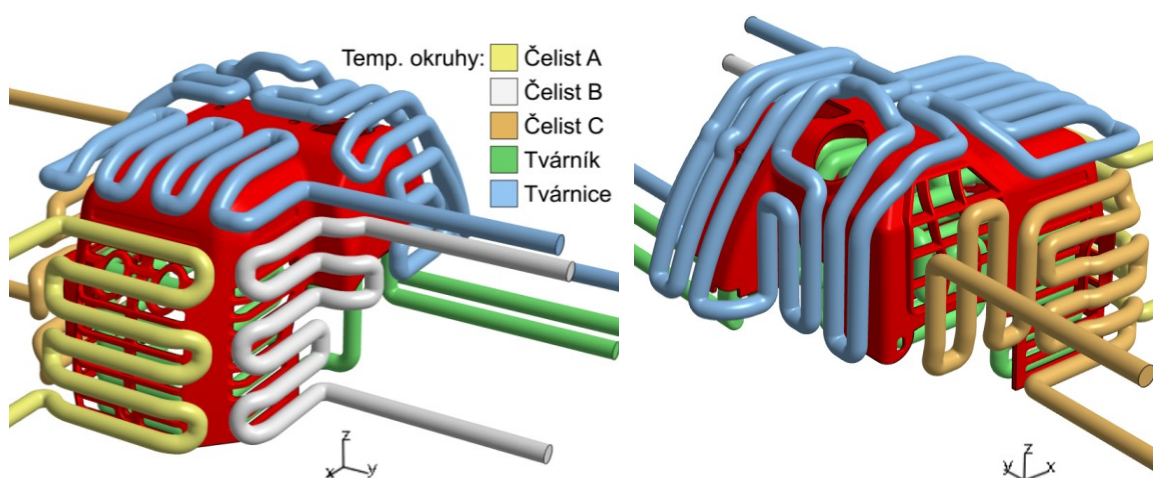
Obr. 93 Řez sestavou znázorňující základní parametry temperačních systémů

8.2 Konformní systém 1 – cik cak

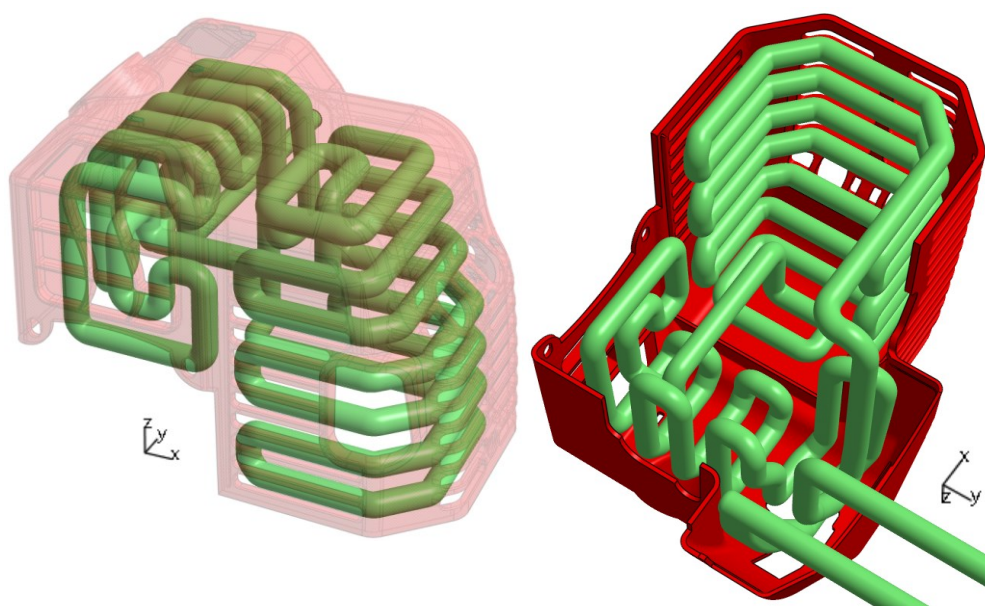
První návrh konformního temperačního systému byl vytvořen metodou cik-cak, jak ukazují *Obr. 94* a *95*. Je zde apelováno na maximální využití prostoru a rovnoměrné pokrytí celé

plochy výrobku. Všechny zatačky jsou tvořeny minimálním rádiusem obvykle 6 mm, které podporují vznik turbulentního proudění média vedoucí k vyšší efektivitě temperace. S vysokým množstvím náhlých změn toku média lze ovšem předpokládat vysoký pokles tlaku tohoto systému a také vyšší tendenci k usazování.

Barevná legenda na *Obr. 94* bude využita u všech následujících obrázků znázorňující sestavu temperačních okruhů pro přehlednost. Obrázky jsou dále vybaveny stejným souřadným systémem x, y, z pro orientaci při vzájemné rotaci obrázků.



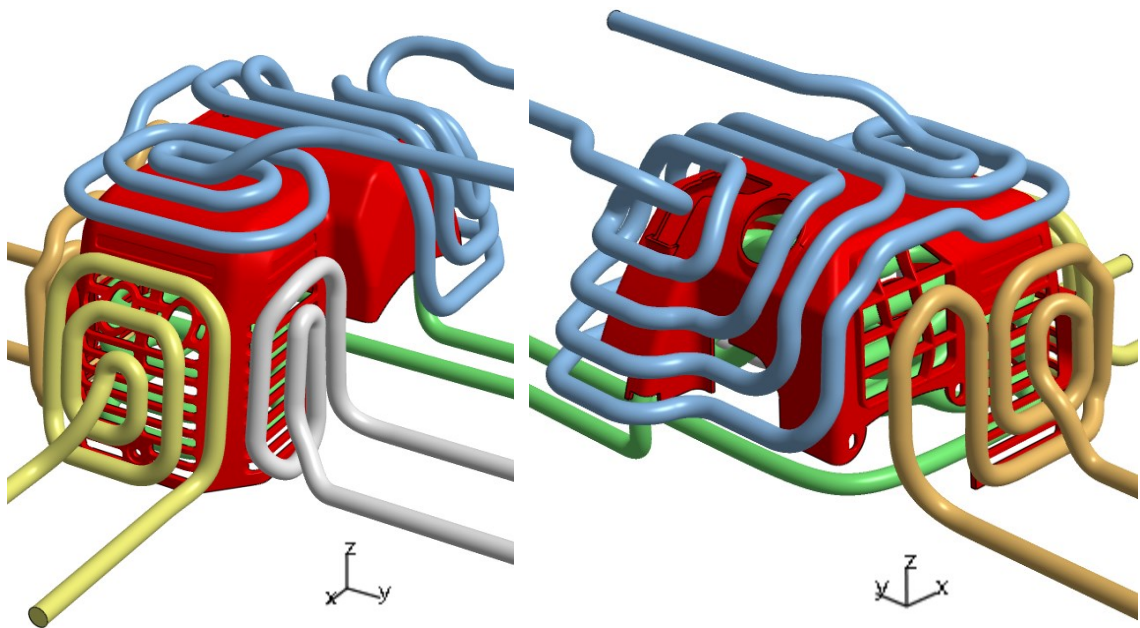
Obr. 94 Temperační systém cik-cak



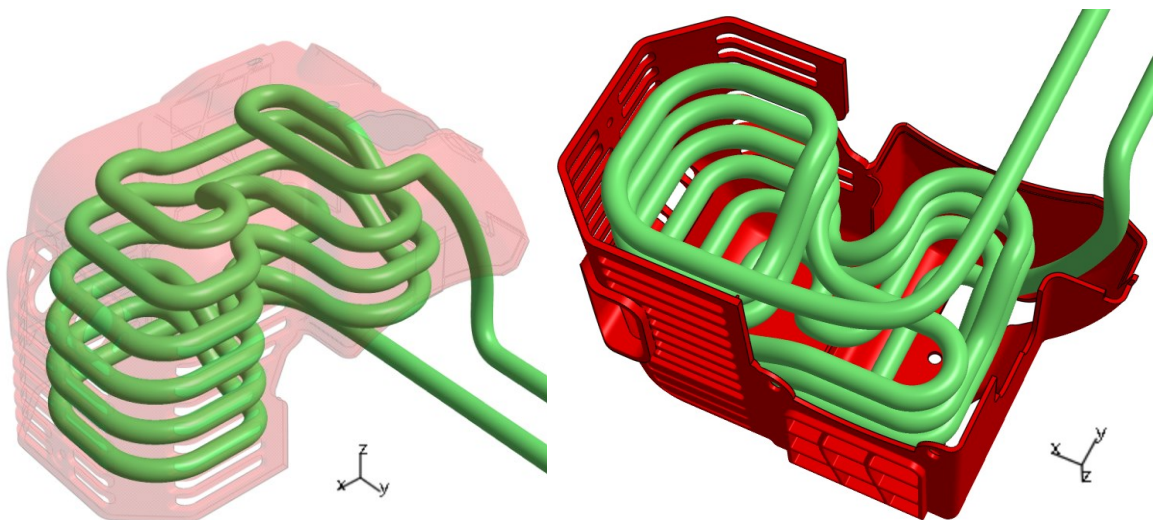
Obr. 95 Temperační okruh tvárníku typu cik-cak

8.3 Konformní systém 2 – spirálový

Druhý temperační systém je navržen dle spirálového rozvržení a nachází se na *Obr. 96* a *97*. Jedná se o velice jednoduchou a nejběžnější metodu při navrhování konformních systémů. Na rozdíl od prvního návrhu jsou zatačky tvořeny maximálními možnými rádiusy. Systém je také odlehčený, s většími rozestupy mezi kanálky. Tento rozdíl v návrhu bude sloužit při posuzování výsledků vedoucí k ideálnímu dimenzování optimalizovaného temperačního systému. Přestože systém konformně kopíruje tvar dutiny, lze s velkými rádiusy očekávat velký nárůst teplot v rozích tvarových vložek.



Obr. 96 Temperační systém spirálový, pohled A



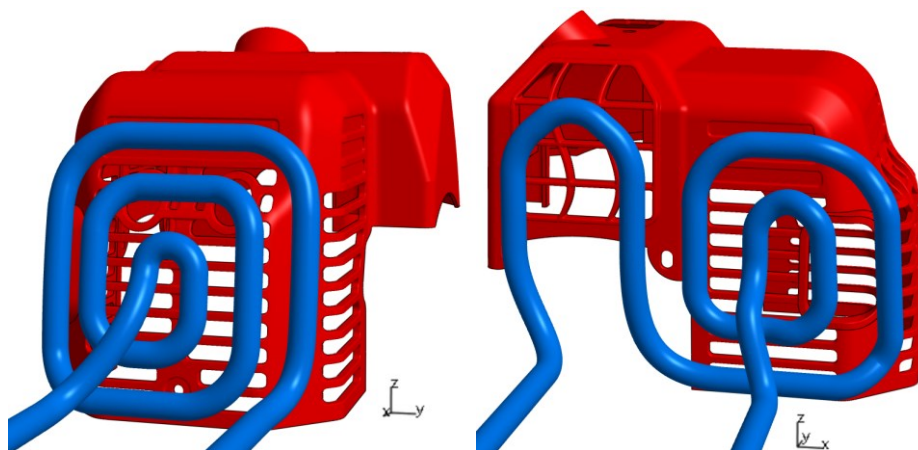
Obr. 97 Temperační okruh tvárníku typu spirála

8.4 Konformní systém 3 – optimalizovaný

Předešlé dva systémy byly navrženy pouze s dodržением struktury daných modelů cik-cak a spirála bez přílišného optimalizování na problematické oblasti výrobku. Následně byly posouzeny výsledky analýz těchto systémů pro vytvoření optimalizovaného temperačního systému s apelem na odstranění hot spotů a vyrováním tlakových ztrát. Podle potřeby byly krátké úseky kanálků přiblíženy k dutině formy na vzdálenost středové osy 11 až 9 mm od dutiny.

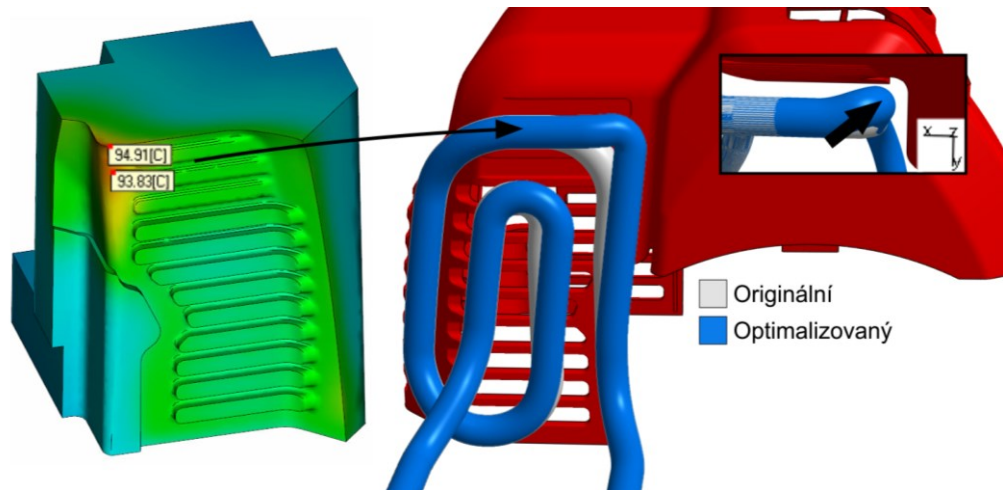
8.4.1 První návrh

U temperačních okruhů posuvných čelistí byly převzaty okruhy vytvořené se spirálovým rozvržením, které prošly podle potřeby mírnými úpravami. Spirálové rozvržení temperace nabízí mírně horší výsledky oproti cik-cak, ovšem za značně sníženého tlakového spádu a tendenci k zanášení nečistotami. Na *Obr. 98* jsou temperační okruhy čelisti A a čelisti C. Tyto okruhy nevyžadovali žádné úpravy a jsou ponechány v původním stavu.



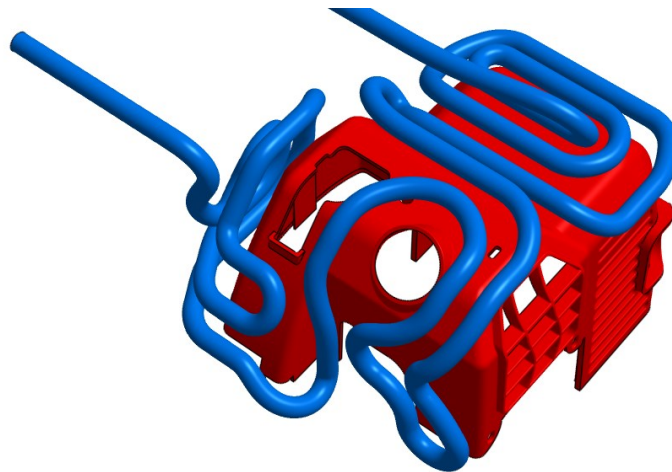
Obr. 98 Optimalizované temperační okruhy čelistí A a C, spirálové rozvržení bez potřeby úprav

V ostrém rohu čelisti B se vyskytovala oblast se značně zvýšenou teplotou dosahující téměř 95°C, viz *Obr. 99*, a proto byla geometrie okruhu v této oblasti upravena. Jak naznačuje obrázek, byl razantně zmenšen rádius, který byl také posunut blíže do míst s vysokou teplotou pro její vyrování. Na obrázku se protíná originální okruh vyznačený bílou barvou s upraveným okruhem vyznačeným modrou barvou.



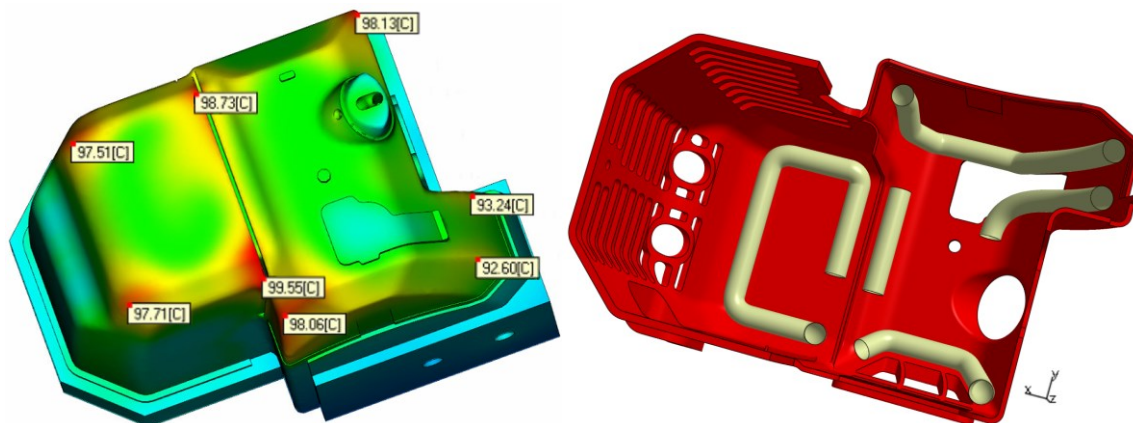
Obr. 99 Optimalizace spirálového temperačního okruhu čelisti B v místě hot spotu

V případě temperace tvárnice byl navržen zcela nový okruh na základě získaných znalostí z výsledků analýz předešlých okruhů, viz *Obr. 100*. V oblasti výrobku s tloušťkou stěny 3 mm je okruh rozvržen jednoduše do spirály, jelikož se jedná o celistvou plochu. V oblasti s tloušťkou 2 mm (na obrázku blíže) okruh kombinuje spirálové a cik-cak rozvržení tak, aby byla efektivně chlazena místa s vyšší teplotou (především ostré rohy). Dále nový okruh neprochází místy s otvory na výrobku, čímž bude teplota v těchto místech vyrovnanější a dochází tak ke zkrácení celého okruhu.



