

Optimalizace optického tlustostěnného dílu pro automobilový průmysl

Bc. Zdeněk Sedlář

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Zdeněk Sedlář
Osobní číslo:	T18308
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Optimalizace optického tlustostěnného dílu pro automobilový průmysl

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma
2. Provést 3D konstrukci modelu optického tlustostěnného dílu
3. Navrhnout konstrukci vstříkovací formy pro zadaný díl
4. Nakreslit 2D řez vstříkovací formou spolu s výkresy a kusovníkem
5. Provést analýzu procesu vstříkování a optimalizaci zadaného dílu

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

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vydání ? Praha: BEN ? technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.

REES, Herbert. *Mold engineering*. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, c2002. ISBN 3-446-21659-6.

OSSWALD, T. A. *Injection molding handbook*. 2nd ed. Munich, Germany: Carl Hanser Publishers, 2008. 764 s. ISBN 978-3-446-40781-7.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

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 užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vstřikování tlustostěnných optických prvků, tedy vstřikováním plastových čoček.

Teoretická část je zaměřena na materiály, které jsou vhodné pro výrobu tlustostěnných optických prvků. Dále jsou zde popsány reologické vlastnosti a další jevy související se vstřikováním. Důležitou částí jsou technologie popisující výrobu čoček a dále také vznik vad a jejich příčiny. Závěr teoretické části patří programu Autodesk Moldflow Synergy 2016.

Praktická část se zabývá analyzováním a vyhodnocováním různých způsobů vstřikování tlustostěnných optických prvků. Tyto analýzy byly provedeny v programu Autodesk Moldflow Synergy 2016. Na základě výsledků z analýz byla pro nejlepší variantu zhotovena vstřikovací forma v programu Catia V5R19.

Klíčová slova: technologie vstřikování, vícevrstvé vstřikování, vstřikování s dotlakem, tlustostěnný optický prvek, čočka, vady, toková analýza

ABSTRACT

This diploma thesis deals with injection of thick-walled optical elements thus injection molding of plastic lenses.

The theoretical part deals with materials that are suitable for the production of thick-walled optical elements. Further, rheological properties and other phenomena are described in this section. An important subchapter is the technologies describing the production of lenses and also a subchapter dealing with the origin of defects and their causes. The conclusion of the theoretical part belongs to analyzes in Autodesk Moldflow Synergy 2016.

The practical part deals with the analysis and evaluation of different methods of injection of thick-walled optical elements. These analyzes were performed in Autodesk Moldflow Synergy 2016. Based on the results of analyzes of injection mold was made for the best variant in the software Catia V5R19.

Keywords: injection molding technology, overmolding, injection compression molding, thick-walled optical part, lenses, defects, flow analysis

V první řadě bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinovi Ovsíkovi, Ph.D. za odborné rady, názory, připomínky a čas, který mi věnoval při tvorbě této diplomové práce.

Poděkování patří také dalším zaměstnancům Fakulty technologické Univerzity Tomáš Bati ve Zlíně, za jejich vstřícnost a ochotu v průběhu studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY A JEJICH ROZDĚLENÍ	12
1.1 TERMOPLASTY PRO TECHNOLOGII VSTŘIKOVÁNÍ.....	13
1.2 TERMOPLASTY PRO VÝROBU OPTICKÝCH PRVKŮ.....	14
1.2.1 Polymethylmethakrylát (PMMA)	15
1.2.2 Polykarbonát (PC).....	16
1.2.3 Polystyren (PS).....	17
1.2.4 Cyklický olefinový kopolymer (COC).....	18
1.2.5 Polyethermid (PEI).....	19
1.3 ADITIVA K POLYMERNÍM MATERIÁLŮM	20
2 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI, DISIPAČNÍ OHŘEV, FONTÁNOVÝ TOK, INDEX TOKU TAVENINY	22
3 VSTŘIKOVÁNÍ TLUSTOSTĚNNÝCH OPTICKÝCH PRVKŮ	25
3.1 TECHNOLOGIE VÍCEVRSTVÉHO VSTŘIKOVÁNÍ.....	25
3.1.1 Chlazení při vícevrstvěném vstřikování.....	28
3.1.2 Experiment vícevrstvěného vstřikování.....	29
3.2 VSTŘIKOVÁNÍ S DOLISOVÁNÍM.....	31
3.3 ZPŮSOBY TEMPERACE	33
3.3.1 Konvenční způsoby temperace	33
3.3.2 Konformní způsoby temperace	34
4 SMRŠTĚNÍ, ZPRACOVATELSKÉ OKNO, VADY VSTŘIKOVANÝCH SOUČÁSTÍ	36
4.1 SMRŠTĚNÍ VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ	36
4.2 ZPRACOVATELSKÉ OKNO (MAD).....	39
4.3 VADY VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ.....	40
4.3.1 Základní rozdělení vad.....	40
4.3.2 Vady a jejich příčiny	41
5 ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ V MOLDFLOW	44
5.1 PODSTATA STÁDIA VÝVOJE	44
5.2 SIMULAČNÍ PROGRAM AUTODESK MOLDFLOW SYNERGY	45
5.2.1 Simulační možnosti softwaru	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	47
6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	48
7 POUŽITÉ SFOTWARY	49
8 VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK	50

8.1	ZVOLENÉ MATERIÁLY VÝROBKU	50
9	ANALÝZY VSTŘIKOVÁNÍ.....	52
9.1	PLNĚNÍ DUTINY FORMY JEDNÍM VTOKEM	54
9.1.1	Vtokový a temperační systém	54
9.1.2	Procesní podmínky	55
9.1.3	Výsledky analýzy	58
9.1.4	Porovnání temperačních okruhů	61
9.2	PLNĚNÍ DUTINY FORMY TŘEMI VTOKY	67
9.2.1	Vtokový systém a temperační systém	67
9.2.2	Procesní podmínky	69
9.2.3	Výsledky analýzy	69
9.3	VÍCEVRSTVÉ VSTŘIKOVÁNÍ (DVOUVRSTVÉ VSTŘIKOVÁNÍ).....	72
9.3.1	Vtokový a temperační systém	72
9.3.2	Procesní podmínky	74
9.3.3	Výsledky analýzy	75
9.4	VÍCEVRSTVÉ VSTŘIKOVÁNÍ (DVOUVRSTVÉ VSTŘIKOVÁNÍ S DOCHLAZENÍM MIMO FORMU).....	78
9.4.1	Vtokový a temperační systém	79
9.4.2	Procesní podmínky	80
9.4.3	Výsledky analýzy	80
9.5	VSTŘIKOVÁNÍ S DOLISOVÁNÍM.....	84
9.5.1	Vtokový a temperační systém	84
9.5.2	Procesní podmínky	85
9.5.3	Výsledky analýzy	87
9.6	VYHODNOCENÍ ANALÝZ	91
9.6.1	Porovnání provedených tokových analýz	91
9.6.2	Porovnání použitých materiálů	92
10	VSTŘIKOVACÍ FORMA	93
10.1	TVAROVÉ ČÁSTI	93
10.2	VTOKOVÝ SYSTÉM	94
10.3	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	94
10.4	ODFORMOVÁNÍ VÝROBKU	95
10.5	VODÍCÍ, STŘEDÍCÍ A UPÍNACÍ PRVKY	96
10.6	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE	99
	ZÁVĚR	100
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	101
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	105
	SEZNAM OBRÁZKŮ	109
	SEZNAM TABULEK.....	112

SEZNAM PŘÍLOH.....	113
---------------------------	------------

ÚVOD

Lidská společnost se setkává s makromolekulárními látkami prakticky odnepaměti. I když rozvoj syntetických polymerů v moderním smyslu nastal až ve dvacátém století, některé polymerní materiály byly známy a používány mnohem dříve. Zpočátku šlo ovšem o přírodní polymery.

Počátek historie technologie vstřikování plastů je spojován se jménem John Wesley Hyatt, který spolu se svým bratrem v roce 1870 v USA patentoval materiál, z něhož později vznikl celuloid, včetně zařízení pro jeho vstřikování. Vstřikování plastů jako výrobní obor se začal rozvíjet po 1. světové válce. V té době začal velký vývoj a rozvoj vstřikovacích strojů a forem. V roce 1942 představuje firma D-M-E formu složenou z normálií. V průběhu dvacátého století přichází řada firem s novými patenty týkající se technologie vstřikování.

Technologie vstřikování termoplastů, včetně strojů a zařízení pro jejich realizaci, urazila od svých prvopočátků, přes masový a bouřlivý rozvoj zejména v druhé polovině minulého století až po dnešní globalizaci, velmi dlouhou a úspěšnou cestu. Díky širokým možnostem využití termoplastů, zejména v automobilovém, elektronickém, leteckém a dalších oblastech průmyslu, je tato technologie i nadále velmi perspektivní. Kromě vývoje vstřikovacích materiálů, zejména směsí (blendů), směřovaného na výrobní skupiny, se jedná o různé modifikace vstřikovacího procesu, včetně zařízení a forem umožňujících tyto modifikace aplikovat na výrobní praxi.

Plasty pro výrobu optických prvků tedy čoček nacházejí uplatnění taktéž již po 1. světové válce, ale zejména od počátku padesátých let minulého století. První plastové čočky byly montovány na levnější typy fotoaparátů a nyní se zcela běžně používají v brýlích, ve světlometech automobilů a dalších aplikacích.

Plastové čočky kladou velmi vysoké nároky, co se týká technologií jejich výroby. Existuje mnoho způsobů jak proces vstřikování optických prvků dovést k dokonalosti a to jak optimalizací procesních parametrů, vhodnou volbou materiálů, optimalizací vtokového a temperačního systému tak použitím modifikovaných technologií vstřikování, zejména aplikováním vícevrstvého vstřikování nebo vstřikování s kompresní fází, známé jako vstřikování s dolisováním.

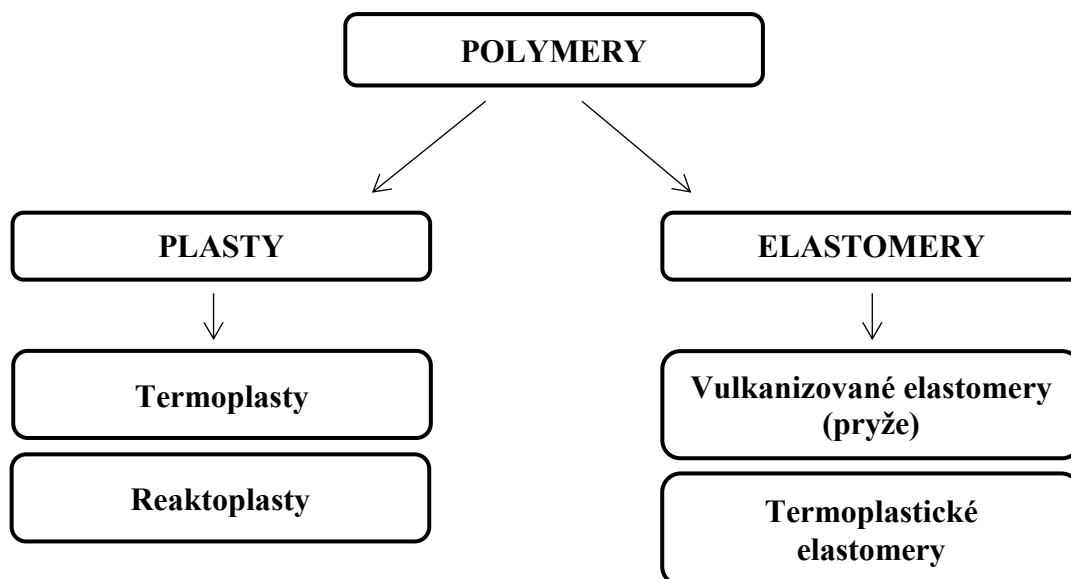
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY A JEJICH ROZDĚLENÍ

Obecně polymerní materiály jsou látky, které jsou tvořeny makromolekulami. Právě tyto makromolekuly vznikají opakujícím se spojováním základní jednotky. Základní jednotkou každé makromolekuly je mer, odvozený od výchozí molekuly (monomer). Samotné uspořádání monomerů ovlivňuje vlastnosti polymeru. Makromolekuly, jak už bylo zmíněno, jsou řetězce merů, které se podle struktury dělí na polymery nezesíťované lineární, nezesíťované rozvětvené a síťované. [1]

V molekulách polymerních látek jsou obsaženy atomy dusíku, uhlíku, kyslíku, chlóru, vodíku a dalších prvků. Spojení atomů makromolekul je realizováno pomocí kovalentní vazby. Druh těchto kovalentních vazeb je různý. I jejich vazebná reakce je různá. [2]

Polymerní materiál, jak je již známo, se dělí na dva hlavní proudy, plasty a elastomery. Následně se každá skupina dělí dále. V případě plastů je dělení na termoplasty a reaktoplasty. Skupina elastomerů je rozdělena na termoplastické elastomery a vulkanizované elastomery (pryže). Toto rozdělení je znázorněno na obrázku (Obr. 1). [1]



Obr. 1 Základní rozdělení polymerů

Polymery je také možno rozdělit podle výchozí suroviny pro jejich výrobu [1]:

- Polymery vyrobené na bázi fosilních surovin – ropa, uhlí, zemní plyn, břidlicové plyny.
- Polymery vyrobené na bázi obnovitelných zdrojů – rostlinné a živočišné produkty.

1.1 Termoplasty pro technologii vstřikování

Termoplastické polymerní materiály pro vstřikování lze rozdělit do čtyř základních skupin:

- **Termoplasty amorfní** - jestliže se materiál nachází ve stavu taveniny, nelze při tuhnutí a ochlazování taveniny amorfního termoplastu vytvořit krystalickou strukturu. Tyto termoplasty mají strukturu neuspořádanou a makromolekula zaujímá tvar tzv. globuly neboli klubíčka. Díky této neuspořádané struktuře a bez přítomnosti plniva disponují relativně nízkým smrštěním. Obvykle pod 1%. Při vyjímání výrobku z formy musí pod být teplotou zesklenní T_g , nad T_g je trvalá deformace. Mezi hlavní amorfní termoplasty patří PS, HI-PS, ABS, SAN, ASA, PVC, PMMA, PC, PPO, CA, CAB, CAP, CP, PET-G, PA6-3-T, PSU, PEI. [1]
- **Termoplasty částečně krystalické** - při ochlazování a tuhnutí taveniny částečně krystalického termoplastu lze získat částečně uspořádanou, krystalickou strukturu. Uspořádanost struktury charakterizuje stupeň krystalinity. Mezi krystalickou fází se nachází fáze amorfní, přičemž tento amorfní obsah dává termoplastu ohebnost, houževnatost. Naopak krystalická fáze dává termoplastu tuhost a pevnost. Makromolekuly se ve struktuře těchto termoplastů seskupují do lamel a vytvářejí sférolity. Obsah krystalické fáze závisí na technologických podmínkách ochlazování, tloušťce stěny daného dílu a také na aditivech atd. Zde je smrštění větší než u amorfních termoplastů. Větší obsah uspořádané krystalické fáze má za následek i větší smrštění. Částečně krystalické plasty jsou z hlediska mechanických, teplotních a chemických vlastností výhodnější pro použití než plasty amorfní. Teplota, při které se zpracovávají, leží nad teplotou tání krystalického podílu T_m , a teplota při které lze vyhazovat z formy, stejně jako teplota použití musí být pod T_m a nad T_g . Mezi hlavní představitelé patří LDPE, HDPE, PP, EVA, PA, PPA, POM, PBT, PET, PPS, PEK, PEEK, LCP, PFA, PTFE. [1]
- **Kompozity s termoplastickou maticí** (s amorfní nebo částečně krystalickou) – jedná se o termoplasty, které jsou pro získání specifických vlastností plněny částicovými, vyztužujícími plnivy (vláknitými, nanoplňivy, speciálními). Nevýhodou u těchto kompozitů s vyztužujícím plnivem je jejich anizotropie vlastností. Tedy rozdíl vlastností ve směru toku taveniny a rozdíl vlastností ve

směru kolmém na tok taveniny. Tento rozdíl vlastností je právě způsoben přítomností a orientací plniva. [1]

- **Termoplastické elastomery (TPE)** – tato skupina termoplastů se dělí na šest skupin [1]:
 - TPE-O – polyolefinové typy, fyzikální směs s plně vulkanizovanými elastomery (EPDM/PP, NBR/PP), rozsah tvrdosti od 40 ShA do 50 ShD
 - TPE-S – styrenové typy, fyzikální směsi se styren-olefin-blokovým kopolymerem (SEBS, SBS, SEBS/SBS), rozsah tvrdosti od 42 ShA do 94 ShA.
 - TPE-U – polyetheruretanové typy, rozsah tvrdosti od 75 ShA do 94 ShA, 45 ShD až 74 ShD.
 - TPE-E – kopolyesterové typy, rozsah tvrdosti 40 ShA do 74 ShD.
 - TPE-A – polyetherblokaramidové typy, rozsah tvrdosti od 72 ShA do 42 ShD.
 - EVA ethylenvinylacetát, rozsah tvrdosti od 72 ShA až 42 ShD.

1.2 Termoplasty pro výrobu optických prvků

I přes nedostatek dostupných typů optických plastů vhodných pro výrobu čoček, našly plasty rozsáhlé uplatnění v této oblasti. Plasty pro optické účely se začaly používat již od první světové války. Větší průlom v používání plastů pro optické účely byl zaznamenán od počátku 50. let 20. století, kdy začaly být na fotoaparáty montovány plastové čočky. Nyní se pravidelně používají v brýlích, ve světlometech a mnoha dalších zařízeních. [20]

V dnešní době se na trhu vyskytuje poměrně dost polymerních materiálů, které slouží jako optické materiály a každý tento materiál má své specifické vlastnosti. Existuje spousta příruček, které udávají vlastnosti pro různé typy optických polymerů avšak tyto údaje (index lomu, disperze, atd.) nejsou příliš přesné, protože závisí na takových faktorech, jako je stupeň polymerace, teplota a jiné. [20]

Pro výrobu optických prvků se používají nejčastěji tyto polymery [20]:

- Polymethylmethakrylát (PMMA).
- Polykarbonát (PC).
- Polystyren (PS).
- Cyklický olefinový kopolymer (COC).
- Polyethermid (PEI).

1.2.1 Polymethylmethakrylát (PMMA)

PMMA představuje v dnešní době velmi rozšířený konstrukční materiál, který se uplatňuje téměř ve všech průmyslových odvětvích. Je na bázi kyslíku, vodíku a uhlíku. Tento termoplastický materiál se vyznačuje svou transparentností a tuhostí, je čistý a bezbarvý i v tlustých vrstvách. Jeho optické vlastnosti se blíží vlastnostem skla, proto se můžeme setkat také s názvem organické sklo. Propustnost pro světlo činí až 92 % (nejvyšší propustnost světla ze všech plastů). Pohlcuje ultrafialové světlo. [3]

Co se týká tepelných vlastností, teplota skelného přechodu činí 106 °C a pro odlévané polotovary až 115 °C. Patří mezi termoplasty, které se vyznačují dobrou teplotní odolností, protože zkušební metodou typu Vicat B bylo zjištěno, že teplota měknutí se pohybuje od 84 °C do 111 °C v závislosti na hodnotě střední molární hmotnosti. Výrobky lze dlouhodobě trvale používat až do teplot 70 °C. [21]

PMMA si i při vyšších teplotách zachovává svůj křehký charakter. Tažnost tohoto materiálu je tedy malá, činí pouze 2 – 4 %. Modul pružnosti v tahu leží v rozmezí 2300 až 3300 MPa. [21]

Odolává slabým kyselinám a louhům, nepolárním rozpouštědlům, roztokům solí, olejům, tukům, vodě. Naopak je napadán silnými louhy a kyselinami, polárními rozpouštědly, benzenem, ketony, estery, étery a dále aromatickými a chlórovanými uhlovodíky. [21]

Dobře odolává povětrnostním vlivům a také vlivům ultrafialového záření. Nedochozí ke žloutnutí ani ke ztrátě povrchového lesku působením klimatických podmínek. PMMA je snadno zápalný. Hoření se projevuje svítivým plamenem o po oddálení zdroje plamene. Zápach při hoření je nasládlý. [21]

Výhody PMMA:

- Vysoká tvrdost, tuhost, pevnost.
- Odolnost proti povětrnostním vlivům.
- Vysoká kvalita povrchu: vysoký lesk, odolný proti poškrábání, možnost leštění.
- Výborné optické vlastnosti.
- Vysoká teplotná odolnost.
- Dobré elektroizolační vlastnosti.
- Dobrá mechanická obrobiteľnosť.

Nevýhody PMMA:

- Náchylnosť k prasknutí při nárazu
- Hořlavost
- Neodolává koncentrovanějším kyselinám a luhům. [4, 21]

1.2.2 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je dalším zástupcem polymerních transparentních materiálů s propustností světla 85 – 90 %. Dále se vyznačuje mimořádně vysokým indexem lomu. [4]

Další významnou vlastností je vysoká rázová houževnatost i při velmi nízkých teplotách, konkrétně pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jejich rozměrová stabilita je dobrá až do $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podobně jako PMMA má i PC dobré elektroizolační vlastnosti. Dále disponuje vysokou mechanickou pevností, především v tahu. Odolnost proti UV záření je i u tohoto materiálu vysoká a také schopnost absorpce vody je relativně nízká. [4, 5]

Polykarbonát je těžko rozpustný v esterech, ketonech, a aromatických uhlovodících, dále odolávají roztokům zředěných kyselin, uhličitanu sodného, alkoholům a alifatickým uhlovodíkům. Dobře se rozpouštějí v chlorovaných uhlovodících a také v cyklohexanonu. Neodolávají dlouhodobému působení vroucí vody a páry. Dále neodolávají působení amoniaku a aminům, dlouhodobé působení metanolu způsobuje také degradaci. [5, 6]

Mezi další negativní vlastnosti lze zařadit fotodegradaci vlivem působení gama záření. Polykarbonáty jsou náchylné na praskání a to zejména po vystavení vlivům rozpouštědel, vysoké teploty nebo také mechanického namáhání. [5, 6]

Použití polykarbonátu je rozšířeno zejména v optice. Z tohoto druhu polymeru se zhotovují konstrukční díly fotoaparátů, kamer, blesků, promítajících přístrojů, dalekohledů, hledáček, clon apod. Vyrábějí se světlovody i optické systémy. Nejvýznamnější aplikací je především výroba optických disků (CD). [4]

Výhody PC:

- Při velmi nízkých teplotách vysoká rázová houževnatost.
- Jsou odolné proti UV záření.
- Dobrá rozměrová stabilita až do 140 °C.
- Dobré elektroizolační vlastnosti.
- Vysoká mechanická pevnost.
- Absorpce vody je nízká.
- Stálost proti oxidaci až do 120 °C.

Nevýhody PC:

- Fotodegradace.
- Neodolává působení amoniaku a amidů, vařící vody a páry. [4]

1.2.3 Polystyren (PS)

Polystyren je dalším zástupcem mezi optickými polymery, je ataktický a vzhledem k nepravidelnosti makromolekulárního řetězce nemůže krystalizovat. Je tedy dalším zástupcem amorfních polymerů a to spolu s jeho chemickou strukturou je hlavní příčinou, že tento polymer má opět vynikající optické vlastnosti. Existují i další formy polystyrenu (izotaktický polystyren), jedná se o polystyren, který krystalizuje a má uspořádanou chemickou strukturu. Tyto polystyreny však nenalezly uplatnění v optice, neboť jsou vlivem krystalizace zakaleny. [23]

Vlastnosti standardního polystyrenu jsou následující: tvrdý, křehký, čirý, průhledný polymer s vysokým leskem. Jeho pevnostní chování je málo závislé na teplotě i na čase jejich vystavení. Dlouhodobě je možné polystyren používat při teplotách do 60 °C až 90 °C. Může být vystaven vzdušné vlhkosti, aniž by byly ovlivněny jeho vlastnosti, protože se vyznačuje nízkou navlhavostí i nasákavostí. Propustnost světla u polystyrenu činí až 90 %.

Tím, že neobsahuje v makromolekule polární skupiny, má vynikající elektrické a dielektrické vlastnosti. [23]

Je odolný proti běžným neoxidujícím kyselinám, louhům, alkoholům, některým olejům a tukům, roztokům solí a vodě. Neodolává však organickým rozpouštědlům, benzínu, aromatickým a chlorovaným uhlovodíkům, ketonům a esterům. Podléhá také korozi za napětí, to znamená, že podléhá působení mechanického zatížení se společným účinkem vnějšího prostředí. Dochází k tvorbě jemných vlasových trhlinek. [26]

Výhody PS:

- Dobrá tuhost a tvrdost.
- Vynikající optické vlastnosti a mimořádná průhlednost.
- Lesklý a kvalitní povrch.
- Výborně se zpracovává.
- Nízká navlhavost a nasákavost.
- Velmi dobré elektrické a dielektrické vlastnosti.

