

Konstrukční návrh vstřikovací formy pro tlustostěnný optický díl

Bc. Jiří Šidla

Diplomová
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jiří Šidla
Osobní číslo:	T21550
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Konstrukční návrh vstřikovací formy pro tlustostěnný optický díl

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Vytvořte model tlustostěnného vstřikovaného dílu.
3. Provedte analýzu procesu vstřikování.
4. Zhotovte konstrukční návrh vstřikovací formy pro daný díl.
5. Nakreslete sestavu formy včetně patřičných pohledů a kusovníku.

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141.

OSSWALD, Tim A., Lih-Sheng TURNG a Paul J. GRAMANN. Injection molding handbook. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Publishers, c2008, xvii, 764 s. ISBN 9781569904206.

LERMA VALERO, José R. Plastics injection molding: scientific molding, recommendations, and best practices. Munich: Hanser publications, [2020], xxiii, 400 s. ISBN 978-1-56990-689-7.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Vaněk
 Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: 2. ledna 2023
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2023

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

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout konstrukční řešení vstřikovací formy pro tlustostěnný optický díl, kterým je čočka používaná v projekční technice. V první, teoretické části, se práce věnuje popisu polymerních materiálů a jejich využití v optickém průmyslu. Teoretická část se dále věnuje samotné technologii vstřikování, jsou zde uvedeny pravidla při návrhu a konstrukci vstřikovacích forem a popis simulací vstřikovacího procesu. V praktické části práce je popsán navržený tlustostěnný optický vstřikovaný díl včetně simulací procesu vstřikování a konstrukčního návrhu vstřikovací formy pro jeho výrobu. Práce obsahuje 3D model vstřikovaného tlustostěnného optického dílu, 3D model vstřikovací formy a výkresovou dokumentaci sestavy formy.

Klíčová slova: vstřikování polymerů, tlustostěnné optické prvky, vstřikovací forma

ABSTRACT

The aim of this master thesis is to propose a design solution for an injection mould used for production of a thick walled optical part, which is a lens used in projection technology. In the first, theoretical part, thesis deals with the description of polymer materials and their use in the optical industry. Theoretical part is also devoted to the injection moulding technology itself along with the rules in the design and construction of injection moulds and simulations of the injection moulding process. Second, practical part, describes the designed thick walled optical part and the design of the injection mould used for its production, including simulations of the injection moulding process. The thesis includes a 3D model of the injection moulded part as well as a 3D model of the injection mould along with the drawings of the mould assembly.

Keywords: injection moulding of polymers, thick walled optical parts, injection mould

Poděkování patří vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Vaňkovi za jeho cenné rady, odborné vedení, trpělivost, nesmírnou ochotu a čas, který mi během zpracování diplomové práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. a panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za jejich cenné rady a kvalitu výuky, která byla pro vypracování diplomové práce nezbytná.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 MATERIÁLY VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ.....	13
1.1 ROZDĚLENÍ A VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ.....	14
1.1.1 Plasty.....	14
1.1.2 Termoplasty.....	15
1.1.3 Reaktoplasty	16
1.1.4 Elastomery	17
1.2 PŘÍSADY POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ.....	18
1.2.1 Plniva	18
1.2.2 Změkčovadla	18
1.2.3 Maziva	19
1.2.4 Stabilizátory	19
1.2.5 Barviva a pigmenty.....	19
1.2.6 Opticky zjasňující látky	19
1.3 POLYMERNÍ MATERIÁLY VHODNÉ PRO TLUSTOSTĚNNÉ OPTICKÉ PRVKY	20
1.3.1 Polykarbonát (PC)	20
1.3.2 Polystyren (PS).....	21
1.3.3 Polymethylmetakrylát (PMMA).....	21
1.3.4 Cyklický olefinový polymer (COP) a cyklický olefinový kopolymer (COC).....	21
1.4 REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN.....	22
1.4.1 Viskozita	22
1.4.2 Viskozitní modely	22
1.4.3 Index toku taveniny	23
1.4.4 Fontánový tok.....	24
1.4.5 Disipační ohřev.....	24
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	25
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	26
2.1.1 Fáze uzavření vstřikovací formy a plastikace	27
2.1.2 Fáze vstříknutí taveniny a dotlaku.....	27
2.1.3 Fáze chlazení	28
2.1.4 Fáze vyhození výrobku	29
2.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	30
2.2.1 Vstřikovací jednotka.....	31
2.2.2 Uzavírací jednotka.....	33
2.3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ S DOLISOVÁNÍM (ICM).....	34
2.4 TECHNOLOGIE VÍCEVRSTVÉHO VSTŘIKOVÁNÍ (MIM).....	36
2.5 SMRŠTĚNÍ A VADY TLUSTOSTĚNNÝCH VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ	38
2.5.1 Smrštění výrobku.....	38

2.5.2	Studené spoje.....	39
2.5.3	Tokové čáry.....	39
2.5.4	Nedostříknutý výrobek	40
2.5.5	Vnitřní pnutí ve výstřiku.....	40
2.5.6	Propadliny a vtaženiny.....	40
2.5.7	Deformace výrobku	40
2.5.8	Rozdíl v lesku a desénu	41
2.5.9	Opalescence a anizotropie optických vlastností.....	41
2.5.10	Stříbrné pruhy na výrobku	41
2.5.11	Rýhovaný a pórovitý povrch výrobku	41
2.5.12	Trhliny a mikrotrhliny na povrchu výrobku	41
2.5.13	Hnědnutí a žloutnutí povrchu výrobku	42
2.5.14	Spálená místa na výrobku	42
2.5.15	Černé tečky ve výrobku	42
2.5.16	Volný tok taveniny (jetting).....	42
3	VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	43
3.1	TVAROVÉ ČÁSTI	44
3.2	VODICÍ, STŘEDICÍ A MANIPULAČNÍ PRVKY	44
3.3	VTOKOVÝ SYSTÉM	46
3.3.1	Studený vtokový systém	46
3.3.2	Horký vtokový systém.....	49
3.4	TEMPERAČNÍ SYSTÉM	51
3.4.1	Konvenční temperace	51
3.4.2	Konformní temperace	52
3.5	VYHAZOVACÍ SYSTÉM	54
3.6	MATERIÁLY VSTŘIKOVACÍCH FOREM	56
3.6.1	Nelegované oceli pro formy.....	56
3.6.2	Kalené středně zušlechtěné oceli pro formy	56
3.6.3	Kalené vysocelegované oceli pro formy.....	57
3.6.4	Antikorozní oceli pro formy.....	57
3.6.5	Hliník, měď a jejich slitiny pro formy.....	57
3.7	ETÁŽOVÁ FORMA	58
4	SIMULACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ.....	60
4.1	AUTODESK MOLDFLOW INSIGHT 2023	60
4.1.1	Typy sítí pro 3D modely	60
4.1.2	Typy analýz.....	61
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	63
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	64
6	MODEL TLUSTOSTĚNNÉHO OPTICKÉHO DÍLU	65
7	ANALÝZY PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ.....	66
7.1	VOLBA UMÍSTĚNÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ	67
7.2	VOLBA MATERIÁLU VSTŘIKOVANÉHO DÍLU	67

7.2.1	Celková deformace (Deflection, All Effects).....	70
7.2.2	Čas pro dosažení vyhazovací teploty (Time To Reach Ejection Temperature).....	70
7.2.3	Vzor polariz. světla (Fringe Pattern For Light Coming From -z Direction).....	71
7.2.4	Fázový posuv polariz. světla (Phase Shift for Light Coming From -z Direction).....	72
7.2.5	Vyhodnocení výsledků volby materiálu vstřikovaného dílu.....	73
7.3	VOLBA VTOKOVÉHO SYSTÉMU.....	74
7.3.1	Čas plnění (Fill Time).....	80
7.3.2	Studené spoje (Weld Lines).....	81
7.3.3	Velikost a umístění propadlin (Sink Marks Estimate).....	82
7.3.4	Smykové napětí na stěně (Shear Stress At Wall).....	86
7.3.5	Rychlost smykové deformace (Shear Rate, Maximum).....	86
7.3.6	Zatuhlá vrstva materiálu (Frozen Layer Fraction).....	87
7.3.7	Vyhodnocení výsledků volby vtokového systému.....	88
7.4	VOLBA TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU.....	89
7.4.1	Tlak v temperačním okruhu (Circuit Pressure).....	91
7.4.2	Teplota temperačního média (Circuit Coolant Temperature).....	92
7.4.3	Teplota v dutině formy (Temperature, Mold).....	93
7.4.4	Čas pro dosažení vyhaz. teploty (Time To Reach Ejection Temperature, Part).....	94
7.4.5	Vyhodnocení výsledků volby temperačního systému.....	94
7.4.6	Návrh konformní temperace.....	95
7.5	VÝBĚR MATERIÁLU TVAROVÝCH ČÁSTÍ.....	96
7.5.1	Čas pro dosažení vyhaz. teploty (Time To Reach Ejection Temperature, Part).....	97
7.5.2	Celková deformace (Deflection, All Effects).....	97
7.5.3	Vyhodnocení výsledků volby materiálu tvarových částí.....	97
8	KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	98
8.1	NÁSOBNOST FORMY A ROZVRŽENÍ DÍLŮ VE FORMĚ.....	98
8.2	VOLBA DĚLICÍCH ROVIN.....	99
8.3	TVAROVÉ ČÁSTI FORMY.....	99
8.4	BOČNÍ POSUVNÉ ČELISTI.....	102
8.5	VTOKOVÝ SYSTÉM FORMY.....	104
8.6	TEMPERAČNÍ SYSTÉM FORMY.....	106
8.7	VYHAZOVCÍ SYSTÉM FORMY.....	108
8.8	ODVZDUŠNĚNÍ FORMY.....	110
8.9	OTEVÍRÁNÍ FORMY.....	111
8.10	VODICÍ, STŘEDICÍ A MANIPULAČNÍ PRVKY FORMY.....	113
8.11	SESTAVA VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	115
9	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI NÁVRHU VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	118

9.1	CELKOVÁ ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO CYKLU	118
9.1.1	Čas plnění (Fill Time).....	120
9.1.2	Smykové napětí na stěně (Shear Stress At Wall).....	120
9.1.3	Uzavírací síla (Clamp Force: XY Plot).....	121
9.1.4	Maximální rychlost smykové deformace (Shear Rate, Maximum).....	121
9.1.5	Teplota čela taveniny (Temperature At Flow Front).....	122
9.1.6	Studené spoje (Weld Lines)	122
9.1.7	Tlak (Pressure)	123
9.1.8	Zatuhlá vrstva materiálu (Frozen Layer Fraction).....	123
9.1.9	Teplota temperačního média (Circuit Coolant Temperature).....	124
9.1.10	Tlak v temperačním okruhu (Circuit Pressure).....	124
9.1.11	Teplota v dutině formy (Temperature, Mold).....	125
9.1.12	Celková deformace (Deflection, All Effects).....	125
9.1.13	Vzor polariz. světla (Fringe Pattern For Light Coming From $\pm z$ Direction)	126
9.1.14	Fázový posuv polariz. světla (Phase Shift for Light Coming From $\pm z$ Direction)	126
9.2	MECHANICKÁ ANALÝZA TVAROVÝCH ČÁSTÍ FORMY.....	127
10	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE.....	132
	ZÁVĚR	133
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	135
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	141
	SEZNAM OBRÁZKŮ	142
	SEZNAM TABULEK	146
	SEZNAM PŘÍLOH.....	147

ÚVOD

Vstřikování plastů v současnosti patří mezi nejrozšířenější způsoby jejich zpracování. Uplatňuje se převážně ve velkosériové výrobě, kdy spolu s příznivými náklady na výrobu umožňuje tvorbu dílů s požadovanými mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Princip metody spočívá v roztavení polymerního materiálu a jeho následném vstříknutí do tvarové dutiny formy. Tavenina v dutině tuhne a kopíruje její tvar. Vzniká díl, který je po dosažení určité teploty z formy vyjmut. S plastovými výrobky se lze setkat téměř ve všech odvětvích, jak v průmyslu, tak u předmětů pro běžné užívání. Výjimkou není ani optický průmysl, kde plasty stále více nahrazují původní optické materiály (sklo). Díky snadnému a rychlému zpracování, spolu se širokým výběrem materiálů s vlastnostmi přizpůsobenými na míru dané aplikaci, nachází plasty v optickém průmyslu čím dál tím větší možnosti využití.

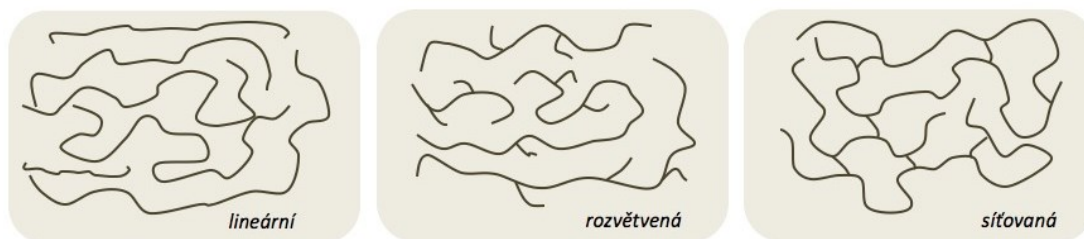
Vzhledem k tlustostěnnému charakteru optických částí je však chování materiálu během vstřikovacího cyklu odlišné od běžného vstřikování tenkostěnných dílů. Během vstřikování tlustostěnných dílů dochází ke složitým fyzikálním procesům a procesní podmínky pro vstřikování jsou u nich značně odlišné než při vstřikování tenkostěnných součástí. U tlustostěnných optických prvků je kladen velký důraz na přesnost rozměrů spolu se zajištěním optimálních optických vlastností. Na formy pro jejich výrobu jsou tak kladeny vysoké požadavky, co se kvality a přesnosti tvarových částí týče. Vznikla také celá řada modifikací vstřikovacího cyklu tak, aby bylo možné tlustostěnné prvky vstřikovat co nejefektivněji. Mezi modifikované metody vstřikování patří například vstřikování s dolisováním nebo metoda vícevrstvého vstřikování. Finanční nároky jsou však u těchto metod značně vysoké, a proto vyvstává snaha o výrobu tlustostěnných optických prvků pomocí klasické metody vstřikování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MATERIÁLY VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ

Pro výrobu vstřikovaných dílů se využívají polymerní materiály. Jedná se o látky tvořené makromolekulami, které jsou složeny z velkého množství základních stavebních (konstitučních) jednotek, které se nazývají mery. Makromolekuly vznikají při reakcích, které se pravidelně opakují a dochází při nich ke spojení funkčních skupin jednotlivých merů do vyšších celků. Mezi tyto reakce se řadí polymerace, polykondenzace a polyadice. Pro vznik makromolekuly je nutné, aby došlo k rozštěpení násobné vazby v molekule meru. Toto štěpení nastává při procesu tzv. iniciace, při které dochází ke vzniku volného radikálu. Vzniklý radikál reaguje s další molekulou meru, kterou rozštěpí a vzniká nový, objemnější radikál. Tento proces se opakuje znovu a znovu a dochází k růstu řetězce (propagaci). Schopnost monomeru tvořit chemické vazby pomocí funkčních skupin je základní podmínkou pro vznik polymeru. Při reakci monomerů různého druhu vzniká kopolymer, reakcí monomerů druhu stejného pak vzniká homopolymer. Hlavní řetězec makromolekulární látky je tvořen atomy uhlíku, na které se pak vážou atomy dalších prvků (vodík, kyslík, dusík, chlor, fluor atd.). [1] [2]

Řetězce polymeru (makromolekuly) mohou být lineární, rozvětvené nebo zesíťované. Typ makromolekul je dán tzv. funkcí monomeru. Funkce monomeru udává, kolikrát se daný monomer může zúčastnit reakce. Dvojfunkční monomery mohou tvořit pouze lineární makromolekuly, troj a více funkční monomery pak tvoří molekuly rozvětvené a zesíťované. Tvar a typ makromolekul ovlivňuje vlastnosti vzniklého polymeru. Polymery s lineárními řetězci mají vyšší hustotu, vyšší pevnost, modul pružnosti a vyšší teplotní odolnost, oproti tomu se vyznačují nižší tažností. Rozvětvené makromolekuly způsobují opačné vlastnosti než makromolekuly lineární. Vlastnosti polymeru se zesíťovanými makromolekulami jsou ovlivněny hustotou sítě, kdy s její zvyšující se hodnotou má polymer vyšší pevnost, modul pružnosti a teplotní odolnost, avšak nižší tažnost. Pro návrh dílů z polymerních materiálů není nutná detailní znalost jejich struktury, stačí znát chování polymerních materiálů při zatížení a jejich fyzikální a chemické vlastnosti. [1] [2]



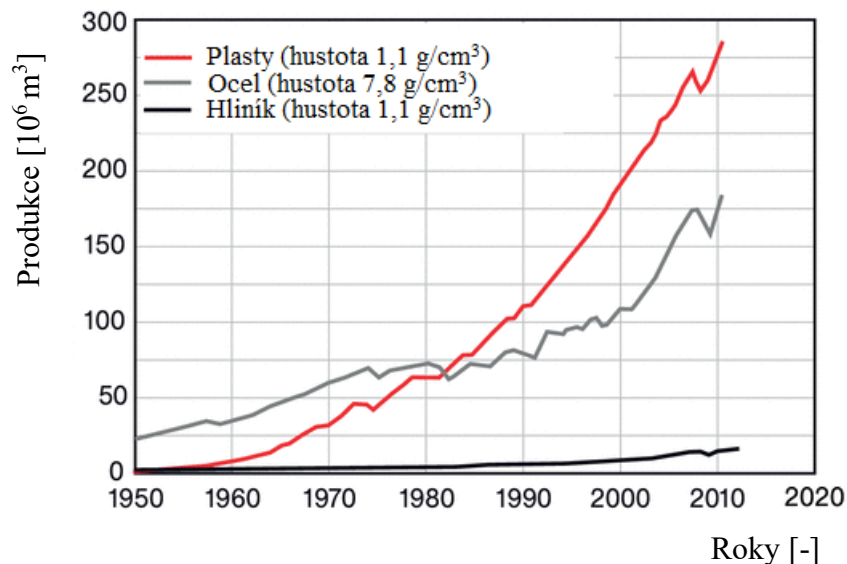
Obrázek 1 – Typy makromolekulárních struktur [1]

1.1 Rozdělení a vlastnosti materiálů pro vstřikování

Primárně se syntetické polymery využívané pro vstřikování dělí do dvou skupin, a to na plasty a elastomery. Plasty se pak dělí na termoplasty a reaktoplasty, do skupiny elastomerů se řadí kaučuky a termoplastické elastomery. [2]

1.1.1 Plasty

Plasty se rozumí syntetické nebo přírodní materiály, které jsou následně převedeny do formy granulí, prášku, gelu nebo roztoků. Takto připravené meziproducty jsou poté sušeny, doplněny o aditiva a tepelným působením taveny a následně chladnutím nebo vytvrzením převedeny do požadovaného tvaru. Za normálních podmínek jsou plasty tvrdé a křehké. Vyznačují se dobrou tvářitelností, mají nízkou hustotu, jsou lehké, dobře odolné korozi a mají dobré tepelně a elektricky izolační vlastnosti. Pod vnějším zatížením dochází u plastů do určité míry k nevratným (plastickým) deformacím, v závislosti na velikosti zatížení. Díky chemické a morfologické struktuře plastů spolu s jejich jednoduchou zpracovatelností a širokými možnostmi použití jsou jedním z nejvíce využívaných materiálů současnosti. Podle toho, jak se mění vlastnosti a chování plastů během zahřívání, se plasty dělí do dvou hlavních skupin, a to na termoplasty a reaktoplasty. Drtivá většina vstřikovaných výrobků je však vyráběna z termoplastů. [2]



Obrázek 2 – Vývoj produkce materiálů od roku 1950 [2]

1.1.2 Termoplasty

Termoplasty představují za běžné teploty tuhé látky. Jsou tvořeny velmi dlouhými lineárními či rozvětvenými makromolekulárními řetězci, které jsou spojeny za pomoci ne příliš pevných, fyzikálních Van der Waalsových vazeb. Vlivem zvýšené teploty vazby mezi molekulami termoplastů slábnou a dochází k jejich plastikaci a následnému převedení do plastického stavu, ve kterém jsou snadno zpracovatelné a lze je vstříkovat. Po zafixování finálního tvaru výrobku a zchladnutí lze termoplasty opět plastikovat a celý proces opakovat. Teplota, nad kterou dochází k plastikaci, se nazývá teplota tání (T_m). Vlastnosti termoplastů jsou do značné míry ovlivněny délkou řetězců a množstvím jejich větví. Délku řetězců a větvení lze ovlivnit během procesu polymerace, což dává možnost vzniku termoplastům, které mají stejnou chemickou strukturu, avšak s rozdílným molekulovým uspořádáním a s jinými vlastnostmi. Typickým příkladem je polyethylen (PE), který se vyrábí ve formě vysokohustotní, s lineárními řetězci (HDPE) nebo ve formě nízkohustotní s řetězci rozvětvenými (LDPE). Kromě PE patří mezi nejvíce využívané termoplasty polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), polyethylentereftalát (PET), polykarbonát (PC), akrylonitril-butadien-styren (ABS), polystyren (PS) nebo polyamid (PA). Vstřikování termoplastů probíhá většinou při teplotě formy přibližně 20 – 120 °C s teplotou taveniny v rozmezí 200 – 300 °C. [2] [3]

Termoplasty se dělí podle toho, zda obsahují uspořádané nebo neuspořádané makromolekulární řetězce. Stupeň krystalinity materiálu zásadně ovlivňuje chování a vlastnosti vstřikovaných dílců. Termoplasty s neuspořádanými makromolekulami se nazývají amorfni. Termoplasty s uspořádanými řetězci se nazývají krystalické, převážně však existují ve formě částečně krystalické neboli semikrystalické. Výsledná krystalinita je také ovlivněna samotným procesem vstřikování, kdy například výrobky z PET získávají při vstřikování do vyhřáté formy semikrystalickou strukturu, při vstřikování do studené formy pak strukturu amorfni. [2] [3]

Amorfni termoplasty se vyznačují širokým rozsahem teplot, při kterých dochází k jejich měknutí. Díky nahodilému uspořádání makromolekul propouštějí více světla a výsledná struktura se jeví jako transparentní, vhodná pro optické díly. Náhodné uspořádání makromolekul také umožňuje dosáhnout nižší hodnoty smrštění při chladnutí výrobků v dutině vstřikovací formy než u výrobků semikrystalických. Využívají se tedy pro výrobu rozměrově přesných dílů a součástí. Výrobky z amorfni termoplastů jsou však křehké, s nižší odolností proti únavě a s nižší pevností. Specifickou teplotou pro amorfni termoplasty

je teplota skelného přechodu (T_g), po jejímž překročení dochází k jejich měknutí. Amorfni termoplasty špatně odolávají chemikáliím a viskozita amorfni taveniny je vysoce závislá na teplotě. Mezi hlavní zástupce této skupiny patří polykarbonát (PC), polymethylmetakrylát (PMMA), polystyren (PS), styren-akrylonitril (SAN) a polyvinylchlorid (PVC). [3]

Semikrystalické termoplasty mají molekulovou strukturu z větší části pravidelně uspořádanou. Podíl krystalické části je vysoce ovlivněn podmínkami zpracování a dobou a průběhem chlazení zpracovávaného materiálu ve formě. Semikrystalické termoplasty jsou z důvodu rozdílného indexu lomu amorfni a krystalické struktury neprůhledné. Vykazují vyšší hodnotu smrštění než materiály amorfni, protože nejprve dochází k tunutí neuspořádané (amorfni) struktury a poté k tunutí krystalické (uspořádané) struktury, což se projevuje výraznou objemovou změnou během chlazení. Jsou vysoce odolné chemikáliím a mají výbornou odolnost vůči únavě, díky pravidelnému uspořádání molekul pak mají vyšší pevnost a tuhost než amorfni termoplasty. Nejpoužívanějšími semikrystalickými materiály pro vstřikování jsou polyethylen (PE), polypropylen (PP), polyamid (PA) nebo polyoxomethylen (POM). [3]

Termoplasty se dále dělí podle aplikace výrobků z nich vyrobených. V největším objemu se zhotovují tzv. komoditní termoplasty (PP, PE, PVC, PET). Používají se pro velké množství aplikací díky své nízké hustotě, dobré tvarovatelnosti a zpracovatelnosti při vstřikování. Komoditní termoplasty jsou hojně využívány v obalovém, hračkářském průmyslu a pro různé prvky do domácností, na které nejsou kladeny příliš velké požadavky z hlediska mechanických vlastností. Další skupinou jsou tzv. inženýrské plasty (PA, POM, ABS). Jedná se o materiály, které díky svým mechanickým vlastnostem mohou v určitých případech nahrazovat kovové výrobky. Jejich oblast použití je však omezená z důvodu rozdílného chování při změně teploty. Poslední skupinou jsou tzv. plasty pro speciální účely. Jsou to materiály vyvinuté pro aplikace, při kterých jsou třeba výjimečné mechanické vlastnosti, vysoká odolnost chemickým látkám nebo stálost při vysoké skokové změně teploty. Do této kategorie se řadí např. polyimidy (PI), polyftalamid (PPA), polyfenylsulfid (PPS) nebo polyarylethersulfon (PAES). [3]

1.1.3 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou látky, které při zahřívání měknou a taví se. Při dalším zahřívání u nich dochází k tzv. zesíťování, tedy k chemickým změnám, které vedou ke vzniku zesíťované makromolekulární struktury, která je spojena pomocí silných kovalentních vazeb. Síťování

reaktoplastů probíhá ve dvou fázích. V první fázi dochází ke vzniku lineárních řetězců, podobně jako u termoplastů. Ve druhé fázi pak dojde k jejich vzájemnému propletení a zesíťování. Vytvrzené reaktoplasty nelze znovu zpracovávat, při opětovném zahřívání po zesíťování u nich dochází přímo k degradačním reakcím. Zesíťovaná struktura udává výrobkům z reaktoplastů vysokou tuhost a pevnost, jejich mechanické vlastnosti zároveň nejsou závislé na změně teploty. Hlavními zástupci reaktoplastů jsou pryskyřice, např. fenolformaldehydové (PF), melaminformaldehydové (MF) nebo epoxidové (EP), močovinoformaldehydové (UF) či polyesterové pryskyřice (UP). PF nelze využívat pro výrobky, které přicházejí do styku s potravinami, vzhledem k obsahu zdraví škodlivému fenolu. Využívají se hojně jako tmely, lepidla nebo lakovací pryskyřice. UF a MF jsou zdravotně nezávadné a hlavní využití nacházejí zpravidla ve slévárenství, při úpravě papíru, textilu a jako lepidla a pojiva. EP lze využít jako podlahové a nátěrové hmoty nebo jako pojivo skelných laminátů. Z UP lze vyrábět galanterní zboží, nátěrové hmoty, lepidla nebo bižuterii. Jsou také často používány jako pojivo při výrobě skelných laminátů, kdy jsou jednotlivé vrstvy výztuže natírány pryskyřicí. Při vstřikování reaktoplastů musí být forma vytemperována na teplotu vyšší, než je teplota vstřikovaného materiálu, aby se předešlo vytvrzení ve vstřikovacím stroji, nebo během jeho vedení do dutiny formy. [1] [3]

1.1.4 Elastomery

Elastomery jsou materiály se zesíťovanými řetězci a vysokou pružností, která umožňuje podstupovat velmi vysoké deformace s tím, že po odeznění deformace se vrací do původního stavu. Hlavním zástupcem elastomerů jsou kaučuky. Kaučuk v syrovém stavu nemá všechny požadované vlastnosti, ty jsou docíleny až vlivem procesu vulkanizace, během které se pomocí tepla a různých přísad z kaučuku stává pryž (guma). Během vulkanizace dochází k vytvrzení materiálu, tedy k tvorbě příčných vazeb mezi molekulami a k tvorbě zesíťované struktury. Zvulkanizovaný kaučuk má poté vysokou pružnost, odolnost vůči kyselinám a zásadám, odolnost olejům a tukům a vysokou ohebnost i při nízkých teplotách. Běžnými zástupci elastomerů jsou styren-butadienový kaučuk (SBR), butylkaučuk (IIR), ethylen-propylenový kaučuk (EPM) nebo silikonové kaučuky. Tyto materiály však vyžadují pečlivý a pomalý proces výroby a jejich zpracování je poměrně nákladné. Z tohoto důvodu byly vyvinuty tzv. termoplastické elastomery (TPE), které vykazují vlastnosti elastomerů, ale jejich zpracovatelnost je jednodušší, podobně jako u termoplastů. [3]

1.2 Příklady polymerních materiálů

Polymerní materiály v surovém stavu často nesplňují všechny potřebné vlastnosti pro snadné zpracování nebo pro žádoucí funkci výrobků. Proto jsou k samotným polymerním materiálům před zpracováním přidávána aditiva pro ovlivnění jejich vlastností. Jedná se zejména o plniva, změkčovadla, stabilizátory a barviva nebo pigmenty. Aditiva se, kromě plniv, přidávají v malém množství (0,1 – 1 %) a měla by být optimálně a rovnoměrně rozprostřena v celém objemu polymerní směsi, aby se předešlo anizotropii vlastností. Aditiva jsou nezbytná pro zajištění dostatečných mechanických vlastností, omezení hořlavosti a stupně tepelné degradace. Zajišťují také lepší zpracovatelnost materiálu a jeho odolnost vůči nežádoucím vlivům při zpracování. [4] [5]

1.2.1 Plniva

Plniva jsou organické nebo anorganické materiály, které se používají pro zlepšení vlastností a pro snížení ceny základního polymerního materiálu určeného pro vstřikování. Plniva ovlivňují reologické chování a viskozitu materiálu během zpracování. Ta plniva, která zlepšují mechanické, optické vlastnosti nebo odolnost vůči degradaci, se řadí mezi plniva aktivní (funkční). Plniva se dělí dle svojí kompozice a struktury na: [4] [5]

- Vlákenná plniva – skleněná, ocelová a uhlíková vlákna,
- částicová plniva – mastek, grafit, skleněné kuličky, slída nebo uhličitán vápenatý.

Vlákenná plniva zvyšují pevnost v tahu, modul pružnosti a mechanickou pevnost. Dle různorodosti orientace vláken způsobují vlákenná plniva anizotropii vlastností (rozdílné mechanické vlastnosti a smrštění v různých směrech) výsledného výrobku a v důsledku zvýšení viskozity zhoršují zpracovatelnost materiálu. [4] [5]

Částicová plniva zlepšují mechanické vlastnosti (tvrdost, tuhost, tvarová stabilita), nezpůsobují anizotropii vlastností a snižují hodnotu smrštění vstřikovaných dílů. [4] [5]

1.2.2 Změkčovadla

Změkčovadla jsou látky, která se rozprostřou mezi molekuly polymeru a ovlivňují tak jeho tuhost a plasticitu. Materiály se změkčovadly jsou tvárnější a lépe zpracovatelné. Funkčnost změkčovadel spočívá ve snížení vnitřního tření mezi polymerními řetězci a usnadnění jejich přesunu. Polymerní řetězce se tak mohou snadněji přeskupit a materiál se stává lépe zpracovatelný. Mezi změkčovadla se řadí ftaláty (DOP, DBP) nebo fosfáty. [5]

1.2.3 Maziva

Hlavním účelem maziv je zlepšit zpracovatelnost polymerních materiálů. Podle svého účinku se dělí na maziva s vnějším nebo vnitřním účinkem. Maziva s vnitřním účinkem ovlivňují reologické chování materiálu a zlepšují jeho tokové vlastnosti. Omezují také degradaci materiálu způsobenou vysokým třením mezi makromolekulárními řetězci při vstřikování. Maziva s vnějším účinkem usnadňují průchod polymerní taveniny vstřikovacím strojem, vtokovým systémem a dutinou formy. Migrují na povrch materiálu a tvoří zde vrstvu, která způsobuje skluz. Další výhodou maziv s vnějším účinkem je umožnění snadnějšího odformování výrobku z dutiny formy. Maziva jsou převážně látky na bázi uhlovodíků, alkoholů, karboxylových kyselin nebo ketonů. [5]

1.2.4 Stabilizátory

Stabilizátory chrání polymerní taveninu při zpracování a zvyšují životnost hotových výrobků. Tepelné stabilizátory zvyšují odolnost tepelné degradace taveniny a snižují hořlavost. Jejich přidáním lze docílit vyšší teploty zpracování, a tedy úpravy reologických vlastností materiálu. UV stabilizátory zabraňují degradaci polymerního materiálu vlivem slunečního záření (světlo o vlnové délce 290 – 400 nm). Semikrystalické polymery jsou na světelnou degradaci citlivější než polymery amorfní a účinkem světla rychleji ztrácejí své vlastnosti. [5]

1.2.5 Barviva a pigmenty

Barviva a pigmenty zajišťují obarvení polymeru na požadovanou barvu. Barviva se přidávají buď do granulátu nebo přímo do taveniny a jsou převážně ve formě prášku, granulí nebo kapalin. Jedná se zejména o organické a anorganické látky (oxid titaničitý, uhlí, vápenatý lak, ultramarínová modř, kyaniny), které jsou v polymerech nerozpustné a neovlivňují tedy jejich makromolekulární strukturu. [5]

1.2.6 Opticky zjasňující látky

Opticky zjasňující látky hrají roli převážně při výrobě optických dílů. Zlepšují vzhled transparentních výrobků a zabraňují jejich zažloutnutí. Zachytávají ultrafialové záření o vlnové délce 290 – 400 nm, které je následně emitováno na světlo ve viditelné oblasti (400 – 600 nm). Polymer poté světlo odráží a jeví se bělejší a jasnější. Jako zjasňující látky se používají kumariny, diazoly nebo benzoxazoliny. [5]

1.3 Polymerní materiály vhodné pro tlustostěnné optické prvky

Kombinaci vlastností vhodnou pro výrobu optických tlustostěnných prvků splňují amorfni termoplasty. Vykazují vysoké hodnoty propustnosti světla (množství světla, které projde materiálem) a jsou velmi dobře zpracovatelné. Díky svému nízkému smrštění oproti dutině formy pak tyto materiály poskytují velmi přesné rozměry optických výrobků. Vstřikováním amorfních termoplastů lze dosáhnout vysoce kvalitních povrchů, složitých tvarů a reprodukovatelnosti optických prvků. Volba materiálu závisí na konkrétním případě funkce, na ceně a na požadovaných vlastnostech výrobku. Důležitou vlastností materiálu je index lomu světla a tzv. dvojlom, tedy optická vlastnost materiálu, která závisí na indexu lomu a na směru šíření světla. Dvojlom je nežádoucí a je ovlivněn procesními podmínkami při zpracování a vnitřní strukturou materiálu. Nejlepší optické vlastnosti, a tedy nejvyšší využití v optickém průmyslu, mají tyto polymerní materiály: [6] [7]

- Polykarbonát (PC),
- polystyren (PS),
- polymethylmetakrylát (PMMA),
- cyklický olefinový polymer (COP),
- cyklický olefinový kopolymer (COC).

1.3.1 Polykarbonát (PC)

Jedná se amorfni termoplastický materiál, který je vysoce tuhý, průhledný a odolný vysokým teplotám. Poskytuje dobrou rázovou odolnost, nehořlavost, elektroizolační vlastnosti, nízkou nasákavost a vysokou pevnost a stabilitu rozměrů až do teploty skelného přechodu (T_g), tedy cca 150 °C. PC má špatnou odolnost proti UV záření a při venkovních aplikacích vyžaduje ochranná stabilizační aditiva. Propustnost světla PC je vysoká, přibližně 90 %, index lomu je rovněž vysoký. Špatně odolává delšímu působení vařící vody a vodní páry. Je rozpustný v chlorovaných uhlovodících a naopak dobře odolává aromatickým uhlovodíkům, esterům, ketonům nebo alkoholům. Využívá se pro výrobu optických čoček projektorů a automobilových světlometů, bezpečnostních skel, dále se využívá pro vstřikování dílů do fotoaparátů, kamer, dalekohledů a v lékařství. Při kombinaci se skelnými vlákny lze vzhledem k vysoké pevnosti výrobky z PC v některých případech používat namísto kovových součástí. [7] [8]

1.3.2 Polystyren (PS)

Dalším hojně využívaným optickým materiálem je polystyren s neuspořádanou makromolekulární strukturou (ataktický). Standartní ataktický polystyren je amorfní, má vysokou tuhost, tvrdost, křehkost, je čirý a velmi dobře průhledný. Díky své chemické struktuře má výborné optické vlastnosti a vysoký index lomu. Lze jej krátkodobě využít do teploty T_g , což odpovídá rozsahu 80 – 100 °C, dlouhodobě pak při teplotách přibližně 60 – 90 °C. PS má nízkou nasákavost a navlhavost, zbytková vlhkost tedy neovlivňuje jeho vlastnosti. Propustnost světla ataktického polystyrenu se udává až na hodnotu 90 %. Jedná se o materiál s dobrou zpracovatelností a dobrými elektrickými a dielektrickými vlastnostmi. Má nízkou chemickou odolnost vůči organickým rozpouštědlům a je náchylný ke korozi pod napětím, která se projevuje zbělením ovlivněných míst. PS se využívá pro tvorbu optických čoček nebo v elektronickém a obalovém průmyslu. [8] [9]

1.3.3 Polymethylmetakrylát (PMMA)

Tento amorfní termoplast, známý také jako plexisklo, má vysokou čírost, a to i v silných vrstvách, což je vhodné při výrobě tlustostěnných dílců. Jedná se o vysoce pevný materiál s dobrou tuhostí. Je dobře zpracovatelný a odolný vůči olejům, alkanům a kyselinám. Špatně odolává alkoholům, organickým kyselinám a ketonům. Má vysokou odolnost proti UV záření, dobře odolává povětrnostním vlivům a vlhkosti beze změny vlastností a je tedy vhodný pro venkovní aplikace. Teplota skelného přechodu PMMA je cca 125 °C, dlouhodobě lze však výrobky používat při teplotách v rozsahu 70 – 80 °C. Díky vysoké propustnosti světla (až 92 %) je PMMA používán jako náhrada běžného skla. Využívá se pro výrobu optických kabelů, čoček, světlometů automobilů, střešních oken a signalizačních cedulí. [8] [10] [11]

1.3.4 Cyklický olefinový polymer (COP) a cyklický olefinový kopolymer (COC)

COP a COC jsou materiály poměrně nové. Jedná se o amorfny termoplasty s vysokou průhledností a nízkým dvojlomem. Mají výborné optické a mechanické vlastnosti, vysokou teplotu skelného přechodu (125 – 150 °C) a vysoký index lomu. Propustnost světla těchto materiálů se udává až na 93 % a jsou tedy extrémně vhodné pro výrobu optických prvků. Mají nízkou nasákavost a dobré dielektrické vlastnosti. Jsou hořlavé a špatně odolávají UV záření a povětrnostním vlivům. Špatně odolávají olejům, kyselinám, etherům a ketonům. Jsou velice snadno zpracovatelné vstřikováním a využívají se převážně pro výrobu optických čoček, čoček pro kamery mobilních telefonů, CD a DVD disků a pro lékařský průmysl. [10]

1.4 Reologie polymerních tavenin

Reologie z pohledu polymerních materiálů zkoumá chování materiálů při toku a deformaci a popisuje tedy vztah mezi napětím a rychlostí deformace. Tok polymerní taveniny je odlišný od toku kapalin, jejichž chování se označuje jako newtonské. Pro symbolizaci chování kapalin při deformaci se využívá píst. Naopak pro popis deformačního chování pevných (tuhých) látek se využívá pružina. Chování polymerní taveniny se označuje jako neneutronské (pseudoplastické) a lze jej popsat kombinací chování kapaliny a tuhé látky, tedy zapojení pístu a pružiny do série. Takto definovanou situaci deformace polymerní taveniny při toku popisuje Maxwellův model. [12] [13] [14]

1.4.1 Viskozita

Mezi hlavní vlastnosti polymerní taveniny, které je třeba znát při zpracování, patří viskozita. Viskozita určuje míru odporu proti toku. Čím nižší je viskozita, tím lépe materiál teče a naopak. Podle typu toku rozlišujeme smykovou viskozitu a viskozitu tahovou (elongační). Smyková viskozita určuje odpor taveniny vůči smykovému toku, tedy toku, kdy dochází ke změně rychlosti kolmo v jeho směru. Elongační viskozita, která je při vstřikování extrémně důležitá, pak určuje odpor vůči elongačnímu toku, při kterém se rychlost mění rovnoběžně ve směru toku. U polymerních látek je viskozita závislá na více parametrech, především na teplotě, tlaku, velikosti makromolekulárních řetězců a jejich větvení a na rychlosti smykové nebo tahové deformace (zejména pak při vyšších hodnotách). S vyšší teplotou viskozita klesá, naopak s růstem tlaku dochází i k růstu viskozity. Díky rostoucí rychlosti smykové deformace se řetězce polymeru orientují a snadněji po sobě kloužou, čímž při procesu vstřikování dochází k poklesu viskozity s rostoucí rychlostí vstříknutí taveniny. Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace popisují tokové křivky, které se měří experimentálně pro zpracovatelské rozsahy smykových napětí. [12] [13] [15]

1.4.2 Viskozitní modely

Pro popis tokového chování, a tedy změny smykové viskozity při procesu vstřikování se využívají především dva matematické modely. Prvním z nich je tzv. Power-Law model (mocninový zákon) a druhým Cross-WLF model. Cross-WLF model rozšiřuje mocninový zákon, který je závislý na čistě lineární závislosti mezi viskozitou a rychlostí smykové deformace. Cross-WLF model tedy umožňuje popis změny viskozity při vysokých rychlostech deformace a zároveň při změně teploty a tlaku. [14] [15]

Power-Law model (mocninový zákon): [15]

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

η ... smyková viskozita [$Pa \cdot s$]

m ... index konzistence [–]

$\dot{\gamma}$... rychlost smykové deformace [s^{-1}]

n ... index nenewtonského chování [–]

Cross-WLF model: [15]

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (2)$$

η ... smyková viskozita [$Pa \cdot s$]

η_0 ... newtonská viskozita [$Pa \cdot s$]

$\dot{\gamma}$... rychlost smykové deformace [s^{-1}]

n ... index nenewtonského chování [–]

τ^* ... kritické napětí [Pa]

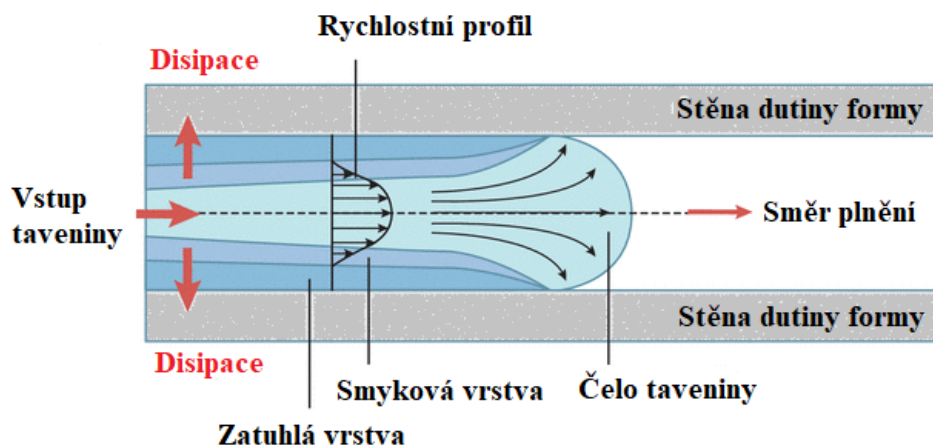
1.4.3 Index toku taveniny

Index toku taveniny (ITT) udává, jak moc je materiál tekutý a lze tedy pomocí něj predikovat tokové chování taveniny konkrétního materiálu. Je definován jako množství (hmotnost, objem) zplastikovaného materiálu v gramech vytlačené za 10 minut při předem definovaných podmínkách (teplota, zatížení). ITT symbolizuje jeden bod na tokové křivce a podle toho, jaká veličina se při jeho stanovení hodnotí, se dělí na objemový index toku taveniny (MVR) a hmotnostní index toku taveniny (MFR). MVR se hodí pro porovnávání materiálů, které obsahují plniva, MFR pak převážně pro neplněné materiály. Tím, že ITT poskytuje údaj pouze o stavu materiálu při jedné hodnotě smykové rychlosti (která je menší než reálná hodnota rychlosti deformace při vstřikování) a teplotě taveniny, může být jeho hodnota zavádějící, protože během vstřikování se vlastnosti taveniny razantně mění, a to v závislosti na proměnné rychlosti deformace. ITT se tedy hodí pro porovnání tekutosti různých materiálů, kdy čím vyšší hodnotu ITT materiál má, tím lepší má tekutost a jeho chování v dutině formy bude příznivější (lepší zatékavost do všech částí dutiny, kvalitní kopírování desénu, optimálnější podmínky vstřikovacího procesu). Pomocí ITT lze také

hodnotit kvalitu dodaného granulátu a hodnotit kvalitu vstřikovacího procesu, kdy např. změna ITT zjištěná z roztaveného zpracovaného materiálu může značit degradační procesy způsobené nevhodnými parametry při vstřikování. [15] [16]

1.4.4 Fontánový tok

Během vstřikovacího procesu nastává snaha o docílení tzv. fontánového toku, který je pro plnění dutiny nejvhodnější. Fontánový tok je způsobený časově neustáleným prouděním taveniny, kdy ve středu taveniny je vyšší rychlost proudění než na okrajích. Střední část taveniny proudí do stran, kde se dostává do kontaktu se stěnou dutiny formy, která má nižší teplotu než tavenina. V tomto místě tavenina rychle chladne a tvoří zatuhlou vrstvu, kdežto střed taveniny zůstává tekutý a proudí dále. Tento efekt se opakuje a vytváří fontánový tvar čela taveniny. Tavenina tedy není při fontánovém toku po povrchu dutiny formy smýkána, ale klouže po něm, čelo taveniny je pak namáháno elongací. Tloušťka zatuhlé vrstvy na povrchu dutiny formy je ovlivněna rychlostí vstřikování, tloušťkou stěn výrobku, teplotou taveniny a teplotou formy. [12] [15] [16]



Obrázek 3 – Detail fontánového toku [12]

1.4.5 Disipační ohřev

Disipace je jev, který nastává při toku taveniny. Jedná se o přeměnu mechanické energie na energii tepelnou vlivem tření. K disipaci dochází nevratnou deformací hmoty při toku, kdy se makromolekulární řetězce polymeru deformují a jednotlivé částice zaujímají nové polohy. Tato deformace se projeví v lokálním zvýšení teploty a výkon disipace je úměrný součinu smykového napětí a rychlosti smykové deformace. K nejvyššímu účinku disipace při vstřikování dochází pak logicky v nejužších místech, kde tavenina proudí nejrychleji a deformace řetězců je tedy značná, tedy v oblastech vtokových ústí a tenkých stěn. [16]

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování je v dnešní době tak rozšířená, že se s její pomocí vyrábí převážná většina plastových výrobků v leteckém, automobilovém či zdravotnickém průmyslu. Svě uplatnění nachází také při výrobě optických tlustostěnných prvků, zejména díky flexibilitě a rychlosti procesu spolu s možností využití nepřeborného množství materiálů. Vstřikování je komplexní děj, který je složen z mnoha cyklicky opakujících se fyzikálních procesů. V první fázi se materiál po vysušení plastikuje a případně míchá s přísadami, poté dochází ke vstříknutí taveniny materiálu pomocí vstřikovacího stroje do dutiny uzavřeného vstřikovacího nástroje, tedy formy. Materiál uvnitř formy přebírá tvar dutiny a dochází k jeho tuhnutí. Forma se následně otevře, zchladnutý výrobek je z ní vyjmut a celý proces začíná znovu. Vstřikovací proces může být plně automatizovaný, od vsypání granulátu do násypky vstřikovacího stroje až po vyhození výrobků z dutiny formy. Umožňuje vyrábět tvarově složité prvky s vysokým stupněm přesnosti a se širokou škálou budoucího využití. Díky vysokým nákladům na pořízení a údržbu vstřikovacích strojů a nástrojů je tato technologie vhodná zejména pro sériovou a hromadnou výrobu. V současnosti existuje mnoho modifikací technologie vstřikování, které byly vyvinuty pro tvorbu tvarově specifických výrobků a pro různé aplikace. [16] [17] [18]

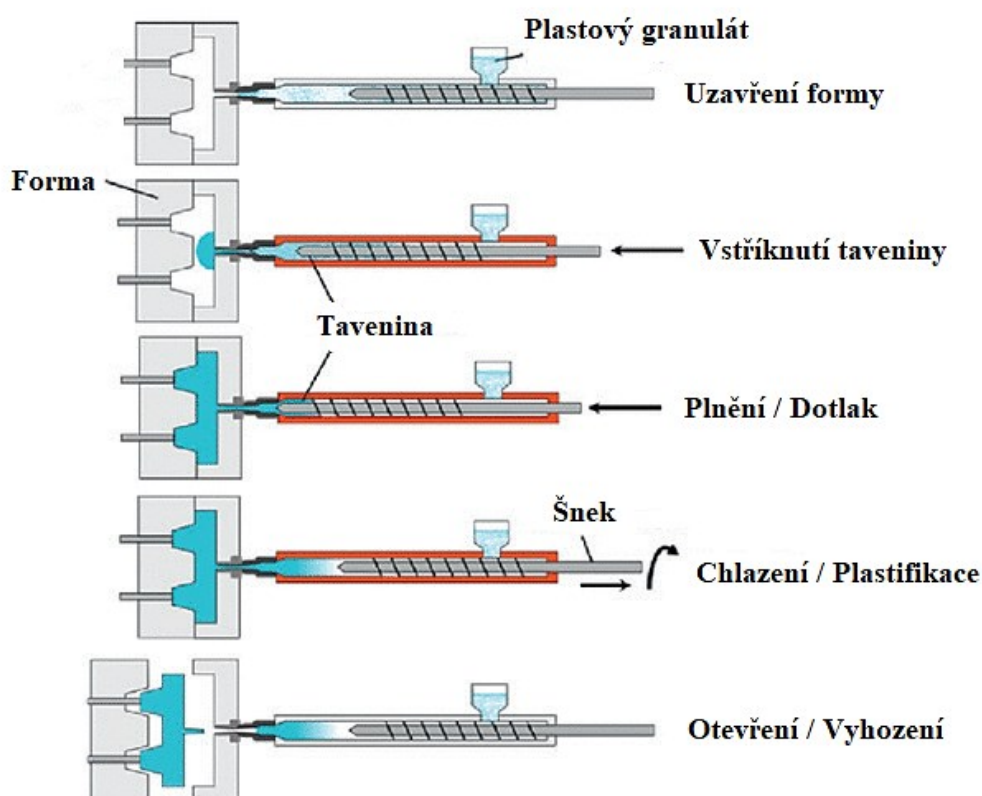
Při výrobě dutých předmětů se využívají technologie vstřikování s podporou vody (WIT) nebo s podporou plynu (GIT). Princip těchto metod spočívá v tom, že se dutina formy naplní pouze do určitého objemu a poté se do taveniny vstříkne proud vody nebo vzduchu, čímž se materiál rozestoupí ke stěnám dutiny vstřikovací formy, kde zatuhne. Voda je po zatuhnutí materiálu odčerpána pryč. Vzniká dutý výrobek, který je odlehčený a s menší spotřebou materiálu. Pomocí WIT lze vyrábět výrobky s rozdílnou tloušťkou stěny, s nižším smrštěním a s lepší kvalitou povrchu. Typickým příkladem dílů vyráběných metodou WIT jsou nárazníky automobilů, kryty zpětných zrcátek, okenní rámy, kliky dveří, žebříky nebo rukojeti náradí. [17] [18]

Pro výrobu optických tlustostěnných prvků se kromě klasické metody vstřikování využívá metoda vícevrstvého vstřikování nebo technologie vstřikování s dolisováním, které umožňují lepší kontrolu vstřikovacího cyklu pro tlustostěnné díly, jsou však finančně vysoce náročné. Při technologii vícevrstvého vstřikování se tlustostěnný prvek vstříkne po částech, kdy při zatuhnutí předchozí vrstvy se následně nastříkne vrstva další. Vstřikování s dolisováním spočívá ve vstříknutí taveniny do pootevřené formy, která se následně uzavře a materiál je dolisován a dotvarován. [17] [18]

2.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus tvoří cyklicky se opakující operace ve vstřikovacím stroji a formě, při kterých je materiál za pomoci tepelného a tlakového působení převeden do tvaru finálního produktu. Počátkem vstřikovacího cyklu se obecně rozumí uzavření vstřikovací formy, která je následně vytemperována na požadovanou teplotu, stanovenou v závislosti na zpracovávaném materiálu. Vstřikovací cyklus bývá popisován pomocí závislosti vstřikovacího tlaku na čase nebo pomocí tzv. pVT diagramu, který znázorňuje závislost stavových termodynamických veličin, tedy tlaku (p), měrného objemu (v) a teploty (T) během vstřikovacího cyklu. [17] [18]

Dobu trvání vstřikovacího cyklu ovlivňuje mnoho parametrů, např. násobnost formy, použitý materiál, velikost a konstrukční provedení výrobku, typ použitého vstřikovacího stroje, nastavení technologických podmínek procesu nebo správnost návrhu temperačního systému. V praxi se udává čas vstřikovacího cyklu v řádu sekund nebo desítek sekund, u tlustostěnných výrobků se pak může vyšplhat až do řádů minut. Pro hospodárnou výrobu a snížení nákladů je nutné vstřikovací cyklus optimalizovat tak, aby trval co nejkratší dobu, avšak bez negativního ovlivnění vlastností výsledného výstřiku. [17] [18]



Obrázek 4 – Vstřikovací cyklus a jeho fáze [18]

2.1.1 Fáze uzavření vstřikovací formy a plastikace

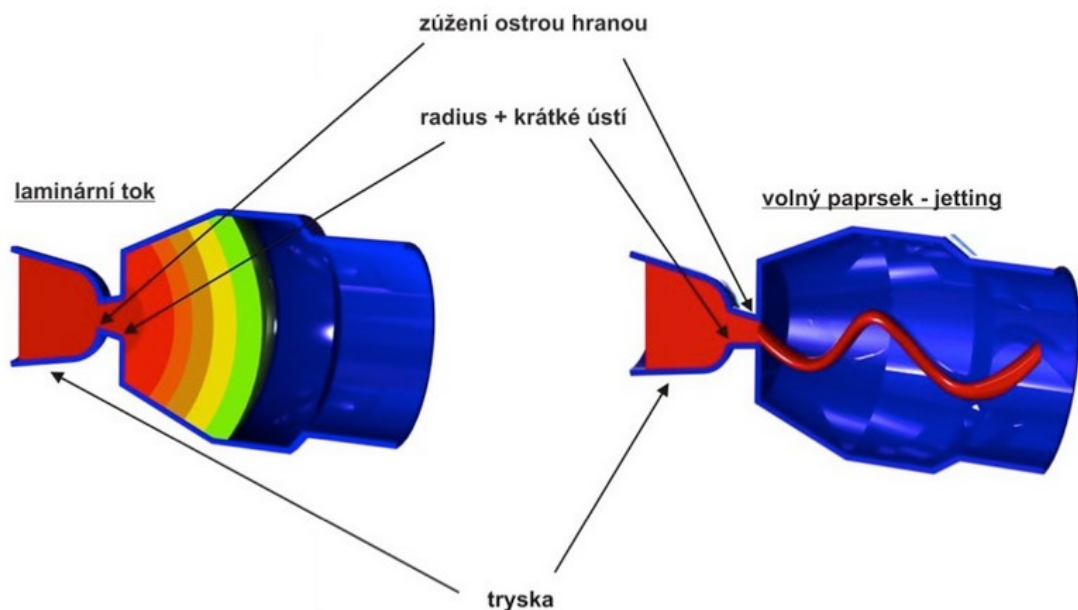
V první fázi vstřikovacího cyklu dochází k uzavření vstřikovací formy a k plastikaci materiálu. Uzavření formy by mělo probíhat co nejrychleji, avšak s plynulým pohybem. Poté, co se pohyblivá část formy přisune k nepohyblivé části, se vysušený materiál (nejčastěji ve formě granulí), vsypaný do pracovního válce vstřikovacího stroje přes násypku, začíná plastikovat. Vlivem disipace a tepelným působením topných těles je materiál v pracovním válci plastikován a za pomoci šneku je promícháván a posouván vpřed. Šnek se otáčí a zároveň posouvá směrem dozadu, čímž dochází k hromadění materiálu před jeho čelem. Množství zplastikovaného materiálu je určeno objemem výrobku a násobností formy, tedy dávkou materiálu potřebnou k úplnému zaplnění všech dutin formy spolu s vtokovým systémem a dále tzv. taveninovým polštářem, který následně slouží k doplňování materiálu během dotlakové fáze. [17] [18]

2.1.2 Fáze vstříknutí taveniny a dotlaku

V další fázi vstřikovacího cyklu vstřikovací jednotka stroje přijíždí k formě a nahromaděný materiál před šnekem je veden přes trysku vstřikovacího stroje a vtokovou vložku formy vtokovým systémem do dutiny formy. Šnek se posouvá dopředu jako píst a velkým tlakem a vysokou rychlostí tlačí taveninu před sebou. Rychlost posuvného pohybu šneku ovlivňuje rychlost plnění dutiny formy a tlakové poměry ve formě. Před samotným vstříknutím taveniny by měla být provedena kontrola, zda je vstřikovací forma vytemperována na požadovanou teplotu a zda je forma správně uzavřena tak, aby se zamezilo případnému úniku vstříknutého plastu do dělicí roviny. Vstříknutí taveniny by mělo být co nejrychlejší, protože tavenina se během kontaktu s chladnějšími částmi formy ochlazuje, tuhne, zvyšuje svoji viskozitu, a tedy ztrácí tekutost. Čas vstříknutí je ovlivněn velikostí výrobku, pohybuje se převážně v řádech desetin sekund až sekund. Rychlost vstřikování musí být optimalizována tak, aby se předešlo volnému toku taveniny v dutině formy, což by mohlo vést ke vzniku různých nestabilit a defektů. V okamžiku, kdy je dutina formy zaplněna zhruba na 95 – 99 % objemu, dochází k přepnutí na fázi dotlaku. [17] [18]

Dotlaková fáze kompenzuje objemové změny, které vznikají v dutině formy vlivem smrštění ochlazeného polymerního materiálu. Dotlak by měl ideálně působit tak dlouho, dokud je možné taveninu do tvarové dutiny dodávat, tedy do zatuhnutí nejužší části vtokového systému (vtokové ústí). Delší působení dotlaku by mohlo vést k nadbytečnému přetlačování taveniny a ke vzniku vnitřního pnutí ve výsledném výrobku. Dotlakem

se eliminují vady na výrobku a zajišťuje se přesnost jeho rozměrů. Další úlohou dotlakové fáze je vyrovnání tlaků uvnitř tvarové dutiny po jejím naplnění. Hodnota nastaveného tlaku během dotlakové fáze je pak stejná nebo nižší jak hodnota tlaku vstřikovacího (70 - 100 %), běžně se na začátku fáze nastaví tlak nejvyšší a poté se postupně snižuje. Pokud dojde k přepnutí na dotlak příliš pozdě, v dutině vzniká tlaková špička, která může vést k vysokému pnutí ve výrobku nebo k značnému namáhání a následnému částečnému pootevření formy. Nejčastěji je přepnutí na dotlak řízeno podle času vstřikování nebo podle tlaku ve vstřikovací formě. [17] [18]