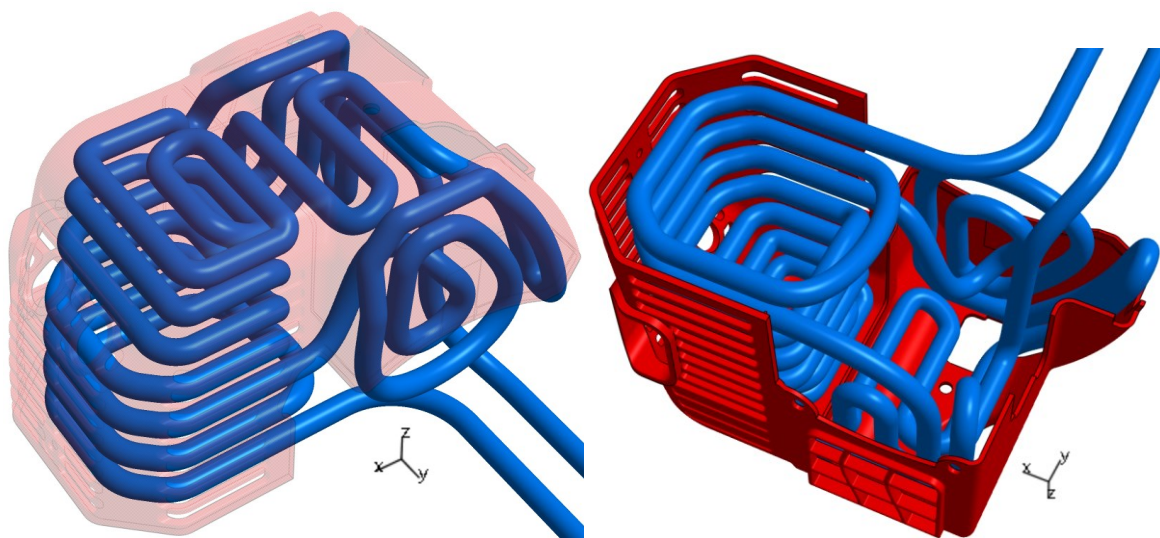
Obr. 100 Optimalizovaný temperační okruh tvárnice

Také v případě tvárníku byl vytvořen zcela nový temperační okruh kombinující metodu cik-cak s metodou spirálovou. Jak ukazuje *Obr. 101*, teplotní pole tvarové vložky se spirálovým okruhem je značně nerovnoměrné s obsahem mnoha hot spotů dosahující teploty téměř 100°C. V místech s nejvyšší teplotou byli segmenty temperačního okruhu přiblíženy na vzdálenost 9 mm od dutiny formy pro vyšší odvod tepla z míst s vysokou teplotou, viz *Obr. 101* vpravo.



Obr. 101 Teplotní pole tvárníku se spirálovým okruhem (vlevo), podle kterých byli části temperačních kanálků vytvořeny blíže k dutině formy s cílem vyrovnání teplot (vpravo)

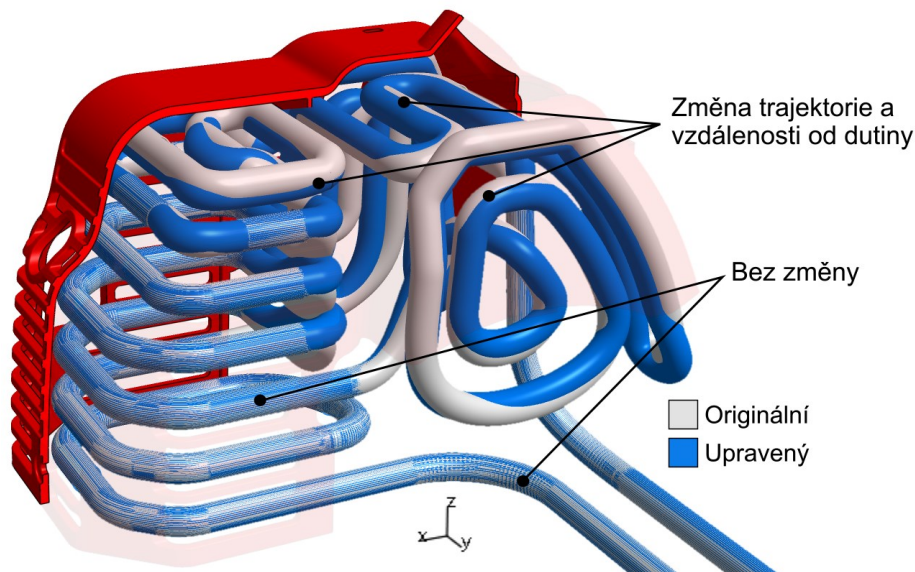
Na vytvořené úseky byl dále napojen zbytek temperačního okruhu s běžnou vzdáleností od dutiny 13 a 16 mm. Napojení bylo promyšleno tak, aby byl okruh stále co nejrovnoměrněji rozložený po celé ploše výrobku.



Obr. 102 První návrh optimalizovaného okruhu tvárníku

8.4.2 Finální úpravy tvárníku

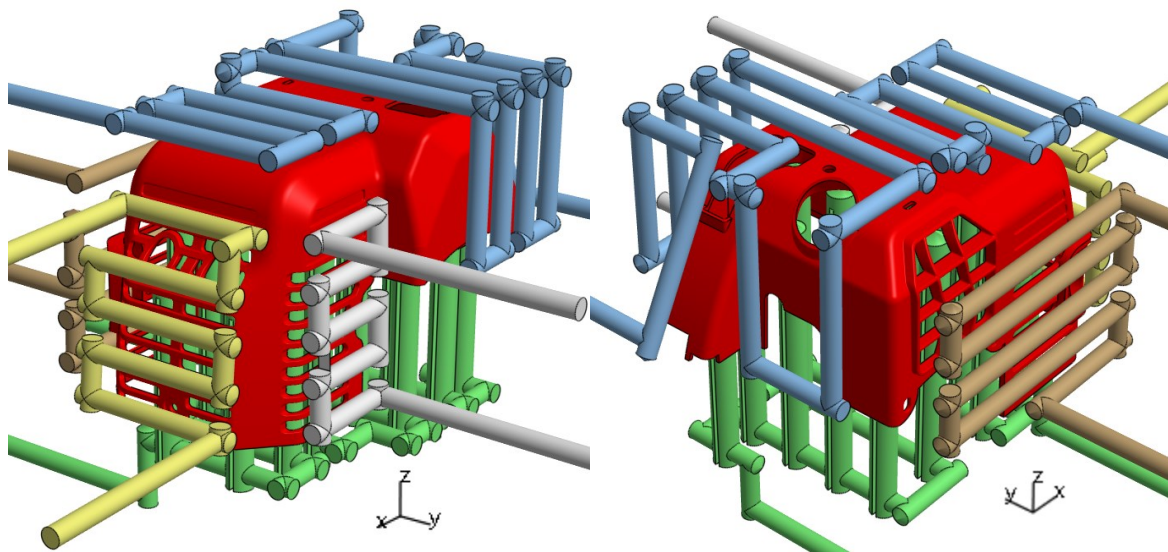
Jak ukazují výsledky analýz v *Kap. 10.1.3*, optimalizovaný okruh tvárníku úspěšně splnil požadavky na snížení maximálních teplot vložky a obecně odstranil všechny oblasti se značně vyšší teplotou. Teplotní pole je ovšem značně nevyrovnané a okruh tak vyžaduje finální úpravy. Jak ukazuje *Obr. 103*, kanálky byly podle potřeby vzdáleny či přiblíženy k dutině formy tak, aby bylo teplotní pole co nejrovnoměrnější. Na obrázku se nachází modře vyznačený finální návrh spolu s bíle vyznačeným původním návrhem pro porovnání. Úpravy okruhu jsou pouze minimální.



Obr. 103 Finální úpravy optimalizovaného okruhu tvárníku

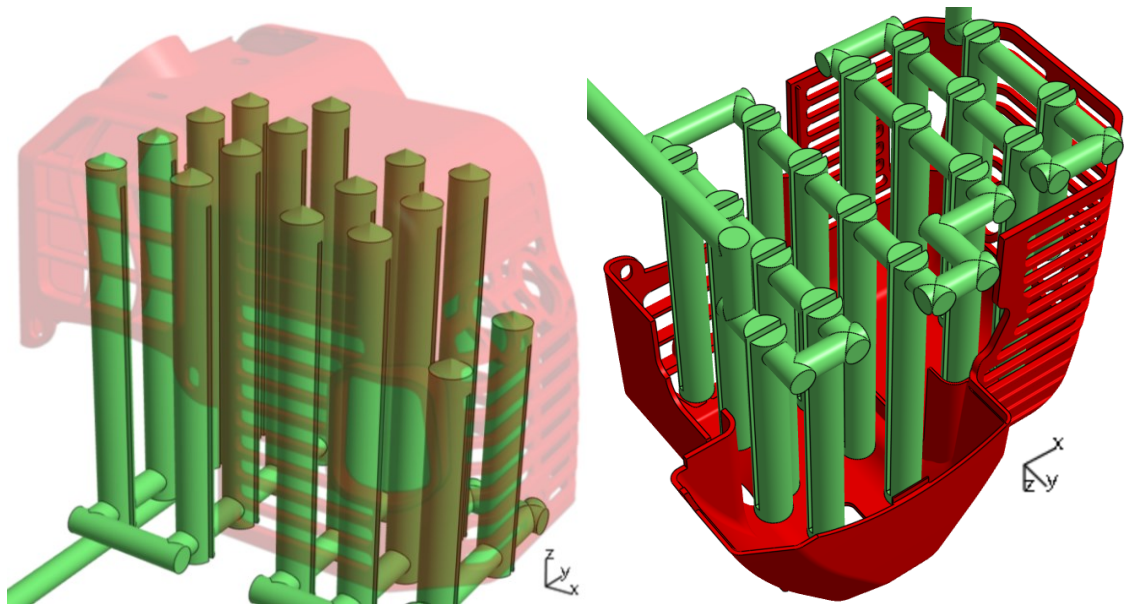
8.5 Konvenční systém

Pro potvrzení zvýšené efektivity konformní temperace byl vytvořen i model konvenční temperace. Minimální vzdálenost mezi kanálky je zvětšena na 20,2 mm, což je způsobeno délkou vkládaných záslepek vyplňující vrtané kanálky pro usměrnění média. Jak ukazuje Obr. 104, kvůli charakteru vrtaných kanálků nemůže konvenční systém zcela kopírovat dutinu formy. Dále musí být kanálky více odsazeny od stěn tvarových vložek z důvodu nutnosti umístění uzavíracích šroubů.



Obr. 104 Konvenční temperační systém

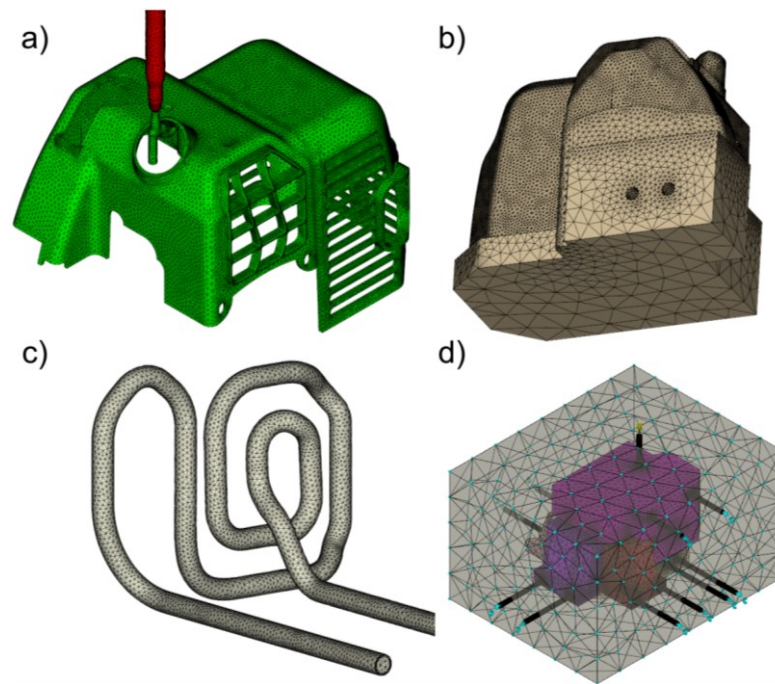
Tvárník je chlazen pomocí série přepážek s vrtanými kanálky o průměru 14. Okruh je tvořen celkem 17 přepážkami.



Obr. 105 Konvenční temperace tvárniku pomocí přepážek

9 NASTAVENÍ TOKOVÝCH ANALÝZ

Pro úspěšné spuštění simulace vstřikování je nutné splnit několik kroků. Nastavení simulací se u všech temperačních systémů shoduje pro zajištění autentického porovnání výsledků analýz. Nejdříve musí být CAD modely výrobku, vtokového systému, temperačního systému, tvarových vložek a bloku formy převedeny na 3d síť tvořenou tetragonálními elementy. Na *Obr. 106* se nachází již vytvořené sítě, kdy se jejich generace a výsledná struktura u jednotlivých součástí liší dle výpočetních potřeb simulačního programu.



Obr. 106 Vytvořené 3d sítě: a) výrobku a vtokového systému, b) tvarových vložek, c) temperačního systému, d) bloku formy

Po vytvoření sítě je nutné nastavit parametry temperačního média. Médium je zvolena čistá voda se vstupní teplotou 80°C při průtoku 10 l/min pro každý okruh.

Následně se nastavují procesní podmínky. Zde byly nastaveny tyto hodnoty:

Tab. 3 Hodnoty nastavení

Teplota taveniny	270	[°C]
Čas otevření formy	5	[s]
Čas vstřikování, dotlaku a chlazení	30	[s]
Čas plnění	Automatický	[s]
Přepnutí na dotlak při zaplnění z	99	[%]

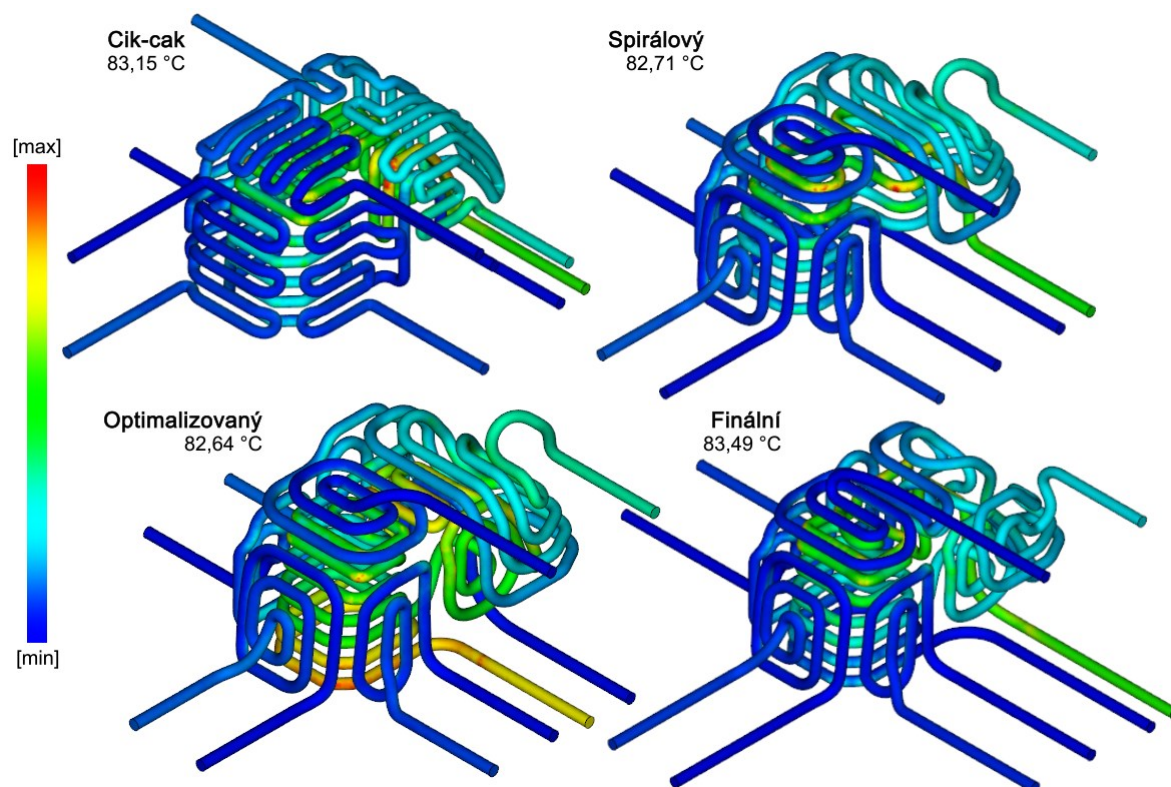
Takto ve zkratce vypadá postup nastavení simulací, které po provedení nabízejí mnoho užitečných analýz s údaji popisujícími procesy plnění, dotlaku, chlazení, a také deformací výrobku.

10 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZ CHLAZENÍ

V této kapitole budou prvně porovnány pouze konformní systémy pro ukázkou postupu vývoje spolu s dosaženými hodnotami jednotlivých systémů. Poté bude podrobně porovnán pouze finální konformní systém s konvenčním pro potvrzení zvýšené efektivity.