Nevýhody PS:

- Poměrně vysoká křehkost.
- Vůči organickým rozpouštědlům nízká chemická odolnost.
- Sklon ke korozi za napětí. [23]

1.2.4 Cyklický olefinový kopolymer (COC)

Cyklické olefinové kopolymery se vyrábějí kopolymerací cyklického olefinu (např. cyklopentanu, norbornenu) s olefinem, jako je ethylen nebo propylen. Reakce, tedy polymerace vedoucí ke vzniku cyklického olefinového kopolymeru je známá pod názvem Ring-Opening Metathesis Polymerization (ROMP). [25]

Představují novou třídu polymerních materiálů. Jedná se o termoplastické elastomery s tvrdostí až 89 ShA a modulem pružnosti v tahu 4500 MPa. Tažnost tohoto materiálu činí více jak 450 %, která se udržuje až do -80 °C. Cyklický olefinový kopolymer se vyznačuje vysokou pevností a tuhostí. Odolává proti kyselinám a louhům a disponuje výbornými dielektrickými vlastnostmi. Jeho čistota je mimořádně dobrá a také se vyznačuje biokompatibilitou a velmi nízkou navlhavostí. [25]

Výhody COC:

- Nízká hustota.
- Vysoká průhlednost.
- Velmi nízká absorpce vody, odolné vůči vodní páře.
- Vysoká tuhost, pevnost a tvrdost.
- Vynikající biokompatibilita.
- Velmi dobrá odolnost vůči kyselinám a zásadám.
- Velmi dobré dielektrické vlastnosti.
- Velmi dobrá zpracovatelnost. [25]

Nevýhody COC:

- Citlivost na UV záření.
- Poměrně velká citlivost na povětrnostní podmínky.
- Snadno hoří. [18]

1.2.5 Polyethermid (PEI)

Základem polyethermidů jsou polyimidy, které představují novou třídu speciálních plastů, které se vyznačují vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti, termoxidační stabilitou, vynikajícími mechanickými vlastnostmi, vysokou odolností vůči teplotám a dalším. [31]

Polymerní skupina, kterou polyimidy představují, se vyznačuje špatnou tavitelností a nepříznivou cenou. Z tohoto důvodu byly vyvinuty právě polyethermidy. Začleněním etherových vazeb do polyimidového molekulárního řetězce poskytuje dostatečnou flexibilitu, tím pádem dosáhneme dobré zpracovatelnosti taveniny se zachováním vlastností imidů. [31]

Polyethermidy byly poprvé vyvinuty v roce 1982 společností General Electric Company (Nyní známou jako SABIC) pod obchodním názvem pryskyřice ULTEM. Jedná se o amorfní konstrukční termoplast, o kterém je známo, že vykazuje vysokou teplotní odolnost, vynikající mechanické a elektrické vlastnosti. Vykazuje vysokou pevnost v tahu, dobrou odolnost proti plamenům a při hoření dochází ke slabému znečištění kouřem, což je

ideální předpoklad pro použití tohoto materiálu v automobilovém, elektrickém a lékařském průmyslu. [31]

Výhody PEI:

- Vysoká pevnost v tahu a modul v ohybu, dobré mechanické vlastnosti i při zvýšených teplotách.
- Dobré elektrické vlastnosti.
- Dobrá odolnost vůči UV záření a povětrnostním vlivům.
- Odolné proti ohni.
- Odolný vůči alkoholům, kyselinám a uhlovodíkovým rozpouštědlům.

Nevýhody PEI:

- Vysoká cena.
- Neodolává halogenovým a chlorovaným rozpouštědlům.
- Před zpracováním je nutné dlouhé sušení. [31]

1.3 Aditiva k polymerním materiálům

Polymerní materiály, které jsou určeny pro vstřikování, se skládají jak ze základního polymeru, tak z aditiv. Základní polymer je vyroben polyreakcí, při které přecházejí chemickou cestou monomerní jednotky na makromolekulární látky, tedy polymery. Existují tři typy polyreakcí [1]:

- Polymerace – výroba polyolefinů (PP, PE), styrenových polymerů (ASA, SAN, PS), polyakrylátů (PMMA), PVC.
- Polyadice – jedná se o proces syntézy lineárních polyuretanů (PUR).
- Polykondenzace – výroba polyamidů (PA), polykarbonátů (PC), nasycených polyesterů (PET, PBT, LCP).

Polymery vzniklé těmito polyreakcemi nemají řadu vlastností, které by byly vhodné pro technologii vstřikování a proto je potřeba tyto polymery upravit přísadami (aditivy), které jim dodávají požadované vlastnosti. Přísad pro úpravu vlastností existuje celá řada [1]:

- Přísady pro zlepšení zpracovatelnosti polymerních tavenin.
- Vnitřní maziva.
- Stabilizátory (termooxidační, UV).
- Změkčovadla (plastifikátory).
- Polymerní modifikátory.
- Lubrikanty (maziva).
- Nukleační činidla.
- Antistatické přísady.
- Retardéry a zpomalovače hoření.
- Chemická nadouvadla.
- Barviva, pigmenty, optická zjasňovadla, barevné koncentráty.

Při výrobě plastových dílů, u kterých jsou důležité požadavky na jejich optickou a pohledovou kvalitu, hrají velký význam opticky zjasňující prostředky. Tyto látky zlepšují vzhled u přírodních, bílých a světle pigmentovaných výstřiků. Jejich účinná složka absorbuje UV záření fialových oblastí o vlnových délkách 340 nm až 370 nm a reemitují jej v modré oblasti o vlnových délkách 420 nm až 470 nm. Díky těmto prostředkům dávají výrobky dojem jasnější barvy, dochází k odstranění nažloutlosti, přičemž tyto vlastnosti jsou nejvíce pozorovatelné na denním světle. [7, 13]

Mezi základní typy zjasňovačů patří [13]:

- Triazinové stilbeny.
- Kumariny.
- Imidazoliny.
- Diazoly.
- Triazoly.
- Benzoxazoliny.
- Bifenylové stilbeny.

2 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI, DISIPAČNÍ OHŘEV, FONTÁNOVÝ TOK, INDEX TOKU TAVENINY

Tok polymerních tavenin se liší od toku nízkomolekulárních kapalin, jejichž chování označujeme jako newtonské. Polymerní taveniny, respektive jejich tok je nenewtonský. V tomto případě mluvíme o toku pseudoplastickém. K popisu pseudoplastického toku nejčastěji používá empirický vztah – mocninový zákon, neboli Power-Law Model. Tento zmíněný model se používá pro vysoké smykové rychlosti. Dalším často používaným vztahem se Bird-Carreau-Yasuda Model. Tento model je nejbližší popisuje chování polymerní taveniny při praktických aplikacích. Existují další modely popisující chování polymerních tavenin (Cross-WLF Model, Bingham Model). [7,14]

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

η – viskozita [Pa · s]

m – index konzistence [–]

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

n – index nenewtonského chování [–]

Bird-Carreau-Yasuda:
$$\eta = \frac{\eta_0}{(1 + |\lambda\dot{\gamma}|^a)^{\frac{(1-n)}{a}}} \quad (2)$$

η – viskozita [Pa · s]

η_0 – newtonská viskozita [Pa · s]

λ – relaxační čas [s]

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

n – index nenewtonského chování [–]

a – hodnota charakterizující ostrost přechodu z newtonské do pseudoplastické oblasti [–]

Experimentálně zjištěné tokové vlastnosti konkrétního polymeru se vyjadřují pomocí tokových křivek, což je závislost viskozity na rychlosti smykové deformace. [7]

Při toku taveniny dochází vlivem vnějších sil k přeskokům jejich částic do nových poloh. Práce, kterou spojujeme s tímto přeskokem, se mění v teplo. Jedná se tedy o změnu mechanické energie na tepelnou. Tato změna energií se nazývá disipace. K tomuto jevu při toku taveniny dochází spontánně a je jen otázkou kvantitativních poměrů, kdy se projeví

dodatečným zvýšením teploty v daném místě. Velikost disipace při toku je v daném místě úměrná součinu smykového napětí a smykové rychlosti. K ohřevu, tedy k disipaci polymerní taveniny bude docházet v místech jejího nejrychlejšího proudění, respektive v místech s největším zúžením tokové dráhy. Tento ohřev může být tak veliký, že způsobí degradaci materiálu. V případě technologie vstřikování jsou hlavním rizikovým místem vtoková ústí. [7]

Obecně při vstřikování polymerních tavenin je teplota stěn tokových kanálů výrazně nižší než teplota taveniny. Z tohoto důvodu dochází k časově neustálenému toku, kdy na „studené“ stěně tokového kanálu tavenina tuhne v rostoucí vrstvě. Pod vzniklou ztuhlou vrstvou směrem ke středu kanálu tavenina nadále teče. Takový tok taveniny nazýváme fontánovým tokem. Je to nejvhodnější způsob toku při plnění tvarových dutin forem. [7]

U fontánového toku je absence skluzu mezi taveninou a stěnou. Rychlostní profil taveniny při vstřikování má zvonovitý tvar, nikoli parabolický. Křivka se mění z konkávní na konvexní a rychlost smykové deformace dosahuje maximální hodnoty v 1/3 od stěny směrem k ose toku. [15]



Obr. 2 Fontánový tok [15]

Na vstřikování má značný význam elongační viskozita. Jestliže je elongační viskozita příliš velká, snižuje se zatékavost do tvarové dutiny. Potom v dutině formy převažuje elongační tok. Platí pravidlo, že čím větší je elongační viskozita, tím větší tlak je potřebný na vyplnění dutiny formy. Smyková viskozita je dalším faktorem, který ovlivňuje proces vstřikování. Ta má vliv zejména na tvar čela polymerní taveniny. [15]

Důležitou hodnotou charakterizující polymerní materiály je index toku taveniny (ITT). Index toku taveniny udává „tekutost“ polymerní taveniny, na jehož základě posuzujeme vhodnost daného materiálu pro konkrétní výrobu výstřiků a zejména je na základě této hodnoty možné porovnávat materiály mezi sebou. Reprezentuje jeden bod na tokové křivce. ITT je definován jako množství roztaveného polymerního materiálu, které je vytlačeno za definovaných podmínek (teplota, zatížení) přes trysku plastometru za 10 minut. Existují dva typy ITT [1]:

- Hmotnostní ITT – udáván v g / 10 min
- Objemový ITT – udáván v cm³ / 10 min

Hmotnostní index toku taveniny se používá pro neplněné materiály a objemový se používá pro kompozity, tedy plněné materiály. Čím je hodnota ITT vyšší, tím je tekutost materiálu také vyšší, tavenina lépe zatéká do menších průřezů. [1]

Z fyzikálního hlediska je vnitřním odporem pro toku taveniny jeho viskozita. Viskozita je u polymerních materiálů závislá na teplotě a na rychlosti smykové deformace. Platí, že čím je viskozita polymerní taveniny větší, tím je její tekutost menší a naopak nižší viskozita polymerní taveniny umožňuje použít pro vstřikování daného materiálu nižší zpracovatelskou teplotu, popřípadě nižší vstřikovací tlak a rychlost. S rostoucí teplotou viskozita klesá. Viskozita klesá i s rostoucí rychlostí smykové deformace. [1]

Při technologii vstřikování polymerních materiálů se rychlosti smykových deformací pohybují v rozmezí od 10² s⁻¹ až 10⁵ s⁻¹ (někdy až 10⁶ s⁻¹). [1]

3 VSTŘIKOVÁNÍ TLUSTOSTĚNNÝCH OPTICKÝCH PRVKŮ

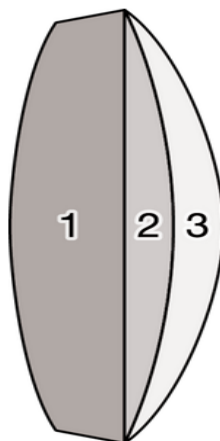
Tato kapitola se zabývá technologií vstřikování tlustostěnných optických prvků pro automobilový průmysl. Pod pojmem tlustostěnný optický prvek si lze představit čočky, v tomto případě zejména čočky používané ve světlometech automobilů. V kapitolách uvedených níže, je rozebrána problematika zmíněných technologií související s výrobou optických prvků.

3.1 Technologie vícevrstvého vstřikování

V Evropě se vývoj plastových optických částí soustředí hlavně na silnější, tedy tlustostěnné čočky pro LED světlometry. Doba chlazení se s rostoucí tloušťkou výrazně zvyšuje, z toho důvodu je největší výzvou vyvinout ekonomické procesy pro takovéto výrobky. Při typické tloušťce 30 mm u čoček automobilových světlometů lze při standardních postupech vstřikování očekávat dobu celého cyklu nejméně 20 minut. [22]

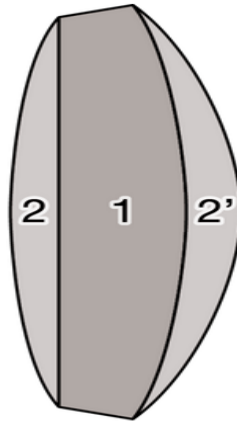
Vícevrstvá technologie je jednou z možností zkrácení doby cyklu, při které je tlustostěnná součást zhotovena z několika vstřikovaných částí tvořících právě jednu čočku. Tuto vícevrstvou strukturu lze vytvořit několika způsoby. Tyto způsoby uplatnění vícevrstvé technologie jsou vysvětleny na čočce, která je složena ze tří vrstev. [22]

První způsob – základem čočky zhotovené vícevrstvým vstřikováním je vrstva 1, která se nazývá předstřík. Na tuto vrstvu se následně provede nástřík vrstvy 2 a vrstvy 3. Struktura této třívrstvé čočky je zobrazena na obrázku (Obr. 3). [22]



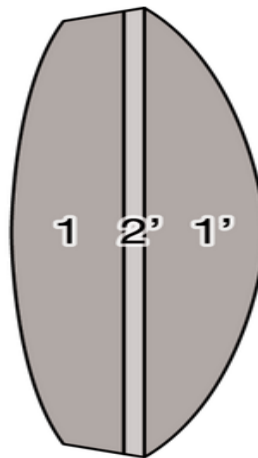
*Obr. 3 První způsob
technologie vícevrstvého
vstřikování čočky [22]*

Druhý způsob (sendvičová varianta) – u tohoto způsobu vstřikování je opět vrstva 1 základní vrstvou, tedy předstříkem. Poté dochází k současnému nastříknutí vrstev na obou stranách, tedy vrstev 2 a 2'. Struktura čočky zhotovené tímto druhým způsobem je znázorněna na obrázku (Obr. 4). U toho způsobu musí být vyvážené vstřikovací tlaky, aby nedošlo k prasknutí předstříku, tedy vrstvy 1. [22]



*Obr. 4 Druhý způsob
technologie vícevrstvého
vstřikování čočky [22]*

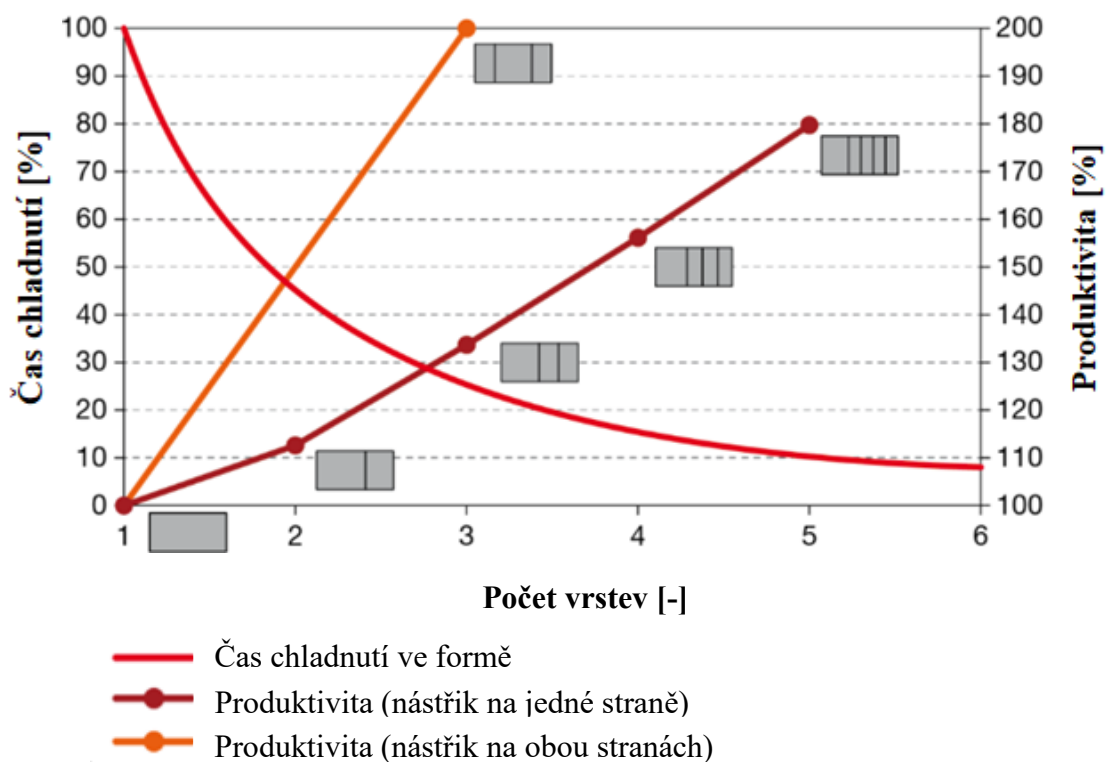
Třetí způsob – zhotovení třívrstvé čočky spočívá nejdříve ve vstříknutí předstříků, kde oproti předchozím dvěma způsobům byl předstřík pouze jeden, zde jsou dva. Předstříky jsou označeny jako 1 a 1'. Následně se tyto předstříky spojí vstříknutím vrstvy 2', čímž dostaneme opět tlustostěnnou čočku zhotovenou pomocí tří vrstev. Tento třetí způsob je znázorněn na obrázku (Obr. 5). [22]



*Obr. 5 Třetí způsob
technologie vícevrstvého
vstřikování čočky [22]*

Na obrázku (Obr. 6) je znázorněn graf závislosti času chladnutí ve formě na počtu vrstev a závislost produktivity opět na počtu vrstev. Čočka, která je tvořena pouze jednou vrstvou, tedy vstříknuta najednou, představuje v tomto grafu pouze referenční hodnotu, od které pro srovnání vychází vstřikování čoček stejných rozměrů ale technologií vícevrstvého vstřikování. Z tohoto grafu je patrné, jak čas chladnutí klesá se zvyšujícím se počtem vrstev, ze kterých je čočka složena. [22]

Dále je v tomto grafu znázorněna produktivita. Opět s počtem vrstev produktivita roste. Tmavě červenou čarou je zde znázorněna produktivita, jaká je při nástřiku pro předstřík pouze na jedné straně. Oranžovou čarou je zase znázorněna produktivita pro oboustranné vstřiknutí na předstřík. Z tohoto srovnání obou produktivit je zřejmé, že při výrobě čočky pomocí tří vrstev produktivita rapidně stoupá, když nástřiknutí na předstřík je provedeno z obou stran. [22]



Obr. 6 Závislost času chladnutí a produktivity na počtu vrstev [22]

Při provádění nástřiku pouze na jedné straně, vyžaduje vstřikovací forma větší počet dutin, a tím pádem bude forma větší ve srovnání s variantou vstřikování z obou stran.

Přes všechny výhody sendvičové alternativy nelze přehlédnout, že vyžaduje složitější koncepci formy. Ukotvení předstříku v dutině formy a jeho přemístování je náročnější,

zatímco pro jednostranné plnění vnějších vrstev stačí pouze otočný stůl nebo robotické rameno. Rovněž při současném plnění z obou stran musí být tlaky na těchto stranách vyvážené, aby nedošlo ke zborcení nebo zlomení předstříku. [22]

Při vícevrstevném vstřikování jsou plochy vnitřních vrstev vlivem dalšího nástřiku přetaveny, čímž dojde k eliminaci případných drobných vad. Naopak u ploch vnějších vrstev k žádnému následnému přetavení nedojde, tudíž jsou zde požadavky na kvalitu těchto ploch velmi vysoké. [22]

Spolu se zkracováním doby cyklu se také zkracuje doba setrvání materiálu v plastifikačním válci. Z toho plyne, že dochází ke snížení zažloutnutí polymerní taveniny a tím vyšší bude propustnost světla. [22]

Z faktů uvedených výše, lze tedy konstatovat, že několik tenkých vrstev se ochlazuje rychleji než jedna tlustá vrstva, což může produktivitu zvýšit přibližně dvakrát. [22]

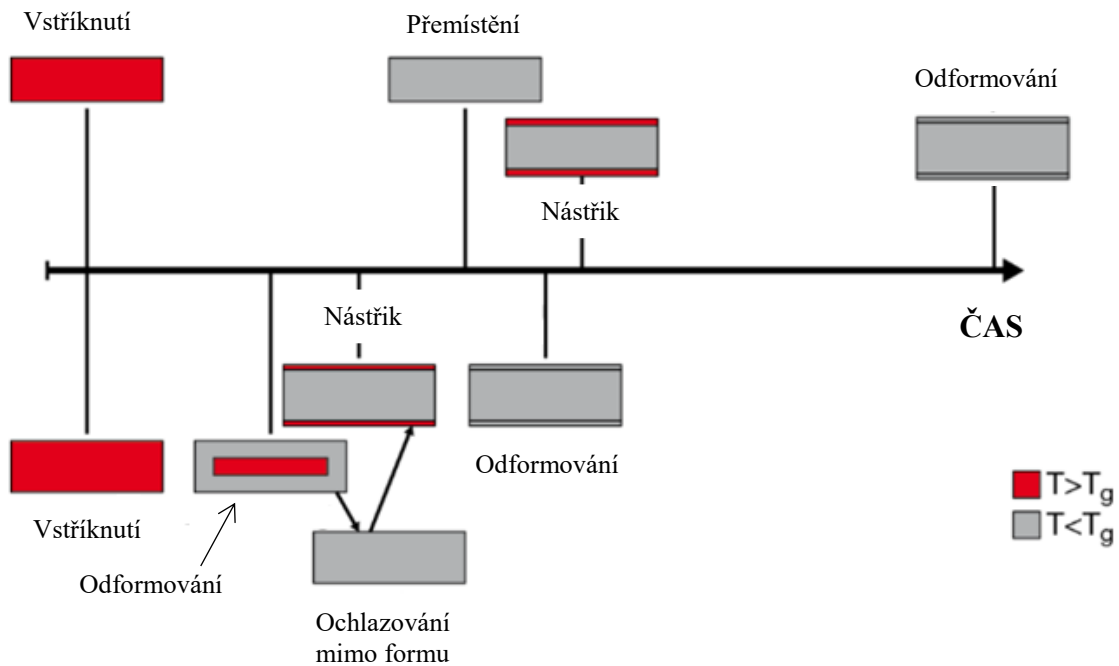
3.1.1 Chlazení při vícevrstevném vstřikování

Obecně se předpokládá, že u třívrstvé sendvičové struktury musí být předstřík a na něm nastříknuté vrchní vrstvy na konci doby chlazení ochlazený pod teplotou skelného přechodu. Testy však ukázaly, že samotný předstřík lze vyjmout mnohem dříve. Musí být pouze zajištěno, že jeho ztuhlé vnější vrstvy jsou dostatečně silné, aby nedošlo k deformaci během odformování. [22]

Existuje také varianta ochlazování předstříku mimo formu před nastříknutím dalších vrstev. Chlazení na vzduchu trvá sice déle než ve formě, ale nedochází k ovlivnění doby cyklu. Navíc předstřík, který chladne na vzduchu a poté se vkládá znovu do dutiny formy, má nižší průměrnou teplotu, než předstřík, který chladne přímo ve formě. Při následném nastříknutí dalších vrstev absorbuje předstřík, který chladnul na vzduchu a má tedy nižší teplotu, více tepla z právě nastříknutých vrchní vrstev, což také napomáhá redukovat čas chlazení. Tento efekt lze posílit tím, pokud předstřík bude tlustší a naopak vrchní vrstvy budou tenčí. [22]

Postup vícevrstevného vstřikování s chlazením mimo formu je následující. Forma obsahuje dutinu pro výrobu předstříku a dutinu pro umístění předstříků a provedení nástřiku. Nejdříve tedy proběhne vstříknutí do dutiny tvořící předstřík. Hotový předstřík je z formy vyjmut a umístěn mimo ni, kde chladne. Zároveň při otevření formy, je vložen předstřík, který chladnul mimo formu a na něj se provede nástřik dalších vrstev. Přitom současně

dochází opět i k plnění dutiny první. Na obrázku (Obr. 7) je znázorněn na časové ose průběh s chlazením uvnitř formy (část nad časovou osou) a průběh externího chlazení (část pod časovou osou). [22]

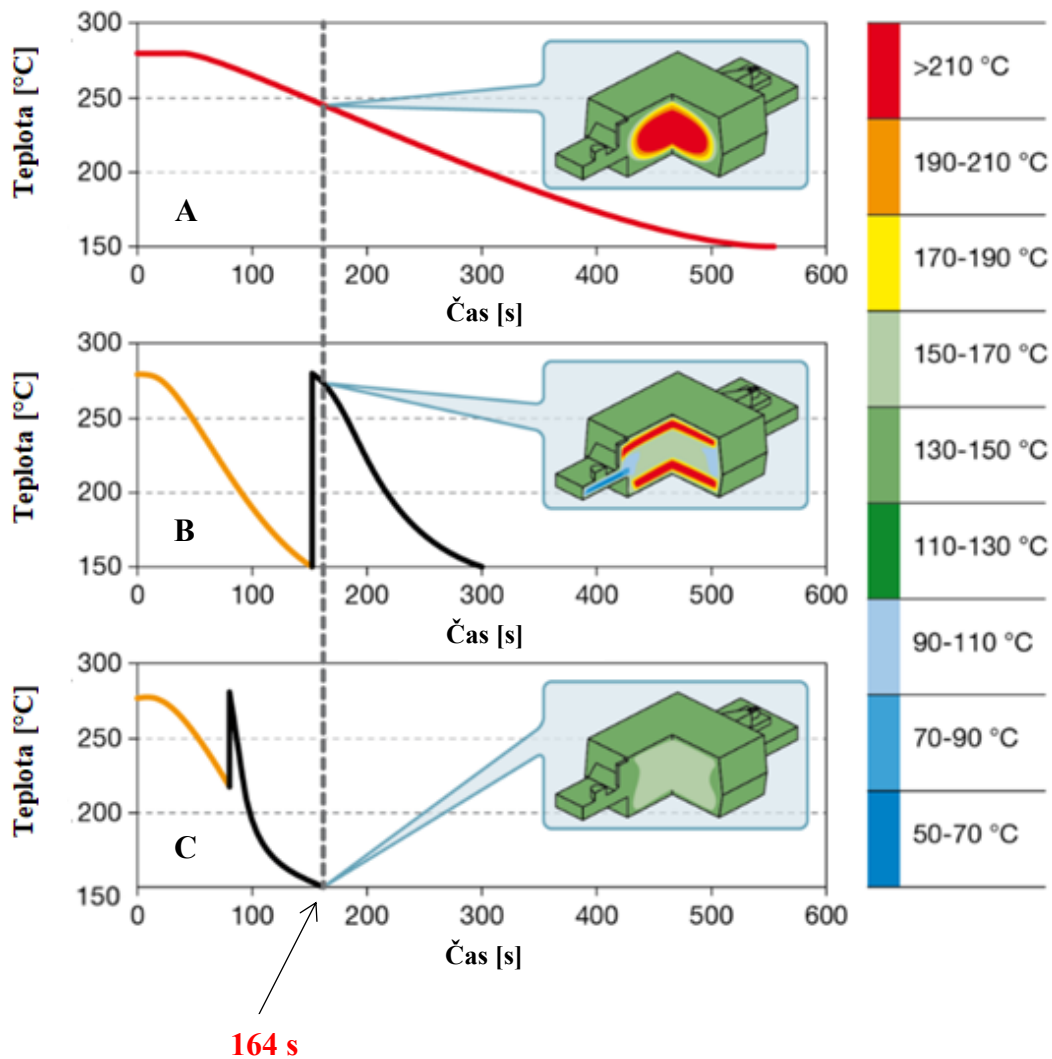


Obr. 7 Časové znázornění chlazení ve formě a chlazení mimo formu [22]

3.1.2 Experiment vícevrstvého vstříkování

Společnost Bayer MaterialScience AG sídlem v Leverkusenu v Německu provedla experiment vícevrstvého vstříkování, který spočíval ve vstříkování vzorku z polykarbonátu obdélníkového průřezu. Rozměry vzorku činí – šířka 40 mm, délka 38 mm, výška 20 mm. Prováděly se tři metody vstříkování. Nejdříve vstříkování jednovrstvé (celý vzorek byl zhotoven najednou), poté je vzorek vstříknut metodou třívrstvého sendviče s chlazením ve formě a poslední pokus představuje opět metodu třívrstvého sendviče s chlazením externím. [22]

V případě třívrstvého sendviče s chlazením ve formě je tloušťka předstříku 12 mm a nastříknuté vrstvy mají tloušťku 4 mm. U varianty s externím chlazením má předstřík tloušťku 12,8 mm a nastříknuté vrstvy 3,6 mm. [22]



Obr. 8 Závislost teploty na čase pro tři varianty vstřikování vzorku [22]

Na obrázku (Obr. 8) lze vidět závislosti teploty vstřikovaného vzorku na čase pro jednotlivé metody vstřikování tohoto vzorku. V tomto experimentu se předpokládá, že pro odformování musí být všechny oblasti vzorku ochlazený na teplotu ležící pod teplotou skelného přechodu, což je pod 150 °C. V případě A, kdy je vzorek vstříknut najednou, bylo dosaženo vyhazovací teploty po více jak 500 s. V druhém případě, tedy v případě B (sendvičová struktura s chlazením ve formě), byla doba ochlazování snížena téměř na polovinu oproti případu A. Doba ochlazování zde činí cca 300 s. V případě C, kdy je opět vzorek vstříknut pomocí technologie vícevrstvého vstřikování, ale v tomto případě ochlazování probíhá mimo formu, bylo dosaženo teploty pro odformování po 164 s. Hodnota těchto 164 s slouží zároveň jako srovnávací hodnota pro předchozí dva případy vstřikování vzorků, na základě které lze zjistit, v jakém stavu se vzorek nacházel.