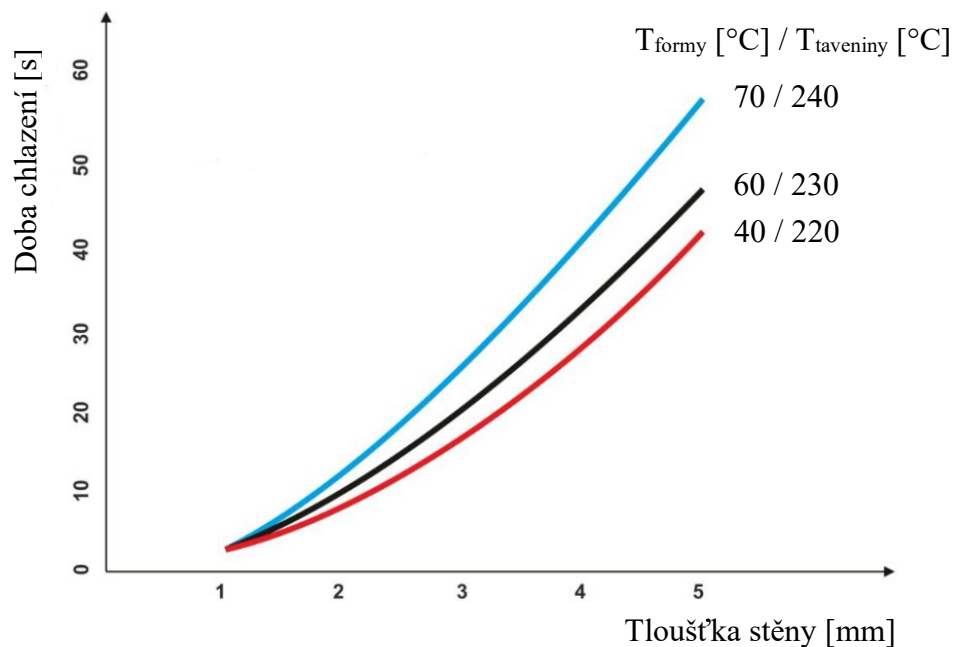
Obrázek 5 – Laminární tok taveniny (žádoucí) a volný tok taveniny (nežádoucí) během vstřikovací fáze [17]

2.1.3 Fáze chlazení

Samotné chlazení materiálu začíná bezprostředně při jeho kontaktu s chladnějšími částmi vstřikovací formy. Po vstříknutí a dotlaku je výstřiku ponechán určitý čas pro to, aby ochladl a ztuhl do takového stavu, aby bylo možné jej z formy bez problému vyjmout. Fáze chlazení je nejdelší fází celého cyklu a závisí na vyhazovací teplotě použitého materiálu, pod kterou bude možné výstřik vyhodit bez zdeformování některé z jeho částí. U tlustostěnných dílů může doba chladnutí trvat až několik minut, u tenkostěnných výrobků se pak pohybuje v řádu sekund až desítek sekund. Chlazení je realizováno temperací, což je systém kanálů vytvořených kolem dutiny vstřikovací formy. V kanálech proudí chladicí médium (voda, olej), které odvádí teplo z dutiny formy a ochlazuje tak výstřik. [17] [18]

Pro hospodárnost výroby (snížení času vstřikovacího cyklu a zvýšení produktivity) a snížení nákladů je nutné zajistit co nejkratší čas chlazení, toho je možné docílit účinným

chlazením problematických částí na výrobku (silné stěny), které chladnou nejdelší dobu. Příliš rychlé chlazení však může vést ke vzniku defektů na výstřiku, k vytvoření zamrzlého vnitřního pnutí, zhoršení mechanických vlastností nebo ke zhoršení kvality jeho povrchu. Doba chlazení je ovlivněna tloušťkou stěn vyráběného dílu, druhem použitého plastu (zejména pak hodnotou vyhazovací teploty), teplotou taveniny a teplotou formy. Pro zajištění optimálního průběhu chlazení se využívají simulační softwary, které umožňují predikovat dobu chlazení a označují místa, která budou chladnout problematicky. Chlazení by mělo probíhat tak, aby se všechny části výrobku ochlazovaly rovnoměrně a nemohlo tak dojít k anizotropii vlastností. Během fáze chlazení se plastikační jednotka vstřikovacího stroje odsouvá od formy a plastikuje se nová dávka materiálu pro další cyklus. [17] [18]



Obrázek 6 – Doba chlazení v závislosti na tloušťce stěny výrobku [17]

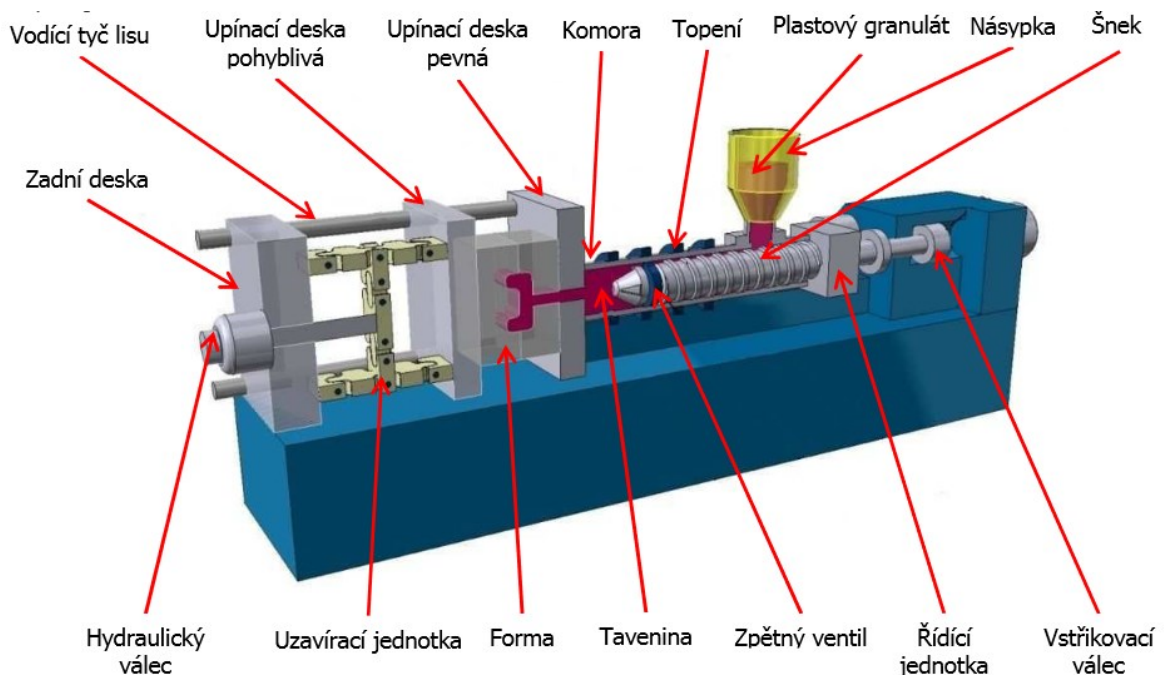
2.1.4 Fáze vyhození výrobku

Po ochlazení na vyhazovací teplotu je výstřik připraven na vyjmutí z formy. Forma se otevírá a výrobek je poté pomocí vyhazovacího systému nebo manipulačního robotu vyjmut, současně je z něj případně odstraněn vtokový zbytek. Samotné odformování probíhá při plném nebo při částečném otevření formy, v závislosti na rozměrech výstřiku. Rychlost vyhození se stanovuje až dle konkrétní situace a musí být odzkoušena. Vyhození by mělo být co nejrychlejší, avšak bez poškození vyhotoveného výstřiku, který by příliš prudkým pohybem vyhazovacích komponent mohl být namáhán a deformován. Zdvih pro odsun pohyblivé části formy musí být dostatečně veliký, aby se předešlo vzpříčení výrobku mezi částmi formy při jeho vyhození. [17] [18]

2.2 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroje jsou určeny pro zpracování polymerního materiálu, jeho převedení z pevného stavu do stavu plastického a k jeho následnému přivedení do vstřikovací formy. Umožňují také upnutí a pohyb formy. Základními částmi vstřikovacího stroje jsou ovládací, vstřikovací a uzavírací jednotka. Mezi hlavní prvky vstřikovacího stroje patří pracovní válec s pracovním členem a tryskou, která zajišťuje spojení mezi vstřikovacím strojem a formou. V současnosti jsou nejvíce rozšířené vstřikovací stroje, které jako pracovní člen využívají šnek. Tyto stroje poskytují vysoký výkon plastikace materiálu a zajišťují homogenitu vlastností a teploty taveniny. Vstřikovací stroje se primárně dělí dle: [19] [20]

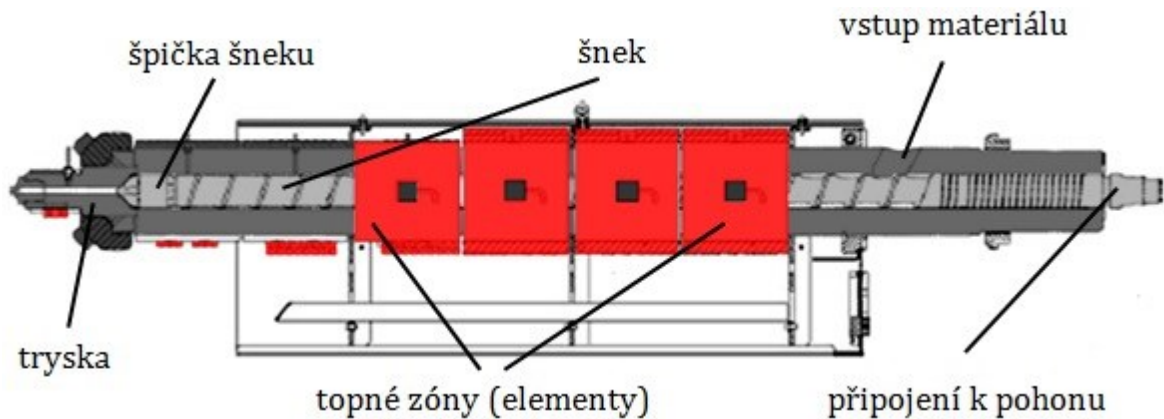
- Pohonu (hydraulické, elektrické, hybridní),
- pracovního členu (šnekové, pístové),
- zpracovávaného plastu (pro termoplasty, reaktoplasty, kaučuky),
- počtu šneků (jednošnekové, vícešnekové),
- rychlosti otáček šneku (rychloběžné, pomaloběžné),
- počtu desek uzavírací jednotky (dvoudeskové, třideskové),
- použití předplastikace (s předplastikací, bez předplastikace),
- maximální velikosti uzavírací síly (malé, střední, velké).



Obrázek 7 – Schéma vstřikovacího stroje [21]

2.2.1 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka se skládá z násypky, pracovního válce, šneku, zpětného ventilu, špičky šneku a z trysky. Hlavním úkolem vstřikovací jednotky je přeměna materiálu z pevného stavu do stavu taveniny, homogenizace taveniny a její doprava do dutiny vstřikovací formy. Materiál vstupuje přes násypku do pracovního válce, který je opatřen topnými pásy a na jeho konci je připojena tryska, která doléhá na vtokovou vložku formy. Topné pásy nejsou umístěny v oblasti násypky, aby se předešlo předčasnému natavení materiálu a aby byla zajištěna jeho plynulá doprava. Válec je během zpracování materiálu silně namáhán, a proto se pro jeho výrobu používají vysoce odolné materiály, jako je např. nitridovaná ocel s povrchovou úpravou. [19] [20]



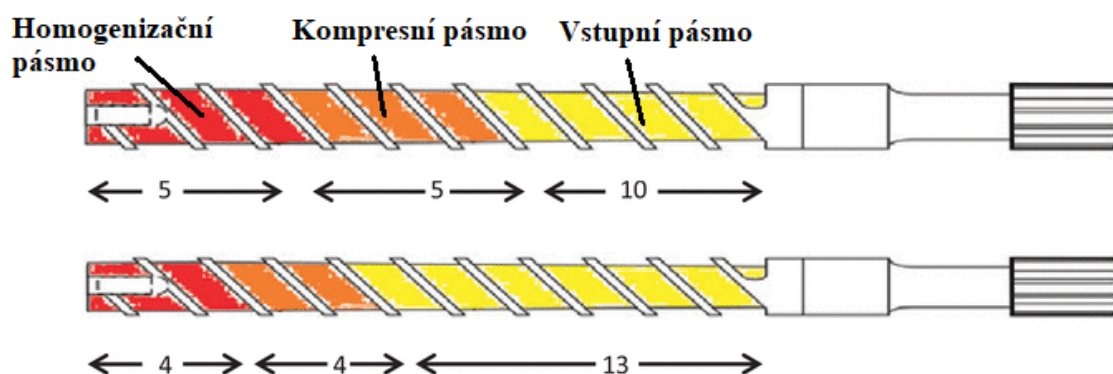
Obrázek 8 – Pracovní válec se šnekem [19]

Uvnitř válce je uložen šnek. Šnek plní funkci dopravníku materiálu od násypky až po trysku pracovního válce, zároveň také slouží k plastikaci materiálu, kdy až 80 % tepla pro plastikaci uvnitř pracovního válce vzniká díky disipaci vlivem tření materiálu mezi pracovním válcem a šnekem. Zbýlých cca 20 % tepla je dodáváno topnými pásy pracovního válce. Šnek je charakterizován poměrem L/D , tedy poměrem jeho délky ku průměru, který se liší v závislosti na typu zpracovávaného materiálu. Šnek je vysoce namáhán na ohyb, krut, vzpěr a tlak, vyrábí se proto z vysoce odolných materiálů (nitridovaná ocel). Šnek nemá po celé délce stejný profil a dělí se do tří funkčních částí. [19] [20]

První část šneku je označována jako vstupní. Zde je materiál (nejčastěji ve formě granulátu) odebírán z násypky a je veden k topným zónám pracovního válce. Šnek má v této části největší hloubku závitů šroubovice s největší hodnotou stoupání. Plynulou dopravu materiálu ovlivňuje tření mezi materiálem, šnekem a pracovním válcem. Pro zajištění nízkého koeficientu tření mezi šnekem a materiálem je povrch šneku leštěn, povrch pracovního válce by pak měl být pro zajištění vysokého koeficientu tření hrubý. [19] [20]

Další částí šneku je část kompresní. Klesá zde hloubka závitů šroubovice šneku a zmenšuje se stoupání. Dochází k intenzivnímu stlačování a smýkání částic materiálu spolu s odvodem vzduchu zachyceného mezi granulemi zpět do vstupní zóny. Tření spolu s teplem dodávaným topnými pásy způsobuje plastikaci materiálu. [19] [20]

Finální částí šneku je pásmo homogenizační. Hloubka šroubovice šneku je v této části nejnižší, s nejmenším stoupáním. Materiál je zde už zcela roztaven bez přítomnosti tuhé fáze a začíná se intenzivně promíchávat, aby byla zajištěna rovnoměrná distribuce přidaných aditiv a aby byla teplota po výstupu z homogenizační části v celém objemu stejná. Zhomogenizovaný materiál je tlačěn mezi špičku šneku a trysku pracovního válce. Ve špičce šneku je připevněn zpětný ventil, který slouží k zabránění zpětnému chodu nahromaděné taveniny před šnekem. Délka jednotlivých částí šneku závisí na druhu zpracovávaného materiálu, na obr. 9 jsou znázorněny profily šneků s počtem závitů v jednotlivých sekcích. Pro univerzální použití se využívají šneky s počtem závitů 10-5-5, pro materiály citlivé na teplotu smykové namáhání pak šneky s počtem závitů 13-4-4. [19] [20]



Obrázek 9 – Profil šneků v závislosti na počtu závitů [20]

Z homogenizační části poté tavenina prochází přes trysku do vstřikovací formy. Tryska a její rozměry se volí vzhledem ke zpracovávanému materiálu a dle velikosti výrobku. Tryska je vyhřívána topnými pásy, aby nedošlo k zatuhnutí taveniny před vstupem do formy. Průměr výstupní části trysky musí být menší než průměr vstupního otvoru vtokové vložky (cca o 10 %), aby se předešlo úniku taveniny. Velikost výstupní části se volí dle viskozity materiálu a dle objemu vstřikovaného dílu. Čím více je materiál viskozní a čím větší je díl, tím vyšší průměr musí mít výstupní část trysky. Nejčastěji se využívají tyto typy trysek: [5]

- Kuželová tryska (samostředění, nízká styčná plocha s formou, nízká odolnost),
- plochá tryska (bez samostředění, velká styčná plocha s formou),
- sférická tryska (ideálně s poloměrem nad 10 mm, samostředění, minimální styk).

2.2.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje je složena z mnoha prvků a slouží k upnutí vstřikovací formy a k plynulému pohybu její pohyblivé části vůči nepohyblivé. Mezi její základní komponenty patří upínací desky s upínacím systémem, vodící sloupky a pohon, který dodává potřebnou sílu k uzavření formy a následně sílu pro udržení obou částí formy u sebe při vstříknutí taveniny a dotlakové fázi. Uzavírací síla působí proti vstřikovacímu tlaku a zabraňuje tak nežádoucímu pootočení formy během cyklu. Uzavírací jednotka určuje velikost uzavírací síly, zdvih pohyblivé části formy, minimální a maximální velikost formy, tloušťku desek a zdvih pro vyhazování. Uzavírací jednotky se dělí: [19] [20]

- Dle vyvození uzavírací síly (mechanické, hydraulické, hydraulicko-mechanické),
- dle pohonu pro pohyb pohyblivé desky (elektrické, hydraulické, elektro-mechanické, hydraulicko-mechanické).

Mechanický kloubový mechanismus patří mezi nejefektivnější, lze ním velice přesně a snadno regulovat rychlost pohybů a je málo energeticky náročný. Spolu s hydraulickým pohonem tvoří kompaktní uzavírací jednotku pro menší vstřikovací stroje a pro rychloběžné vstřikovací stroje. Uzavírací síla kloubového mechanismu je vysoce ovlivněna teplotou formy. Pro vstřikovací stroje o velkých rozměrech se pak využívají vícebodové kloubové mechanismy. [19] [20]

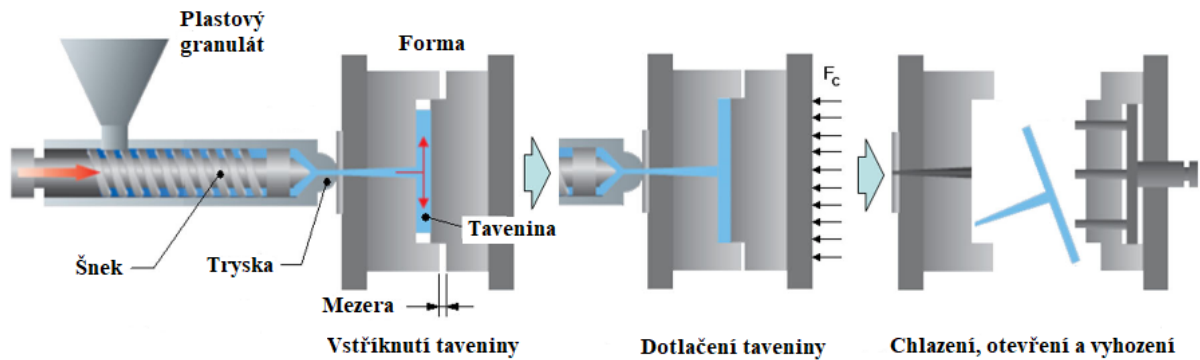
Hydraulický uzavírací systém využívá hydraulického pístu, který je přímo napojen na pohyblivou upínací desku. Hydraulické uzavírací systémy poskytují jednoduché řízení, rychlé pohyby, přesnost a opakovatelnost pohybů a vysoké uzavírací síly. Jejich nevýhodou je velká spotřeba hydraulické kapaliny v systému. Zdvih hydraulických uzavíracích jednotek je omezen délkou pístu, kdy s vyšší délkou formy klesá výška možného zdvihu. Velikost uzavírací síly hydraulických jednotek není omezena teplotou formy. [19] [20]



Obrázek 10 – Kloubový uzavírací mechanismus s hydraulickým pohonem (vlevo) a hydraulický uzavírací mechanismus (vpravo) [20]

2.3 Technologie vstřikování s dolisováním (ICM)

Vstřikování s dolisováním, také označováno jako kompresní vstřikování, je metodou, která kombinuje technologie vstřikování a lisování. Jedná se o technologii, při které se přesně stanovená dávka taveniny vstřikuje do pootevřené formy a v určitém bodě naplnění je forma působením uzavírací síly uzavřena a tavenina je dotlačena do dutiny. Ostatní fáze vstřikovacího cyklu jsou totožné jako u klasické metody vstřikování. [22] [23]



Obrázek 11 – Vstřikování s dolisováním [24]

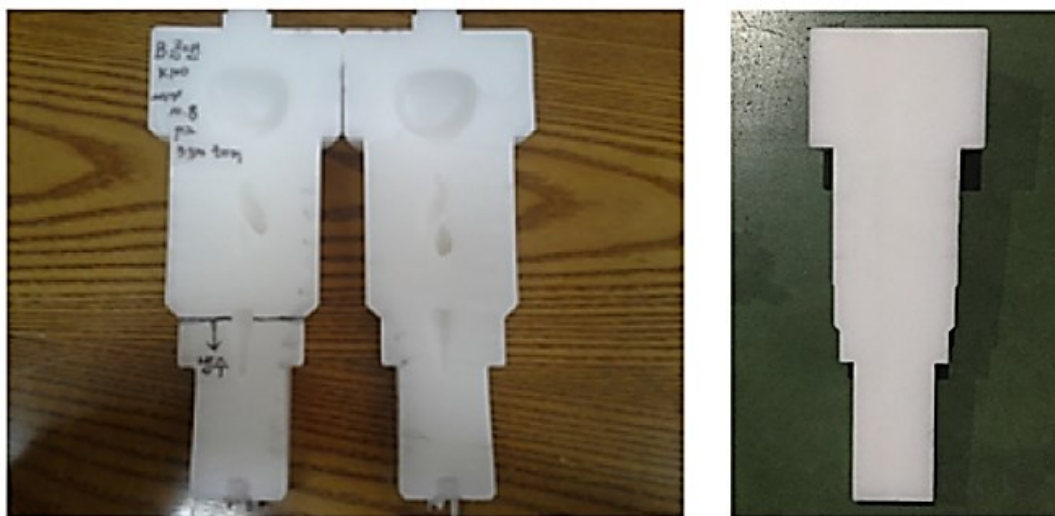
Metoda byla vyvinuta primárně pro výrobu tenkostěnných výrobků s vyšší dráhou toku taveniny (CD, DVD disky) a pro výrobu tlustostěnných součástí, u kterých při metodě běžného vstřikování dochází k četným nestabilitám. Pro vstřikování s dolisováním se používají konvenční vstřikovací stroje a není nutné další přídavné vybavení. Náročnost této metody je spojena s přesným nastavením velikosti pootevření formy a přesnou dávkou vstřikované taveniny. Kritický je pak čas přepnutí mezi vstřikovací a kompresní fází. Tlustostěnné díly vyrobené klasickou metodou vstřikování vykazují vysoké hodnoty smrštění, špatné rozložení hustoty materiálu a hojně se u nich vyskytují nežádoucí vady v podobě dutin a propadlin. Metoda ICM tyto problémy odstraňuje a produkuje výrobky s vysokou přesností a tvarovou stabilitou. Mezi hlavní přednosti vstřikování s dolisováním patří: [22] [23] [24]

- Nízká hodnota smrštění stlačením taveniny,
- rovnoměrná distribuce tlaku,
- zkrácení doby dotlaku a tedy času vstřikovacího cyklu,
- eliminace propadlin na výrobku,
- nižší náchylnost k deformaci a zlepšení tvarové stability,
- snížení velikosti vnitřního pnutí v materiálu.

Tlak během kompresní fáze je nižší než u dotlakové fáze při klasickém vstřikování. Komprese taveniny tak ovlivňuje proudění materiálu a má vliv na jeho orientaci (snižuje její účinek), což má zásadní vliv na zvýšení přesnosti vyráběného dílu. Výrobky vystavené nižší hodnotě tlaku, který je však rovnoměrněji rozprostřen, jsou méně deformovány a vykazují nízkou hodnotu vnitřního pnutí, což je vhodné zejména u optických prvků (lepší vlastnosti průchodu světla). [22] [23]

Experimentálně bylo zjištěno, že metodou ICM se výrazně snižuje čas potřebný pro vyhození součástí. Konkrétní studie při výrobě tlustostěnné části plynového ventilu ukazuje snížení času pro vyhození součásti oproti klasickému vstřikování až o 1000 sekund, což výrazně ovlivňuje hospodárnost a produktivitu výroby. Studie se dále zabývala uniformitou teploty, hustotního profilu a porovnávala smrštění výrobku při výrobě klasickým vstřikováním a vstřikováním s dolisováním. [24]

Bylo zjištěno, že při metodě ICM byl teplotní profil v celém objemu výrobku rovnoměrnější a zároveň asi o 15 °C nižší než teplotní profil u výrobku vstřikovaného klasickou metodou. Nižší teplota po vstřikování vede ke zkrácení doby chlazení a k menším objemovým změnám, což bylo ve studii potvrzeno. Hodnoty objemového smrštění výrobku se u klasického vstřikování pohybovaly okolo 20 %, u metody ICM pak došlo k výraznému zlepšení, kdy nejvyšší hodnota smrštění ve výrobku byla cca 7 %. Při porovnání hustotního profilu byl výsledek rovněž příznivější pro metodu ICM. Díky rovnoměrnému tlaku působícího při kompresní fázi je hustota materiálu v celém objemu stejná a tvorba propadlin a vzduchových dutin je tedy omezena, což je znázorněno na *Obrázku 12*. [24]



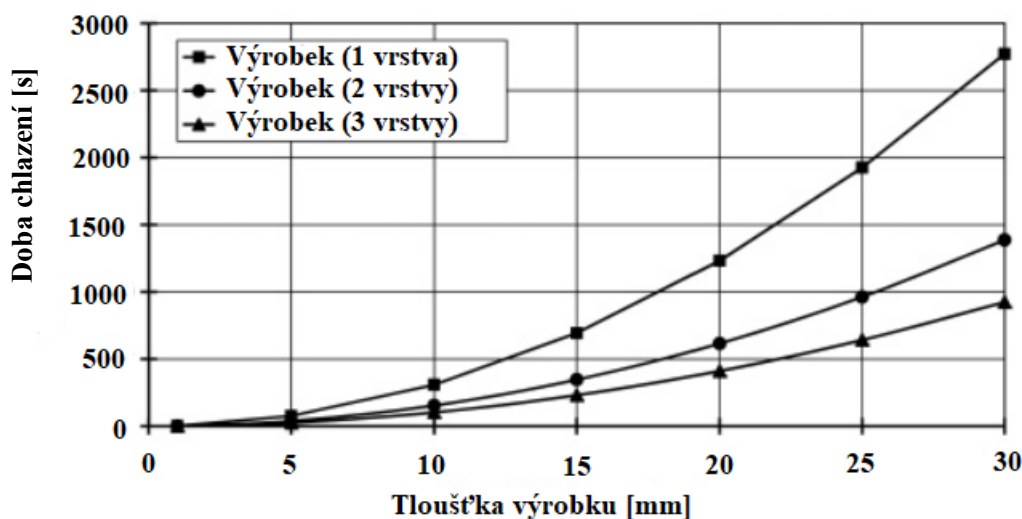
Řez dílcem vyrobeným běžnou metodou vstřikování

Řez dílcem vyrobeným ICM

Obrázek 12 – Porovnání nežádoucích dutin ve výstřiku vyrobeného běžným vstřikováním (vlevo) a metodou ICM (vpravo) [24]

2.4 Technologie vícevrstvého vstřikování (MIM)

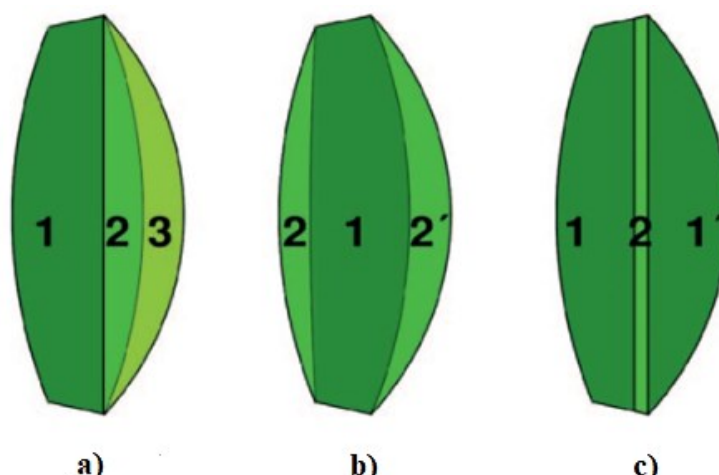
Další metodou pro tvorbu tlustostěnných prvků je metoda vícevrstvého vstřikování (Multilayer Injection Molding – MIM). Metoda byla vyvinuta přímo pro tlustostěnné optické prvky, kdy proces výroby probíhá po částech (vrstvách), které jsou na sebe postupně nastříkávány. Využívá se hlavně pro výrobu optických čoček s vysokou tloušťkou (až 30 mm), u kterých je nutné při klasické metodě vstřikování počítat s velkým intervalem chladnutí (až 30 min). Při metodě vícevrstvého vstřikování se využívá toho, že vrstvy s nižší tloušťkou chladnou razantně rychleji a vstřikovací cyklus je v konečném součtu časů chladnutí výrazně kratší než vstřikovací cyklus při vstřiknutí tlustostěnné čočky najednou. Závislost času chladnutí na celkové tloušťce výrobku znázorňuje *Obrázek 13*. [25] [26]



Obrázek 13 – Závislost doby chlazení na tloušťce výrobku [25]

Na celkovou dobu chlazení má vliv nejenom počet vrstev, ale i jejich uspořádání. Nejjednodušší variantou pro vstřiknutí výrobku pomocí MIM je jeho složení ze dvou vrstev. Nejprve se vytvoří tzv. předstřík, který je následně ochlazen a na něj je nastříknuta druhá, finální část, tzv. nástřík. Předstřík musí být přeložen do dutiny nástříku, což se provádí manuálně, pomocí robotu nebo je forma vybavena otočným systémem, který předstřík následně posune do tvarové dutiny pro nanesení nástříku. Nevýhodou dvouvstvého vstřikování jsou vysoké požadavky na přesnost tvarových ploch (jak pro předstřík, tak pro nástřík) a na samotný proces vstřikování. Bylo zjištěno, že dvouvstvěným vstřikováním byl zkrácen čas chlazení tlustostěnné optické čočky oproti metodě CIM pouze o zhruba 2 – 3 %, avšak využití dvouvstvé metody MIM nemělo výrazný vliv na optické vlastnosti. [25] [26]

Jinou variantou MIM je složení výrobku ze tří vrstev. Vzhledem k tomu, že střední vrstva nemá žádný vliv na optický výkon, nejsou u ní kladeny vysoké nároky na přesnost. Při procesu je tak pro zajištění optických vlastností nutno precizně vytvarovat pouze vnější vrstvy a tvorba méně kvalitní střední vrstvy tak výrazně zkracuje čas celého cyklu. Pro maximální zlepšení ekonomičnosti a produkce výroby se využívá současný nános obou vnějších vrstev výrobku v jednom kroku. U takto vyráběných čoček lze docílit snížení výrobního času až o 30 %. Důležitým parametrem, který se rovněž odráží v celkovém čase cyklu, je rozložení tloušťky jednotlivých vrstev. První vrstva (předstřík) by měla být ideálně co nejtlustší, vzhledem k možnosti účinnějšího chlazení díky kontaktu se stěnami dutiny formy po obou stranách. Optimální rozložení tloušťky vrstev u třívrstvé čočky se udává jako polovina celkové tloušťky pro předstřík a čtvrtina celkové tloušťky čočky pak pro obě vnější vrstvy (nástriky). [25] [26]



Obrázek 14 – Metoda MIM pomocí tří vrstev – a) postupné vrstvení, b) předstřík jádra a nástriky vnějších vrstev, c) předstřík vnějších vrstev a nástriky jádra [26]

Kromě snížení času výrobního cyklu se díky MIM dosahuje i vyšší přesnosti vstřikovaných dílů. Tenčí vrstvy mají nízkou hodnotu smrštění, což se odráží v nižší deformaci výsledné čočky. Třívrstvé čočky poskytují vyšší propustnost světla a nižší tendenci ke žloutnutí než čočky vyrobené při klasickém vstřikování, při porovnání s čočkami vyrobenými metodou CIM se propustnost světla téměř neliší. Žloutnutí materiálu je spojeno s jeho degradací, která vzniká v důsledku delšího času setrvání materiálu při vysoké teplotě. U třívrstvé struktury jsou časy chlazení krátké a materiál je tedy vystaven vyšší teplotě po kratší dobu. Kratší doba chlazení rovněž vede k nižšímu vnitřnímu pnutí ve výrobku. Při porovnání metod CIM a MIM není výrazný rozdíl v celkovém čase vstřikovacího cyklu ani v optických vlastnostech vytvořených čoček, přesnost povrchu čočky je však vyšší při využití metody MIM. [25] [26]

2.5 Smrštění a vady tlustostěnných vstříkovaných výrobků

Vstříkování je velice komplexní technologie a vyžaduje kvalifikované a zkušené pracovníky. Kvalita a technologická konstrukce samotného návrhu vstříkovaného dílu spolu s vhodným konstrukčním řešením formy a optimálními zpracovatelskými podmínkami hraje roli v prevenci vad ve výsledném výstřiku. Při nedodržení konstrukčních zásad nebo špatném zvolení procesních podmínek dochází ke znehodnocení výrobku. Ne všechny vady jsou však nepřijatelné, např. u nepohledových výrobků není kladen důraz na optickou kvalitu, musí ale splňovat dané užité vlastnosti, které mají vliv na funkci a životnost. [16]

Vady vstříkovaných dílů lze rozdělit podle toho, jak se na výrobku projevují, a to na vady zjevné, vady skryté a vady vzniklé při samotném procesu vstříkování. Vady zjevné se dělí do dvou skupin – vady tvaru (rozdílné smrštění, nedostříknuté výrobky, přetoky, propadliny nebo deformace výstřiku) a vady povrchu (změna barvy, rozdílný lesk, optická anizotropie, žloutnutí materiálu, spálená místa, studené spoje, tokové čáry, mikrotrhliny atd.). Skryté vady nelze odhalit pomocí vizuální kontroly, většinou jsou odhaleny až při špatné funkci nebo poruše výrobku, případně pomocí destruktivních zkoušek materiálu. Patří sem zejména nerovnoměrná orientace makromolekul materiálu, vnitřní pnutí ve výrobku, studené spoje, lunkry (vakuové bubliny), vnitřní vzduchové dutiny a přílišná křehkost materiálu. Skryté vady způsobují výrazné problémy zejména u tlustostěnných součástí. Vady vzniklé při samotném procesu vstříkování zahrnují zejména špatnou funkci vstříkovací jednotky stroje, špatné dosednutí trysky na vtokovou vložku formy, tvorba studené kapky u horkých vtoků, deformace výstřiku při jeho vyhození z formy nebo stopy po vyhazovačích. Mezi prvky vstříkovacího procesu, které způsobují a řeší vznik vad, patří: [16] [27] [28]

- Samotný vstříkovací proces (podmínky, nastavení procesu),
- vstříkovací stroj (vhodnost pro použitý materiál, dostatečná velikost),
- konstrukce výrobku a vstříkovací formy (dodržení technologických požadavků),
- materiál výstřiku (reologické vlastnosti, užité vlastnosti).

2.5.1 Smrštění výrobku

Smrštění materiálu je proces objemových změn, který probíhá při chladnutí materiálu ve formě z vysoké zpracovatelské teploty na teplotu formy. Při konstrukci je nutné brát v potaz smrštění použitého materiálu a o jeho hodnotu zvětšit dutinu formy tak, aby se po zchladnutí výrobek smrští na požadované rozměry. V zásadě se rozeznávají dva druhy

smrštění – výrobní a dodatečné. Výrobní smrštění je ovlivněno primárně druhem použitého materiálu (amorfní termoplasty mají nižší hodnoty smrštění než termoplasty semikrystalické), tvarem výstřiku (tloušťka stěn), umístěním vtoku na výrobku (charakter toku ovlivňuje anizotropii smrštění) a technologickými podmínkami procesu (teplota taveniny a teplota formy, doba a velikost tlaku při dotlakové fázi). [16] [27]

Dodatečným smrštěním se rozumí změna objemu do určitého času po výrobě (cca 24 hodin). Dochází ke stabilizaci rozměrů výrobku, uvolňují se vnitřní pnutí a probíhá relaxace materiálu. Tyto procesy vedou k částečnému dosmrštění materiálu v určitém časovém intervalu po výrobě a tvoří zhruba 10 % z celkové hodnoty smrštění výrobku. [16] [27]

2.5.2 Studené spoje

Studený spoj vzniká v místě spojení dvou čel polymerní taveniny. Dochází k němu v místech, kde je tavenina nuceně rozdělena do více proudů (při obtékání překážky), např. v místě otvoru na výrobku nebo při využití plnění více vtoky. V místě opětovného styku chladnějších čel taveniny dochází k vytvoření místa s pozměněnými optickými nebo mechanickými vlastnostmi. Studené spoje mohou a nemusí ovlivňovat mechanické vlastnosti výrobku v místě jejich vzniku. Hlavními parametry, které určují vliv studeného spoje, jsou rychlost vstřikování a teplota při které studený spoj vznikl (teplota taveniny a teplota formy). Vyšší rychlost vstřikování vede na tvorbu studeného spoje s přijatelnými mechanickými vlastnostmi. Rychlejší čela tavenin do sebe narazí a lépe se propojí, což se pozitivně projeví v pevnosti vzniklého studeného spoje. Teplota, která zásadně ovlivňuje viskozitu taveniny, hraje nejvýznamnější roli při tvorbě studených spojů. Obecně se udává, že pokud teplota v místě studeného spoje neklesne o 5 °C pod teplotu taveniny na začátku vstřikování, studený spoj pak výrazně neovlivní mechanické vlastnosti výrobku. [16] [27]

2.5.3 Tokové čáry

Tokové čáry jsou estetické vady na povrchu výrobku. Jedná se o přímé nebo klikaté stopy, které vznikají při špatně nastavené rychlosti vstřikování a vyskytují se převážně v oblasti vtokového ústí. Jejich příčinou je nevhodné nastavení procesních podmínek (primárně teplota formy, teplota taveniny a tlak) nebo nesprávně řešený a dimenzovaný vtokový systém. Tokové čáry mohou rovněž signalizovat špatné vysušení materiálu a jeho vysokou vlhkost nebo znečištění. Tokové čáry mohou ukazovat na problémy s plněním, kdy při příliš nízkých hodnotách vstřikovací rychlosti dochází k tvorbě tzv. váhavých tokových čar. [16] [27]

2.5.4 Nedostříknutý výrobek

Vzniká při neúplném zaplnění tvarové dutiny, kdy tato je naplněna pouze do určité části. Vzniká zmetek, který není úplný a který nemůže plnit svou funkci. Nedostříknuté místo je zpravidla to, které je nejvíce vzdáleno od vtokového ústí. Mezi příčiny nedostříknutí výrobku patří např. nedostatečná dávka vstříknutého materiálu, unikající tavenina v určitém místě (tryska vstřikovacího stroje, zpětný uzávěr u špičky šneku, horký rozvodný blok), nízký tlak vstřikování, nízká hodnota dotlaku, příliš nízká teplota taveniny a nízký index toku taveniny, nízká teplota formy nebo nevhodně navržené a umístěné ústí vtoku. [16] [27]

2.5.5 Vnitřní pnutí ve výstřiku

Vnitřní pnutí se vyskytuje ve všech vstřikovaných výrobcích. Vzniká během proudění taveniny a během následného chladnutí výrobku, respektive při jeho vyhazování z formy. Veškeré pnutí ve výrobku je sčítáno a výsledná napjatost je tedy součtem mnoha faktorů. Nejvíce pnutí vzniká v kritických místech výrobku, v oblasti vtokových ústí, otvorů, tenkých stěn a v oblasti studených spojů. Konstrukce výrobku, formy a nastavení výrobního procesu by měly být takové, aby výsledné pnutí ve výrobku bylo co nejmenší, kdy vysoké hodnoty vnitřního pnutí mohou vést k ovlivnění mechanických vlastností výrobku či dokonce k jeho prasknutí. [16] [27]

2.5.6 Propadliny a vtaženiny

Propadliny jsou oblasti na povrchu dílu, které jsou prohloubené a zasahují tak do povrchové kvality dílu. Vyskytují se zejména v místech s velkým množstvím materiálu, tedy u tlustostěnných výrobků. Jejich odstranění je velice náročné, doporučená zásada pro minimalizování propadlin je umístit vtokové ústí tak, aby se nejprve plnily nejsilnější části výrobku a až poté části s menším průřezem. Velký vliv na tvorbu propadlin má také dotlaková fáze. Propadliny vznikají při smršťování materiálu a postupují z povrchu do středu materiálu. Velkou roli hrají propadliny u optických tlustostěnných prvků, protože v místě vzniku propadliny dochází k rozdílnému lomu světla a součást pak má anizotropické optické vlastnosti. [16] [27] [28]

2.5.7 Deformace výrobku

Deformace je definována jako změna tvaru a rozměrů výstřiku oproti jeho výkresu nebo 3D modelu. Deformace může být způsobena mnoha faktory, zejména pak špatnou konstrukcí výrobku, špatně zvoleným materiálem nebo špatně zvolenými procesními podmínkami. [16]

2.5.8 Rozdíl v lesku a desénu

Špatně okopírovaný tvar dutiny formy nebo rozdíly v lesku a matné skvrny se projevují v místech výrobku, která jsou nejdále od vtokového ústí a kde je tedy omezené působení dotlakové fáze. Další příčinou může být orientace makromolekulárních řetězců materiálu, která následně ovlivní tokové chování v různých částech dutiny formy. Nevykopírování desénu je problematické např. u čoček do projektorů, které jsou z jedné nebo z obou stran vybaveny desénem pro optimální rozložení světla. [16] [27]

2.5.9 Opalescence a anizotropie optických vlastností

Opalescence hraje roli u transparentních materiálů. Jedná se o rozptýlení dopadajícího světla z důvodu přítomnosti cizí látky. Může být způsobena znečištěním plastikační jednotky, kdy se kousky nečistot dostávají do výrobku a následně způsobují zhoršení optických vlastností a namodralý barevný odstín. [16]

2.5.10 Stříbrné pruhy na výrobku

Stříbrné pruhy se vyskytují u výrobků, které byly vstřikovány ze špatně vysušených materiálů s velkou vlhkostí nebo u materiálů s těkavými látkami (PVC). Dále mohou vznikat vysokým smykovým namáháním polymerní taveniny, vstřikovací rychlostí a nevhodně zvolenou teplotou taveniny a formy. Jedná se o vějířovité paprskovité tvary na povrchu výrobku. Vznikají tím, že se částice vody nebo těkavé látky mění při zpracování v plyny a tyto vzniklé plynové bublinky v materiálu praskají. Prasknutím bublinky dojde k rozstříknutí taveniny plastu ve směru jeho proudění a ve vytvoření vějířovité struktury. [16]

2.5.11 Rýhovaný a pórovitý povrch výrobku

Příliš vysoký odpor taveniny v tvarové dutině může vést k vytvoření rýhovaného povrchu (efekt gramfonové desky) nebo k tvorbě drsného a pórovitého povrchu (efekt pomerančové kůry). Tok taveniny je díky velkému odporu ovlivněn a dochází k jeho pulsaci. Pro snížení odporu při toku taveniny je možné zvýšit její teplotu, zvýšit teplotu formy nebo zvýšit tlak a rychlost vstřikování. [16]

2.5.12 Trhliny a mikrotrhliny na povrchu výrobku

Na tvorbu trhlin jsou nejvíce náchylné amorfní termoplasty. Trhliny vznikají v místech, kde se mění tloušťka stěn, v okolí vtokového ústí a v rozích výrobků. Jedná se rovná nebo zakřivená místa tenká místa na povrchu, ve kterých došlo k odtržení materiálu a jsou

převážně způsobeny vnitřním pnutím ve výrobku. Trhliny se dělí podle charakteru na trhliny izolované, větvené a síťované. Trhliny lze eliminovat úpravou dotlakové fáze, odstraněním míst na výrobku, která koncentrují napětí (ostré hrany, podkoso, přechody silných a tenkých stěn) nebo upravením polohy vtokového ústí.[16]

2.5.13 Hnědnutí a žloutnutí povrchu výrobku

Hnědnutí a žloutnutí jsou jevy spojené s tepelnou degradací polymerních materiálů. Dochází k nim především při dlouhých prodlevách materiálu v plastikační jednotce vstřikovacího stroje nebo při příliš vysoké hodnotě teploty taveniny a teplotě formy. Hnědnutí může být také způsobeno lokálním vysokým smykovým namáháním v úzkých místech, které se projeví zvýšením teploty. V krajním případě může vlivem špatně nastavené teploty dojít k degradaci materiálu již při samotném sušení. [16]

2.5.14 Spálená místa na výrobku

Spálená místa na výrobcích vznikají ve formách, které jsou špatně odvdzdušněny. Před vstřikováním je forma naplněna vzduchem, který je poté ve formě uzavřen před vstříknutou taveninou. Uzavřený vzduch je postupující taveninou stlačován a nemá kam uniknout. Adiabatické stlačování vzduchu vede k razantnímu zvýšení teploty a následuje jeho vzplanutí, které se projeví vznikem černé skvrny na výrobku. Vznik spáleného místa se odborně nazývá jako Dieselův efekt. Předjít se mu dá umístěním odvdzdušňovacích kanálů v místech, ve kterých k uzavírání vzduchu dochází. [16] [27]

2.5.15 Černé tečky ve výrobku

Vznik černých teček je spojován se znečištěnou plastikační jednotkou a se špatně roztaveným materiálem. Přítomnost cizího materiálu, který vysokou teplotou degraduje, oxiduje a je strháván do taveniny, se projeví na stěnách nebo uvnitř výrobku ve formě částic s černou barvou. Tato vada je viditelná zejména u transparentních optických prvků. [16] [27]

2.5.16 Volný tok taveniny (jetting)

K volnému toku taveniny dochází při vysoké rychlosti vstřikování. Tavenina poté neplní dutinu formy fondánovým tokem, ale ve formě úzkého paprsku narazí na protější stěnu od vtoku a forma je pak plněna z opačné strany. Proud taveniny se velice obtížně spojuje s taveninou, která do dutiny přitéká a vzniká tak efekt volného paprsku, který znehodnocuje optické a mechanické vlastnosti výrobku. [16] [27]

3 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je komplexní nástroj, který slouží k udělení tvaru budoucímu výrobku a skládá se z velkého množství komponent. Primární funkcí vstřikovací formy je rozvést taveninu od trysky vstřikovacího stroje tak, aby dostatečně rychle a zcela zaplnila všechny tvarové dutiny formy (jsou negativem tvaru vyráběné součásti) a součást tak mohla být vytvarována do finální podoby. Sekundární funkcí vstřikovací formy je účinný odvod tepla ze zpracovávaného materiálu tak, aby výrobek byl vytvořen co nejrychleji, cyklicky, nejjednodušeji avšak v požadované kvalitě. Dále musí být forma navržena tak, aby mohlo dojít k efektivnímu vyhození výstřiku bez jeho nadměrného namáhání. Jedná se o velmi nákladný nástroj, který musí odolávat teplotnímu a mechanickému namáhání. Existuje celá řada typů vstřikovacích forem, které se odvíjí od geometrie a charakteru vyráběné součásti, běžně se však formy skládají ze dvou částí (pohyblivá a nepohyblivá část). Konstrukce vstřikovací formy by měla zohlednit kompromis mezi technologickými požadavky (pravidla pro konstrukci) a konstrukční a výrobní složitostí navržené formy. [29] [30]

Forma je poměrně složitá a komplikovaná sestava mnoha systémů, které se skládají z konstrukčních prvků (slouží k zajištění správné funkce formy) a prvků funkčních (jsou ve styku se zpracovávaným materiálem). Drtivou část prvků, ze kterých je forma složena, lze vybírat z normalizovaných součástí od široké škály dodavatelů (Hasco, Meusburger). Normalizované části pomáhají urychlit a usnadnit konstrukci samotné formy, navíc lze díky nim razantně snížit celkové náklady na pořízení vstřikovací formy a její následnou údržbu. Další prvky formy, jako třeba tvarové části vymezující tvarovou dutinu, vyhazovače nebo boční tvarová jádra, se vyrábí speciálně pro každý výrobek, s ohledem na jeho tvar, geometrii a způsob zaformování. Základní prvky, ze kterých je forma složena, jsou následující: [29] [30]

- Tvarové části (tvárník, tvárnice, boční tvarová jádra),
- vodící, středící a manipulační prvky (vodící čepy a pouzdra, středící trubky, středící kroužky, závěsná oka),
- vtokový systém (vtoková vložka, rozvodné kanály, horké rozvodné bloky),
- temperační systém (temperační kanály, temperační médium, spojovací součásti),
- vyhazovací systém (vyhazovače, stírací desky, pneumatické vyhazování).

3.1 Tvarové části

Tvarové části patří mezi nejdůležitější prvek formy. Tvoří negativ tvaru výrobku a vstříknutý materiál po zatuhnutí přebírá tvar, který vymezují. Základní tvarové části, které vytváří tvarovou dutinu, se nazývají tvárnice a tvárník. Tvárnice je zpravidla umístěna v pravé, nepohyblivé části formy a tvárník pak v části pohyblivé. Plocha, která vymezuje jejich styk, a tedy styk obou polovin formy, se nazývá hlavní dělicí rovina. V převážné většině případů je vnější tvar součástí vytvořen pomocí tvárnice a tvárník pak vymezuje její vnitřní část. U plochých součástí bez vypouklého tvaru jsou pak tvárník a tvárnice většinou symetrické. Tvárník s tvárnici mohou být doplněny různými tvarovými jádry, které slouží k tvorbě částí dílů, které se nevytváří kolmo na směr hlavní dělicí roviny (boční otvory, podkoso). [29] [31]

Pro zajištění přesných rozměrů výrobku je nutné tvarové části zvětšit o hodnotu smrštění výrobku, dle použitého materiálu. Tvarové části je rovněž nutné opatřit patřičnými úkoso pro usnadnění odformovatelnosti výrobku. Tvarové části jsou převážně řešeny jako vložky, které se vkládají do desek formy a které lze v případě nutnosti snadno vyměnit, v některých případech je tvar součástí vytvořen přímo do desek formy. Počet párů tvarových vložek (tvárníku s tvárnici) určuje násobnost formy, tedy kolik výrobků bude vytvořeno během jednoho vstřikovacího cyklu. [29] [31]

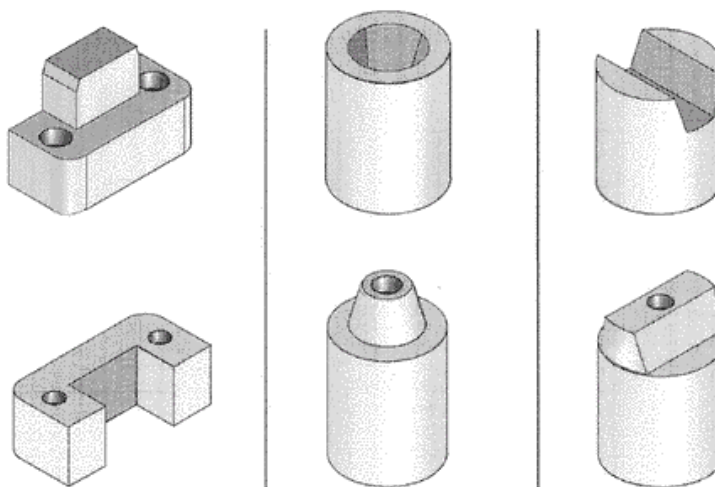
Tvarové části jsou vysoce tepelně a mechanicky namáhány. Musí odolávat vysokým teplotám a tlakům polymerní taveniny a jsou tedy vyráběny z vysoce odolných materiálů, zejména z kalené nástrojové oceli. Tloušťka tvarových částí nebo desek je volena s ohledem na prostor pro umístění temperačních kanálů. Šířka a délka desek pak závisí na geometrii vyráběné součásti. Návrh tvarových desek musí zohlednit i jejich vyrobiteľnost. V současné době se pro jejich tvorbu využívají konvenční metody obrábění (frézování, leštění, broušení), nekonvenční metody obrábění (elektrojiskrové, chemické, elektrochemické) nebo se vyrábí metodou 3D tisku, konkrétně metodou DMLS (Direct Metal Laser Sintering), která funguje na principu spékání kovového materiálu ve formě prášku pomocí laseru. [29] [31]

3.2 Vodicí, středící a manipulační prvky

Vodicí, středící a manipulační prvky jsou normalizované součásti, které se používají pro správný chod vstřikovací formy. Pro přesné vedení pohyblivé části formy vůči nepohyblivé a pro vedení vyhazovacího systému se využívají vodicí čepy a vodicí pouzdra. Vodicí prvky se vyrábí v různých materiálových variantách. Obecně platí, že je vhodné využít vodicí

prvky co největší, dle rozměrových možností formy. Využití vodicích prvků s většími rozměry nemá výraznější vliv na zvýšení nákladů za formu, razantně však přispívá k robustnosti a pevnosti formy. Vodicí sloupek je umístěn v nepohyblivé části formy a vodicí pouzdro v části pohyblivé, při pohybu formy dochází k pohybu vodicího sloupku v pouzdře. Typická hodnota vůle mezi vodicím sloupkem a pouzdem bývá cca 0,03 mm. [30] [31]

Pro vystředění desek formy vůči upínací desce a vodicímu sloupku se využívají středící trubky. Ty zajišťují přesnou a správnou polohu desek, kterými prochází. Při zavírání formy dochází k zajetí vodicího sloupku do vodicího pouzdra. Pro vystředění vstříkovací formy vůči vstříkovacímu stroji slouží středící kroužky. Středící kroužek také pomáhá navést trysky vstříkovacího stroje k vtokové vložce, ke středění dochází pomocí jeho vnějšího průměru. Pro přesné vystředění pohyblivé části formy vůči nepohyblivé se forma osazuje středícími zámkami. Obecně je vhodné využít menší množství větších středících zámků, aby byl středící účinek co nejefektivnější. Středící zámek je rozdělen na dvě části, které jsou připevněny na obě části formy. Po uzavření formy dojde k jejímu vystředění zajetím vystouplé části středícího zámku do protikusu. [30] [31]



Obrázek 15 – Typy středících zámků [31]

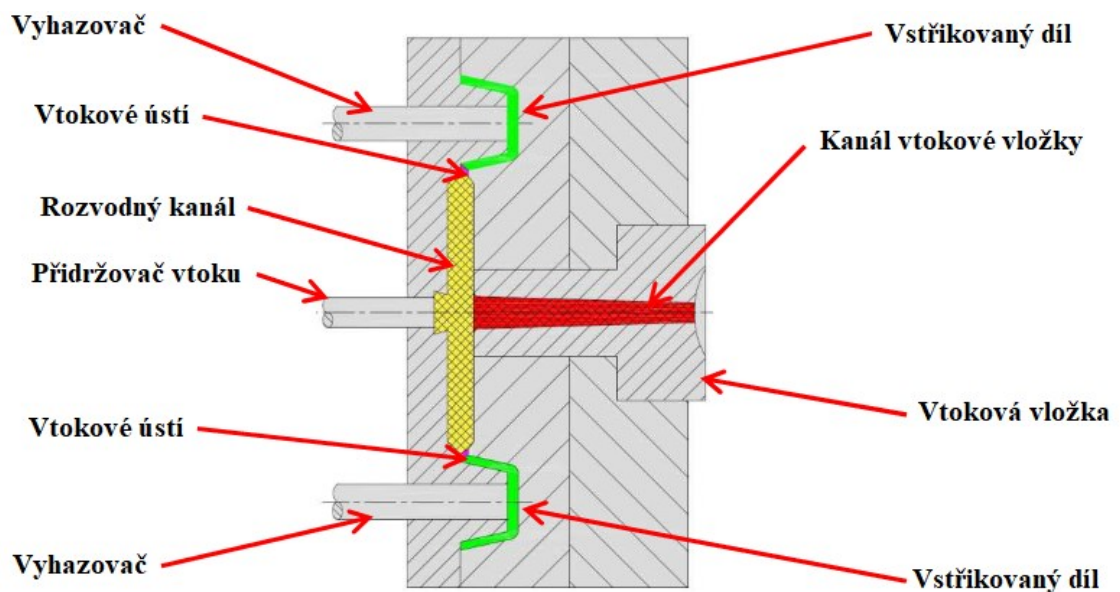
Pro manipulaci s formou při údržbě, ve skladu nebo při jejím ustavování na vstříkovacím stroji se používají manipulační oka nebo transportní můstky. Při manipulaci je nutné, aby všechny části formy byly spojeny k sobě a bylo tak zabráněno jejich pohybu. Manipulační oka by měla být umístěna v těžišti formy a jejich rozměry se volí ohledem na její celkovou hmotnost. Transportní můstky jsou vybaveny posuvným manipulačním okem, poskytují tedy možnost přesného vyvážení formy během manipulace spolu s připevněním transportního elementu mimo její těžiště. [30]

3.3 Vtokový systém

Vtokový systém formy udává trajektorii trajektorii taveniny a vede ji od trysky vstřikovacího stroje do tvarové dutiny formy. Typ a volba jednotlivých částí vtokového systému závisí na konstrukci výrobku, na druhu použitého materiálu a na násobnosti formy. U vícenásobných forem by měl být vtokový systém navržen tak, aby se všechny dutiny plnily rovnoměrně, stejnou rychlostí a pod stejným tlakem. Vtokové systémy se primárně dělí podle toho, zda je tavenina průchodem vstřikovací formou ohřívána nebo zda ve vtokovém systému tavenina zatuhne a spolu s výrobkem je poté z formy vyhozena jako odpad. Tímto způsobem se vtokové systémy dělí na studené a horké. [15] [31]

3.3.1 Studený vtokový systém

U forem se studeným vtokovým systémem je tavenina ochlazována bezprostředně po opuštění trysky vstřikovacího stroje. Studený vtokový systém je konstrukčně jednoduchý, levný a nenáročný na údržbu. Jeho nevýhodou je vyšší spotřeba materiálu, který v systému tuhne a během každého vstřikovacího cyklu musí být z formy vyjmut spolu s výrobkem. V některých případech bývá objem vyhozeného materiálu dokonce vyšší než objem výrobku. [15] [31]