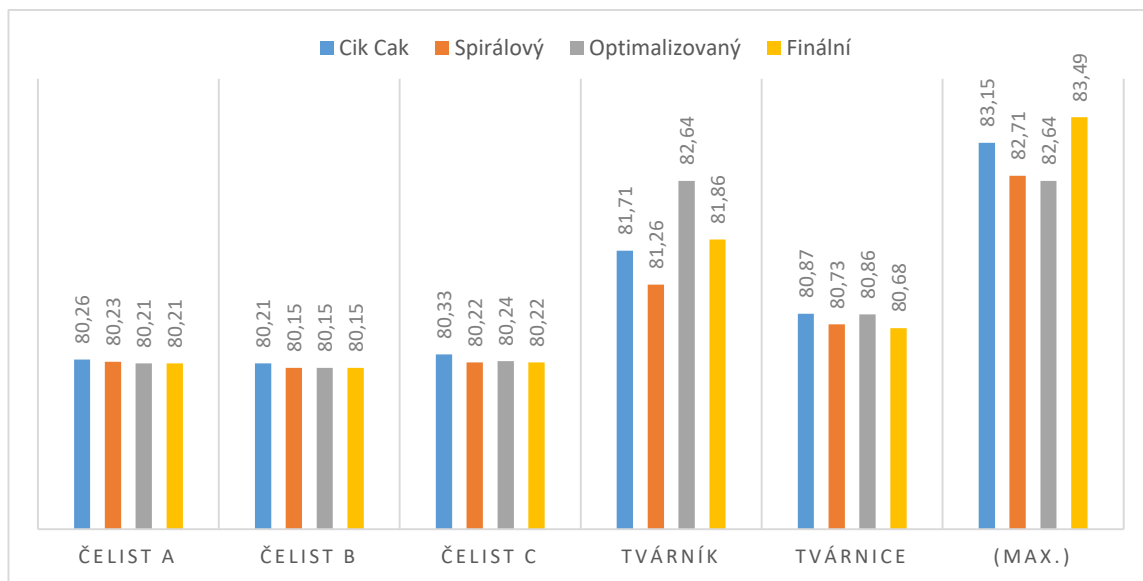
10.1 Porovnání konformních systémů

10.1.1 Teplotní pole kanádků



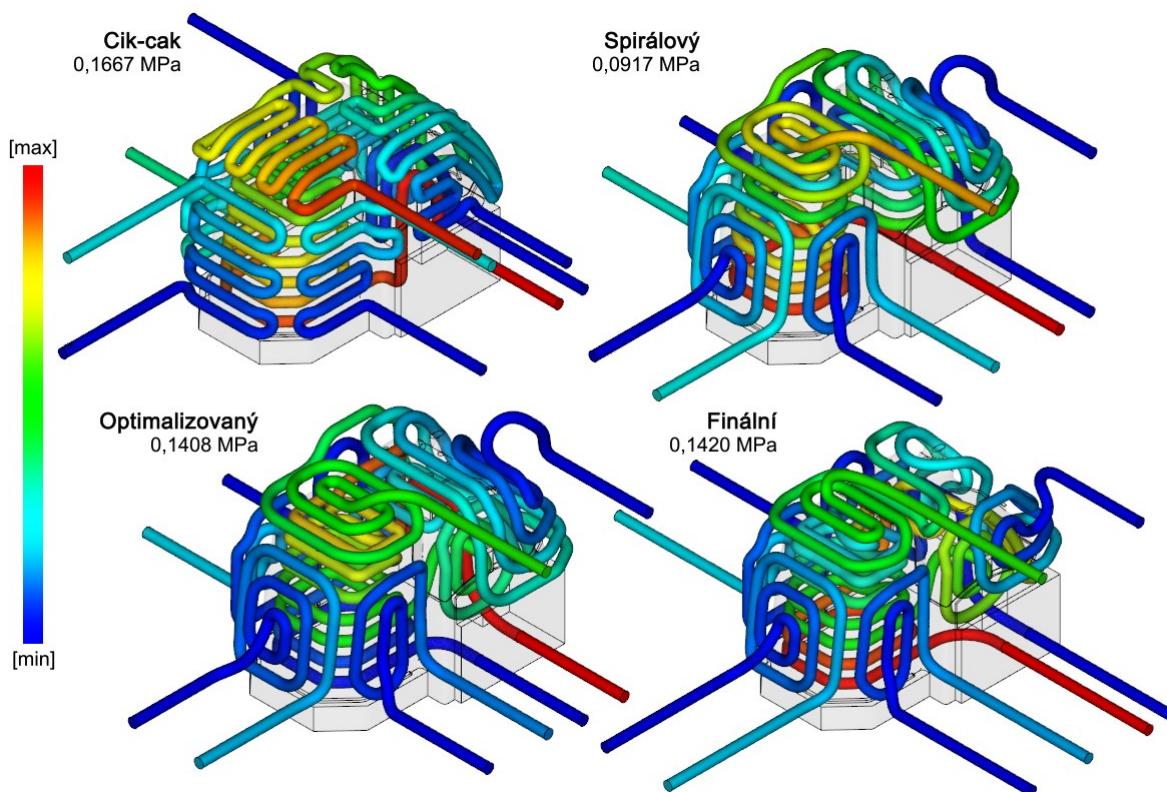
Obr. 107 Teplotní pole kanádků konformních systémů

Rozdíl teplot temperačního média na vstupu a výstupu temperačních okruhů by neměl přesahovat 5°C. U všech temperačních systémů a jejich okruhů je vstupní teplota 80°C. Na Obr. 107 jsou porovnány konformní systémy s vyznačenými výstupními teplotami, z nichž všechny splňují zmíněnou podmínku. Finální návrh vykazuje největší rozdíl 3,49°C, což poukazuje na vysokou efektivitu odvodu tepla. Oproti optimalizovanému návrhu se liší také směrem proudění, které se prokázalo pozitivním přínosem. Graf na Obr. 108 dále shrnuje výsledky této analýzy pro jednotlivé tvarové vložky spolu s maximálními teplotami systémů. Jedná se vždy o lokální maxima teploty tvárníku.



Obr. 108 Teplotní pole tvarových vložek konformních systémů [°C]

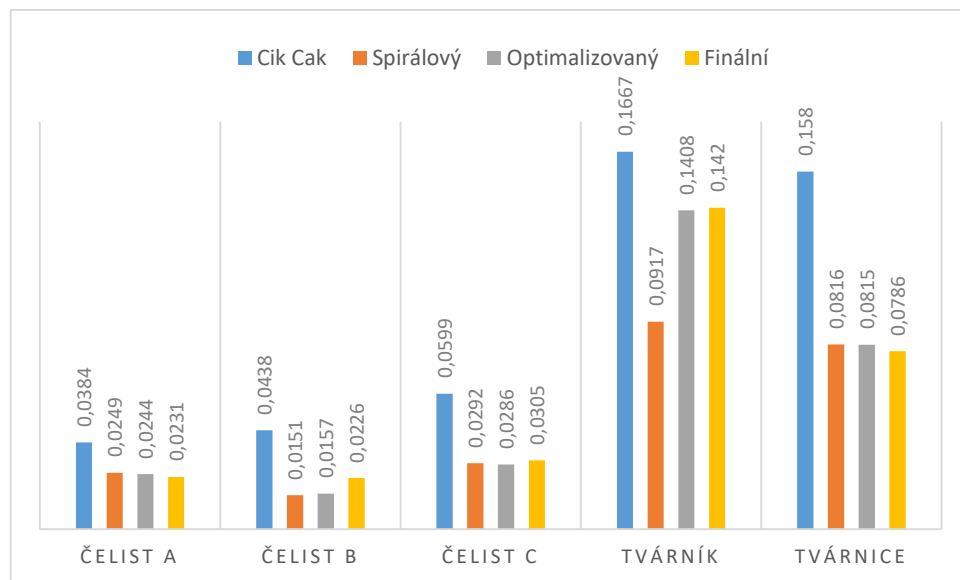
10.1.2 Tlak kanáلكů



Obr. 109 Tlak v kanáلكích konformních systémů

Další analýza se týká tlaku kanáلكů temperačních systémů. Na Obr. 109 se nachází výsledky této analýzy, kde jsou zobrazeny maximální hodnoty jednotlivých systémů. Hodnotou je tlakový spád, jelikož se hodnoty na výstupu pohybují okolo 0 MPa. Jedná se o minimální tlak potřebný pro zajištění nastaveného průtoku média 10 l/min v každém okruhu. Jak lze

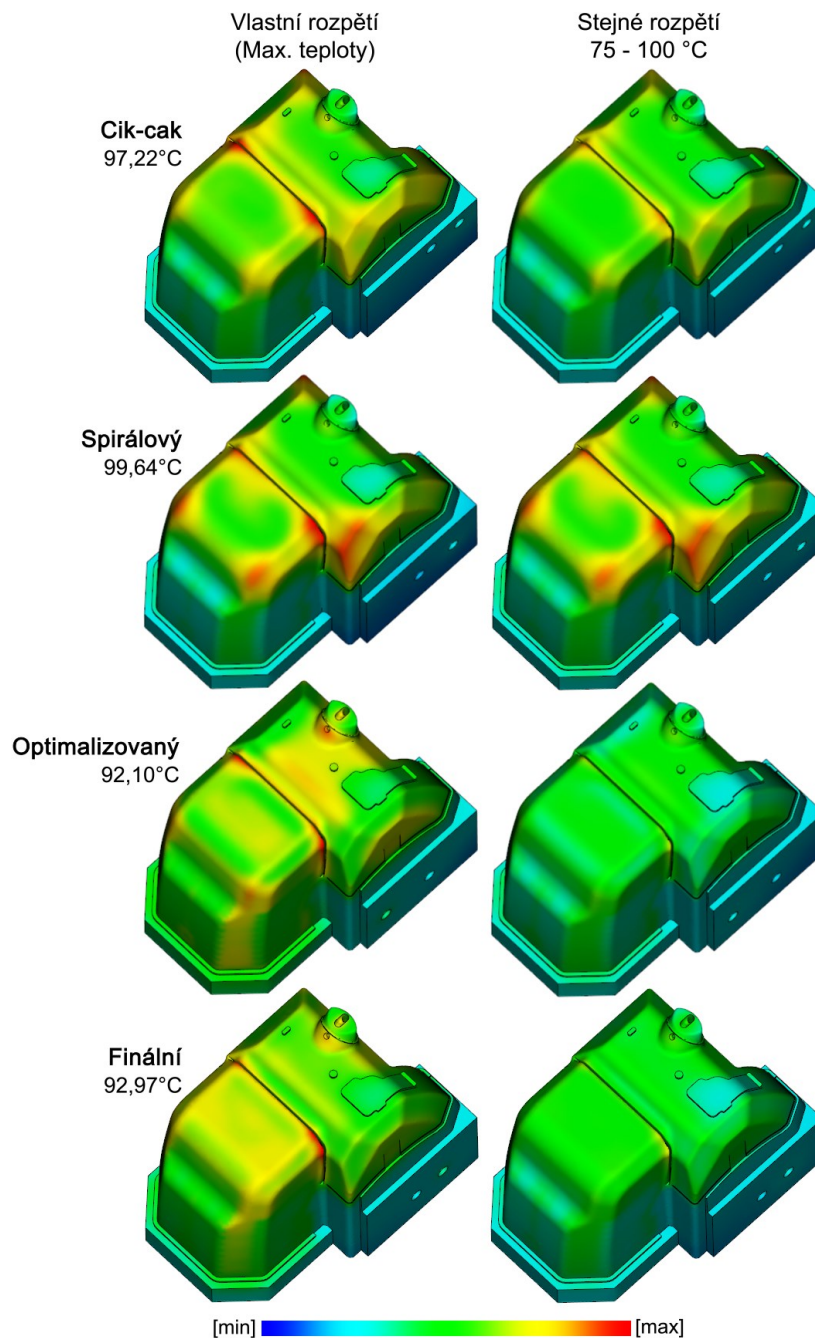
předpokládat, nejvyšší hodnota se vyskytuje u systému cik-cak a nejnižší u spirálového systému. Optimalizované návrhy kombinují tyto systémy a vyrovnávají tak tlakový spád na 0,142 MPa. Vyšší tlaky vyžadují vyšší výkon pumpy vedoucí ke zvýšené energetické náročnosti a tím i ceny provozu. Graf na Obr. 110 umožňuje snadné porovnání vlivu struktury konformního temperačního systému na tlak kanálek jednotlivých tvarových vložek.



Obr. 110 Tlak kanálek tvarových vložek konformních systémů [MPa]

10.1.3 Teplotní pole tvarových vložek

Teplotní pole je na Obr. 111 porovnáno pouze na tvárníku, který nabízí největší přehled o rozdílech v oblasti dosažených teplot a homogenity teplotního pole vlivem různých rozvržení systému. Jednotlivé tvarové vložky budou později porovnány s konvenčním systémem. Na obrázku vlevo se nachází teplotní rozpětí jednotlivých výsledků, která viditelně vystihují úroveň rovnoměrnosti teplotního pole. Vpravo na obrázku jsou tvárníky všech systémů zobrazeny v jednotném teplotním rozpětí 75-100°C pro lepší vzájemné porovnání výsledků. Jak lze vidět na obrázku, optimalizovaný systém značně snížil maximální teplotu vložky a dosahuje celkově nejnižší teploty 92,1°C. Teplotní pole je ovšem značně nevyrovnané a forma je místy dokonce podchlazena, což je napraveno u finálního návrhu, kde se výsledek nejvíce blíží ideálnímu stavu. Jelikož je tvar dutiny značně komplikovaný, není možné dosáhnout zcela homogenního teplotního pole, obzvláště s temperačními kanálky o průměru 10 mm.

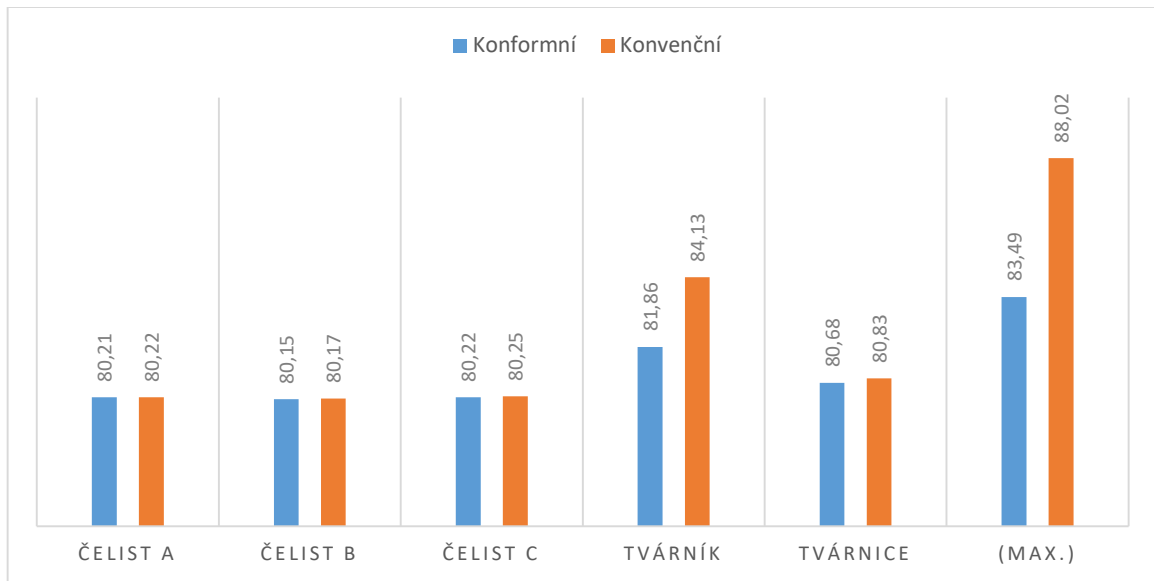


Obr. 111 Teplotní pole tvárníku jednotlivých konformních systémů

10.2 Porovnání konvenčního a konformního systému

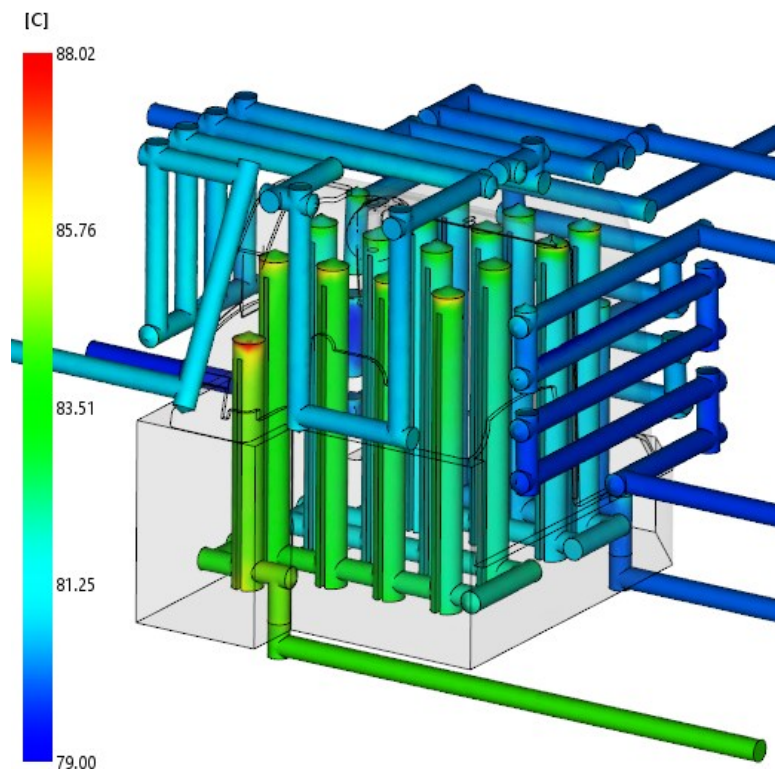
V následujících kapitolách se nachází porovnání finální verze konformního systému s konvenčním systémem v oblasti teplotních polí, tlaku kanálek a především času chlazení výrobků.

10.2.1 Teplotní pole kanálků



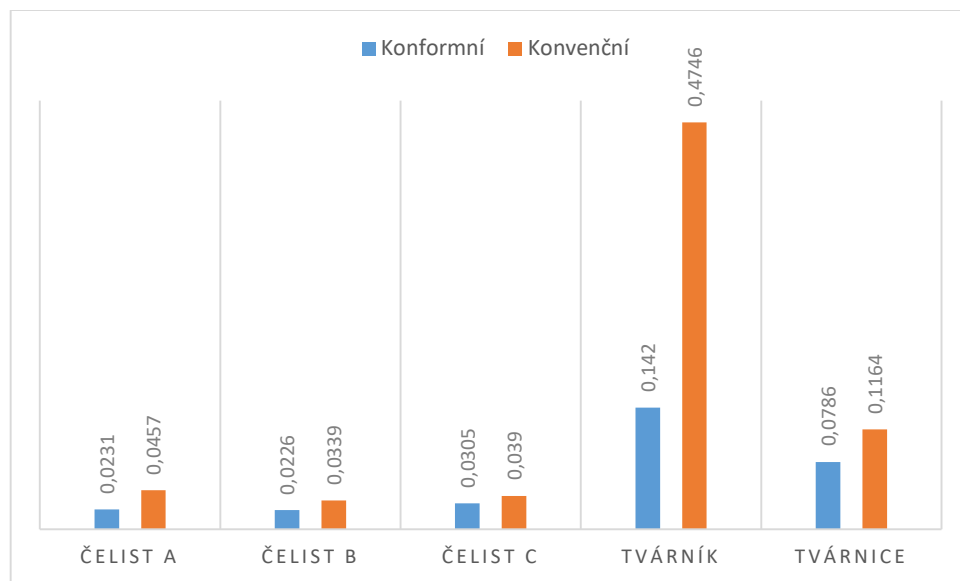
Obr. 112 Porovnání teplotních polí kanálků konformního a konvenčního systému [°C]

Z grafu na Obr. 112 lze vidět, že rozdíl v teplotách kanálků je nejvýznamnější u teploty tvárníku. Na Obr. 113 se nachází teplotní pole konvenčního systému. Přestože vrchol poslední přepážky dosahuje lokální teploty přes 88°C, výstupní hodnota obvodu je 84,13°C. Systém tak splňuje podmínku maximálního rozdílu 5°C.