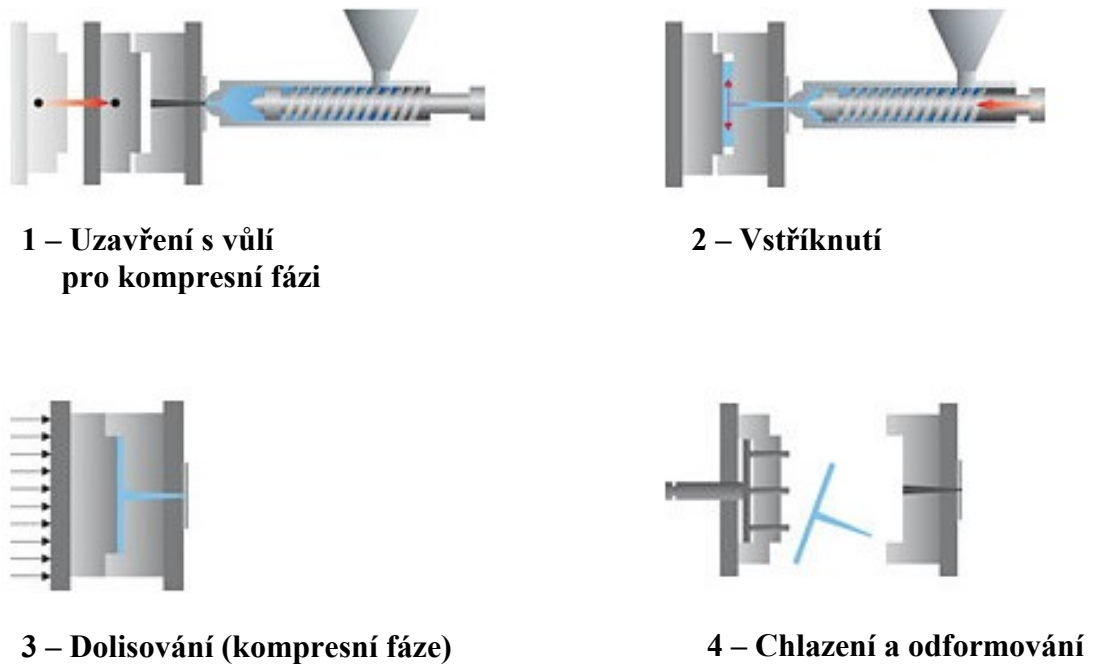
V případě A v tomto čase dosahovala hodnota teploty jádra vzorku stále více jak 210 °C. V případě B byly v tomto čase provedeny nástřiky vrchních vrstev, jejichž teplota také dosahovala hodnoty více jak 210 °C. [22]

3.2 Vstřikování s dolisováním

Technologie vstřikování s dolisováním, také označována jako technika kompresního vstřikování vychází ze zkratky ICM (Injection Compression Molding). Jedná se o způsob, při kterém dochází ke kombinaci technologie vstřikování a lisování, využívají se zde tedy výhody obou těchto technologií. Jako u klasického vstřikování, tak i u vstřikování s dolisováním se používá klasický vstřikovací stroj. Následně se provádí vstřikování. Rozdíl oproti klasické metodě je ten, že vstřikování se provádí do pootevřené formy. Následuje komprese, tedy uzavření formy, čímž dojde ke stlačení taveniny a rovnoměrnému vyplnění dutiny formy. Velikost zmíněného pootevření formy (Initial Injection Height) je definována jako velikost mezery mezi oběma polovinami vstřikovací formy. [16, 12]

Kompresní stupeň, tedy uzavření formy nahrazuje dotlakovou fázi. Tlak, který je vyvíjen během kompresního stupně je výrazně nižší než tlak v dotlakové fázi klasického vstřikování. Tímto způsobem vstřikování dosáhneme menších reziduálních napětí v součásti. S reziduálním napětím souvisí orientace řetězců molekul. Čím nižší je reziduální napětí, tím menší je orientace řetězců molekul. Orientace molekul zase ovlivňuje mechanické a optické vlastnosti výstřiku a také různá smrštění ve směru kolmém a ve směru toku taveniny. S rostoucí orientací řetězců molekul se kvalita výstřiku zhoršuje. Dále se díky této metodě snižuje dvojlom. [6, 24]

Vstřikování s dolisováním se uplatňuje především při výrobě tenkostěnných dílů s dlouhou dráhou toku taveniny k dosažení vysoké rozměrové a vzhledové kvality. Typickým příkladem uplatnění této technologie je výroba CD, DVD, membrány pro mikrofony, displeje apod. Společnost Arburg využívá vstřikování s dolisováním i pro silnostěnné součásti, které se vyznačují nízkým pnutím a současně vysokou přesností obrysů. [17]



Obr. 9 Cyklus vstřikování s dolisováním [26]

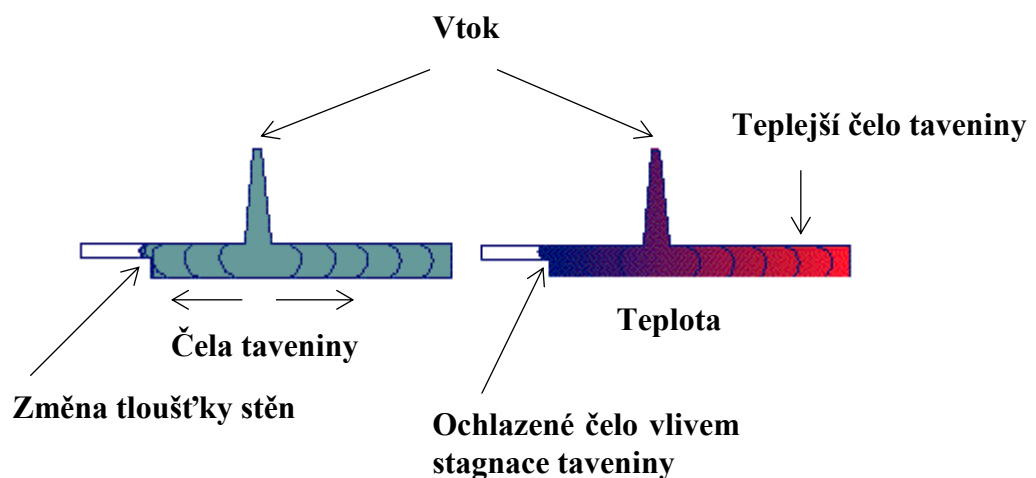
Na obrázku (Obr. 9) jsou zjednodušeně zobrazeny kroky vstřikovacího procesu s dolisováním. V prvním kroku dojde k uzavření formy s vůlí pro kompresní fázi. Obě poloviny formy v této části cyklu na sebe nedosedají. Mezi tyto dvě poloviny formy, mezi kterými je stále vůle, se provede vstříknutí polymerní taveniny. Následuje dolisování, tedy kompresní fáze, při které obě poloviny vstřikovací formy na sebe dosednou, a polymerní tavenina zcela vyplní dutinu formy. Poslední krok tohoto cyklu představuje chlazení a odformování hotového výrobku. [26]

Při kompresním vstřikování je také odlišný tok taveniny. Jak již bylo výše zmíněno, pro klasickou metodu vstřikování je charakteristický fontánový tok taveniny. Avšak u metody vstřikování s následným dolisováním vzniká vlivem komprese tok taveniny, který je biaxiálně orientovaný. [12]

Metodu kompresního vstřikování lze provádět různými technologickými postupy, podle kterých můžeme tento typ vstřikování rozdělit do následujících kategorií [12]:

- Dvoustupňové sekvenční ICM.
- Simultánní (současné) ICM.
- Selektivní ICM.

Dvoustupňové sekvenční ICM spočívá ve vstříknutí taveniny do pootevřené dutiny formy s následnou kompresní fází. Potenciální nevýhody při této metodě ICM jsou zpomalení toků taveniny – stagnace toku, vlivem nestejných tloušťek stěn (hesitation effect), což může dále způsobovat uzavírání vzduchu ve stěně, v extrémním případě až zamrznutí toku ve stěně dílu. Předejít vzniku těmto zmíněným vadám lze uplatněním simultánní metody ICM. Jedná se o modifikovanou metodu, pro kterou je charakteristické vstříkování se současným uzavíráním formy. Další metoda ICM technologie, která eliminuje tyto vady je selektivní ICM. U této metody dochází ke kompresnímu působení pouze v určitém místě na výrobku. [12]



Obr. 10 Stagnace toku vlivem nestejných tloušťek stěn [27]

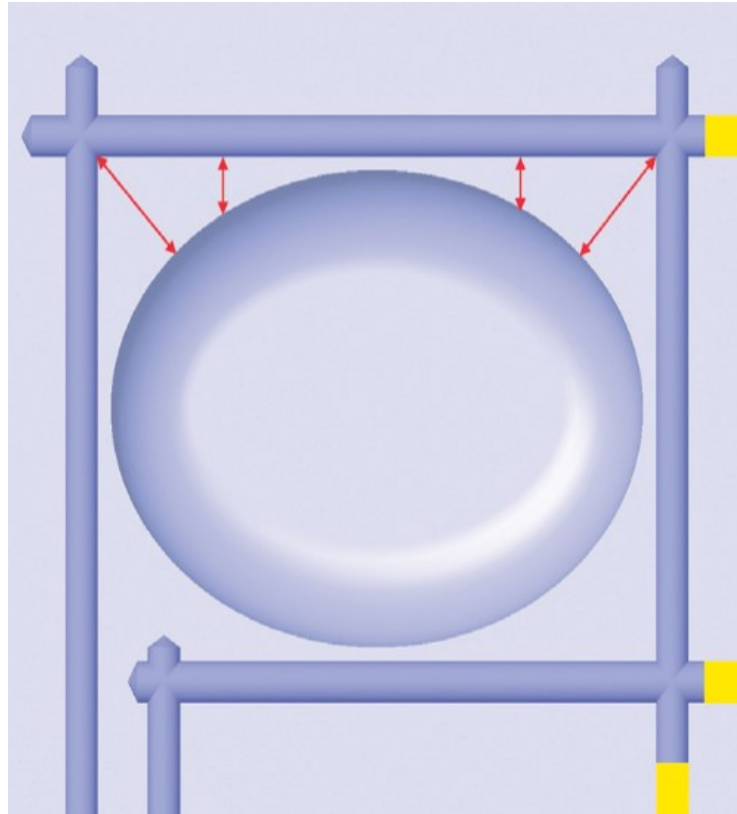
3.3 Způsoby temperace

Chladicí systém má významný vliv na ekonomiku a správnou funkčnost navržené vstříkovací formy. Jedná se o jeden z nejdůležitějších systémů, co se týká vstříkovacích forem. Správně navržený chladicí systém může zabránit vzniku několika typům vad. Na druhé straně mají nesprávně navržené temperační systémy často dva negativní účinky. Za prvé je doba cyklu příliš dlouhá, což má velmi špatný vliv na ekonomiku a za druhé jsou uvnitř formy značné teplotní rozdíly což má za následek rozdílné smrštění a deformace výstřiků. [8]

3.3.1 Konvenční způsoby temperace

Konvenční způsoby temperace jsou realizovány pomocí chladicích kanálů, spirál, přepážek nebo teplených trubíc. Kanály jsou zhotoveny konvenčními způsoby obrábění, jako je vrtání a frézování. Jednou z největších výhod tohoto typu temperace je jeho jednoduchost a

náklady na výrobu. Nevýhodou kanálů vyrobených konvenčními technologiemi je nemožnost sledovat zakřivenou dutinu formy. Příklad temperačního okruhu zhotoveného konvenčními způsoby, je uveden na obrázku (Obr. 11). [9, 28]



Obr. 11 Temperační kanály zhotovené konvenčními způsoby obrábění [28]

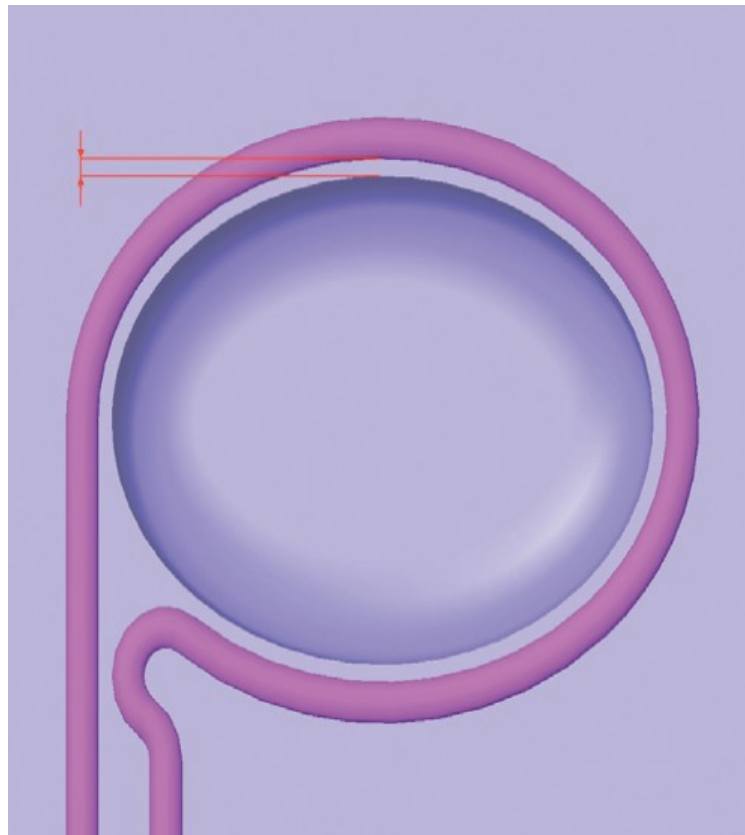
3.3.2 Konformní způsoby temperace

Konformní chlazení forem nabízí zcela nové možnosti temperování forem, kterých nebylo možné dosáhnout konvenčním chlazením vyráběným klasickými technologiemi. Lze jej charakterizovat jako temperační systém, který v podstatě kopíruje tvar výrobku. Cílem je dosáhnout velmi rovnoměrného chlazení dutiny formy. Díky tomuto způsobu temperace dochází k výrazným úsporám času jednotlivých cyklů výroby součásti. [9, 29]

Studie ukazují, že konformní chlazení může zkrátit dobu cyklu o 30 % až 60 % oproti konvenčně chlazeným formám, ovšem tato úspora je závislá na geometrii vyráběného dílu. Dále vlivem rovnoměrného chlazení se eliminují deformace dílů. Zkrácením doby cyklu a eliminací deformací poklesnou výrobní náklady, cena výstřiku a zmetkovitost. [9, 28]

Části formy obsahující konformní temperační kanály jsou vyrobeny technologií DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Jedná se o technologii, pomocí které se vyrábí kovové

funkční díly přímo z 3D CAD dat. Jednoduše řečeno, jedná se o 3D tisk kovových dílů. Dochází k nanášení jemných vrstev práškových kovů, kde je materiál roztaven pomocí koncentrovaného paprsku energie, tedy paprskem laseru. Postupným nanášením vrstev dostaneme finální tvar výrobku. Výrobky jsou z hlediska mechanických vlastností srovnatelné s obráběnými díly. [28, 29]



Obr. 12 Konformní temperační kanál zhotovený metodou DMLS [28]

4 SMRŠTĚNÍ, ZPRACOVATELSKÉ OKNO, VADY VSTŘIKOVANÝCH SOUČÁSTÍ

4.1 Smrštění vstřikovaných výrobků

Po vstříknutí polymerní taveniny do dutiny formy následuje ochlazování. Při ochlazování ze zpracovatelské teploty materiál tuhne a s rostoucím časem se přibližuje teplotě okolí, přičemž se objem plastu zmenšuje a hmota smršťuje. Jedná se tedy o objemovou změnu plastového dílu, tedy výrobku, která vznikla vlivem chlazení tohoto výrobku bez současného působení tlaku. Změny objemu lze posoudit buď z hlediska výstřiku jako celku, kde měřítkem těchto celkových změn je hodnota smrštění, která udává, o kolik je rozměr výrobku menší než odpovídající rozměr dutiny formy. Dále je možné posuzovat změny objemu lokálně, tedy pouze podle určitého místa na výrobku, kde vlivem ochlazování došlo ke vzniku propadlin, vnitřních dutiny apod. Smrštění rozdělujeme do dvou skupin [10, 30]:

- Výrobní smrštění.
- Dodatečné smrštění.

Výrobní smrštění – jedná se o smrštění měřené po 24 hodinách od samotného vstříknutí a vyhození výrobku při daných technologických podmínkách. Toto měření však musí být provedeno do 48 hodin od samotného zhotovení výrobku. Výrobek musí být uložen v prostředí, jehož teplota je $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a relativní vlhkost vzduchu by měla být $50\% \pm 5\%$. [30]

Výrobní smrštění rozeznáváme *lineární* a *objemové*. Pro lineární výrobní smrštění platí [7]:

$$S_L = \frac{L_F - L_V}{L_F} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

L_F – rozměr formy při teplotě 23 °C [mm]

L_V – rozměr výstřiku při teplotě 23 °C [mm]

Pro objemové výrobní smrštění podobně platí vztah:

$$S_{VV} = \frac{V_F - V_V}{V_F} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

V_F – objem dutiny formy při teplotě 23 °C [mm³]

V_V – objem výstřiku při teplotě 23 °C [mm³]

Na výrobní smrštění má hlavní význam druh použitého plastu. Uplatňuje se především nadmolekulární struktura plastu. Amorfni termoplasty mají všeobecně menší smrštění než krystalické. Tabulka (Tab. 1) pro porovnání uvádí velikosti výrobních smrštění vybraných termoplastů. [30]

Tab. 1 Výrobní smrštění vybraných termoplastů [30]

Druh termoplastu	Výrobní smrštění [%]
PS, SAN, ABS	0,4 - 0,6
SB	0,4 - 0,9
PMMA	0,2 - 0,7
PC	0,6 - 0,75
PA	1,0 - 2,0
PE-LD	1,5 - 3,0 (4,0)
PE-HD	1,0 - 2,5 (4,0)
PP	1,5 - 3,0
POM	2,0 - 3,5

Dalším faktorem ovlivňující výrobní smrštění je tvar výrobku a tloušťka stěny. Čím tlustší je stěna výrobku, tím větší je smrštění. Vliv tloušťky je nejvíce patrný u krystalických polymerů. Jestliže je větší tloušťka stěny, výrobek déle chladne a stupeň krystalinity je vyšší. [30]

Vliv na smrštění má dále umístění vtoku na výrobku, protože umístění vtoku určuje charakter toku taveniny v dutině formy. Důsledkem orientace makromolekul se setkáme s pojmem anizotropie smrštění. To znamená, že velikosti smrštění jsou v různých směrech jiné. U neplněných plastů je smrštění ve směru toku taveniny větší než ve směru, který je na tok taveniny kolmý. Tento rozdíl ve směru toku a ve směru kolmém na tok taveniny se

u amorfních polymerů může lišit až kolem 10 %. U krystalických činí tento rozdíl až 30 %. [30]

Dále závisí hodnota výrobního smrštění na technologických podmínkách. Z nich mají největší vliv na smrštění vstřikovací tlak a velikost a doba trvání dotlaku. Zvýšením tlaku a dotlaku a prodloužením dotlakové fáze se dá výrazně zmenšit výrobní smrštění. Vliv teploty taveniny zde není úplně jednoznačný. Pokud by došlo pouze ke zvýšení teploty a vnitřní vstřikovací tlak by byl konstantní, potom by mělo zvýšení teploty za následek zvětšení smrštění. Většinou teplota taveniny je v interakci se vstřikovacím tlakem, a jestliže je vnější vstřikovací tlak konstantní, je zvýšení teploty polymerní taveniny provázáno zvýšením tlaku v dutině formy. Jestliže zvyšujeme teplotu formy, pak se zvětšuje i smrštění. Tento vliv je u amorfních termoplastů malý, u krystalických je tento vliv značný. [30]

Dodatečné smrštění – Po uplynutí 24 hodin nejsou rozměry výstřiku úplně stabilizované. Stále pokračují změny vnitřního stavu výstřiku, což je uvolňování vnitřních napětí, dílčí dezorientace makromolekul nebo sekundární krystalizace, se projevují dodatečnými změnami rozměrů, tedy dodatečné smrštění. Dodatečné smrštění je závislé na teplotě, kterým je výstřik vystaven. A také na době působení. Čím vyšší je teplota, tím změny probíhají rychleji. [30]

Smrštění dodatečné je pouze jedna ze změn rozměrů, kterým výrobek při používání podléhá. K dalším rozměrovým změnám dochází důsledkem měnící se teploty okolí. S rostoucí teplotou se rozměry výrobku zvětšují, při nižších teplotách se zmenšují. Oproti ocelím mají plasty součinitel teplotní roztažnosti asi desetkrát větší, jsou rozměrové změny u plastů daleko výraznější. Změny rozměrů kolísáním teploty jsou vratné. [30]

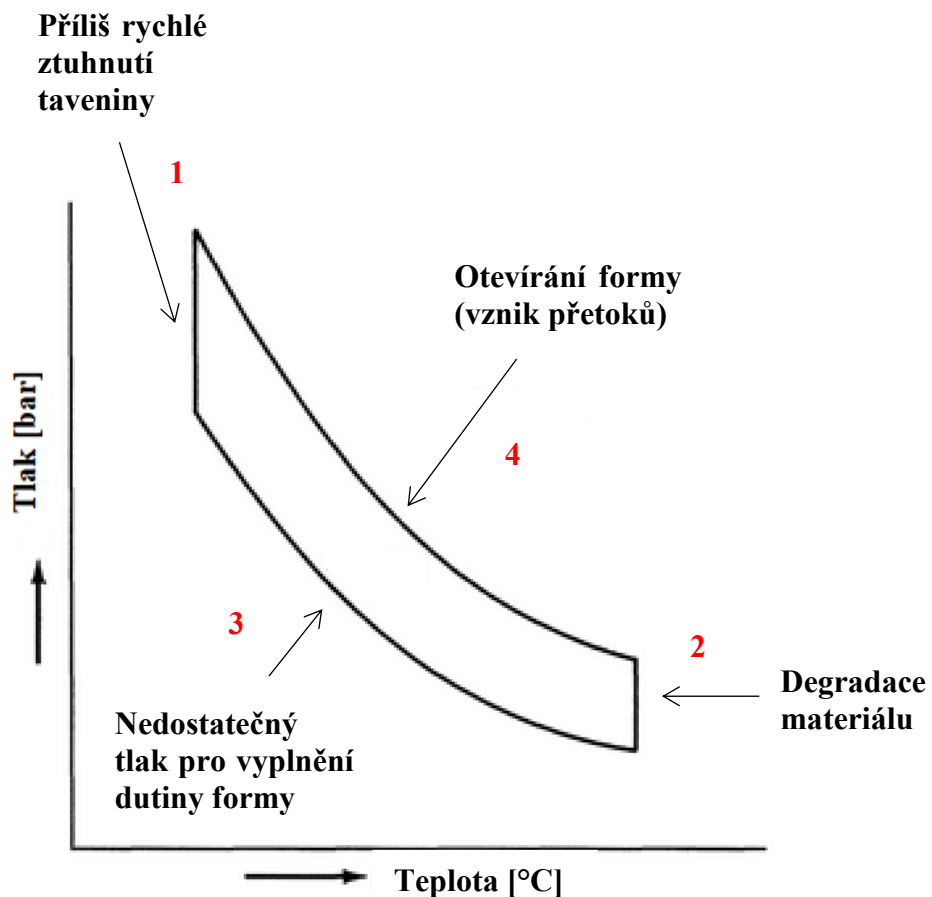
Dalším vlivem, který souvisí se změnou rozměrů je navlhavost. Navlhání se opět projevuje se zvětšováním rozměrů výstřiku. Opakem je vysychání, čímž dochází ke zmenšování rozměrů. [30]