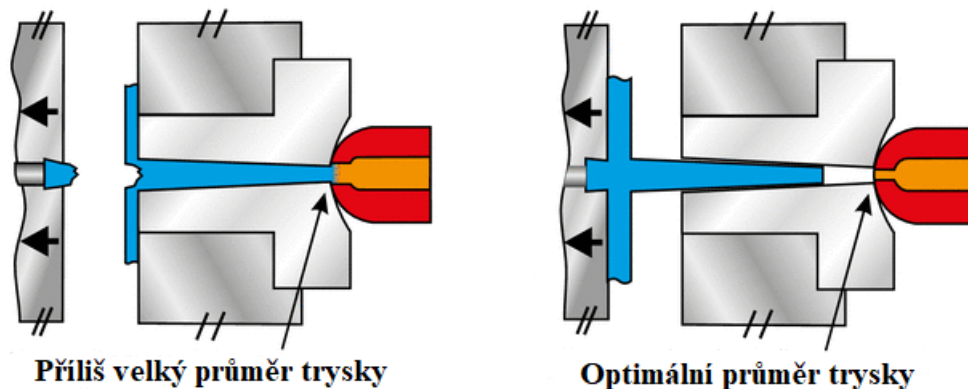


Obrázek 16 – Studený vtokový systém [32]

U forem s jednou tvarovou dutinou je dutina zpravidla umístěna uprostřed formy a od trysky vstřikovacího stroje je tavenina vedena do dutiny přímo přes vtokovou vložku, která na trysku přiléhá. Plnění přes vtokovou vložku zanechává po oddělení vtokového zbytku na dílu poměrně velkou stopu, která se obtížně odstraňuje. U vícenásobných forem

je tavenina přes vtokovou vložku přiváděna do rozvodných kanálů, které ji dále vedou skrz vtokové ústí do jednotlivých dutin. Studený vtokový systém bývá pro snadné vyjmutí standartně vytvořen v dělicí rovině formy. [15] [31]

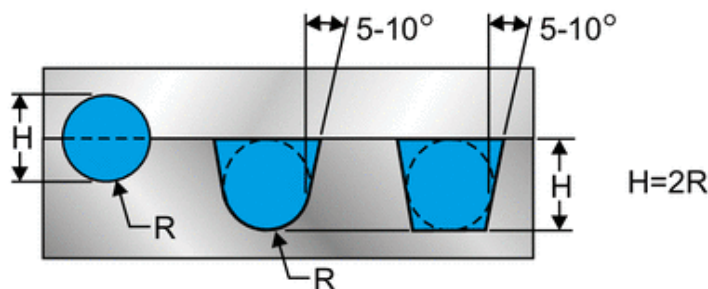
Vtoková vložka je součást vystavená vysokému teplotnímu a mechanickému namáhání. Musí odolávat teplotnímu a tlakovému působení proudící taveniny, navíc je cyklicky namáhána nárazy tryskou vstřikovacího stroje při příjíždění plastikační jednotky. Z těchto důvodů jsou vložky vytvořeny z vysoce odolných houževnatých, tepelně zpracovaných materiálu (kalená nástrojová ocel). Vložky jsou pro možnost snadné vyměnitelnosti vyráběny jako normálie v různých rozměrových škálách. Povrch vtokového kanálu vložky je leštěn a rozšiřuje se směrem k dělicí rovině formy tak, aby bylo možné bez obtíží vyjmout zatuhlý vtokový zbytek. Velký důraz je kladen na styčnou plochu vložky s tryskou vstřikovacího stroje. Průměr otvoru ve vtokové vložce by měl být o něco větší, než je otvor trysky stroje, dle zakončení trysky je pak styčná plocha vložky vytvořena s odpovídajícím zaoblením. [15] [31]



Obrázek 17 – Zobrazení chybné (vlevo) a správné (vlevo) styčné plochy mezi tryskou a vložkou [15]

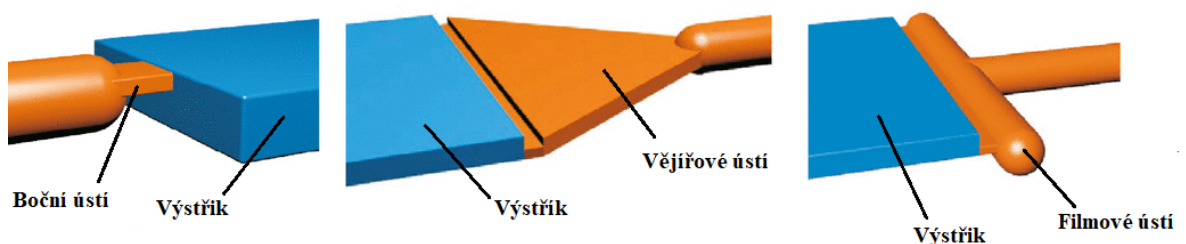
Rozvodné kanály slouží k vedení taveniny od vtokové vložky k vtokovému ústí. Jsou vytvořeny v dělicí rovině, zpravidla pak pouze v jedné polovině formy. Výjimkou jsou rozvodné kanály kruhového průřezu, které jsou vytvořeny do obou polovin formy. Nevýhoda kruhových kanálů je v tom, že vyžadují dokonalý kontakt obou částí formy bez netěsností. Alternativními tvary kruhového kanálu, které lze vyrábět pouze do jedné poloviny formy, jsou kanály lichoběžníkové, půlkruhové nebo parabolické. Oproti kruhovým kanálům jsou však méně účinné a vykazují vyšší tlakovou ztrátu. Konstrukční řešení kanálů musí zajistit rovnoměrný tok taveniny ke všem dutinám formy. Obecně platí, že kanály by měly být co nejkratší, s co nejmenšími tlakovými ztrátami. Dalším pravidlem je jejich odstupňování, kdy směrem od vtokové vložky kanály zmenšují svůj průřez. Průřez kanálů se volí s ohledem

na velikost výrobku, je důležité, aby materiál v kanálech neztuhl příliš brzo a nebyla tak ovlivněna fáze dotlaku taveniny. Příliš velké průřezy kanálů naopak zbytečně prodlužují dobu chlazení a zvyšují tak náklady na cyklus. Kanály jsou leštěny, ideálně bez ostrých hran a v oblastech změny směru toku se v nich vytváří jímky pro zachycení chladného čela taveniny. Pro zajištění přidržení vtokového zbytku na pohyblivé části formy se rozvodné kanály a vtoková vložka osazují tzv. přidržovači vtoku, které díky podkosu přidrží zatuhlý vtokový zbytek na pohyblivé straně a zajistí jeho vyhození z formy. [15] [31]



Obrázek 18 – Kruhový (vlevo), parabolický (uprostřed) a lichoběžníkový (vpravo) tvar rozvodného kanálu [15]

Vtokové ústí spojuje rozvodné kanály s dutinou vstříkovací formy. Jedná se o zúženou část studeného vtokového systému, kterou tavenina proudí do dutiny. Velikost, tvar a umístění vtokového ústí jsou kritické parametry pro správné vstříknutí výrobku. Vtokové ústí by mělo mít co nejmenší rozměry, aby bylo možné oddělit zatuhlý vtokový zbytek od výrobku a aby bylo zabráněno zpětnému chodu taveniny do vtokového systému. Příliš nízké rozměry vtokového ústí však mohou vést k problémům při plnění dutiny nebo k nadměrnému smykovému namáhání taveniny a k jejímu lokálnímu zahřívání a následné degradaci. Doporučená tloušťka ústí je okolo 40 – 70 % tloušťky stěny dílu, délka ústí by měla být co nejmenší, pro zamezení tlakových ztrát. Kratší ústí vtoku má také pozitivní vliv na fázi dotlaku. Ústí by mělo být umístěno na nepohledových místech a v nejsilnějších částech výrobku, u optických částí pak v místech, která neovlivňují optický výkon prvku. Typů vtokových ústí je celá řada, volí se s ohledem na geometrii a tvar výrobku. Pro tlustostěnné optické prvky se nejčastěji využívají vtoková ústí vějířová, filmová, šterbinová, boční nebo vtoková ústí s nálitkem. [15] [31]

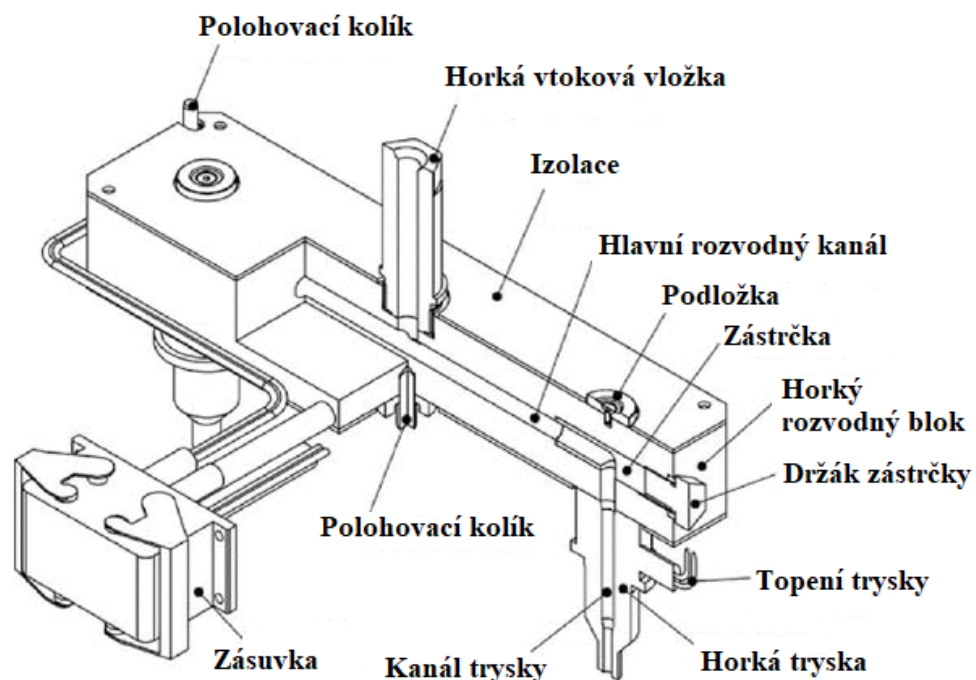


Obrázek 19 – Typické tvary vtokových ústí pro tlustostěnné součásti [15]

3.3.2 Horký vtokový systém

Horké vtokové systémy udržují konstantní teplotu taveniny po celou dobu jejího toku ve formě. Horký vtokový systém musí být navržen tak, aby odolával vysokým teplotám a tlakům. Je třeba zajistit dostatečnou izolaci mezi horkým vtokem a studenými částmi formy tak, aby byly tepelné ztráty co nejnižší. Horké systémy poskytují celou řadu výhod pro průběh vstřikovacího cyklu, mají však i své nedostatky. Primárními částmi horkého vtokového systému pro vícenásobné formy jsou horká vtoková vložka, horký rozvodný blok a horká tryska. Hlavními výhodami oproti studeným vtokovým systémům jsou: [15] [31]

- Absence vtokového zbytku a menší spotřeba materiálu,
- rychlejší čas vstřikovacího cyklu (kratší doba chlazení, menší objem vstřikovaného materiálu, kratší čas vstřikovací fáze),
- zmenšení potřebného zdvihu pro vyhození výrobku,
- homogenní vlastnosti materiálu díky řízenému průběhu teploty taveniny,
- možnost vstříknutí většího objemu taveniny,
- snížení velikosti uzavírací síly a vstřikovacího tlaku,
- možnost plné automatizace a zvýšení produktivity,
- výhodné použití pro etážové formy.



Obrázek 20 – Řez horkým rozvodným blokem [29]

Mezi nevýhody horkých vtokových systémů se řadí: [15] [31]

- Vysoké náklady na pořízení a údržbu,
- konstrukční náročnost všech částí systému,
- nevhodné pro teplotně citlivé plasty,
- často použitelné pro jeden typ materiálu nebo více materiálů s podobnými vlastnostmi,
- obtížnější chlazení části výrobku v blízkosti horkého vtoku,
- obtížná změna polohy vtoků.

Horký rozvodný blok slouží k rovnoměrné dopravě taveniny k horkým tryskám. Jedná se o element, který spojuje horkou vtokovou vložku a horké trysky a využívá se převážně u vícenásobných forem. Je ustaven mezi deskami formy, ve kterých je uložen s vůlí pro zamezení tepelných ztrát. Jeho hlavním úkolem je udržovat konstantní teplotní pole v celém objemu taveniny při jejím průchodu od vytlačovacího stroje až do dutin formy. Tvar horkého rozvodného bloku je určen počtem vstřikovaných výrobků a jejich uspořádáním ve formě. Průřez rozvodných kanálů může být větší než u studeného vtokového systému, protože všechen materiál je tlačěn do dutin formy a nedochází k jeho zatuhnutí. Vyhřívání bloku je zajištěno topnými odporovými elektrickými vodiči usazenými v drážkách na jeho povrchu nebo pomocí topných patron, které jsou uloženy uvnitř bloku. [15] [29] [31]

Horké trysky jsou připevněny k bloku a vedou z něj taveninu přímo do dutin formy. Existují dva typy trysek – trysky těsnicí a trysky šroubovatelné. Tlakové těsnicí trysky se používají převážně při potřebě krátké trysky (do 180 mm), trysky s malým průměrem (do 25 mm) nebo pro formy s vysokou násobností. Šroubovací trysky jsou opatřeny závitem, přes který jsou připevněny k horkému bloku. Šroubovací spojení poskytuje vysokou těsnost a je vhodné zejména pro dlouhé trysky a trysky s velkým průměrem. Trysky jsou vyhřívány topnými tělesy a jsou zakončeny zúženým ústím. V případě vstřikování polymerů, které táhnou vlas, se konec trysky po vstříknutí automaticky utěsňuje uzavírací jehlou, u ostatních polymerů je konec trysky otevřený s hrotem nebo bez hrotu. Po vstříknutí taveniny a jejím naplnění do dutiny formy se u hrotu trysky, která je v kontaktu se studenou částí formy, tvoří zatuhlá část, která je v dalším vstřikovacím cyklu tlakem taveniny protržena a proces se opakuje. Zatuhlá blanka je přicházející taveninou a smykovým působením znovu roztavena, nemá tedy negativní vliv na vlastnosti výrobku. [31]

3.4 Temperační systém

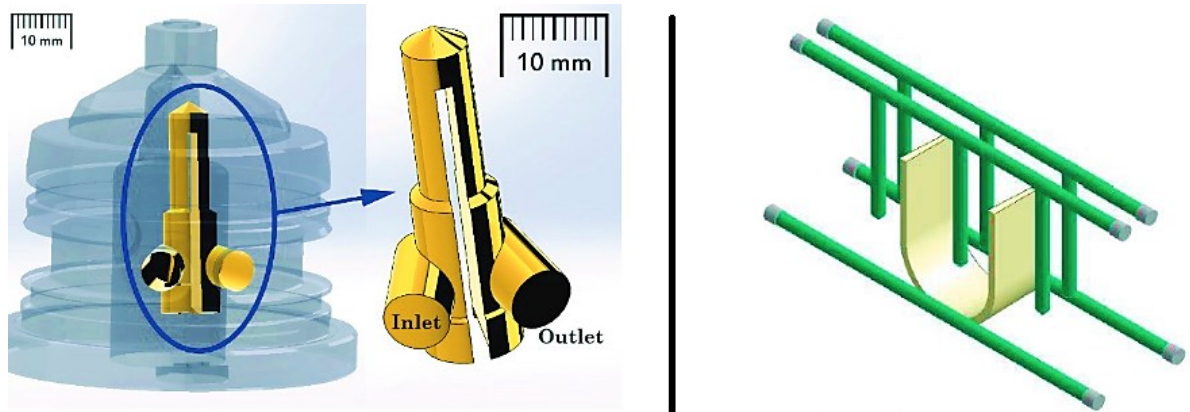
Temperační systém slouží k nastavení a udržení požadovaného teplotního pole ve formě. Je tvořen pasivní a aktivní temperací. Pasivní temperace zabráňuje úniku tepla z formy do okolí a do upínacích desek vstřikovacího stroje. Pro pasivní temperaci se využívají tepelně izolační materiály na bázi pryskyřic nebo sklotextitu, případně desky z PA 66. Aktivní temperací se rozumí využití temperačního média, proudícího v temperačním okruhu. Temperačním médiem může být voda, olej nebo glycerol, případně jejich kombinace. Aktivní temperace před začátkem vstřikování vyhřívá formu na požadovanou teplotu, při vstřikovacím cyklu pak slouží k odvodu tepla přivedeného taveninou a ovlivňuje tedy dobu chladnutí výrobku. Temperační systém má velký vliv na celkový čas vstřikovacího cyklu a na výsledné hodnoty deformace a smrštění výstřiku, musí být tedy navržen co nejefektivněji a podle doporučených zásad. Pro návrh temperačního okruhu platí tyto zásady: [30] [31]

- V okruhu nesmí vznikat mrtvá místa s omezeným prouděním média,
- u temperačních kanálů s průměrem menším než 6 mm hrozí při temperaci vodou zanášení nečistotami a vodním kamenem,
- efektivnější je využití většího množství temperačních kanálů o menším průměru,
- rozdíl teploty temperačního média na vstupu a výstupu by neměl být vyšší než 3 °C,
- médium by mělo proudit turbulentně (hodnota reynoldsova kritéria vyšší než 2300),
- temperační médium by při odvodu tepla mělo cirkulovat z míst od nejvyšší teplotě k místům nejchladnějším,
- velká pozornost by měla být věnována chlazení v oblastech vtokového ústí,
- rozmístění kanálů musí být provedeno s ohledem na tuhost formy a v optimální vzdálenosti od dutin formy.

3.4.1 Konvenční temperace

Konvenčně je temperační systém v závislosti na tvaru výrobku řešen jako kombinace vrtaných nebo frézovaných kanálků kruhového tvaru, kterými proudí temperační médium a různých typů spirálových nebo plochých přepážek, které temperují dlouhé a úzké tvarové části. Výhodou konvenčního způsobu temperace je jeho poměrně jednoduchá a levná výroba konvenčními způsoby obrábění. Tok média je usměrněn pomocí ucpávek, které jsou velmi

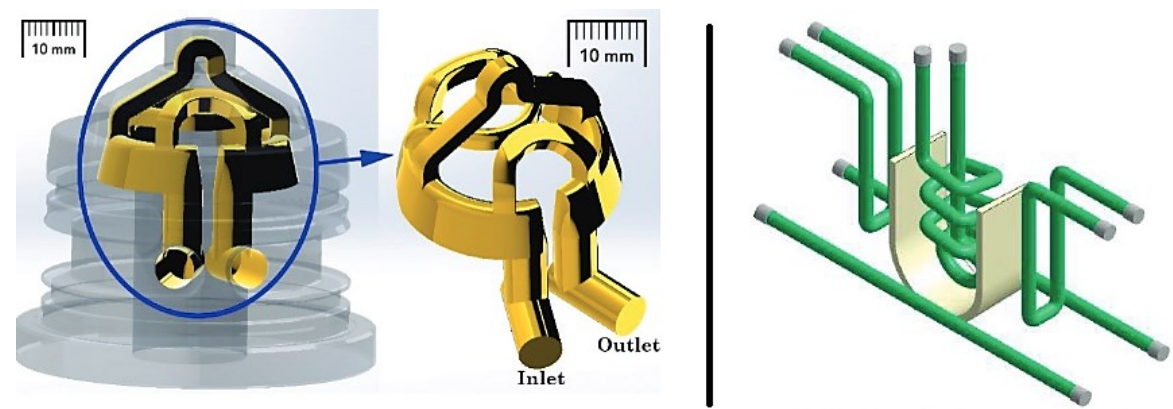
levné a jejich instalace do vytvořených temperačních kanálů je snadná. Nevýhodou konvenčního způsobu temperace je nemožnost přesně okopírovat konturu vstříkovaného dílu (zejména u tvarově složitých dílů), efektivita chlazení je tedy omezená. [30] [31]



Obrázek 21 – Příklady konvenční temperace [33] [34]

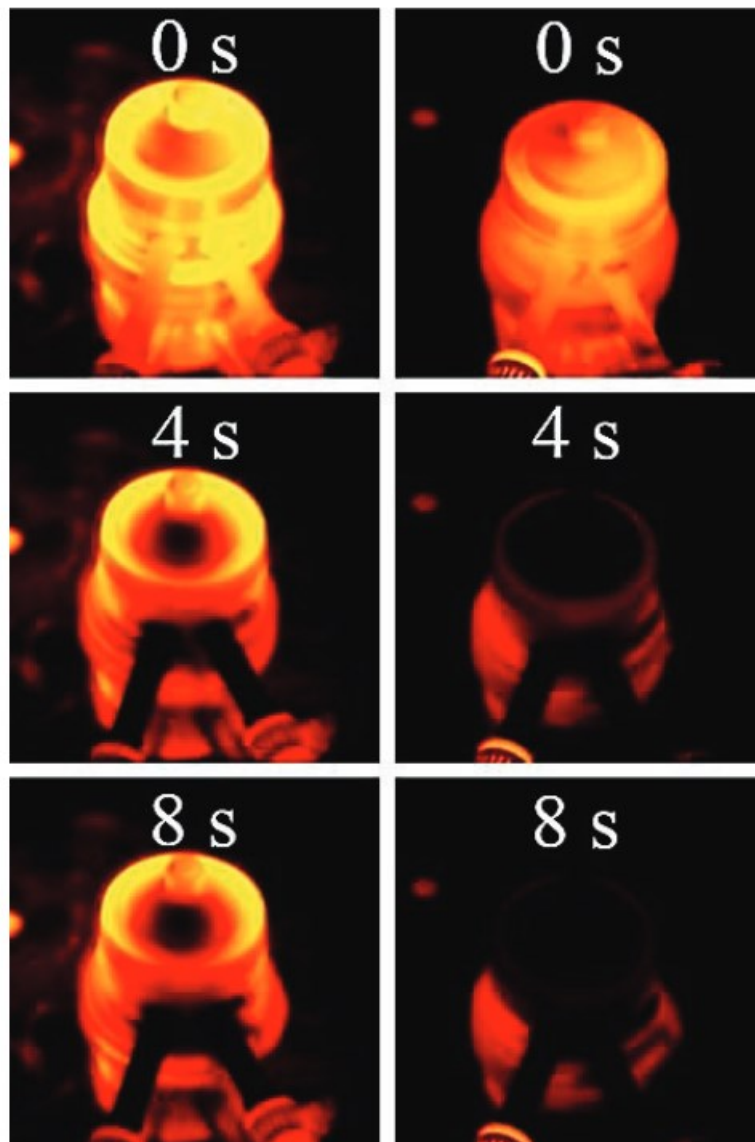
3.4.2 Konformní temperace

Konformní temperace byla vyvinuta pro zefektivnění chlazení. Konformní temperační okruh přesně kopíruje konturu výrobku a účinnost odvodu tepla je tedy vyšší než u temperace konvenční. Využitím konformního chlazení lze snížit čas vstříkovacího cyklu až o 40 %, vstříkované díly chlazené konformně vykazují rovněž nižší hodnoty deformací a vyšší rozměrovou přesnost. Nevýhodou konformního chlazení jsou vysoké náklady na výrobní proces tvarových částí. Průřez kanálů konformního temperačního okruhu se může snadno měnit tak, aby se trajektorie temperace nestřetla s dalšími prvky formy (např. s vyhazovacími kolíky). Pro výrobu tvarových částí nebo vložek s konformním chlazením se využívá metoda DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Jedná se o spékání kovového prášku v tenkých vrstvách pomocí laserového paprsku. [33] [34]



Obrázek 22 - Příklady konformní temperace [33] [34]

V některých případech se využívá metoda hybridního obrábění, kdy je určitá část tvarové vložky vytvořena konvenčním způsobem obrábění a tvarově složitě části pak metodou DMLS. Výhodou DMLS je tvorba funkčního dílu přímo z jeho 3D modelu, nevýhodou je vysoká cena výrobku. Materiálem pro DMLS je nástrojová ocel nebo různé slitiny na bázi bronzu v práškovém stavu. Nejmenší možný průřez temperačních kanálů, které lze metodou DMLS vyrobit, se pohybuje okolo 1 mm, jako nejmenší doporučený se však udává průřez o velikosti 2 mm a vyšší. Mnoho studií potvrdilo zvýšenou účinnost odvodu tepla pomocí konformního chlazení. Obrázek 23 ukazuje porovnání chlazení tvarové části s konvenčním temperačním okruhem a s konformním temperačním okruhem, zachycené termální kamerou. Z obrázku je patrná vysoká účinnost a uniformita chlazení tvarové části opatřené konformním chlazením, jejíž teplota klesla výrazně rychleji. [33] [34]

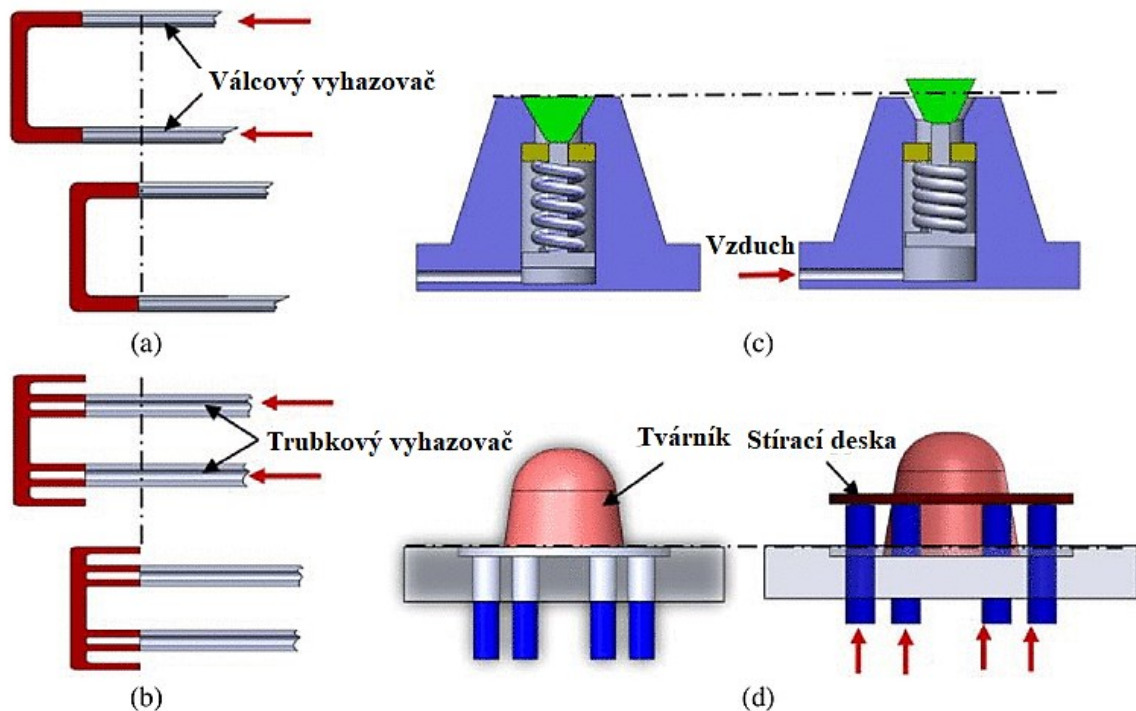


Obrázek 23 – Porovnání teplotního pole tvarové části s konvenční temperací (vlevo) a konformní temperací (vpravo) v čase [34]

3.5 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém se skládá z komponent, které ve formě zajišťují vyhození výstřiku, případně studeného vtokového zbytku. Existuje celá řada systémů pro vyhození výrobku, v závislosti na jeho tvaru a rozměrech. Vyhození může být realizováno: [31] [35]

- Vyhazovacími kolíky,
- stírací deskou,
- pneumatickým vyhazováním,
- speciálními způsoby (vytáčení formy pro výrobky se závitem),
- kombinace výše uvedených.

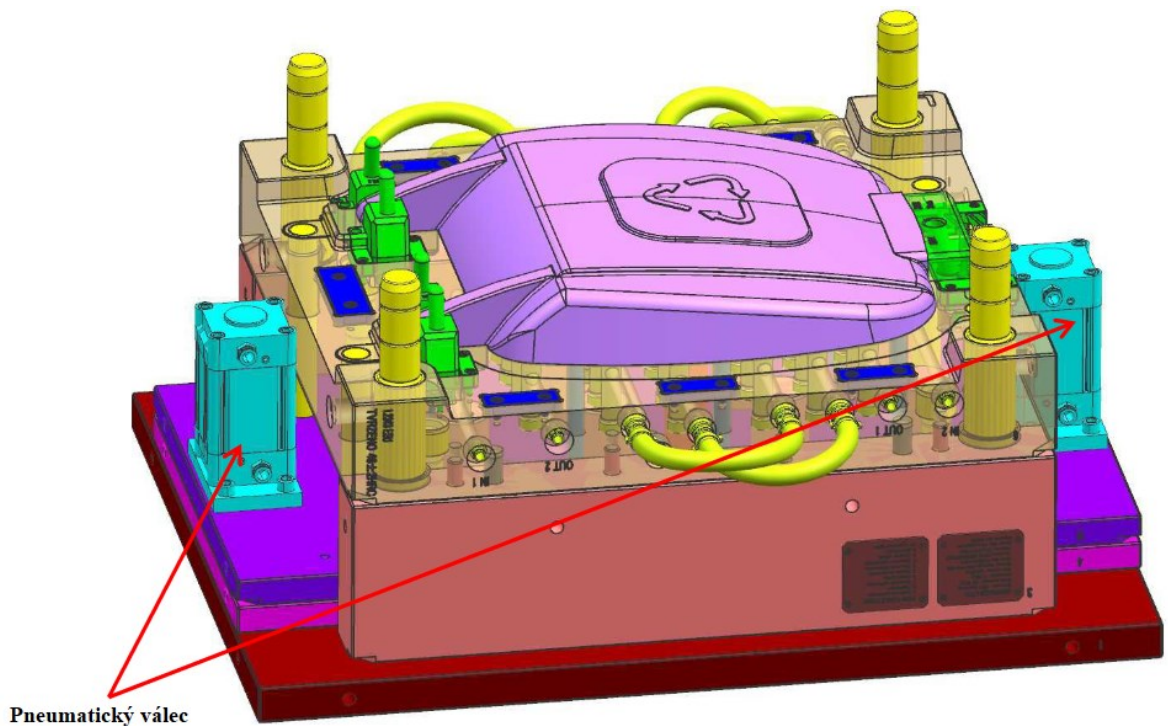


Obrázek 24 – Druhy vyhazování – a) Válcovým vyhazovacím kolíkem, b) Trubkovým vyhazovacím kolíkem, c) Pneumaticky, d) Stírací deskou [35]

Nejčastěji se vyhazování realizuje mechanicky, pomocí vyhazovacích kolíků. Celá sestava vyhazovacího paketu s vyhazovacími kolíky je složena z opěrné a kotevní desky vyhazovačů, vodicích čepů a vodicích pouzder, dosedacích podložek, táhla a ze samotných vyhazovacích kolíků. Vyhazovače jsou uloženy v kotevní desce vyhazovacího paketu a opírají se o desku opěrnou. Vodicí čepy a pouzdra vymezují správný pohyb vyhazovacího systému a vystředují ho vůči zbylým částem formy. Dosedací podložky jsou připevněny na opěrné desce vyhazovacího paketu a zamezují jejímu dosedání na upínací desku formy. [35]

Vyhazování je ve formách řízeno převážně automaticky, což vysoce usnadňuje výrobu a zkracuje čas výrobního cyklu. Po automatickém vyhození jsou výrobky vyhozeny vyhazovacím paketem a volným pádem jsou přesouvány do sběračů nebo na dopravní pás. Druhou možností je využití robotu, který spolu s pohybem vyhazovacího paketu vyjme výstřik a položí ho na předem stanovené místo. Základní podmínkou efektivního odformování výrobku je jeho zafixování na části formy, ze které má být vyhozen (nejčastěji pohyblivá část, u etážových forem více částí). Vyhození probíhá při otevírání formy, kdy otevírací zdvih musí být dostatečný k zajištění prostoru pro vyhození všech výrobků, případně vtokového systému. U etážových forem, které mají více vyhazovacích paketů, je nutné pro jejich ovládání využít kromě táhla vyhazovačů i další přídavné zařízení (pneumatické, hydraulické válce) viz *Obrázek 25*. [31] [35] [36]

Vyhazovací kolíky se ve formě umísťují tak, aby byla vyhazovací síla působící na výrobek co nejrovnoměrněji rozložena. Existuje mnoho typů provedení vyhazovacích kolíků, např. válcové, trubkové, prizmatické nebo ploché vyhazovače, vyrobené z kalené nástrojové oceli. Vyhazovače se umísťují na vnější okraje výrobku, proti žebrům a svislým stěnám a obecně do míst s vysokou masou materiálu. Konstruktor by se měl vyvarovat jejich umístění na pohledové plochy dílu a na plochy funkční. Vyhazovače jsou vůči ostatním částem formy uloženy s vůlí, lícuje se pouze jejich část v oblasti u výrobku. [36]



Obrázek 25 – Příklad ovládání vyhazovacího paketu pneumatickým válcem [36]

3.6 Materiály vstřikovacích forem

Jednotlivé části vstřikovací formy jsou vyrobeny z různých materiálů. Převažujícím materiálem je ocel různých tříd a se specifickým tepelným či povrchovým zpracováním. Kritéria pro výběr materiálu jsou následující: [37]

- Cena materiálu,
- dobrá obrobiteľnosť a nízke opotrebenie nástroje,
- odolnosť proti korozi a popoušťať,
- kaliteľnosť a povrchová kaliteľnosť,
- odolnosť proti opotrebeniu, teplotě, praskaniu a lámání,
- leštitelnost
- chromovatelnost, nitridovatelnost, PVD povlakovatelnost.

Na oceli pro výrobu forem jsou kladeny speciální požadavky. Neexistuje jedna jakostní třída, která by byla vyhovující pro všechny části formy. Pro výrobu funkčních částí formy, které přicházejí do styku s taveninou, je třeba použít kvalitnější a odolnější typy ocelí s odpovídající povrchovou a tepelnou úpravou. Pro konstrukční části formy se využívají levnější konstrukční oceli, které není třeba tepelně upravovat. [37]

3.6.1 Nelegované oceli pro formy

Jedná se o konstrukční oceli s vyšším obsahem uhlíku a dobrou obrobiteľnosť, avšak s horšími mechanickými vlastnosťmi. Patří mezi ně ocel 1.1730 (C45) nebo ocel 1.0060 (E335). Vyznačují se tvrdostí do 190 HB a používají se pro výrobu částí formy, které jsou méně mechanicky namáhány (rám a upínací desky formy). [37]

3.6.2 Kalené středně zušlechťené oceli pro formy

Oceli s tvrdostí 29 – 44 HRC. Jsou dobře obrobiteľné, odolné opotrebeniu a teplotě, chromovatelné, nitridovatelné a dobře leštitelné. Do této skupiny patří oceli 1.2311 (40CrMnMo7), 1.2312 (40CrMnMoS8-6), 1.2738 (40CrMnNiMo8-6-4) nebo 1.2711 (54NiCrMoV6). Jedná se o nástrojové oceli legované chromem, niklem, molybdenem, vanadem a manganem. Využití nachází ve výrobě tvarových částí pro formy na vstřikování a vstřikování s dolisováním a obecně pro díly, které jsou mechanicky a tepelně namáhány (tvárníky, tvárnice, boční tvarová jádra nebo vtokové vložky). [37]

3.6.3 Kalené vysocelegované oceli pro formy

Jejich vlastnosti jsou definovány podmínkami kalení. Tvrdost po kalení dosahuje hodnot cca 46 – 62 HRC. Mezi hlavní oceli této kategorie patří chrom-molybden-vanadové oceli 1.2343 (X37CrMoV5-1) a 1.2379 (X153CrMoV12), nikl-chrom-molybdenová ocel 1.2767 (45NiCrMo16). Vzhledem ke svojí nízké tuhosti (kromě oceli 1.2767) se nedoporučují pro formy s hlubokými tvarovými dutinami. Jsou naopak vhodné pro tvarové části s mělkými dutinami, ve kterých působí vysoké tlaky. Velmi dobře odolávají opotřebení, otěru, teplotě, jsou dobře leštitelné a vhodné pro povrchové úpravy. Používají se převážně pro výrobu tvarových částí a vložek namáhaných vysokými tlaky. [37]

3.6.4 Antikorozi oceli pro formy

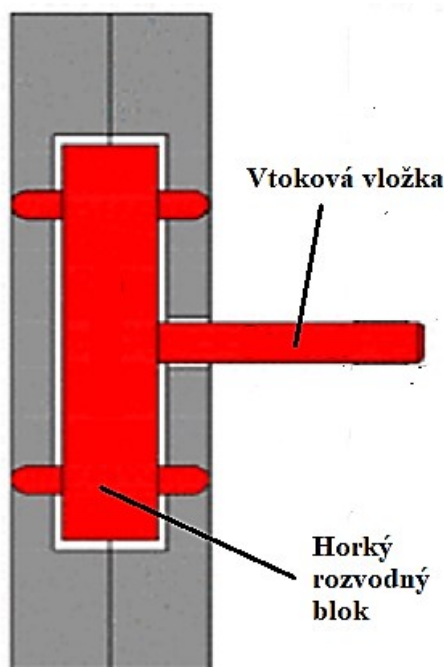
Využívají se hlavně pro formy, ve kterých se zpracovávají materiály se specifickými aditivami (retardéry hoření, stabilizátory). Korozi lze zabránit pochromováním nebo poniklováním výše uvedených druhů, u složitých tvarových kontur můžou však ale nastat při povrchové úpravě problémy. Z tohoto důvodu vznikly oceli antikorozi. Běžně používanými jsou 1.2083 (X40Cr14), 1.2085 (X33CrS16) a 1.2316 (X38CrMo16). Kalením u nich lze dosáhnout tvrdosti až 54 HRC. Vykazují vysokou odolnost korozi a jsou dobře leštitelné. Mají vysokou odolnost otěru, která může být ještě zvýšena nitridováním nebo pochromováním. Používají se pro výrobu malých a středně velkých forem, pro tvarové vložky a pro rámy forem. Uplatnění nachází také při zpracování PVC. [37]

3.6.5 Hliník, měď a jejich slitiny pro formy

Z hliníku, mědi a jejich slitin se vyrábí převážně komponenty pro prototypové formy, ze speciálních slitin se pak vyrábí formy pro velké série. Jedná se o lehké materiály s dobrou obrobiteľností, dobrou odolností vůči korozi a s dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Hliník má čtyřikrát vyšší tepelnou vodivost než ocel, a proto jeho využití výrazně zkracuje čas vstřikovacího cyklu při zpracování plastů. Formy z hliníku mají nižší hmotnost a lépe se s nimi manipuluje. Desky forem se vyrábí pomocí odlévání nebo kování. Při odlévání se používá slitiny AlSi (silumin), při kování pak slitiny AlMg nebo AlMgMn, kdy největší vliv na pevnost materiálu má obsah magnesia ve slitině. V dnešní době se pro výrobu forem používá nová slitina ALUMOLD 500. Tento materiál má vysokou pevnost, tepelnou vodivost a výbornou obrobiteľnost. Díky vysoké tepelné vodivosti razantně snižuje dobu vstřikovacího cyklu a maximalizuje produktivitu. Cena na výrobu formy z ALUMOLDU 500 je v porovnání s cenou ocelových forem až o třetinu nižší. [37]

3.7 Etážová forma

Etážová forma je specifická tím, že má více hlavních dělicích rovin (typicky dvě hlavní dělicí roviny). V principu tedy funguje jako dvě formy, které jsou umístěny za sebou. Vyrábí se převážně ve verzi s horkým vtokem, protože zakomponování studeného vtoku a jeho odformování je u tohoto konceptu forem obtížné. Etážová forma se dělí na část střední, ve které jsou umístěny tvárnice a horký rozvodný blok s tryskami a na dvě části boční, ve kterých jsou umístěny tvárníky a vyhazovací systémy. Tavenina je do horkého rozvodného bloku přiváděna prodlouženou vtokovou vložkou, která se vyrábí v celku nebo ze dvou částí, u kterých se průtok taveniny ovládá pomocí jehel. [38] [39]

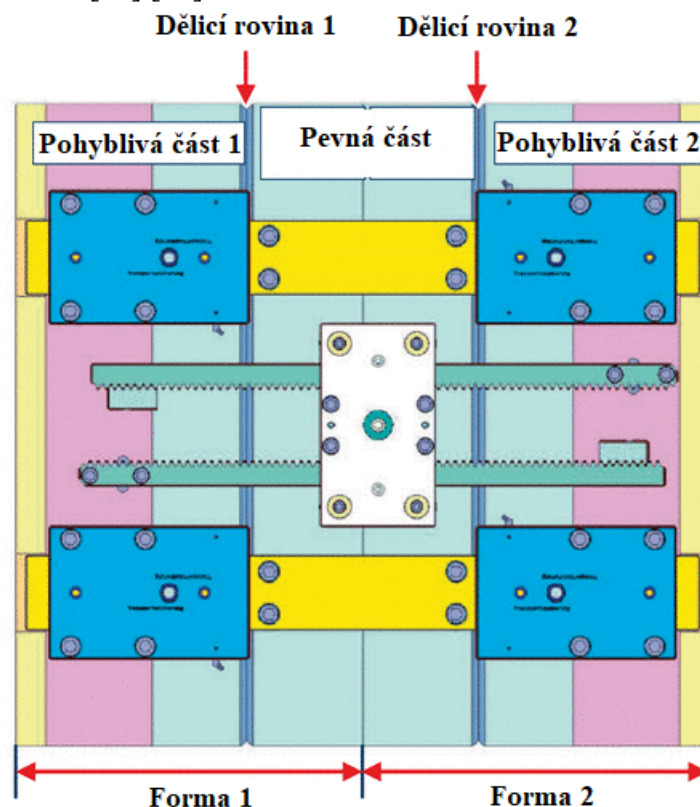


Obrázek 26 – Detail uložení horkého rozvodného bloku ve střední části formy [38]

Použití etážových forem zvyšuje produkci, protože v jednom vstřikovacím cyklu je vyrobeno dvakrát více výrobků. Jejich výhodou je to, že lze zdvojnásobit násobnost formy bez toho, aniž by se zvětšovala šířka a výška formy. Formu je tedy možné ustavit na menším vstřikovacím stroji, na kterém by bylo možné upnout formu s jednou dělicí rovinou. Potřebná uzavírací síla vstřikovacího stroje je závislá na vstřikovacím tlaku a na průmětné ploše výrobků. Pokud jsou výrobky umístěny etážově (v patrech) nad sebou, tak průmětná plocha nevzroste a velikost uzavírací síly se nezmění, ale bude totožná jak při výrobě dvou dílů, tak při výrobě čtyř dílů (dva v každé dělicí rovině). Na úkor šířky a výšky však u etážových forem dochází k nárůstu délky, ke které je navíc připočtena velikost zdvihu při otevření formy pro vyhození výrobků ve dvou dělicích rovinách. Náklady na výrobu

etážových forem jsou asi o 30 – 40 % vyšší než u klasické formy, etážová forma však produkuje dvakrát více výrobků a její pořízení a užití je tedy hospodárné. [38] [39]

Etážová forma se ke vstřikovacímu stroji upíná jako běžné dvoudeskové formy. Levá pohyblivá strana je upnuta k levé upínací desce, pravá pohyblivá strana se upne k pravé upínací desce, střední část formy je pak držena pomocí vodicích tyčí mezi pohyblivými částmi. Některé stroje disponují posuvným vedením, na kterém je střední část etážové formy položena. Pohyblivé části jsou se střední částí spojeny kloubovým mechanismem nebo ozubeným převodem. Při otevírání formy dochází k oddalování levé pohyblivé části od části střední, kdy tento pohyb je přes kloubový mechanismus nebo ozubený převod přenášen na pravou pohyblivou část. Nastavený zdvih při otevírání formy se tedy rozdělí na dvě poloviny a forma se otevře ve dvou dělicích rovinách. Pohyb vyhazovacího systému je na levé straně zajištěn pomocí táhla vyhazovačů, které je připojeno ke vstřikovacímu stroji. Na pravé straně se pak pro pohyb vyhazovacího paketu používají hydraulické nebo pneumatické válce. [38] [39]



Obrázek 27 – Schéma etážové formy [39]

Etážová forma se dá využít pro vstřikování jednoho druhu výrobků, nebo pro jejich kombinaci. Dvou dělicích rovin se dá využít například tak, že se v každé dělicí rovině vstříkují jiné výrobky ze stejného materiálu. Další možností je vstřikování stejných výrobků, ale z jiných materiálů v každé dělicí rovině. [38] [39]

4 SIMULACE PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

Pro vizualizaci procesu vstřikování byla vyvinuta celá řada simulačních softwarů, které pomáhají analyzovat vstřikovací proces před uvedením dílu do výroby. Analýzy pomáhají predikovat chyby při vstřikování, a to jak samotné konstrukční chyby na dílu, tak chyby způsobené špatně zvolenými procesními podmínkami. Včasné odhalení chyb a jejich odstranění spolu s optimalizací procesu vede ke značnému snížení nákladů na vstřikovací proces a na zlepšení kvality vstřikovaných součástí. Ve vývoji je možné vyřešit až 70 % celkových nákladů na výrobu, kdy náklady na vývojovou fázi představují pouze cca 5 % celkových nákladů. Z tohoto pohledu se bez simulací procesu vstřikování v dnešní době prakticky nelze obejít. [40] [41]

4.1 Autodesk Moldflow Insight 2023

Program Autodesk Moldflow Insight patří mezi špičku ve své kategorii a používají ho přední výrobci plastových dílů po celém světě. Umožňuje provedení simulací různých metod vstřikování (vstřikování termoplastů, vstřikování s podporou vody a plynu, vstřikování s dolisováním, vícekomponentní vstřikování, vstřikování mikročipů atd.) a poskytuje spolehlivé výsledky pro ověření návrhu a geometrie dílu, formy nebo pro kontrolu zvolených procesních parametrů. Velkou výhodou je analýza procesu při vstřikování optických prvků, kdy Moldflow nabízí celou řadu výsledků ověřujících optické vlastnosti vyrobeného dílu. K dispozici má materiálové databáze s nepřehledným množstvím plastů, kdy každý z nich je doplněn o reologická data, doporučené procesní podmínky, teplotní nebo mechanické vlastnosti a materiály pro optické prvky navíc obsahují informace o optických vlastnostech (index lomu a napěťově – optický koeficient). [40] [41]

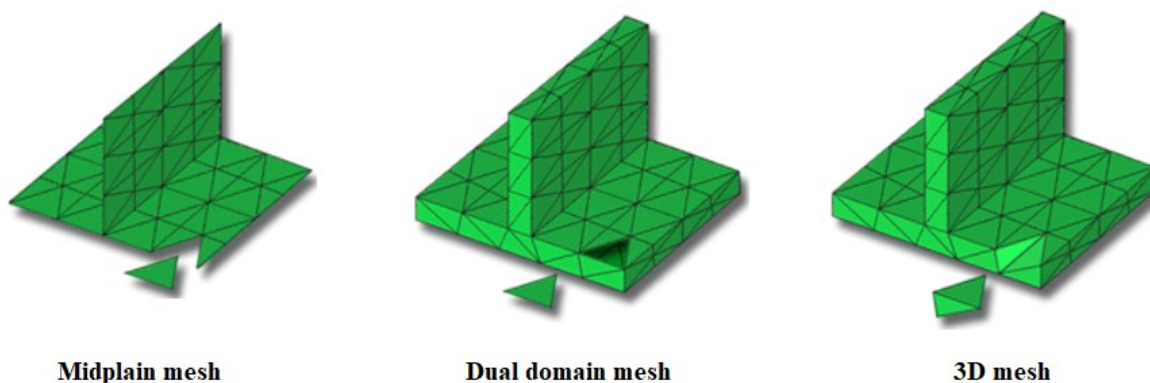
4.1.1 Typy sítí pro 3D modely

Moldflow nabízí síťování modelů metodou konečných prvků. K dispozici jsou 3 typy sítí (viz *Obrázek 28*), každá z nich je vhodná pro určitý typ výrobku. Při síťování metodou midplain je síť složena z trojúhelníkových elementů se třemi uzly a vytváří jednorozměrné zobrazení součásti, které je umístěno v její středové rovině. Na prvky sítě je aplikována hodnota tloušťky, která symbolizuje tloušťku dílu. Používá se pro síťování tenkostěnných dílů s konstantní tloušťkou. [42]

Metoda síťování Dual domain tvoří plošná síť složená rovněž z trojúhelníkových elementů se třemi uzly. Oproti Midplain síti trojúhelníkové elementy kopírují celý povrch

součásti a vytváří tak dutý model výrobku, který je pokryt povrchovou sítí. Tato metoda síťování je vhodná pro tenkostěnné díly s proměnnou tloušťkou a s malým počtem míst s vyšší tloušťkou. Pro přesné výsledky by neměla být minimální šířka a délka v dané oblasti nižší než desetinásobek její tloušťky. [42]

Poslední sítí je 3D síť. Je vhodná pro tlustostěnné prvky a poskytuje přesnou 3D reprezentaci modelu. Je složena z čtyřstěnných elementů se čtyřmi uzly, které vyplňují celý objem součásti. Tvorba 3D sítě a následný výpočet analýzy je nejnáročnější, její použití tedy výrazně navyšuje čas výpočtu. [42]



Obrázek 28 – Typy sítí v programu Autodesk Moldflow Insight 2023 [42]

4.1.2 Typy analýz

Analýza umístění vhodnosti umístění vtoku (Gate Location Analysis) se používá pro zobrazení místa na výrobku, které je nejvhodnější pro umístění vtokového ústí. Analýza poskytuje dva druhy výsledků. Jedním z nich je přímo vhodnost pro umístění vtoku vyjádřená v hodnotách 0 – 1, kdy hodnota 1 symbolizuje nejvíce vhodná místa. Druhým výsledkem je odpor taveniny proti tečení. Výsledek analýzy je nutné brát s rezervou, protože analýza nepočítá s možnostmi zaformování výrobku a je tedy nutné udělat kompromis mezi nejvhodnějším místem pro umístění vtoku a reálnými možnostmi pro jeho umístění. [42]

Analýza plnění a dotlaku (Fill + Pack Analysis) ukazuje to, jak polymerní tavenina zaplňuje dutinu formy. Zobrazuje proudění taveniny od vtokového ústí a pokračuje až do přepnutí cyklu na fázi dotlaku. Spolu s analýzou plnění lze provést i analýzu pro optimalizaci vtokového systému (Runner Balance) tak, aby byly všechny dutiny formy plněny rovnoměrně. Před spuštěním analýzy plnění a dotlaku by měla být zkontrolována kvalita sítě v zakřivených oblastech modelu a v rozích. Při analýze plnění a dotlaku lze nastavit materiál vstřikovaného dílu a procesní podmínky – teplota taveniny, teplota formy, rychlost

vstřikování, bod přepnutí na dotlak a dobu jeho působení, typ vstřikovacího stroje a materiál tvarových částí (formy). Případně také lze zvolit funkci pro analýzu dvojlomu u optických součástí, nebo funkci pro výpočet orientace vláken u plněných polymerních materiálů. Výsledkem analýzy plnění a dotlaku je kompletní přehled o plnicí a dotlakové fázi vstřikovacího cyklu. Pomocí analýzy plnění lze určit například čas plnění, tlak při přepnutí na dotlakovou fázi, hodnotu smykové rychlosti a smykového napětí při plnění, tlak na konci plnění, objemové smrštění, oblasti a charakter studených spojů a vzduchových kapes nebo velikost a umístění propadlin na dílu. Dále je možné určit to, zda bude dutina formy zcela zaplněna a zda nevznikne nedostříknutý výrobek. [42]

Analýza chlazení (Cool Analysis) simuluje tepelné procesy, které probíhají uvnitř formy. Pro její spuštění je nutné předem vytvořit určitý temperační systém pro chlazení výrobku. Dává nám informace o teplotním profilu výstřiku, vtokového systému a formy, času potřebném pro vyhození dílu nebo vtokového zbytku, teplotě a tlaku temperačního média v okruhu nebo o účinnosti odvodu tepla v jednotlivých částech temperačních okruhů. Analýzou chlazení lze určit optimální rozvržení temperačních kanálů a jejich velikost, případně nastavit procesní podmínky jako teplota a tlak temperačního média nebo správně určit samotný druh temperačního média pro co nejvyšší efektivitu procesu. [42]

Analýza deformace (Warp Analysis) se používá k diagnostice příčin deformací vyráběného dílu a nabízí doporučení pro jejich ovlivnění. Analýza poskytuje buď informace o celkové hodnotě deformace, nebo zobrazuje jednotlivé příčiny deformace. Příčiny deformace jsou tři – deformace vlivem chlazení, deformace vlivem smrštění a deformace vlivem orientace. Deformace výrobku lze ovlivnit vhodným zvolením materiálu, změnou procesních podmínek nebo zvýšením účinnosti temperačního systému. [42]

Analýza dvojlomu (Birefringence Analysis) se používá u vstřikování optických součástí. Poskytuje dva druhy výsledků. Výsledky změny indexu lomu ukazují odchylku nominální hodnoty indexu lomu materiálu u vystříknutého dílu. Změna je počítána na základě napětí po vstřikovacím cyklu a optických vlastností materiálu. Druhou kategorií výsledků analýzy dvojlomu jsou informace o fázovém posuvu a retardaci mezi horizontálně a vertikálně polarizovaným světlem, které prochází vystříknutým dílem ze zadaného směru. Rozdíl lze vyjádřit pomocí absolutní vzdálenosti mezi vlnami světla nebo jako rozdíl vlnových délek. Čím vyšší je rozdíl mezi fázovým posuvem nebo retardací polarizovaného světla, tím horší optické vlastnosti daný optický výstřik bude mít. [42]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V rámci vypracování diplomové práce byly stanoveny tyto cíle:

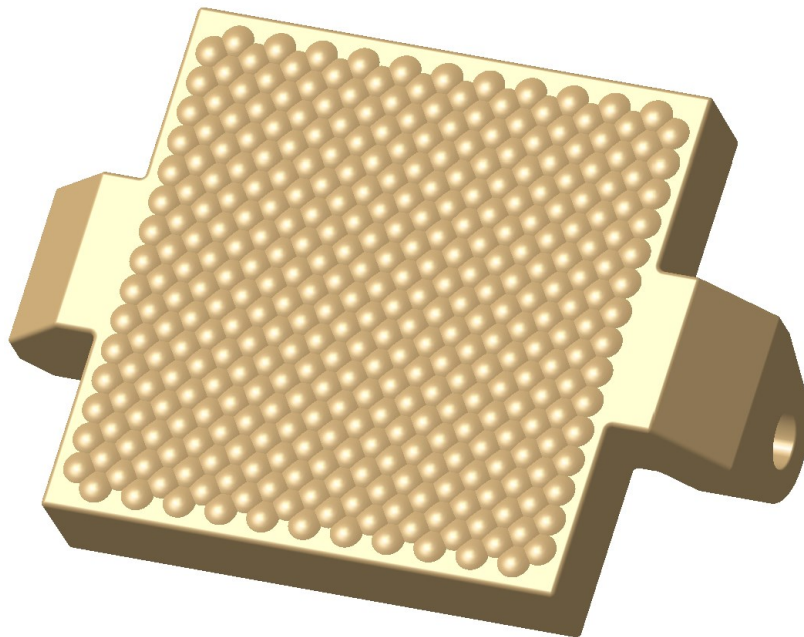
- Vypracovat literární rešerši na dané téma,
- vytvořit model tlustostěnného vstříkovaného dílu,
- provést analýzu procesu vstříkování,
- zhotovit konstrukční návrh vstříkovací formy pro daný díl,
- nakreslit sestavu formy včetně patřičných pohledů a kusovníku.

V literární rešerši jsou shrnuty poznatky a teoretické znalosti o samotném procesu vstříkování, vstříkovacích strojích a analýzách vstříkovacího procesu. Jsou zde také popsány materiály používané pro vstříkování tlustostěnných dílů, jejich vlastnosti při zpracování a vady, které při vstříkování tlustostěnných dílů mohou vzniknout.

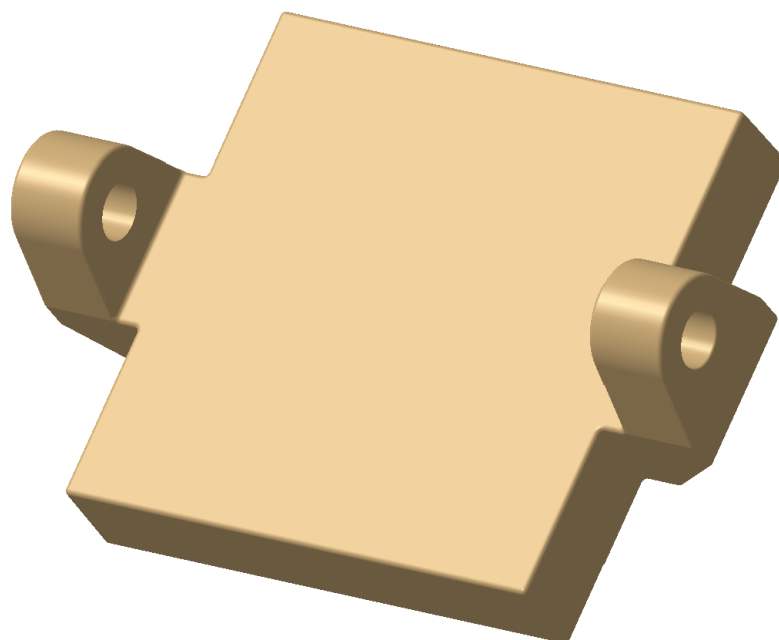
Cílem praktické části je návrh 3D modelu vstříkovaného tlustostěnného dílu a návrh vstříkovací formy pro jeho výrobu v programu CATIA V5R19 za využití maximálního množství normalizovaných částí od firmy Meusburger. Konstrukční návrh formy je založen na průběžných výsledcích simulací vstříkovacího procesu v programu Autodesk Moldflow 2023, funkčnost finálního konstrukčního provedení formy je pak rovněž ověřena simulacemi vstříkování a mechanickou analýzou tvarových částí. Součástí konstrukčního návrhu je výkresová dokumentace včetně patřičných pohledů, řezů a kusovníku.

6 MODEL TLUSTOSTĚNNÉHO OPTICKÉHO DÍLU

V rámci diplomové práce byl navržen 3D model tlustostěnného optického vstříkovaného dílu. Jedná se o čočku, která se využívá pro rovnoměrné rozptýření a distribuci světelného paprsku v projekční technice. Čočka je opatřena plochou s optickým desénem, po stranách jsou pak vytvořeny montážní otvory pro ustavení čočky v požadované poloze. Rozměry čtvercové části čočky s optickým desénem jsou 64(d)x64(š)x13(v) mm. Hmotnost vstříkované čočky činí 60 g.