Obr. 113 Teplotní pole kanálků konvenčního systému

10.2.2 Tlak kanálků



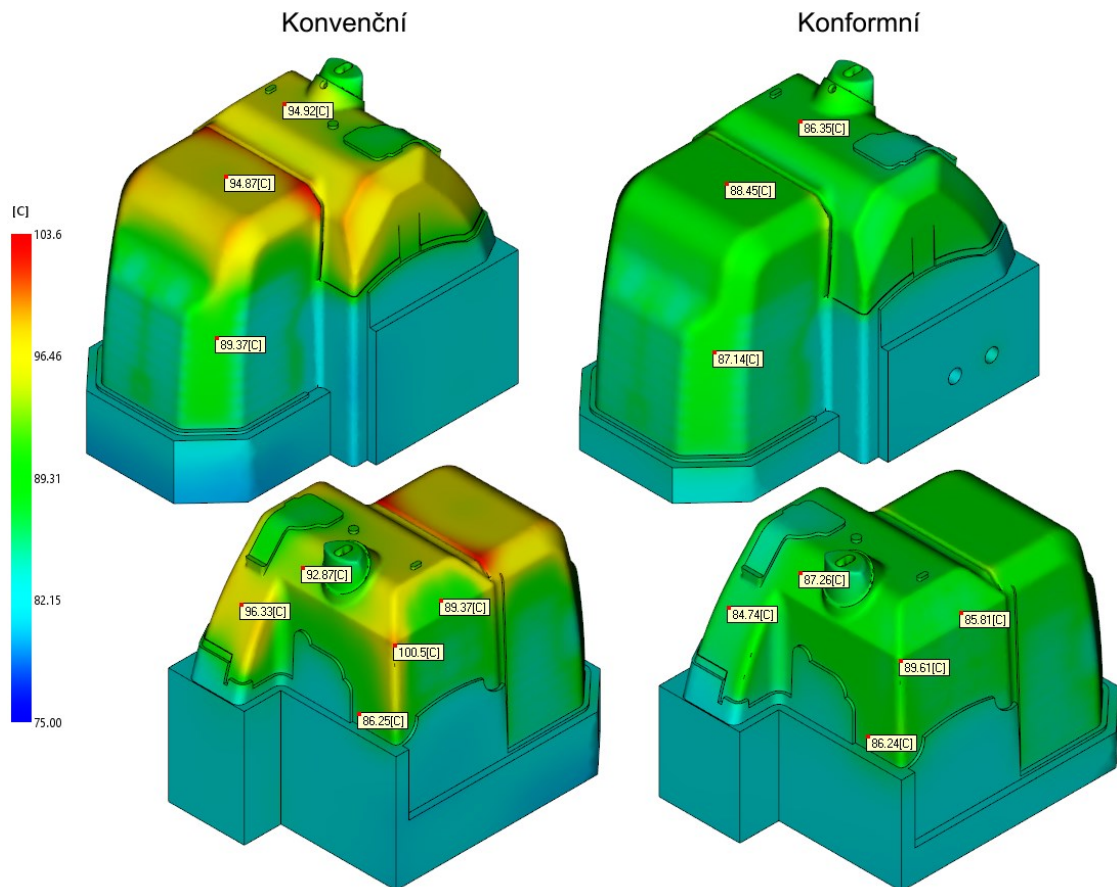
Obr. 114 Porovnání tlaků v kanálcích tvarových vložek konformního a konvenčního systému [MPa]

V případě tlaku kanálků jde vidět značný nárůst u všech vložek, u tvárníku jde dokonce o hodnotu téměř 0,5 MPa v případě konvenční temperace, což je třikrát více než u temperace konformní. S využitím vysokého počtu přepážek značně roste tlakový spád, a to neúměrně k růstu efektivity temperace. Jak lze z grafu na Obr. 114 vyčíst, pro zajištění kvalitní temperace jader s využitím konvenčních technologií značně narůstají požadavky na cirkulaci, a to především u objemných výrobků. Alternativou jsou spirálové trny, které by značně snížily tlakový spád, avšak za cenu vysoce heterogenního teplotního pole v případě složitých geometrií, jako je tento výrobek.

10.2.3 Teplotní pole tvarových vložek

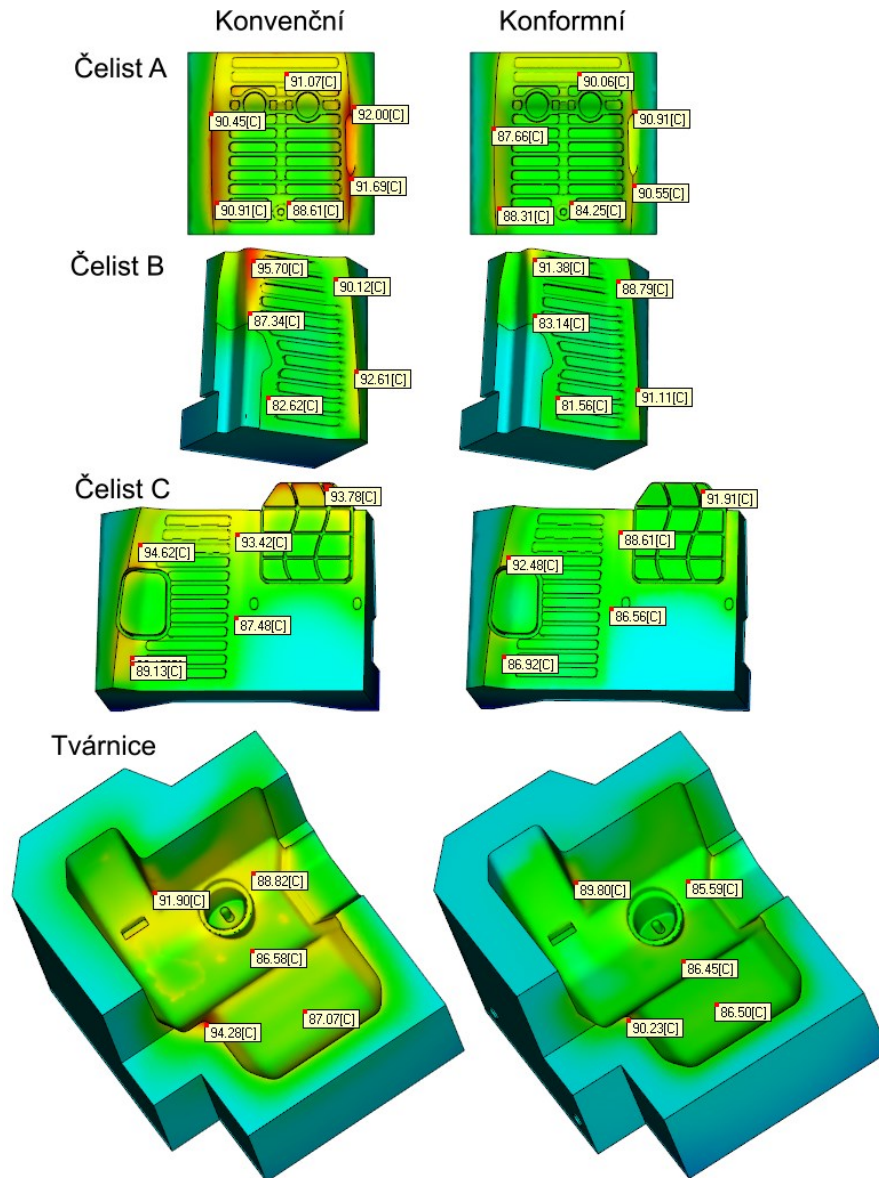
Zde jsou porovnány teploty všech vložek finálního konformního systému s vložkami konvenčního systému. Na Obr. 115 jsou porovnány teplotní pole tvárníků s tepelným rozpětím 75 – 103,6°C, což je maximální teplota, kterou dosahuje tvárník konvenčního systému. Dle vyznačených bodů se teplota liší průměrně o 8°C, maximální teplota se liší o více než 10°C.

Kromě značně nižších teplot je teplotní pole u konformní temperace také mnohem vyrovnanější. Výrobek tak chladne rovnoměrněji a lze u něj očekávat lepší vlastnosti, kvalitu, a především menší vnitřní pnutí.



Obr. 115 Porovnání teplot tvárníku konvenčního a konformního systému

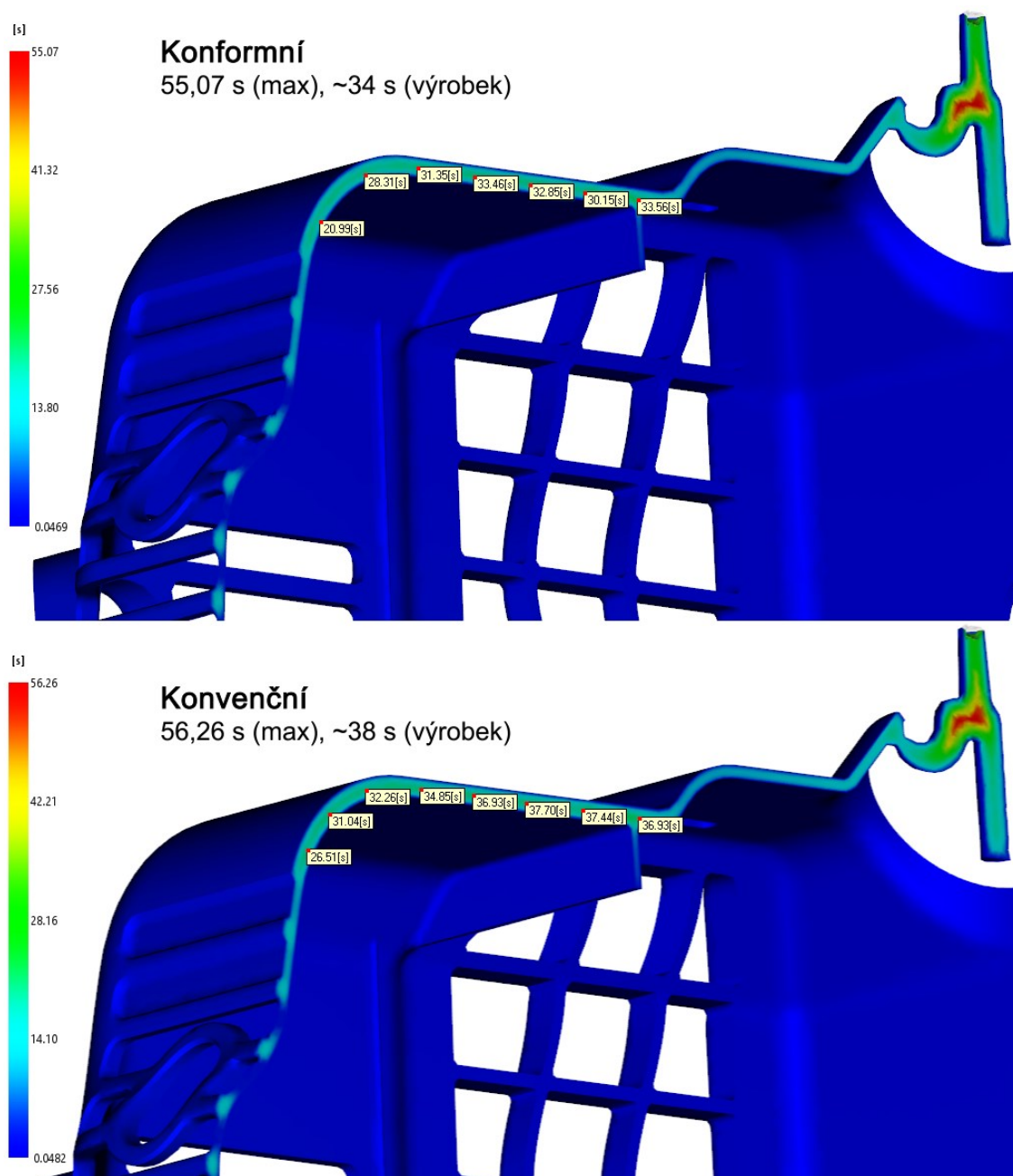
Na Obr. 116 se nachází porovnání zbylých tvarových vložek. Stejně jako u tvárníku jsou nejvyšší teploty všech tvarových vložek nižší a teplotní pole značně rovnoměrnější s využitím konformního systému.



Obr. 116 Porovnání teplot tvarových vložek konvenčního a konformního systému, vložky jsou na obrázku ve stejném měřítku

10.2.4 Čas vyhození

Poslední a nejdůležitější analýzou pro porovnání je analýza času pro dosažení vyhazovací teploty. Na Obr. 117 se nachází řezy výrobkem. Jelikož na stěně dutiny dochází k rychlému ochlazení taveniny, je podstatnější zjistit hodnoty ve středu stěny výrobku, kde tavenina chladne nejpomaleji. Nejvyšší hodnoty 55,07 s u konformního a 56,26 s u konvenčního systému se týkají pouze studeného vtoku. Na výrobku v oblasti s nejdelší dobou chlazení bylo vyznačeno několik bodů. Při zaokrouhlení těchto hodnot lze bezpečně určit čas vyhození u konformní temperace na 34 s, a u konvenční temperace 38 s. Tento rozdíl tvoří ve výsledku zkrácení času chlazení o 10,5 % v případě konformní temperace.

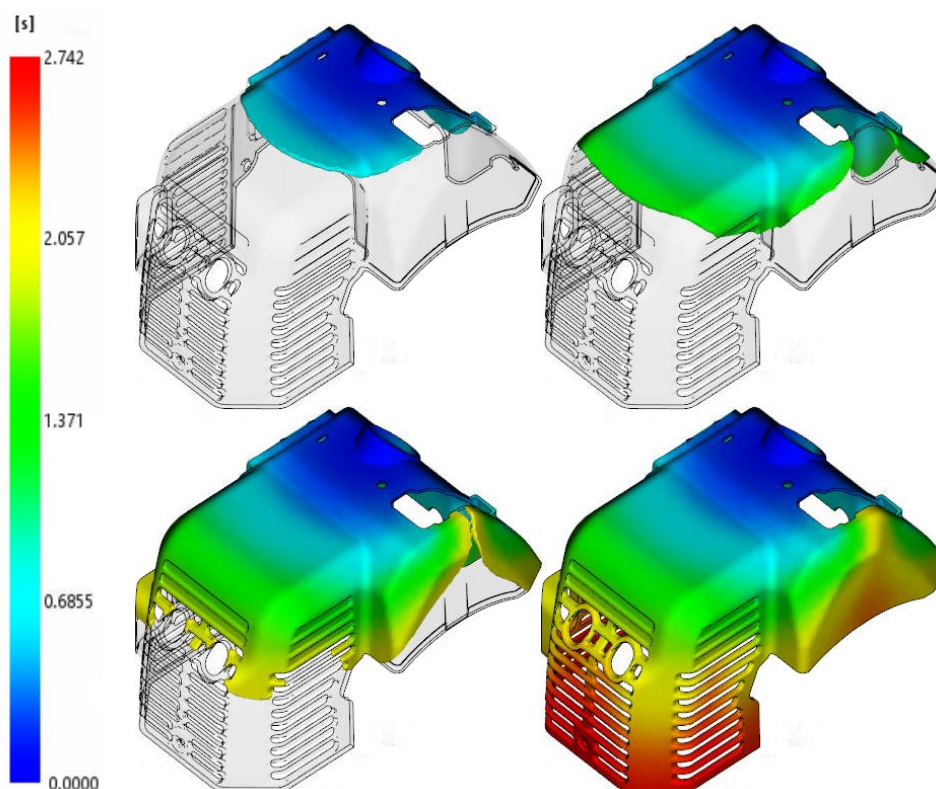


Obr. 117 Hodnoty času dosažení vyhazovací teploty u konformního a konvenčního systému

11 VÝSLEDKY ANALÝZ PLNĚNÍ, DOTLAKU A DEFORMACÍ

11.1 Čas plnění

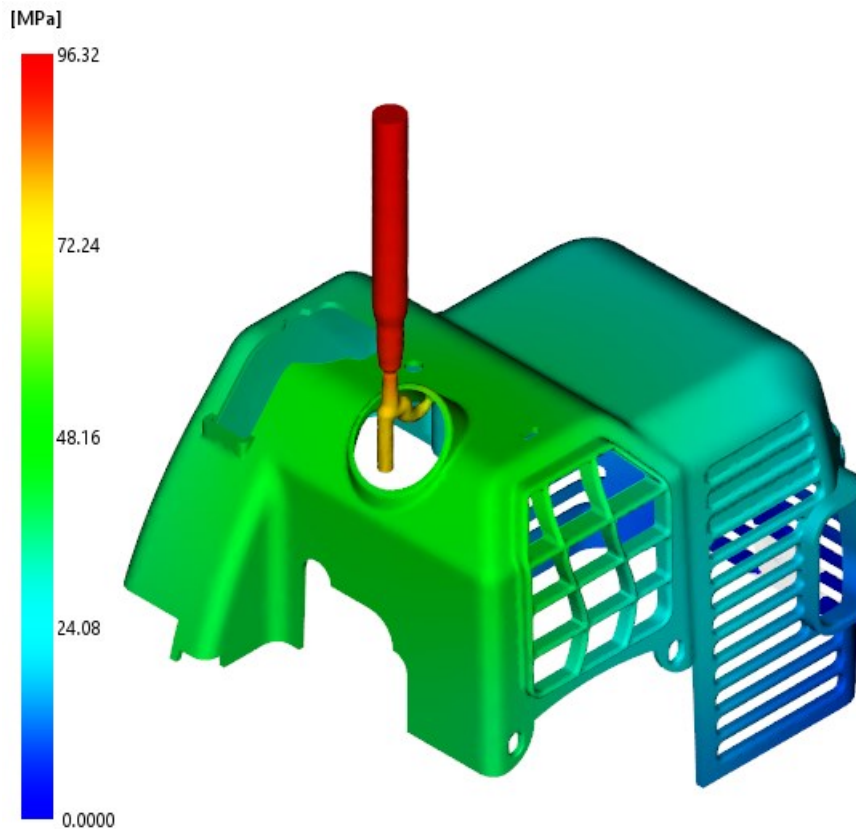
Tato analýza znázorňuje graficky průběh plnění dutiny formy taveninou polymeru s modrou barvou značící počátek plnění v místě vtoku a červenou barvou značící místa, kde tavenina doteče jako poslední. V tomto případě je čas plnění 2,742 s a jedná se o okraje výrobku s největší vzdáleností od vtoku. Analýza je nastavena na automatický čas plnění zajišťující kompletní zaplnění za ideálních podmínek.