Plnění dutin při výrobě tlustostěnných prvků je snadnější a nevyžaduje tak velký vstřikovací tlak, ale smrštění materiálu je zde mnohem větší než při výrobě výstřiků s tenkými stěnami. Vyžaduje se vhodné nastavení nejen samotného tlaku, ale také dotlakové fáze ke kompenzaci smrštění a zabránění vzniku propadlin a dalších vad. Vyžadují se větší vtoková ústí, protože v případě předčasného zatuhnutí vtokových ústí

menších rozměrů by nedocházelo k doplňování taveniny do dutiny formy při dotlakové fázi. [11]

4.2 Zpracovatelské okno (MAD)

Při technologii vstřikování se setkáváme s pojmem zpracovatelské okno. Tento pojem vychází z anglického názvu Molding Area Diagram (MAD). Na obrázku (Obr. 13) je zobrazena závislost tlaku na teplotě. Určité hodnoty těchto procesních parametrů a jejich kombinace vymezují prostor, který právě představuje zmíněné zpracovatelské okno. Tento vymezený prostor slouží pro výrobu přijatelných nebo optimálních výrobků technologií vstřikování plastů. Tvar a velikost zpracovatelského okna se může lišit v závislosti na druhu používaného materiálu, konstrukci samotného výrobku a použitým vstřikovacím zařízením. [19]



Obr. 13 Zpracovatelské okno, závislost tlaku na teplotě

Dále jsou na obrázku (Obr. 13) znázorněny situace, které nastanou v případě nastavení procesních podmínek ležících mimo zpracovatelské okno. Prvním takovým případem je

příliš rychlé ztuhnutí polymerní taveniny, protože teplota byla nastavena na nízkou hodnotu a tavenina zatuhne ještě dříve, než vyplní tvarovou dutinu formy. Opakem této situace je situace 2. Při překročení vstřikovací teploty dochází vlivem přehřátí polymerní taveniny k její degradaci, což má za následek opět výrobu vadných dílů. Třetí případ poukazuje na nedostatečný vstřikovací tlak. V případě že vstřikovací tlak je nízký a neleží ve zpracovatelském okně, dochází opět ke vzniku zmetků, protože vyplnění tvarové dutiny formy by nebylo úplné. Opakem nízkého vstřikovacího tlaku je příliš velký vstřikovací tlak. Tento případ představuje čtvrtou variantu v grafu. Důsledkem tohoto vysokého tlaku, dojde k pootevření vstřikovací formy v dělicí rovině, což způsobí vznik přetoků. [34]

4.3 Vady vstřikovaných výrobků

Vady výstřiků z termoplastů lze definovat jako defekt, kterým se daný výstřik odlišuje od předem dohodnutého normálu. Tyto neshody se mohou týkat zejména vzhledu povrchu, tvarů a rozměrů popřípadě fyzikálně-mechanických vlastností výstřiku. Za všemi těmito vadami stojí vždy nějaká příčina, kterou není možné vždy rychle rozpoznat a analyzovat. Největším cílem analýzy vad je zjištění příčiny výskytu určité chyby. Známe-li povahu této vady, je jednodušší provést a trvale udržovat vhodná opatření k jejímu odstranění. [7]

Při zavádění nových vstřikovacích forem do výroby se mohou vyskytnout i vady, které není možno odstranit ani kombinací technologických parametrů. Většinou se jedná o konstrukční chyby výstřiků nebo konstrukční a výrobní vady forem. [7]

4.3.1 Základní rozdělení vad

Vady, které mohou při technologii vstřikování vzniknout, lze rozdělit do dvou základních skupin. Na vady zjevné a vady skryté. [7]

Zjevné vady jsou takové, které je možné identifikovat vizuálním porovnáním se schváleným referenčním výstřikem. Tyto vady lze dále rozdělit. [7]

- Vady tvaru – nedotečené díly, propadliny, vrásnění, zvlnění, zborcení, deformace, přetoky, otřepy, rozměrové vady.
- Vady povrchu – nedostatečný lesk, matná místa, opalescence, povrchové zakalení, stříbření, stopy monomeru, stopy po vlhkosti, neokopírovaný dezén, povrch tzv. pomerančové kůry, tokové čáry, vrstvení, delaminace, žloutnutí až hnědnutí, změna barvy u barevných materiálů, černé tečky, spálená místa.

Skryté vady představují vady, které obvykle nezjistíme vizuální kontrolou, ale mají vliv na výsledné vlastnosti výstřiku. Mezi skryté vady je možno zařadit vady následující. [7]

- Vnitřní pnutí.
- Studené spoje.
- Vakuové bubliny a lunkry v průřezu výstřiku.
- Uzavřený vzduch (bubliny) nebo plyny v průřezu výstřiku.
- Anizotropie fyzikálně-mechanických vlastností.

Kromě vad výstřiků se mohou objevit i vady vlastního vstřikovacího procesu nebo vady formy, které mají přímý vliv na vady výstřiků. Zde můžeme zařadit například netěsnost zpětného uzávěru šneku, samovolné vytékání taveniny z trysky při odjezdu plastikační jednotky od formy, špatný dosed trysky stroje na vtokovou vložku formy, zůstávání výstřiku na pevné části formy, deformace výstřiku při jeho vyhazování, odvzdušnění formy atd. [7]

4.3.2 Vady a jejich příčiny

Přestřiky, přetoky, otřepy – důvodem vzniku těchto vad je příliš vysoký ITT (nízká viskozita) materiálu, vysoký vstřikovací tlak a rychlost, a také příliš vysoká teplota formy a teplota taveniny. Dále nízká uzavírací síly vstřikovacího stroje nebo nedokonalé uzavírání formy vlivem nepřesnosti v dělicí rovině. Znečištění, opotřebení, poškození dělicích rovin a lícovaných dílů. Předimenzované odvzdušnění. [7]

Nedotečení, neúplné výstřiky – příliš nízký ITT (vysoká viskozita) materiálu. Dále za tyto vady může nízký vstřikovací tlak, dotlak, teplota taveniny a teplota formy, nízká vstřikovací rychlost, malá plastikační dávka a nedostatečný polštář, špatné nastavení přepnutí na dotlak. Dalším důvodem může být, že zpětný uzávěr šneku netěsní. Plastikační výkon nestačí. Špatně navrhnutý výrobek – tloušťka stěny je nevhodně zvolena pro daný typ polymeru. [7]

Propadliny, staženiny, lunkry, zvlnění povrchu - zde je příčinou vzniku těchto vad opět příliš nízký ITT, tedy vysoká viskozita. Dále je příčinou nízký vstřikovací tlak, dotlak, krátká doba dotlaku, nízká vstřikovací rychlost, nízká teplota taveniny a teplota formy, příliš malá dávka a polštář. Opět i s touto vadou souvisí špatné přepnutí na dotlak. Dalším důvod je předčasné zatuhnutí taveniny v trysce, příliš dlouhé tokové kanály k dutinám

formy, nepravidelné rozložení teploty tvarové dutiny a v neposlední řadě za tímto problémem stojí špatně navržený výrobek. [7]

Studené spoje – ke studenému spoji může dojít z několika důvodů. Jedním z nich je nehomogenita vstřikovaného materiálu (rozdílná tekutost). Dalšími příčinami jsou nízká teplota taveniny a formy, příliš nízká vstřikovací rychlost. Nevhodná poloha ústí vtoku a nevhodná vtoková soustava jsou další příčinou. Studené spoje mohou vzniknout i nedostatečným odvzdušněním v místě styku dvou nebo více proudů taveniny. [7]

Dieslův efekt – neboli místní spálení materiálu v důsledku komprese vzduchu. Podíl na vznik tohoto defektu má příliš nízká viskozita taveniny, vysoká vstřikovací rychlost, vysoká teplota taveniny a formy. Dále velká dekomprese po plastikaci, nevhodná konstrukce a poloha vtoku, nedostatečné odvzdušnění. [7]

Šmouhy, změna barvy - za těmito vadami stojí termicky nestabilní materiál nebo jeho aditiva. Znečištěný materiál nebo nerovnoměrné rozdělení barevného koncentrátu. Příčinou může být příliš vysoká teplota taveniny a vysoká vstřikovací rychlost. Dlouhá doba prodlevy taveniny v komoře, opotřebovaná plastikační jednotka nebo špatná konstrukce ústí vtoku způsobující přehřátí taveniny. [7]

Tmavé body na povrchu výstřiku – zde je příčinou znečištění granulátu, příliš vysoký odpor šneku, který vyvolá „strhávání“ nečistot z mrtvých koutů, znečištěná (zkorodovaná) vtoková soustava a tvarová dutina formy. [7]

Stopy vlhkosti - příčinou je nevhodné skladování granulátu (v chladu, vlhku apod.) s následným nedostatečným vysušením. [7]

Tvorba drobných bublinek (vzduch, plynné produkty) – důvodem vzniku je vysoká zbytková vlhkost v granulátu. Dále vysoký obsah vlhkosti v tavenině, malá tepelná stabilita materiálu nebo aditiv. Tvorba těchto defektů souvisí také s příliš vysokou teplotou taveniny a vysokou vstřikovací rychlostí. Bublinky mohou způsobit i malé rozměry odvzdušňovacích kanálek, mrtvé kouty a netěsnosti ve vstřikovací jednotce. [7]

Rozdíl lesku na povrchu výstřiku – důvodem těchto vad je vlhký či znečištěný materiál, teplotní nehomogenita taveniny, nerovnoměrná teplota formy a nevhodná vstřikovací rychlost a dotlaková fáze. Dalším iniciátorem vzniku je nedokonalý povrch dutiny vstřikovací formy, nedokonalé odvzdušnění formy, nevhodně navržené vtokové ústí. Také ostré změny průřezu vyvolávají značné změny průtoku taveniny, což také může ovlivnit kvalitu povrchu vstřikovaného výrobku. [7]

Opalescence, stříbření, mikrotrhliny, napět'ové trhlinky – příčinou vzniku těchto vad je materiál obsahující málo vnitřního maziva, vlhkost materiálu a také velký podíl regenerátu (více než 50%). Tyto vady způsobuje i příliš vysoké tepelné zatížení materiálu a to zejména vysoká teplota taveniny, vysoké otáčky šneku, velký odpor šneku a vysoká vstřikovací rychlost. Dále zde můžeme zahrnout dlouhou prodlevu materiálu v plastikační jednotce, malý průměr trysky nebo také špatná funkce (regulace) horkých rozvodů a trysek. [7]

Tokové čáry, studené tokové linie – mezi příčiny patří opět nízký ITT pro danou tloušťku a délku toku, vlhký a znečištěný materiál. Příčinou vzniku je dále pomalý objemový proud taveniny, jehož teplota je příliš nízká a také teplota formy je nízká. Poslední z příčin může být nevhodná volba vtokového ústí. [7]

Jemně rýhovaný až pórovitý povrch – za zhoršení kvality povrchu stojí příliš vysoký odpor při plnění tvarové dutiny, vyvolaný nízkou teplotou taveniny a formy a nízkou vstřikovací rychlostí. Malý mísicí účinek při plastikaci je další příčinou rovněž jako nevhodná vtoková soustava a nevhodný temperační systém. [7]

Stopy po studené tavenině, delaminace – příčinou je znečištěný materiál jinými nemísitelnými plasty, nízká teplota trysky, taveniny a formy. Další příčinou je nedostatečná plastikace, malý průměr trysky či nevhodně volený tvar výstřiků. [7]

Stopy po vyhazovačích - jsou způsobeny vyhozením výstřiku, který má ještě příliš vysokou teplotu nebo nevhodným navržením jednotlivých vyhazovačů. [7]

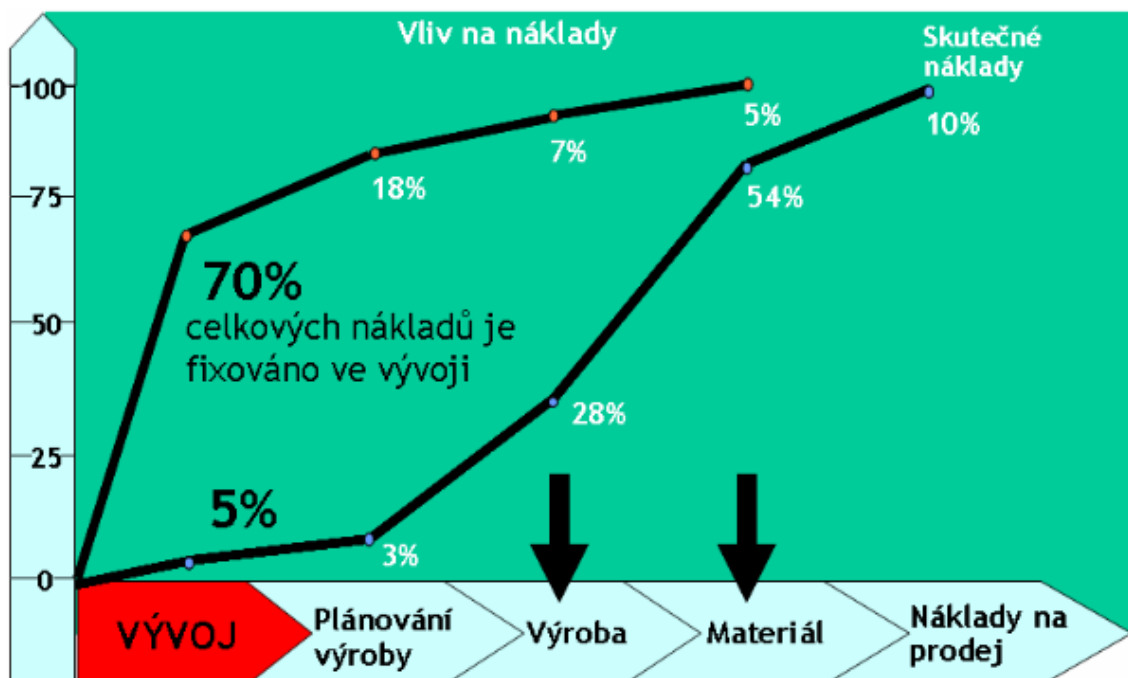
Deformace výstřiků při vyhazování z formy – k deformaci může docházet vlivem působení vyhazovačů, kdy je dutina formy přeplněna materiálem, čímž je odformování obtížnější. Přeplněná forma je způsobena špatným nastavením přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak. Dále jsou deformace způsobeny při brzkém vyhazování. Podkoso a špatně navržená dutina formy stojí také za vznikem deformací. To samé platí i pro konstrukci výrovku. Rozdíly v tloušťce stěn způsobují opět deformace vlivem rozdílného smrštění. [7]

5 ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ V MOLDFLOW

5.1 Podstata stádia vývoje

Při navrhování nových výrobků metodou vstřikování se uplatňují hlavně zkušenosti designéra a konstruktéra forem. Jak byl tento návrh úspěšný, se ukáže až po výrobě vstřikovací formy a provedení zkušebních výstřiků. Dále záleží na samotném nastavení procesních podmínek, což je opět dáno zkušenostmi technologa. [32]

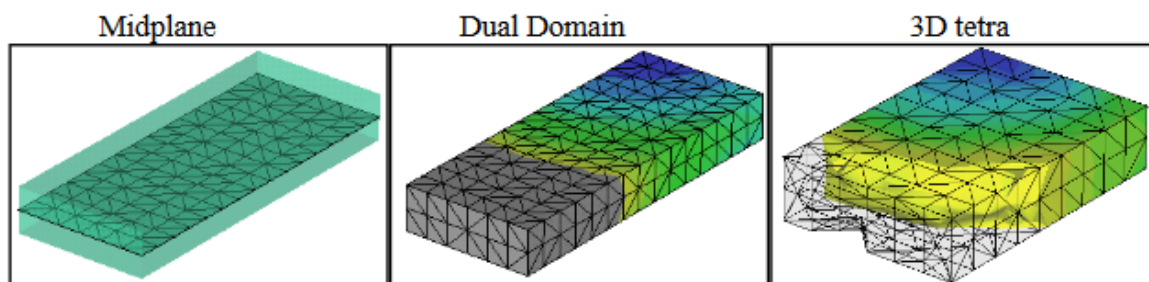
Cena vstřikovaného dílu se odvíjí hlavně od ceny vstřikovací formy, plastu, hmotnosti výstřiku včetně vtoků a od délky vstřikovacího cyklu. Výše těchto cen jsou ovlivněny ve fázi designu plastového výrobku, konstrukce formy a nastavením procesních podmínek vstřikování. Ve vývoji je fixováno až 70 % celkových nákladů na výrobu, přičemž fáze vývoje představuje asi 5 % výrobních nákladů. Tento významný fakt je důvodem, proč věnovat vývojové fázi velkou pozornost. S částkou, která odpovídá výrobním nákladům, tedy těch 5%, můžeme ušetřit desítky procent celkových výrobních nákladů. Pro snižování výrobních nákladů v odvětví konstrukce vstřikovacích forem slouží právě také nástroj zvaný Moldflow od společnosti Autodesk. [32]



Obr. 14 Vliv vývoje na celkové náklady a vliv jednotlivých etap na růst nákladů [32]

5.2 Simulační program Autodesk Moldflow Synergy

Jedná se o nástroj pro hloubkovou analýzu procesu vstřikování. Tento software poskytuje bezkonkurenční generování a editaci konečně prvkové sítě a množství řešičů. Lze generovat tři typy sítě. Síť střednicové plochy (Midplane), síť Dual Domain a síť objemovou s využitím prvků TETRA 4 i TETRA 10. Tyto typy sítě jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 15). [32]



Obr. 15 Konečně prvkové sítě Midplane, Dual Domain, 3D tetra [32]

Výpočtové moduly jsou určeny pro komplexní analýzu vstřikovacího procesu včetně optimalizace DOE (Design of Experiment), dále moduly pro dvoukomponentní vstřikování, zástřiky, vstřikování se systémem Dynamic Feed, technologii GIT a vstřikování termosetů. Obsahuje databázi polymerních materiálů, ve které je uvedeno asi 8000 typů termoplastů včetně hodnot pro technologické podmínky, dále jsou zde uvedeny reologické vlastnosti, PVT vlastnosti, teplotní data, mechanická data a hodnoty smrštění, které slouží pro optimalizaci designu dílu, nástroje a výroby. [32]

5.2.1 Simulační možnosti softwaru

Simulace polohy vtoku (Gate Location) – jedná se o velmi rychlou analýzu, jejímž cílem je na výrobku znázornit co nejvhodnější místa pro umístění vtokového ústí. Zároveň tato analýza zobrazuje místa, která kladou největší odpor vůči toku taveniny. [33]

Simulace plnění dutiny formy (Fill) – slouží k predikci toku a plnění dutiny formy polymerní taveninou. Na základě těchto simulací můžeme zajistit, aby dutina formy byla plněna rovnoměrně, díky čemuž je možno vyhnout se zmetkovitosti. Díky simulaci plnění se můžeme vyhnout vzniku vad nebo alespoň tyto vady co nejvíce eliminovat, mezi které patří vznik studených spojů, vznik vzduchových kapes vlivem špatného odvodu vzduchu apod. [33]

V prostředí tohoto programu lze navrhnout rozmanité tvary vtokových kanálů včetně příčných parametrů pro dosažení co nejrovnoměrnějšího toku a plnění dutiny formy. Dále je možné navrhnout vtokový kanál studený, vyhřívaný anebo použít jejich kombinaci. Dále je možno provést vyvážení vtokového systému, abychom docílili současného plnění dutiny. [33]

Simulace dotlaku (Pack) – pomocí simulace dotlaku je možno určit nejideálnější okamžik, kdy dojde k přepnutí z plnění na dotlak. Dále lze nastavit délku dotlakové fáze a samotnou hodnotu dotlaku. Díky správnému nastavení dotlakové fáze můžeme předejít vzniku nežádoucích vad a eliminovat velikost výrobního smrštění na co nejmenší hodnoty. [33]

Simulace chlazení (Cool) – podává informace o navrženém temperačním systému. Na základě jeho tvaru a použití temperačního média vyhodnocuje účinnost odvodu tepla, teplotní spád temperačního média včetně jeho dalších vlastností jakož jsou tlak, Reynoldsovo číslo apod. Na základě výsledků této simulace lze temperační systém upravit tak, aby chlazení bylo co nejefektivnější a rovnoměrné. Teplota má vliv na rozměrovou stabilitu, kvalitu povrchu a snižuje riziko vzniku deformací. [33]

Opět je i zde možno navrhnout libovolný temperační systém, skládající se z libovolného počtu okruhů obsahující přepážky a různé prvky související s teplotou. Volitelné jsou i rozměry temperačních kanálů včetně použitého média, jehož parametry jsou také volitelné. [33]

Simulace deformace a smrštění (Warp) – Během vstřikování a následném ochlazení materiálu vznikají v součásti různá napětí, při nichž má výrobek tendenci se deformovat. Tato simulace nám pomáhá odhalovat místa výskytu deformací na výrobku, která je možno na základě této analýzy upravit. Změny velikosti deformace docílíme vhodnou úpravou teploty, úpravami samotného výrobku a správnou volbou procesních parametrů popřípadě volbou materiálu. [33]

Stejná predikce jako platí pro deformaci, platí i pro smrštění. Simulace odhaluje charakter a velikost smrštění součásti, které může být eliminováno na minimální hodnoty správným nastavením procesních podmínek, vhodnou volbou materiálu apod. [33]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

V diplomové práci byly stanoveny následující cíle:

- Vypracovat literární studii pro dané téma.
- Provést 3D konstrukci modelu optického tlustostěnného prvku.
- Navrhnout konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl.
- Nakreslit 2D řez vstřikovací formou spolu s výkresy a kusovníkem.
- Provést analýzu procesu vstřikování a optimalizaci zadaného dílu.

Jedním z nejdůležitějších bodů při vypracování praktické části je bod, který se týká analýzy procesu vstřikování a optimalizace. V této kapitole je prováděna analýza různých způsobů výroby tlustostěnných optických prvků technologií vstřikování. Analyzovány jsou různé vtokové systémy, temperační systémy a je prováděna optimalizace procesních parametrů tak, aby výsledky byly co nejpříznivější. Dále jsou tyto procesy vstřikování analyzovány z pohledu vybraných druhů materiálů. Na základě těchto analýz je pro tu neoptimálnější navrhnutá vstřikovací forma podložena výkresovou dokumentací.

7 POUŽITÉ SFOTWARY

Pro vypracování praktické části diplomové práce byly použity tyto softwary:

Autodesk Inventor Professional 2019 – CAD aplikace, která obsahuje funkce pro adaptivní a parametrické 3D navrhování, tvorbu 2D výkresové dokumentace, prezentace, fotorealistické vizualizace a animace a další funkce. Tento program je použit pro konstrukci tlustostěnného optického prvku a dále pro návrh trajektorií vtokových a temperačních systémů pro tokové analýzy.

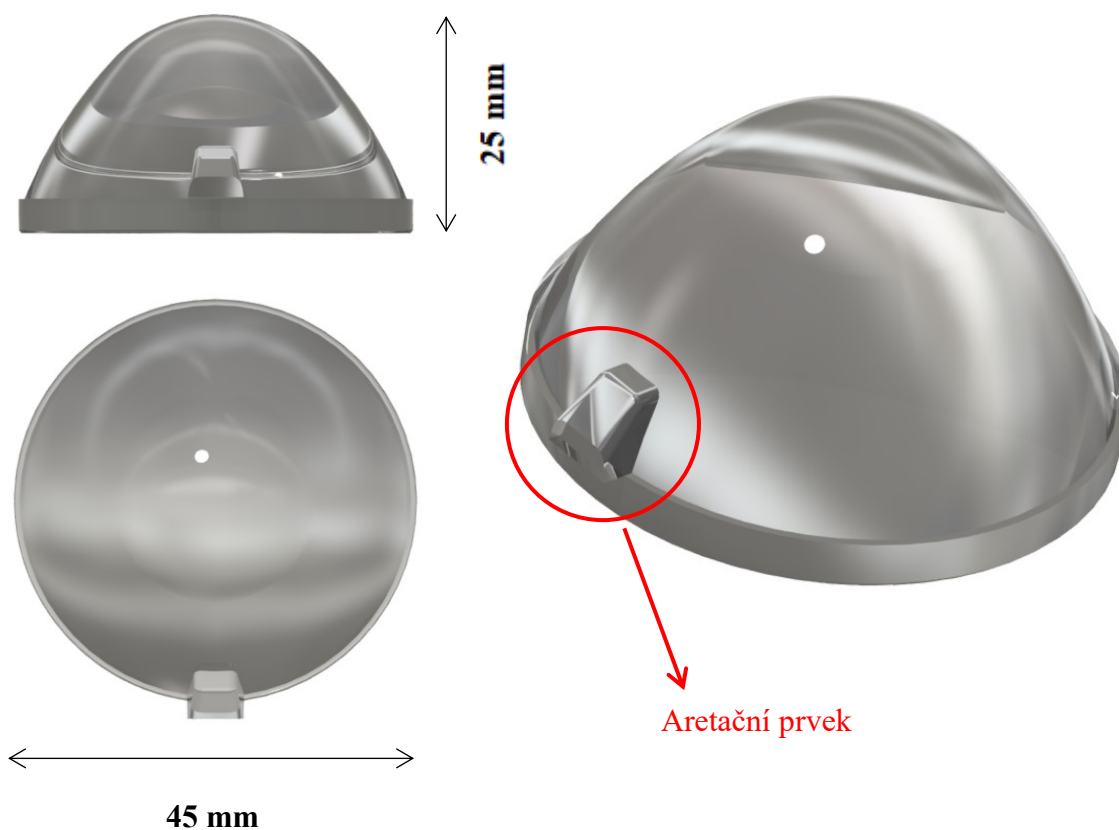
Autodesk Moldflow Synergy 2016 – CAE aplikace sloužící jako simulační software pro oblast vstřikování plastů. Poskytuje nástroje, které pomáhají výrobcům predikovat, vyhodnotit a optimalizovat technologický design plastových dílů a vstřikovacích forem. Tento program je tedy použit pro analyzování procesu při vstřikování zadaného tlustostěnného optického prvku.