Obrázek 29 – 3D model vstříkovaného optického dílu (pohled zeshora)



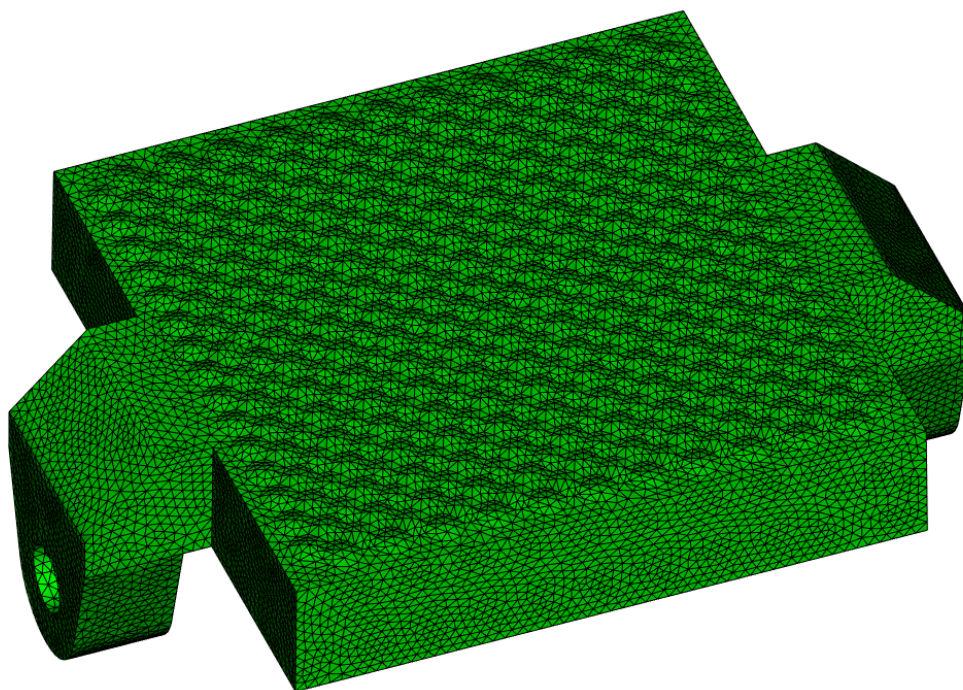
Obrázek 30 – 3D model vstříkovaného optického dílu (pohled zespoda)

7 ANALÝZY PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

Před samotnou konstrukcí vstřikovací formy byly vyhotoveny analýzy procesu vstřikování v programu Autodesk Moldflow 2023. Na základě výsledků analýz byly následně zvoleny následující aspekty:

- Umístění vtokového ústí,
- materiál vstřikovaného dílu,
- vtokový systém formy spolu s typem a rozměry vtokového ústí,
- temperační systém formy,
- materiál tvarových částí formy.

Vstřikovaný díl byl nejprve vysítován metodou 3D Mesh, která je pro tlustostěnné součásti nejvhodnější a vyplňuje celý objem dílu čtyřstěnnými elementy se čtyřmi uzly. Délka hrany elementu (Global Edge Length) byla nastavena na hodnotu 1 mm.

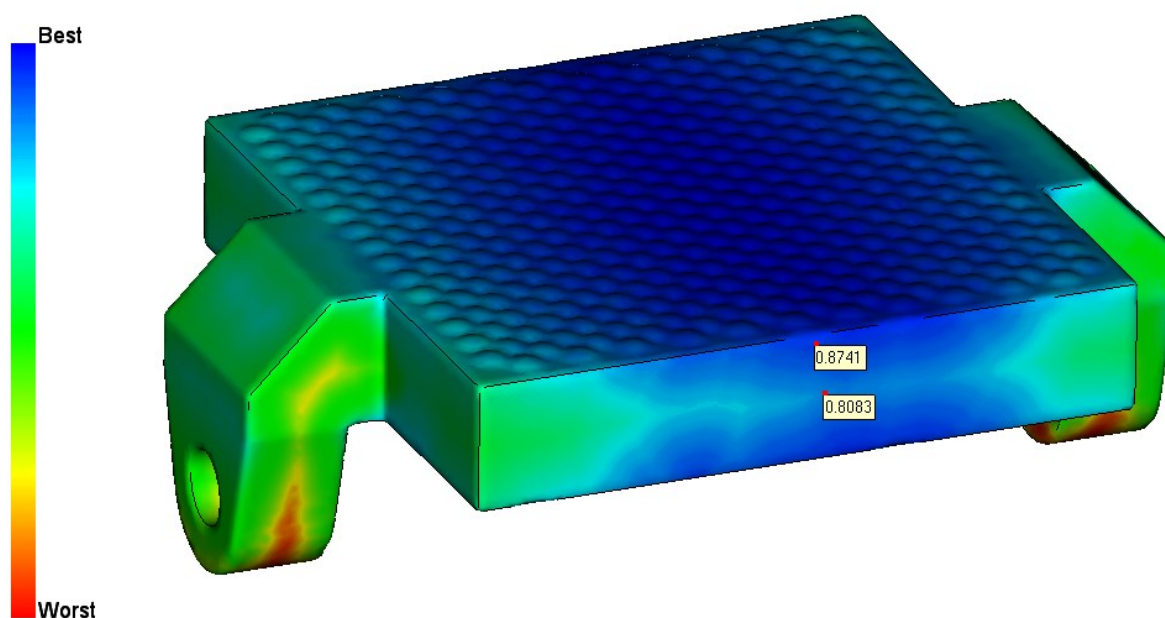


Obrázek 31 – Vysítovaný díl v programu Autodesk Moldflow 2023

Po tvorbě sítě byla provedena její kontrola. Hlavním zkoumaným parametrem byla hodnota Aspect Ratio, tedy poměru velikostí nejdelší a nejkratší hrany čtyřstěnných elementů, ze kterých je síť složena. Maximální hodnota Aspect Ratio by pro zajištění přesných výsledků analýzy neměla překročit hodnotu 30. Při kontrole sítě byla zjištěna maximální hodnota 21,4 a podmínka pro správný výpočet byla tedy splněna.

7.1 Volba umístění vtokového ústí

První provedená analýza byla zaměřena na vhodnost umístění vtokového ústí (Gate Location). Místa nejvíce vhodná pro umístění vtokového ústí jsou vyznačena modrou barvou, nejméně vhodná místa pak barvou červenou. Při vyhodnocování výsledků byly brány v potaz možnosti zaformování daného dílu spolu se zajištěním jeho funkčnosti. Na *Obrázku 32* jsou znázorněna dvě místa, ve kterých by bylo možné umístit vtokové ústí s ohledem na optický charakter dílu tak, aby stopy po vtoku co nejméně ovlivňovaly optické vlastnosti. Konkrétně se jedná o oblast u plochy s optickým desénem, druhou oblastí je pak střed stěny čočky. Z obrázku je patrné, že oblast u plochy s optickým desénem byla programem vyhodnocena jako vhodná z 87 %, oblast ve středu stěny čočky pak z 80 %.



Obrázek 32 – Vhodnost umístění vtokového ústí

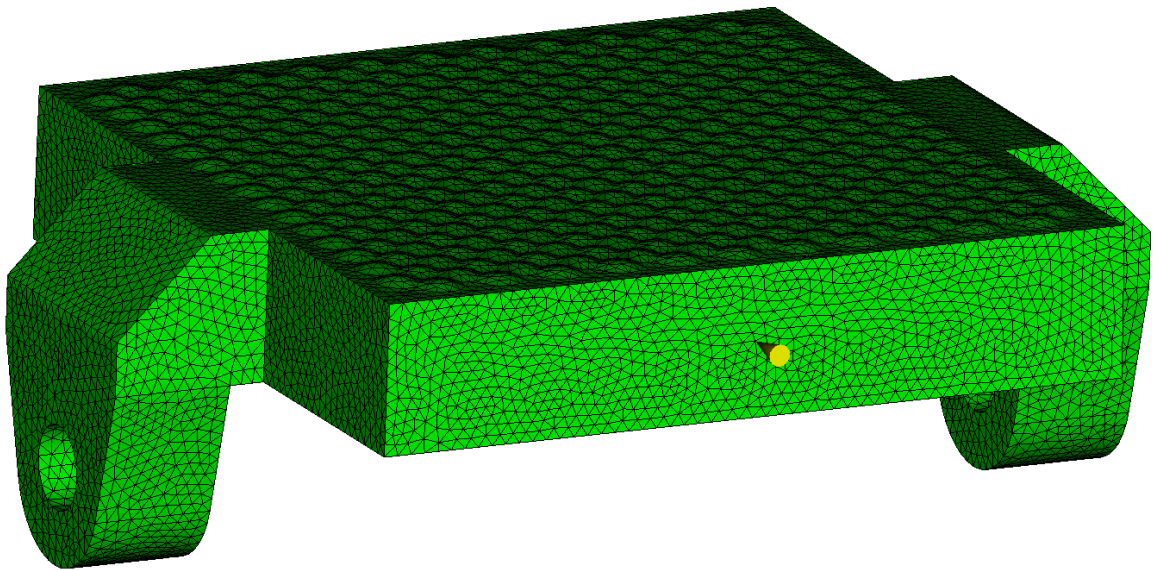
7.2 Volba materiálu vstříkovaného dílu

Pro simulaci výroby optické čočky bylo vybráno celkem 5 amorfních termoplastických materiálů vhodných pro optické aplikace. Materiály byly mezi sebou vzájemně porovnány pomocí analýzy plnění + dotlaku + deformací (Fill + Pack + Warp). Zvolenými materiály byly polykarbonát (Panlite AD-5503: Teijin Limited), polystyren (Austrex 555: Polystyrene Australia), polymethylmetakrylát (ACRYPET VH001: Mitsubishi Chemical), cyklický olefinový polymer (Zeonex E48R: Zeon Corporation) a cyklický olefinový kopolymer (APEL APL5014CL: Mitsui Chemicals Co Ltd.). *Tabulka 1* uvádí vlastnosti zvolených materiálů, které byly vybrány z materiálové databáze programu Autodesk Moldflow 2023.

Tabulka 1 – Vlastnosti materiálů z databáze Autodesk Moldflow 2023

	PC	PS	PMMA	COP	COC
Modul pružnosti v tahu [MPa]	2280	3200	3350	2575	3018
Poissonovo číslo [-]	0,417	0,353	0,330	0,360	0,335
Doporučená teplota taveniny [°C]	270 - 320	200 - 210	210 – 260	240 - 300	260 - 290
Zvolená teplota taveniny [°C]	290	205	235	270	275
Maximální teplota taveniny [°C]	360	230	300	340	330
Doporučená teplota formy [°C]	80 - 120	40 - 60	50 – 90	80 - 120	80 - 120
Zvolená teplota formy [°C]	100	50	70	100	108
Teplota pro vyhození dílu [°C]	133	70	101	121	121
Maximální smykové napětí [MPa]	0,5	0,25	0,4	0,5	0,5
Maximální rychlost smyk. deformace [s ⁻¹]	40 000	40 000	40 000	100 000	100 000

Při výpočtu analýz pro určení vhodného materiálu vstřikovaného dílu byly zvolené teploty zpracování nastaveny jako výchozí pro každý z materiálů. Ostatní parametry vstřikovacího procesu byly nastaveny pro všechny materiály totožně. Vtokové ústí bylo prozatím umístěno do středu stěny čočky. Pro výsledný zvolený materiál bylo vtokové ústí následně umístěno i do oblasti u plochy s optickým desénem.



Obrázek 33 – Umístění vtokového ústí na výrobku pro prvotní analýzy

Tabulka 2 – Nastavené procesní podmínky

Vstřikovací čas [s]	2,5
Zaplnění dutiny při přepnutí na dotlak [%]	98
Doba dotlakové fáze [s]	15
Hodnota dotlaku vůči vstřikovacímu tlaku [%]	80
Výpočet chlazení	Automatický
Zatuhlý objem dílu při vyhazovací teplotě [%]	90
Optická analýza	Ano
Výpočet orientace vláken	Ne
Vstřikovací stroj	Výchozí
Materiál formy	Ocel (Tool steel P-20)
Počítat s teplotní roztažností formy	Ano
Izolovat příčiny deformace	Ne

Z analýz vypočítaných pro jednotlivé materiály byly poté zkoumány a porovnávány tyto výsledky:

- Celková deformace čočky,
- čas pro dosažení vyhazovací teploty,
- optické vlastnosti čočky.

7.2.1 Celková deformace (Deflection, All Effects)

Celková deformace (vlivem rozdílného smrštění a nerovnoměrného chlazení) čočky vystříkнутé z daných materiálů je porovnána v *Tabulce 3*. Vzhledem k požadavkům na vysokou přesnost optických dílů by měly být hodnoty deformace co nejmenší. Z tabulky je patrné, že nejmenších deformací dosahuje čočka vyrobená z PS (0,41 mm), nejvyšších deformací pak čočka zhotovená z PC (0,59 mm). Pro zvolené materiály se rozdíl v celkové deformaci pohybuje v rozmezí dvou desetín milimetru.

Tabulka 3 – Porovnání výsledků celkové deformace

	PC	PS	PMMA	COP	COC
Celková deformace [mm]	0,59	0,41	0,44	0,46	0,48

7.2.2 Čas pro dosažení vyhazovací teploty (Time To Reach Ejection Temperature)

Porovnání časů pro dosažení vyhazovací teploty uvádí *Tabulka 4*. Analýza byla nastavena tak, aby k vyhození došlo při zamrznutí 90 % objemu materiálu čočky. Výsledky ukazují, že čočku z PC by bylo možné bezpečně vyhodit z formy již po 277 s, oproti tomu čočku z PS až po 671 s. Čas potřebný pro vyhození je ovlivněn teplotou taveniny, formy a doporučenou teplotou pro vyhození materiálu. Pro maximální efektivitu a ekonomičnost vstřikovacího procesu je žádoucí, aby čas potřebný pro vyhození výrobku byl co nejkratší.

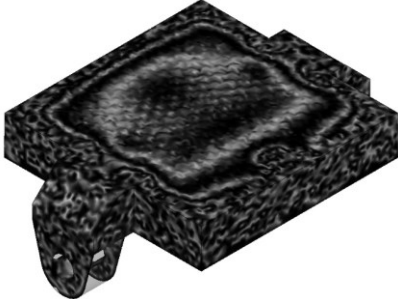
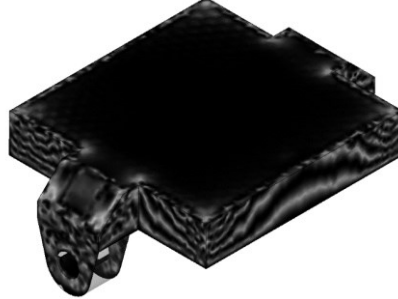
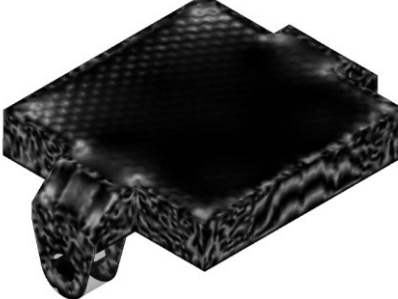
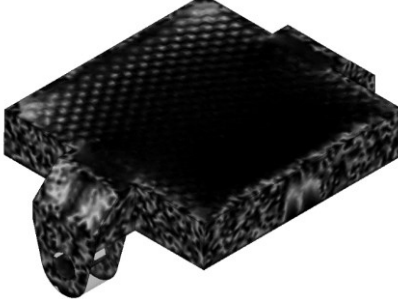

Tabulka 4 – Porovnání výsledků času pro dosažení vyhazovací teploty

	PC	PS	PMMA	COP	COC
Čas pro dosažení vyhazovací teploty [s]	277	671	372	430	606

7.2.3 Vzor polariz. světla (Fringe Pattern For Light Coming From -z Direction)

Tento optický výsledek zobrazuje rozložení polarizovaného světla, které prošlo optickým dílem. Každý pruh na vzoru reprezentuje zpomalení světla o jednu vlnovou délku (546 nm). Velký počet pruhů a bílých míst na vzoru značí vysokou míru zpomalení světla a indikuje nadměrnou úroveň zbytkového pnutí v dané části dílu. Optimální kvalitu optických vlastností čočky značí černý vzor bez přítomnosti bílých míst a pruhů. Výsledek je zobrazen pro světlo přicházející ze záporného směru osy z na ploše s optickým desénem, ze které je světlo po průchodu čočkou vyzařováno. Nejlepší výsledek vykazuje materiál COC, u kterého je vzor na povrchu s desénem téměř dokonalý, bez výskytu nežádoucích bílých míst.

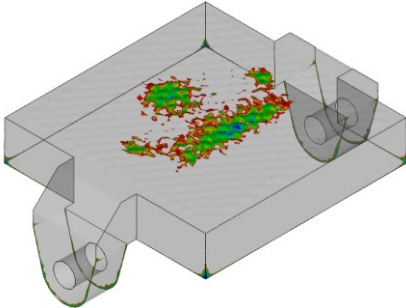
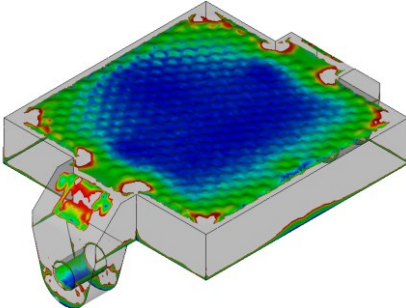
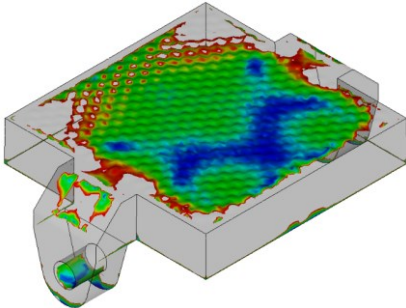
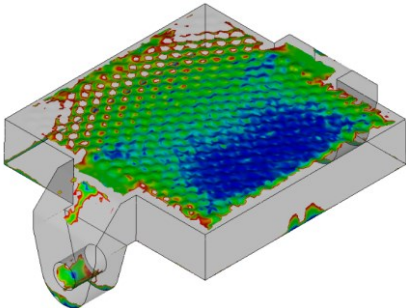
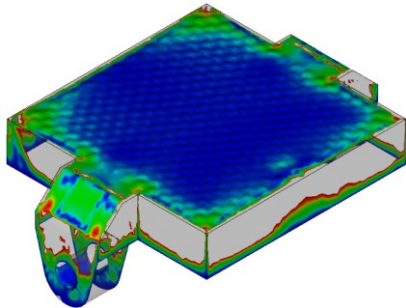
Tabulka 5 – Porovnání výsledků vzoru polarizovaného světla

PC	PS
	
PMMA	COP
	
COC	
	

7.2.4 Fázový posuv polariz. světla (Phase Shift for Light Coming From -z Direction)

Druhý optický výsledek zobrazuje rozdíl mezi fázemi vertikálně a horizontálně polarizovaného světla, které prošlo čočkou. Příliš vysoký fázový posuv se může projevat v rozdílném jasu prošlého světla na různých místech plochy s desénem. Výsledek je opět zobrazen pro světlo přicházející ze záporného směru osy z. Uvádí se, že fázový rozdíl nižší než 90° nemá výrazný vliv na vlastnosti prošlého světla. Zobrazení výsledku tedy bylo upraveno tak, aby zabarvené části symbolizovaly místa na optickém desénu, ve kterých je fázový posuv pod touto hodnotou, nezabarvené oblasti mají hodnotu fázového posuvu vyšší než 90° . Nejlepší výsledky vykazuje materiál COC, optický desén je zcela barevně pokryt.

Tabulka 6 – Porovnání výsledků fázového posuvu polarizovaného světla

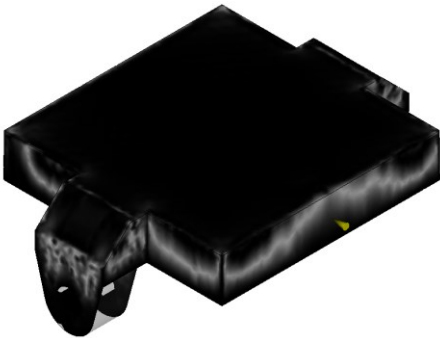

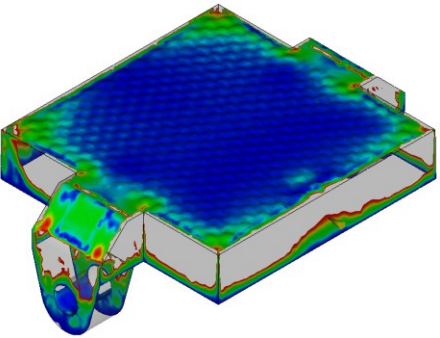
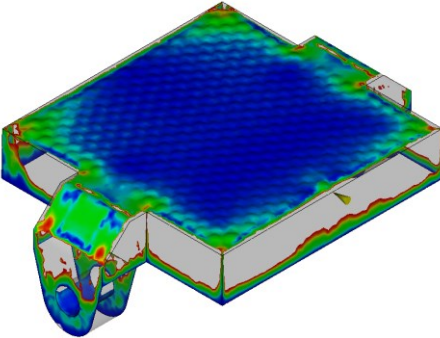
PC	PS
	
PMMA	COP
	
COC	
	

7.2.5 Vyhodnocení výsledků volby materiálu vstřikovaného dílu

Výsledky analýzy ukázaly, že ze zvolených materiálů má každý svoje výhody i nevýhody. Výrobek z materiálu PS dosahuje nejnižší hodnoty celkové deformace a vykazuje poměrně příznivé optické vlastnosti. Čas pro dosažení vyhazovací teploty je však u tohoto materiálu jednoznačně nejvyšší. Materiál PC vykazuje nejnižší čas pro dosažení vyhazovací teploty, hodnoty celkové deformace jsou však nejvyšší a optické vlastnosti dílu jsou nejméně příznivé ze všech zkoumaných materiálů. Plocha s optickým desénem má vysoce nepravidelný vzor a fázový posuv polarizovaného světla na většině místech plochy přesahuje dovolenou hranici 90 °. Lze konstatovat, že čočka z COC vykazuje nejlepší optické vlastnosti ze všech analyzovaných materiálů. Pro výrobu čočky lze tedy konkrétní polymer vybírat dle několika kritérií, v závislosti na požadavcích výroby.

Díky optickému charakteru dílu bylo rozhodnutí o volbě materiálu pro jeho výrobu nejvíce ovlivněno optickými výsledky analýzy. Na základě těchto výsledků byl pro výrobu čočky zvolen materiál COC. Pro zvolený materiál byla následně provedena analýza s umístěním vtokového ústí do oblasti u plochy s optickým desénem a totožnými procesními podmínkami, jako při umístění ústí do středu stěny. Bylo zjištěno, že umístění vtokového ústí nemá vliv na optické vlastnosti, které jsou pro oba případy téměř totožné.

Tabulka 7 – Porovnání optických výsledků pro materiál COC se změnou polohy vtok. ústí

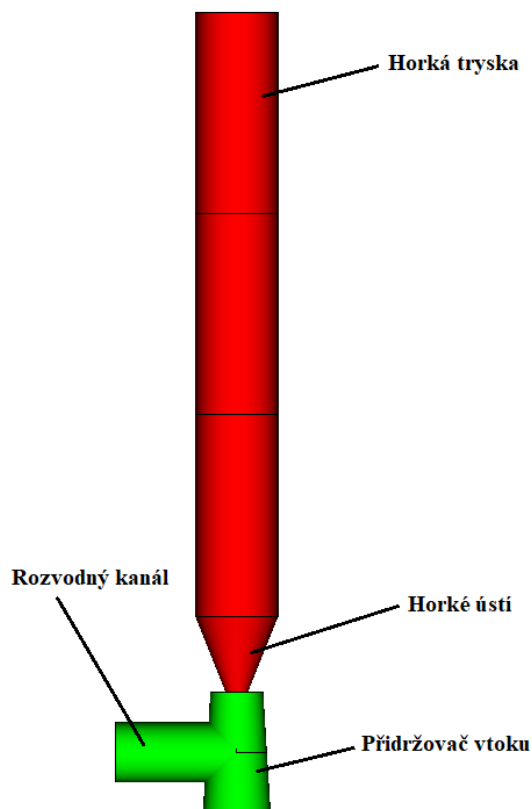
COC s vtokem uprostřed	COC s vtokem u plochy s desénem
	
	

7.3 Volba vtokového systému

Vzhledem ke tvaru čochky a omezení umístění vtokového ústí bylo rozhodnuto, že vtokový systém bude koncipován jako kombinovaný. Bude se tedy jednat o horký rozvodný blok s horkými tryskami, na které budou navazovat studené rozvodné kanály spolu se studeným vtokovým ústím.

Analýzy pro výběr vtokového ústí byly pro urychlení výpočtů koncipovány tak, že forma byla prozatím uvažována jako jednonásobná. Horká část vtokového systému byla řešena normalizovanou horkou tryskou od firmy Meusburger. Na trysku navazuje studený kuželový přídržovač vtoku a studený rozvodný kanál kruhového průřezu, jejichž rozměry jsou totožné pro všechny zvolené typy ústí. V programu Autodesk Moldflow 2023 byl namodelován vtokový systém s těmito rozměry:

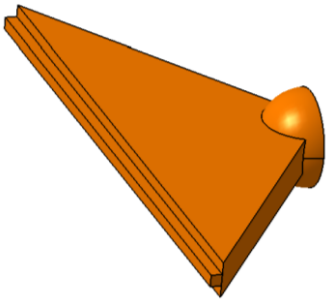
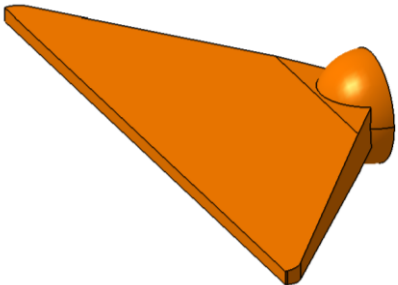
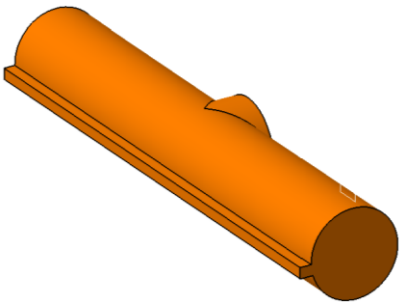
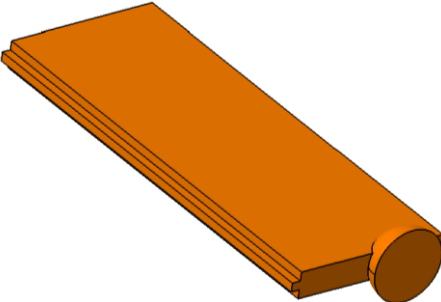
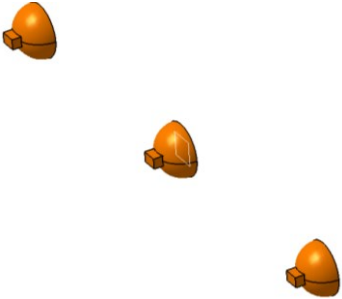
- Horká tryska (Hot Runner): $D = 12 \text{ mm}$,
- ústí horké trysky (Hot Gate): $D_{\text{začátek}} = 3 \text{ mm}$; $D_{\text{konec}} = 12 \text{ mm}$,
- studený přídržovač vtoku (Cold Runner): $D_{\text{začátek}} = 7 \text{ mm}$; $D_{\text{konec}} = 9 \text{ mm}$,
- studený rozvodný kanál (Cold Runner): $D = 8 \text{ mm}$.



Obrázek 34 – Ukázka části vtokového systému

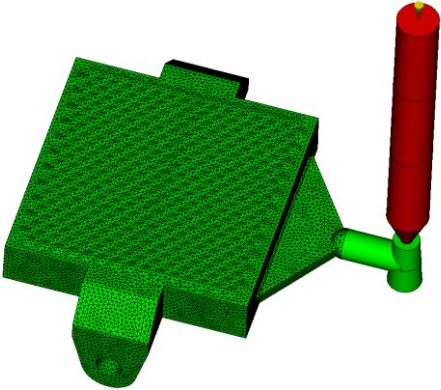
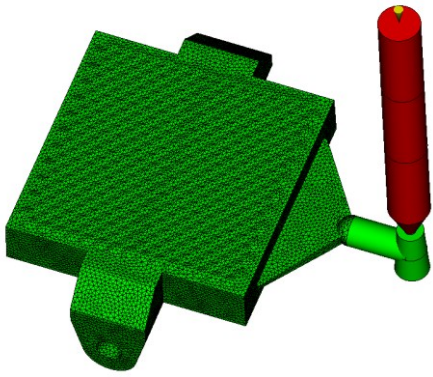
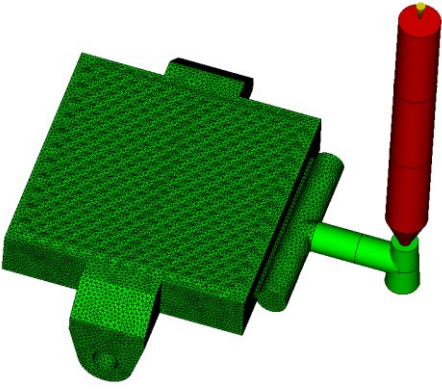
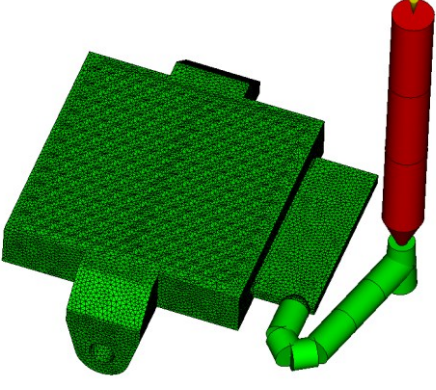
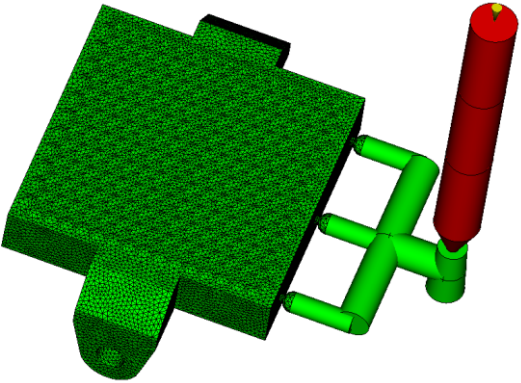
Dále bylo navrženo 5 typů vtokových ústí, ze kterých bylo za pomoci výsledků analýz vybráno to nejvhodnější. Typy vtokových ústí jsou zobrazeny v *Tabulce 8*. K výše uvedené části vtokového systému byla vtoková ústí připojena tak, aby osa horké trysky byla vždy ve stejné vzdálenosti od stěny čochky a horká tryska tak byla od stěny dílu vzdálena totožně ve všech případech (33 mm). Vzhledem k vstřikování tlustostěnné součásti byla vtoková ústí navržena tak, aby jejich šířka zabírala 75 % šířky stěny čochky, tedy 48 mm a plnění taveniny tak bylo co nejrovnoměrnější. Zúžená část vtokových ústí, která je v kontaktu s vstřikovaným dílem, byla nejprve zvolena s tloušťkou 1 mm a délkou 1 mm, totožně pro všechny typy ústí. Vzhledem ke složitosti vtokových ústí musela být tato vymodelována a do programu Autodesk Moldflow 2023 vložena spolu se vstřikovaným dílem.

Tabulka 8 – Typy zvolených vtokových ústí

Vějířový vtok (Fan Gate)	Upravený vějířový vtok (Fan Gate 2)
	
Filmový vtok (Flash Gate)	Vtok s nálitkem (Tab Gate)
	
Boční 3 bodový vtok (Triple Side Gate)	
	

Procesní podmínky analýz byly nastaveny totožně jako u analýz při volbě materiálu (viz *Tabulka 2*). Vstříkovaným materiálem dílu byl zvolen vybraný COC (APEL APL5014CL: Mitsui Chemicals Co Ltd.). Pro výpočet byla opět využita analýza plnění + dotlaku + deformací (Fill + Pack + Warp). První analýzy proběhly pro vtoková ústí umístěná ve středu stěny čochy.

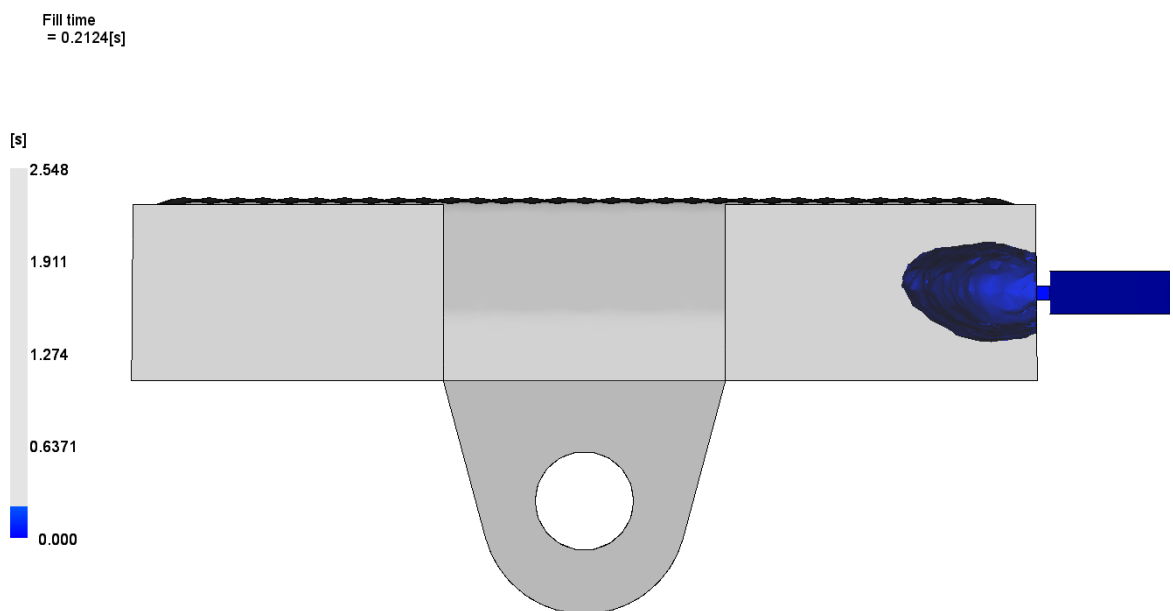
Tabulka 9 – Vysíťovaný díl a vtokový systém s jednotlivými typy vtokových ústí

Vějířový vtok (Fan Gate)	Upravený vějířový vtok (Fan Gate 2)
	
Filmový vtok (Flash Gate)	Vtok s nálitkem (Tab Gate)
	
Boční 3 bodový vtok (Triple Side Gate)	
	

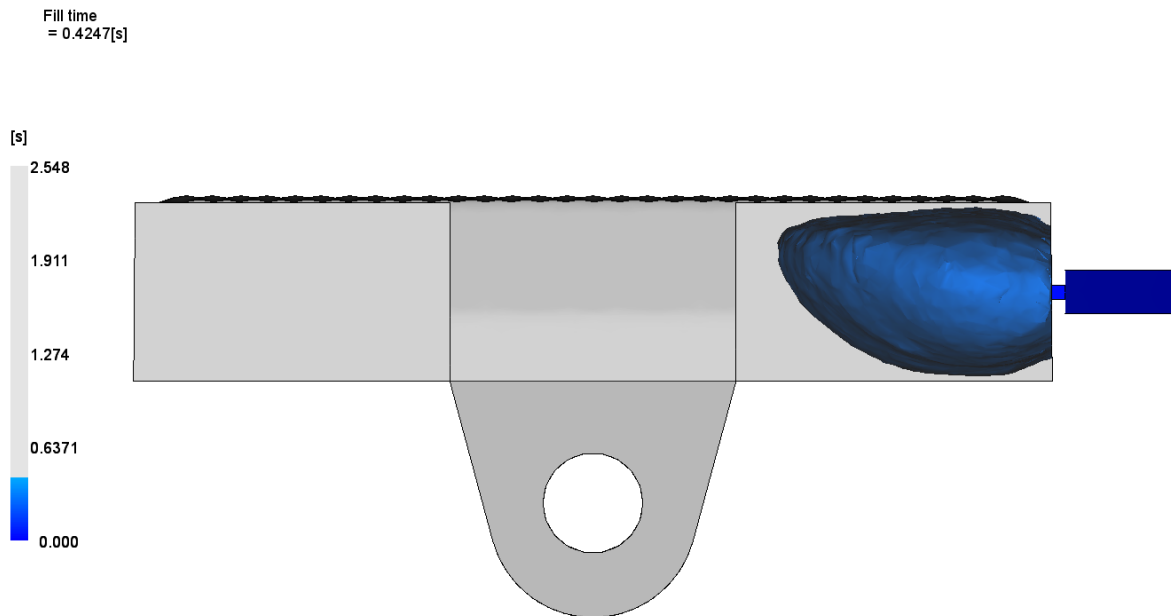
Po vypočtení analýz byly vyhodnoceny výsledky, na základě kterých byl zvolen typ vtokové ústí. Určující faktory pro volbu vtokového ústí byly následující:

- Uniformita plnění dutiny,
- tvorba studených spojů,
- velikost a umístění propadlin,
- hodnota smykového napětí na stěně,
- hodnota rychlosti smykové deformace,
- účinnost dotlakové fáze.

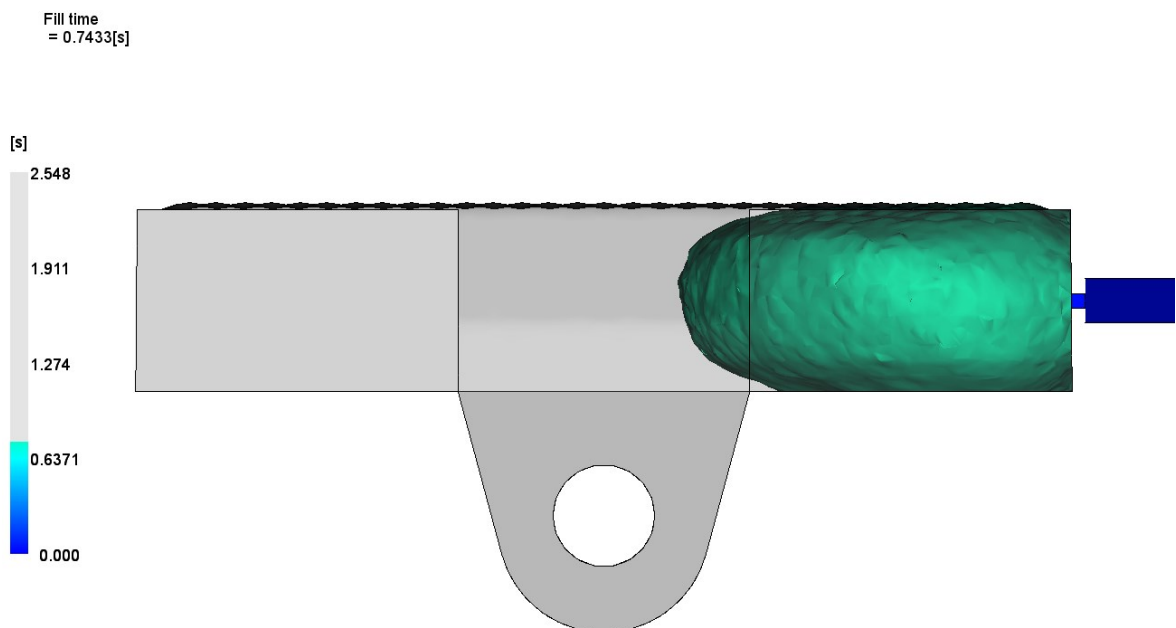
Vyhodnocením výsledků při umístění vtokového ústí uprostřed stěny bylo zjištěno, že uniformita plnění vstřikovaného dílu není zaručena. Informace o rovnoměrnosti plnění byly získány pomocí výsledku času plnění (Fill Time). Čočka je plněna jejím středem, kdy čelo taveniny nejprve vytryskne do prostoru. Mohlo by zde tedy docházet k nežádoucím jevům při plnění dutiny formy. K požadovanému a ideálnímu fontánovému toku taveniny uvnitř dutiny dochází až po určitém čase (cca 0,7 s), přičemž by tento způsob plnění dutiny mohl negativně ovlivňovat optické vlastnosti vzniklé čočky. Nestabilní plnění zobrazuje *Obrázek 35 – 37*. V čase 0,7 s dochází k fontánovému toku a čočka je poté již plněna žádoucím způsobem.



Obrázek 35 – Detail plnění dutiny vtokem ve středu stěny v čase 0,2 s

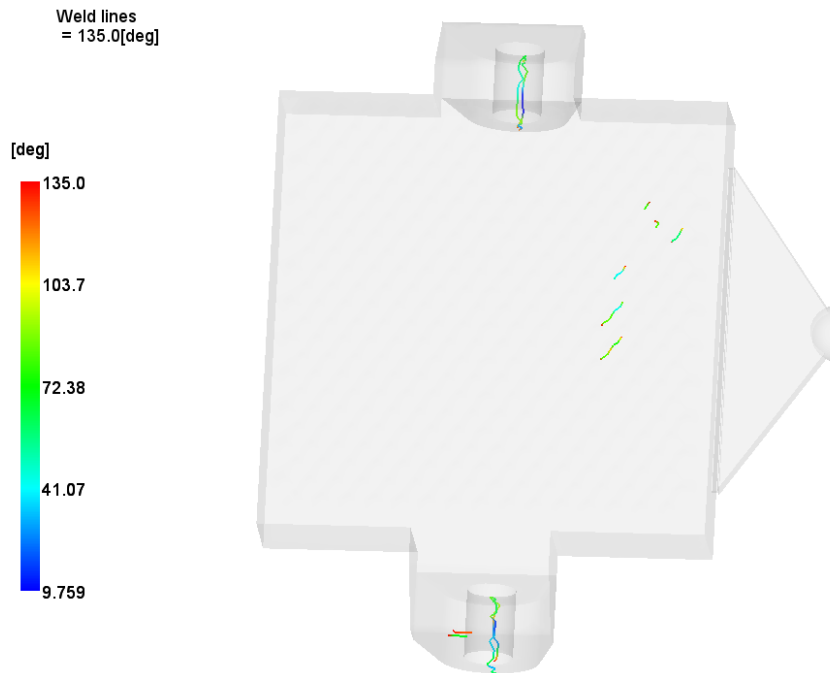


Obrázek 36 – Detail plnění dutiny vtokem ve středu stěny v čase 0,4 s



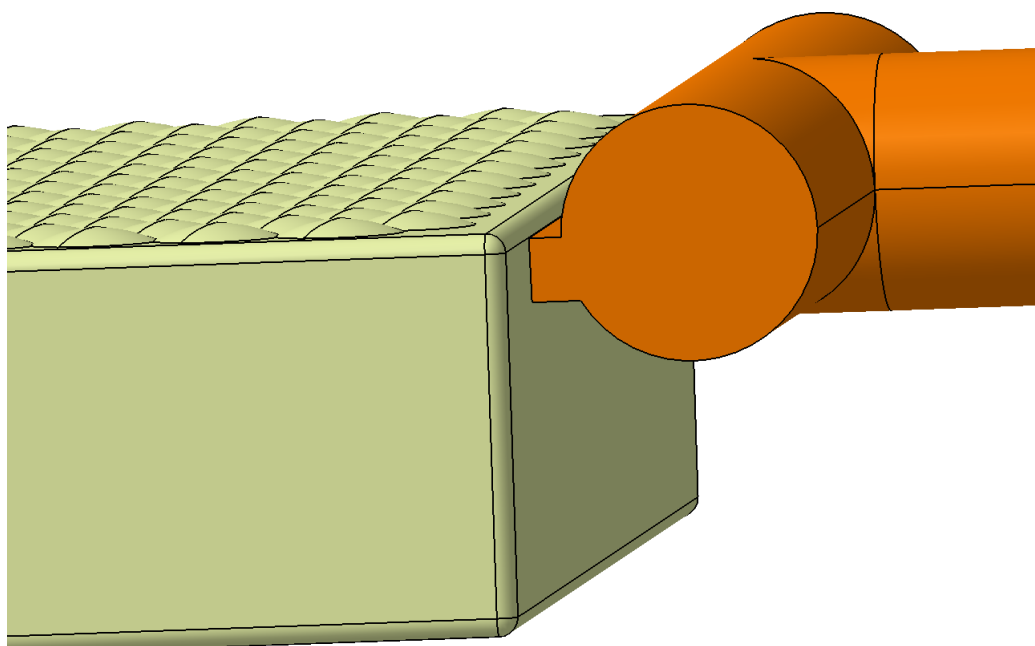
Obrázek 37 – Detail plnění dutiny vtokem ve středu stěny v čase 0,7 s

Neuniformní plnění bylo totožné pro všechny typy vtokových ústí a výsledek tedy indikoval nevhodné umístění polohy ústí ve středu čočky. Nevhodné umístění vtoku potvrdil rovněž výsledek výskytu studených spojů (Weld Lines), obdobný pro všechny typy ústí. Při plnění dutiny středem čočky dochází vlivem nestabilního plnění ke tvorbě studených spojů na optické části čočky, což je nepřijatelné. Studené spoje by mohly mít nežádoucí vliv na optické vlastnosti čočky a je nutné se jim v části optického desénu vyvarovat.



Obrázek 38 – Studené spoje při plnění vtokem ve středu stěny

Po vyhodnocení výsledků uniformity plnění a studených spojů již další výsledky pro umístění vtokového ústí uprostřed stěny čočky nebyly dále zkoumány, jelikož se ukázalo jako nevhodné. Čočka by byla plněna nerovnoměrně a na ploše s optickým desénem by vznikaly studené spoje. Z tohoto důvodu bylo umístění vtokového ústí změněno a zvoleno u plochy s optickým desénem (viz Obrázek 39). Po výpočtu analýz proběhlo opět vyhodnocení výše zmíněných výsledků při změněné poloze vtokového ústí.

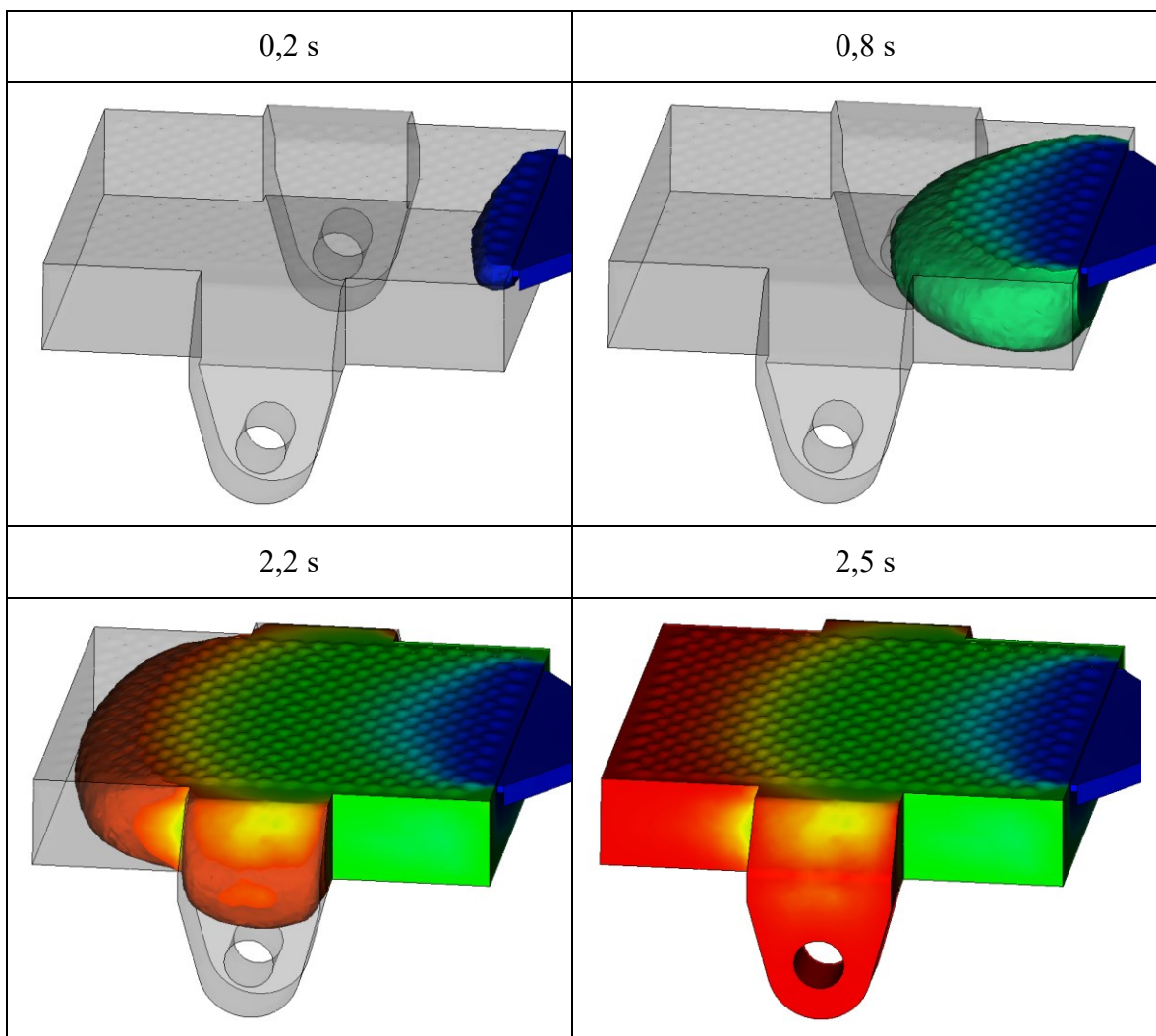


Obrázek 39 – Detail umístění vtoku u plochy s optickým desénem

7.3.1 Čas plnění (Fill Time)

Umístění vtokového ústí k ploše s optickým desénem vyřešilo problém nestabilního plnění. U všech typů vtokového ústí byla pozorována uniformita plnění s fontánovým typem toku v celém čase plnění, kdy se materiál ihned po vniknutí do dutiny formy odvaluje po její stěně. Dutina je na konci stanoveného času plnění zcela zaplněna. Ukázka uniformity plnění při použití vtoku u plochy s optickým desénem je zobrazena v *Tabulce 10*. Dutina se u vtokového ústí s nálitkem a 3 bodového ústí plní vzhledem k rozdílné trajektorii taveniny odlišně, u obou však rovněž dochází k fontánovému toku ihned po vniknutí taveniny do dutiny formy. Všechna vtoková ústí tedy plní dutinu dle požadavků.



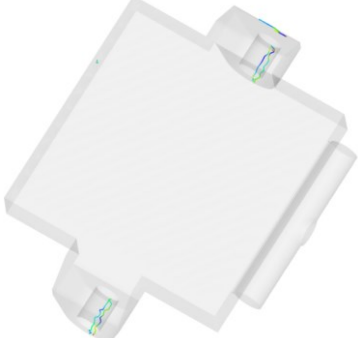

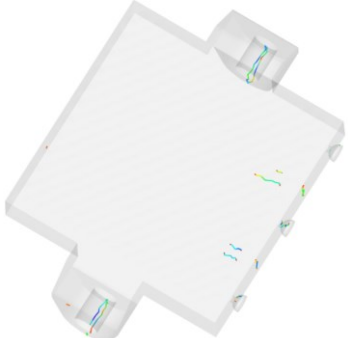
Tabulka 10 – Detail plnění dutiny vtokem u plochy s optickým desénem



7.3.2 Studené spoje (Weld Lines)

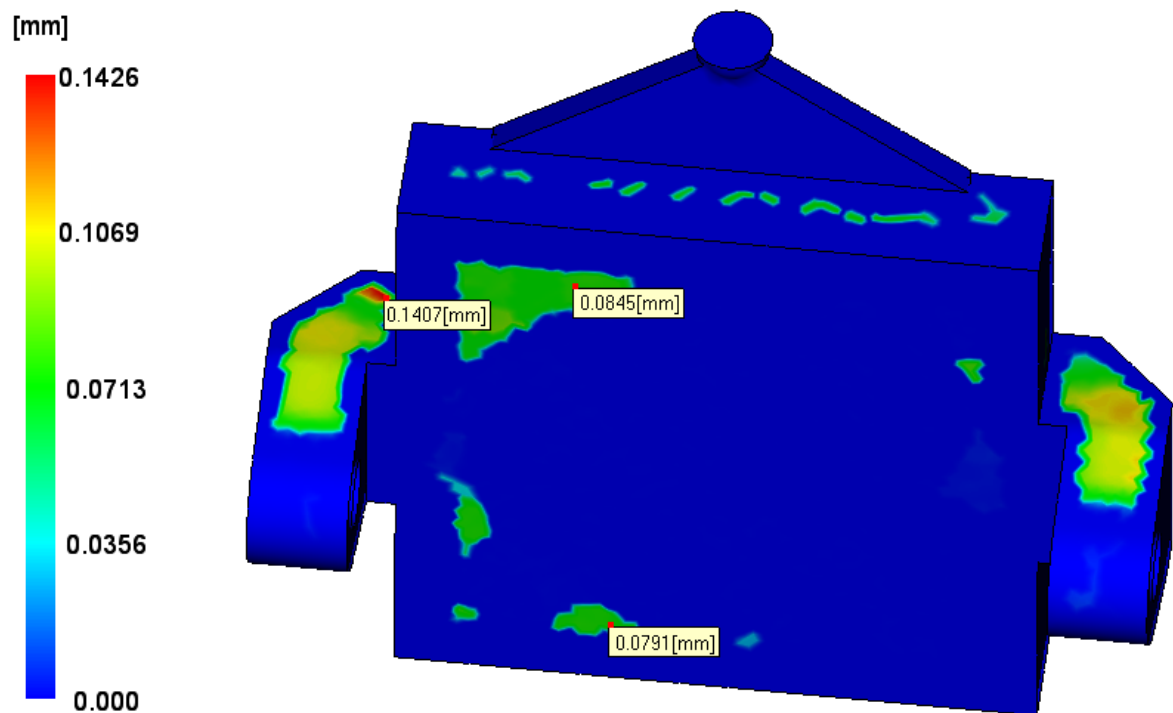
Při plnění dutiny u plochy s optickým desénem již nevznikají na optické ploše studené spoje. Výjimkou je boční 3 bodový vtok, u kterého vlivem spojení čel taveniny dochází ke vzniku studených spojů na optickém desénu a tento vtok tedy není vhodný pro výrobu optické čočky. U ostatních typů vtokových ústí studené spoje vznikají mimo optickou část, pouze v oblasti úchytek s montážními otvory. Vzhledem k tomu, že tyto části nejsou při užívání dílu výrazně mechanicky namáhány, by studené spoje v těchto místech neměly ovlivnit funkčnost výrobku. Výskyt studených spojů je zobrazen v *Tabulce 11*.

Tabulka 11 – Studené spoje při plnění dutiny vtokem u plochy s optickým desénem

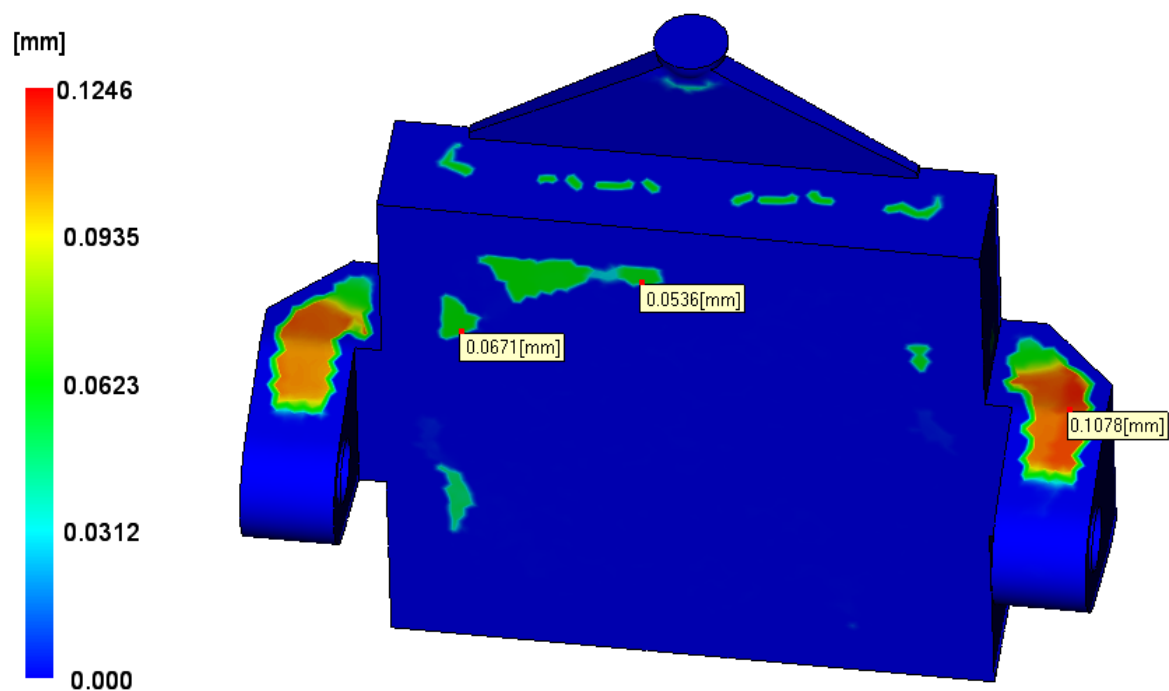
Vějířový vtok (Fan Gate)	Upravený vějířový vtok (Fan Gate 2)
	
Filmový vtok (Flash Gate)	Vtok s nálitkem (Tab Gate)
	
Boční 3 bodový vtok (Triple Side Gate)	
	

7.3.3 Velikost a umístění propadlin (Sink Marks Estimate)

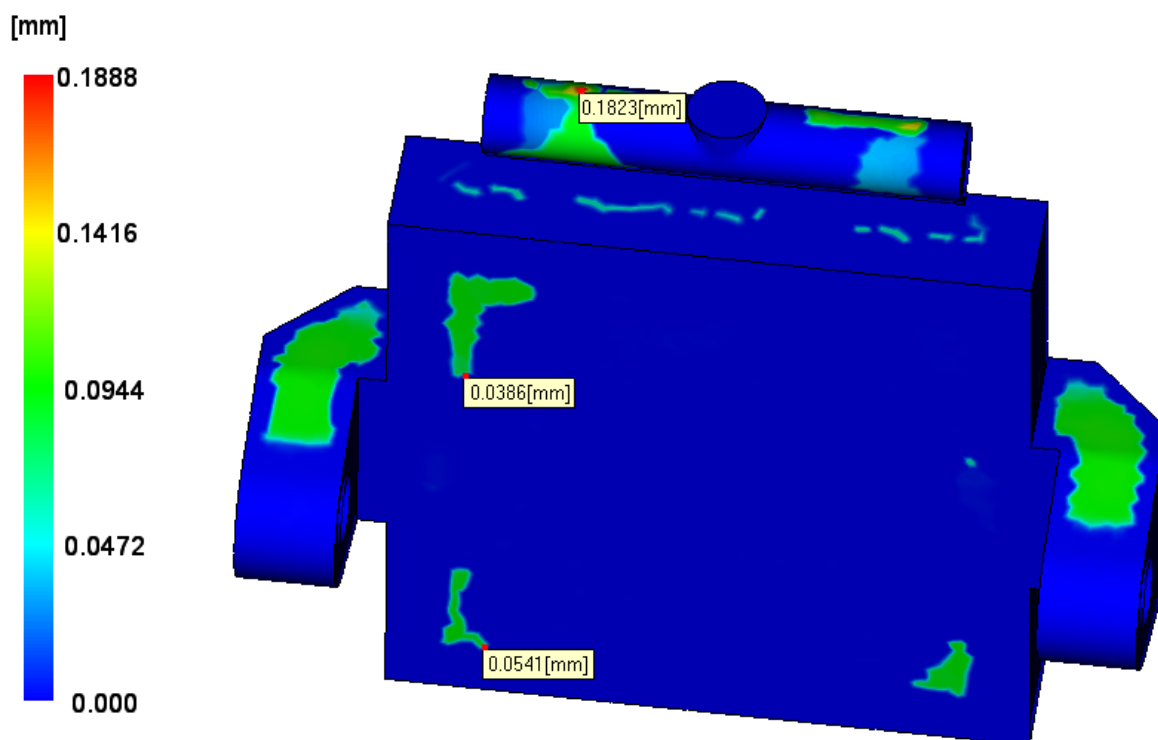
Dalším vyhodnocovaným výsledkem jsou propadliny. Jedná se o nežádoucí vady, které jsou u tlustostěnných dílů velmi časté. Propadliny mohou způsobovat zhoršení optických vlastností čočky a je tedy žádoucí zredukovat jejich počet a velikost na minimum. *Tabulka 12* ukazuje porovnání propadlin u jednotlivých typů vtokových ústí. Místa vzniku propadlin jsou značena barevnou škálou. Červená místa symbolizují největší propadliny, modrá místa pak propadliny nejmenší. Propadliny nevznikají na optickém desénu u žádného typu vtokového ústí, což je vysoce žádoucí. Vyskytují se však na protilehlé straně desénu, v okolí vtokových ústí, v oblasti úchytek s montážními otvory a na bočních stěnách čočky. U výsledků je vždy zaznačena maximální velikost propadlin pro dané vtokové ústí spolu s konkrétním místem, kde se toto maximum nachází. Jsou zde rovněž zaznačeny velikosti propadlin na protilehlé straně optického desénu, které by mohly negativně ovlivnit optické vlastnosti dílu. Tyto hodnoty jsou poté přehledně vyplněny v *Tabulce 12*. Z výsledků vyplývá, že nejmenší pokrytou plochu proti optickému desénu a nejnižší hodnoty velikosti propadlin v této oblasti dosahuje filmový vtok a upravený vějířový vtok.