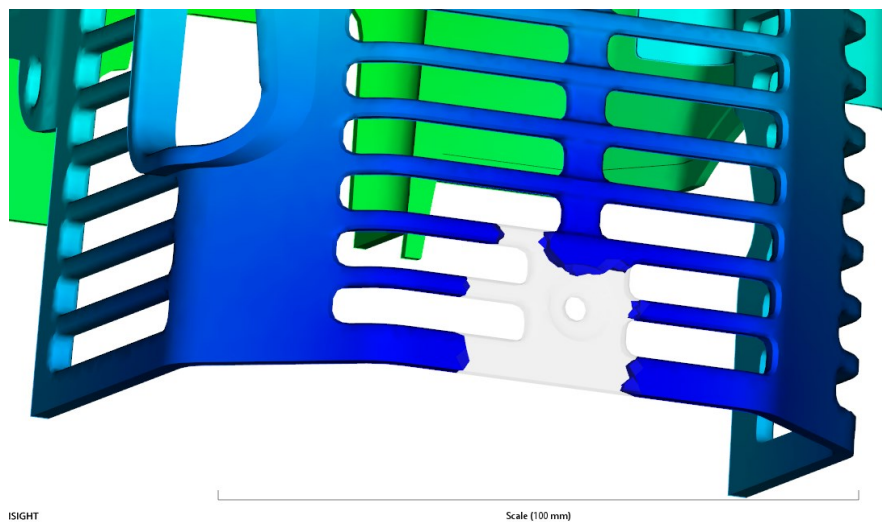
Obr. 118 Analýza času plnění v časech 0,6855; 1,371; 2,057 a 2,742 s

11.2 Tlak při přepnutí na dotlak

Tato analýza kromě hodnoty tlaku při přepnutí na dotlak ukazuje také stav zaplnění dutiny formy v tomto momentě, viz Obr. 120. K přepnutí na dotlak dochází dle nastavení při zaplnění dutiny formy z 99 %, tudíž je zbývající část zaplněna pouze dotlakem. Jelikož je dotlak nastaven na 90 % hodnoty vstřikovacího tlaku, ukazuje nám výsledek analýzy na Obr. 119 maximální dosažené tlaky, které následně klesají. V případě dutiny formy je to ~ 48 MPa, v případě studené části vtoku ~ 72 MPa a u vyhřívané části je tlak maximální, a to 96,32 MPa.



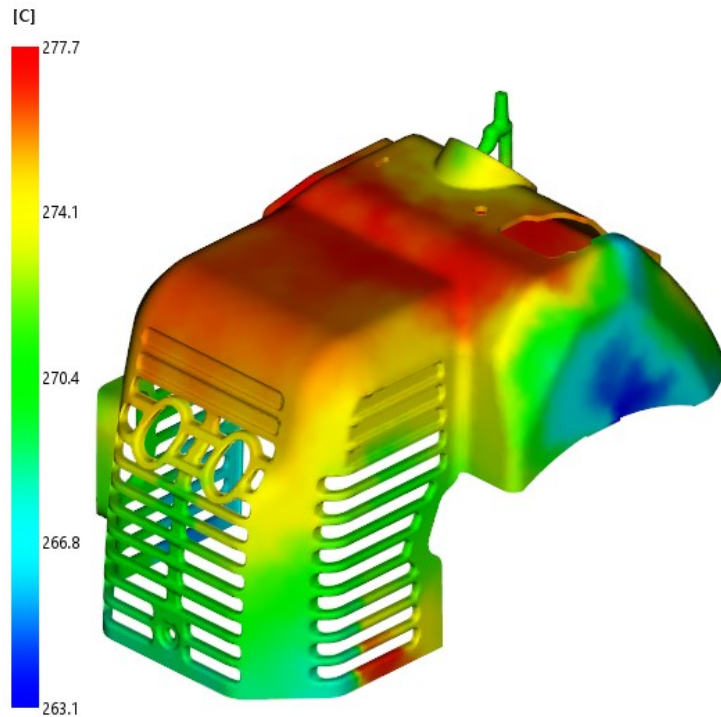
Obr. 119 Analýza tlaku při přepnutí na dotlak



Obr. 120 Stav zaplnění dutiny při přepnutí na dotlak

11.3 Teplota na čele taveniny

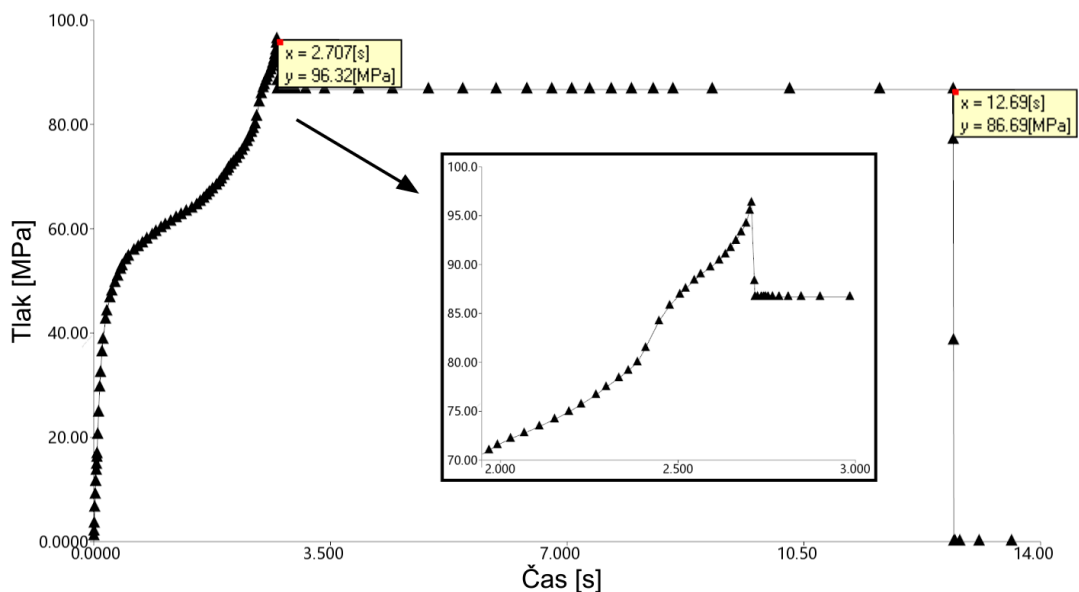
Výsledkem této analýzy je zobrazení teplot, jaké má polymerní taveniny v době při průtoku daným místem. Dle doporučení byla teplota taveniny nastavena na 270°C. Jak ukazuje Obr. 121, v dutině formy poté tavenina dosahuje teplot v rozmezí 263 – 278°C, což splňuje podmínku rozmezí doporučených teplot 260 – 290°C.



Obr. 121 Analýza teploty na čele taveniny

11.4 Tlak v místě vtokového ústí

Výsledkem této analýzy je graf na Obr. 122, který znázorňuje průběh tlaku v místě vtokového ústí v závislosti na čase. Tlak od počátku vstřikování rapidně roste do maximální hodnoty 96,32 MPa v čase 2,707 s, kdy dochází k přepnutí z fáze plnění na dotlak o hodnotě 90 % vstřikovacího tlaku, který činí 86,69 MPa. Na této hodnotě tlak setrvává dle nastavení po dobu 10 s.

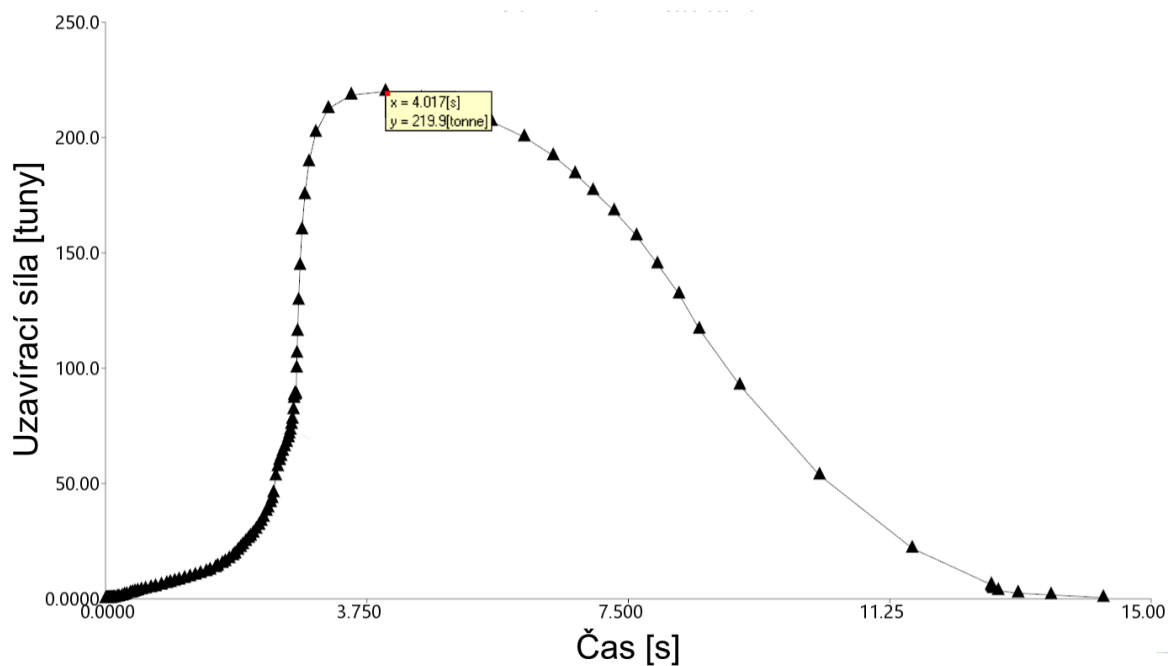


Obr. 122 Analýza průběhu tlaku v místě vtokového ústí

11.5 Uzavírací síla

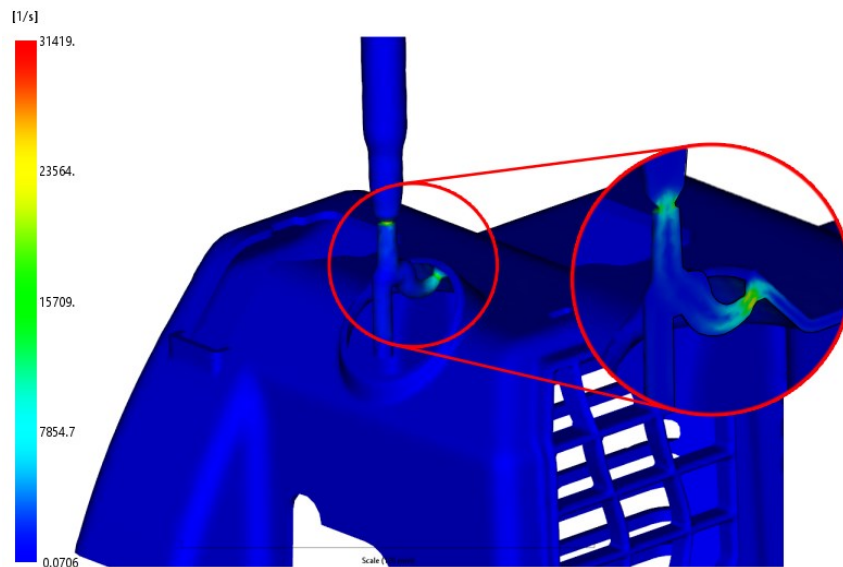
Výsledkem této analýzy je opět graf, který znázorňuje průběh uzavírací síly v závislosti na čase. Maximální hodnoty 220 tun, tedy 2 200 kN, je dosaženo v čase 4,017 s. Poté potřebná síla stále klesá, jelikož se chladnoucí tavenina polymeru začíná smršťovat a působí na formu stále menším tlakem.

Z této analýzy slouží jako nástroj pro volbu vstřikovacího stroje. Vybraný stroj by měl být schopen vyvinout potřebnou uzavírací sílu s rezervou alespoň 20 %, což v tomto případě zvedá potřebnou hodnotu na 2 640 kN.



11.6 Rychlost smykové deformace

Rychlost smykové deformace se mění s časem. Proto výsledek této analýzy zobrazuje pouze nejvyšší dosahované hodnoty v každém místě za celou dobu vstřikovacího cyklu. Jak ukazuje *Obr. 123*, nejvyšších hodnot dosahuje ústí mezi horkým a studeným vtokovým systémem, a také ústí mezi studeným vtokovým systémem a výrobkem. V materiálovém listě je maximální dovolená hodnota stanovena na $60\,000\text{ s}^{-1}$ a dle výsledku analýzy je maximální rychlost smykové deformace při vstřikování $31\,419\text{ s}^{-1}$, tedy v dovoleném rozmezí hodnot.

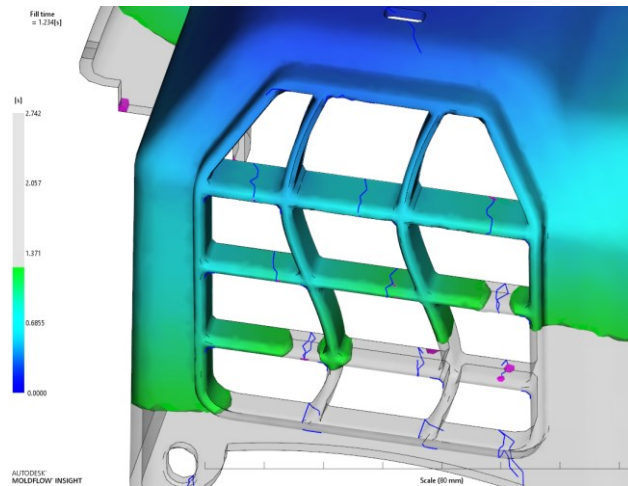


Obr. 123 Analýza rychlosti smykové deformace

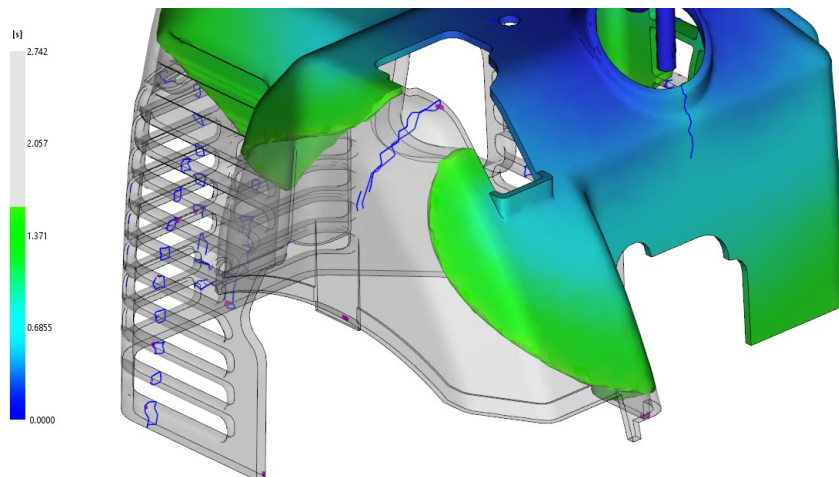
11.7 Vzduchové kapsy & studené spoje

Zde se nachází spojení dvou analýz - predikce vzniku vzduchových kapes a spojených spojů, jelikož spolu tyto deformace často souvisejí. Na Obr. 124, 125 a 126 se nachází detaily zobrazující místa s predikcí vzniku studených spojů (na obrázcích modře) a vzduchových kapes (na obrázcích růžově). Analýzy se také prolínají s průběhem plnění v určitých časech pro znázornění proudění taveniny, které vede ke vzniku těchto problémových míst. Studené spoje vznikají stykem více čel taveniny a vzduchové kapsy vznikají v témže místě, popřípadě v koncových bodech toku taveniny.

Je nutné počítat se zhoršenými mechanickými vlastnostmi v místě vzniku spojů. Semikrystalické materiály jako např. zde použitý PA, mají obecně lepší vlastnosti v místě spojů, než materiály amorfni.

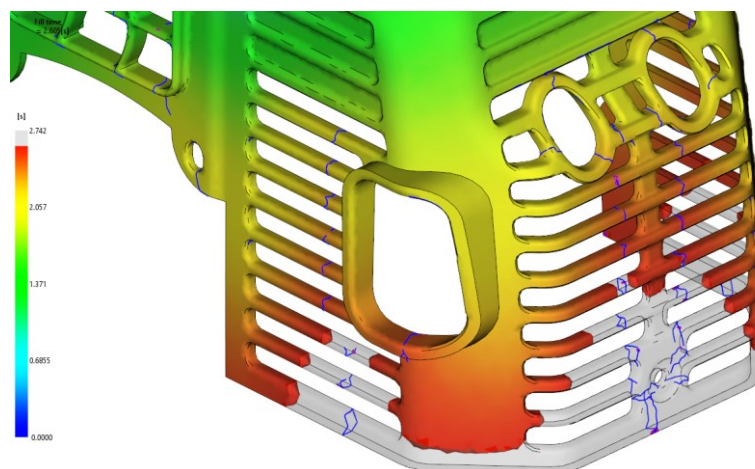


Obr. 124 Vzduchové kapsy & studené spoje 1



Obr. 125 Vzduchové kapsy & studené spoje 2

Na výrobku se nachází velké množství žebrování, kde není možné vzniku studených spojů zamezit.