Catia V5R19 – moderní 3D software dodávaný společností Dassault Systemes. Je k dispozici v několika variantách určených pro různé úrovně využívání CAD, CAM a CAE technologií. Prostředí tohoto programu umožňuje samotný návrh, konstrukci, simulaci či optimalizaci a tvorbu výkresové dokumentace vyvíjených součástí. Využití softwaru v této diplomové práci je především pro návrh a konstrukci vstřikovací formy.

HASCO DAKO modul – jedná se o databázi obsahující normalizované díly pro konstrukci vstřikovacích forem. Tato aplikace také umožňuje importování těchto normalizovaných dílů do prostředí CAD softwarů.

8 VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK

Vstřikovaným výrobkem je tlustostěnný optický prvek, tedy čočka používaná v automobilovém průmyslu. Čočka má za úkol usměrňovat světelný paprsek do požadovaného tvaru a v požadovaném směru, tudíž jsou při vstřikování těchto čoček kladeny vysoké nároky na jejich kvalitu. Vstřikovaná čočka musí odpovídat jak rozměrovým a tvarovým požadavkům tak také vzhledovým požadavkům. Při vstřikování čoček je dále nezbytné vyvarovat se vadám, které mohou zhoršit nebo znemožnit průchod světelného paprsku. Základní rozměry výrobku jsou – průměr 45 mm, výška 25 mm. Hmotnost výrobku činí 28 g. Na základě reálného výrobku byl zhotoven jeho 3D model v programu Autodesk Inventor Professional 2019.



Obr. 16 3D model výrobku

8.1 Zvolené materiály výrobku

Pro provedení analýzy bylo zvoleno celkem pět materiálů, které budou porovnány. Konkrétně se jedná o polymethylmetakrylát, polykarbonát, polystyren, cyklický olefinový kopolymer a polyethermid.

Tab. 2 Materiálové parametry z databáze Moldflow

		PMMA	PC	PS	COC	PEI
Zvolená teplota povrchu formy	[°C]	60	104	50	100	160
Zvolená teplota taveniny	[°C]	250	307	230	280	355
Doporučená teplota povrchu formy	[°C]	35-80	87-121	20-70	80-120	140-180
Doporučená teplota taveniny	[°C]	240-280	271-343	180-280	250-310	335-375
Nejvyšší možná teplota taveniny	[°C]	320	383	320	340	395
Doporučená teplota pro vyhození	[°C]	85	135	80	122	219
Max. smykové napětí	[MPa]	0,41	0,5	0,24	0,3	0,5
Max. rychlost smykové deformace	[1/s]	21000	40000	40000	40000	50000
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	2740	2280	3200	3362	2970
Modul pružnosti ve smyku	[MPa]	1011	804,5	1183	1284	1061
Poissonovo číslo	[-]	0,35	0,417	0,353	0,338	0,4

Konkrétní typy jednotlivých materiálů jsou následující:

- PMMA – Plexiglas HFI-10, Arkema NA.
- PC – Lexan 105, SABIC Innovative Plastics US, LLC.
- PS – Styrol NF20, Idemitsu Kosan Co Ltd.
- COC – APEL APL5514ML, Mitsui Chemicals Co Ltd.
- PEI – Ultem 1010, SABIC Innovative Plastics US, LLC.

9 ANALÝZY VSTŘIKOVÁNÍ

Jak už bylo výše zmíněno, analýzy vstřikování jsou prováděny v programu Autodesk Moldflow Synergy 2016.

Jelikož analyzovaný výrobek představuje tlustostěnný optický prvek, byly z tohoto důvod při všech analýzách použity sítě typu 3D. Tento typ sítě je všeobecně vhodný pro tlustostěnné součásti. Při generování sítě bylo důležité zvolit tento parametr:

- Global edge length on surface (celková délka hrany na povrchu) - **1,3 mm**

Při vyhodnocení kvality sítě bylo rozhodující, zda maximální hodnota Aspect ratio (poměr stran) nepřekračuje hodnotu 30. V případě překročení této hodnoty by byly výsledky analýzy nepřesné.

```
Tetrahedras
-----
Entity counts:
  Tetrahedra           208629
  Connected nodes      36816
  Connectivity regions 1

Volume by element types:
(Mold blocks and cooling channels are
not included)
  Tetra:      23.2578 cm^3
  Total:      23.2578 cm^3

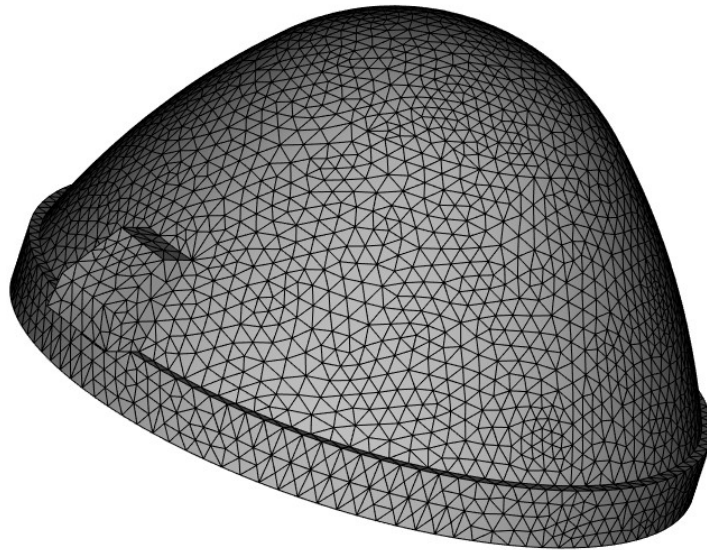
Volume by components:
  Cavity:     23.2578 cm^3
  Inserts:    0 cm^3
  Mold blocks: 0 cm^3

Aspect ratio:
  Maximum   Average   Minimum
    28.91     3.83     1.04

Maximum dihedral angle: 172.2
```

Obr. 17 Statistika 3D sítě výrobku

Obrázek (Obr. 17) zobrazuje statistiku vygenerované 3D sítě pro zadaný výrobek, kde lze zkontrolovat hodnotu určující kvalitu sítě – Aspect ratio, která nabývá hodnoty 28,91, čímž splňuje podmínku. Ve všech prováděných analýzách byla tato podmínka splněna.



Obr. 18 Síť výrobku

Analýzy jsou provedeny pro několik variant vstřikování zadaného výrobku:

- Plnění dutiny formy jedním vtokem.
- Plnění dutiny formy třemi vtoky současně.
- Technologie vícevrstvého vstřikování (Overmolding).
 - Dvouvrstvé vstřikování.
 - Dvouvrstvé vstřikování s dochlazením mimo formu.
- Technologie vstřikování s dolisováním (Injection Compression Molding).

Vzhledem k velkému počtu prováděných analýz jsou všechny analýzy provedeny jako jednonásobné, z důvodu výrazného zkrácení výpočtových časů.

Zvoleným tedy referenčním materiálem, který byl pro provádění a srovnání všech tokových analýz použit je PMMA konkrétně typ Plexiglas HFI-10, Arkema NA.

Provádí se kompletní analýzy, tedy analýzy Cool (FEM) + Fill + Pack + Warp (chlazení + plnění + dotlak + smrštění).

9.1 Plnění dutiny formy jedním vtokem

Slouží jako výchozí analýza pro porovnání a zvolení vhodných temperačních okruhů. Jedná se o nejjednodušší typ ze zmíněných analýz, kde dutina formy je plněna pouze jedním vtokem.

9.1.1 Vtokový a temperační systém

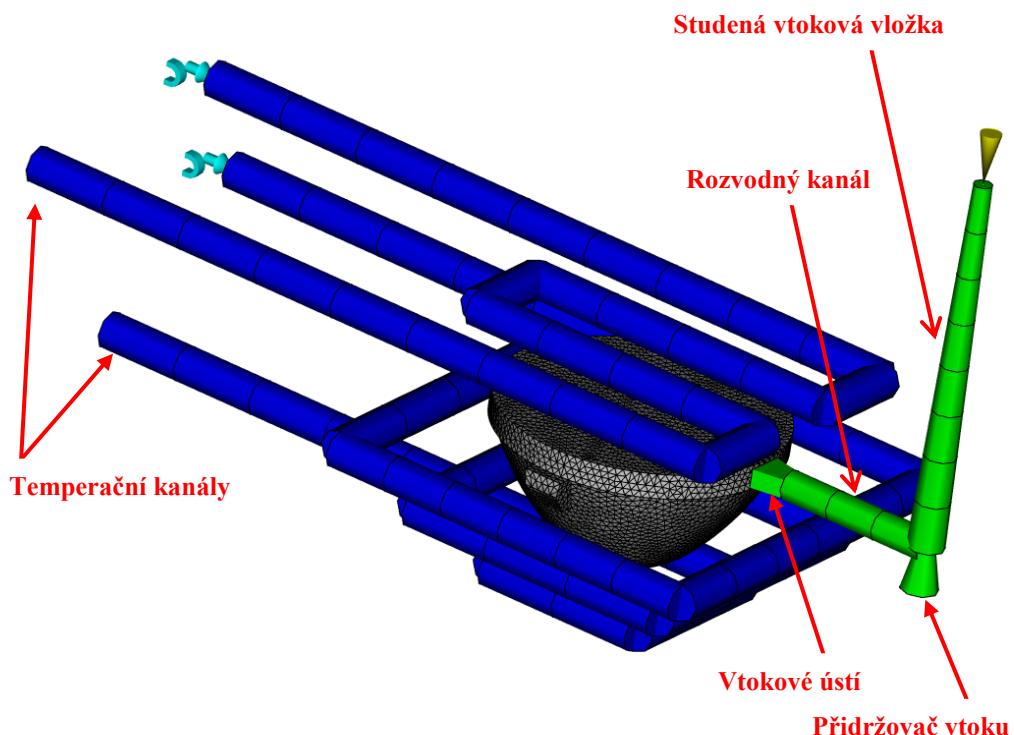
Trajektorie vtokového a temperačního systému byly navrženy v programu Autodesk Inventor Professional 2019. Tyto navrhnuté trajektorie byly ve formátu *.igs importovány do Moldflow, kde jim byly přiřazeny vlastnosti a rozměry. Následovalo vysítování, které se provádělo zvlášť jak pro vtokový systém, tak pro temperační systém.

Definice kanálů pro vtokový systém:

- Studená vtoková vložka (Cold sprue): $D_{\text{start}} = 6 \text{ mm}$, $D_{\text{end}} = 3 \text{ mm}$.
- Rozvodný kanál (Cold runner): $D = 5 \text{ mm}$.
- Přidržovač vtoku (Cold runner): $D_{\text{start}} = 3 \text{ mm}$, $D_{\text{end}} = 5 \text{ mm}$.
- Vtokové ústí (Cold gate): $W_{\text{start}} = 4 \text{ mm}$, $W_{\text{end}} = 6 \text{ mm}$, $H_{\text{start}} = H_{\text{end}} = 3 \text{ mm}$.

Definice kanálů pro temperační systém:

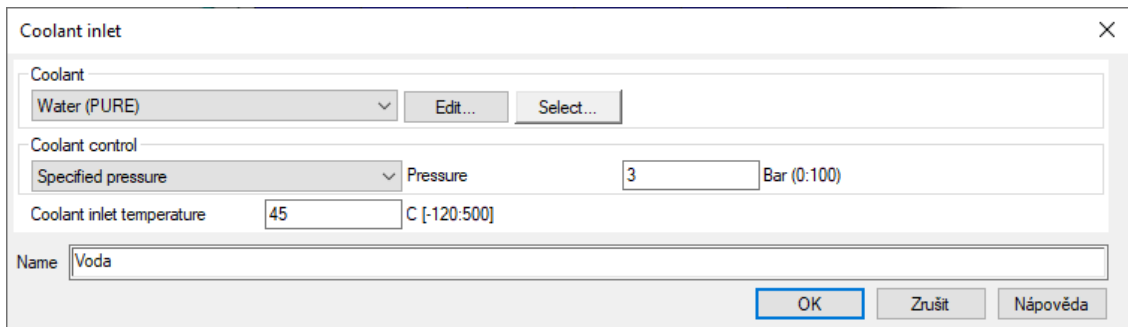
- Temperační kanál (Channel): $D = 6 \text{ mm}$.



Obr. 19 Síť vtokového a temperačního systému vůči modelu

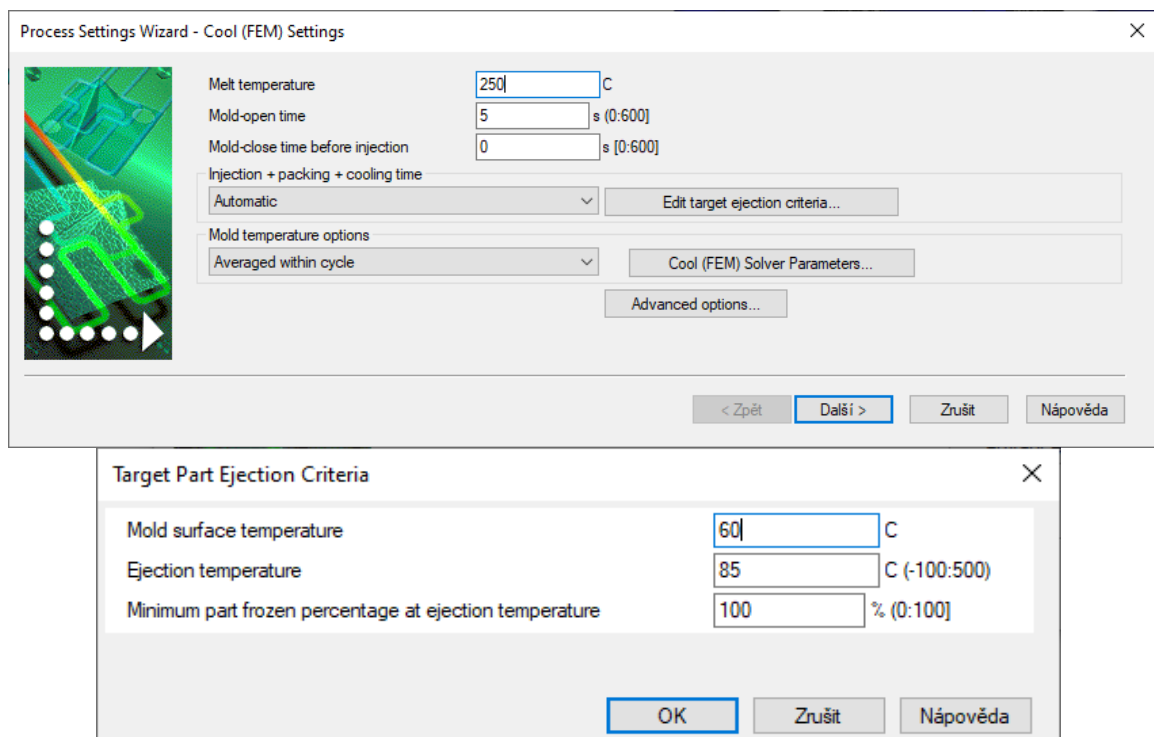
9.1.2 Procesní podmínky

Volba procesních podmínek začíná nejdříve volbou temperačního média. Jako temperační médium byla zvolena voda, jejíž vlastnosti proudění jsou pro každý okruh stejné. Teplota tohoto média byla zvolena na 45 °C, což je o 15 °C nižší, než je doporučená teplota povrchu vstřikovací formy. Dále byl zvolen tlak proudění, který činí 3 bar.



Obr. 20 Volba temperačního média

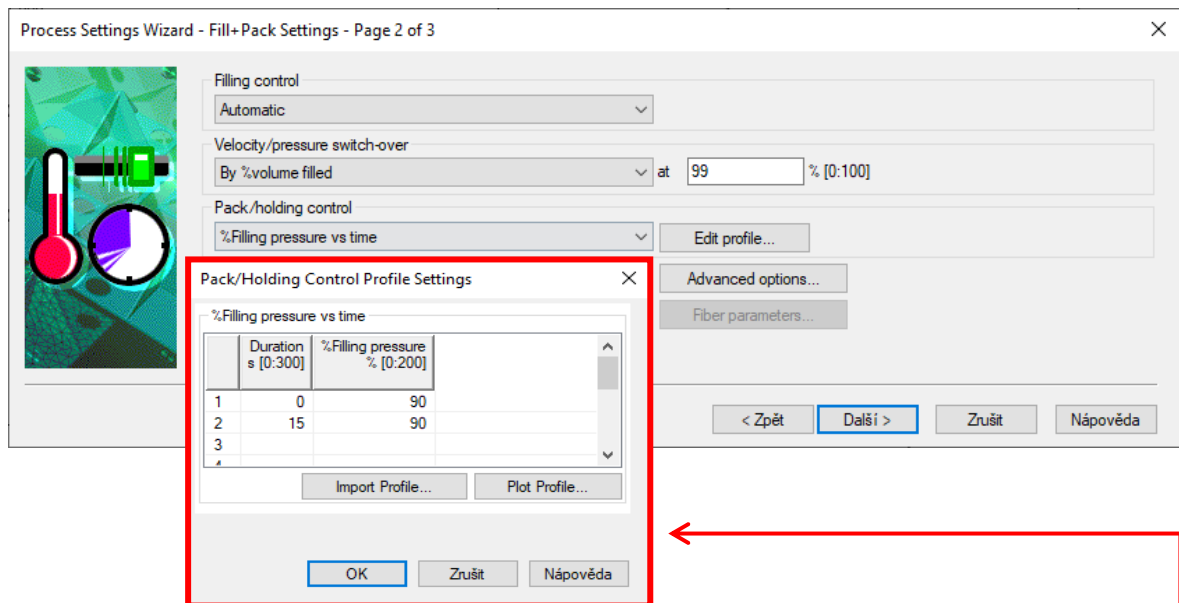
Dále volba procesních podmínek pokračuje v panelu Process Settings Wizard, kde se jako první nastavují podmínky pro výpočet chladnutí (Cool (FEM) Settings).



Obr. 21 Procesní podmínky pro analýzu chladnutí

- Teplota taveniny: 250 °C
- Doba otevření formy: 5 s
- Teplota povrchu formy: 60 °C
- Vyhazovací teplota: 85 °C
- Minimální ztuhlá část při vyhazovací teplotě: 100 %
- Vstřík + dotlak + čas chlazení: Automaticky

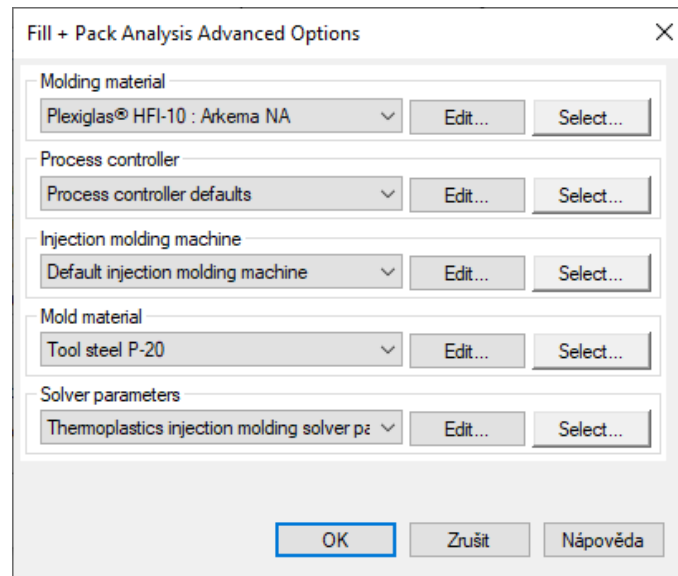
Následuje volba procesních podmínek pro část analýzy týkající se plnění dutiny formy a dotlaku (Fill + Pack Settings).



Obr. 22 Procesní podmínky pro analýzu plnění a dotlaku

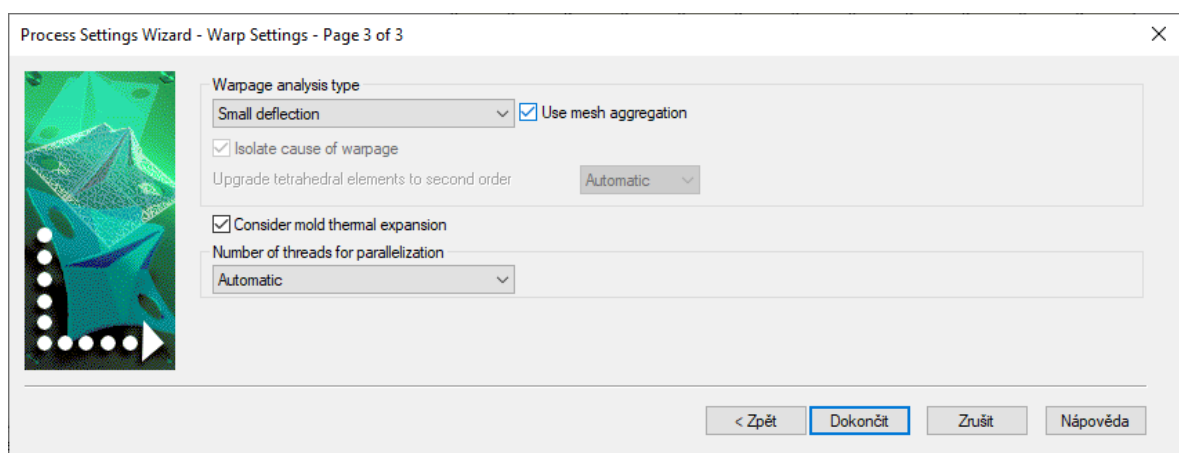
- Kontrola plnění: Automaticky
- Přepnutí na dotlak podle zaplněného objemu: 99%
- Dotlaková fáze kontrolována podle tlaku při plnění dutiny:

Dále v pokročilém nastavení je možno zvolit typ vstřikovacího stroje. Vzhledem k tomu, že analýzy jsou prováděny pouze pro jednu dutinu a není známa velikost vstřikovací formy, bylo nastavení vstřikovacího stroje ponecháno na defaultním nastavení. Jako materiál vstřikovací formy byla zvolena nástrojová ocel P-20.



Obr. 23 Pokročilé nastavení plnění a dotlaku

Poslední část procesních podmínek souvisí s nastavením smrštění (Warp Settings), kde bylo provedeno následující nastavení.



Obr. 24 Procesní podmínky pro analýzu smrštění

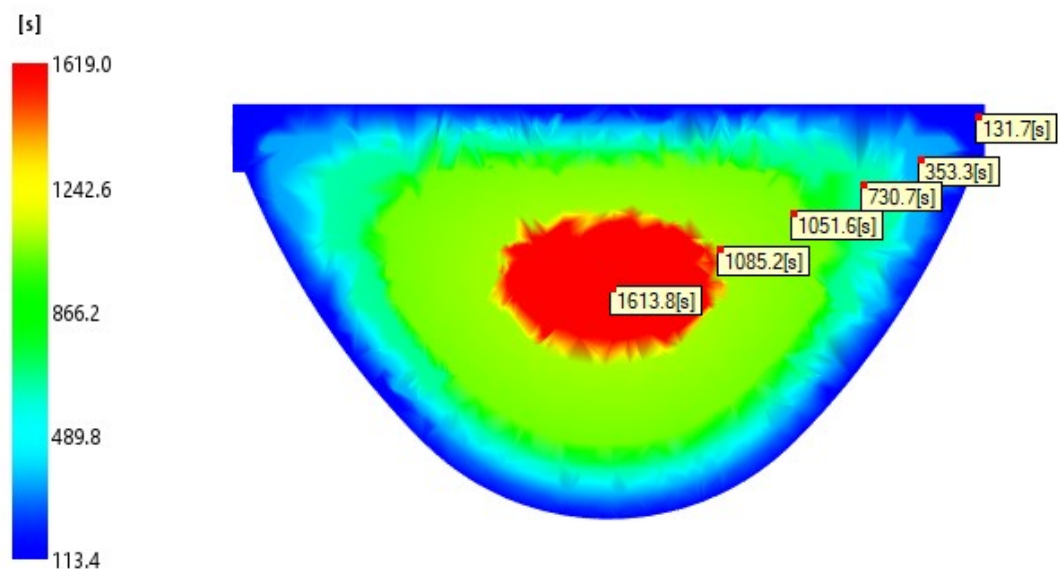
- | | |
|---------------------------------------|----------------|
| • Typ analýzy smrštění: | Malé deformace |
| • Použití agregace (spojování) sítě: | ✓ |
| • Izolovat příčiny deformace: | ✓ |
| • Zahrnout teplotní roztažnost formy: | ✓ |
| • Počet vláken pro paralelizaci: | Automaticky |

9.1.3 Výsledky analýzy

Tato podkapitola zahrnuje výsledky analýz, které slouží pro porovnání jednotlivých metod vstřikování mezi sebou. Jelikož se jedná o analyzování tlustostěnného prvku, bude při těchto výsledcích rozhodující čas, při kterém bude možno výrobek odformovat, tedy čas chladnutí ve formě. Obecně při vstřikování platí, že doba chladnutí představuje nejdelší část vstřikovacího cyklu. Dalším rozhodujícím faktorem je velikost smrštění a vznik vzduchových kapes a studených spojů.