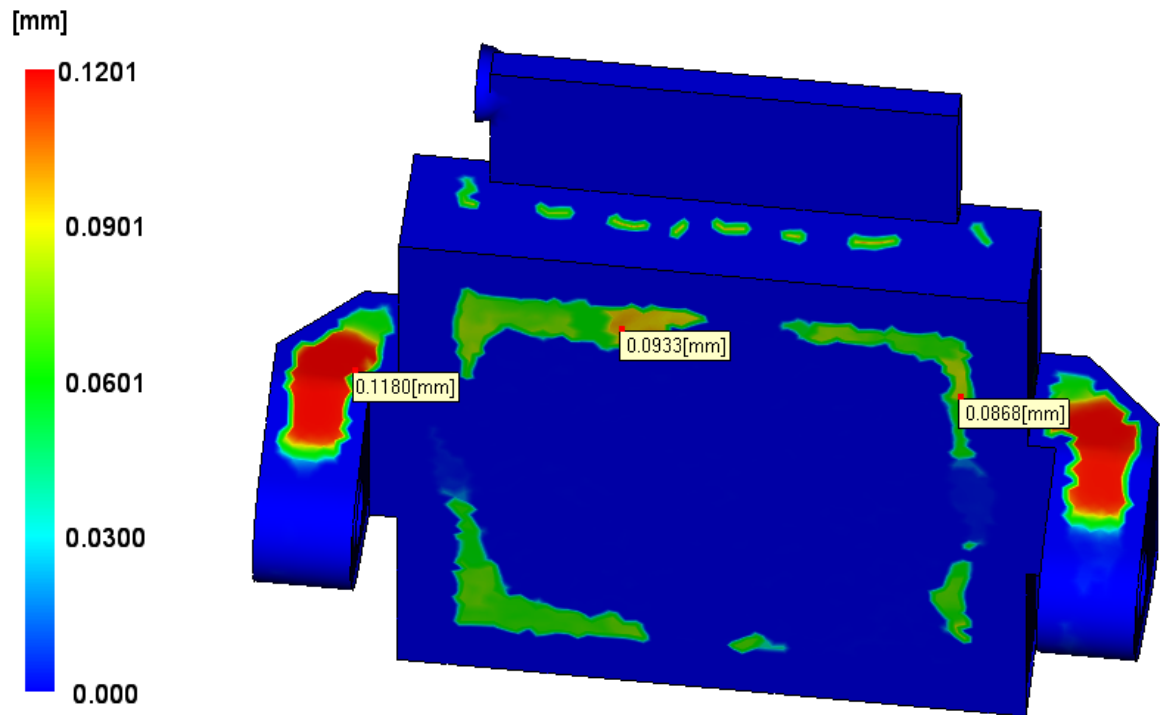
Obrázek 40 – Propadliny při plnění vějířovým vtokem



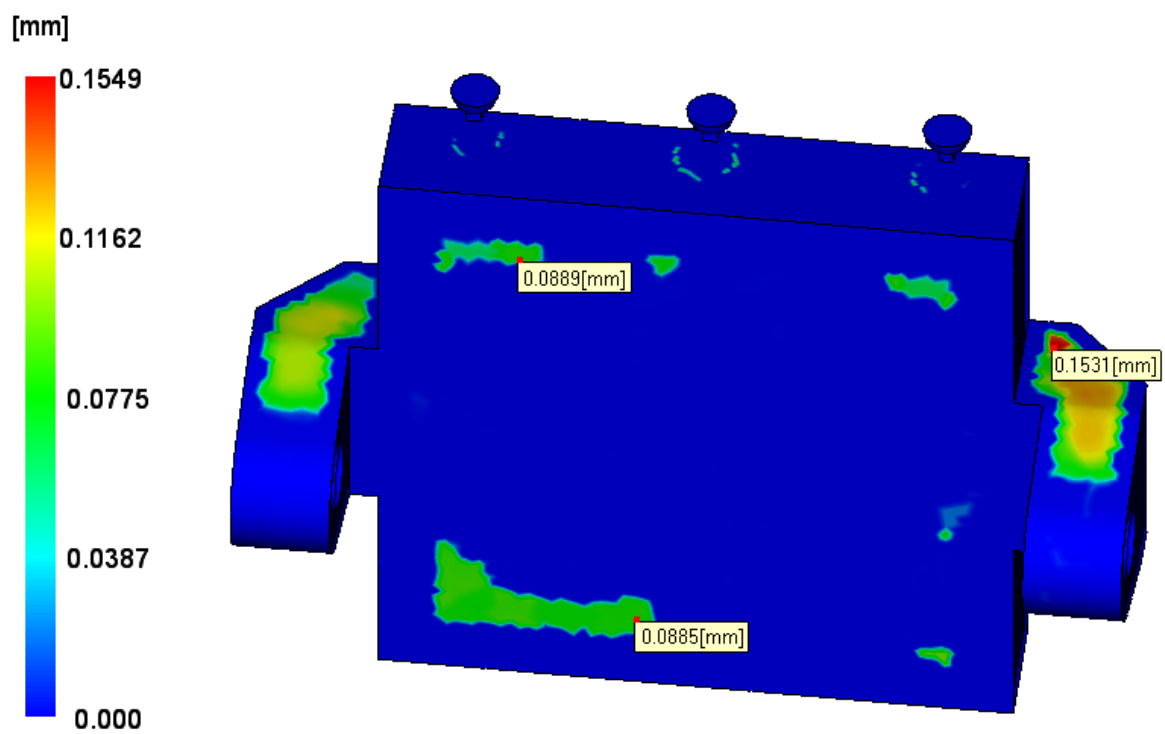
Obrázek 41 – Propadliny při plnění speciálním vějířovým vtokem



Obrázek 42 – Propadliny při plnění filmovým vtokem



Obrázek 43 – Propadliny při plnění vtokem s nálitkem



Obrázek 44 – Propadliny při plnění bočním 3 bodovým vtokem

Tabulka 12 shrnuje výsledky výskytu propadlin. Jsou v ní uvedeny maximální hodnoty propadlin pro daný typ vtokového ústí a velikost propadlin na protilehlé části optického desénu. Dále je v tabulce porovnána plocha, kterou na protilehlé straně optického desénu propadliny zaujímají, vyjádřená na škále 1 – 10 (10 znamená nejvyšší pokrytí plochy propadlinami). Z výsledků uvedených v tabulce vyplývá, že nejlepší výsledky vykazuje filmové vtokové ústí. Maximální velikost propadlin při použití filmového ústí je nejvyšší, hodnota se však nachází v místech samotného ústí a propadliny na dílu nabývají výrazně nižších hodnot. Pokrytí plochy propadlinami při využití tohoto typu ústí je minimální. Nejvyšší hodnoty propadlin na ploše proti optickému desénu dosahují velikosti přibližně 0,05 mm, nejsou tedy výrazné a neměly by mít větší vliv na optické vlastnosti čočky.

Tabulka 12 – Srovnání výsledků velikosti a umístění propadlin

	Max. velikost propadlin [mm]	Velikost propadlin na protilehlé ploše optického desénu [mm]	Pokrytí plochy propadlinami [-]
Vějířový vtok	0,14	0,08	3
Upravený vějířový vtok	0,12	0,07	2
Filmový vtok	0,19	0,05	2
Vtok s nálitkem	0,12	0,09	5
Boční 3 bodový vtok	0,15	0,08	3

7.3.4 Smykové napětí na stěně (Shear Stress At Wall)

Výsledek smykového napětí na stěně ukazuje, zda byla při plnění dutiny taveniny a následné dotlakové fázi překročena maximální hodnota dovoleného smykového namáhání, která pro zvolený materiál činí 0,5 MPa. Při překročení dovolené hodnoty je materiál nadměrně namáhán a degraduje. Z Výsledků vyplývá, že u všech typů vtokového ústí byla překročena dovolená maximální hodnota, nejnižší je však u vtokového ústí filmového. Nejvyšších hodnot smykové napětí dosahuje v nejužším místě vtokových ústí.

Tabulka 13 – Srovnání výsledků smykového napětí na stěně

	Max. velikost smykového napětí na stěně [MPa]
Vějířový vtok	1,54
Upravený vějířový vtok	0,60
Filmový vtok	0,51
Vtok s nálitkem	1,68
Boční 3 bodový vtok	2,10

7.3.5 Rychlost smykové deformace (Shear Rate, Maximum)

Výsledek ukazuje nejvyšší hodnotu rychlosti smykové deformace během vstřikovacího cyklu. Ta by neměla překročit maximální dovolenou hodnotu materiálu, tedy 100 000 s⁻¹. Tabulka 14 ukazuje, že při použití všech vtokových ústí nebyla překročena dovolená hodnota, materiál tedy nebude nadměrně přehříván a nebude docházet k jeho degradaci.

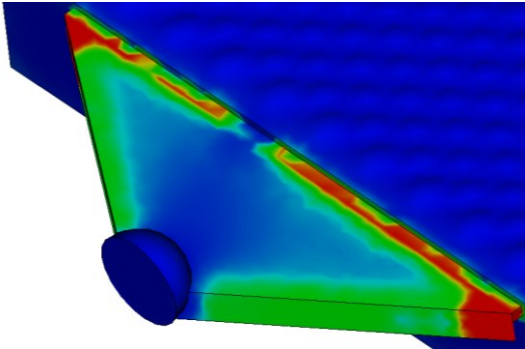
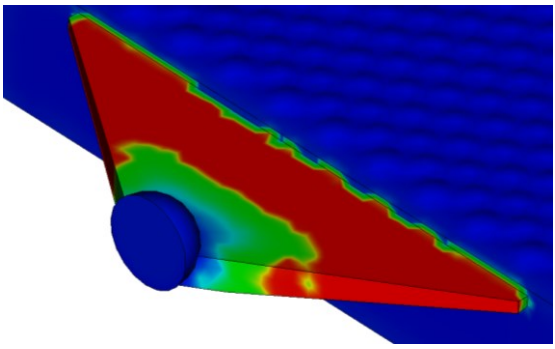
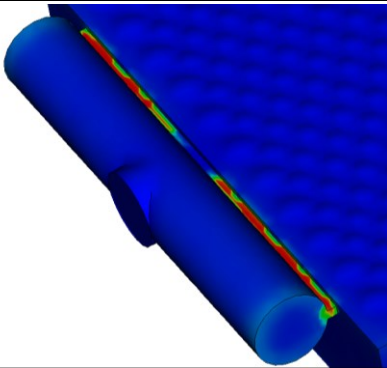
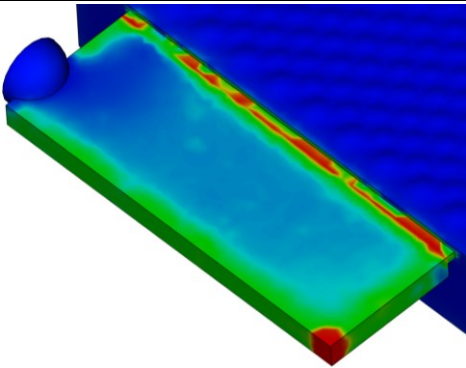
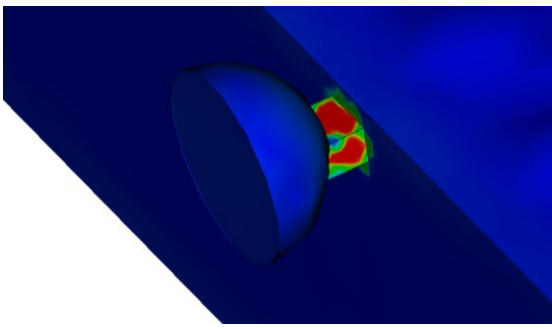
Tabulka 14 – Srovnání výsledků rychlosti smykové deformace

	Max. velikost rychlosti smyk. deformace [s ⁻¹]
Vějířový vtok	3600
Upravený vějířový vtok	3600
Filmový vtok	3800
Vtok s nálitkem	5000
Boční 3 bodový vtok	57 000

7.3.6 Zatuhlá vrstva materiálu (Frozen Layer Fraction)

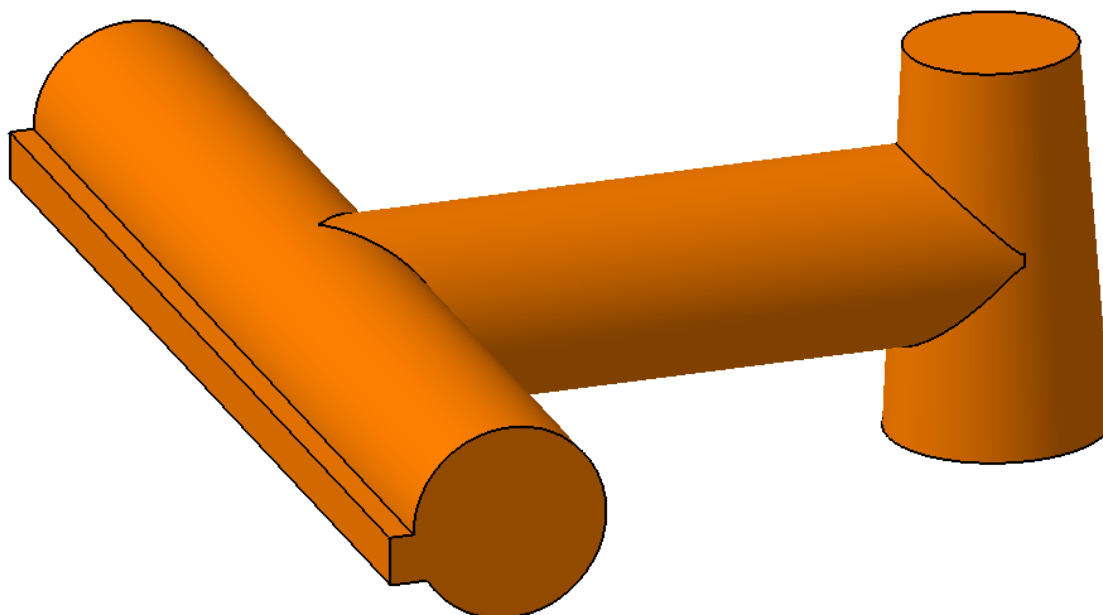
Účinnost působení dotlakové fáze jednotlivých vtokových ústí byla zkoumána podle výsledku zatuhlých vrstev materiálu v čase. Výsledek byl upraven tak, aby zobrazoval % zatuhlé vrstvy na konci dotlakové fáze, tedy v čase 17,5 s od začátku plnění dutiny. Červená barva zobrazuje místa se 100 % zamrzlou vrstvou materiálu, kudy už materiál nemůže proudit a modrá barva naopak oblasti, kde je materiál ve stavu tekutiny. Z výsledků vyplývá, že na konci dotlakové fáze proudí materiál částečně pouze u vějířového a filmového vtoku, ostatní vtoková ústí jsou v tomto čase již zatuhlá a dotlaková fáze není plně využita.

Tabulka 15 – Srovnání výsledků účinnosti dotlakové fáze

Vějířový vtok (Fan Gate)	Upravený vějířový vtok (Fan Gate 2)
	
Filmový vtok (Flash Gate)	Vtok s nálitkem (Tab Gate)
	
Boční 3 bodový vtok (Triple Side Gate)	
	

7.3.7 Vyhodnocení výsledků volby vtokového systému

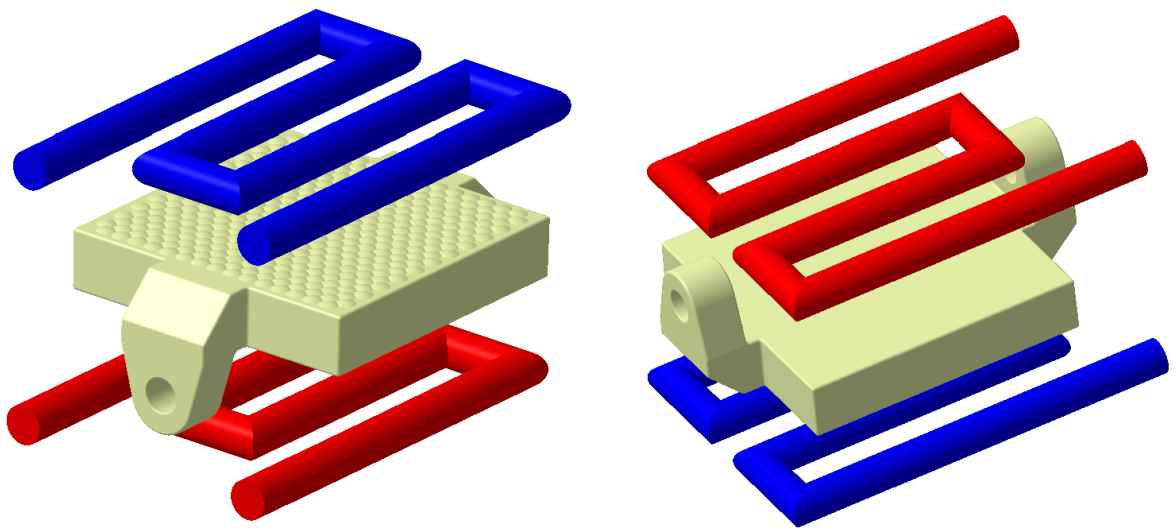
Dle výsledků analýz bylo rozhodnuto, že bude využit kombinovaný vtokový systém s filmovým vtokovým ústím. Filmové vtokové ústí se jeví jako nejvhodnější varianta ze všech analyzovaných provedení. Vykazuje nejlepší výsledky, co se vzniku propadlin týče a tavenina je pomocí něj dodávána rovnoměrně, bez vzniku studených spojů na kritických místech dílu. Hodnoty rychlosti smykové deformace jsou u tohoto ústí daleko pod dovolenou maximální hodnotou. Filmové ústí umožňuje nejdelší působení dotlakové fáze, což může výrazně pomoci při zmenšování deformací výrobku. Jedinou nevýhodou navrženého filmového vtokového ústí bylo překročení dovolené hodnoty smykového napětí na stěně pro použitý materiál. Materiál by mohl být vlivem nadměrného smýkání namáhán a degradován. Z tohoto důvodu byla u finální podoby filmového ústí provedena úprava rozměrů zúžené části, která přiléhá k dutině formy. Původní tloušťka zúžené části o velikosti 1 mm byla zvětšena na hodnotu 2 mm. Touto úpravou dojde k eliminaci vysokého smykového napětí na stěně v zúžené části vtokového ústí. Zúžená část s vyšší tloušťkou rovněž bude tuhnout déle a dotlaková fáze tak bude efektivnější a případně prodloužena tak, aby se během ní účinně doplňovala tavenina a kompenzovala tak smrštění tlustostěnné čočky. Na *Obrázku 45* je zobrazena finální verze studené části vtokového systému spolu se zvoleným filmovým ústím. Z rozvodného kanálu o průměru 8 mm putuje tavenina do válcové části filmového ústí o průměru 8 mm a šířce 48 mm. Zúžená část ústí má délku 1 mm a tloušťku 2 mm.



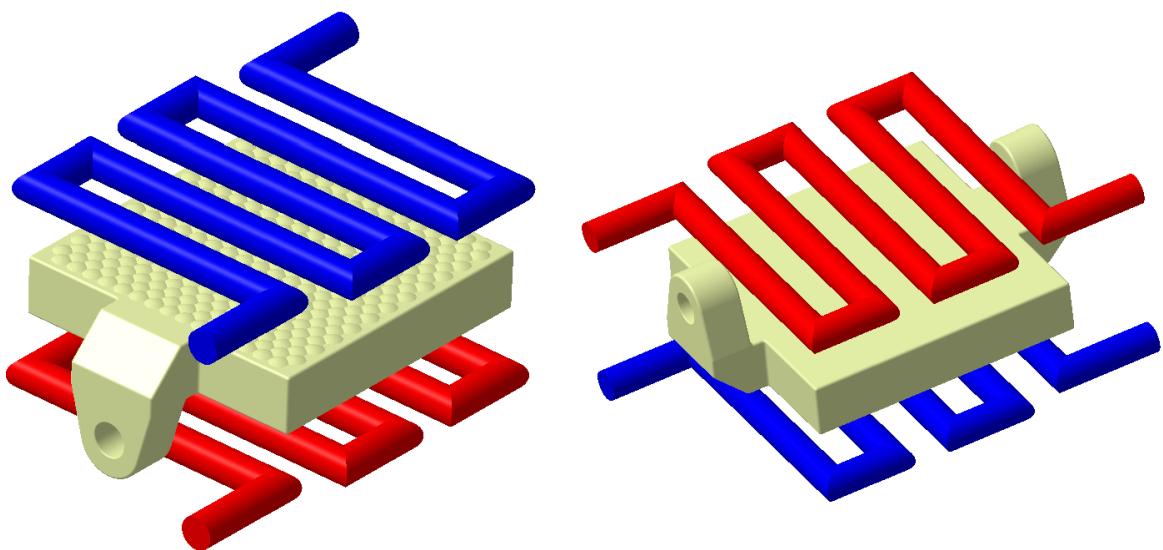
Obrázek 45 – Finální podoba studené části vtokového systému

7.4 Volba temperačního systému

Jako další byly provedeny analýzy temperace tvarových částí formy. Byly vytvořeny 2 návrhy konvenčních temperačních okruhů. Návrh č. 1 je složen z temperačních kanálů o průměru 8 mm, osa kanálů leží ve vzdálenosti 20 mm od stěny čocky. V návrhu č. 2 byly kanály přiblíženy ke stěně dílu do vzdálenosti 14 mm a jejich průměr byl zmenšen na hodnotu 7 mm. Rozložení kanálů vůči vstřikovanému dílu je zobrazeno na *Obrázku 46 – 47*. Červenou barvou jsou zobrazeny kanály temperující tvárník, modrou barvou pak kanály temperující tvárnici.



Obrázek 46 – Návrh temperace č. 1

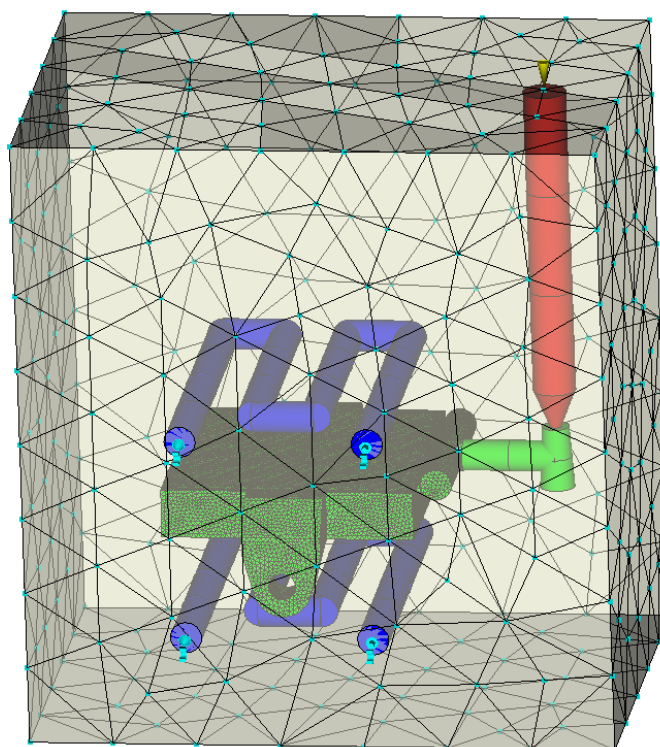


Obrázek 47 – Návrh temperace č. 2

Oba návrhy temperací byly poté převedeny do programu Autodesk Moldflow 2023 a spolu se vstříkovaným dílem a zvoleným vtokovým systémem vysítovány. Typ analýzy byl nastaven na analýzu chlazení + plnění + dotlaku + deformace (Cool + Fill + Pack + Warp). Procesní podmínky zůstaly totožné jako u předchozích analýz, nastavení chlazení bylo ponecháno jako výchozí. Jednotlivým větvím temperačního okruhu byly přiděleny vlastnosti temperačního média, zvoleny následovně:

- Typ temperačního média: Ethylenglykol (30 %) / Voda (70 %),
- kontrola temperačního média podle: Reynoldsovo číslo – 10 000 [-],
- teplota temperačního média: 93 °C.

Kombinace ethylenglykolu a vody byla zvolena proto, že ethylenglykol poskytuje vyšší odvod tepla než samotná voda a v kanálech při použití tohoto média dochází k nižšímu usazování nečistot. Médium je kontrolováno přes hodnotu Reynoldsova čísla, které uvádí, že při dosažení hodnoty 10 000 je zajištěno turbulentní proudění média, které tak maximalizuje odvod tepla z dutiny formy. Analýza poskytne výsledky o tlaku a průtoku temperačního média tak, aby bylo Reynoldsovo kritérium dodrženo a tyto parametry lze poté nastavit na temperační jednotce. Teplota média 93 °C je o 15 °C nižší než nastavená teplota vstříkovací formy. Pro tento typ analýzy byl vytvořen blok formy, který reprezentuje její tvarové části.

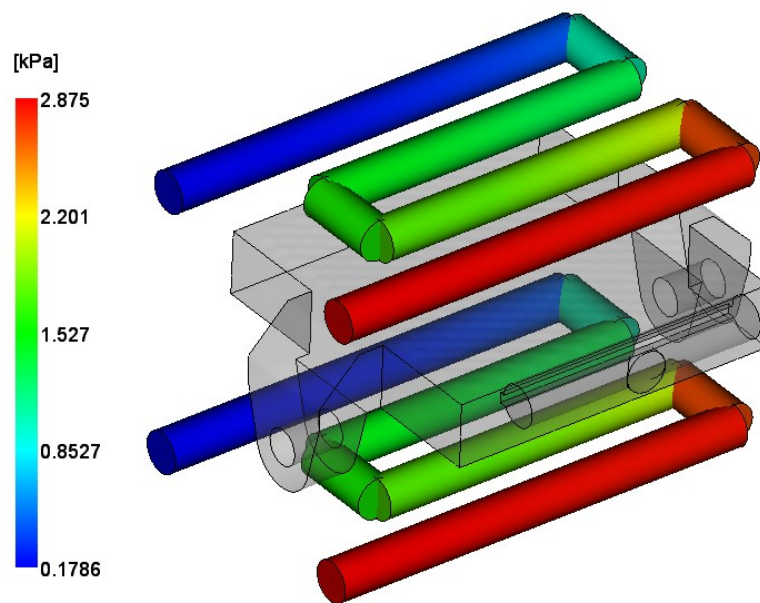


Obrázek 48 – Vysítovaný díl, vtokový, temperační systém a blok formy

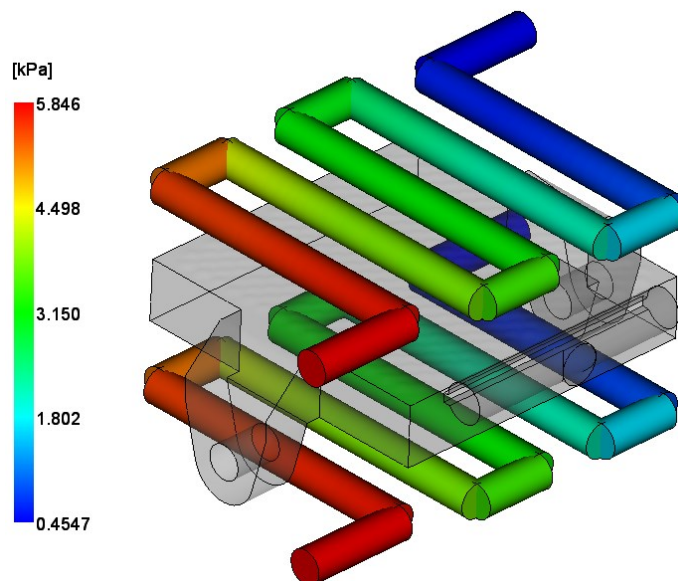
Po vypočtení analýz byly vyhodnoceny výsledky. Pro volbu temperace byl rozhodující tlak v temperačním okruhu, teplota temperačního média, čas pro dosažení vyhazovací teploty a rozložení teploty v dutině formy.

7.4.1 Tlak v temperačním okruhu (Circuit Pressure)

Výsledek zobrazuje tlakovou ztrátu temperačního média při jeho průchodu temperačními kanály. Důležité je, aby v žádném místě temperačního okruhu nebyl tlak záporný. V těchto tzv. mrtvých místech by médium neproudilo a odvod tepla by nebyl účinný. U obou návrhů je hodnota tlaku kladná a médium tedy proudí ve všech místech.



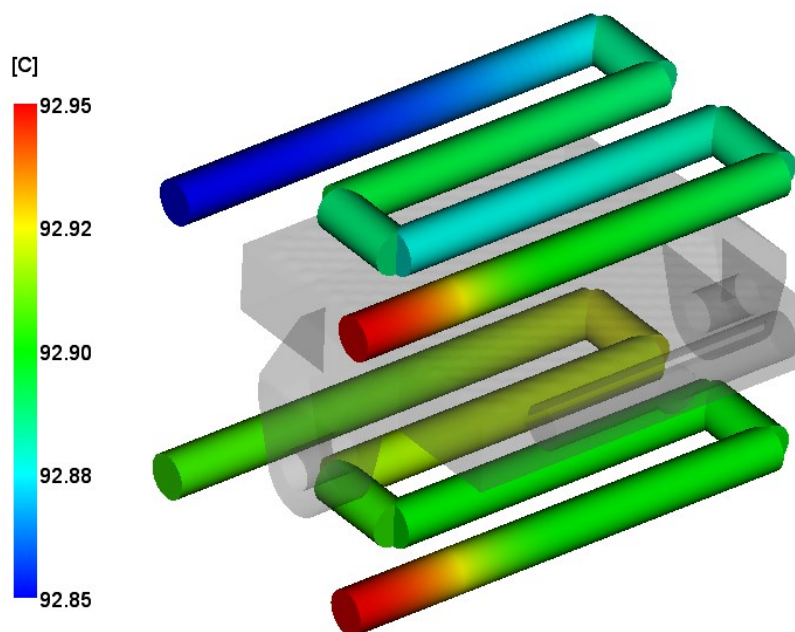
Obrázek 49 – Tlak v temperačním okruhu pro návrh č. 1



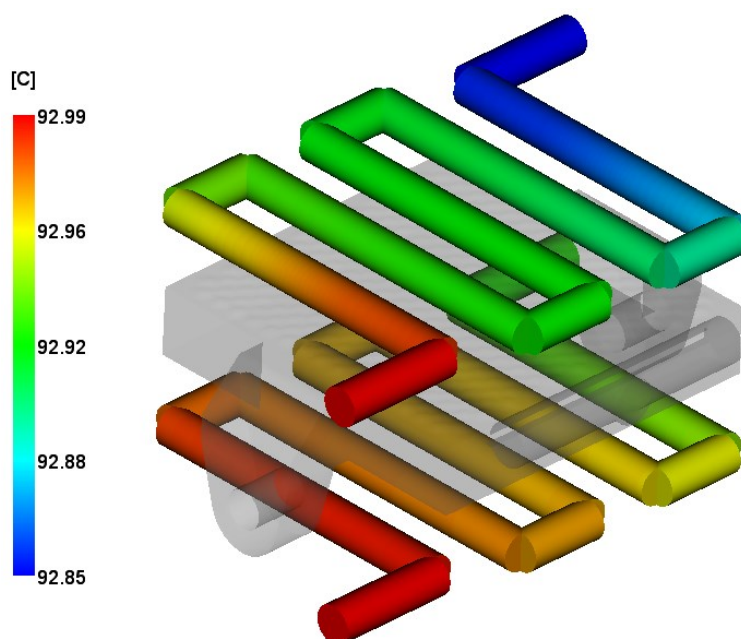
Obrázek 50 – Tlak v temperačním okruhu pro návrh č. 2

7.4.2 Teplota temperačního média (Circuit Coolant Temperature)

Výsledek zobrazuje teplotu temperačního média při jeho průchodu jednotlivými temperačními okruhy. Rozdíl v teplotách temperačního média na vstupu a výstupu do temperačního okruhu by v ideálním případě pro maximální odvod tepla neměl přesáhnout hodnotu 3 °C. Z výsledků vyplývá, že rozdíl teploty na vstupu a na výstupu temperačního média u obou návrhů nepřesahuje hodnotu 0,2 °C a je tedy pod doporučenou maximální hodnotou. Oba návrhy jsou z tohoto hlediska vyhovující.



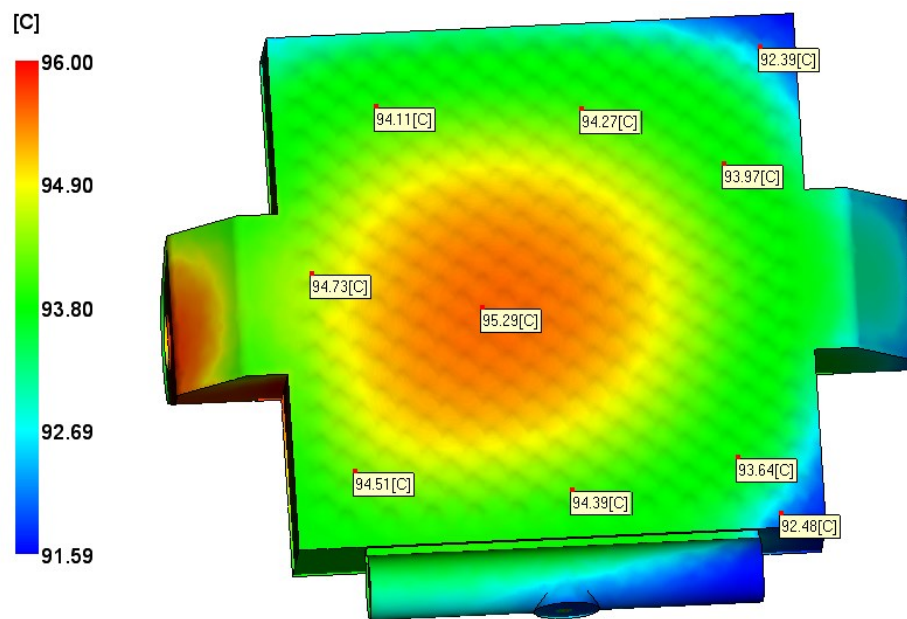
Obrázek 51 – Teplota temperačního média pro návrh č. 1



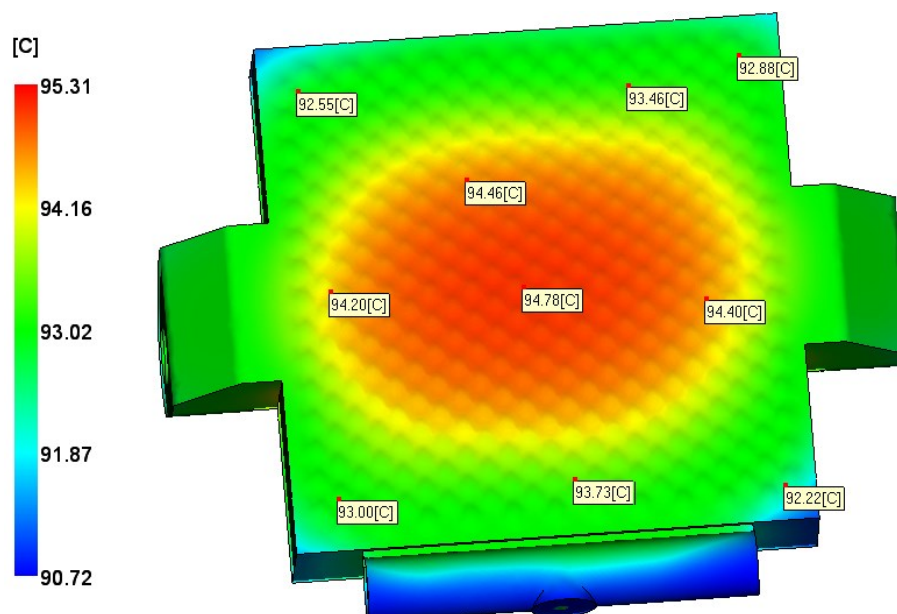
Obrázek 52 – Teplota temperačního média pro návrh č. 2

7.4.3 Teplota v dutině formy (Temperature, Mold)

Výsledek ukazuje rozložení teplotního pole uvnitř dutiny formy. Pro stabilitu rozměrů a vlastností v celém objemu výrobku je důležité, aby rozdíl teplot v různých částech dutiny nebyl příliš razantní. Maximální doporučený rozdíl v teplotě formy bývá udáván hodnotou 10 °C. Při překročení této hodnoty pak materiál v různých místech dutiny chladne s různou intenzitou a vlastnosti vystříknutého dílu tak mohou být rozdílné. Z výsledků plyne, že teplota formy a její rozložení je vyhovující pro oba návrhy. Rozdíl mezi teplotami činí u obou návrhů cca 5 °C a rozložení teplotního pole na optické části je podobné.



Obrázek 53 – Teplota v dutině formy pro návrh č. 1



Obrázek 54 – Teplota v dutině formy pro návrh č. 2

7.4.4 Čas pro dosažení vyhaz. teploty (Time To Reach Ejection Temperature, Part)

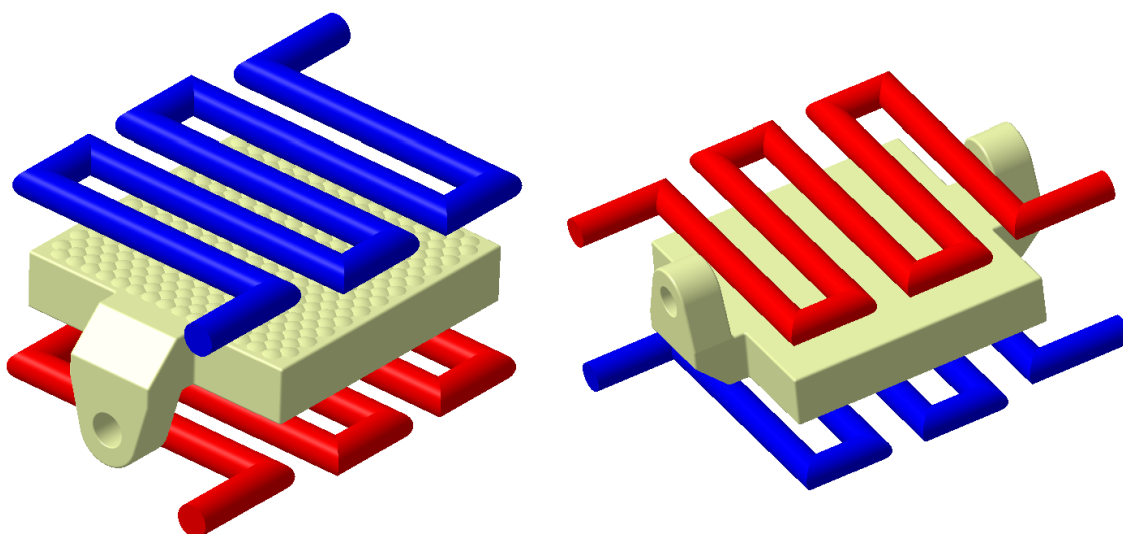
Výsledek určuje dobu od vstříknutí taveniny, za kterou bude možné výrobek bezpečně z dutiny formy vyjmout. Je ovlivněn nastavením toho, kolik % objemu materiálu musí být v dutině pro bezpečné vyhození již zatuhnuto. V procesních podmínkách byla tato hodnota nastavena na 90 % objemu materiálu. Čím kratší bude čas pro dosažení vyhazovací teploty, tím ekonomičtější bude samotná výroba. *Tabulka 16* ukazuje porovnání času pro dosažení vyhazovací teploty dílu při použití jednotlivých návrhů temperace. Z tabulky je patrné, že čas pro dosažení vyhazovací teploty je u návrhu č. 1 520 s, u návrhu č. 2 pak 505 s. Rozdíl mezi nimi je tedy 15 s ve prospěch návrhu č. 2. Tento rozdíl by přispěl k ekonomičnosti výroby a je tedy rozhodující při volbě temperačního systému.

Tabulka 16 – Porovnání časů pro dosažení vyhazovací teploty mezi návrhy

	Návrh č. 1	Návrh č. 2
Čas pro dosažení vyhazovací teploty [s]	520	505

7.4.5 Vyhodnocení výsledků volby temperačního systému

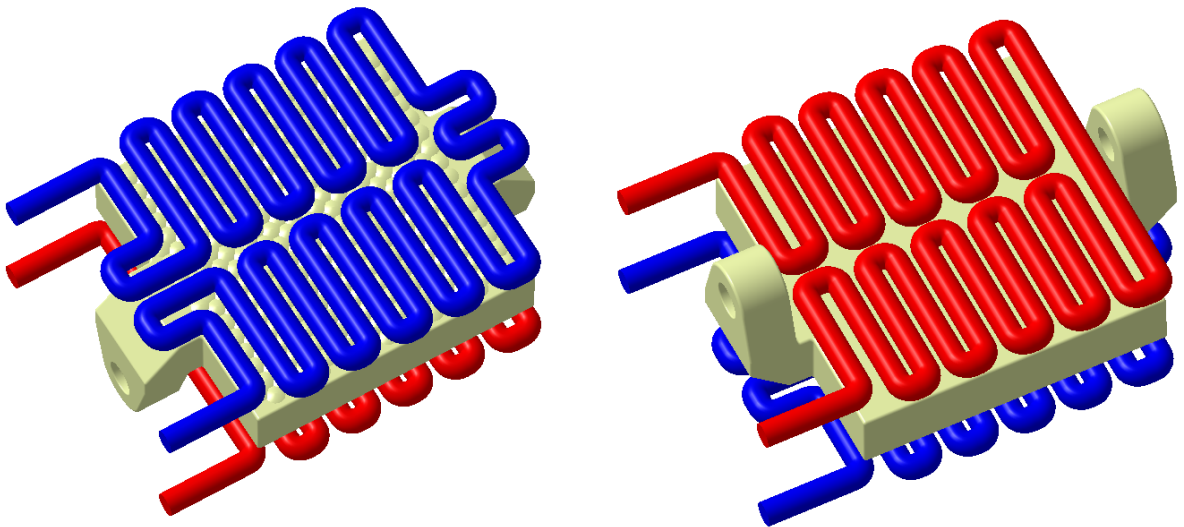
Na základě výsledků analýzy chlazení bylo rozhodnuto, že pro formu bude zvolen návrh č. 2 temperačního systému. Návrh splnil, stejně jako návrh č. 1, podmínku tlaku a teploty temperačního média spolu s podmínkou rozložení teplotního pole v dutině formy. Návrh č. 2 však vykázal zlepšení času pro dosažení vyhazovací teploty o 15 s a byl tedy vybrán z důvodu ekonomičnosti výroby. Temperační okruhy pro tvárník i tvárnici jsou tvořeny kanály o průměru 7 mm, jejichž osa je od stěny dílu ve vzdálenosti 14 mm.



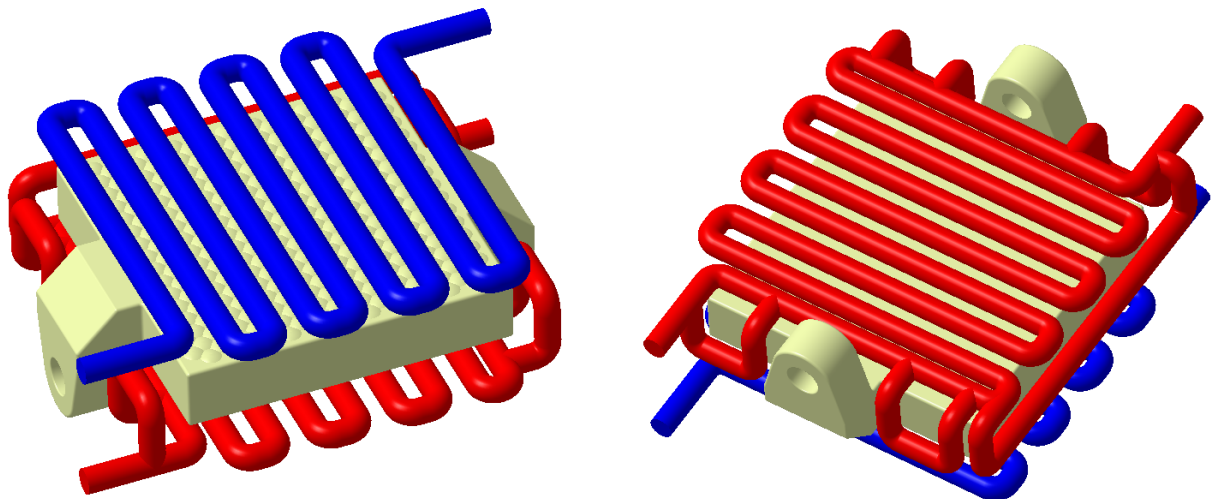
Obrázek 55 – Zvolená temperace tvárníku (červená) a tvárnice (modrá)

7.4.6 Návrh konformní temperace

Vzhledem k tomu, že přiblížení kanálů k dutině formy se současným zmenšením jejich průměru přineslo zlepšení v čase pro dosažení vyhazovací teploty, byly rovněž navrženy možnosti konformní temperace tvarových částí. Konformní temperace využívá okopírování tvaru součásti vysokým počtem kanálů o malém průměru. Návrhy však z důvodu vysokých nákladů na jejich realizaci spolu se složitým nastavením a náročností výpočtu analýz nebyly samotnému vyhodnocení podrobeny a slouží pouze jako možné zlepšení zvolené konvenční temperace tvarových částí formy. Byly provedeny 2 návrhy tak, aby byl tvar čochky co nejlépe okopírován. Červené kanály opět symbolizují temperaci tvárníku, modré kanály pak temperaci tvárnice. Návrhy jsou tvořeny kanály o průměru 5 mm ve vzdálenosti osy kanálu 7 mm od stěny dílu. Tvarové části by byly vytvořeny metodou DMLS.



Obrázek 56 – Konformní temperace návrh č. 1



Obrázek 57 – Konformní temperace návrh č. 2

7.5 Výběr materiálu tvarových částí

Analýza chlazení byla rovněž využita pro volbu materiálu tvarových částí formy. Vzhledem k dlouhé době chladnutí u tlustostěnných součástí vyvstává snaha o snížení celkové doby chlazení, avšak při zachování požadovaných vlastností vstříkovaného dílu. Jednou z možností pro docílení snížení času potřebného pro chlazení je využití materiálů, které mají vyšší koeficient tepelné vodivosti, a tedy rychleji odvádějí teplo. Analýzou byly porovnány 3 materiály, které by mohly sloužit pro výrobu tvarových částí formy. Konkrétně se jedná o nástrojovou ocel W300 (1.2343) od firmy Böhler, hliníkovou slitinu ALUMOLD 500 od firmy CONSTELLIUM a slitinu mědi AMPCOLOY 972 (CuCr1Zr) od firmy Ampco Metal. Vlastnosti jednotlivých materiálů jsou uvedeny v *Tabulce 17*. Z tabulky je patrné, že materiál ALUMOLD 500 má zhruba 6x vyšší koeficient tepelné vodivosti než ocel, materiál AMPCOLOY 972 pak dokonce 13x vyšší než ocel. Oproti oceli však tyto materiály vykazují nižší hodnotu modulu pružnosti v tahu a tvarové části z nich vyrobené tak budou mít horší mechanické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že je vstříkován tlustostěnný díl, by však odpor materiálu v dutině formy neměl být tak značný, jako je tomu u tenkostěnných dílů a tlak v dutině formy by tedy neměl nabývat výrazných hodnot. S tímto předpokladem by se v případě příznivých výsledků analýzy chlazení dalo pro výrobu tvarových částí uvažovat o použití materiálu s nižší pevností.

Tabulka 17 – Vlastnosti materiálů z databáze programu Autodesk Moldflow 2023

	W300	ALUMOLD 500	AMPCOLOY 972
Modul pružnosti [GPa]	215	71	120
Poissonovo číslo [-]	0,29	0,33	0,31
Hustota [kg/m ³]	7800	2800	8900
Koeficient tepelné vodivosti [W/m.K]	25	153	320

Procesní podmínky analýz byly totožné jako v předešlé kapitole, pouze s jinými materiály tvarových částí. Po výpočtu analýz byly zhodnoceny výsledky, kdy byl zkoumán vliv materiálu tvarových částí na čas pro dosažení vyhazovací teploty. Dále byl zjišťován vliv na deformace čochky vlivem rozdílného odvodu tepla při použití různých materiálů tvarových částí.

7.5.1 Čas pro dosažení vyhaz. teploty (Time To Reach Ejection Temperature, Part)

Bylo zjištěno, že při použití materiálu ALUMOLD 500 se oproti oceli čas pro dosažení vyhazovací teploty vstřikované čočky snížil o 20 s. Při využití materiálu AMPCOLOY 972 se oproti oceli čas snížil dokonce o 30 s. Výsledek ukazuje, že při použití materiálu AMPCOLOY 972 lze snížit celkový čas vstřikovacího cyklu, a tedy zvýšit ekonomičnost výroby. Porovnání časů pro dosažení vyhazovací teploty udává *Tabulka 18*.

Tabulka 18 – Porovnání časů pro dosažení vyhazovací teploty pro různé materiály tvarových částí

	W 300	ALUMOLD 500	AMPCOLOY 972
Čas pro dosažení vyhazovací teploty [s]	505	485	475

7.5.2 Celková deformace (Deflection, All Effects)

Výsledky ukázaly, že celková deformace při použití ocelových tvarových částí nabývá hodnot 0,48 mm. Při použití materiálu ALUMOLD 500 je deformace nižší, cca 0,42 mm. Při využití materiálu AMPCOLOY 972 pak deformace nabývá hodnot 0,45 mm. Vzhledem k optickému charakteru vstřikované součásti je žádoucí deformace dílu snížit na co nejmenší hodnotu a materiály s vyšším odvodem tepla tento cíl splnily.

Tabulka 19 – Porovnání celkové deformace pro různé materiály tvarových částí

	W 300	ALUMOLD 500	AMPCOLOY 972
Celková deformace [mm]	0,48	0,42	0,45

7.5.3 Vyhodnocení výsledků volby materiálu tvarových částí

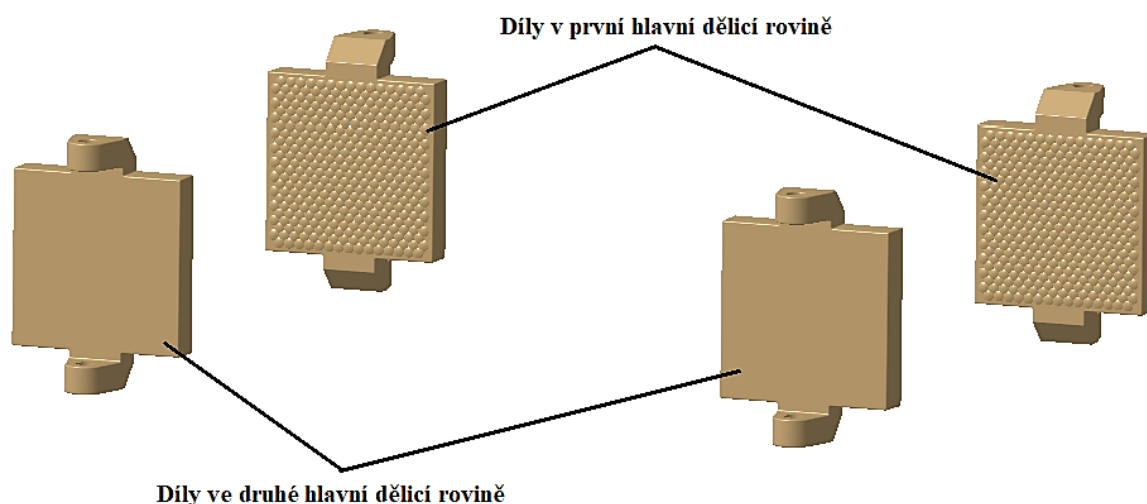
Materiálem pro tvarové části byla zvolena slitina mědi AMPCOLOY 972 od firmy Ampco Metal. Využitím tohoto materiálu bylo docíleno nižších deformací ve vstřikovaném dílu, navíc byla jeho použitím zkrácena doba vstřikovacího cyklu o 30 s v porovnání s ocelovými tvarovými částmi. Materiál je rovněž díky nižší pevnosti v porovnání s ocelí lépe obrobitelný, což výrazně snižuje celkové náklady na výrobu tvarových částí formy.

8 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

Při konstrukčním návrhu vstřikovací formy je využito maximální množství normálií od firmy Meusburger. Využití normálií snižuje celkové náklady na výrobu formy a usnadňuje její konstrukci. Konstrukční návrh byl proveden v programu CATIA V5R19. Návrh formy byl zhotoven na základě předběžných analýz vstřikovacího procesu a dle obecných pravidel pro konstrukci vstřikovacích forem.

8.1 Násobnost formy a rozvržení dílů ve formě

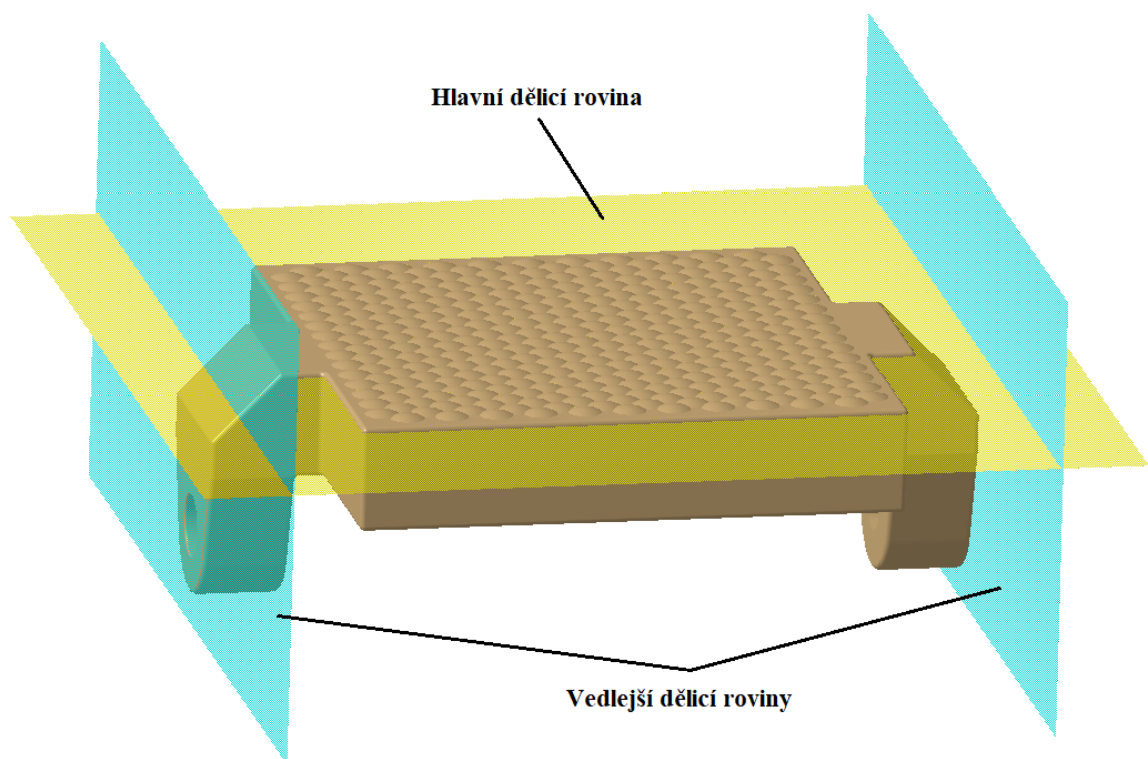
Forma byla vzhledem k rozměrům a geometrii dílu zvolena jako čtyřnásobná. To znamená, že v každém vstřikovacím cyklu budou vyrobeny čtyři totožné výrobky. Dle rozměrů dílu a způsobu jeho zaformování bylo rozhodnuto, že forma bude řešena jako etážová. Forma tedy bude mít dvě hlavní dělicí roviny, kdy v každé nich budou zrcadlově vytvořeny dva díly. Etážové uspořádání formy umožní její nasazení na menší vstřikovací stroj, tak jako kdyby byla forma pouze dvojnásobná s jednou hlavní dělicí rovinou a velikost uzavírací síly pro výrobu čtyř dílů bude totožná jako při vstřikování do dvojnásobné formy. Bylo ověřeno, že etážovou koncepcí lze v daném případě dosáhnout zmenšení velikosti desek formy z rozměru 646x646 mm na 446x446 mm, tedy o 200 mm na šířku i výšku. *Obrázek 57* ukazuje rozložení výrobků ve formě. Forma je rozdělena na tři části. Ve střední části formy jsou umístěny čtyři tvárnice, po dvou zrcadlově na každou stranu od středu formy. V pravé a levé části formy se pak nacházejí vždy dva tvárníky. Tento koncept rozložení dílů, umístěných ve dvou patrech, vytváří čtyřnásobnou etážovou formu se dvěma hlavními dělicími rovinami.