Obr. 126 Vzduchové kapsy & studené spoje 3

12 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Vstřikovací stroj byl vybrán na základě technických parametrů vstřikovací formy a výsledků tokových analýz. Jako vhodný stroj se nabízí **Allrounder 720 A 3200 – 800 (55)** od firmy Arburg. Rozhodujícím parametrem je v tomto případě maximální uzavírací síla stroje. Jak napovídá analýza, je od stroje vyžadována uzavírací síla 217,2 tun, což činí 2640 kN při rezervě 20%. Hmotnost vstřikované dávky činí 405 g při rezervě 10%. S ohledem na tuto skutečnost byla vybrána vstřikovací jednotka 800 (dle normy EUROMAP) se šnekem o průměru 55 mm.

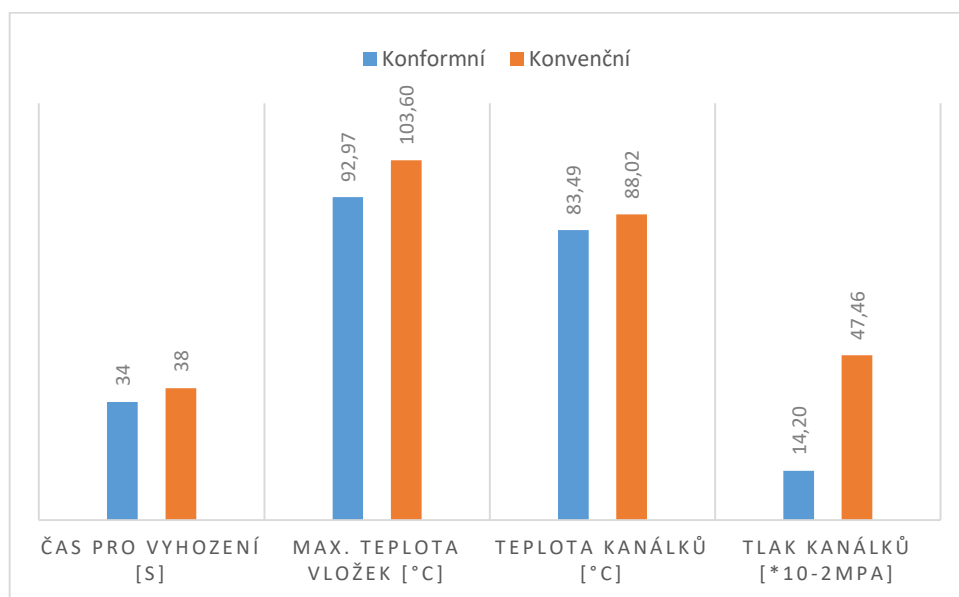
Následující tabulka nabízí porovnání parametrů vstřikovacího stroje a požadavků formy:

Tab. 4 Porovnání parametrů stroje s požadavky formy

Parametry	Jedn.	Parametry stroje	Požadované parametry
Rozměr mezi vodícími sloupky	[mm]	720 x 720	696 x 496
Velikost uzavírací síly	[kN]	3 200	2 640
Hmotnost vstřikované dávky	[g]	431	405
vstřikovací tlak	[bar]	1 650	970
Středící kroužek	[mm]	160	

DISKUZE VÝSLEDKŮ A VYUŽITÍ KONFORMNÍ TEMPERACE

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout konformní temperační systém, který prokáže při porovnání s konvenční temperací zvýšení efektivity chlazení. U tohoto návrhu bylo dosaženo zkrácení doby chlazení z 38 na 34 s, což znamená 10,5% úsporu času oproti vrtanému konvenčnímu systému. Z obrázků a grafů vycházejících z tokových analýz této práce je zjevné, že bylo dosaženo také značně vyšší homogenity teplotního pole u všech tvarových vložek, a to za nižšího tlakového spádu a teplotního rozdílu média na vstupu a výstupu. Veškeré zlepšení shrnuje následující graf:



Obr. 127 Shrnutí dosažených výsledků s konformní a konvenční temperací

Přestože se konformní temperace jasně jeví jako lepší varianta pro chlazení výstřiků, nenachází 100 % uplatnění ve všech případech vstřikovacích forem. Konformní temperace vyžaduje (nejčastěji) aditivní technologie na principu laserového spékání kovových prášků, což je přirozeně vysoce energeticky náročný proces v porovnání s konvenčními metodami výroby. Zkrácení doby chlazení s konformní temperací, které vede ke snížení ceny výrobků, tak naráží na vysoký nárůst vstupních nákladů. Zda-li je využití konformní temperace opravdu výhodné se tak odvíjí hlavně od množství vyrobených kusů, tedy velikosti série. Dále se volba odvíjí od požadavků na kvalitu a mechanické vlastnosti výrobku, které jsou ovlivněny homogenitou chlazení, které je u konformní temperace značně lepší. U levnějších spotřebních výrobků není kladen tak vysoký apel na kvalitu jako u technických, mechanicky namáhaných výrobků.

ZÁVĚR

Diplomová práce je rozdělena na dvě hlavní části, kdy se první část zabývá teorií okolo poznatků v procesu vstřikování nutných pro úspěšný návrh vstřikovací formy s využitím moderních technologií v této práci. Jsou zde rozebrány vybrané body pojednávající o:

1. Technologii vstřikování termoplastů zahrnující vstřikovací stroje a jeho části, dále je zde rozebrána problematika procesu vstřikování, termoplastů a jejich chování při vstřikování a nakonec samotná vstřikovací forma a její systémy.
2. Temperaci vstřikovacích forem zahrnující matematický model tepelné bilance, konstrukční zásady temperačních systémů a také druhy konformních temperací včetně konceptů pro další zvýšení efektivity temperace.
3. Aditivních technologiích umožňující výrobu částí vstřikovacích forem s konformní temperací.
4. Simulacích procesu vstřikování a jejich přínosu k dalšímu zvyšování efektivity.

Druhá, praktická část se věnuje návrhu vstřikovací formy s konformní temperací dle zadaných cílů této práce. Nejdříve byl vybrán výrobek s geometrií vhodnou pro potvrzení zvýšené efektivity konformní temperace. Vybraným výrobkem se stal kryt motoru strunové sekačky zhotoveného z polyamidu 6, který je plněný 30% skelných vláken. Podle výrobku byly navrženy tvarové vložky. Jelikož je výrobek tvořen mnoha žebry po stěnách pro ventilaci, zahrnují tvarové vložky kromě tvárníku a tvárnice hned tři posuvné čelisti. Vložky byly vytvořeny v souladu s rozměry temperačních obvodů.

Po zhotovení tvarových vložek byla sestavena vstřikovací forma o násobnosti 2. Forma je složena kompletně z normálií od firem HASCO a Meusburger, její rozměry jsou 696 x 496 x 633 a její přibližná hmotnost je 1500 kg.

Nakonec je sestava podrobena tokovým analýzám. Hlavním záměrem bylo porovnat výsledky navržených konformních a konvenčních temperačních systémů pro prokázání zvýšené efektivity. Dle analýz nabízí konformní systém zkrácení doby chlazení od 4 s z 38 na 34 s, což znamená zkrácení doby o 10,5 %. Kromě toho nabízí konformní temperace vysoce homogenní teplotní pole, které zajišťuje rovnoměrné chladnutí taveniny a snížení následných vnitřních pnutí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Zheng R., Tanner R. I., Fan X. J. *Injection molding: integration of theory and modeling methods*. Heidelberg: Springer, 2011, XII, 188 s. ISBN 9783642212628
- [2] Yang Y., Chen X., Lu N., Gao F. *Injection molding process control, monitoring and optimization*. Munich: Hanser, 2016, XVI, 397 s. ISBN 9781569905920
- [3] Bobčík L. *Formy pro zpracování plastů*. II. díl, Vstřikování termoplastů. Brno: Uniplast Brno, 1999, 134 s.
- [4] Seidl M. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. Střední odborné učiliště Svitavy. Code Creator, s.r.o., publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [5] *Arburg's efficient injection moulding solutions at the Plastpol*. Plastech, 2014. Dostupné z: <https://www.plastech.biz/en/news/Arburg-s-efficient-injection-moulding-solutions-at-the-8519?p=2>
- [6] Wang M. L., Chang R. Y., Hsu Ch. H. *Molding simulation: theory and practice*. Cincinnati: Hanser Publications, 2018, XVIII, 513 s. ISBN 9781569906194
- [7] Zoller P., Walsh D. J. *Standard pressure-volume-temperature data for polymers*. Lancaster: Technomic Publisher Compny, 1995, 412 s. ISBN 1566763282
- [8] Zeman, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN – technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 9788093002503
- [9] Lenfeld P. *Technologie vstřikování*. Brno: Code Creator, s.r.o., 2016. ISBN 978-80-88058-74-8
- [10] Haluška P. *Vliv reziduálního napětí na kvalitu vsřikovaných dílů*. PlasticPortal.eu, 2013. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/vliv-rezidualnich-napeti-na-kvalitu-vstrikovanych-dilu/c/1713/>
- [11] Schoff C. K. *Hansen Solubility Parameters (HSP): 1—Introduction*. [obrázek]. Dostupné z: <https://www.paint.org/coatingstech-magazine/articles/%E2%80%89hansen-solubility-parameters-hsp-1-introduction/>
- [12] Běhálek L. *Polymery*. Střední odborné učiliště Svitavy. Code Creator, s.r.o., publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [13] Wilczyński K. *Rheology in polymer processing: modeling and simulation*. Munich: Hanser Publishers, 2021, XIII, 377 s. ISBN 978-1-56990-660-6
- [14] Osswald T. A., Rudolph N. *Polymer rheology: fundamentals and application*. Munich: Hanser, 2015, XI, 225 s. ISBN 9781569905173
- [15] *What is MFI or MFR and why is it important?*. Industrial physics. Dostupné z: <https://industrialphysics.com/knowledgebase/what-is-mfi-or-mfr-and-why-is-it-important/>
- [16] Ing. Bobek J., Ph.D. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. Střední odborné učiliště Svitavi. Code Creator, s.r.o., publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [17] Custom Plastic Injection Mould. [obrázek]. Dostupné z: <https://m.made-in-china.com/product/Custom-Plastic-Injection-Mould-Making-for-ABS-PP-PA-PE-PS-PC-POM-Material-750052832.html>
- [18] Horké vtoky [obrázek]. Wikipedia. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hork%C3%A9_vtoky#/media/Soubor:Hot_runner_x-section_injection.png

- [19] Bobčík L. *Formy pro zpracování plastů*. II. díl, Vstřikování termoplastů. Brno: Uniplast Brno, 1999, 214 s.
- [20] Zemam L. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141
- [21] Dang X.P., Park H.S. *Design of U-shape milled groove conformal cooling channels for plastic injection mold*. Int J Precis Eng Manuf 12, 73-84, 2011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0009-8>
- [22] Feng S., Kamat A.M., Pei Y. *Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates*. International Journal of Heat and Mass Transfer 171, 121082, 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082>
- [23] Hynek M., Müller E., Heller Š. *Temperace vstřikovacích forem*. Západočeská univerzita v Plzni, 2013. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf
- [24] Saunders M. *Responding to production pressure with conformal cooling*. Renishaw. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/responding-to-production-pressure-with-conformal-cooling--42510>
- [25] Heat insulation board. [obrázek] Yutaka Corporation. Dostupné z: <https://yutakasangyo.co.jp/english/plastic.html>
- [26] Park H.S., Dang X.P. *Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold*. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 11, 879-890, 2010. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12541-010-0107-z>
- [27] Katalog komponentů Meusburger. [obrázek] Dostupné z: <https://www.meusburger.com/EN/GB/products>
- [28] AMPCO METAL. *Copper: The secret weapon of injection molding*. 2019. Dostupné z: <https://academy.ampcometal.com/copper-the-secret-weapon-of-injection-molding>
- [29] Červinková P., Lenfeld P. *Konformní chlazení vstřikovacích forem*. Technická Univerzita v Liberci, 2010. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/2880>
- [30] TSY Molding Limited. [obrázek] Dostupné z: <https://www.injectionmoldingsupplier.com/plastic-injection-mold.html>
- [31] Park H.S., Dang X.P., Nquyen D.S., Kumar S. *Design of Advanced Injection Mold to Increase Cooling Efficiency*. Int J of Precis Eng and Manuf-Green Tech 7, 319-328, 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00041-4>
- [32] Ahn D.Q., Park S.H., Kim H.S. *Manufacture of an injection mould with rapid and uniform cooling characteristics for the fan parts using a DMT process*. Int J Precis Eng Manuf 11, 915-924, 2010. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12541-010-0111-3>
- [33] Evens T., Six W., Keyzer J., Desplentere F., Bael A. *Experimental analysis of conformal cooling in SLM produced injection moulds: Effects on process and product quality*. AIP Conference Proceedings 2055, 070017, 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5084861>
- [34] Wang Y., Yu K. M., Wang Ch. C. L., Zhang Y. *Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling*. Computer-Aided Design 43, 1001-1010, 2011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.04.011>
- [35] Upmold. *Injection Mold Cooling Design*. Dostupné z: <https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/>
- [36] Kirchheim A., Katrodiya Y., Zumofen L., Ehrig F., Wick C. *Dynamic conformal cooling improves injection molding*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 114, 107-116, 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06794-0>

- [37] Murphy J. M. *How To Design a Mold with Additive Tooling*. Mold Making Technology, 2020. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/how-to-design-a-mold-with-additive-tooling>
- [38] Berger G. R., Zorn D., Friesenbichler W., Bevc F., Bodor Ch. J. *Efficient cooling of hot spots in injection molding. A biomimetic cooling channel versus a heat-conductive mold material and a heat conductive plastics*. Polymer Engineering and Science 59, 180-188, 2018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pen.25024>
- [39] Schlieper G. *RapidTech + FabCon 3D: Innovations in binder-based AM and advances in conformal cooling*. Metal AM 3, 2017. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/innovations-in-binder-based-3d-printing-and-advances-in-conformal-cooling/>
- [40] *Modeling software tackles tough mold designs*. Plastics Machinery Manufacturing, 2020. Dostupné z: <https://www.plasticsmachinerymanufacturing.com/product-innovations/product/21118663/ntopology-modeling-software-tackles-tough-mold-designs>
- [41] Chung Ch.Y. *Integrated Optimum Layout of Conformal Cooling Channels and Optimal Injection Molding Process Parameters for Optimal Lenses*. Appl. Sci. 9, 4341, 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app9204341>
- [42] Eiamsa-ard K., Wannissorn K. *Conformal bubbler cooling for molds by metal deposition process*. Computer-Aided design 69, 126-133, 2015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.004>
- [43] Vysokai J. *Optimalizace chlazení vložky klobouku přístrojové desky automobilu*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, 67 s. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/149853>
- [44] Frazier W. E. *Metal Additive Manufacturing: A Review*. Journal of Materials Engineering and Performance 23, 1917-1928, 2014. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [45] Sun Ch., Shang G. *On Application of Metal Additive Manufacturing*. World Journal of Engineering and Technology 9, 194-202, 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.4236/wjet.2021.91014>
- [46] *Technologie 3d tisku kovů*. LASCAM SYSTEMS, 2016. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/technologie-3d-tisku-kovu-2/>
- [47] Murphree Z. *Shrouded Impellers with metal AM*. Velo 3D. Dostupné z: <https://blog.velo3d.com/blog/shrouded-impeller-applications>
- [48] *Metal Additive Manufacturing processes*. Metal AM. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-additive-manufacturing-processes/>
- [49] Tan Ch., Wang D., Ma W., Chen Y. Chen S., Yang Y., Zhou K. *Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds*. Materials & Design 196, 109147, 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109147>
- [50] Özel T., Altay A., Kaftanoğlu B., Senin N., Leach R., Donmez A. *Focus Variation Measurement and Prediction of Surface Texture Parameters Using Machine Learning in Laser Powder Bed Fusion*. Journal of Manufacturing Science and Engineering 142, 011008, 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.4045415>
- [51] *Metal Additive Manufacturing: What You Need to Know*. California's Manufacturing Network, 2021. Dostupné z: <https://www.cmtc.com/blog/metal-additive-manufacturing-what-you-need-to-know>

- [52] Kment T. *Vývoj parametrů procesu tisku pro nástrojovou ocel L-40 v Laser Powder Bed Fusion*. České vysoké učení technické v Praze, 2021. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/92873>
- [53] Jones G. *Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained*. All3DP, 2021. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- [54] Saunders M. *Design for metal AM / a beginner's guide*. LinkedIn, 2017. Dostupné z: https://www.linkedin.com/pulse/design-metal-am-beginners-guide-marc-saunders/?trk=portfolio_article-card_title
- [55] Irrinki H., Barmore B., Kate K. H., Atre S. V. *Material selection for the production of injection moulding tooling by Additive Manufacturing*. Metal AM 2, 2, 2016. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/material-selection-for-the-3d-printing-of-injection-moulding-tooling/>
- [56] *Making Metal Powder I*. Metal Powder Industries Federation. Dostupné z: <https://www.mpif.org/IntrotoPM/MakingMetalPowder.aspx>
- [57] Kippax P., Deffley R. *Size and shape optimisation of metal powders for Additive Manufacturing*. Metal AM 1, 2015. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/size-and-shape-optimisation-of-metal-powders-for-3d-printing/>
- [58] Han S., Salvatore F., Rech J., Bajolet J. *Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels*. Precision Engineering 64, 20-33, 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.03.006>
- [59] Marr J. *How to Improve 3D-Printed Conformal-Cooled Mold Insert Performance*. Mold Making Technology, 2020. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/how-to-improve-3d-printed-conformal-cooled-mold-insert-performance->
- [60] *Snižování výrobních nákladů pomocí simulační analýzy*. Portál MM průmyslové spektrum, 2010. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/snizovani-vyrobnich-nakladu-pomoci-simulacni-analyzy>
- [61] Zytel® 73G30T NC010 – materiálový list. CAMPUS. Dostupné z: <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Zytel%C2%AE+73G30T+NC010/DuPont+Engineering+Polymers/52/cb5c5432>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
3d	-	trojrozměrný
2d	-	dvojměrný
316L	-	typ oceli
17-4 PH	-	typ oceli
A	m ²	plocha
AM	-	aditivní technologie (Additive Manufacturing)
b	m	vzdálenost mezi kanálky
CAD	-	počítačem podporované konstruování
CAE	-	počítačem podporované analýzy
C _f	-	faktor povrchového tření
c _p	J/KgK	měrná tepelná kapacita
d; D	m	průměr
DMLS	-	Direct Metal Laser Sintering
De	-	Debořino číslo
F	N	síla
H	m	vzdálenost
H13	-	typ oceli
i _m	J/kg	latentní teplo
ITT	g/10min	index toku taveniny
Kap.	-	kapitola
k _{st}	W/mK	tepelná vodivost oceli
k _p	W/mK	tepelná vodivost polymeru
L	m	délka
L-PBF	-	Laser Powder Bed Fusion
m	Pa*s ⁿ	koeficient konzistence
M2	-	typ oceli
M300	-	typ oceli
n	-	index neneutonského chování
Obr.	-	obrázek
p	MPa	tlak
P20	-	typ oceli
PA	-	polyamid
PBT	-	polybutylentereftalát
PC	-	polykarbonát
PE	-	polyetylén