- **Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu (Time to reach ejection temperature, part)**

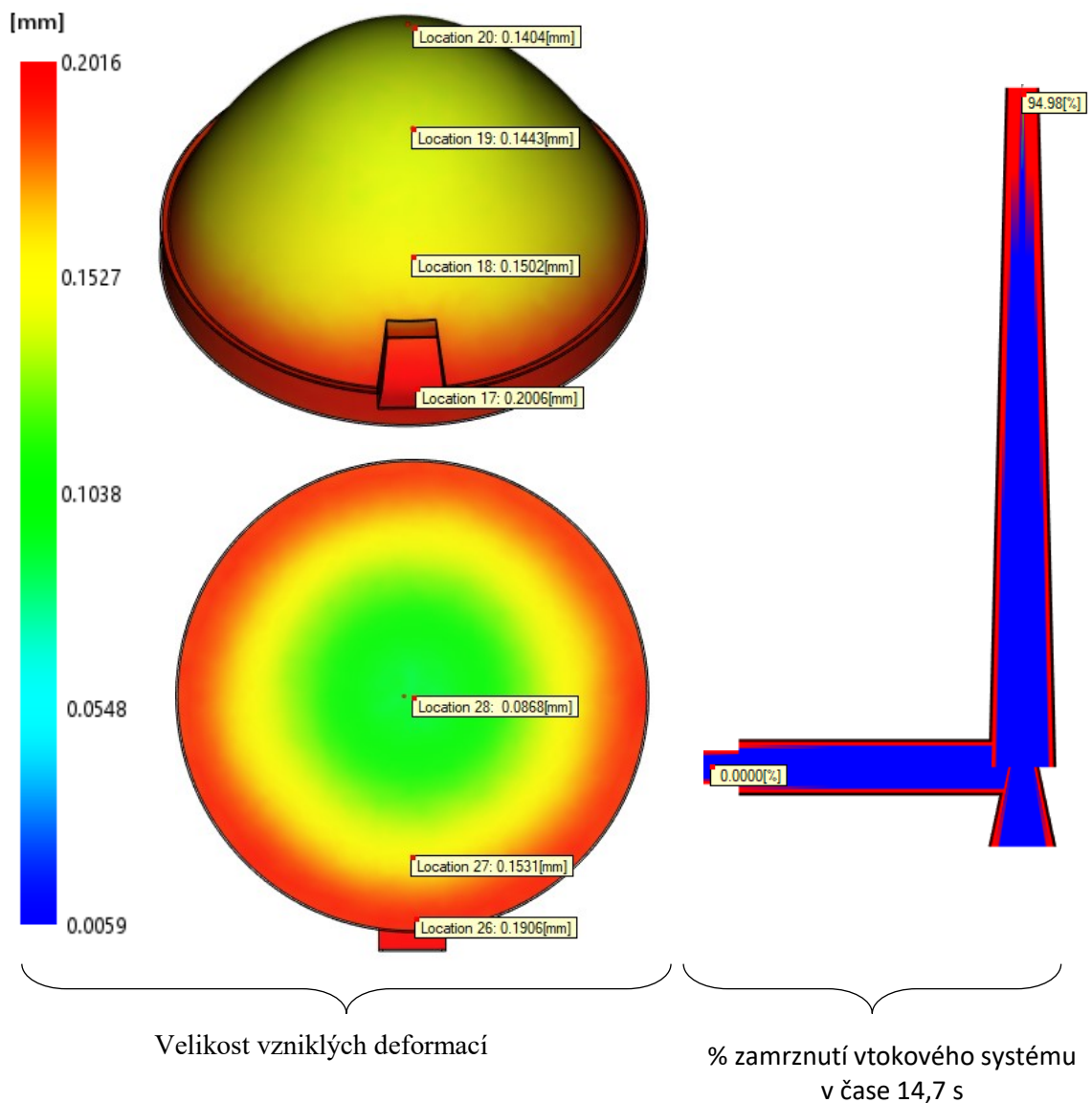
Výsledek této analýzy ukazuje dle barevné stupnice čas, který je potřebný pro dosažení vyhazovací teploty součásti. Modrá barva znázorňuje místa kde čas pro dosažení vyhazovací teploty je nejkratší a červená naopak místa, kde čas pro vyhození je nejdelší. Jak už bylo zmíněno, vyhazovací teplota je 85 °C. Čas, při kterém je materiál celého výrobku ochlazen na vyhazovací teplotu, činí 1619 s, což je 26 min a 59 s. Obecně se polymery chovají jako izolanty. Proto dojde k relativně rychlému ochlazení vrchní vrstvy do určité hloubky a směrem ke středu doba chladnutí polymerní taveniny výrazně roste.



Obr. 25 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu

- **Deformace od všech vlivů (Deflection, all effects)**

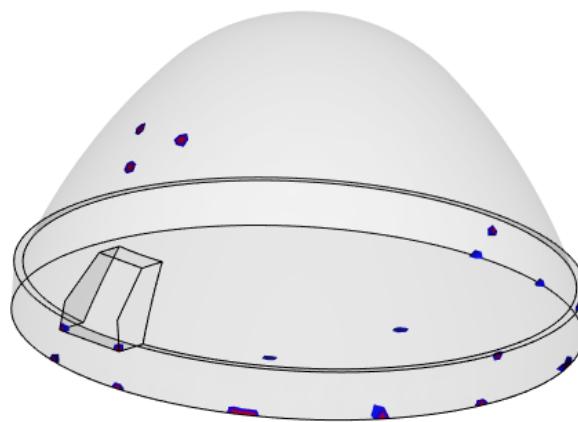
Deformace od všech vlivů zahrnují jak deformace vzniklé smrštěním materiálu, tak také deformace vzniklé vlivem ochlazování, tedy temperace. Barevná stupnice symbolizuje k jaké velikosti smrštění a na jakém místě výrobku došlo. Z výsledku je patrné, že největší velikost deformace nabývá hodnot až 0,2 mm. Deformace směrem ke středu součásti klesá na hodnotu, pohybující se kolem 0,09 mm. Velikost smrštění vstřikovaného dílu je kompenzovaná dotlakovou fází, která je v analýze nastavena na dobu 15 s. V čase 14,7 s bylo změřeno, že na začátku studené vtokové vložky je téměř 95 % zamrznutého materiálu.



Obr. 26 Velikost vzniklých deformací, zamrznutí vtokového systému

- **Vzduchové kapsy (Air traps)**

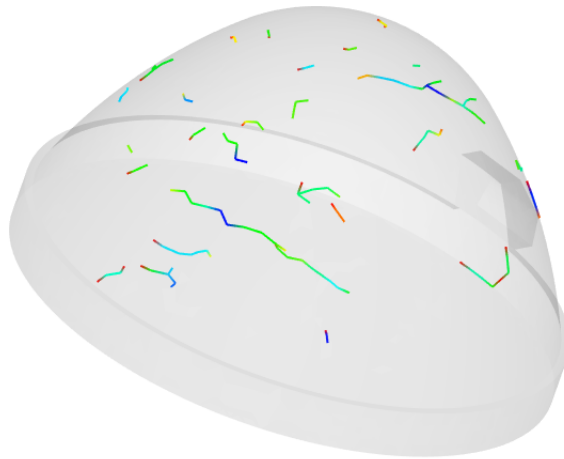
Před vstříknutím taveniny je dutina formy naplněna vzduchem, který je nutno řádně odvádět. Díky tomuto výsledku jsou predikována místa, ve kterých by mohlo docházet ke vzniku vzduchových kapes. Takto vzniklé vzduchové kapsy mohou způsobit vznik bublin, spálených míst nebo propadlin. Jelikož se většina potenciálních míst pro vznik vzduchových kapes nachází na spodní části výrobku, kde by teoreticky mohla být dělicí rovina, došlo by k odvádění vzduchu právě dělicí rovinou.



Obr. 27 Vzduchové kapsy

- **Studené spoje (Weld lines)**

Tento výsledek analýzy nám vykresluje nejpravděpodobnější místa pro vznik studených spojů. Studený spoj pak vykazuje zhoršené mechanické vlastnosti. Jelikož se jedná o výrobek, který není namáhaný, není zde třeba řešit pevnost v místě těchto studených spojů. Ovšem studené spoje mají také vliv na vzhledové vlastnosti. Projevují se jako čáry na výrobku. Jedná se opět pouze o predikce a záleží, jaká bude kvalita reálného vstříku.



Obr. 28 Studené spoje

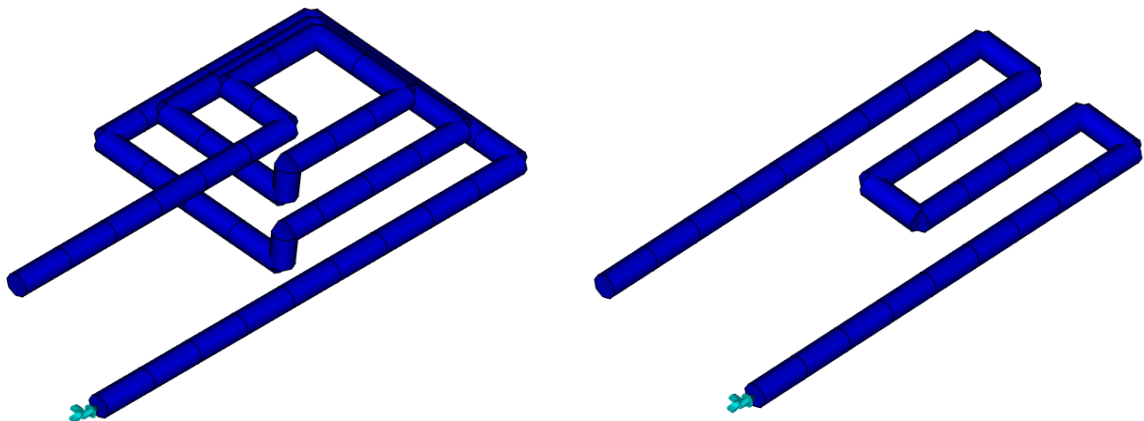
9.1.4 Porovnání temperačních okruhů

Jelikož při vstřikování těchto tlustostěnných optických prvků je kladen velký důraz na rovnoměrné odvádění tepla z dutiny vstřikovací formy, byly pro porovnání navrženy dva základní typy temperačních okruhů, z nichž jeden obsahuje dvě modifikace.

- Konvenční temperační kanály.
- Konformní temperační kanály.
 - Modifikace 1.
 - Modifikace 2.

Konvenční temperační kanály

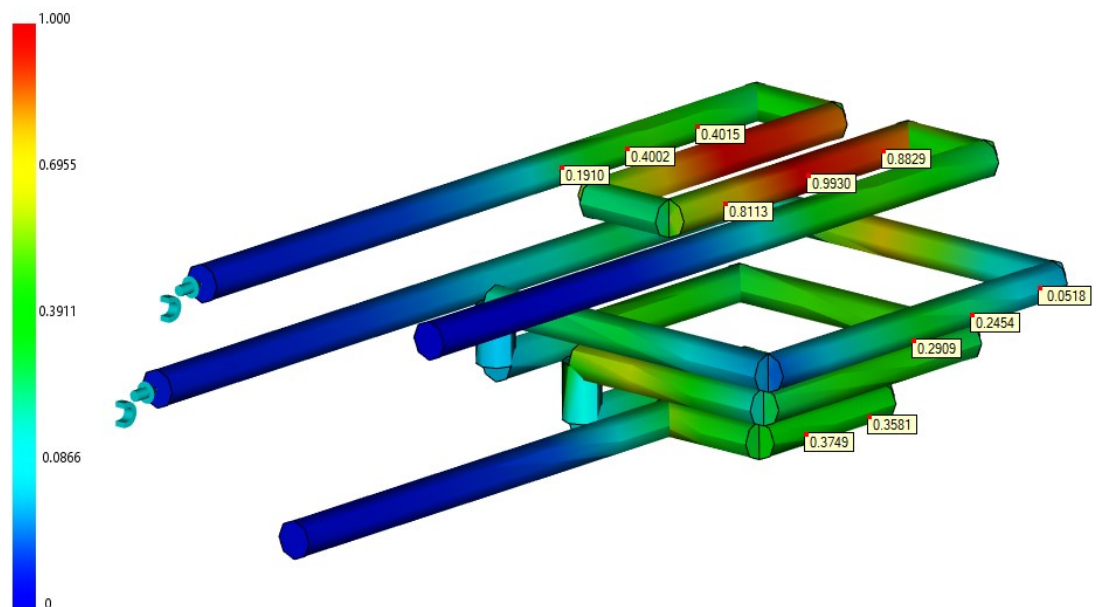
Jedná se o kanály, které jsou zhotovené pomocí konvenčních technologií obrábění. V tomto případě se jedná o vrtané temperační kanály o průměru 6 mm. Temperace je tvořena dvěma okruhy, které jsou znázorněny na obrázku (Obr. 29).



Obr. 29 Konvenční temperační kanály

- **Účinnost odvodu tepla okruhu (Circuit heat removal efficiency)**

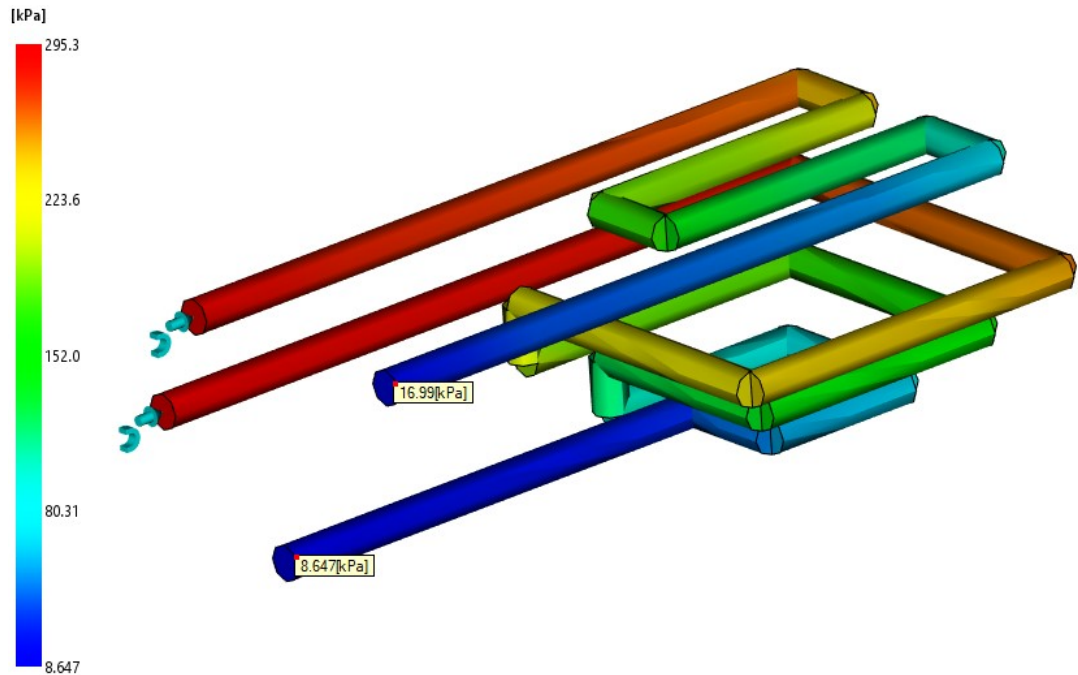
Tento výsledek je jedním z nejdůležitějších při volbě vhodného temperačního okruhu. Ukazuje účinnost odvodu tepla po celém jeho průběhu. V případě konvenční temperace je patrné, že nedochází k rovnoměrnému odvodu tepla. V místech, která jsou od dutiny nejvzdálenější, účinnost odvodu tepla výrazně klesá, tato místa jsou značena modrou barvou. Naopak značení červenou barvou představuje místa, kde je odvod tepla nejefektivnější. Vlivem tohoto nerovnoměrného odvádění tepla může docházet k nepříznivým deformacím a smrštění vstříkovaného výrobku.



Obr. 30 Účinnost odvodu tepla konvenčních temperačních kanálů

- **Tlak temperačního média (Circuit pressure)**

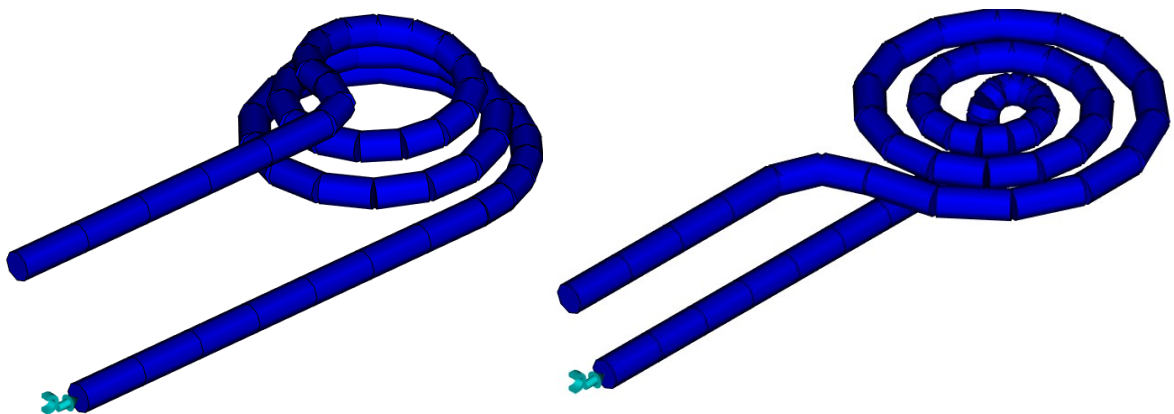
Dalším výsledkem k porovnáním temperačních okruhů slouží tlak temperačního média. Z tohoto výsledku lze zjistit, k jakým tlakovým ztrátám při průchodu média temperačními kanály došlo. Na vstupu tlak dosahuje hodnoty 295,3 kPa a po průchodu dosahuje u jednoho okruhu hodnoty téměř 17 kPa a u druhého okruhu hodnoty 8,65 kPa. Důležité je, aby po celé dráze kanálu byl generován tlak. V případě, že by tlak v nějakém místě klesl na nulovou hodnotu, vznikla by tzv. mrtvá místa a temperační médium by okruhem neproudilo.



Obr. 31 Tlak temperačního média konvenčního způsobu temperace

Konformní temperační kanály (modifikace 1)

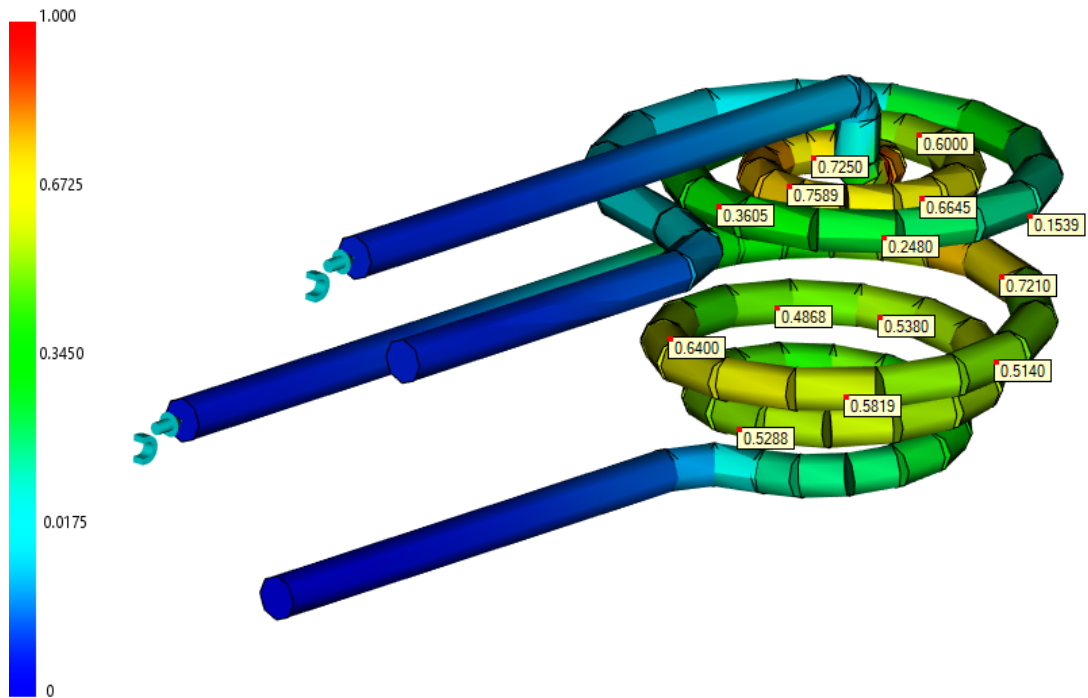
Konformní temperační kanály jsou zhotovené technologií DMLS. V tomto případě mají průměry obou okruhů velikost 6 mm. Jeden okruh je tvaru ploché spirály, který má za úkol odvádět teplo z rovinné strany čočky a druhý okruh má tvar spirály s určitým stoupáním, tak aby bylo docíleno kopírování tvaru čočky.



Obr. 32 Konformní temperační kanály (modifikace 1)

- **Účinnost odvodu tepla okruhu (Circuit heat removal efficiency)**

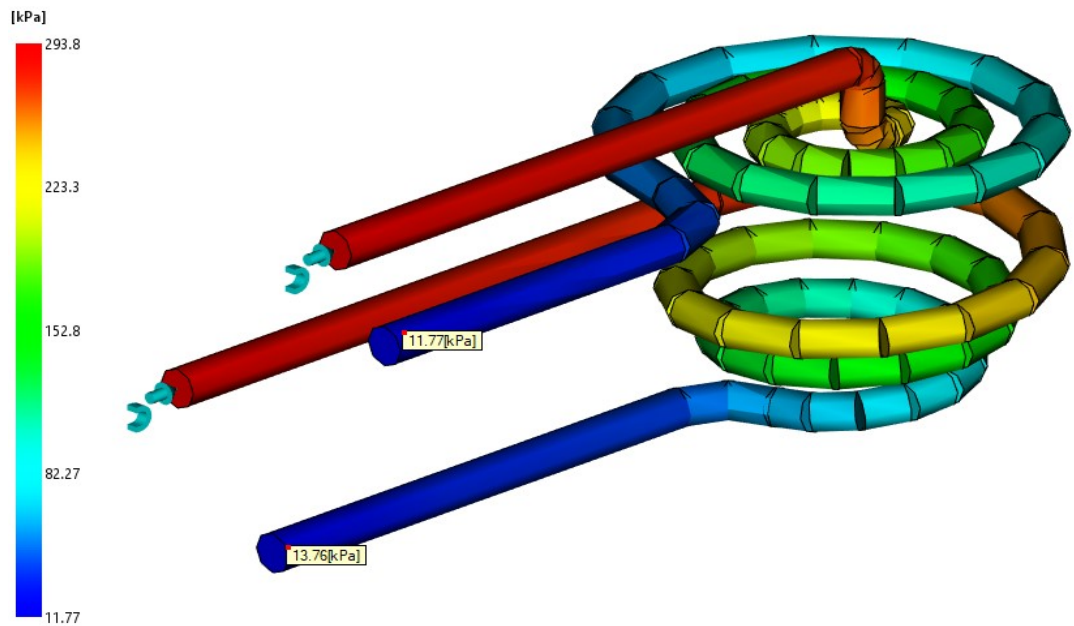
V případě konformních temperačních kanálů je účinnost odvodu tepla znatelně vyšší a také rovnoměrnější. Nejsou zde jako v případě konvenčního způsobu vzdálená místa, která mají velmi nízkou efektivitu odvodu tepla. Na obrázku (Obr. 33) je zobrazen konformní temperační systém s naznačenými hodnotami účinností odvodu tepla v různých místech po dráze kanálu.



Obr. 33 Účinnost odvodu tepla konformních kanálů (modifikace 1)

- **Tlak temperačního média (Circuit pressure)**

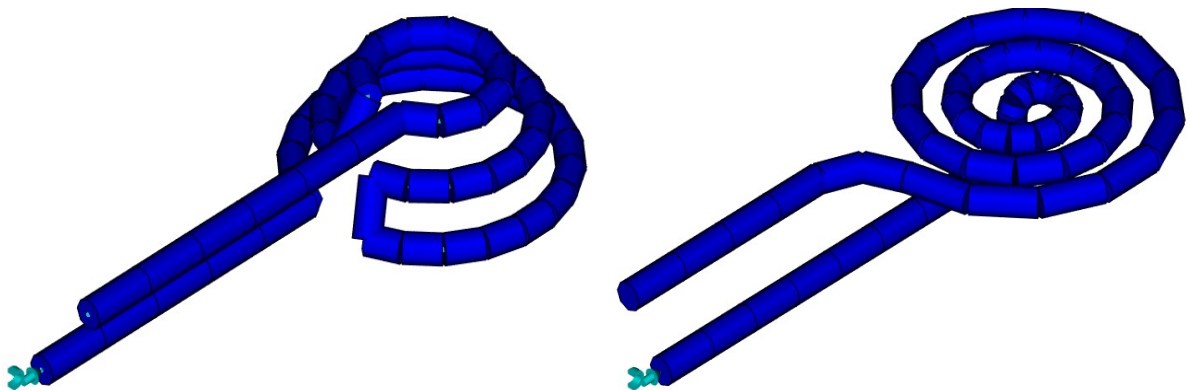
V případě proudění média konformním temperačním systémem dochází k menším tlakovým ztrátám. Pro proudění média byly zadány totožné hodnoty jako v předchozím případě. Tlak na výstupu jednoho temperačního okruhu je 11,77 kPa a tlak na výstupu druhého temperačního okruhu činí 13,76 kPa. Nižší tlakové ztráty jsou v tomto případě způsobeny plynulejší změnou trajektorie temperačních kanálů.