Obrázek 58 – Etážové rozložení výrobků ve formě

8.2 Volba dělicích rovin

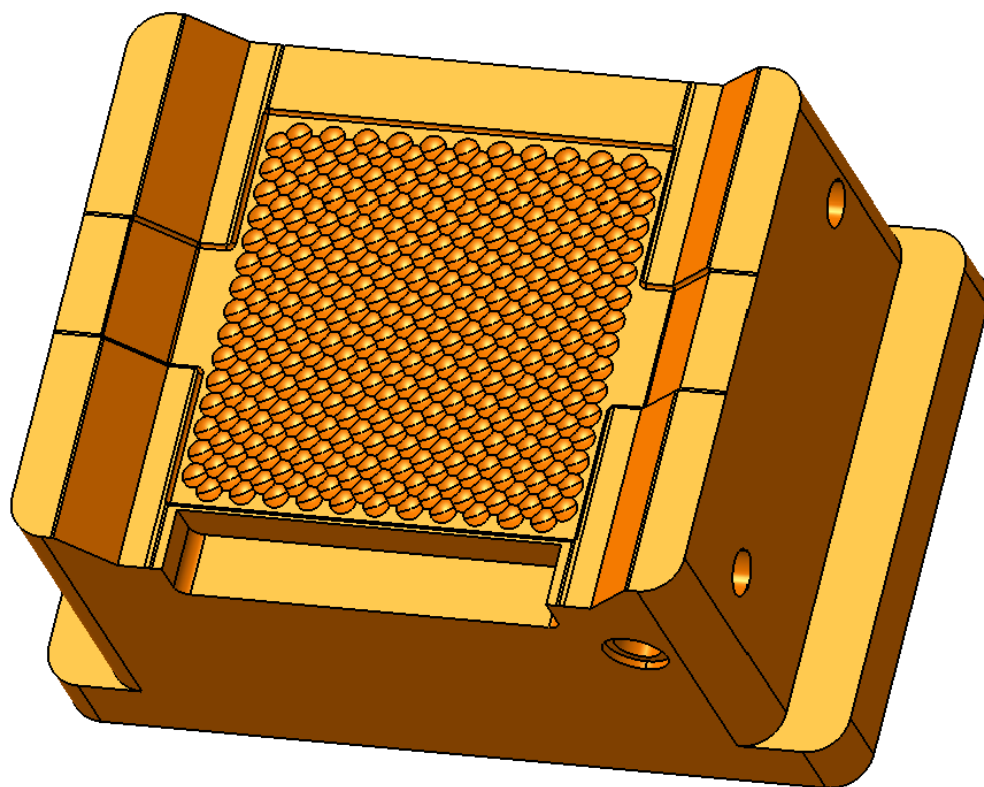
Hlavní dělicí rovina byla zvolena na základě výsledků analýz vstřikovacího cyklu. Volbu umístění hlavní dělicí roviny ovlivnila poloha zvoleného vtokového ústí a samotná geometrie dílu. Hlavní dělicí rovina je tedy umístěna na hraně zaoblení u plochy s optickým desénem čočky, jak ukazuje *Obrázek 59*. Takto zvolená hlavní dělicí rovina umožňuje snadné odformování vstřikovaného dílu. Vedlejší dělicí roviny jsou dvě, kdy v každé z nich dochází k odformování montážního otvoru na boční straně čočky. Vedlejší roviny byly zvoleny ve směru rovnoběžném ke směru otevírání formy, hlavní dělicí rovina pak kolmo na směr otevírání formy.



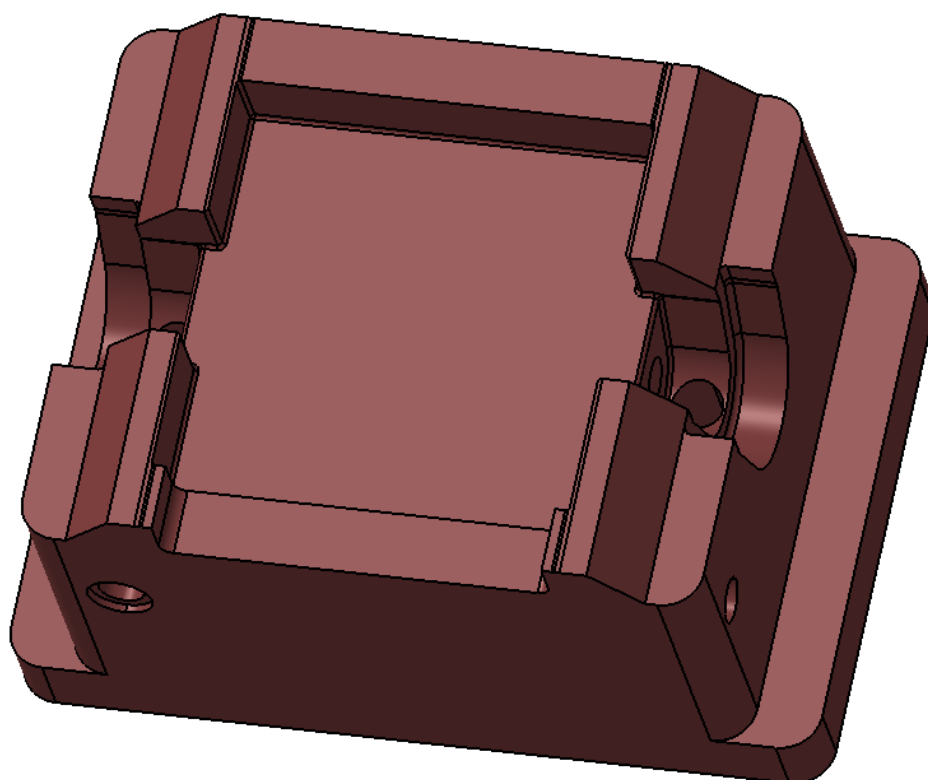
Obrázek 59 – Dělicí roviny

8.3 Tvarové části formy

Tvarové části tvoří dutinu vstřikovací formy, která je negativem vyráběného dílu. Tvarová dutina je tvořena tvárnici, tvárníkem a bočními tvarovými jádry. Dutina byla zvětšena o hodnotu smrštění materiálu vstřikovaného dílu (0,5 %). Na tvárníku a tvárnici bylo vytvořeno osazení pro montáž do kotevních desek vstřikovací formy. Všechny tvarové části jsou dle výsledků analýz vstřikovacího cyklu vyrobeny z materiálu AMPCOLOY 972. V tvárníku a tvárnici jsou vytvořeny kapsy pro vložení vyměnitelných vložek, které vytváří studenou část vtokového systému. Výška tvárnice je 56 mm, výška tvárníku pak 66 mm.

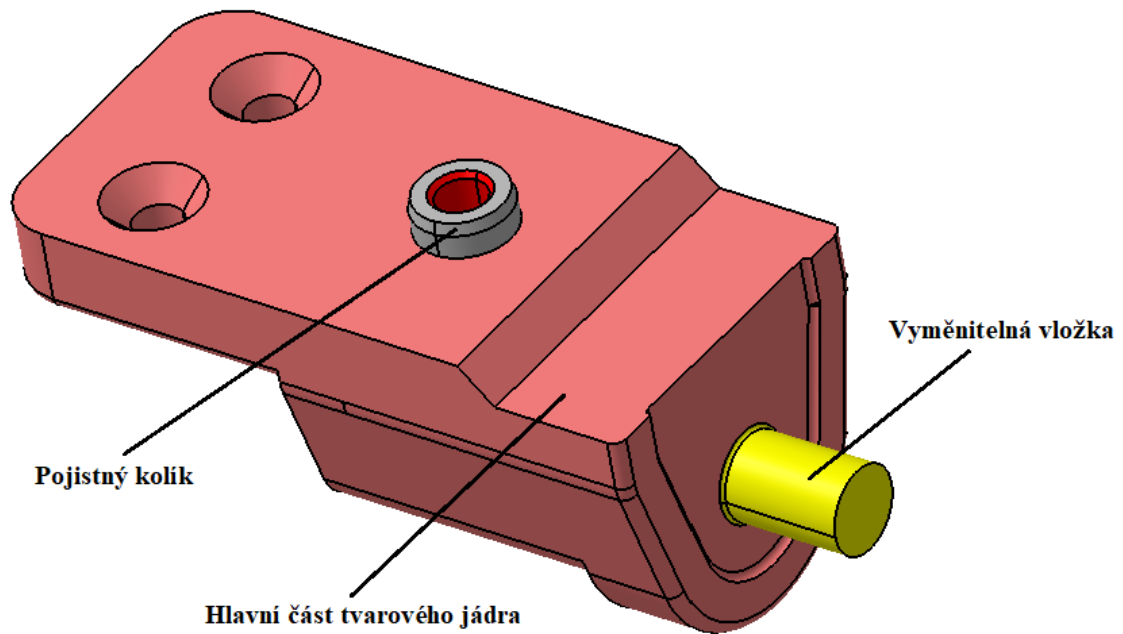


Obrázek 60 - Tvárnice

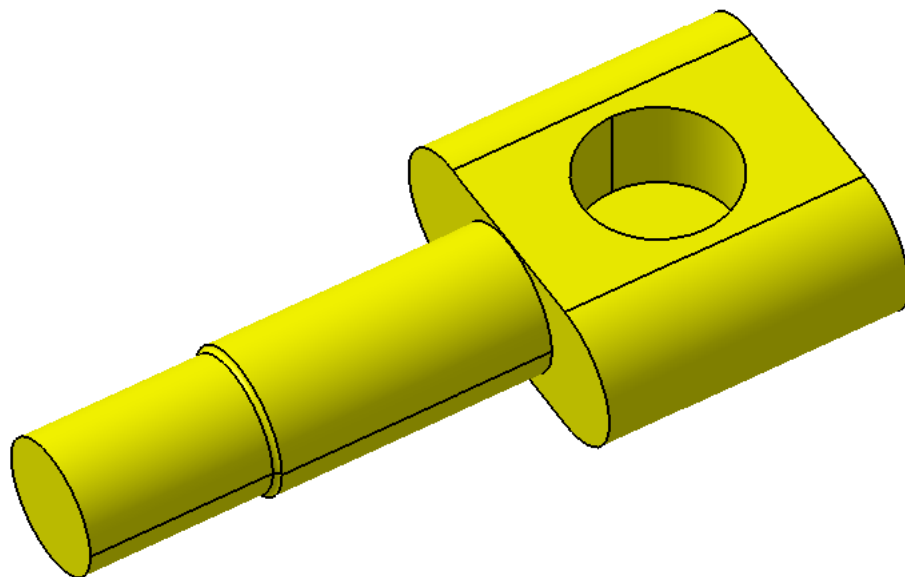


Obrázek 61 - Tvárník

Boční tvarová jádra slouží k vytvoření výstupků s montážními otvory po stranách čočky. Tvarové jádro je složeno ze dvou částí. Samotný montážní otvor je odformován pomocí vyměnitelné vložky, kterou lze v případě opotřebení jednoduše vyjmout a vyměnit za nový kus. Vložka je v hlavní části bočního tvarového jádra nalisována a zajištěna pojistným válcovým kolíkem s vnitřním závitem o průměru 8 mm.



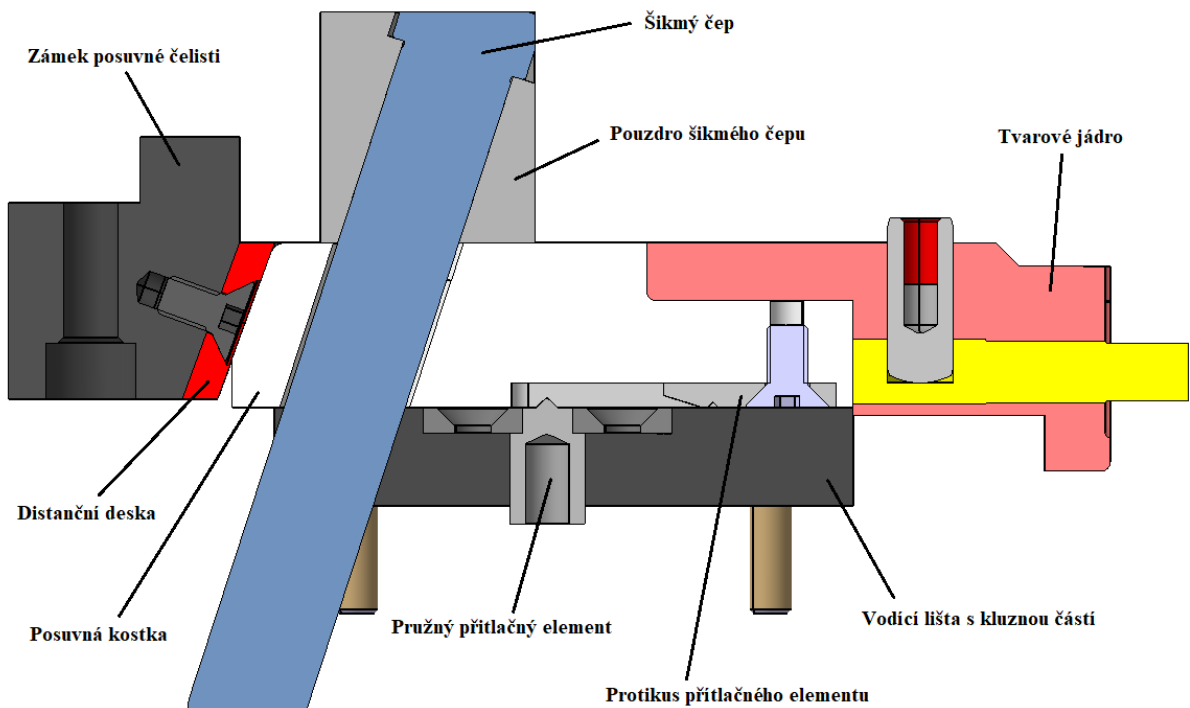
Obrázek 62 – Boční tvarové jádro



Obrázek 63 – Detail vyměnitelné vložky tvarového jádra

8.4 Boční posuvné čelisti

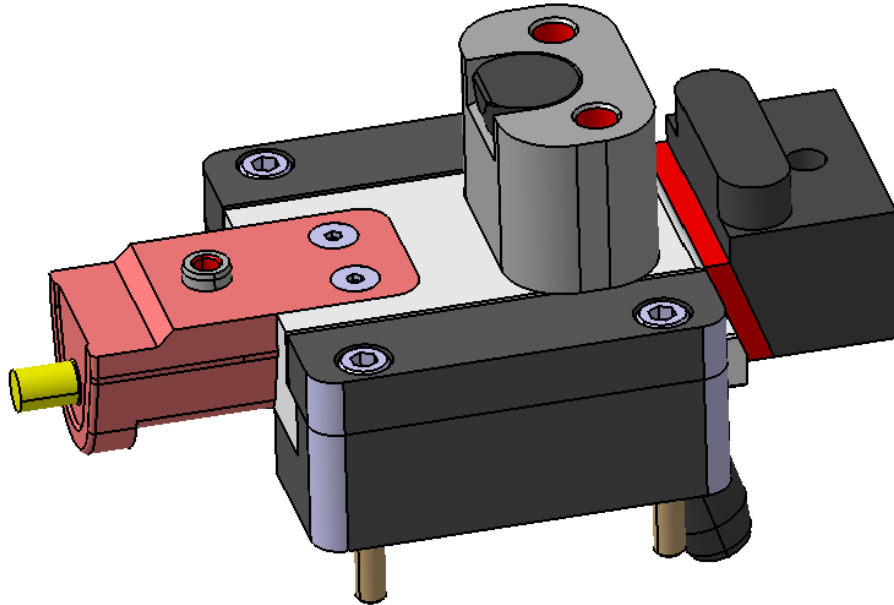
Boční posuvné čelisti představují sestavu komponent, které slouží k pohybu bočních tvarových jader při otevírání a zavírání vstřikovací formy. Jsou rozděleny na dvě části. Část na straně tvárníku je složena ze samotného tvarového jádra, které je připevněno na posuvnou kostku. Posuvná kostka se pohybuje mezi dvěma vodícími lištami, které mají na spodní straně kluznou část. Součástí boční posuvné čelisti na straně tvárnice je rovněž pružný přitlačný element s protikusem, který slouží pro zajištění tvarového jádra v poloze po otevření formy. Druhou část bočních posuvných čelistí, na straně tvárnice, tvoří celkem 4 komponenty. Jedná se o šikmý čep, pouzdro šikmého čepu, zámek posuvné čelisti a distanční desku, která spolu se zámkem zajišťuje polohu boční posuvné čelisti při uzavřené formě. Obě části bočních posuvných čelistí jsou vloženy do vytvořených prostor v jednotlivých deskách formy a připevněny k nim pomocí šroubů. Pro vytvoření bočních posuvných čelistí byly použity normálie od firmy Meusburger.



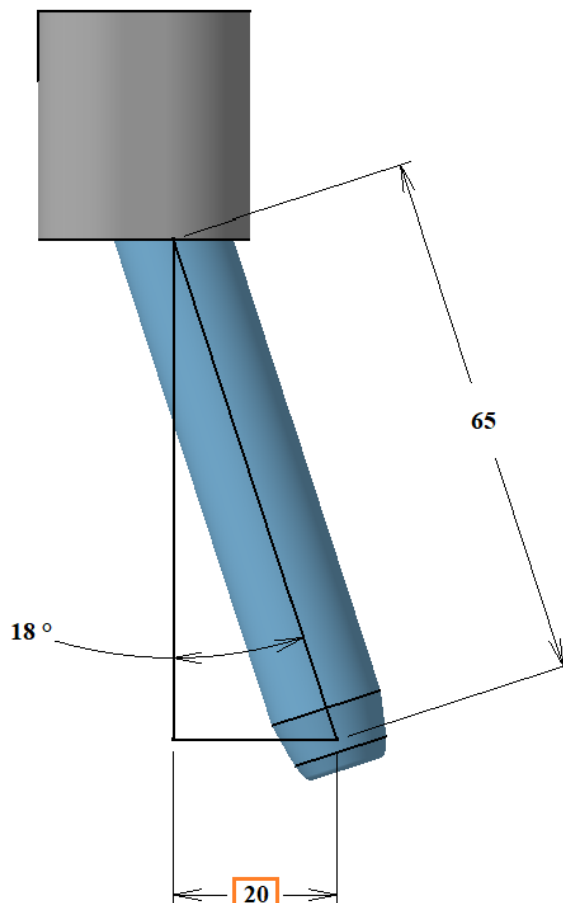
Obrázek 64 – Řez boční posuvnou čelistí

Při otevírání formy dochází k pohybu posuvné kostky s tvarovým jádrem po šikmém čepu, který je uložen v protilehlé části formy. Posuvná kostka s tvarovým jádrem jsou po čepu posouvány směrem od tvarové dutiny. V otevřené poloze (po vyjetí šikmého čepu z kostky) jsou pak zajištěny pružným přitlačným elementem, jehož pružná část je zatlačena do protikusu připevněném na posuvné kostce. Vzdálenost, o kterou se posuvná kostka oddálí od tvarové dutiny, a tedy vzdálenost pro umístění pružného přitlačného elementu od jeho

protikusu, zobrazuje *Obrázek 65*, konkrétně se jedná o hodnotu 20 mm. Vzdálenost je dostatečná pro oddálení bočního tvarového jádra od dutiny tak, aby mohl být díl bez problému vyhozen a nedocházelo tak ke kolizi dílu a jádra.



Obrázek 65 – Sestava boční posuvné čelisti

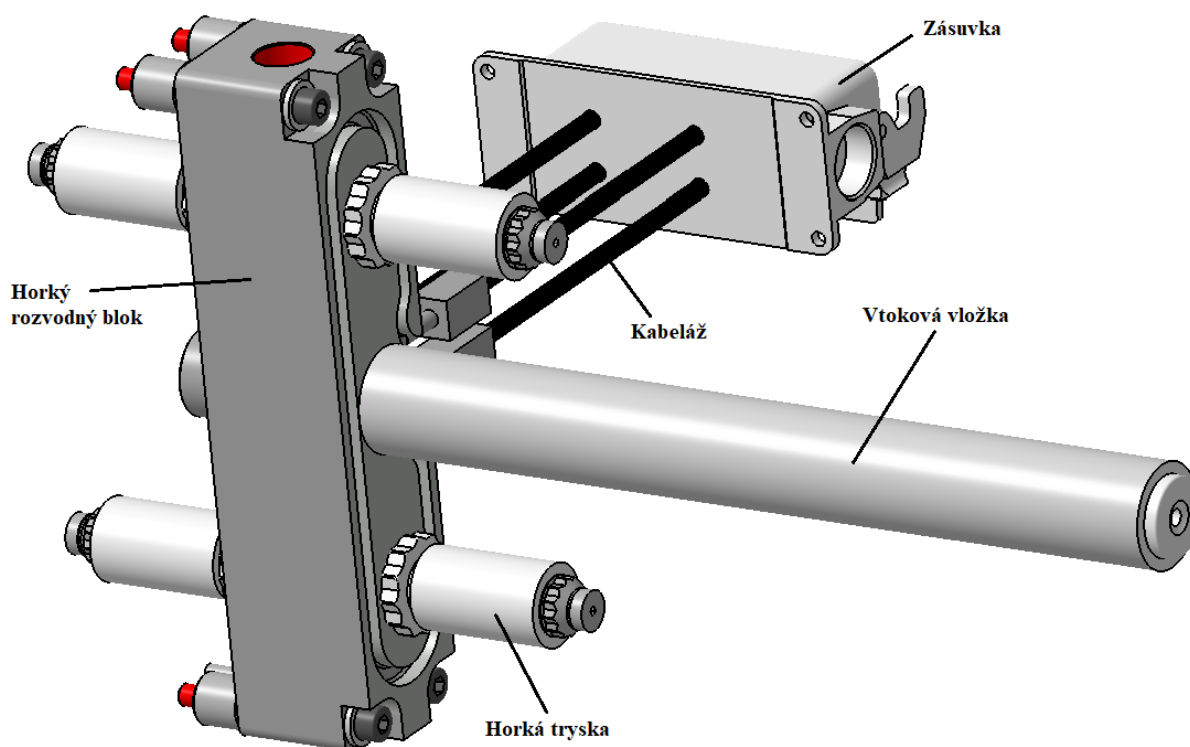


Obrázek 66 – Určení vzdálenosti pro umístění pružného přitlačného elementu

8.5 Vtokový systém formy

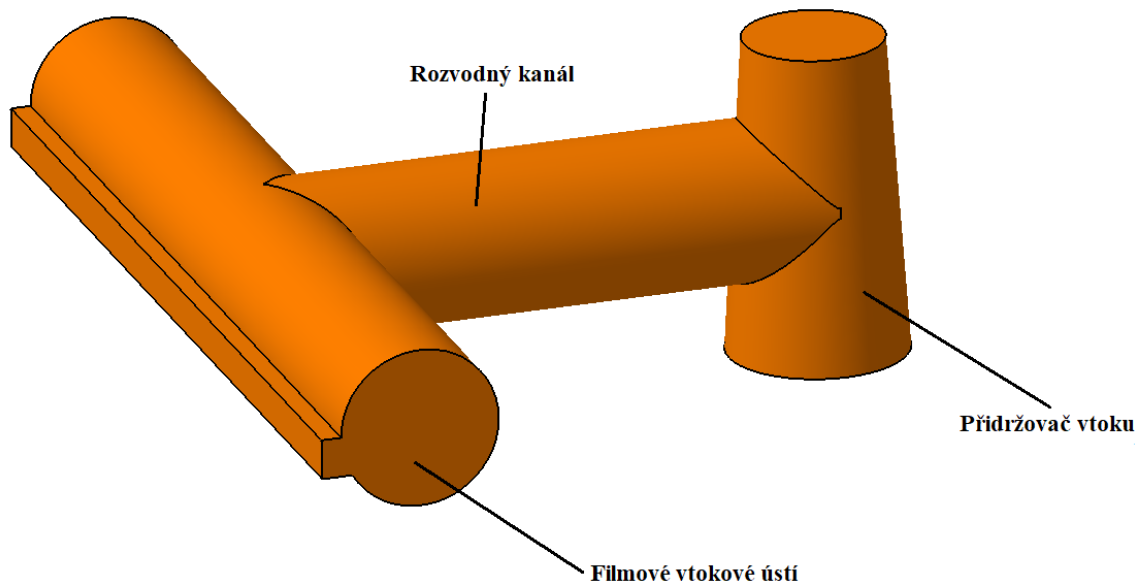
Pro formu byl zvolen kombinovaný vtokový systém. Druh vtokového systému byl vybrán z hlediska možností zaformování výrobku a z koncepce samotné etážové formy použité pro jeho výrobu. Čistě horký vtokový systém nebylo možné vzhledem ke geometrii a způsobu zaformování dílu zvolit, jelikož horké trysky zanechávají na výrobku stopy po vtoku, které by mohly negativně ovlivnit optický charakter vstříkované čočky. Studený vtokový systém byl rovněž zamítnut z důvodu jeho složitosti při zakomponování do etážové koncepce formy. Navržený kombinovaný vtokový systém umožňuje rozvod taveniny při konstantní teplotě téměř po celou dobu jejího průchodu formou a je pro etážovou formu konstrukčně vhodný.

Horká část vtokového systému je složena z prvků firmy Meusburger. Skládá se z prodloužené horké vtokové vložky, která ústí do přímého horkého rozvodného bloku. Vtoková vložka prochází pravou částí formy do části střední. Horký rozvodný blok je uložen ve vyfrézované kapse v desce ve střední části formy. Na horký rozvodný blok jsou připevněny čtyři horké trysky, po dvou na každou stranu tak, aby plnily obě patra formy. Každá z trysek pak ústí do studené části vtokového systému a slouží k plnění jednoho z dílů. Ústí trysek bylo zvoleno o průměru 3 mm. Pro uložení trysek jsou v kotevních deskách tvárnice vytvořeny kapsy. Horký vtokový systém je pomocí kabeláže připojen k zásuvce.



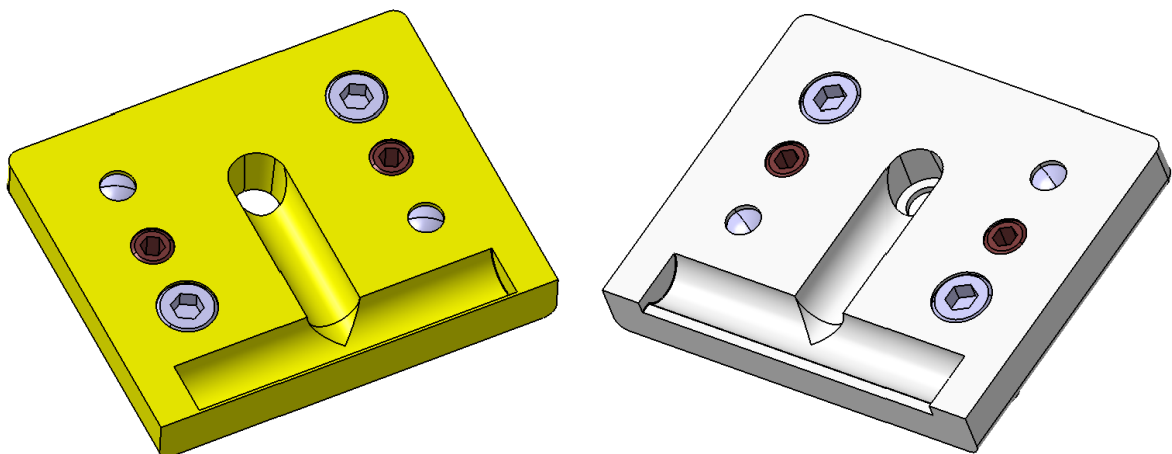
Obrázek 67 – Horká část vtokového systému

Studená část vtokového systému byla navržena na základě analýz vstřikovacího procesu. Je složena z přídržovače vtoku, který má délku 16 mm, počáteční průměr 7 mm a koncový průměr 9 mm. Poté je tavenina vedena kruhovým rozvodným kanálem o průměru 8 mm do filmového vtokového ústí, které má šířku 48 mm. Válcová část ústí má průměr 8 mm a koncová zúžená část má délku 1 mm a tloušťku 2 mm.



Obrázek 68 – Studená část vtokového systému

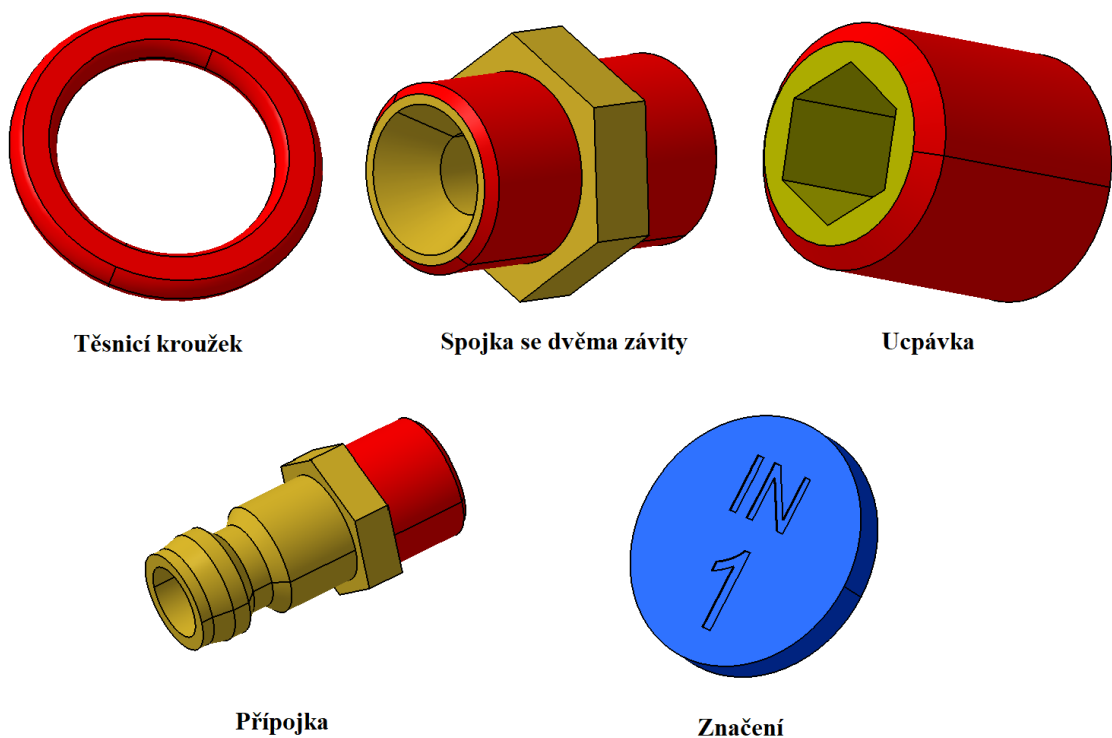
Studenou část vtokového systému tvoří vyměnitelné vložky, jedna na straně tvárnice, druhá pak na straně tvárníku. Vložky jsou uloženy ve vybrání kotevnicí desek formy a částečně ve vybrání tvarových částí. Tloušťka vložek je 8 mm, ke kotevním deskám jsou připevněny každá dvěma šrouby a dvěma pojistnými kolíky. Pro snadnou demontáž při výměně je každá vložka opatřena dvěma stavěcími šrouby. Vložky jsou vytvořeny ze stejného materiálu jako tvarové části, tedy z AMPCOLOY 972 od firmy Ampco Metal.



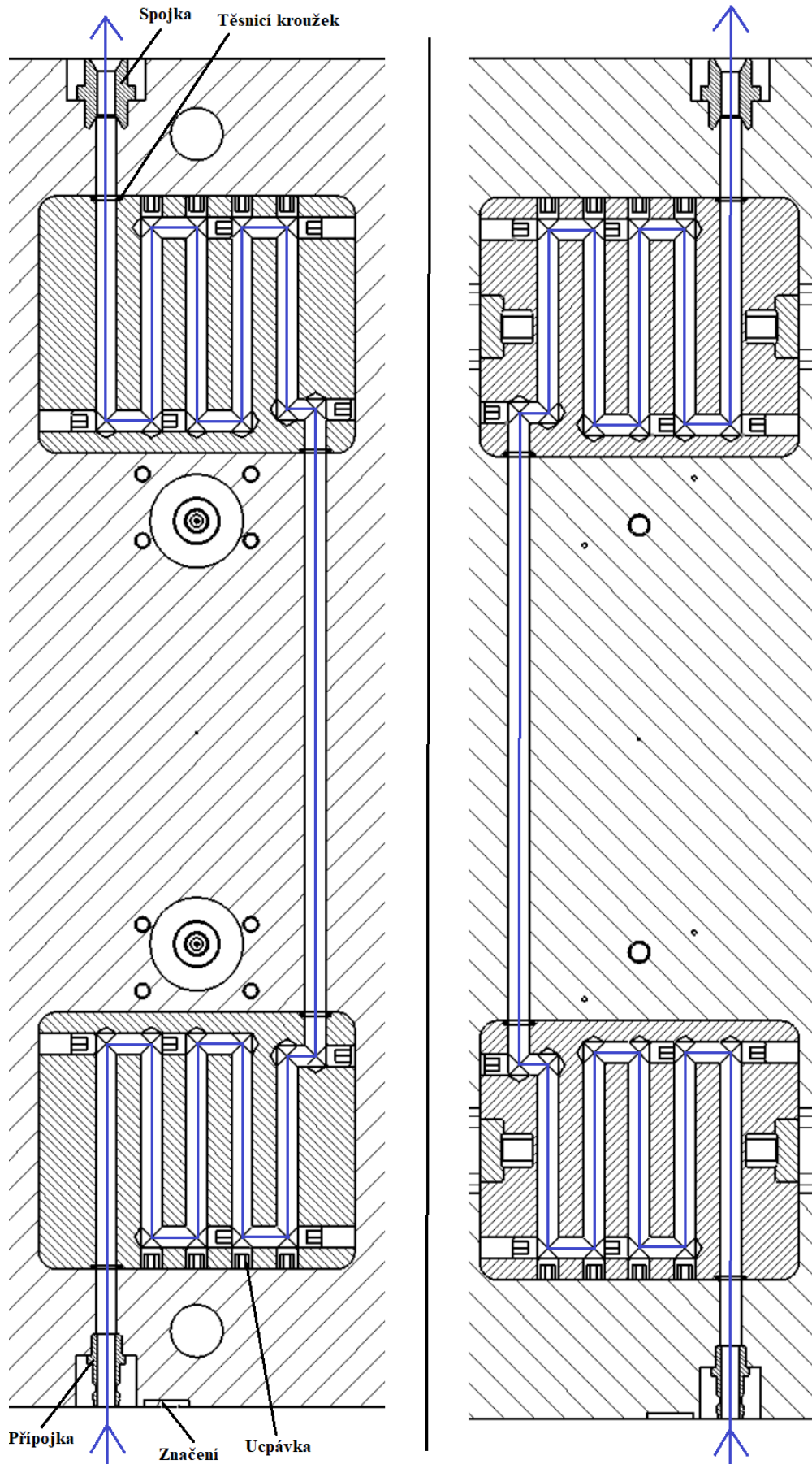
Obrázek 69 – Vyměnitelné vložky vtoku na straně tvárnice (vlevo) a tvárníku (vpravo)

8.6 Temperační systém formy

Temperační systém formy byl navržen rovněž na základě výsledků analýzy vstřikovacího cyklu. Návrh temperačního systému respektuje tvar a rozměry výrobku tak, aby chladicí kanály byly v dostatečné vzdálenosti od dutiny vstřikovací formy. Pasivní temperace formy je zajištěna izolačními deskami ze sklotextitu, které jsou upevněny na upínacích deskách formy. Aktivní temperace probíhá pomocí temperačního média (Voda 70 % / Ethylenglykol 30 %), které proudí v temperačních okruzích. Forma má celkem dva temperační okruhy. Jeden okruh slouží k temperaci tvárníků a druhý k temperaci tvárnic. Okruhy jsou tvořeny vrtanými temperačními kanály o průměru 7 mm, osa kanálů je ve vzdálenosti 14 mm od dutiny formy. Po vytemperování tvarových částí v jednom patře formy temperační médium formu opouští a pomocí hadice je převedeno do druhého patra formy, kde temperuje druhou polovinu tvarových částí. Pro usměrnění toku temperačního média a zamezení jeho úniku do ostatních částí formy byly využity ucpávky. V místech, kde temperační kanál přechází z desky formy do tvarové části, byly umístěny těsnicí kroužky. Pro připojení hadic k temperačním okruhům formy byly využity přípojky, pro propojení částí temperačních okruhů mezi částmi formy pak spojky se dvěma závity. Vstupy a výstupy temperačního média z formy jsou pro přehlednost značeny barevnými štítky. Přípojky, spojky, těsnicí kroužky, značení a ucpávky byly voleny jako normálie od firmy Meusburger.



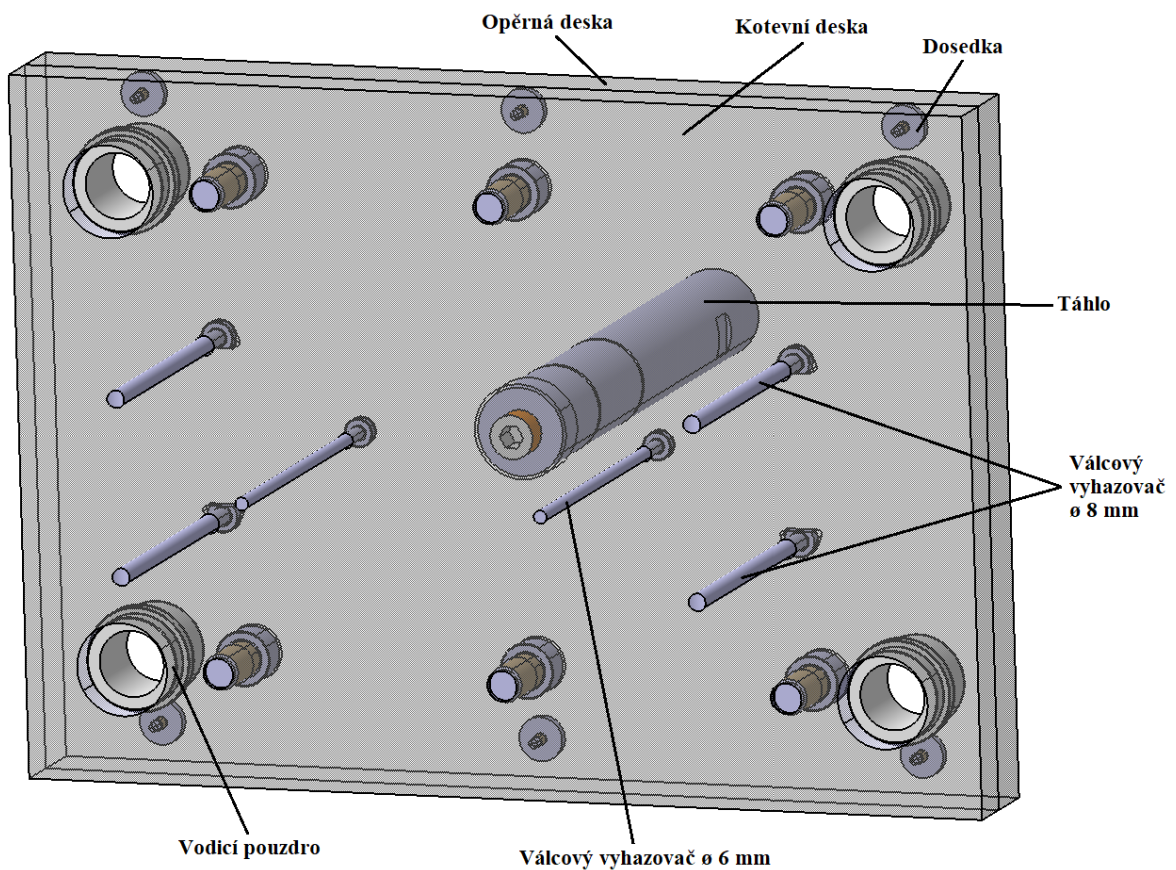
Obrázek 70 – Normálie využité při tvorbě temperačního systému



Obrázek 71 – Temperační okruhy pro tvárnice (vlevo) a tvárníky (vpravo)

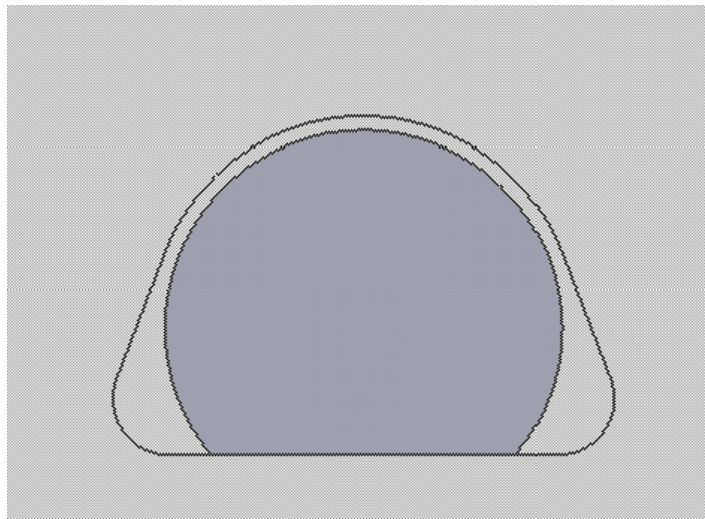
8.7 Vyhazovací systém formy

Vyhazovací systém formy byl navržen tak, aby docházelo k efektivnímu a bezpečnému vyhození vstříknutých dílů z dutiny formy. Forma je vybavena dvěma vyhazovacími systémy, jedním na levé straně a druhým na pravé straně formy. Každý z vyhazovacích systémů slouží k vyhození dvou dílů. Pro vyhození každého z dílů je využito dvou válcových vyhazovačů o průměru 8 mm. Vyhazovače jsou umístěny v oblasti úchytek s montážními otvory a stopy po nich tak neovlivňují optickou část čočky. Koncová část vyhazovačů byla upravena tak, aby kopírovala tvar úchytek a vyhazovače jsou proto v kotevní desce vyhazovacího systému zajištěny proti pootočení. Pro vyhození vtokového zbytku v místě přidržovače vtoku byl použit vždy jeden válcový vyhazovač o průměru 6 mm.



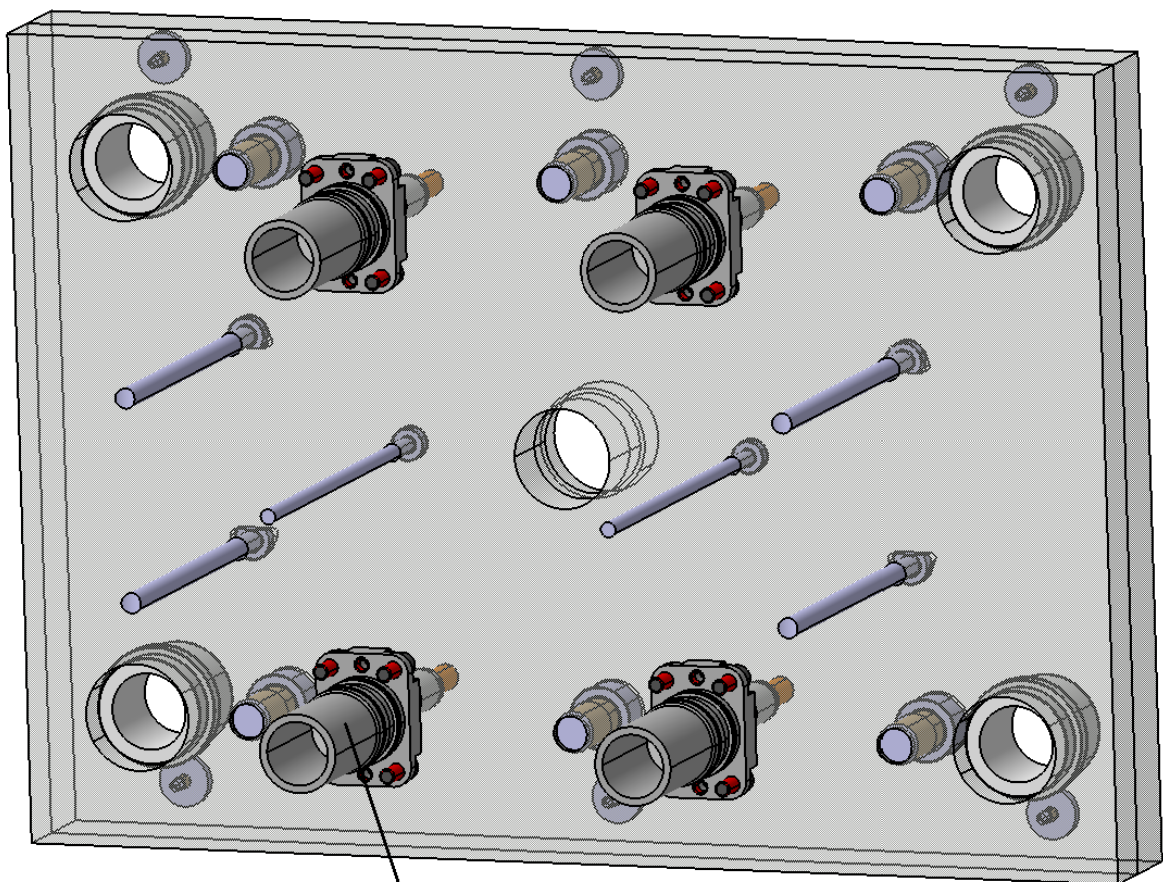
Obrázek 72 – Vyhazovací systém levé strany formy

Vyhazovače jsou uloženy v kotevní desce a zajištěny pomocí desky opěrné. Přesnost pohybu vyhazovacího systému vůči vyráběným dílům je zajištěna pomocí vodících čepů, které se pohybují ve vodících pouzdrech. Pro zabránění nárazu vyhazovacího systému na kotevní desku formy je využito 6 dosedacích podložek. Velikost zdvihu vyhazovacích systémů (30 mm) je zvolena tak, aby došlo k bezproblémovému vyhození dílů.



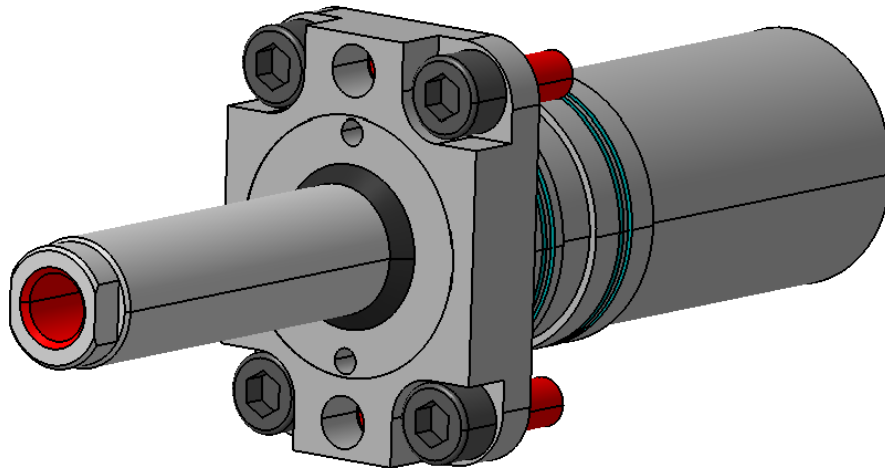
Obrázek 73 – Detail zajištění vyhazovače proti pootočení

Pohyb vyhazovacího systému na levé straně formy je řízen přes táhlo připojené ke vstřikovacímu stroji. Vyhazovací systém na pravé straně formy je pak řízen pomocí čtyř hydraulických válců, které jsou připojeny na hydraulický systém vstřikovacího stroje.

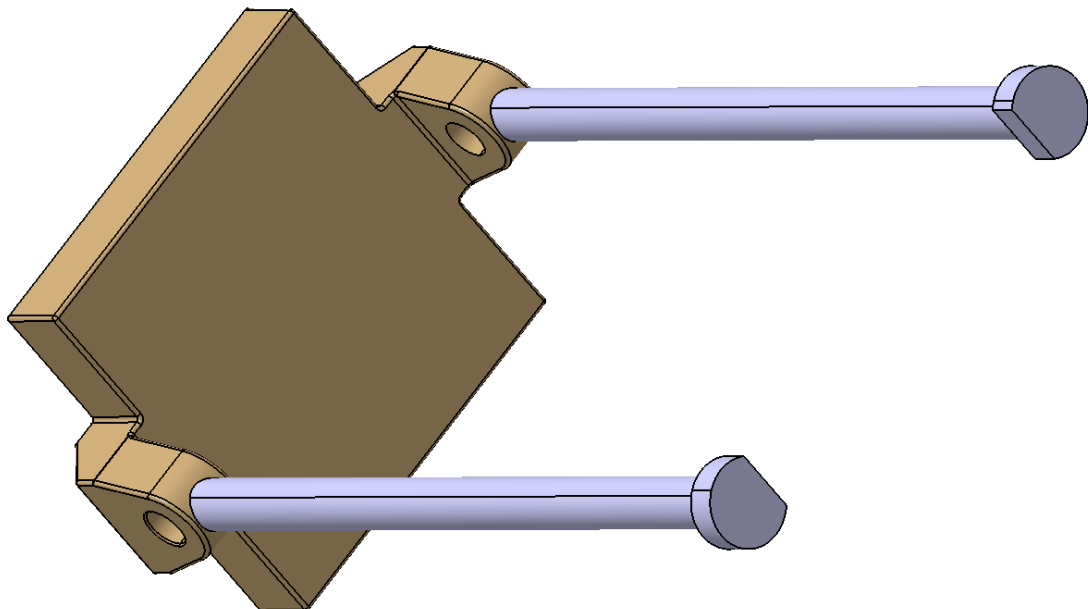


Hydraulický válec

Obrázek 74 – Vyhazovací systém pravé strany formy



Obrázek 75 – Detail hydraulického válce



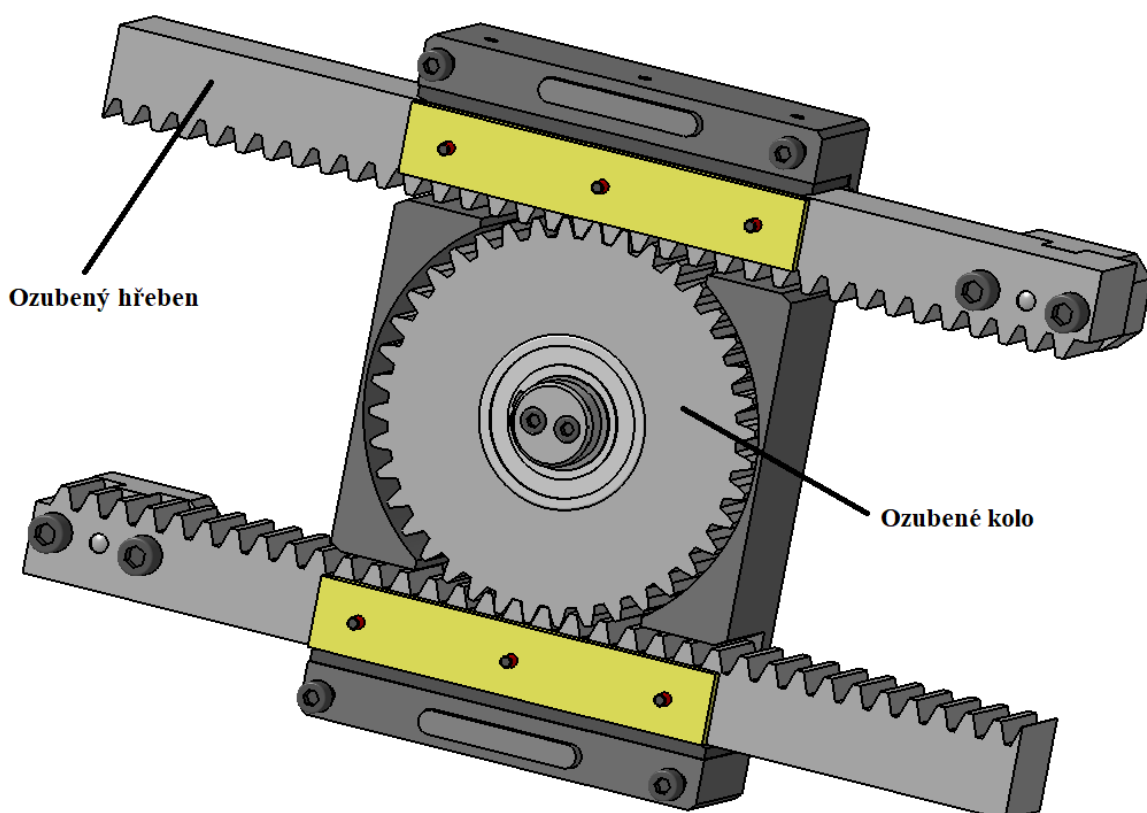
Obrázek 76 – Umístění vyhazovačů na vstříkovaném dílu

8.8 Odvzdušnění formy

Dutina formy je před začátkem vstříkovacího cyklu naplněna vzduchem. Vstříknutá tavenina poté před svým čelem žene vzduch ve formě a stlačuje ho. Pokud není vzduch z formy dostatečně odveden, může dojít k nedostříknutí vstříkovaného dílu. Při velké rychlosti a tlaku vstříkované taveniny pak může nastat tzv. Dieselův efekt. Při něm je vzduch působením vysoké teploty ohřátý natolik, že dochází k jeho vzplanutí a na vstříkovaném dílu se objeví spálené místo. V navržené vstříkovací formě je předpokládán únik vzduchu vůlemi v hlavních dělicích rovinách formy, vůlemi v bočních posuvných čelistech a vůlemi mezi vyhazovači a tvarovými částmi.

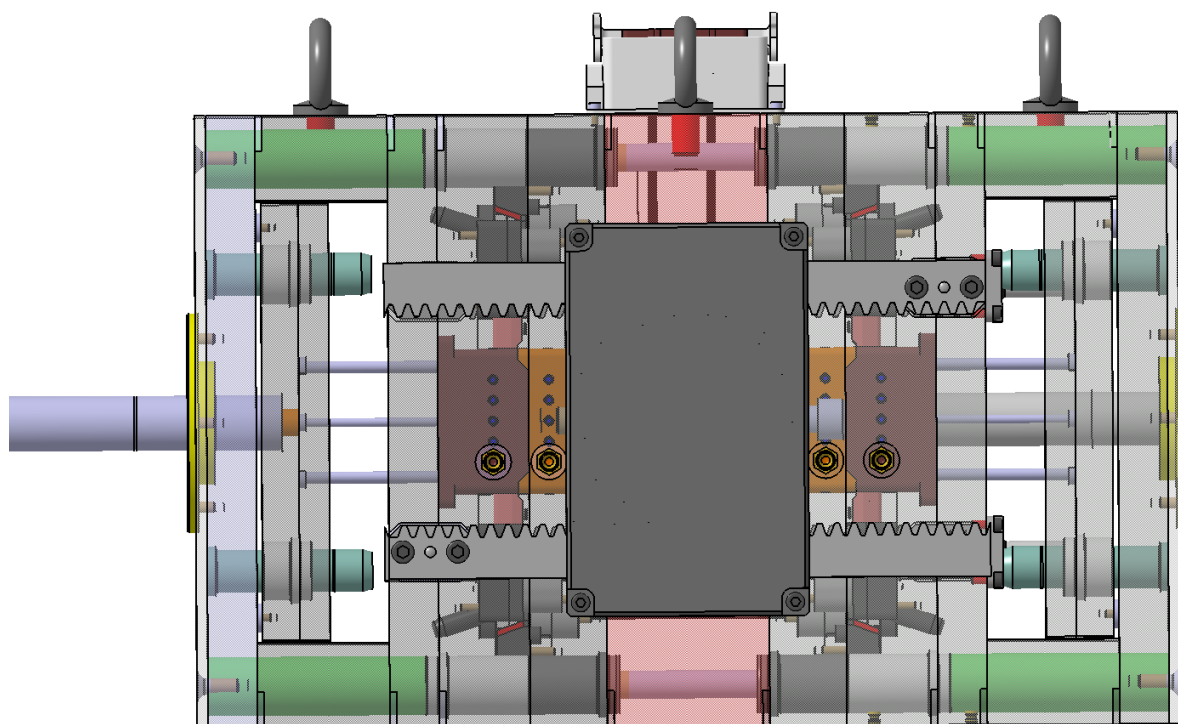
8.9 Otvírání formy

Etážová forma je rozdělena na 3 části. Pravá a levá část jsou upnuty k deskám vstřikovacího stroje. Střední část je pak s krajními spojena pomocí dvou hřebenových převodů. Hřebenový převod je složen ze dvou ozubených hřebenů a jednotkou s ozubeným kolem. Jednotka s ozubeným kolem je připevněna na střední část formy, ozubené hřebeny pak na pravou a levou část formy. Při otvírání formy dochází k tomu, že je levá část formy oddalována od střední a pravé části. Díky hřebenovému převodu je otevírací zdvih přenášen tak, že při otvírání formy dochází zároveň ke stejnému oddálení střední části formy od části pravé. Takto dochází k otevření formy ve dvou hlavních dělicích rovinách. Hřebeny byly zakráčeny na potřebnou délku 437 mm a hřebenové převody byly umístěny na bocích formy.

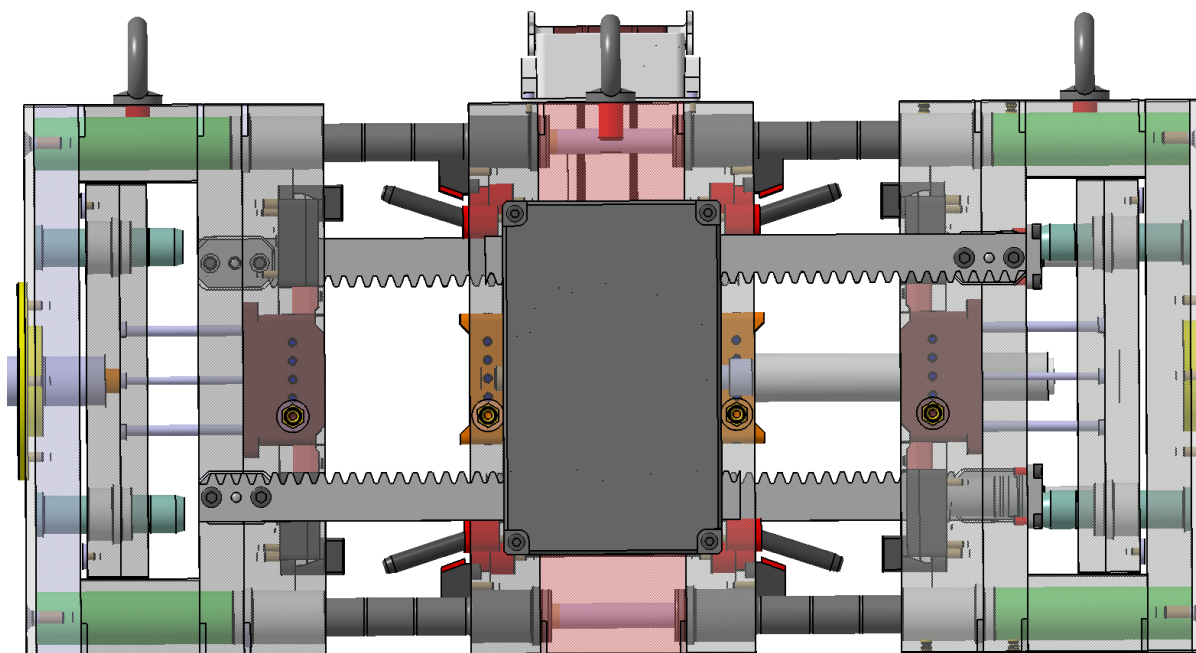


Obrázek 77 – Hřebenový převod

Zdvih pro otevření formy byl v každé dělicí rovině nastaven na hodnotu 120 mm. V součtu se tedy forma otevře o 240 mm. Daný zdvih byl zjištěn jako dostatečný pro bezproblémové odformování výrobku. Vzdálenost šikmých čepů bočních posuvných čelistí je při daném zdvihu již tak velká, že se s nimi díly při vyhození a pádu z formy nemohou dostat do kolize a tím je zabráněno jejich vzájemnému poškození. Hřebenový převod je složen z normalizovaných součástí od firmy Meusburger.