PP	-	polypropylén
PS	-	polystyrén
PVC	-	polyvinylchlorid
\dot{Q}_c	W/m ²	tepelný tok chladícího média
\dot{Q}_e	W/m ²	tepelný tok okolního prostředí
\dot{Q}_m	W/m ²	tepelný tok taveniny
Ra	μm	drsnost
Re	-	reynoldsovo číslo
s	m	tloušťka; vzdálenost kanálku od dutiny
SLM	-	Selective Laser Melting
SAN	-	styren-akrylonitrilová pryskyřice
Tab.	-	tabulka
t _c	s	čas chlazení
T _C	°C	teplota temperačního média
T _e	°C	teplota rozkladu polymeru
T _E	°C	vyhazovací teplota polymeru
t _f	s	čas plnění
T _f	°C	teplota tečení
T _g	°C	teplota skelného přechodu
T _m	°C	teplota tání krystalického podílu
T _M	°C	teplota taveniny
t _o	s	čas pro otevření formy
T _w	°C	průměrná teplota formy
U	m/s	rychlost
v	cm ³ /g	měrný objem
x	m	vzdálenost mezi temperačními kanálky
y	m	vzdálenost temperačních kanálků od dutiny formy
τ	MPa	smykové napětí
η	Pa*s	dynamická viskozita
λ	s	relaxační čas
θ	s	čas pozorování
α	°	úhel
α	W/m ²	součinitel přestupu tepla
Δp	MPa	pokles tlaku
γ̇	s ⁻¹	rychlost smykové deformace
ρ	kg/m ³	hustota
ν	m ² /s	kinematická viskozita

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Dnešní podoba - vstřikovací stroj Allrounder od firmy Arburg [5]</i>	14
<i>Obr. 2 Plastikační (vstřikovací) jednotka a šnek vstřikovací jednotky [6]</i>	15
<i>Obr. 3 Časový průběh standartního vstřikovacího cyklu [2]</i>	16
<i>Obr. 4 Vliv doby plnění na potřebný vstřikovací tlak [6]</i>	16
<i>Obr. 5 Procesní okno [6]</i>	17
<i>Obr. 6 pvT diagramy amorfních (vlevo) a semikrystalických (vpravo) polymerů</i>	17
<i>Obr. 7 Průběh vstřikovacího cyklu v pvT diagramu [8]</i>	18
<i>Obr. 8 Fontánový tok [9]</i>	19
<i>Obr. 9 Orientace makromolekul polymeru ve směru toku taveniny [10]</i>	19
<i>Obr. 10 Polymery v podobě granulátu pro následné zpracování [11]</i>	20
<i>Obr. 11 a) amorfní polymer, b) semikrystalický polymer [12]</i>	21
<i>Obr. 12 Vliv chlazení na tvorbu krystalické složky</i>	21
<i>Obr. 13 Vyjádření viskozity mezi deskami [13]</i>	23
<i>Obr. 14 Toková křivka newtonské kapaliny [6]</i>	25
<i>Obr. 15 Tokové křivky nenewtonských kapalin</i>	25
<i>Obr. 16 Zdánlivá viskozita v závislosti na rychlosti smykové deformace</i>	26
<i>Obr. 17 Chování materiálů po odstranění aplikované síly [2]</i>	27
<i>Obr. 18 Schéma znázorňující oblasti newtonského, elastického, plastického, lineárně a nelineárně viskoelastického a newtonského chování látek v závislosti na velikosti deformací a Debořině čísla [14]</i>	27
<i>Obr. 19 Pevná (vlevo) a pohyblivá (vpravo) část vstřikovací formy rozdělena v dělicí rovině [17]</i>	29
<i>Obr. 20 Vtokový systém</i>	30
<i>Obr. 21 Vhodné průřezy vtokových kanálků – 1, 6 výrobně nevýhodné; 2, 3, 4, 5 výrobně výhodné [3]</i>	30
<i>Obr. 22 Vybrané typy vtokových ústí [3]</i>	31
<i>Obr. 23 Přidržovače vtoku [3]</i>	31
<i>Obr. 24 Vyhříváný vtokový systém ve formě, na obrázku vyznačen červeně [18]</i>	32
<i>Obr. 25 Vyhazovací systémy: a) jednonásobné formy, b) třídeskové formy, c) formy s vyhříváním vtokovým systémem [6]</i>	33
<i>Obr. 26 Schéma tepelných toků ve vstřikovací formě (vlevo) a konfigurace temperačního systému (vpravo) [21]</i>	37
<i>Obr. 27 Vliv konfigurace temperačních kanálků na teplotu stěny formy při daných zpracovatelských podmínkách [21]</i>	39
<i>Obr. 28 a) vliv rozmístění kanálků na průběh teploty povrchu dutiny, b) způsoby chlazení výstřiků o různé tloušťce stěny [19]</i>	41

<i>Obr. 29 Schéma k Tab. 2 [19]</i>	41
<i>Obr. 30 Temperační systém [6]</i>	42
<i>Obr. 31 Umístění prvků temperačního systému [23]</i>	42
<i>Obr. 32 Sériové a) a paralelní b) rozložení temperačního systému</i>	43
<i>Obr. 33 Rozdělení temperačního systému na podsystémy [24]</i>	43
<i>Obr. 34 Umístění izolačních desek [25]</i>	45
<i>Obr. 35 Plochá přepážka [27]</i>	45
<i>Obr. 36 Spirálová přepážka [27]</i>	46
<i>Obr. 37 Fontánová přepážka [27]</i>	46
<i>Obr. 38 Spirálový trn [27]</i>	47
<i>Obr. 39 Jádro z vysoce tepelně vodivé slitiny mědi [28]</i>	48
<i>Obr. 40 Tvarové vložky z vysoce tepelně vodivé slitiny mědi [30]</i>	48
<i>Obr. 41 Konvenční (vlevo) vs. konformní (vpravo) temperační systém [35]</i>	49
<i>Obr. 42 Konvenční (vlevo) vs. konformní (vpravo) temperace čelisti [24]</i>	49
<i>Obr. 43 Rozložení konformní temperace typu spirála (vlevo) [36] a cik-cak (vpravo) [22]</i>	50
<i>Obr. 44 Variabilní průřez konformních kanálků [37]</i>	51
<i>Obr. 45 Proces tvorby temperačního systému dle Voroného diagramu [34]</i>	51
<i>Obr. 46 Vaskulární systém s průměry kanálků 3, 2,12 a 1,5 mm. [39]</i>	52
<i>Obr. 47 Porézní temperační systém [40]</i>	53
<i>Obr. 48 Konformní temperační systém tvořený sérií přepážek [26]</i>	53
<i>Obr. 49 Konformní fontánová přepážka [42]</i>	54
<i>Obr. 50 Schéma temperačního systému Contura [16]</i>	54
<i>Obr. 51 Frézovaný konformní systém [21]</i>	55
<i>Obr. 52 Výrobek aditivní technologie s komplikovanou geometrií [47]</i>	56
<i>Obr. 53 Schéma technologie Laser Powder Bed Fusion [50]</i>	57
<i>Obr. 54 Rozměrové nepřesnosti u horizontálních kanálků vyrobených aditivní technologií [22]</i>	58
<i>Obr. 55 Vyztužené temperační kanálky [49]</i>	59
<i>Obr. 56 Vznik praskliny způsobené zbytkovým napětím [54]</i>	59
<i>Obr. 57 Strategie tisku [54]</i>	60
<i>Obr. 58 Schéma výroby kovových prášků metodou atomizace [56]</i>	60
<i>Obr. 59 Uvznutý, částečně roztavený prášek (vlevo) a detail povrchu kanálku (vpravo) [58]</i>	61
<i>Obr. 60 Koncepty optimalizace bez a se simulací [6]</i>	62

<i>Obr. 61</i> Růst nákladů na uvedení výrobku na trh a vliv jednotlivých etap na růst nákladů [60]	63
<i>Obr. 62</i> Zvolený výrobek pro vstřikování – kryt motoru strunové sekačky AL-KO.....	66
<i>Obr. 63</i> CAD model krytu motoru	66
<i>Obr. 64</i> Řez výrobkem poukazující na rozdílné tloušťky stěny 2 mm (modře) a 3 mm (červeně)	67
<i>Obr. 65</i> Značka materiálu vyznačená na vnitřní straně výrobku	67
<i>Obr. 66</i> Zvětšení výrobku o smrštění	68
<i>Obr. 67</i> Objem výrobku po zvětšení	68
<i>Obr. 68</i> Render kompletní vstřikovací formy rozdělené v dělicí rovině, vlevo pohyblivá část, vpravo nepohyblivá	69
<i>Obr. 69</i> Tvarové vložky vzhledem k výrobku	70
<i>Obr. 70</i> Plochy jednotlivých tvarových vložek vyznačených barevně na výrobku.....	70
<i>Obr. 71</i> Rozložení výrobků ve formě z pohledu do pohyblivé strany formy	71
<i>Obr. 72</i> Dělicí rovina (modře) formy vůči výrobku s tvárníkem	72
<i>Obr. 73</i> Samostatné desky vstřikovací formy	73
<i>Obr. 74</i> Řez formou v rovině spojovacích, vodících a středících prvků jednotlivých stran formy	74
<i>Obr. 75</i> Rám formy s vyznačenými spojovacími, vodícími a středícími prvky	75
<i>Obr. 76</i> Prvky pro uložení a vedení posuvných čelistí.....	76
<i>Obr. 77</i> Výsledek analýz Gating suitability (vlevo) a Flow resistance indicator (vpravo) .	77
<i>Obr. 78</i> Zvolený bod vtokového ústí	78
<i>Obr. 79</i> Model studené části vtokového systému	78
<i>Obr. 80</i> Řez formou v místě vtoku.....	79
<i>Obr. 81</i> Snímky konfigurátoru firmy Meusburger pro návrh vyhřívaného vtokového systému	80
<i>Obr. 82</i> Umístění vtokového systému včetně zásuvky ve formě	81
<i>Obr. 83</i> Drážka pro vedení kabeláže vyhřívaného temperačního systému.....	81
<i>Obr. 84</i> Temperační okruhy formy	82
<i>Obr. 85</i> Temperační systém a jeho prvky	83
<i>Obr. 86</i> Kompletní vyhazovací systém	84
<i>Obr. 87</i> Vyhazovače výrobku válcové (vlevo) a ploché (vpravo)	85
<i>Obr. 88</i> Vyhazovací prostor.....	85
<i>Obr. 89</i> Funkce aretace čelistí.....	86
<i>Obr. 90</i> Princip oddělení vtokového zbytku při vyhazování	86
<i>Obr. 91</i> Průběh odformování a vyhození výrobku ve třech krocích	87
<i>Obr. 92</i> Transportní a manipulační prvky formy spolu s objemem vstřikovací formy	88

<i>Obr. 93 Řez sestavou znázorňující základní parametry temperačních systémů</i>	89
<i>Obr. 94 Temperační systém cik-cak</i>	90
<i>Obr. 95 Temperační okruh tvárníku typu cik-cak</i>	90
<i>Obr. 96 Temperační systém spirálový, pohled A</i>	91
<i>Obr. 97 Temperační okruh tvárníku typu spirála</i>	91
<i>Obr. 98 Optimalizované temperační okruhy čelistí A a C, spirálové rozvržení bez potřeby úprav</i>	92
<i>Obr. 99 Optimalizace spirálového temperačního okruhu čelisti B v místě hot spotu</i>	93
<i>Obr. 100 Optimalizovaný temperační okruh tvárnice</i>	93
<i>Obr. 101 Teplotní pole tvárníku se spirálovým okruhem (vlevo), podle kterých byly části temperačních kanálek vytvořeny blíže k dutině formy s cílem vyrovnání teplot (vpravo)</i> ...	94
<i>Obr. 102 První návrh optimalizovaného okruhu tvárníku</i>	94
<i>Obr. 103 Finální úpravy optimalizovaného okruhu tvárníku</i>	95
<i>Obr. 104 Konvenční temperační systém</i>	95
<i>Obr. 105 Konvenční temperace tvárníku pomocí přepážek</i>	96
<i>Obr. 106 Vytvořené 3d sítě: a) výrobku a vtokového systému, b) tvarových vložek, c) temperačního systému, d) bloku formy</i>	97
<i>Obr. 107 Teplotní pole kanálek konformních systémů</i>	98
<i>Obr. 108 Teplotní pole tvarových vložek konformních systémů [°C]</i>	99
<i>Obr. 109 Tlak v kanálcích konformních systémů</i>	99
<i>Obr. 110 Tlak kanálek tvarových vložek konformních systémů [MPa]</i>	100
<i>Obr. 111 Teplotní pole tvárníku jednotlivých konformních systémů</i>	101
<i>Obr. 112 Porovnání teplotních polí kanálek konformního a konvenčního systému [°C]</i> ..	102
<i>Obr. 113 Teplotní pole kanálek konvenčního systému</i>	102
<i>Obr. 114 Porovnání tlaků v kanálcích tvarových vložek konformního a konvenčního systému [MPa]</i>	103
<i>Obr. 115 Porovnání teplot tvárníku konvenčního a konformního systému</i>	104
<i>Obr. 116 Porovnání teplot tvarových vložek konvenčního a konformního systému, vložky jsou na obrázku ve stejném měřítku</i>	105
<i>Obr. 117 Hodnoty času dosažení vyhazovací teploty u konformního a konvenčního systému</i>	106
<i>Obr. 118 Analýza času plnění v časech 0,6855; 1,371; 2,057 a 2,742 s</i>	107
<i>Obr. 119 Analýza tlaku při přepnutí na dotlak</i>	108
<i>Obr. 120 Stav zaplnění dutiny při přepnutí na dotlak</i>	108
<i>Obr. 121 Analýza teploty na čele taveniny</i>	109
<i>Obr. 122 Analýza průběhu tlaku v místě vtokového ústí</i>	109
<i>Obr. 123 Analýza rychlosti smykové deformace</i>	111

<i>Obr. 124 Vzduchové kapsy & studené spoje 1</i>	112
<i>Obr. 125 Vzduchové kapsy & studené spoje 2</i>	112
<i>Obr. 126 Vzduchové kapsy & studené spoje 3</i>	112
<i>Obr. 127 Shrnutí dosažených výsledků s konformní a konvenční temperací.....</i>	114

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Zpracovatelské teploty pro vstřikování vybraných materiálů [12]</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2 Minimální vzdálenosti temperačních kanálek v milimetrech [19]</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 3 Hodnoty nastavení</i>	<i>97</i>
<i>Tab. 4 Porovnání parametrů stroje s požadavky formy.....</i>	<i>113</i>

SEZNAM PŘÍLOH

P I: Materiálový list

P II: Datový list vybraného vstřikovacího stroje

P III: Výkresová dokumentace:

- Pohledy do stran formy spolu s řezy formou spolu s kusovníkem a iso pohledy

P IV: CD obsahující:

- 3d model vstřikovací formy
- 3d model výrobku
- Moldflow analýzy chladících systémů

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PA6

CAMPUS® Datasheet

Zytel® 73G30T NC010 - PA6-I-GF30
DuPont Engineering Polymers



Product Texts

Common features of Zytel® nylon resin include mechanical and physical properties such as high mechanical strength, excellent balance of stiffness and toughness, good high temperature performance, good electrical and flammability properties, good abrasion and chemical resistance. In addition, Zytel® nylon resins are available in different modified and reinforced grades to create a wide range of products with tailored properties for specific processes and end-uses. Zytel® nylon resin, including most flame retardant grades, offer the ability to be coloured.

The good melt stability of Zytel® nylon resin normally enables the recycling of properly handled production waste. If recycling is not possible, DuPont recommends, as the preferred option, incineration with energy recovery (-31 kJ/g of base polymer) in appropriately equipped installations. For disposal, local regulations have to be observed.

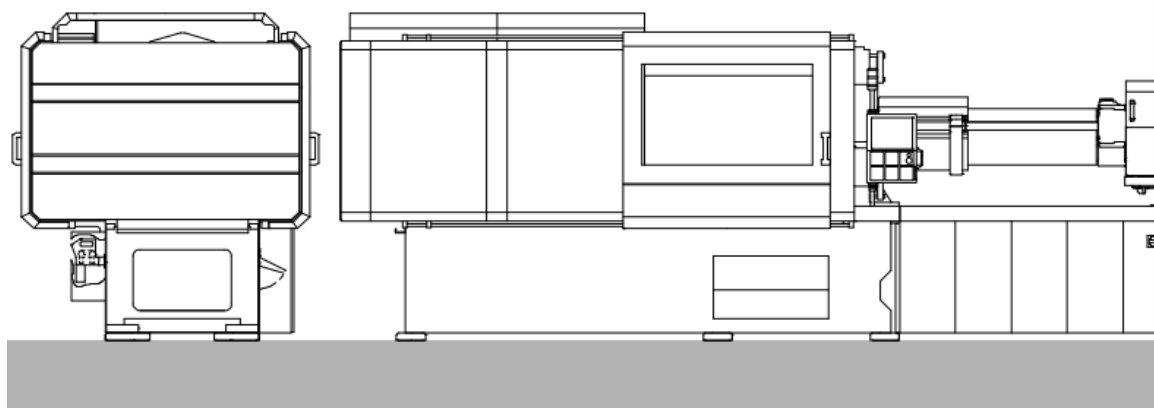
Zytel® nylon resin typically is used in demanding applications in the automotive, furniture, domestic appliances, sporting goods and construction industry.

Zytel® 73G30T NC010 is a 30% glass fiber reinforced, toughened polyamide 6 resin for injection molding.