Obr. 34 Tlak temperačního média konformního způsobu temperace (modifikace 1)

Konformní temperační kanály (modifikace 2)

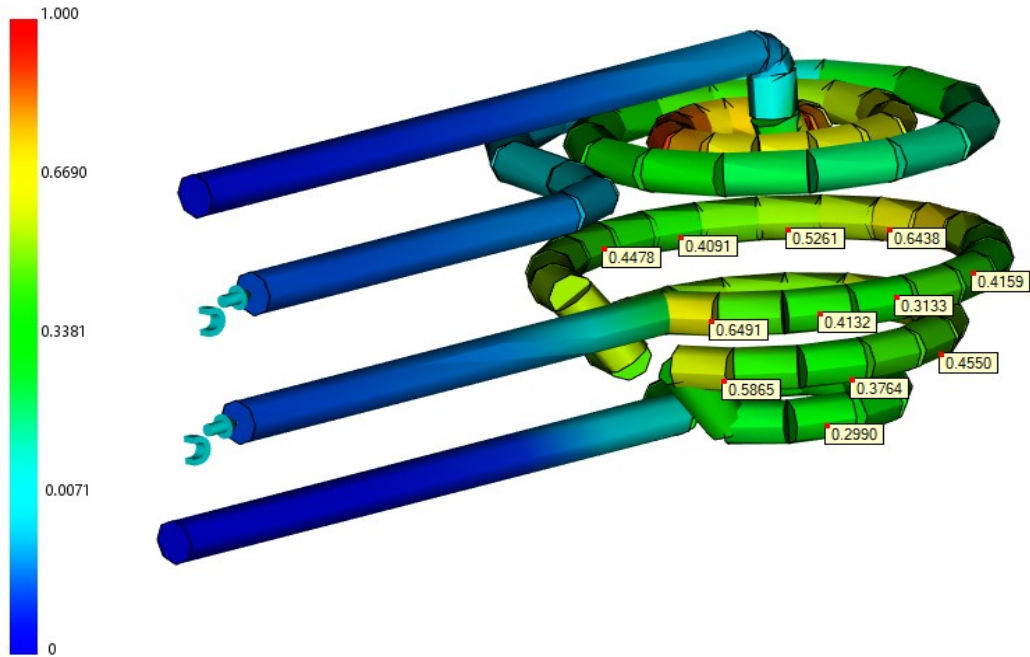
U této modifikace byla provedena změna pouze jednoho temperačního okruhu a to okruhu, který kopíruje konvexní tvar čochky. Spirála byla nahrazena kružnicemi, jejichž průměr se s výškou čochky zmenšuje tak, aby kanál byl ve vhodné vzdálenosti od dutiny vstřikovací formy.



Obr. 35 Konformní temperační kanály (modifikace 2)

- **Účinnost odvodu tepla okruhu (Circuit heat removal efficiency)**

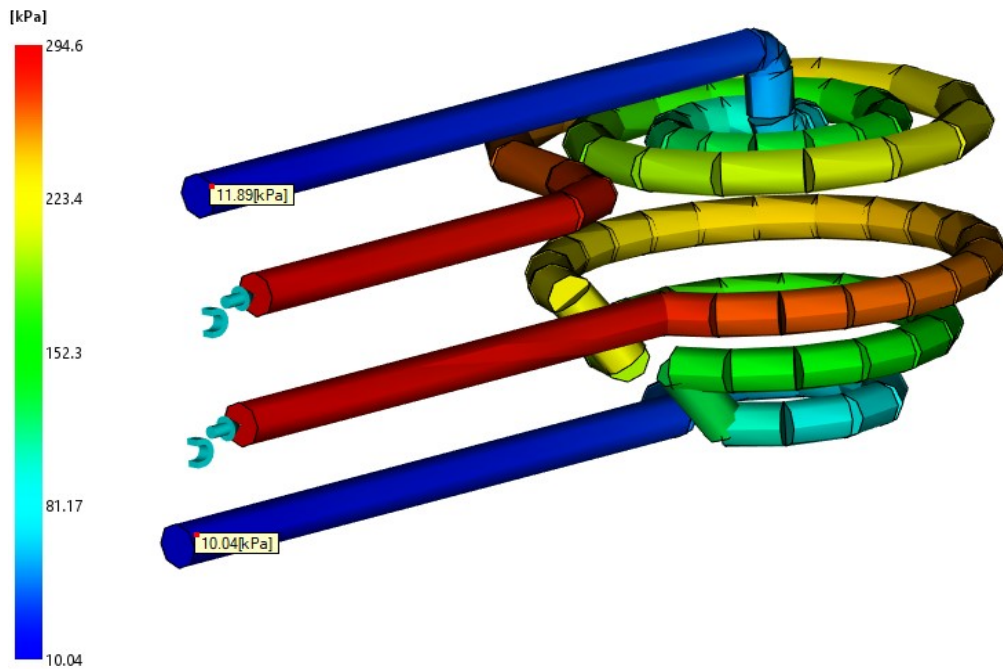
V případě konformního temperačního systému modifikace 2 je účinnost odvodu tepla srovnatelná s účinností u modifikace 1.



Obr. 36 Účinnost odvodu tepla konformních kanálů (modifikace 1)

- **Tlak temperačního média (Circuit pressure)**

Zde je tlaková ztráta o něco větší, konkrétně nejnižší tlak na výstupu nabývá hodnoty 10,04 kPa, což je způsobeno náhlými přechody.



Obr. 37 Tlak temperačního média konformního způsobu temperace (modifikace 2)

Volba temperačního systému

Z navrhnutých variant temperačních okruhů byla pro další analýzy zvolena varianta konformní temperace konkrétně modifikace 1. Rozhodujícím faktorem oproti konvenčnímu temperačnímu systému byla vyšší a také rovnoměrnější účinnost odvodu tepla. Dále tato zvolená modifikace dostala přednost před modifikací 2 z důvodu plynulejšího průchodu média temperačními kanály, tedy tlakové ztráty byly menší. I když rozdíl těchto tlakových ztrát mezi modifikací 1 a 2 je zanedbatelný, bylo přesto přikloněno právě k modifikaci 1.

9.2 Plnění dutiny formy třemi vtoky

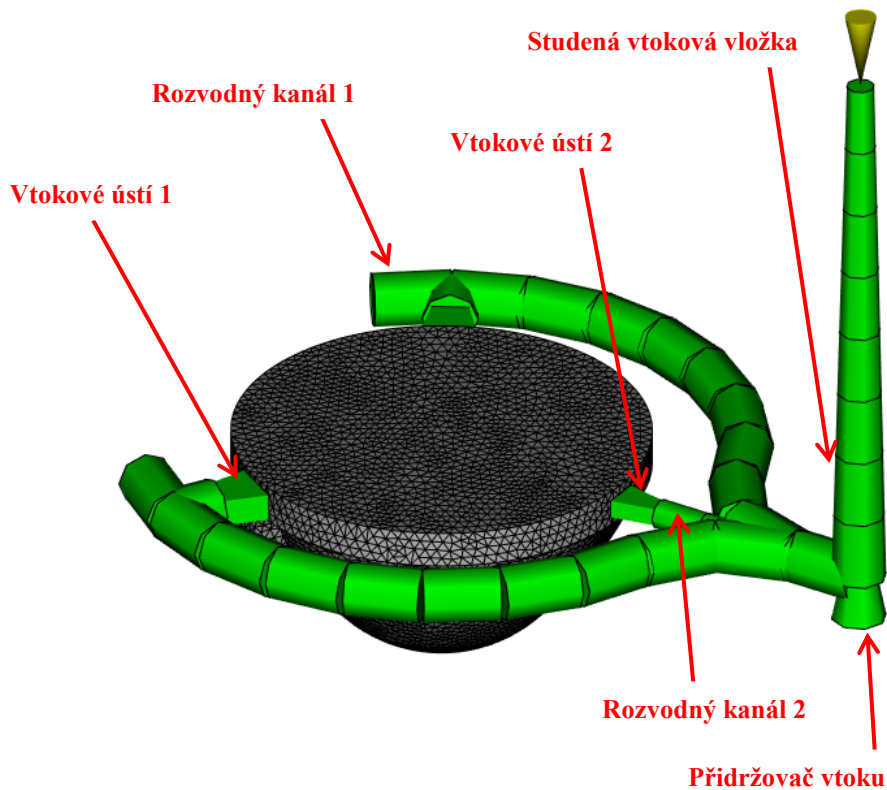
V této kapitole bude zkoumán vliv plnění dutiny formy třemi vtoky současně.

9.2.1 Vtokový systém a temperační systém

Na základě analýz byl zvolen temperační systém konformní, konkrétně modifikace 1, jehož geometrie je obsažena v kapitole 9.1.4.

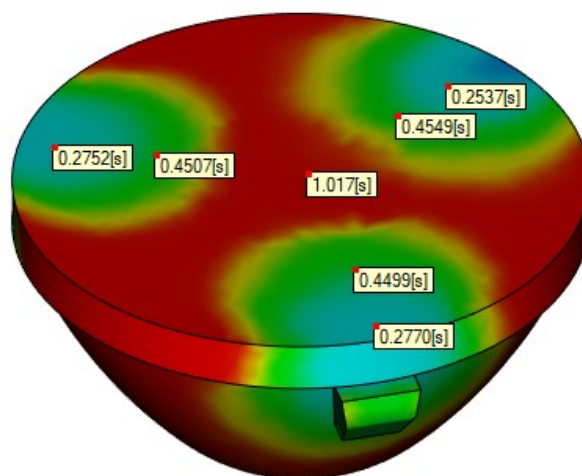
Definice kanálů pro vtokový systém:

- Studená vtoková vložka (Cold sprue): $D_{\text{start}} = 6 \text{ mm}$, $D_{\text{end}} = 3 \text{ mm}$.
- Rozvodný kanál 1 (Cold runner): $D = 6 \text{ mm}$
- Rozvodný kanál 2 (Cold runner): $D = 3,3 \text{ mm}$
- Přidržovač vtoku (Cold runner): $D_{\text{start}} = 3 \text{ mm}$, $D_{\text{end}} = 5 \text{ mm}$.
- Vtokové ústí 1 (Cold gate): $W_{\text{start}} = 4 \text{ mm}$, $W_{\text{end}} = 6 \text{ mm}$, $H_{\text{start}} = H_{\text{end}} = 3 \text{ mm}$.
- Vtokové ústí 2 (Cold gate): $W_{\text{start}} = 2 \text{ mm}$, $W_{\text{end}} = 4 \text{ mm}$, $H_{\text{start}} = H_{\text{end}} = 2 \text{ mm}$.



Obr. 38 Síť vtokových kanálů vůči modelu

Rozvodné kanály a vtoková ústí byly navrženy tak, aby dutina forma byla taveninou plněna rovnoměrně. Plnění dutiny formy je časově znázorněno na obrázku (Obr. 39), ze kterého je patrné, že časy jednotlivých vtokových ústí jsou si téměř rovny, plnění je tedy vyvážené.



Obr. 39 Časové znázornění plnění dutiny formy
třemi vtoky současně

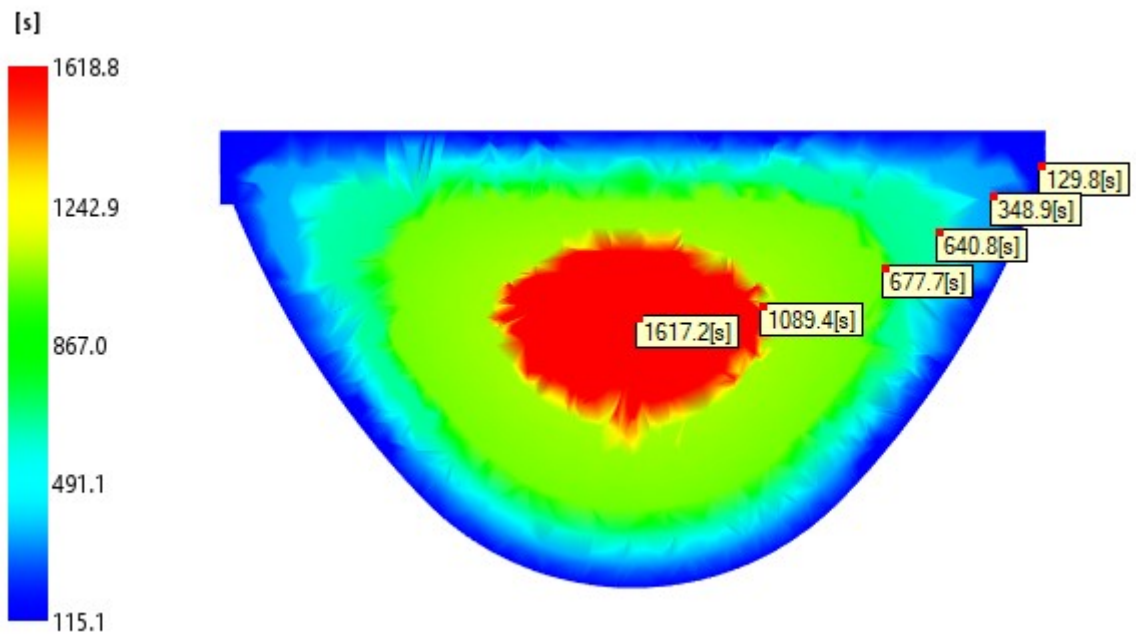
9.2.2 Procesní podmínky

Procesní podmínky při plnění dutiny formy třemi vtoky jsou nastaveny shodně jako u analýzy pro plnění dutiny formy jedním vtokem, tedy dle kapitoly 9.1.2.

9.2.3 Výsledky analýzy

- **Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu (Time to reach ejection temperature, part)**

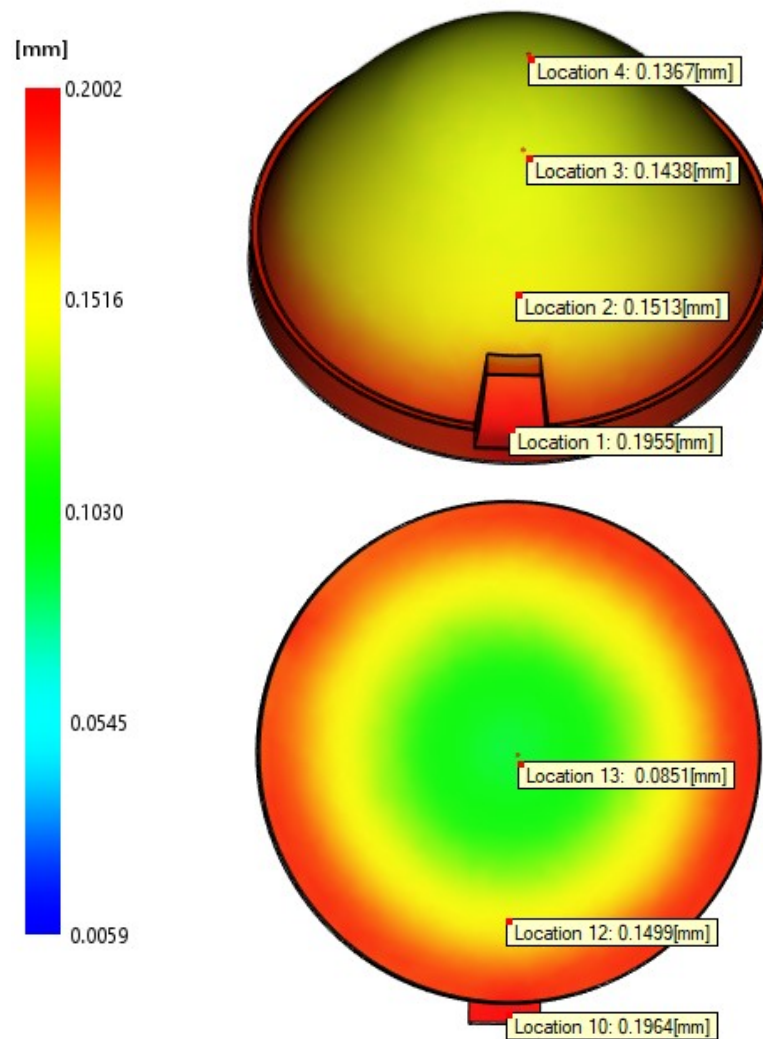
Čas potřebný pro vyhození součásti je téměř totožný s předešlou analýzou, tedy kde dutina byla plněna jedním vtokem. Dle výsledků čas činí 1618,8 s což je téměř 26 min a 59 s. Zda je dutina formy plněna jedním vtokem nebo třemi vtoky nemá vůbec žádný vliv na čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty.



Obr. 40 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu

- **Deformace od všech vlivů (Deflection, all effects)**

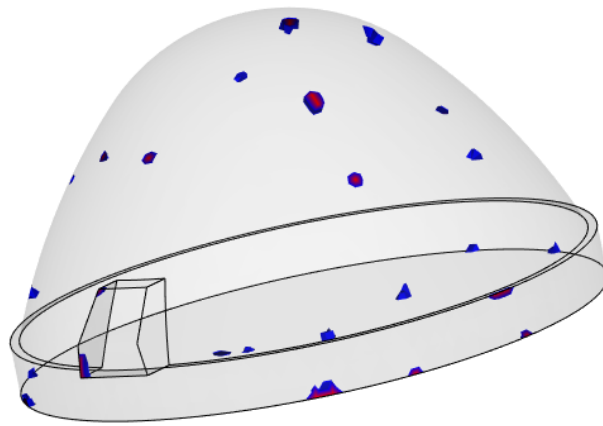
Opět i velikost vzniklých deformací vlivem smrštění materiálu a vlivem temperace jsou téměř totožné s předchozí analýzou, dosahují hodnoty až 0,2 mm. Čas dotlaku byl i v tomto případě nastaven na dobu 15 s, protože byly opět použity totožné rozměry pro studenou vtokovou vložku, u které bylo zjištěno, že v čase 14,7 s dojde k zamrznutí části kanálu z 95 %.



Obr. 41 Velikost vzniklých deformací

- **Vzduchové kapsy (Air traps)**

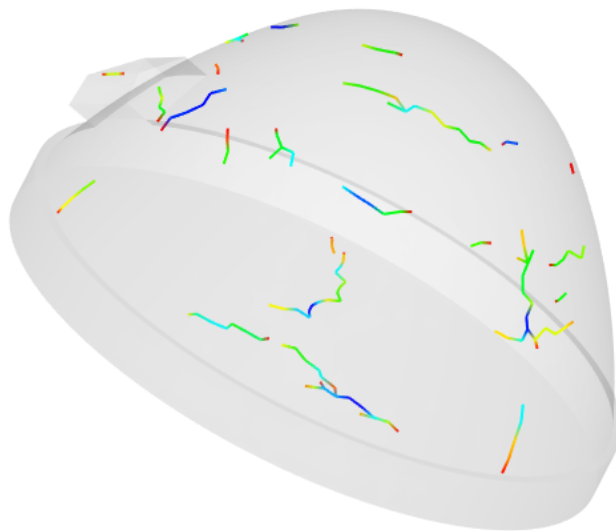
V případě plnění dutiny formy třemi vtoky je pravděpodobnost výskytu vzduchových kapes mnohem vyšší. Vznik vzduchových kapes je v tomto případě způsoben především třemi stékajícími se čely taveniny, přičemž dojde ke špatnému odvodu vzduchu, který následně způsobí defekty. Vyšší pravděpodobnost výskytu vzduchových kapes lze pozorovat na konvexní části čočky.



Obr. 42 Vzduchové kapsy

- **Studené spoje (Weld lines)**

Za vznikem studených spojů při tomto typu analýzy stojí už zmíněné stékání třech ochlazených čel taveniny. Zde je riziko vzniku studených spojů mnohem větší než v případě plnění jedním vtokem. Viditelnost těchto spojů a míra zhoršení optických vlastností je zde relativně vysoká.



Obr. 43 Studené spoje

9.3 Vícevrstvé vstřikování (dvouvrstvé vstřikování)

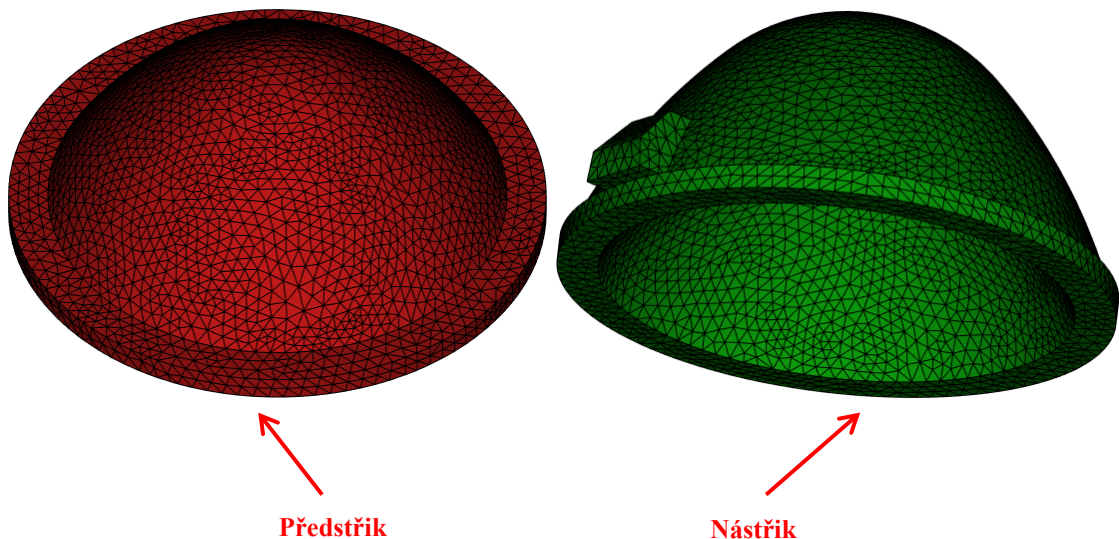
Vícevrstvé, v tomto případě dvouvrstvé vstřikování spočívá ve vstřikování výrobku ve více etapách, tedy ve dvou etapách. Čočka byla rozdělena na dvě části, z nichž jedna dosahuje tloušťky 16,7 mm a je nazvána předstřík a druhá vrstva dosahuje tloušťky 8,3 mm a je nazvána jako nástřík. Tloušťky těchto jednotlivých vrstev jsou vypočítány dle následujících vztahů:

- Tloušťka předstříku:

$$s_0 = \frac{2}{n+1} \cdot s_{\text{total}} = \frac{2}{2+1} \cdot 25 = 16,7 \text{ mm} \quad (5)$$

- Tloušťka nástříku:

$$s_1 = \frac{1}{n+1} \cdot s_{\text{total}} = \frac{1}{2+1} \cdot 25 = 8,3 \text{ mm} \quad (6)$$



Obr. 44 Rozdělení čočky do dvou vrstev

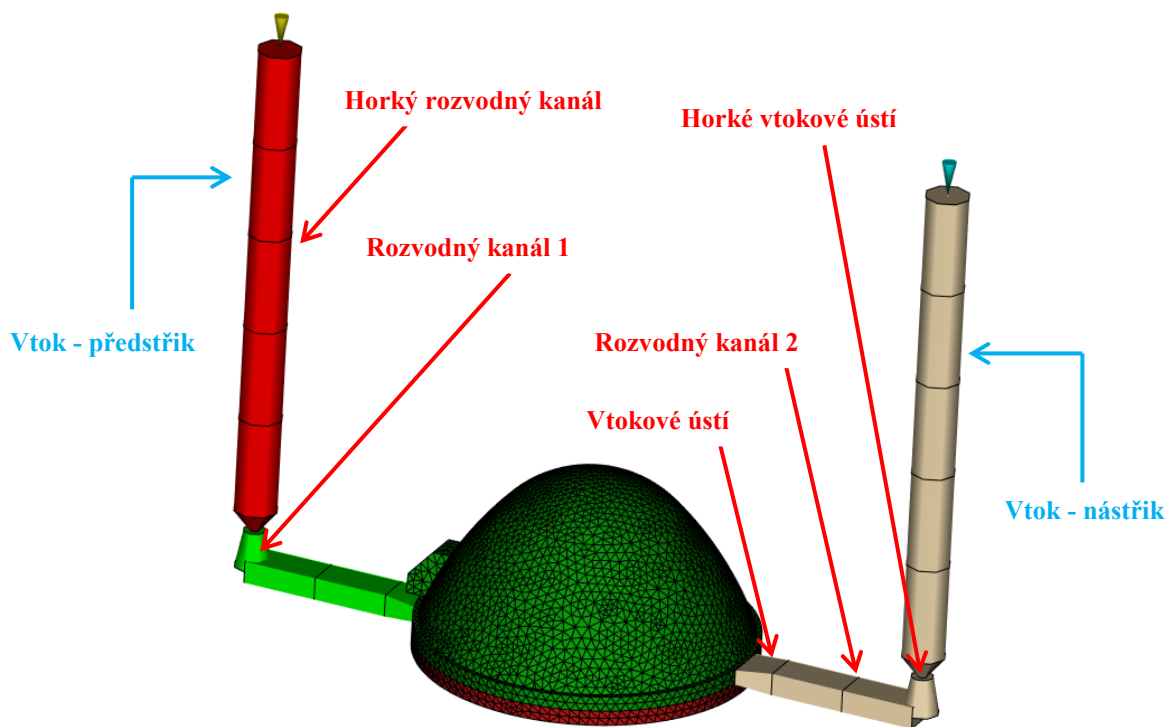
9.3.1 Vtokový a temperační systém

Zde byl vtokový systém navržen jako kombinace horkého a studeného vtokového systému. Systém temperace byl zde ponechán (temperace celé čočky), přičemž pro temperaci předstříku byl zvolen okruh stejného charakteru tak jako pro temperaci celé čočky. Rozložení vtokového a temperačního systému je patrné z obrázků (Obr. 45, 46)

Definice kanálů pro vtokový systém:

- Horký rozvodný kanál (Hot runner): $D = 6$ mm.
- Horké vtokové ústí (Hot gate): $D_{\text{start}} = 1,3$ mm, $D_{\text{end}} = 6$ mm.
- Rozvodný kanál 1 (Cold runner): $D_{\text{start}} = 5$ mm, $D_{\text{end}} = 3$ mm.
- Rozvodný kanál 2 (Cold runner): $W = 5$ mm, $H = 3$ mm.
- Vtokové ústí (Cold gate): $W_{\text{start}} = 5$ mm, $W_{\text{end}} = 6$ mm, $H_{\text{start}} = 3$ mm, $H_{\text{end}} = 2$ mm.