Obrázek 78 – Uzavřená etážová forma

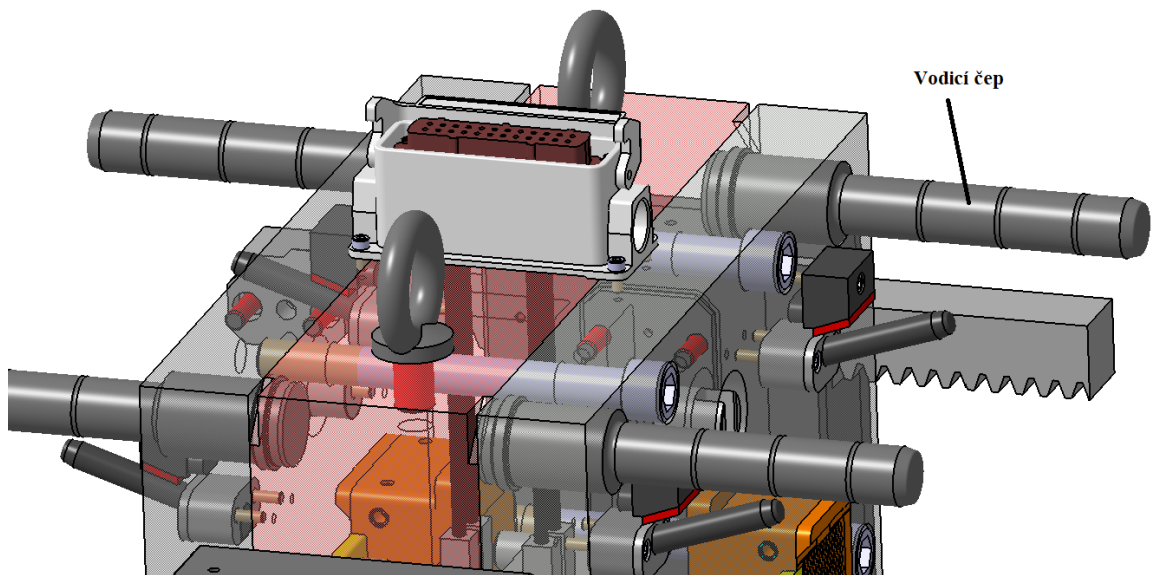


Obrázek 79 – Otevřená etážová forma

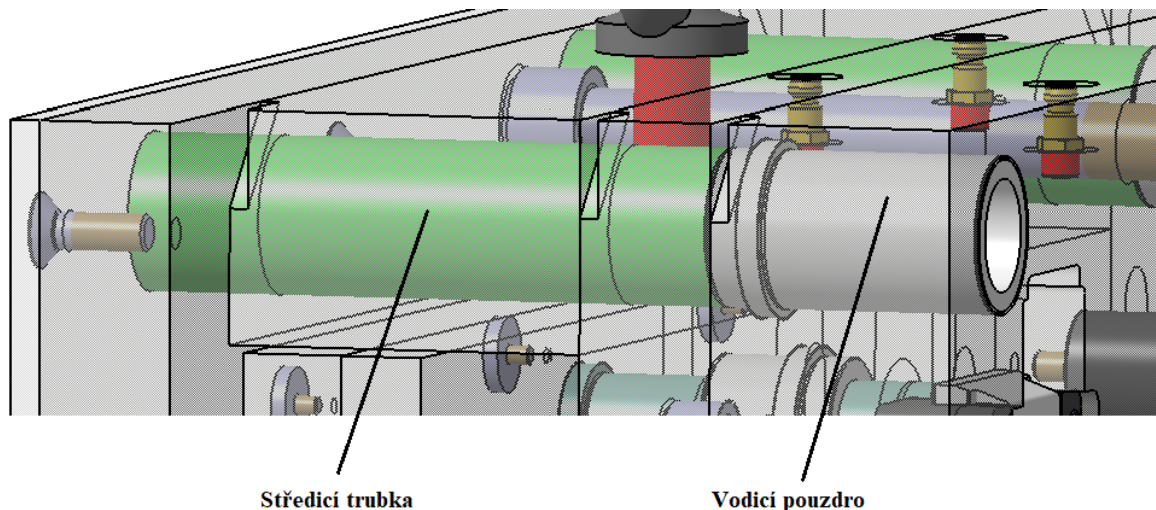
8.10 Vodicí, středící a manipulační prvky formy

Všechny středící, vodicí a manipulační prvky byly zvoleny jako normálie od firmy Meusburger. Volba prvků byla provedena s ohledem na celkovou velikost a rozměry částí vstřikovací formy. Pro normálie byly v patřičných místech formy vytvořena vybrání, k deskám formy jsou normálie připevněny pomocí šroubů.

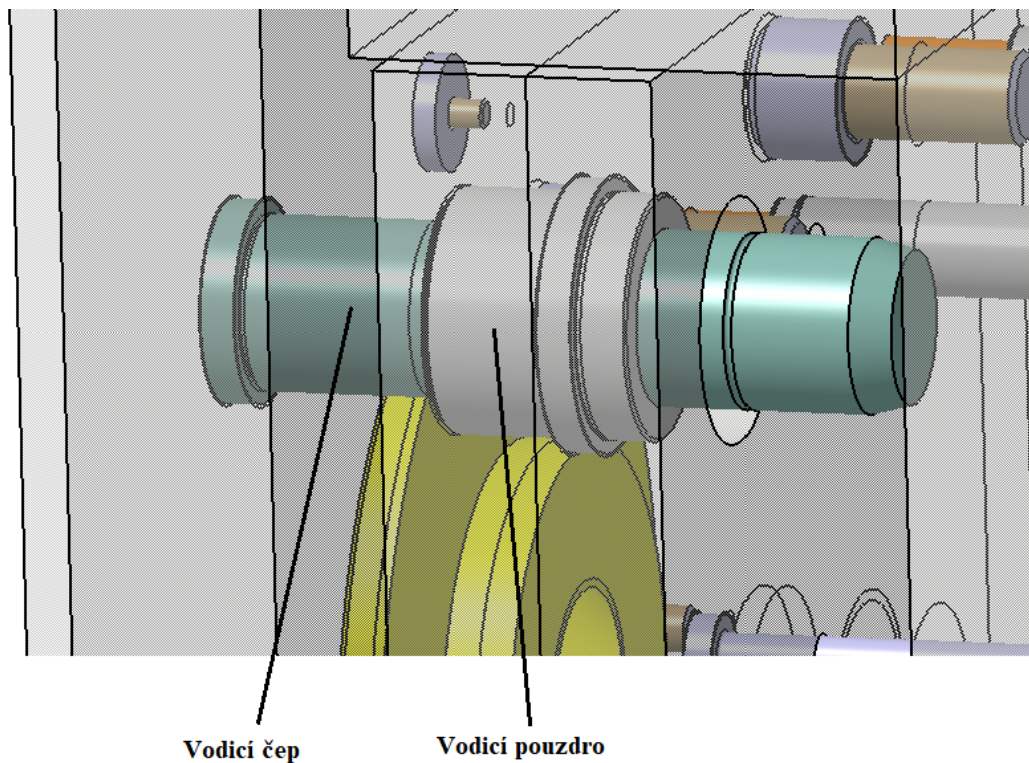
Vodicí prvky formy tvoří vodicí čepy, vodicí pouzdra a středící trubky, které zajišťují pohyb jednotlivých částí formy vůči sobě při jejím otevírání a zavírání. Ve střední části formy jsou uloženy vodicí čepy, po čtyřech na každou stranu. Vodicí čepy jsou vedeny ve vodicích pouzdrech a středících trubkách, které jsou umístěny v pravé a levé části formy.



Obrázek 80 – Vodicí prvky střední části formy

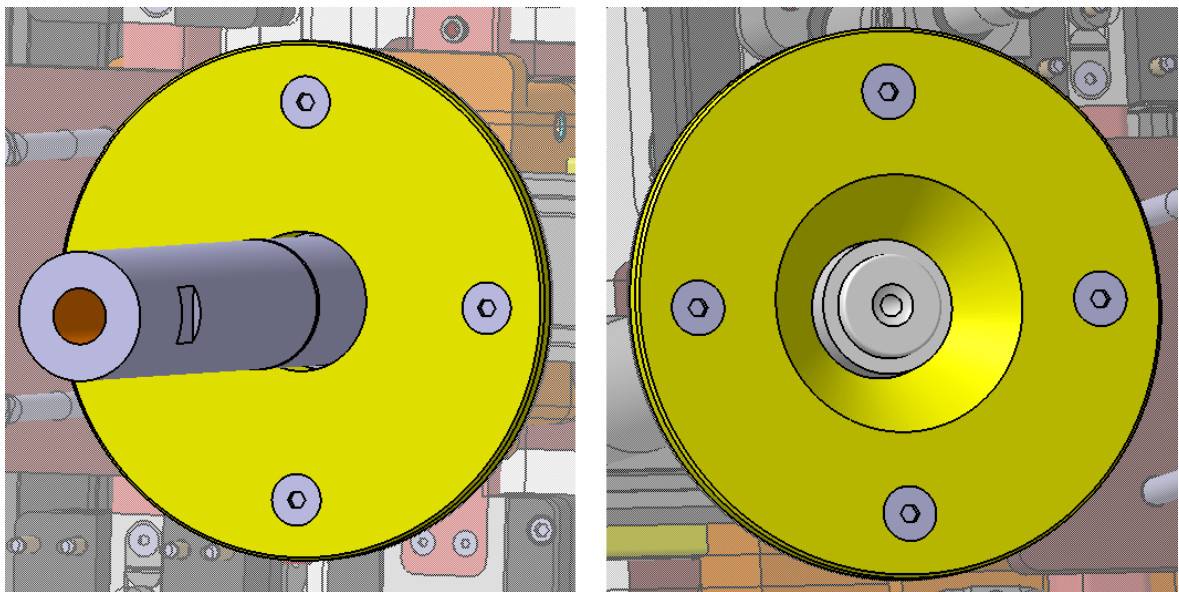


Obrázek 81 – Vodicí prvky pravé a levé části formy



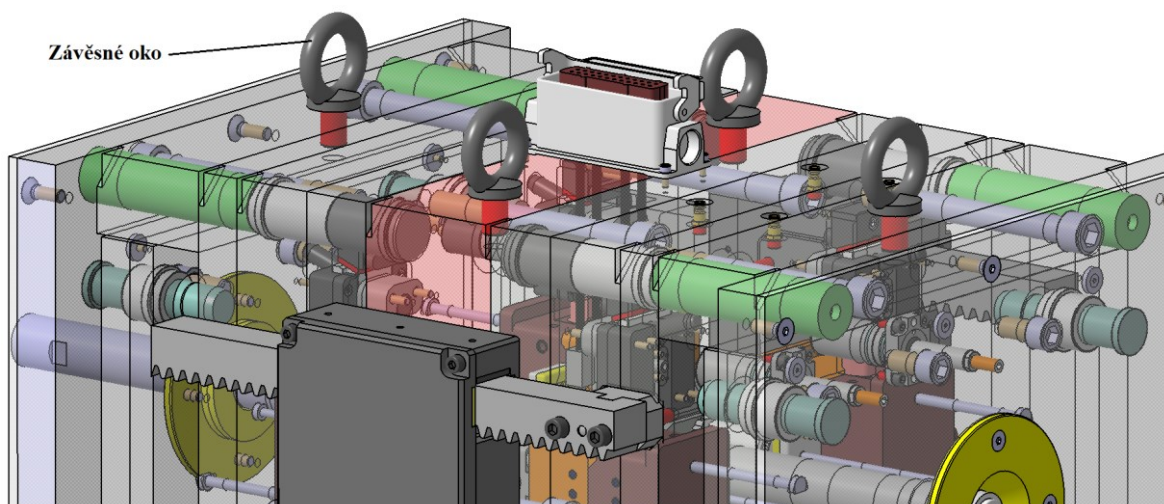
Obrázek 82 – Vodící prvky vyhazovacího systému

Středicí kroužky slouží k ustavení formy ve vstřikovacím stroji a navedení trysky vstřikovací jednotky k vtokové vložce formy. Ve formě byly využity dva typy středících kroužků, oba o průměru 125 mm a výšce 20 mm. Středicí kroužky jsou zapuštěny do izolačních a upínacích desek formy, středění pak probíhá pomocí vnějšího průměru kroužků. Každý ze středících kroužků je připevněn k upínací desce formy pomocí čtyř šroubů.



Obrázek 83 – Středicí kroužek na pravé straně (vpravo) a levé straně (vlevo) formy

Pro možnost manipulace za pomoci jeřábu byla forma opatřena čtyřmi závěsnými oky. Dvě oka jsou umístěna ve střední části formy, jedno oko je pak umístěno na pravou a jedno na levou část formy. Velikost a rozměry manipulačních prvků byly zvoleny tak, aby jejich maximální nosnost byla vyšší, než je hmotnost formy a během manipulace tak nedošlo k jejich utržení. Každé ze závěsných ok má maximální provozní zatížení 1200 kg, přičemž celková hmotnost formy činí 1560 kg.



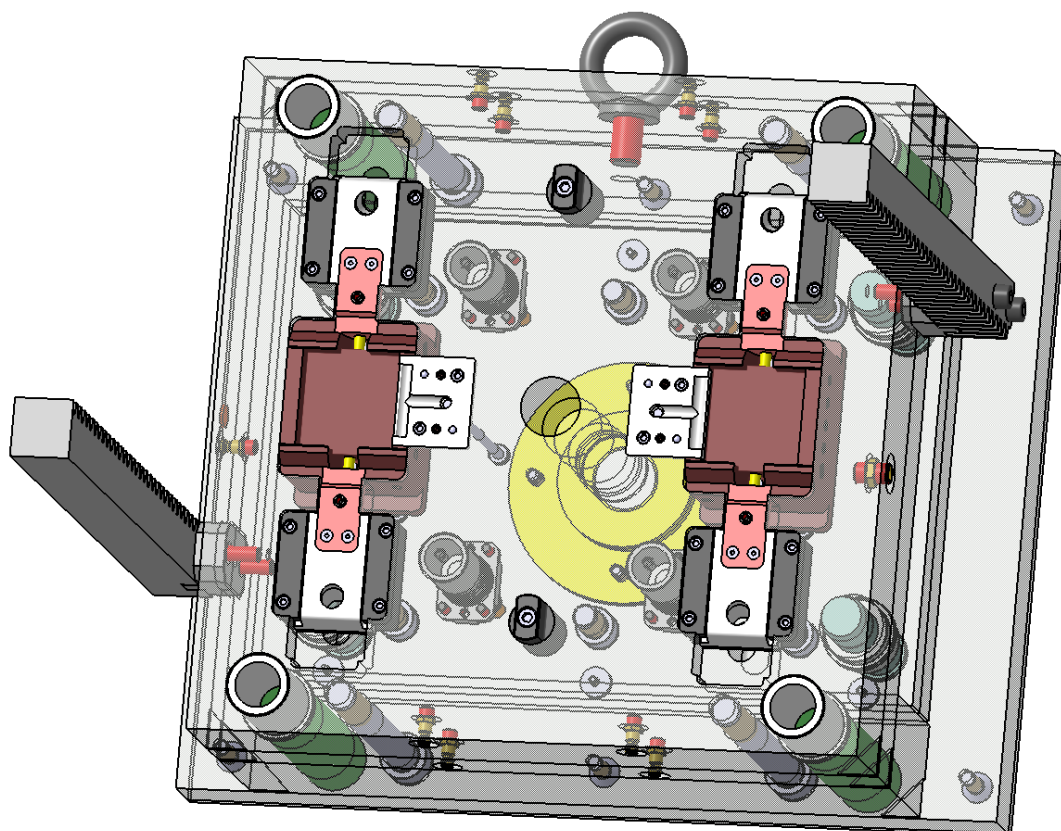
Obrázek 84 – Rozvržení manipulačních prvků formy

8.11 Sestava vstříkovací formy

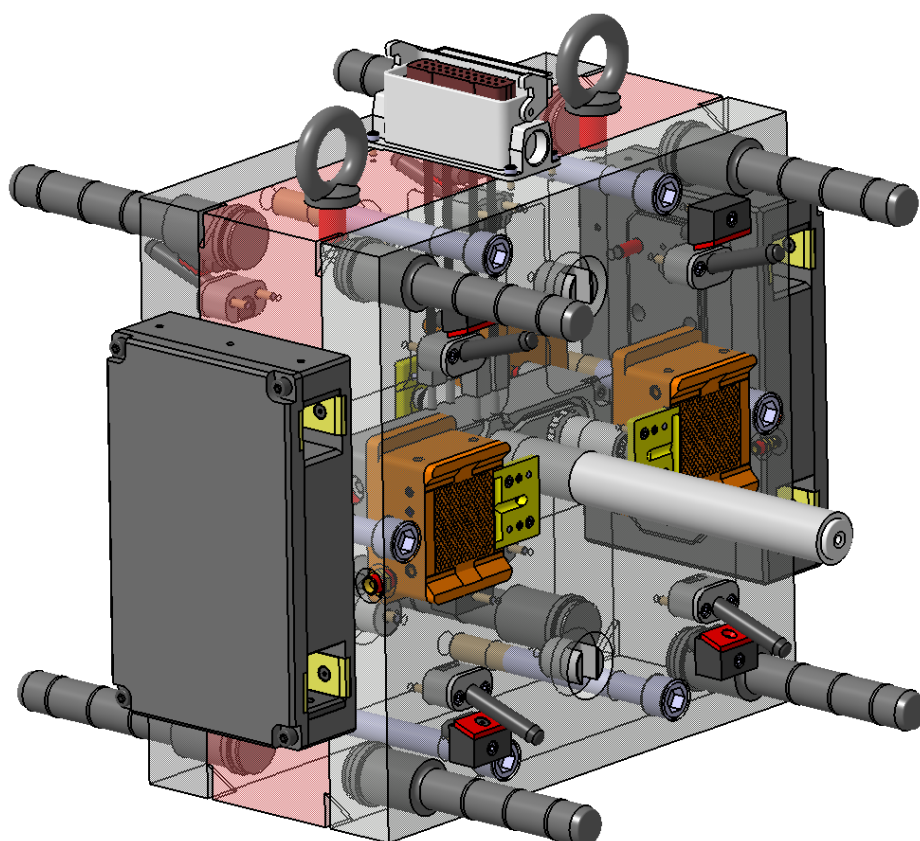
Etážová vstříkovací forma je rozdělena na tři části. Pravou část tvoří izolační deska, upínací deska, rozpěrné desky, opěrná deska tvárníků a kotevní deska tvárníků. Součástí pravé strany je rovněž vyhazovací systém složený z kotevní desky vyhazovačů a opěrné desky vyhazovačů. Levá strana formy je koncepcí podobná jako pravá strana. Liší se však ovládáním vyhazovacího systému, jehož pohyb je u pravé části formy řízen pomocí hydraulických válců, u levé části formy pak pomocí táhla vyhazovacího systému.

Střední část formy je tvořena třemi deskami. V prostřední desce je uložen horký rozvodný blok s horkou vtokovou vložkou a horkými tryskami. Prostřední deska střední části formy slouží zároveň jako opěrná deska pro tvárnice. V krajních deskách střední části formy jsou uloženy tvárnice, po dvou v každé desce. Otvírání a zavírání etážové formy je ovládáno přes hřebenový převod. Desky v jednotlivých částech formy jsou k sobě připojeny pomocí šroubů.

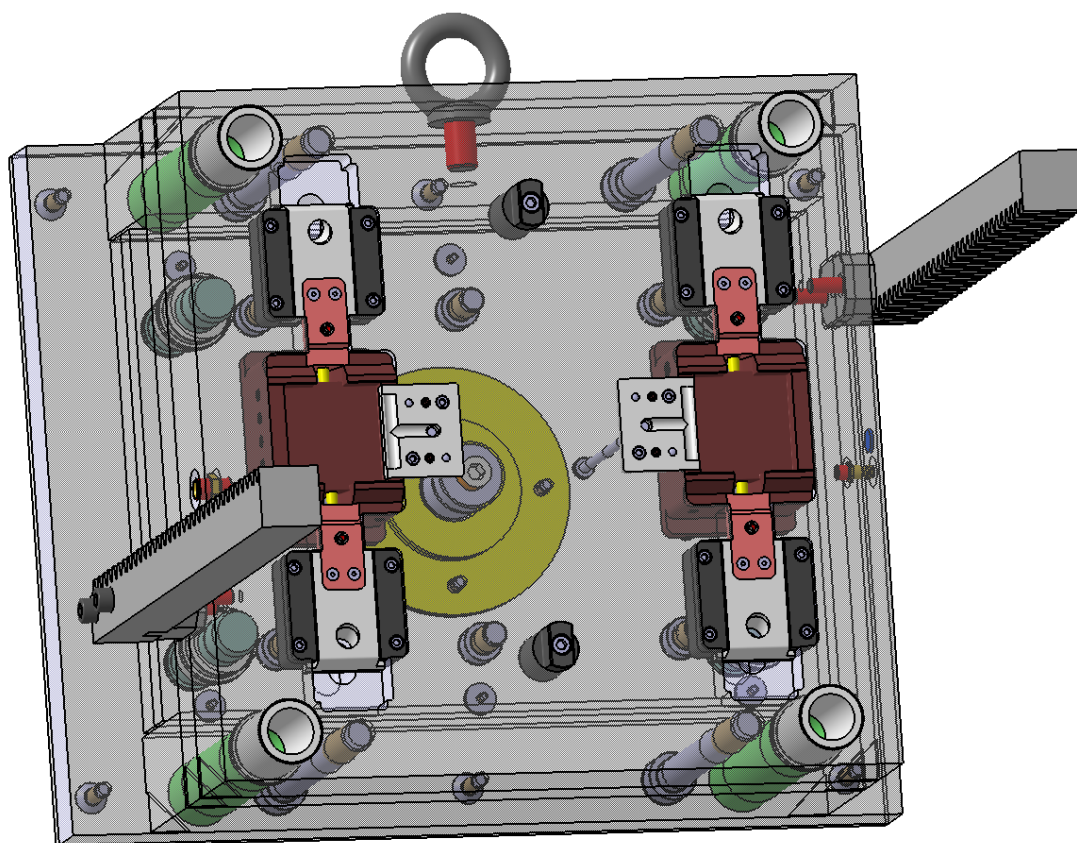
Všechny desky formy byly voleny jako normálie od firmy Meusburger. Rozměry desek formy jsou 446x446 mm, upínací a izolační desky mají vytvořený přesah pro upnutí formy k upínacím deskám vstříkovacího stroje a byly zvoleny v rozměru 446x546 mm.



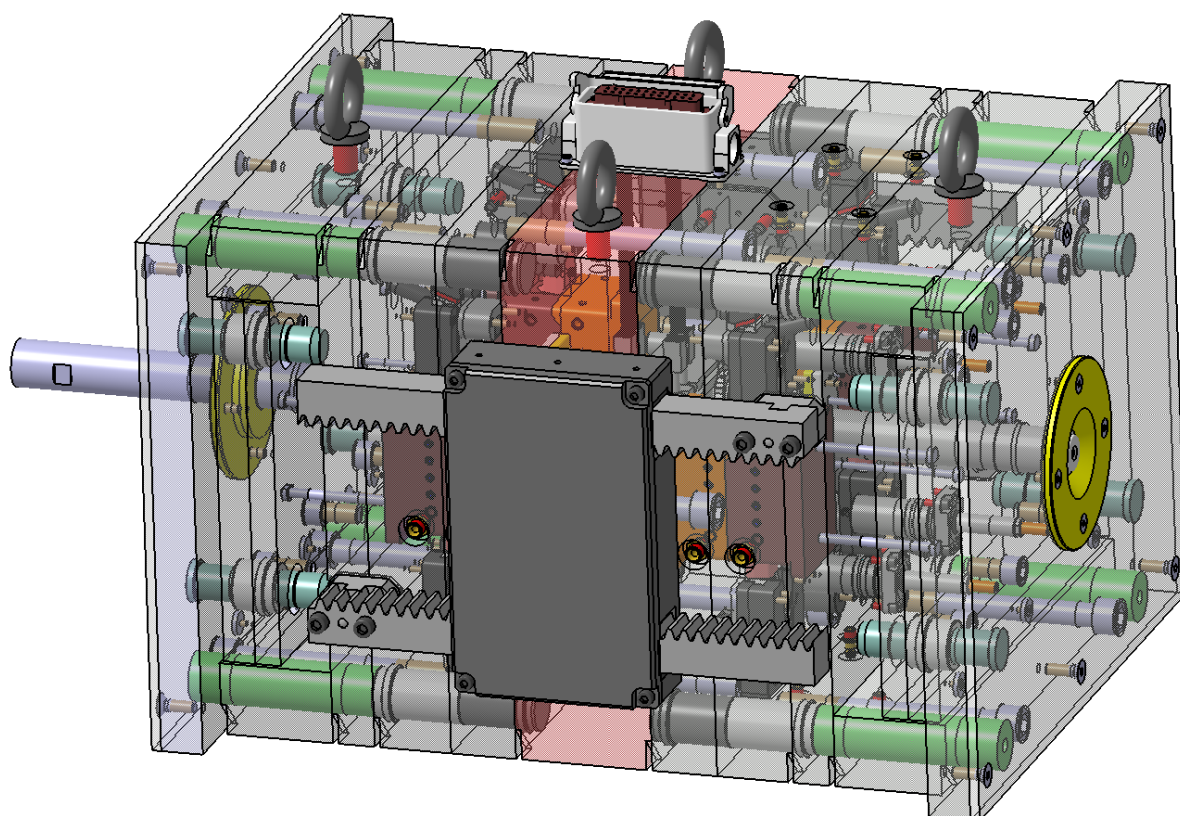
Obrázek 85 – Pravá část etážové formy



Obrázek 86 – Střední část etážové formy



Obrázek 87 – Levá část etážové formy



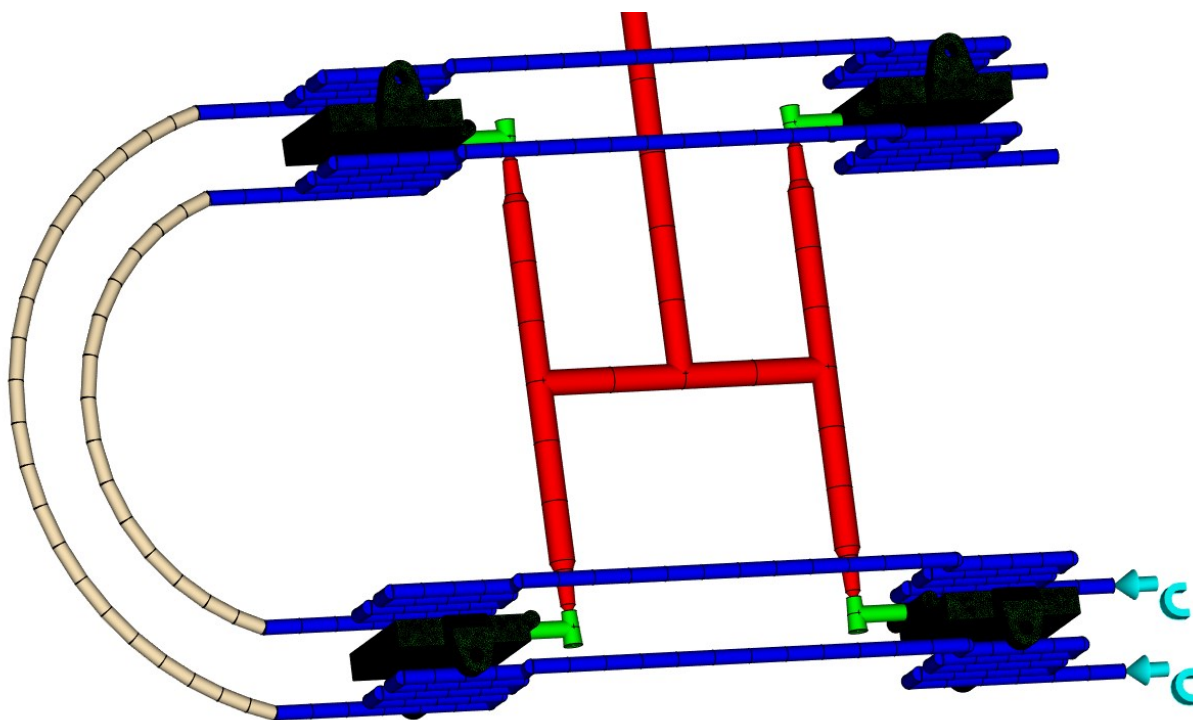
Obrázek 88 – Sestava etážové formy

9 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI NÁVRHU VSTŘIKOVACÍ FORMY

Funkčnost konstrukčního provedení formy byla ověřena pomocí analýz vstřikovacího cyklu. Následně byly zhotoveny mechanické analýzy tvarových částí formy (tvárník, tvárnice a boční tvarové jádro), které přicházejí do styku s taveninou polymeru. Celková analýza vstřikovacího cyklu byla provedena v programu Autodesk Moldflow 2023. Mechanické analýzy pak byly provedeny v programu Autodesk Fusion 360.

9.1 Celková analýza vstřikovacího cyklu

Pro celkovou analýzu vstřikovacího cyklu byla využita analýza chlazení + plnění + dotlaku + deformace (Cool + Fill + Pack + Warp). Procesní podmínky analýzy byly nastaveny a upraveny dle předchozích průběžných analýz uvedených v kapitole 7. Zvoleným materiálem dílu byl cyklický olefinový kopolymer (APEL APL5014CL: Mitsui Chemicals Co Ltd.). Zvoleným materiálem tvarových částí byl AMPCOLOY 972 od firmy Ampco Metal. Díly byly rozvrženy totožně jako v navržené sestavě formy, spolu s vtokovým a temperačním systémem. Dále byl vytvořen blok, který kopíruje rozměry navrženého 3D modelu formy. Nastavení procesních podmínek je přehledně uvedeno v *Tabulce 20*. Po vypočítání analýzy byly vyhodnoceny a okomentovány výsledky, díky kterým byla ověřena funkčnost konstrukčního návrhu formy.



Obrázek 89 – Díly s vtokovým a temperačním systémem v programu Autodesk Moldflow 2023

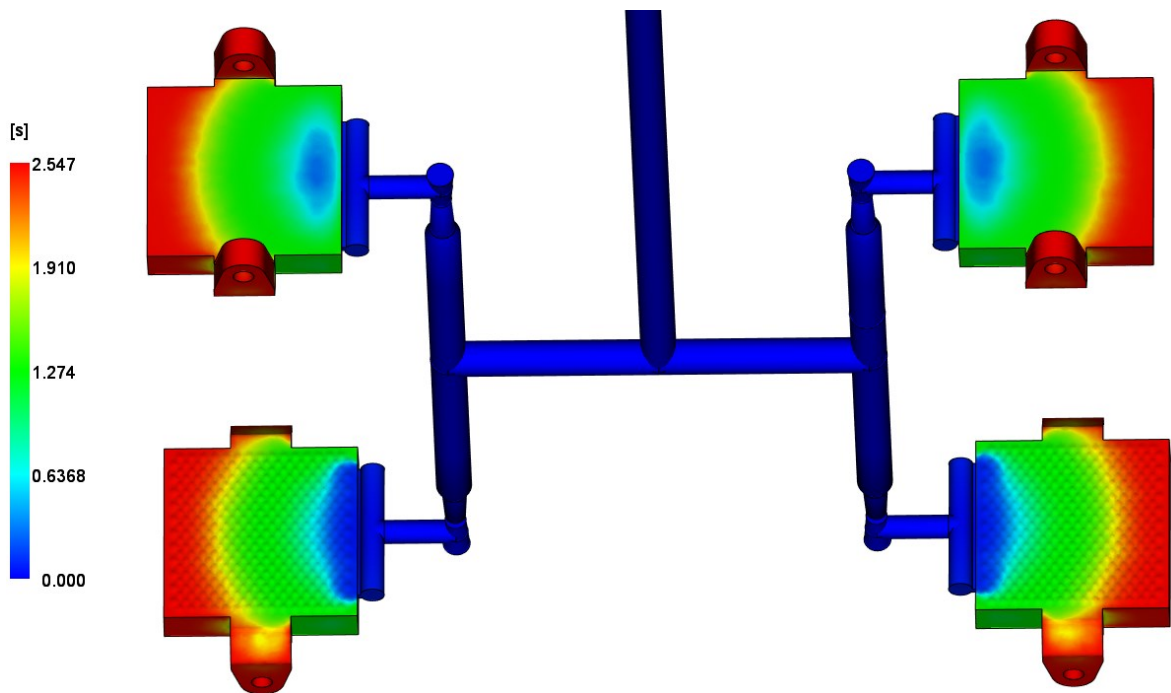
Tabulka 20 – Procesní podmínky celkové analýzy vstřikovacího cyklu

Doba otevírání a zavírání formy [s]	5
Vstřikovací čas [s]	2,5
Zaplnění dutiny při přepnutí na dotlak [%]	98
Doba dotlakové fáze [s]	20
Hodnota dotlaku vůči vstřikovacímu tlaku [%]	80
Výpočet chlazení	Automatický
Nastavení analýzy chlazení	Výchozí
Teplota taveniny [°C]	275
Teplota formy [°C]	108
Teplota při vyhození [°C]	121
Zatuhlý objem dílu při vyhazovací teplotě [%]	90
Optická analýza	Ano
Vstřikovací stroj	Výchozí
Materiál formy	Ampcoloy 972
Materiál dílu	COC (APEL APL5014CL)
Počítat s teplotní roztažností formy	Ano
Izolovat příčiny deformace	Ne
Typ temperačního média	Ethylenglykol 30 % / Voda 70 %
Teplota temperačního média [°C]	93
Kontrola média: Reynoldsovo kritérium [-]	10 000

9.1.1 Čas plnění (Fill Time)

Výsledek ukazuje plnění tvarové dutiny taveninou polymeru. Lze ho využít k ověření zvoleného vtokového systému a procesních podmínek. Tavenina by měla plnit všechny dutiny formy rovnoměrně a dutiny by pak měly být na konci vstřikovací fáze zcela zaplněny. Modrá barva značí místa, která jsou zaplněna nejdříve a červená barva pak místa, do kterých tavenina v dutině zateče nejpozději.

Z výsledku vyplývá, že všechny dutiny formy jsou zcela zaplněny v čase 2,5 s, nastavená doba vstřikovací fáze je tedy zvolena optimálně a na výrobku nedochází ke vzniku nedostříknutých míst. Plnění formy je rovnoměrné, tvarové dutiny jsou v celém svém objemu plněny žádoucím fontánovým tokem a zvolený vtokový systém se spolu s volbou procesních podmínek tedy jeví jako vhodný.



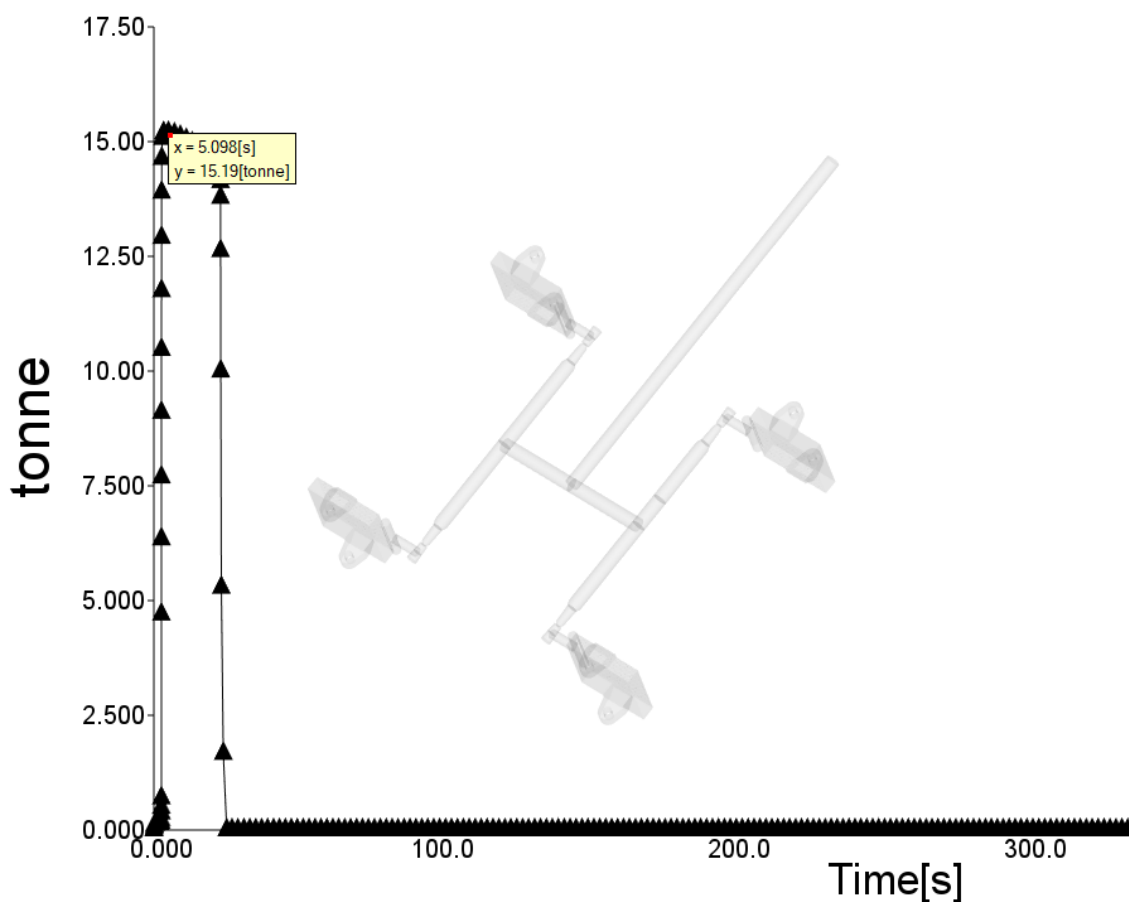
Obrázek 90 – Výsledek analýzy času plnění

9.1.2 Smykové napětí na stěně (Shear Stress At Wall)

Výsledek ukazuje hodnotu smykového napětí taveniny na stěně během vstřikovacího cyklu. Je důležité, aby nebyla překročena maximální dovolená hodnota smykového napětí zvoleného materiálu, která činí 0,5 MPa. Nejvyšších hodnot smykové napětí dosahuje v oblasti vtokového ústí, jeho maximální hodnota je zde 0,45 MPa. Během vstřikovacího cyklu tedy nedojde k překročení dovolené hodnoty smykového napětí na stěně pro daný materiál, který tak nebude podléhat nadměrnému namáhání a degradaci.

9.1.3 Uzavírací síla (Clamp Force: XY Plot)

Tento výsledek analýzy ukazuje potřebnou uzavírací sílu, kterou musí vyvinout vstřikovací stroj v průběhu vstřikovacího cyklu. Uzavírací síla působí proti tlaku taveniny, kterou jsou plněny dutiny vstřikovací formy. Velikost maximální uzavírací síly během vstřikování nesmí přesáhnout dovolenou uzavírací sílu zvoleného vstřikovacího stroje a tento výsledek tedy poslouží k jeho volbě. Z *Obrázku 91* je zřejmé, že maximální uzavírací síla během vstřikování dosahuje hodnoty 15,2 t. Pro správný výpočet uzavírací síly je nutné, aby byl v programu Autodesk Moldflow 2023 nastaven směr vstřikování taveniny, a tedy směr uzavírání formy, v ose z, což je dodrženo.



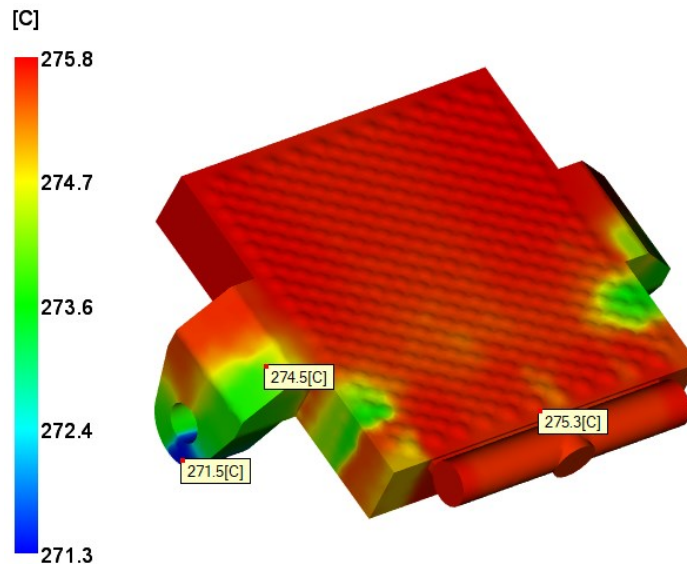
Obrázek 91 – Výsledek analýzy uzavírací síly

9.1.4 Maximální rychlost smykové deformace (Shear Rate, Maximum)

Výsledek poskytuje informace o maximální hodnotě rychlosti smykové deformace během vstřikovacího cyklu. Ta by neměla překročit dovolenou hodnotu pro zvolený materiál, tedy $100\,000\text{ s}^{-1}$. Nejvyšších hodnot rychlosti smykové deformace dosahuje v oblasti vtokového ústí. Maximální hodnota během vstřikovacího cyklu je 1650 s^{-1} a nepřekračuje tedy maximální dovolenou hodnotu pro zvolený materiál.

9.1.5 Teplota čela taveniny (Temperature At Flow Front)

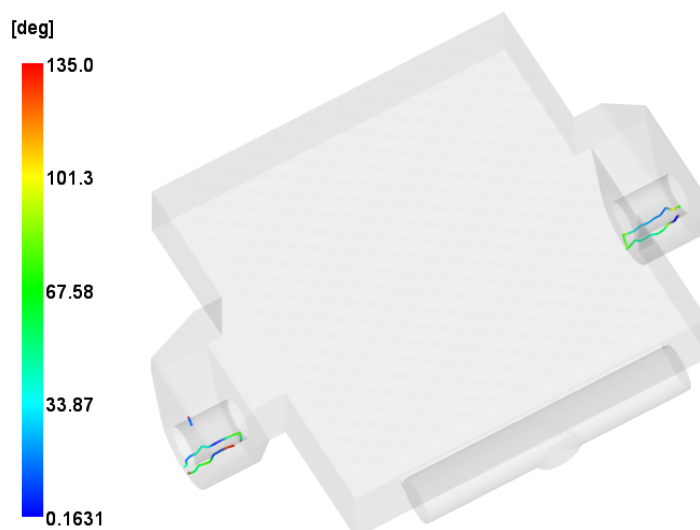
Výsledek zobrazuje teplotu čela taveniny během plnění dutiny formy. Rozdíl při vstupu taveniny do dutiny formy a na konci jejího toku by neměl překročit hodnotu 5 °C. Z Obrázku 92 je zřejmé, že rozdíl teploty čela taveniny dosahuje hodnoty 4,5 °C a je tedy v toleranci.



Obrázek 92 – Výsledek analýzy teploty čela taveniny

9.1.6 Studené spoje (Weld Lines)

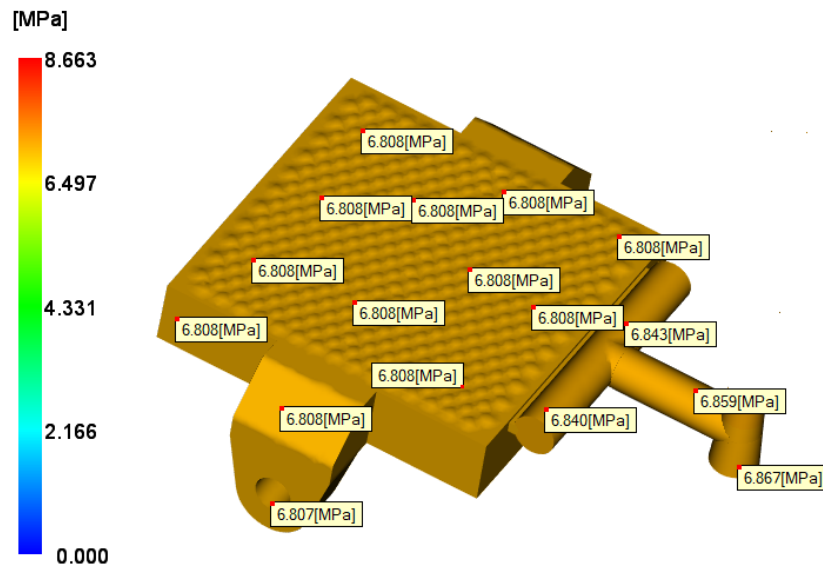
Výsledek analýzy ukazuje místa na výrobku, ve kterých dochází ke vzniku studených spojů. Studené spoje vznikají pouze v oblastech úchytek s montážními otvory, které nejsou při používání čochky mechanicky namáhány. Dle výsledku teploty čela taveniny studené spoje vzniknou při vysoké teplotě a proudy taveniny by se tak měly spojit bez výrazného ovlivnění vlastností dílu. Na oblasti s optickým desénem se studené spoje nevyskytují.



Obrázek 93 – Výsledek analýzy studených spojů

9.1.7 Tlak (Pressure)

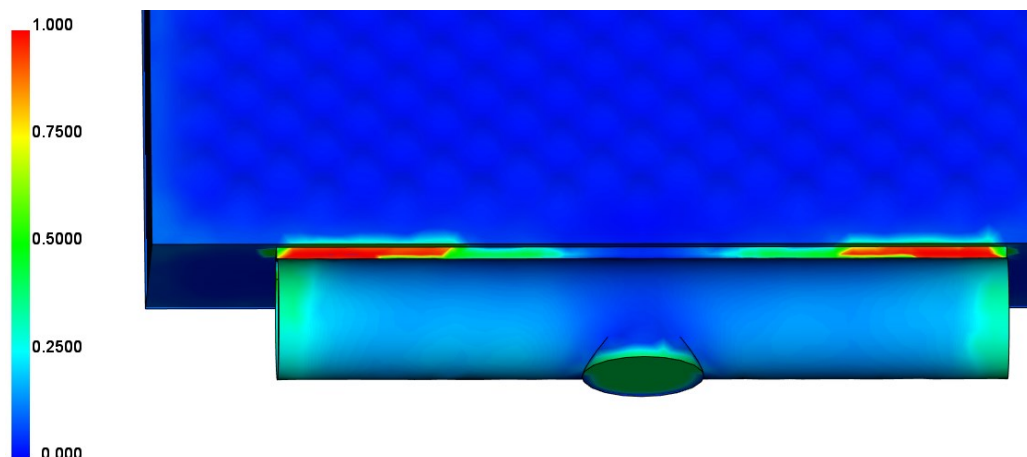
Výsledek analýzy ukazuje rozložení tlaku v dutině formy a ve vtokovém systému během vstříkovacího cyklu. Tlak dosahuje maxima 8,7 MPa, hodnota je však pozorována pouze v částech horkého vtokového systému. Dle *Obrázku 94* je v dutině formy a ve studené části vtokového systému nejvyšší hodnota tlaku 6,9 MPa. Nejvyššího tlaku bylo dosaženo v čase 7 s. Výsledek tlaku byl využit pro určení zatížení při mechanické analýze tvarových částí.



Obrázek 94 – Výsledek analýzy tlaku

9.1.8 Zatuhlá vrstva materiálu (Frozen Layer Fraction)

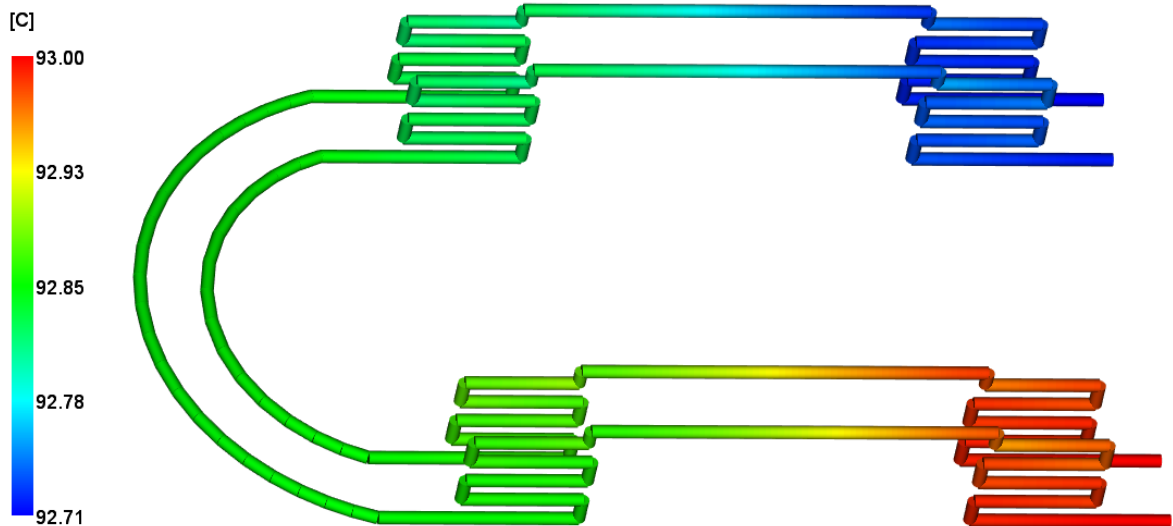
Výsledek analýzy poskytuje informace o tom, v jakém místě je v daném čase materiál již zatuhlý (červená barva) a v jakém místě je ještě v tekutém stavu (modrá barva). Výsledek byl upraven tak, aby zobrazoval zatuhlou vrstvu materiálu na konci dotlakové fáze. Z výsledku vyplývá, že po ukončení dotlaku, v čase 22,5 s od vstříknutí taveniny, je ústí vtoku zatuhlé jen zčásti a dotlaková fáze je tedy nastavena efektivně.



Obrázek 95 – Výsledek analýzy zatuhlé vrstvy materiálu

9.1.9 Teplota temperačního média (Circuit Coolant Temperature)

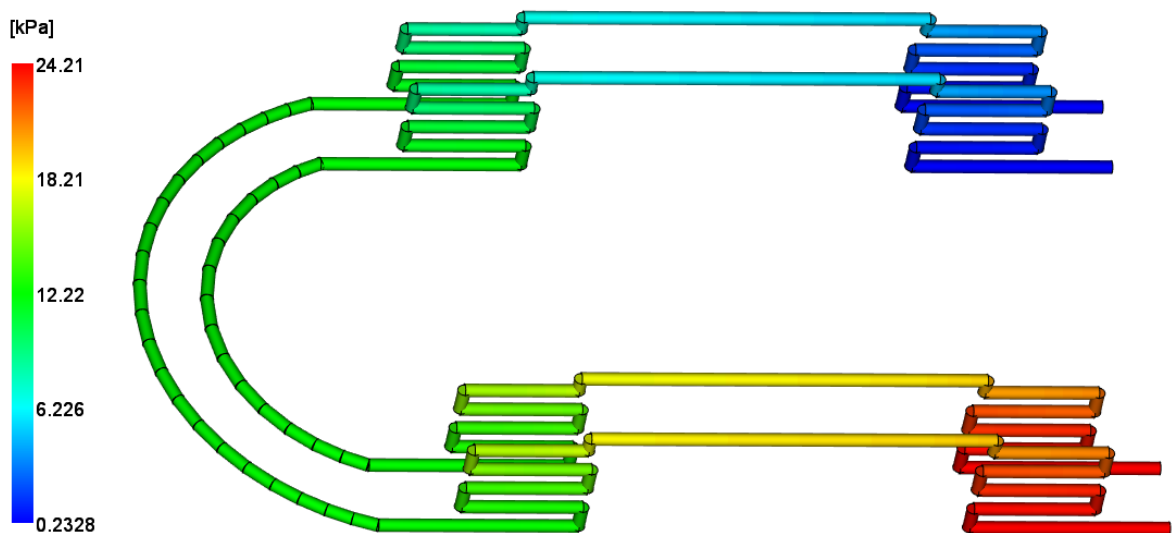
Rozdíl teploty temperačního média na vstupu a na výstupu z temperačního okruhu by neměl překročit hodnotu 3 °C. *Obrázek 96* ukazuje, že rozdíl v teplotě na vstupu a na výstupu navržených temperačních okruhů dosahuje hodnoty cca 0,3 °C a podmínka je tedy splněna.



Obrázek 96 – Výsledek analýzy teploty temperačního média

9.1.10 Tlak v temperačním okruhu (Circuit Pressure)

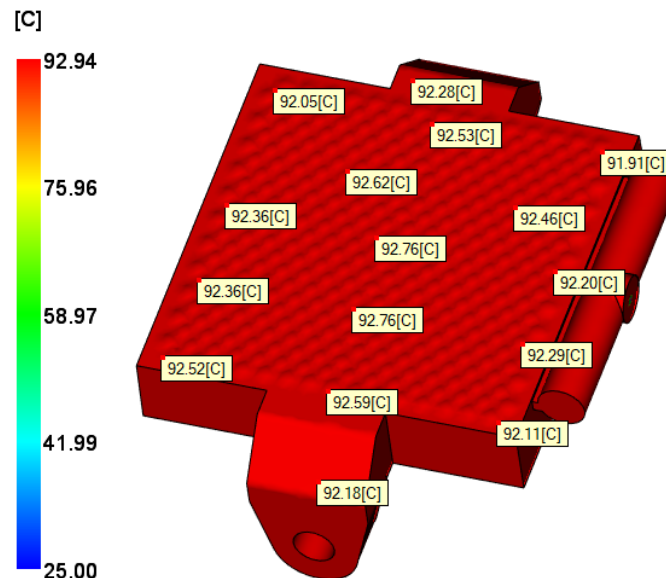
Tlak by v žádném místě temperačního okruhu neměl nabývat záporných hodnot. Znamenalo by to, že v okruhu vzniká mrtvé místo, ve kterém nedochází k proudění temperačního média a teplota je tedy neúčinná. Dle *Obrázku 97* je patrné, že mrtvá místa v navržených temperačních okruzích nevznikají a tlak je ve všech místech okruhů kladný.



Obrázek 97 – Výsledek analýzy tlaku v temperačním okruhu

9.1.11 Teplota v dutině formy (Temperature, Mold)

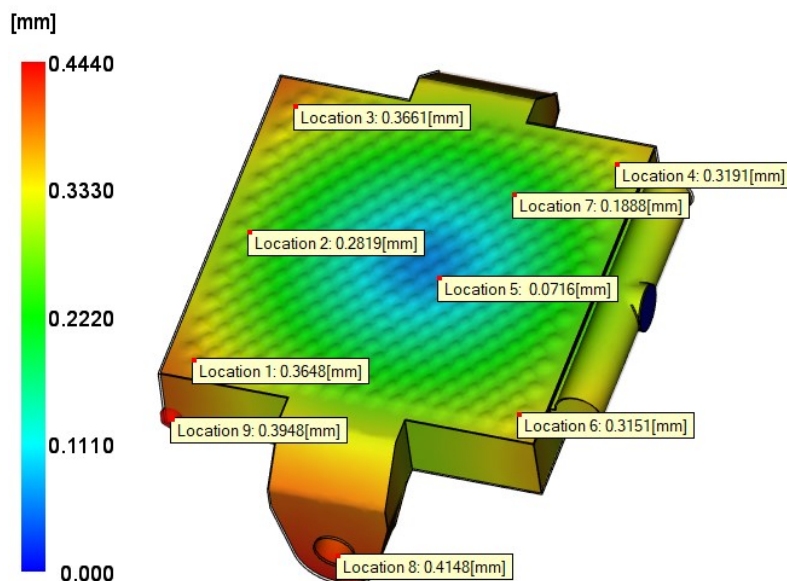
Pro zajištění rovnoměrných vlastností v celém dílu je důležité, aby byly teplotní rozdíly v jednotlivých místech tvarové dutiny formy co nejmenší. Doporučená maximální hodnota rozdílu teplot v různých částech formy je 10 °C. *Obrázek 98* udává rozložení teploty na optické části čočky. Rozdíl v teplotách je nižší než 1 °C a podmínka je tedy splněna.



Obrázek 98 – Výsledek analýzy teploty v dutině formy

9.1.12 Celková deformace (Deflection, All Effects)

Výsledek zobrazuje celkovou deformaci v určitém místě dílu. Celková deformace je složena z dílčích složek, které vznikají vlivem nerovnoměrného chlazení a smrštění dílu. Maximální hodnota deformace dílu činí 0,44 mm.



Obrázek 99 – Výsledek analýzy celkové deformace

9.1.13 Vzor polariz. světla (Fringe Pattern For Light Coming From $\pm z$ Direction)

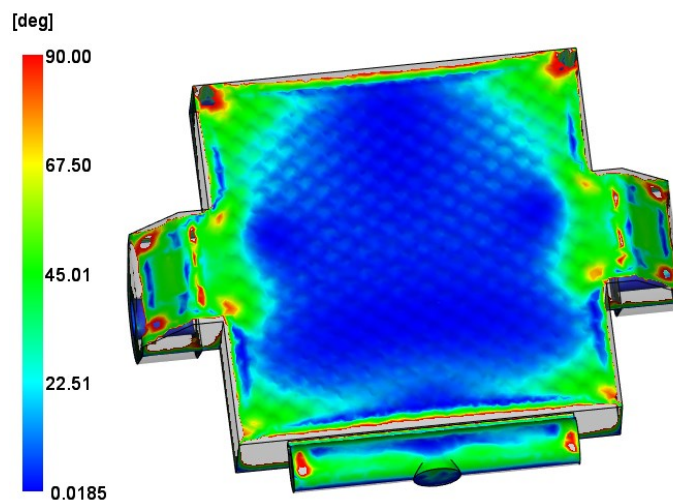
Výsledek optické analýzy ukazuje rozložení polarizovaného světla, které prošlo čočkou. V ideálním případě by měl být optický desén čočky pokryt černým vzorem bez bílých pruhů a skvrn, které u tohoto výsledku značí místa s vysokým pnutím ve výrobku. *Obrázek 100* ukazuje vzor na optické části čočky, který je téměř dokonalý, bez výskytu bílých pruhů a skvrn. V dílu tedy nevzniká nadměrné pnutí a jeho optické vlastnosti by měly být optimální.