Rheological properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Molding shrinkage, parallel	0.2 / *	%	ISO 294-4, 2577
Molding shrinkage, normal	1.0 / *	%	ISO 294-4, 2577
Mechanical properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Tensile modulus	9000 / 5700	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	160 / 105	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	3.5 / 7	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength, +23°C	100 / 100	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength, -30°C	100 / 90	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, +23°C	20 / 25	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength, -30°C	13 / 12	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Thermal properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Melting temperature, 10°C/min	221 / *	°C	ISO 11357-1/-3
Glass transition temperature, 10°C/min	60 / *	°C	ISO 11357-1/-2
Temp. of deflection under load, 1.80 MPa	210 / *	°C	ISO 75-1/-2
Temp. of deflection under load, 0.45 MPa	221 / *	°C	ISO 75-1/-2
Vicat softening temperature, 50°C/h 50N	215 / *	°C	ISO 306
Coeff. of linear therm. expansion, parallel	28 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion, normal	120 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Burning Behav. at 1.5 mm nom. thickn.	HB / *	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested (1.5)	1.5 / *	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card available	Yes / *	-	-
Burning rate, thickness 1 mm	22	mm/min	ISO 3795 (FMVSS 302)
FMVSS	B	-	ISO 3795 (FMVSS 302)
Electrical properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Comparative tracking index	550 / -	-	IEC 60112
Other properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Water absorption	6.2 / *	%	Sim. to ISO 62
Humidity absorption	2 / *	%	Sim. to ISO 62
Density	1340 / -	kg/m ³	ISO 1183
Material specific properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Viscosity number	150 / *	cm ³ /g	ISO 307, 1157, 1628

PŘÍLOHA P II: DATOVÝ LIST VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Facts and figures



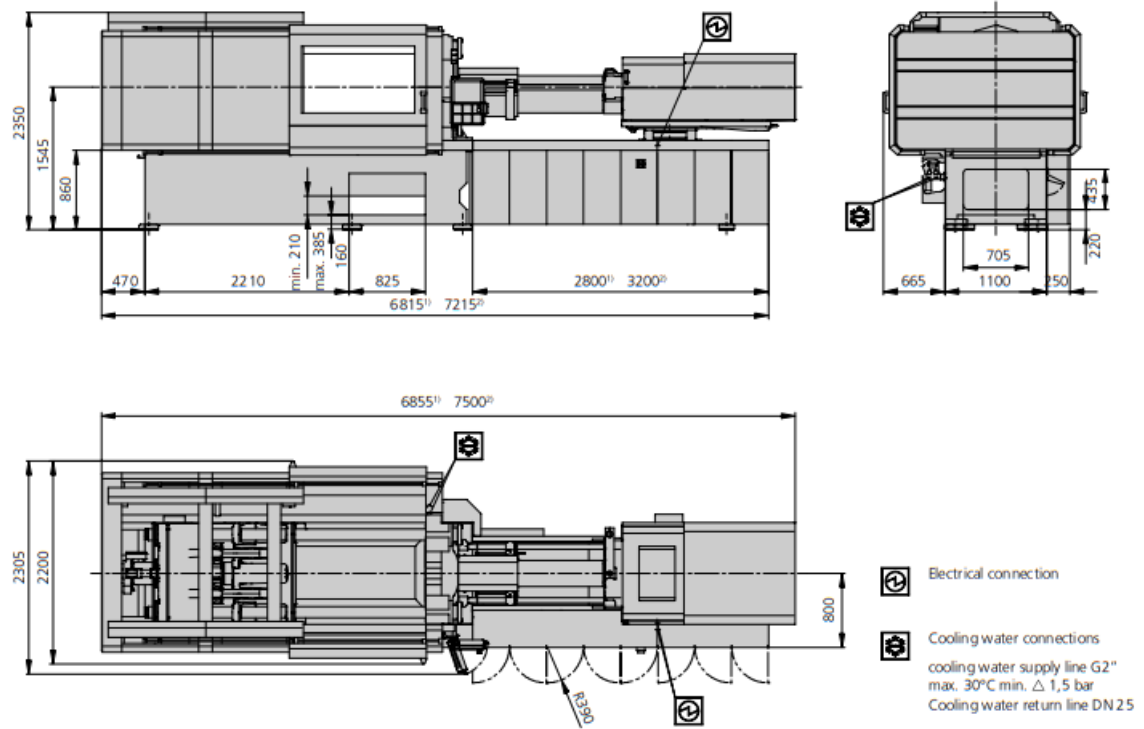
ALLROUNDER 720 A

Tie bar distance: 720 x 720 mm

Clamping force: 3200 kN

Injection unit: (according to EUROMAP): 800, 1300

ARBURG



1) Dimension applies to injection unit 800
2) Dimension applies to injection unit 1300

Machine model		720 A	720 A
EUROMAP size indication ¹⁾		3200-800	3200-1300
Clamping unit			
Clamping force	max. kN	3200	3200
Mould protection force	kN	1-80	1-80
Opening stroke	max. mm	600	600
Mould height	min.- max. mm	300-800	300-800
Daylight	max. mm	900-1400	900-1400
Distance between tie bars	mm	720 x 720	720 x 720
Platen size (hor. x vert.)	mm	1040 x 1040	1040 x 1040
Weight of mov. mould half	max. kg	2900	2900
Ejector force	max. kN	86	86
Ejector stroke	max. mm	250	250
Drives, other			
Dry cycle time for opening stroke ²⁾	s-mm	1,5-504	1,5-504
Total connected load ²⁺³⁾	kW	58	76
Colour: plastic coated, structure light gray / mint green / canary yellow			
Control cabinet			
Safety standard according to		DIN EN 60204	DIN EN 60204
Socket combination (1 single phase, 1 three-phase)		1 x 16 A	1 x 16 A
Injection unit		800	1300
Screw diameter	mm	45 / 50 / 55	55 / 60 / 70
Effective screw length	LD	22 / 20 / 18	22 / 20 / 17
Screw stroke	max. mm	200	240
Calculated injection volume	max. cm ³	318 / 392 / 474	570 / 678 / 923
Shot weight	max. g PS	291 / 359 / 434	521 / 620 / 844
Material throughput ⁴⁾	max. kg/h PS	46 / 53 / 59	86 / 96 / 115
	max. kg/h PA 6.6	23 / 27 / 30	43 / 48 / 58
Injection pressure	max. bar	2470 / 2000 / 1650	2380 / 2000 / 1470
Holding pressure	max. bar	2000 / 1600 / 1260	1900 / 1600 / 1170
Injection flow	max. cm ³ /s	318 / 392 / 475	476 / 566 / 772
Back pressure positive / negative	max. bar	350 / 200	350 / 200
Circumferential screw speed	max. m/min	54 / 60 / 66	55 / 60 / 70
Screw torque	max. Nm	900 / 1000 / 1100	1510 / 1640 / 1920
Nozzle contact force	max. kN	70	90
Nozzle retraction stroke	max. mm	400	500
Installed cylinder heating power / heating zones	kW	19,3 / 7	21,9 / 7
Installed nozzle heating power	kW	0,6	1
Machine dimensions and weights of the basic machine			
Net weight	aprox. kg	14800	16000
Electrical connection (pre-fused) ²⁺⁴⁺⁵⁾	Motor + Heating A	160	---
	Motor A	125	200
	Heating A	35	35

1) 1st figure: clamping force (kN).

2nd figure: max. dosage volume (cm³) x max. injection pressure (kbar).

2) Values refer to 400 V/50 Hz. The load is symmetrically distributed on three phases. The specified value applies to the basic machine.

One or two separate supply lines can be connected as an option (motor + controller/heating). Through options the connection value can be higher.

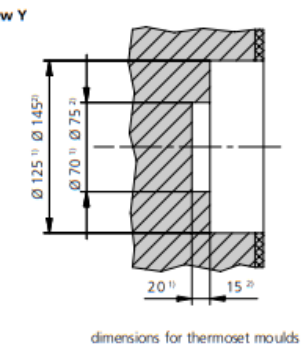
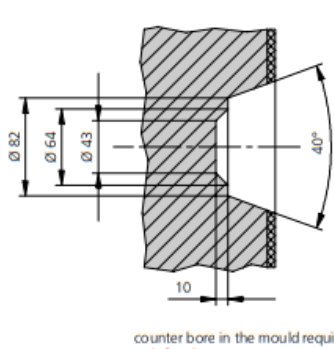
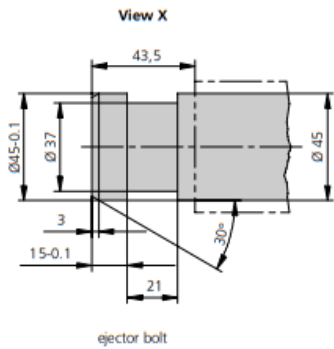
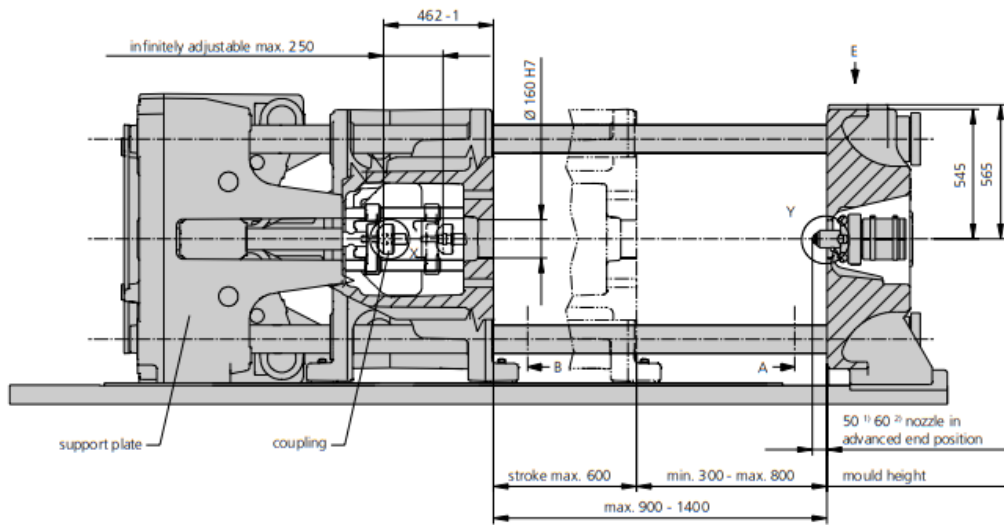
3) According to EUROMAP for basic machine.

4) Depending on number of axis drives.

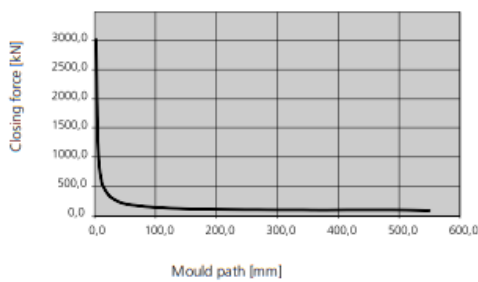
5) Deviations are possible depending upon process settings and material type.

6) Certain combinations of additional machine equipment can make two separate supply lines absolutely necessary.

These technical data specifications refer to the state at the time of printing. We reserve the right to modify specifications in the interest of a continuous program of further development.

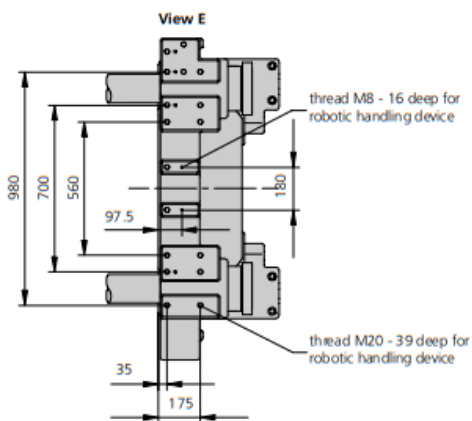


Closing force for spring moulds or for injection coining*

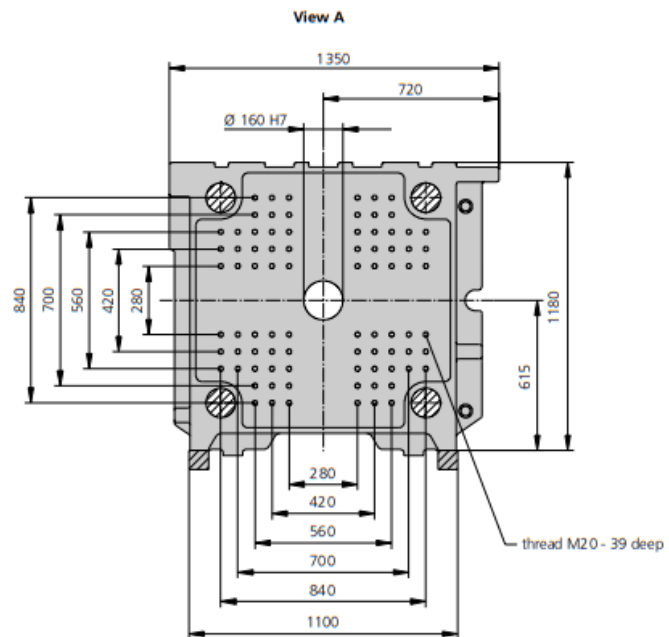


* automatic clamping force adjustment up to 25 kN

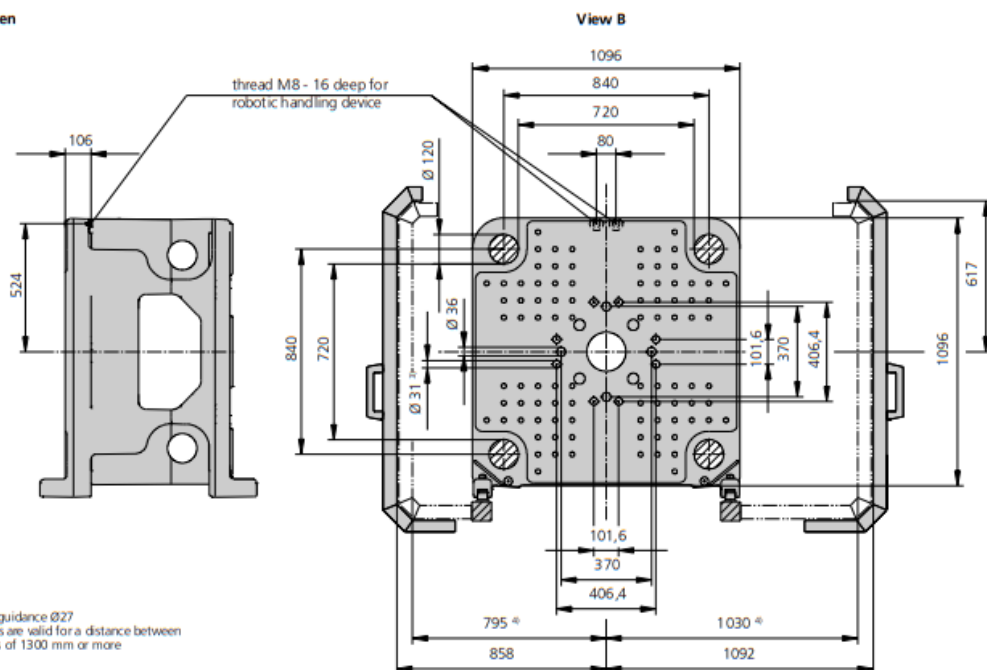
- 1) Dimension applies to injection unit 800
- 2) Dimension applies to injection unit 1300



Fixed platen



Movable platen



3) Prepared for guidance $\varnothing 27$
 4) 1) Dimensions are valid for a distance between mounting platens of 1300 mm or more

Maximum theoretical shot weights for the most important injection moulding materials (in grams)							
Injection units according to EUROMAP		800			1300		
Screw diameter	mm	45	50	55	55	60	70
Polystyrene	PS	291	359	434	521	620	844
Styrene heteropolymerizates	SB	284	350	424	509	606	824
	SAN, ABS ¹⁾	278	344	416	499	594	808
Cellulose acetate	CA ¹⁾	327	404	488	586	698	949
Celluloseacetobutyrate	CAB ¹⁾	304	375	454	545	649	883
Polymethyl methacrylate	PMMA	300	371	449	538	641	872
Polyphenylene ether, mod.	PPE	270	333	403	484	575	783
Polycarbonate	PC	305	377	456	547	651	887
Polysulphone	PSU	316	390	471	566	673	916
Polyamides	PA 6.6, PA 6 ¹⁾	289	357	431	517	616	838
	PA 6.10, PA 11 ¹⁾	270	333	403	473	575	783
Polyoximethylene (Polyacetal)	POM	359	443	536	643	765	1042
Polyethylene terephthalate	PET	346	427	517	620	738	1005
Polyethylene	PE-LD	219	271	328	393	468	637
	PE-HD	227	280	339	406	483	658
Polypropylene	PP	232	286	346	415	494	672
Fluoropolymerides	FEP, PFA, PCTFE ¹⁾	465	574	695	834	992	1350
	ETFE	408	504	609	731	870	1185
Polyvinyl chloride	PVC-U	351	434	525	629	749	1020
	PVC-P ¹⁾	324	401	485	582	692	942

1) average value

ARBURG GmbH + Co KG

Postfach 11 09 · 72286 Losburg · Tel.: +49(0)7446 33-0 · Fax: +49(0)7446 33-3365 · www.arburg.com · e-mail: contact@arburg.com

With locations in Europe: Germany, Belgium, Denmark, France, United Kingdom, Italy, Netherlands, Austria, Poland, Switzerland, Slovakia, Spain, Czech Republic, Turkey, Hungary | **Asia:** People's Republic of China, Indonesia, Malaysia, Singapore, Thailand, United Arab Emirates | **America:** Brazil, Mexico, USA
For more information, please go to www.arburg.com.

© 2013 ARBURG GmbH + Co KG
The brochure is protected by copyright. Any utilisation, which is not expressly permitted under copyright legislation, requires the previous approval of ARBURG.

All data and technical information have been compiled with great care. However, we are unable to guarantee its correctness. Individual illustrations and information may deviate from the actual delivery condition of the machine. The relevant valid operating instructions are applicable for the installation and operation of the machine.



ARBURG GmbH + Co KG

DIN EN ISO 9001 + 14001 + 50001 certified