Obrázek 100 – Výsledek analýzy vzoru polarizovaného světla

9.1.14 Fázový posuv polariz. světla (Phase Shift for Light Coming From $\pm z$ Direction)

Výsledek analýzy ukazuje místa, ve kterých je rozdíl mezi fázemi horizontálně a vertikálně polarizovaného světla vyšší než 90° . Tato hodnota je udávána jako kritická pro ovlivnění optického výkonu dílu. *Obrázek 101* ukazuje rozdíl ve fázovém posuvu na optickém desénu čočky. Barevně jsou označeny oblasti, ve kterých je rozdíl nižší než 90° . Desén je téměř celý zbarven a optické vlastnosti dílu tedy nebudou negativně ovlivněny.



Obrázek 101 – Výsledek analýzy fázového posuvu polarizovaného světla

9.2 Mechanická analýza tvarových částí formy

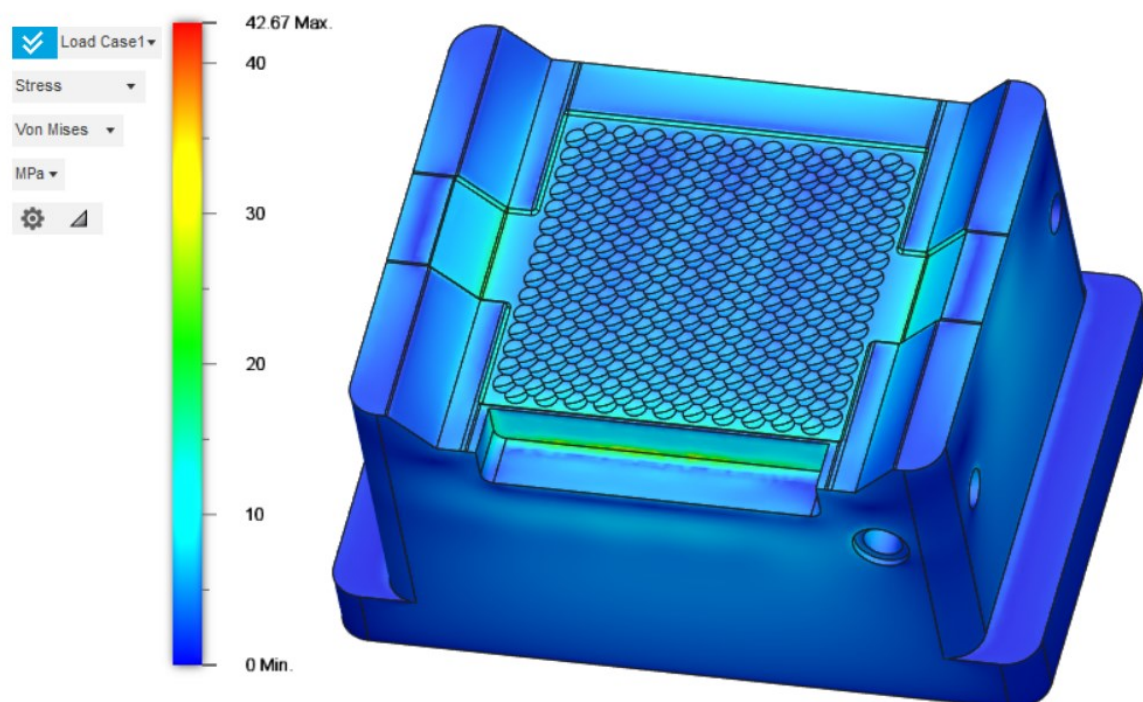
Mechanická analýza tvarových částí byla provedena v programu Autodesk Fusion 360. Analýze byly podrobeny části formy, jejichž povrch je zatížen vstřikovacím tlakem. Jedná se o tvárníky, tvárnice a boční tvarová jádra. U těchto dílů bylo zkoumáno, jak velké deformace tlak polymeru způsobí a zda nedojde k překročení meze dovoleného napětí materiálu, ze kterého byly díly vyrobeny. Zkoumaným parametrem pro vyhodnocení bylo napětí Von Mises, které vyjadřuje fiktivní jednoosé redukované napětí přiřazené víceosé napjatosti. Používá se pro posouzení mezního stavu a lze jej srovnat s mezí kluzu daného materiálu. Při překročení meze kluzu by v dané tvarové části došlo k nevratným deformacím.

Tvarové části byly do programu vloženy ve formátu .stp. Pomocí metody FEM byla na každé části vytvořena trojúhelníková síť s délkou hrany trojúhelníku 2 mm (tvárník, tvárnice) a 1 mm (tvarové jádro). Částem byl přiřazen materiál AMPCOLOY 972 (CuCr1Zr), jehož mechanické vlastnosti jsou uvedeny v *Tabulce 21*. Poté byly tvarové části uloženy a zatíženy tlakem na plochách, které jsou při vstřikování v kontaktu s polymerní taveninou. Hodnota tlaku byla zjištěna z výsledků analýzy vstřikovacího cyklu v programu Autodesk Moldflow 2023. Tlak v dutině formy dosáhl nejvyšší hodnoty 6,9 MPa. Hodnota tlaku byla poté z důvodu bezpečnosti zvýšena o 20 % a výsledný tlak pro zatížení částí při mechanické analýze byl tedy určen jako 8,5 MPa.

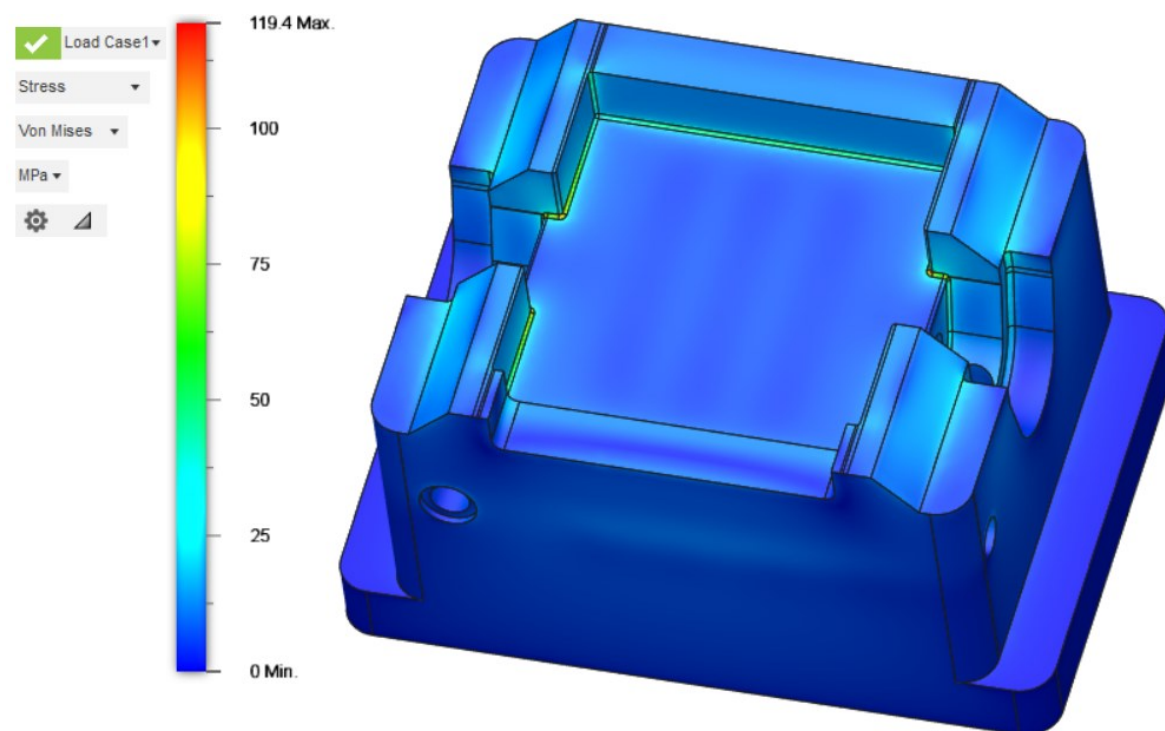
Tabulka 21 – Mechanické vlastnosti materiálu AMPCOLOY 972 [43]

Modul pružnosti v tahu [GPa]	120
Poissonovo číslo [-]	0,31
Mez kluzu [MPa]	410
Mez pevnosti [MPa]	465
Tvrlost dle Rockwella [HRB]	72
Tvrlost dle Brinella [HBW]	125

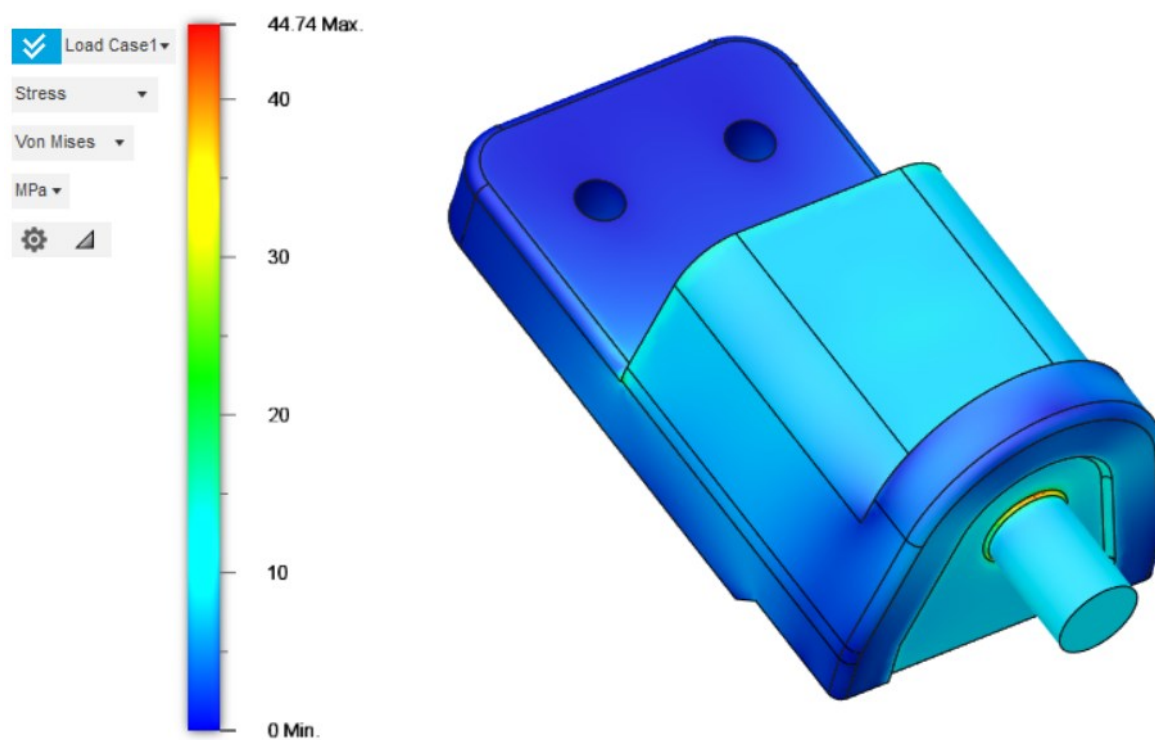
Po nastavení parametrů analýzy byl proveden výpočet a vyhodnocení výsledků. Byly zjišťovány deformace tvarových částí a maximální hodnota napětí Von Mises, která byla poté porovnána s hodnotou meze kluzu materiálu tvarových částí AMPCOLOY 972.



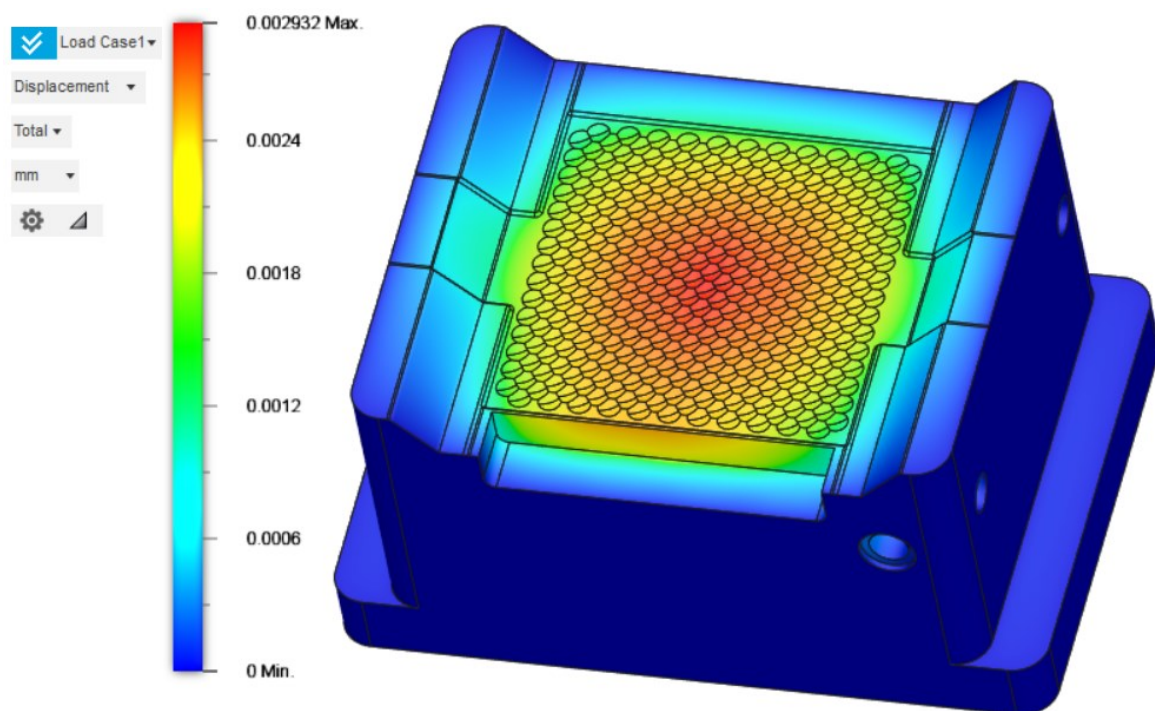
Obrázek 102 – Napětí Von Mises vznikající v tvárnici



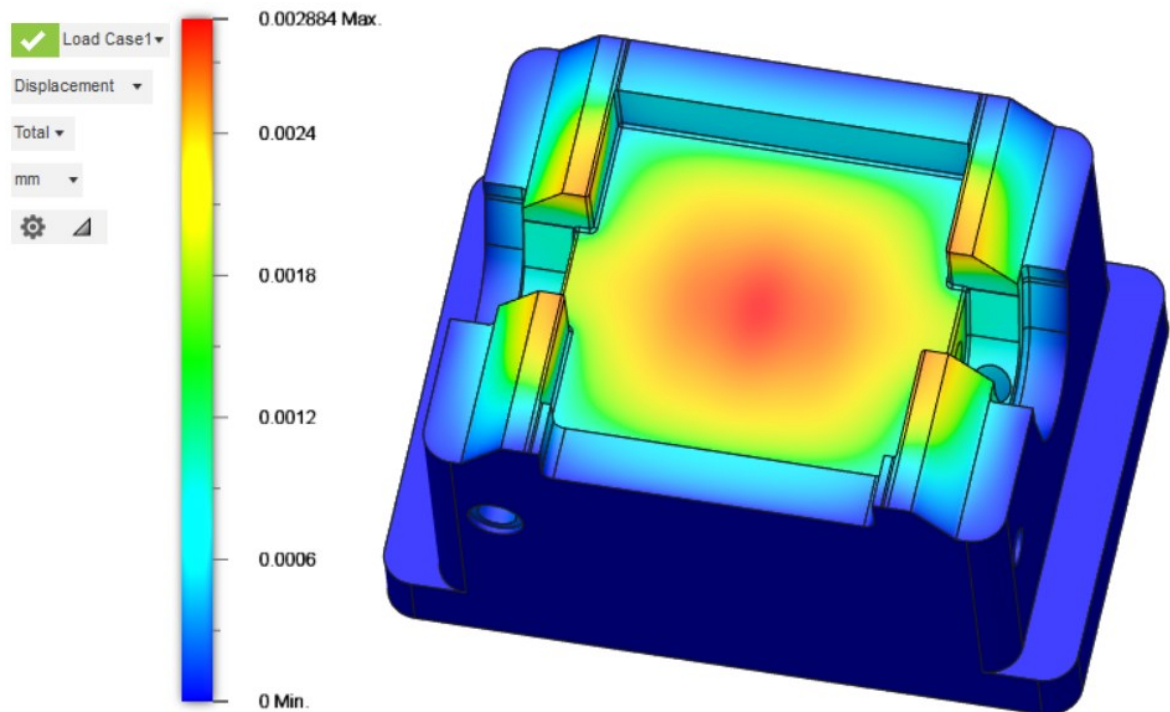
Obrázek 103 – Napětí Von Mises vznikající v tvárniku



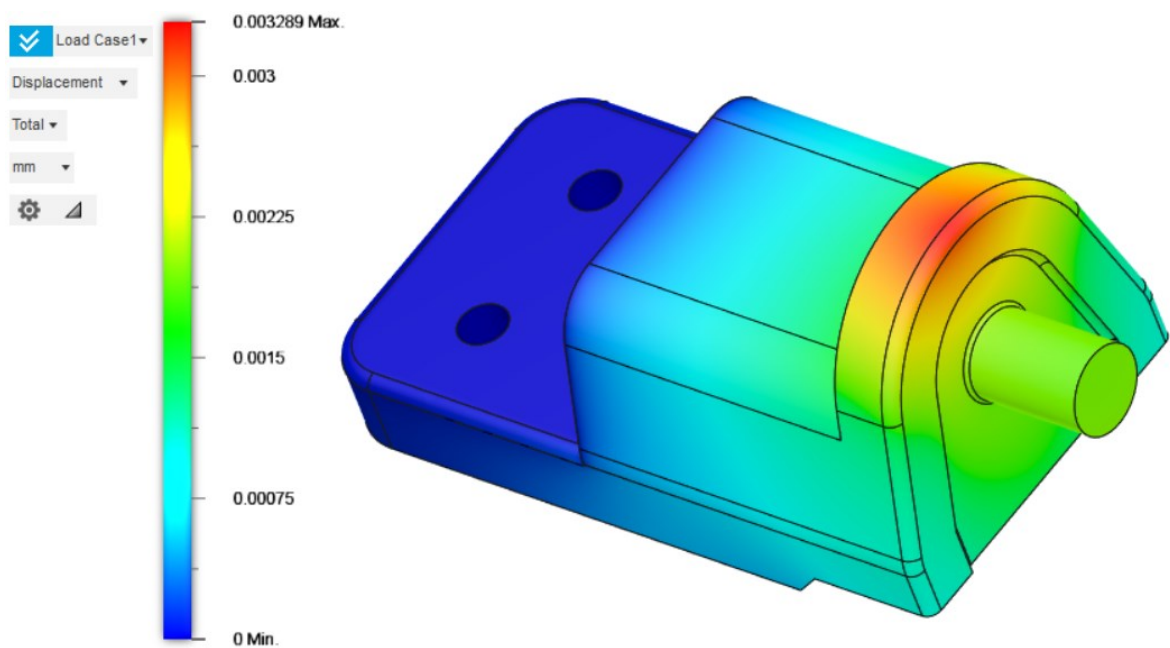
Obrázek 104 – Napětí Von Mises vznikající v boční tvarové části



Obrázek 105 – Deformace tvárnice



Obrázek 106 – Deformace tvárníku



Obrázek 107 – Deformace boční tvarové části

Výsledky mechanické analýzy jsou uvedeny v *Tabulce 22*. Po vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, že ani v jednom případě nedošlo k překročení maximálního napětí Von Mises vůči hodnotě meze kluzu materiálu tvarových částí (410 MPa). Nejvyšší hodnota napětí Von Mises byla zaznamenána u tvárníku (120 MPa), tato hodnota je však stále pod mezí kluzu použitého materiálu a deformace částí se tak budou pohybovat v elastické oblasti. Zvolený materiál AMPCOLOY 972 a konstrukční provedení zkoumaných dílů se tedy jeví jako dostačující. Velikost deformací je u všech tvarových částí podobná, v řádech jednotek mikrometrů. Takto nízké hodnoty deformací by neměly mít výrazný vliv na funkčnost vstřikovací formy.

Tabulka 22 – Výsledky mechanické analýzy tvarových částí formy

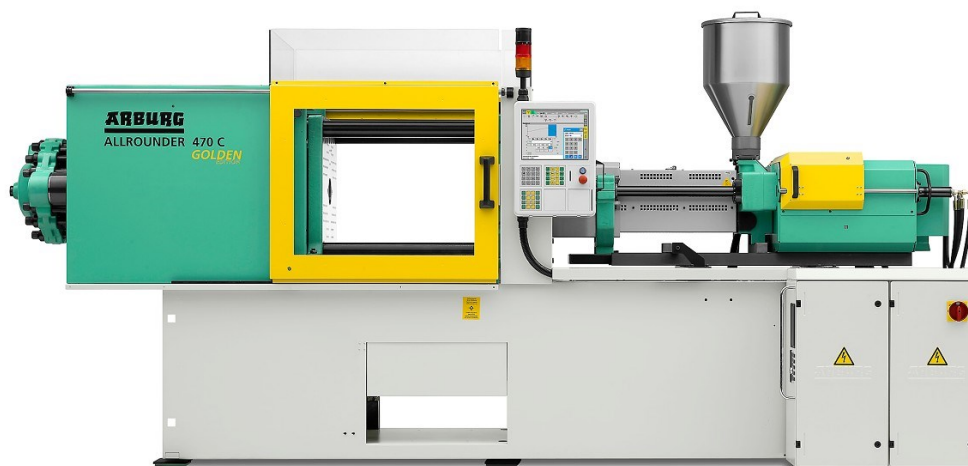
	Deformace [mm]	Von Mises [MPa]	Mez kluzu [MPa]
Tvárnice	$2,932 \cdot 10^{-3}$	43	410
Tvárník	$2,884 \cdot 10^{-3}$	120	
Boční tvarová část	$3,289 \cdot 10^{-3}$	45	

10 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Vstřikovací stroj byl zvolen na základě parametrů konstrukčního návrhu vstřikovací formy a dle výsledků analýz vstřikovacího cyklu. V *Tabulce 23* jsou potřebné parametry porovnány s možnostmi vstřikovacího stroje. Pro formu byl zvolen vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION s průměrem šneku 45 mm. Zvolený vstřikovací stroj splňuje všechny parametry pro upnutí formy a má dostatečnou kapacitu plastikační jednotky pro zaplnění všech dutin.

Tabulka 23 – Porovnání potřebných parametrů s parametry vstřikovacího stroje [44]

	Parametr stroje	Zjištěný parametr
Maximální uzavírací síla [kN]	1500	150
Vzdálenost mezi vodicími čepy [mm]	470x470	-
Maximální rozměry upínacích desek [mm]	650x650	446x546
Vnější průměr středicího kroužku [mm]	125	125
Maximální hmotnost pohyblivé části formy [kg]	800	540
Minimální délka uzavřené formy [mm]	250	714
Maximální otevření formy [mm]	500	240
Maximální dávka vstřikovaného materiálu [g]	305	260



Obrázek 108 – Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470 C GE

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vypracovat literární rešerši na téma vstřikování, vytvořit model tlustostěnného vstřikovaného dílu, provést analýzu procesu vstřikování, zhotovit konstrukční návrh vstřikovací formy pro daný díl a nakreslit sestavu formy včetně patřičných pohledů a kusovníku.

Teoretická část popisovala problematiku polymerních materiálů a způsob jejich zpracování pomocí metody vstřikování. Byly zde uvedeny jednotlivé materiály používané při vstřikování, důraz byl pak kladen především na popis materiálů používaných v optickém průmyslu. Nechyběl ani popis reologických vlastností polymerních materiálů. Dále byl teoreticky popsán průběh vstřikovacího cyklu spolu s jeho modifikacemi pro výrobu tlustostěnných částí. Pozornost byla věnována také samotné konstrukci vstřikovací formy, konkrétně zásadám a doporučením, které by se měly při konstrukci dodržovat. V teoretické části byly rovněž popsány vady vstřikovaných dílů a možnosti simulací vstřikovacího procesu.

Praktická část pak obsahovala návrh tlustostěnného optického dílu, kterým byla čočka užívaná v projekční technice. Čočka je tvořena čtvercovou částí s optickým desénem o rozměrech 64x64x13, na okrajích čočky byly vytvořeny úchytky s montážními otvory pro její ustavení v požadované poloze. Následovala volba jednotlivých komponent formy na základě simulací vstřikovacího procesu. Dle výsledků optických simulací byl vybrán nejvhodnější materiál pro výrobu čočky, konkrétně cyklický olefinový kopolymer APEL APL5014CL od firmy Mitsui Chemicals, Inc. Poté byly provedeny simulace pro určení pozice a typu vtokového ústí. Bylo zvoleno filmové vtokové ústí o tloušťce 2 mm. Na základě výsledků simulací chlazení byl zvolen temperační systém formy, který byl tvořen kanály o průměru 7 mm a vzdálenosti kanálů 14 mm od stěny dutiny formy. Dále byl zvolen materiál tvarových částí formy. Bylo zjištěno, že v porovnání s tvarovými částmi z nástrojové oceli došlo využitím slitiny mědi AMPCOLOY 972 ke snížení vstřikovacího času o 30 s, čímž byla výrazně zvýšena ekonomičnost výroby. Využitím daného materiálu rovněž došlo ke snížení výsledných deformací vstřikovaného dílu.

Na základě simulací vstřikovacího procesu byla navržena vstřikovací forma. Vzhledem k charakteru a rozměrům vstřikované součásti byla forma zvolena jako čtyřnásobná v etážovém uspořádání. Forma tedy byla rozdělena na tři části s dvěma hlavními dělicími rovinami, kdy v každé z nich probíhá výroba dvou dílů.

Vtokový a temperační systém byly navrženy dle výsledků simulací vstřikovacího procesu. Vtokový systém byl zvolen jako kombinovaný a byl tedy tvořen horkou částí a studenou částí. Horká část vtokového systému byla složena z horké vtokové vložky, horkého rozvodného bloku a čtyř horkých trysek. Každá z trysek ústí do studené části vtokového systému složené z přidržovače vtoku, rozvodného kanálu a ústí vtoku. Studená část vtokového systému byla řešena formou vyměnitelných vložek, které lze snadno demontovat. Temperační systém byl řešen dvěma okruhy, jedním pro temperaci tvárnků, druhým pro temperaci tvárnic. Okruhy byly tvořeny kanály o průměru 7 mm, pro přenos temperačního média mezi jednotlivými patry formy pak byly využity hadice se spojkami. Vyhazovací systém formy byl zvolen jako jednostupňový. Pro vyhození každého z dílů byly použity dva válcové vyhazovače o průměru 8 mm. Válcový vyhazovač o průměru 6 mm se pak staral o vyhození vtokového zbytku a byl umístěn v oblasti přidržovače vtoku. Pro odformování bočních montážních otvorů na výrobku byly navrženy posuvné čelisti, které nesou boční tvarová jádra s vyměnitelnými vložkami. Otevírání formy ve dvou dělicích rovinách bylo realizováno pomocí ozubeného převodu, který přenáší otevírací zdvih mezi levou a střední částí formy na zdvih mezi střední a pravou částí. Manipulace s formou byla umožněna pomocí čtyř závěsných ok, které byly rozmístěny na všech třech částech formy.

Funkčnost konstrukčního návrhu vstřikovací formy byla ověřena pomocí celkové analýzy vstřikovacího cyklu. Dle výsledků analýzy bylo zjištěno, že forma byla navržena optimálně a všechny systémy formy splnily svoji funkci. Analýza ukázala vysokou kvalitu optických vlastností dílu, které byly z hlediska jeho použití klíčové. Dále byla provedena mechanická analýza tvarových částí, aby se verifikovala možnost využití zvoleného materiálu tvarových částí, konkrétně slitiny mědi AMPCOLOY 972. Výsledky analýzy ukázaly, že všechny tvarové části obstály a u žádné z nich nedošlo k překročení dovolené meze napětí, nad kterou by docházelo k nevratným deformacím. Deformace tvarových částí byly malé, v řádech jednotek mikrometrů a neměly by tedy ovlivnit průběh vstřikovacího cyklu.

V poslední části práce byl zvolen vhodný vstřikovací stroj a následně byla vytvořena výkresová dokumentace, která byla složena z patřičných pohledů na jednotlivé části formy a řezů sestavou formy. Součástí výkresové dokumentace byl rovněž kusovník použitých prvků při konstrukci formy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. publi.cz, 2016 [cit. 2022-08-04]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [2] BAUR, Erwin, Tim A. OSSWALD a N. RUDOLPH. *Plastics handbook: the resource for plastics engineers* [online]. 5. Munich: Hanser Publishers, 2019 [cit. 2022-12-14]. ISBN 978-1-5231-2103-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPHTRPEE2/plastics-handbook-resource/plastics-handbook-resource>
- [3] CRAWFORD, Roy J. a Peter J. MARTIN. *Plastics engineering* [online]. 4th edition. Cambridge, MA: Elsevier, 2020 [cit. 2022-12-14]. ISBN 978-0-08-100710-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPEE0003H/plastics-engineering/plastics-engineering>
- [4] KOHLGRÜBER, Klemens, Michael BIERDEL a Harald RUST. *Plastics Compounding and Polymer Processing - Fundamentals, Machines, Equipment, Application Technology* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2022 [cit. 2022-12-14]. ISBN 978-1-5231-4507-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPCPPFME2/plastics-compounding/plastics-compounding>
- [5] VALERO, José R.. *Plastics Injection Molding - Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2020 [cit. 2022-12-16]. ISBN 978-1-5231-2723-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPIMSMRB7/plastics-injection-molding/plastics-injection-molding>
- [6] BONAQUE-GONZÁLEZ, S., O. CASANOVA-GONZÁLEZ, J. M. TRUJILLO-SEVILLA, J. J. FERNÁNDEZ-VALDIVIA, H. HERNÁNDEZ-DELGADO a D. CARMONA-BALLESTER. Optical and physics differential characteristics of optical plastics. *Optica Pura y Aplicada* [online]. 2018, **51**(2), 50010:1-50010:11 [cit. 2023-01-01]. ISSN 21718814. Dostupné z: doi:10.7149/OPA.51.2.50010
- [7] MASTRO, Paul F. *Plastics product design* [online]. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2016 [cit. 2023-01-01]. ISBN 978-1-5231-1031-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPPD00002/plastics-product-design/plastics-product-design>

- [8] KUTZ, Myer. *Applied Plastics Engineering Handbook - Processing, Materials, and Applications* [online]. 2nd edition. Cambridge, MA: Elsevier, 2017 [cit. 2023-01-05]. ISBN 978-0-323-39041-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAPEHPMA5/applied-plastics-engineering/applied-plastics-engineering>
- [9] MILOŠ, Sova. Polystyrén standardní. *TECHportal.cz* [online]. Verlag Dashöfer, 2015 [cit. 2023-01-09]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/33/polystyren-standardni-ps-gpps-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EhIUR5OAmM__zjI7ygF8_ko/
- [10] BIRON, Michel. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites* [online]. 3rd edition. Cambridge, MA: Elsevier, 2018 [cit. 2023-01-18]. ISBN 978-0-0810-2502-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTTCE001D/thermoplastics-thermoplastic/thermoplastics-thermoplastic>
- [11] ALMAADEED, Mariam, Ponnamma MARIAM AL ALI, CARIGNANO a Marcelo A. *Polymer Science and Innovative Applications - Materials, Techniques, and Future Developments* [online]. Cambridge, MA: Elsevier, 2020 [cit. 2023-01-20]. ISBN 978-0-12-817303-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPSIAMTF3/polymer-science-innovative/polymer-science-innovative>
- [12] WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang HSU. *Molding Simulation - Theory and Practice* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2018 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-5231-2024-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMSTP0001/molding-simulation-theory/molding-simulation-theory>
- [13] MALKIN, Alexander Ya. a Avraam I. ISAYEV. *Rheology - Concept, Methods, and Applications* [online]. 4th edition. Toronto, Ontario, Canada: ChemTec Publishing, 2022 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-5231-4491-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRCMAE022/rheology-concept-methods/rheology-concept-methods>
- [14] DEALY, John M. a Ronald G. LARSON. *Structure and Rheology of Molten Polymers - From Structure to Flow Behavior and Back Again*. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-611-8.

- [15] BEAUMONT, John P. *Runner and Gating Design Handbook - Tools for Successful Injection Molding* [online]. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, 2019 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-1-5231-2685-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRGDHTSI1/runner-gating-design/runner-gating-design>
- [16] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018 [cit. 2023-01-26]. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [17] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. Liberec: Code creator, s.r.o., distribuce publi.cz, 2015 [cit. 2023-01-26]. ISBN 978-80-88058-72-4. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [18] CHEN, Shia-Chung a Lih-Sheng TURNG. *Advanced Injection Molding Technologies* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2019 [cit. 2023-01-26]. ISBN 978-1-5231-2479-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAIMT0003/advanced-injection-molding/advanced-injection-molding>
- [19] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. Code Creator, s.r.o., distribuce publi.cz, 2016 [cit. 2023-01-26], ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Impresum.html>
- [20] SCHILLER, Gary F. *Practical Approach to Scientific Molding* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2018 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-1-5231-2017-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPASM0012/practical-approach-scientific/practical-approach-scientific>
- [21] Injection moulding machine. *Rutland plastics* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.rutlandplastics.co.uk/plastics-moulding-methods/moulding-machine/>
- [22] BONTEN, Christian. *Plastics Technology - Introduction and Fundamentals* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2019 [cit. 2023-02-02]. ISBN 978-1-5231-2686-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPTIF0003/plastics-technology-introduction/plastics-technology-introduction>
- [23] KOÇ, Muammer a Tuğrul ÖZEL. *Modern Manufacturing Processes* [online]. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2020 [cit. 2023-02-02]. ISBN 978-1-5231-2837-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMMP00011/modern-manufacturing/modern-manufacturing>

- [24] HAN, S. R., J. R. CHO, S. K. BEAK, J. A. HONG a Y. S. LEE. Numerical and experimental studies of injection compression molding process for thick plastic gas valve stem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 89(1-4), 651-660 [cit. 2023-02-02]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-016-9139-6
- [25] HOPMANN, Christian a Malte RÖBIG. Application of a multilayer injection molding process for thick-walled optical components. *Journal of Polymer Engineering* [online]. 2016, 36(6), 557-562 [cit. 2023-02-03]. ISSN 2191-0340. Dostupné z: doi:10.1515/polyeng-2014-0259
- [26] NIAN, Shih-Chih, Po-Wen CHEN a Ming-Shyan HUANG. Multilayer injection molding of high-profile convex lens. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2019, 137(17) [cit. 2023-02-03]. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:10.1002/app.48600
- [27] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide* [online]. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, 2021 [cit. 2023-02-04]. ISBN 978-1-5231-4506-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIMATGE02/injection-molding-advanced/injection-molding-advanced>
- [28] MOTEGI, Atsushi, Tomohiro HISHIDA a Yasuhiko MURATA. Restraint of Voids Generated Inside Injection Molded Products by In-Mold Pressing Method. *International Journal of Automation Technology* [online]. 2018, 12(6), 930-939 [cit. 2023-02-04]. ISSN 1883-8022. Dostupné z: doi:10.20965/ijat.2018.p0930
- [29] KAZMER, David O. *Injection Mold Design Engineering* [online]. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, 2016 [cit. 2023-02-07]. ISBN 978-1-5231-0587-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIMDEE002/injection-mold-design/injection-mold-design>
- [30] BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. Code creator, s.r.o., distribuce publi.cz, 2016 [cit. 7.2.2023]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [31] CATOEN, Bruce a Herbert REES. *Injection Mold Design Handbook*. Munich: Hanser Publishers, 2021. ISBN 978-1-56990-815-0.

- [32] HYNEK, M. a kol. *Studené a živé vtokové systémy* [online]. In: *Plastové díly*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. 2013 [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Studene_a_zive_vtokove_systemy.pdf
- [33] LU, Chun-Ting, Chun-Hsein CHEN a Shi-Chang TSENG. Application of conformal cooling to reduce cooling time and warpage of a U-shaped plate [online]. 2019, 030007- [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: doi:10.1063/1.5088265
- [34] ČERČE, Luka a Janez KOPAC. Cooling simulation of conformal cooling injection mould insert produced by hybrid manufacturing. *Tehnicki vjesnik – Technical Gazette* [online]. 2017, 24(4) [cit. 2023-02-07]. ISSN 13303651. Dostupné z: doi:10.17559/TV-20150909075338
- [35] BI, Zhuming a Xiaoqin WANG. *Computer Aided Design and Manufacturing* [online]. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2020 [cit. 2023-02-08]. ISBN 978-1-5231-3290-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCADM0004/computer-aided-design/computer-aided-design>
- [36] HYNEK, M. a kol. *Vyhazovací sestava a vyhazovače* [online]. In: *Plastové díly*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. 2013 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Vyhazovaci_sestava_a_vyhazovace.pdf
- [37] MENNIG, Günter a Klaus STOECKHERT. *Mold-Making Handbook* [online]. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, 2013 [cit. 2023-02-08]. ISBN 978-1-68015-483-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMMHE001C/mold-making-handbook/mold-making-handbook>
- [38] PRUNER, Harry a Wolfgang NESCH. *Understanding Injection Molds* [online]. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, 2020 [cit. 2023-02-09]. ISBN 978-1-5231-3613-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpUIME0002/understanding-injection/understanding-injection>
- [39] DANGEL, Rainer. *Injection Molds for Beginners* [online]. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, 2020 [cit. 2023-02-09]. ISBN 978-1-5231-3614-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIMBE000A/injection-molds-beginners/injection-molds-beginners>

- [40] Vstřikování plastů dovedené k dokonalosti. *Autodesk Simulation Moldflow* [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/dl/Autodesk-Simulation-Moldflow.pdf>
- [41] HALAŠKA, Petr. Snižování výrobních nákladů pomocí Autodesk Moldflow analýzy. *ANZDOC. SMARTPLAST* [online]. Zlín, [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://adoc.tips/sniovani-vyrobnich-naklad-pomoci-autodesk-moldflow-analyzy.html>
- [42] Oficiální stránky softwaru Autodesk Moldflow Insight [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://help.autodesk.com/view/MFIA/2023/ENU/>
- [43] Vlastnosti materiálu AMPCOLOY 972. Oficiální stránky firmy Ampco metal [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://www.ampcometal.com/documents/A972_EX_E.pdf
- [44] Parametry vstřikovacího stroje ARBURG ALLROUNDER 470 C GE. Oficiální stránky firmy ARBURG [online]. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/technicke-udaje/injection-moulding-machines/hydraulic-machines/series/allrounder-golden-edition/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PC	polykarbonát
PMMA	polymethylmetakrylát
PS	polystyren
COC	cyklický olefinový kopolymer
COP	cyklický olefinový polymer
PVC	polyvinylchlorid
PE	polyethylen
PP	polypropylen
η	smyková viskozita
WIT	vstřikování s podporou vody
GIT	vstřikování s podporou plynu
ICM	vstřikování s dolisováním
MIM	vícevrstvé vstřikování
nm	nanometr
mm	milimetr
kN	kilonewton
s	sekunda
s^{-1}	reciproká sekunda
MPa	megapascal
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
g	gram
%	procento
p	tlak
3D	trojrozměrný prostor
DMLS	metoda spékání kovového prášku

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Typy makromolekulárních struktur [1]</i>	13
<i>Obrázek 2 – Vývoj produkce materiálů od roku 1950 [2]</i>	14
<i>Obrázek 3 – Detail fontánového toku [12]</i>	24
<i>Obrázek 4 – Vstřikovací cyklus a jeho fáze [18]</i>	26
<i>Obrázek 5 – Laminární tok taveniny (žádoucí) a volný tok taveniny (nežádoucí) během vstřikovací fáze [17]</i>	28
<i>Obrázek 6 – Doba chlazení v závislosti na tloušťce stěny výrobku [17]</i>	29
<i>Obrázek 7 – Schéma vstřikovacího stroje [21]</i>	30
<i>Obrázek 8 – Pracovní válec se šnekem [19]</i>	31
<i>Obrázek 9 – Profil šneků v závislosti na počtu závitů [20]</i>	32
<i>Obrázek 10 – Kloubový uzavírací mechanismus s hydraulickým pohonem (vlevo) a hydraulický uzavírací mechanismus (vpravo) [20]</i>	33
<i>Obrázek 11 – Vstřikování s dolisováním [24]</i>	34
<i>Obrázek 12 – Porovnání nežádoucích dutin ve výstřiku vyrobeného běžným vstřikováním (vlevo) a metodou ICM (vpravo) [24]</i>	35
<i>Obrázek 13 – Závislost doby chlazení na tloušťce výrobku [25]</i>	36
<i>Obrázek 14 – Metoda MIM pomocí tří vrstev – a) postupné vrstvení, b) předstřík jádra a nástřík vnějších vrstev, c) předstřík vnějších vrstev a nástřík jádra [26]</i>	37
<i>Obrázek 15 – Typy středících zámků [31]</i>	45
<i>Obrázek 16 – Studený vtokový systém [32]</i>	46
<i>Obrázek 17 – Zobrazení chybné (vlevo) a správné (vlevo) styčné plochy mezi tryskou a vložkou [15]</i>	47
<i>Obrázek 18 – Kruhový (vlevo), parabolický (uprostřed) a lichoběžníkový (vpravo) tvar rozvodného kanálu [15]</i>	48
<i>Obrázek 19 – Typické tvary vtokových ústí pro tlustostěnné součásti [15]</i>	48
<i>Obrázek 20 – Řez horkým rozvodným blokem [29]</i>	49
<i>Obrázek 21 – Příklady konvenční temperace [33] [34]</i>	52
<i>Obrázek 22 - Příklady konformní temperace [33] [34]</i>	52
<i>Obrázek 23 – Porovnání teplotního pole tvarové části s konvenční temperací (vlevo) a konformní temperací (vpravo) v čase [34]</i>	53
<i>Obrázek 24 – Druhy vyhazování – a) Válcovým vyhazovacím kolíkem, b) Trubkovým vyhazovacím kolíkem, c) Pneumaticky, d) Stírací deskou [35]</i>	54
<i>Obrázek 25 – Příklad ovládání vyhazovacího paketu pneumatickým válcem [36]</i>	55
<i>Obrázek 26 – Detail uložení horkého rozvodného bloku ve střední části formy [38]</i>	58
<i>Obrázek 27 – Schéma etážové formy [39]</i>	59
<i>Obrázek 28 – Typy sítí v programu Autodesk Moldflow Insight 2023 [42]</i>	61

<i>Obrázek 29 – 3D model vstřikovaného optického dílu (pohled zeshora)</i>	65
<i>Obrázek 30 – 3D model vstřikovaného optického dílu (pohled zesoda)</i>	65
<i>Obrázek 31 – Vysítovaný díl v programu Autodesk Moldflow 2023</i>	66
<i>Obrázek 32 – Vhodnost umístění vtokového ústí</i>	67
<i>Obrázek 33 – Umístění vtokového ústí na výrobku pro prvotní analýzy</i>	69
<i>Obrázek 34 – Ukázka části vtokového systému</i>	74
<i>Obrázek 35 – Detail plnění dutiny vtokem ve středu stěny v čase 0,2 s</i>	77
<i>Obrázek 36 – Detail plnění dutiny vtokem ve středu stěny v čase 0,4 s</i>	78
<i>Obrázek 37 – Detail plnění dutiny vtokem ve středu stěny v čase 0,7 s</i>	78
<i>Obrázek 38 – Studené spoje při plnění vtokem ve středu stěny</i>	79
<i>Obrázek 39 – Detail umístění vtoku u plochy s optickým desénem</i>	79
<i>Obrázek 40 – Propadliny při plnění vějířovým vtokem</i>	82
<i>Obrázek 41 – Propadliny při plnění speciálním vějířovým vtokem</i>	83
<i>Obrázek 42 – Propadliny při plnění filmovým vtokem</i>	83
<i>Obrázek 43 – Propadliny při plnění vtokem s nálitkem</i>	84
<i>Obrázek 44 – Propadliny při plnění bočním 3 bodovým vtokem</i>	84
<i>Obrázek 45 – Finální podoba studené části vtokového systému</i>	88
<i>Obrázek 46 – Návrh temperace č. 1</i>	89
<i>Obrázek 47 – Návrh temperace č. 2</i>	89
<i>Obrázek 48 – Vysítovaný díl, vtokový, temperační systém a blok formy</i>	90
<i>Obrázek 49 – Tlak v temperačním okruhu pro návrh č. 1</i>	91
<i>Obrázek 50 – Tlak v temperačním okruhu pro návrh č. 2</i>	91
<i>Obrázek 51 – Teplota temperačního média pro návrh č. 1</i>	92
<i>Obrázek 52 – Teplota temperačního média pro návrh č. 2</i>	92
<i>Obrázek 53 – Teplota v dutině formy pro návrh č. 1</i>	93
<i>Obrázek 54 – Teplota v dutině formy pro návrh č. 2</i>	93
<i>Obrázek 55 – Zvolená temperace tvárníku (červená) a tvárnice (modrá)</i>	94
<i>Obrázek 56 – Konformní temperace návrh č. 1</i>	95
<i>Obrázek 57 – Konformní temperace návrh č. 2</i>	95
<i>Obrázek 58 – Etážové rozložení výrobků ve formě</i>	98
<i>Obrázek 59 – Dělicí roviny</i>	99
<i>Obrázek 60 - Tvárnice</i>	100
<i>Obrázek 61 - Tvárník</i>	100
<i>Obrázek 62 – Boční tvarové jádro</i>	101
<i>Obrázek 63 – Detail vyměnitelné vložky tvarového jádra</i>	101

<i>Obrázek 64 – Řez boční posuvnou čelistí</i>	102
<i>Obrázek 65 – Sestava boční posuvné čelisti</i>	103
<i>Obrázek 66 – Určení vzdálenosti pro umístění pružného přitlačného elementu</i>	103
<i>Obrázek 67 – Horká část vtokového systému</i>	104
<i>Obrázek 68 – Studená část vtokového systému</i>	105
<i>Obrázek 69 – Vyměnitelné vložky vtoku na straně tvárnice (vlevo) a tvárníku (vpravo) ..</i>	105
<i>Obrázek 70 – Normálie využité při tvorbě temperačního systému</i>	106
<i>Obrázek 71 – Temperační okruhy pro tvárnice (vlevo) a tvárníky (vpravo)</i>	107
<i>Obrázek 72 – Vyhazovací systém levé strany formy</i>	108
<i>Obrázek 73 – Detail zajištění vyhazovače proti pootočení</i>	109
<i>Obrázek 74 – Vyhazovací systém pravé strany formy</i>	109
<i>Obrázek 75 – Detail hydraulického válce</i>	110
<i>Obrázek 76 – Umístění vyhazovačů na vstříkovaném dílu</i>	110
<i>Obrázek 77 – Hřebenový převod</i>	111
<i>Obrázek 78 – Uzavřená etážová forma</i>	112
<i>Obrázek 79 – Otevřená etážová forma</i>	112
<i>Obrázek 80 – Vodící prvky střední části formy</i>	113
<i>Obrázek 81 – Vodící prvky pravé a levé části formy</i>	113
<i>Obrázek 82 – Vodící prvky vyhazovacího systému</i>	114
<i>Obrázek 83 – Středící kroužek na pravé straně (vpravo) a levé straně (vlevo) formy</i>	114
<i>Obrázek 84 – Rozvržení manipulačních prvků formy</i>	115
<i>Obrázek 85 – Pravá část etážové formy</i>	116
<i>Obrázek 86 – Střední část etážové formy</i>	116
<i>Obrázek 87 – Levá část etážové formy</i>	117
<i>Obrázek 88 – Sestava etážové formy</i>	117
<i>Obrázek 89 – Díly s vtokovým a temperačním systémem v programu Autodesk Moldflow 2023</i>	118
<i>Obrázek 90 – Výsledek analýzy času plnění</i>	120
<i>Obrázek 91 – Výsledek analýzy uzavírací síly</i>	121
<i>Obrázek 92 – Výsledek analýzy teploty čela taveniny</i>	122
<i>Obrázek 93 – Výsledek analýzy studených spojů</i>	122
<i>Obrázek 94 – Výsledek analýzy tlaku</i>	123
<i>Obrázek 95 – Výsledek analýzy zatuhlé vrstvy materiálu</i>	123
<i>Obrázek 96 – Výsledek analýzy teploty temperačního média</i>	124
<i>Obrázek 97 – Výsledek analýzy tlaku v temperačním okruhu</i>	124

<i>Obrázek 98 – Výsledek analýzy teploty v dutině formy</i>	125
<i>Obrázek 99 – Výsledek analýzy celkové deformace</i>	125
<i>Obrázek 100 – Výsledek analýzy vzoru polarizovaného světla</i>	126
<i>Obrázek 101 – Výsledek analýzy fázového posuvu polarizovaného světla</i>	126
<i>Obrázek 102 – Napětí Von Mises vznikající v tvárnici</i>	128
<i>Obrázek 103 – Napětí Von Mises vznikající v tvárniku.....</i>	128
<i>Obrázek 104 – Napětí Von Mises vznikající v boční tvarové části</i>	129
<i>Obrázek 105 – Deformace tvárnice</i>	129
<i>Obrázek 106 – Deformace tvárniku</i>	130
<i>Obrázek 107 – Deformace boční tvarové části.....</i>	130
<i>Obrázek 108 – Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470 C GE.....</i>	132

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Vlastnosti materiálů z databáze Autodesk Moldflow 2023</i>	68
<i>Tabulka 2 – Nastavené procesní podmínky</i>	69
<i>Tabulka 3 – Porovnání výsledků celkové deformace</i>	70
<i>Tabulka 4 – Porovnání výsledků času pro dosažení vyhazovací teploty.....</i>	70
<i>Tabulka 5 – Porovnání výsledků vzoru polarizovaného světla.....</i>	71
<i>Tabulka 6 – Porovnání výsledků fázového posuvu polarizovaného světla.....</i>	72
<i>Tabulka 7 – Porovnání optických výsledků pro materiál COC se změnou polohy vtok. ústí</i>	73
<i>Tabulka 8 – Typy zvolených vtokových ústí</i>	75
<i>Tabulka 9 – Vysíťovaný díl a vtokový systém s jednotlivými typy vtokových ústí.....</i>	76
<i>Tabulka 10 – Detail plnění dutiny vtokem u plochy s optickým desénem</i>	80
<i>Tabulka 11 – Studené spoje při plnění dutiny vtokem u plochy s optickým desénem</i>	81
<i>Tabulka 12 – Srovnání výsledků velikosti a umístění propadlin.....</i>	85
<i>Tabulka 13 – Srovnání výsledků smykového napětí na stěně</i>	86
<i>Tabulka 14 – Srovnání výsledků rychlosti smykové deformace</i>	86
<i>Tabulka 15 – Srovnání výsledků účinnosti dotlakové fáze</i>	87
<i>Tabulka 16 – Porovnání časů pro dosažení vyhazovací teploty mezi návrhy</i>	94
<i>Tabulka 17 – Vlastnosti materiálů z databáze programu Autodesk Moldflow 2023</i>	96
<i>Tabulka 18 – Porovnání časů pro dosažení vyhazovací teploty pro různé materiály tvarových částí</i>	97
<i>Tabulka 19 – Porovnání celkové deformace pro různé materiály tvarových částí.....</i>	97
<i>Tabulka 20 – Procesní podmínky celkové analýzy vstřikovacího cyklu</i>	119
<i>Tabulka 21 – Mechanické vlastnosti materiálu AMPCOLOY 972 [43]</i>	127
<i>Tabulka 22 – Výsledky mechanické analýzy tvarových částí formy.....</i>	131
<i>Tabulka 23 – Porovnání potřebných parametrů s parametry vstřikovacího stroje [44] ..</i>	132

SEZNAM PŘÍLOH

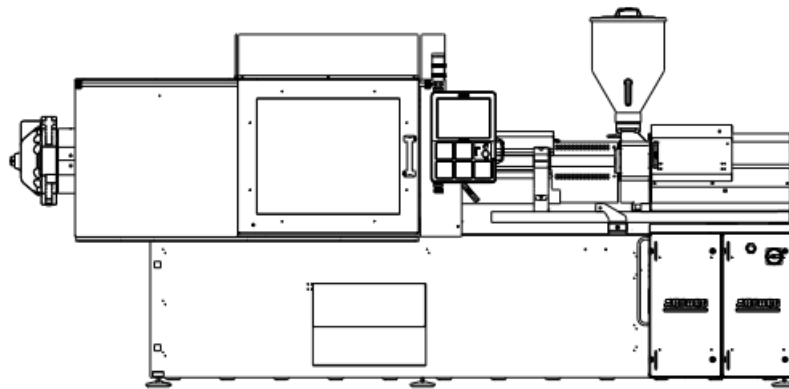
Příloha P I: Technický list vstřikovacího stroje ARBURG ALLROUNDER 470 C GE

Příloha P II: Materiálový list APEL APL5014CL

Příloha P III: Výkresová dokumentace:

- Pohled do levé, střední a pravé části formy,
- řezy sestavou formy,
- kusovník.

**PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST VSTŘIKOVACÍHO STROJE
ARBURG ALLROUNDER 470 C GE**



**ALLROUNDER 470 C
GOLDEN EDITION**

Distance between tie bars: 470 x 470 mm
Clamping force: 1500 kN
Injection unit (acc. to EUROMAP): 400, 800

ARBURG

TECHNICAL DATA | 470 C GOLDEN EDITION

Clamping unit		470 C GOLDEN EDITION	
with clamping force	max. kN	1500	
Opening force stroke	max. kN mm	350 500	
Mould height, fixed variable	min. mm	250 ---	
Platen daylight fixed variable	max. mm	750 ---	
Distance between tie bars (w x h)	mm	470 x 470	
Mould mounting platens (w x h)	max. mm	650 x 650	
Weight of movable mould half	max. kg	800	
Ejector force stroke	max. kN mm	40 175	
Dry cycle time EUROMAP 2	min. s - mm	1,8 - 329	

Injection unit		400			800		
with screw diameter	mm	35	40	45	45	50	55
Effective screw length	L/D	23	20	18	22	20	18
Screw stroke	max. mm	160			200		
Calculated stroke volume	max. cm ³	154	201	254	318	392	474
Shot weight	max. g PS	141	184	232	291	359	434
Material throughput	max. kg/h PS	25	29	35	46	53	59
	max. kg/h PA6.6	12,5	15	17,5	23	27	30
Injection pressure	max. bar	2500	2000	1580	2470	2000	1650
Holding pressure	max. bar	2500	2000	1580	2470	2000	1650
Injection flow 2	max. cm ³ /s	128	168	212	174	214	260
Screw circumferential speed 2	max. m/min	47	53	60	54	60	66
Screw torque	max. Nm	480	550	610	880		
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm	60 300			70 400		
Heating capacity zones	kW	9,4 5			19,9 8		
Feed hopper	l	50			50		

Drive and connection		400		800	
with injection unit					
Net weight of machine	kg	4850		5200	
Sound press. level Insecurity *	dB(A)	69 3		69 3	
Oil filling	l	235		235	
Drive power 2	max. kW	18,5		22	
Electrical connection 3	kW	30		44	
	Total	80		100	
	Machine	---		---	
	Heating	---		---	
Cooling water connection	max. °C	30		30	
	min. Δp bar	1,5		DN 25	

Machine type
with EUROMAP size designation 1
470 C GOLDEN EDITION 1500-400 | 800

All specifications relate to the basic machine version. Deviations are possible depending on variants, process settings and material type. Depending on the drive, certain combinations, e.g. max. injection pressure and max. injection flow may be mutually exclusive.

- 1) Clamping force (kN) - size of injection unit = max. stroke volume (cm³) x max. injection pressure (bar)
 - 2) Specifications depend on the drive variant / drive configuration.
 - 3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.
 - 4) Detailed info in the operating instr.
- [] Specifications apply to alternative equipment.

SHOT WEIGHTS | 470 C GOLDEN EDITION

Theoretical shot weights for the most important injection moulding materials

Injection units according to EUROMAP		400			800		
Screw diameter	mm	35	40	45	45	50	55
Polystyrene	max. g PS	141	184	232	291	359	434
Styrene heteropolymerizates	max. g SB	137	179	227	284	350	424
	max. g SAN, ABS ¹⁾	135	176	223	278	344	416
Cellulose acetate	max. g CA ¹⁾	158	207	262	327	404	488
Celluloseacetobutyrate	max. g CAB ¹⁾	147	192	243	304	375	454
Polymethyl methacrylate	max. g PMMA	145	190	240	300	371	449
Polypheylene ether, mod.	max. g PPE	131	171	216	270	333	403
Polycarbonate	max. g PC	148	193	244	305	377	456
Polysulphone	max. g PSU	153	199	252	316	390	471
Polyamides	max. g PA 6.6 PA 6 ¹⁾	140	183	231	289	357	431
	max. g PA 6.10 PA 11 ¹⁾	131	171	216	270	333	403
Polyoximethylene (Polyacetal)	max. g POM	174	227	287	359	443	536
Polyethylene terephthalate	max. g PET	167	219	277	346	427	517
Polyethylene	max. g PE-LD	106	139	176	219	271	328
	max. g PE-HD	110	143	181	227	280	339
Polypropylene	max. g PP	112	146	185	232	286	346
Fluoropolymerides	max. g FEP, PFA, PCTFE ¹⁾	225	294	372	465	574	695
	max. g ETFE	196	256	324	408	504	609
Polyvinyl chloride	max. g PVC-U	170	222	281	351	434	525
	max. g PVC-P ¹⁾	157	205	260	324	401	485

1) average value

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST APEL APL5014CL

Properties	Test Method	Unit	General Grade				Optical Grade	
			APL6509T	APL6011T	APL6013T	APL6015T	APL5014DP	APL5014CL
Tg	MCI method	°C	80	105	125	145	135	135
Specific gravity	ASTM D792	—	1.02	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04
MFR (260°C, 2.16Kg)	ASTM D1238	g/10min	30	26	15	10	36	36
HDT(1.82MPa)	ASTM D648	°C	70	95	115	135	125	125
Tensile Strength at Yield	ASTM D638	MPa	60	60	60	60	60	60
Tensile Strength at Break	ASTM D638	%	60	3	3	3	3	3
Flexural Modulus	ASTM D790	MPa	2500	2700	3000	3200	3200	3200
Flexural Strength	ASTM D790	MPa	100	110	110	110	100	100
Izod Impact Strength(notched)	ASTM D256	J/m	35	25	25	25	25	25
Moisture Permeability	ASTM F1249	g*mm /m ² *d	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Light Transmittance	ASTM D1003	%	91	90	90	90	90	90
Mold Shrinkage (MD/TD)	MCI method	%	0.6/0.5	0.6/0.5	0.6/0.5	0.6/0.5	0.6/0.5	0.6/0.5
Applications	—	—	Film, Sheet	Industrial parts	Industrial parts	Medical package	Optical	Optical

Item	Unit	Testing Conditions	APEL™ (APL5014CL)	PMMA	PC
Gravity	—	4°C	1.04	1.18	1.20
Heat Distortion Temperature	°C	1.82MPa	125	75	125
Light Transmittance	%	2mmt	90	92	90
Refractive Index (n _D)	—	25°C	1.54	1.49	1.58
Abbe Number (V _D)	—	25°C	56	58	30
Water Absorption Rate	%	23°Cx24h	<0.01	0.3	0.2