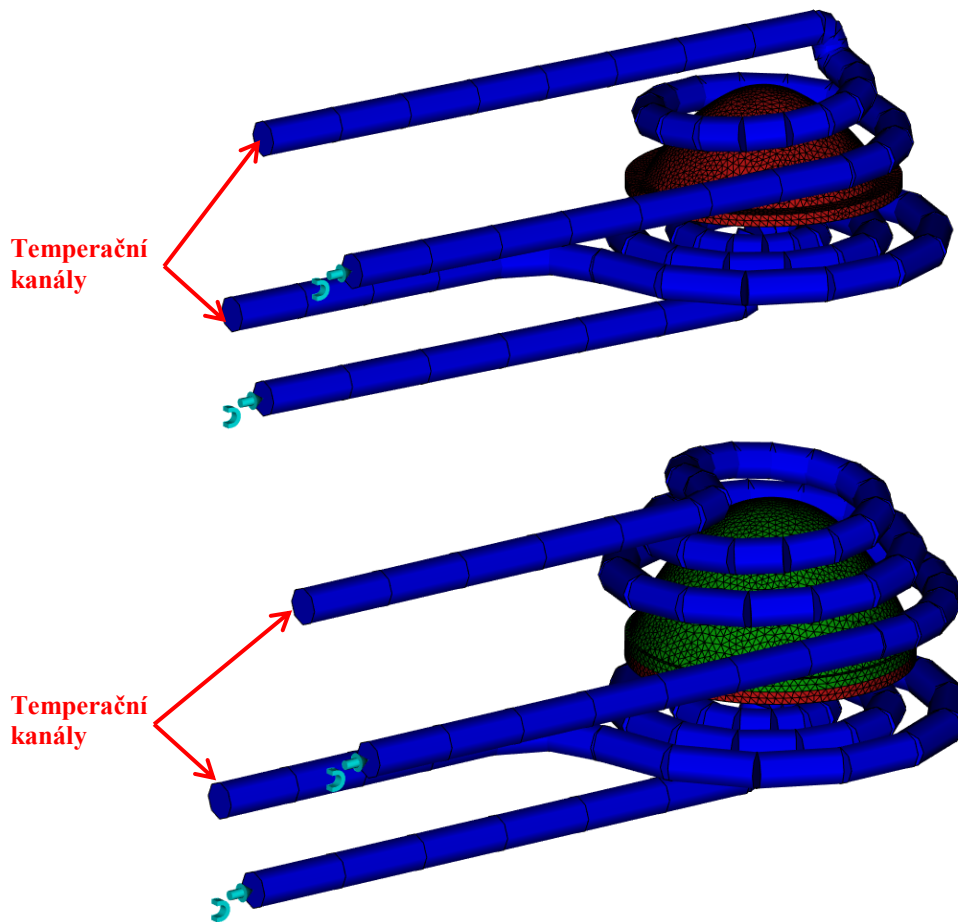
Geometrie vtokových kanálů pro obě části čočky je totožná.



Obr. 45 Síť vtokových kanálů vůči modelu

Definice kanálů pro temperační systém:

- Temperační kanál (Channel): $D = 6$ mm.



Obr. 46 Síť temperačních kanálů vůči modelu

9.3.2 Procesní podmínky

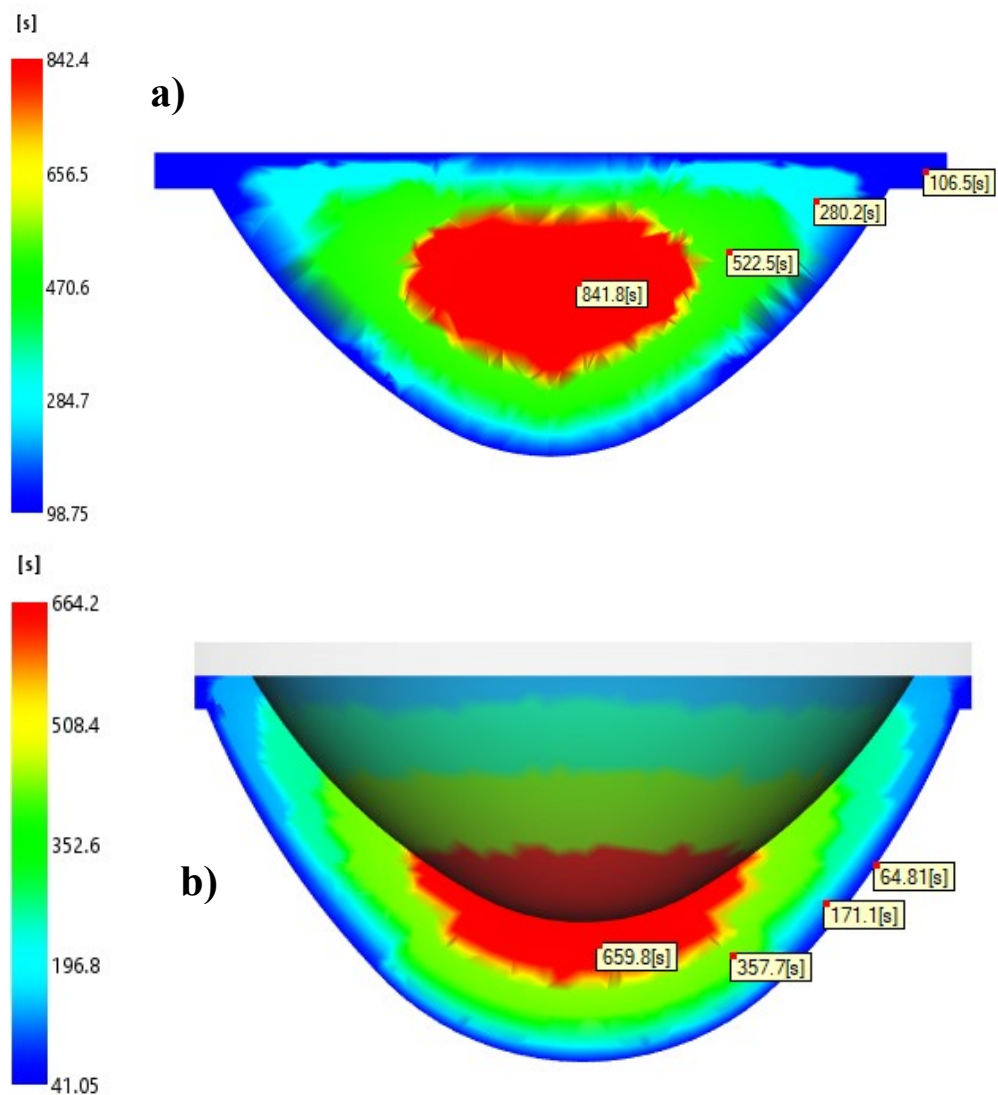
Analýza vícevrstvého vstřikování byla nejdříve řešena pro celou čočku v programu v režimu Thermoplastic Overmolding. Nicméně v tomto režimu analýzy nelze do výpočtů zahrnout teplotu, byla analýza provedena v režimu Thermoplastic Injection Molding nejdříve zvlášť pro předstřík. Následně se analýza provedla pro celou čočku, kde plnění se provádělo jen pro část zvanou nástřík a předstřík zde představoval již zhotovenou část tzv. insert, u něhož byl zvolen totožný materiál jako pro nástřík.

Procesní podmínky pro vstřikování jednotlivých vrstev byly opět nastaveny shodně, tak jako u předešlých analýz.

9.3.3 Výsledky analýzy

- Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu (Time to reach ejection temperature, part)

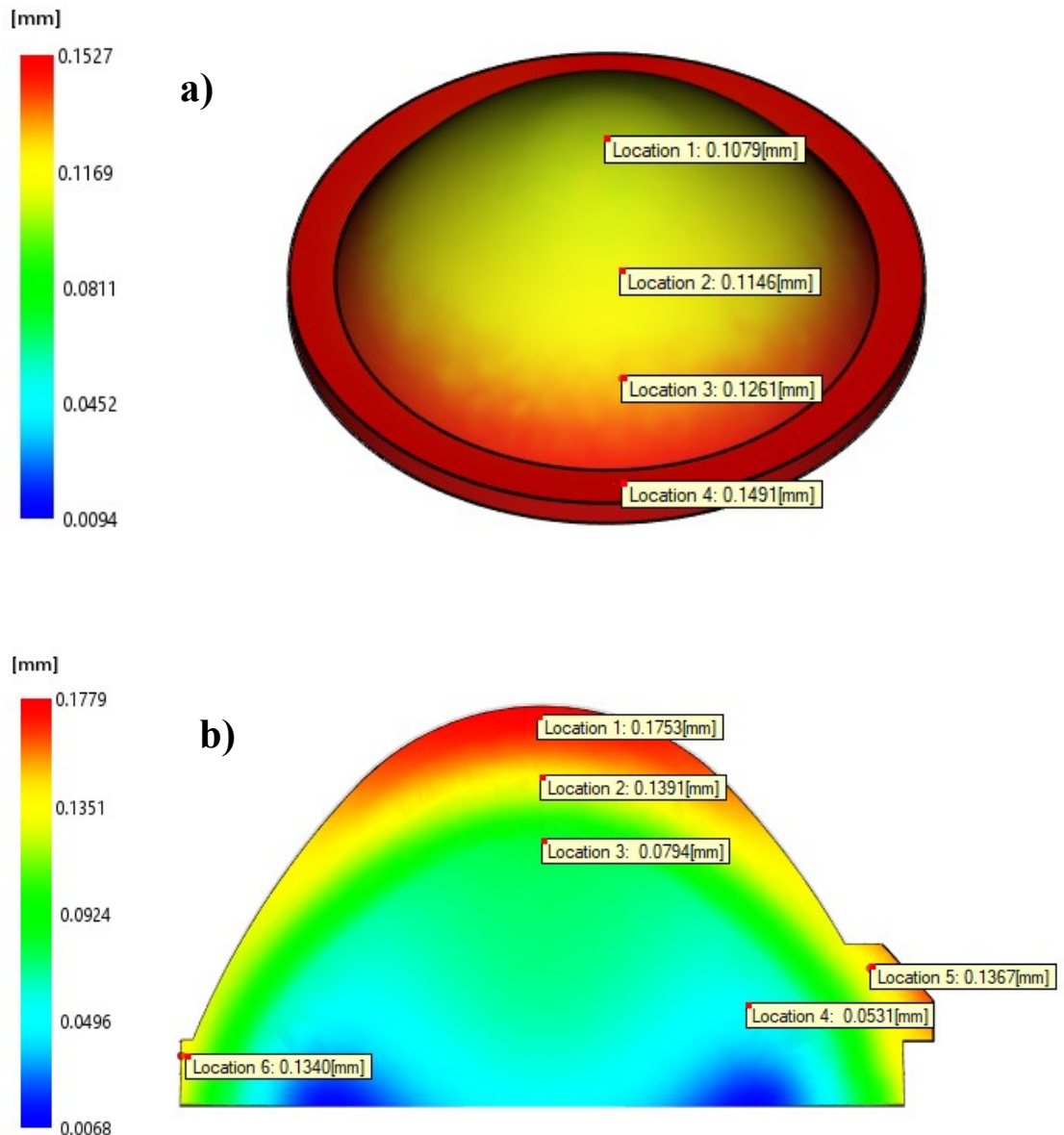
Potřebný čas k dosažení vyhazovací teploty je zde zobrazen pro obě části čočky, jak pro předstřík tak pro nástřík. Delší doba chladnutí byla zjištěna u předstříku, kde čas dosahuje hodnoty 842,4 s což je asi 14 min a 2 s. Pro nástřík by zjištěn čas chladnutí 664,2 s, což je 11 min a 4 s. Protože se u vícevrstvého vstřikování předpokládá, že forma obsahuje dutinu na předstřík a také na nástřík, přičemž dochází k plnění obou dutin zároveň, úspora času bude tedy znatelná. Rozhodující je tedy čas pro vstřikování předstříku.



Obr. 47 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty a) předstříku, b) nástříku

- **Deformace od všech vlivů (Deflection, all effects)**

První výsledek zobrazuje deformaci předstříku (Obr. 48a) u kterého se maximální hodnota pohybuje kolem 0,15 mm. Při provádění nástřiku dojde k eliminaci vzniklých deformací na předstříku, tudíž tyto deformace nejsou rozhodující. Důležité jsou, až vzniklé deformace po provedení nástřiku což je zobrazeno na obrázku (Obr. 48b), kde tyto deformace dosahují hodnoty téměř 0,18 mm.

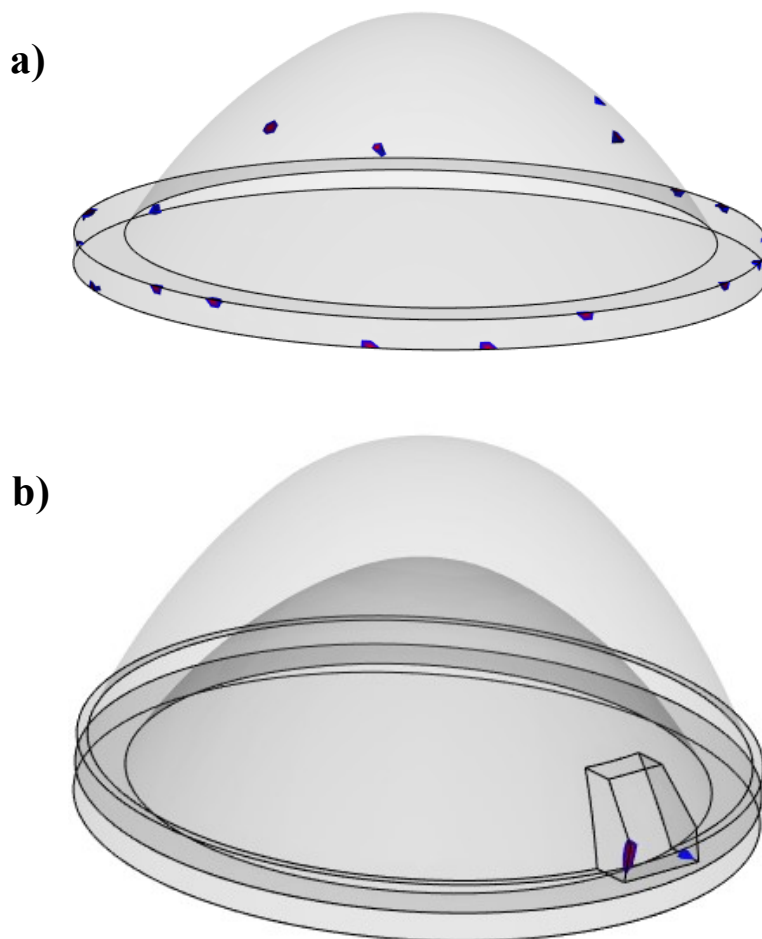


Obr. 48 Velikost vzniklých deformací a) předstříku, b) celé čočky

- **Vzduchové kapsy (Air traps)**

Predikce vzduchových kapes je opět zobrazena nejdříve pouze pro předstřík, který je zobrazen na obrázku (Obr. 49a). Zde, je jejich výskyt převážně v oblasti rovinné

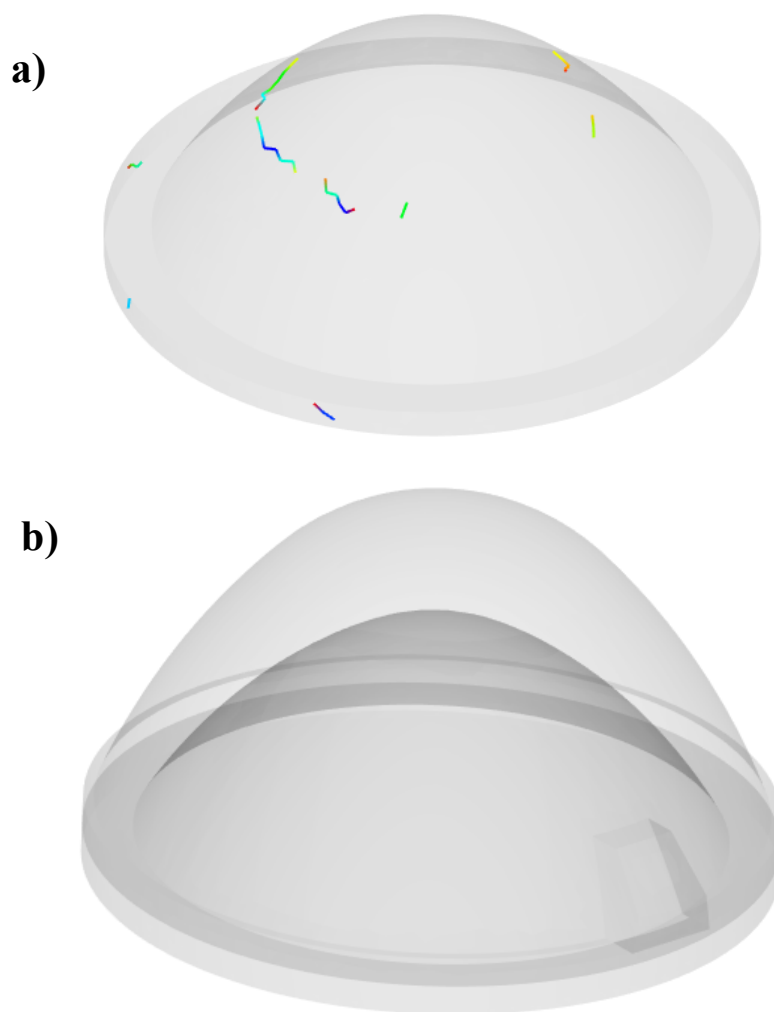
plochy čočky, kde by vzduch měl opouštět dutinu dělicí rovinou. Na obrázku (Obr. 49b) je již zobrazen jak předstřík tak také nástřík, kde analyzovanou částí je pouze nástřík. Zde analýza odhalila pouze dvě potenciální místa pro vznik vzduchových kapes. Jedná se o konkrétně o aretační prvek. V těchto místech by případný vznik defektů neměl ovlivnit funkci čočky.



Obr. 49 Vzduchové kapsy a) předstřík, b) celá čočka

- **Studené spoje (Weld lines)**

Při této metodě vstřikování došlo k výraznému poklesu i výskytu studených spojů. Opět jsou predikce těchto studených spojů zobrazeny nejprve na samotném předstříku (Obr. 50a), kde je ve srovnání s čočkou vstřikovanou na jedenkrát významný pokles jejich výskytu. Obrázek (Obr. 50b) zobrazuje kompletní čočku, kde byl opět analyzován pouze nástřík a zde analýza neodhalila žádný vznik studených spojů.

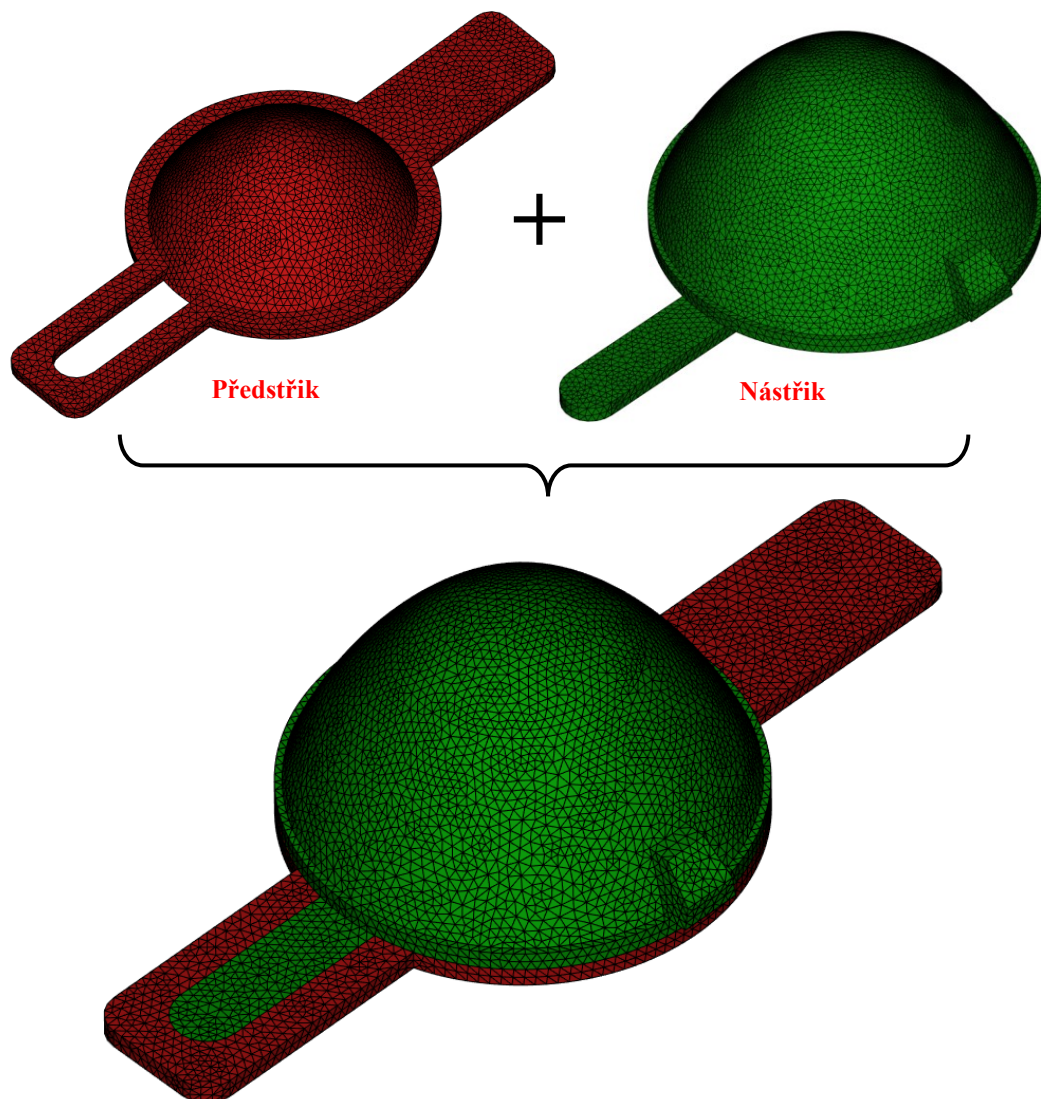


Obr. 50 Studené spoje a) předstřík, b) celá čočka

9.4 Vícevrstvé vstřikování (dvouvrstvé vstřikování s dochlazením mimo formu)

Jedná se o modifikaci předchozí metody, tedy metody dvouvrstvého vstřikování, s tím rozdílem že čočka obsahuje plochy sloužící k manipulaci s čočkou. Jelikož při dochlazování mimo formu je předstřík vyjímán z formy tehdy, kdy ještě není dosaženo vyhazovací teploty v celém objemu výrobku a nachází se zde místa, kde polymer je stále ještě ve formě taveniny. Z toho důvodu slouží pro manipulaci právě tyto zmíněné plochy, které slouží k eliminaci vzniku případných deformací vlivem manipulace. Tato úprava je znázorněna na obrázku (Obr. 51).

Tloušťky jednotlivých vrstev, tedy předstříku a nástříku mají shodné rozměry jako u klasického dvouvrstvého vstřikování, tedy dle výpočtů v předchozí analýze.



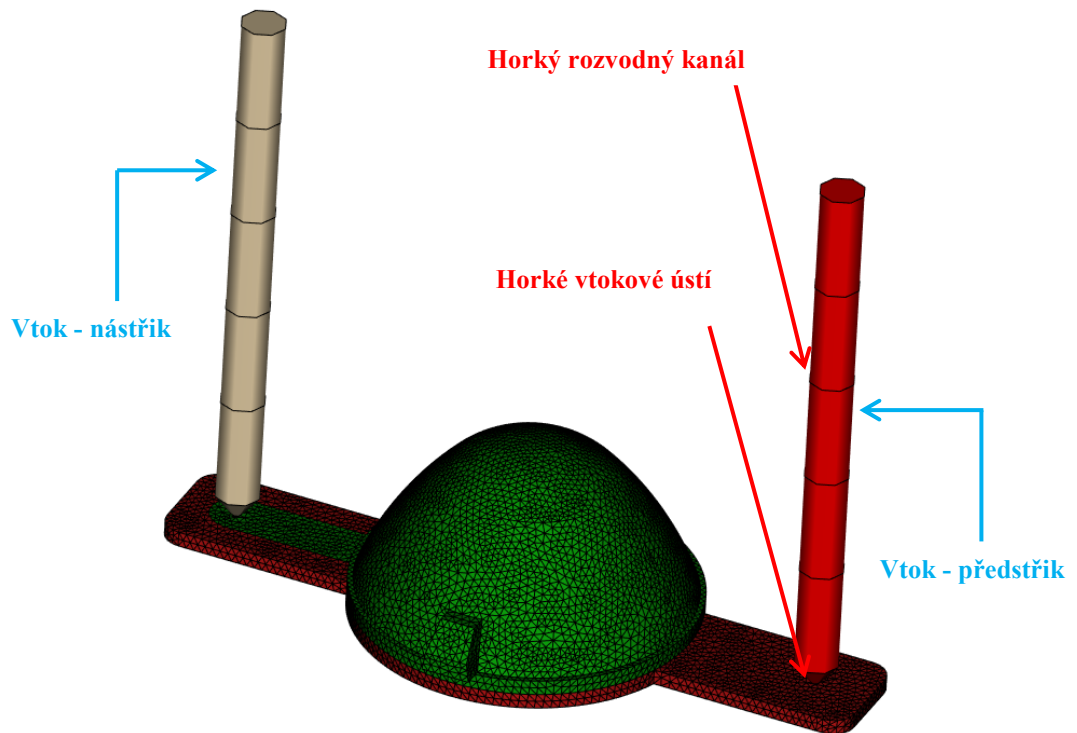
Obr. 51 Rozdělení čočky do dvou vrstev pro chlazení mimo formu

9.4.1 Vtokový a temperační systém

I v tomto případě byl použit temperační systém konformní, modifikace 1 a také pro temperaci předstříku byl použit stejný okruh jako v kapitole 9.3.1.

Definice kanálů pro vtokový systém:

- Horký rozvodný kanál (Hot runner): $D = 6 \text{ mm}$.
- Horké vtokové ústí (Hot gate): $D_{\text{start}} = 1,3 \text{ mm}$, $D_{\text{end}} = 6 \text{ mm}$.



Obr. 52 Síť vtokových kanálů vůči modelu

Manipulační plochy v tomto případě nahrazují studené rozvodné kanály, tak jako tomu bylo v předchozí analýze vícevrstvého vstřikování.

9.4.2 Procesní podmínky

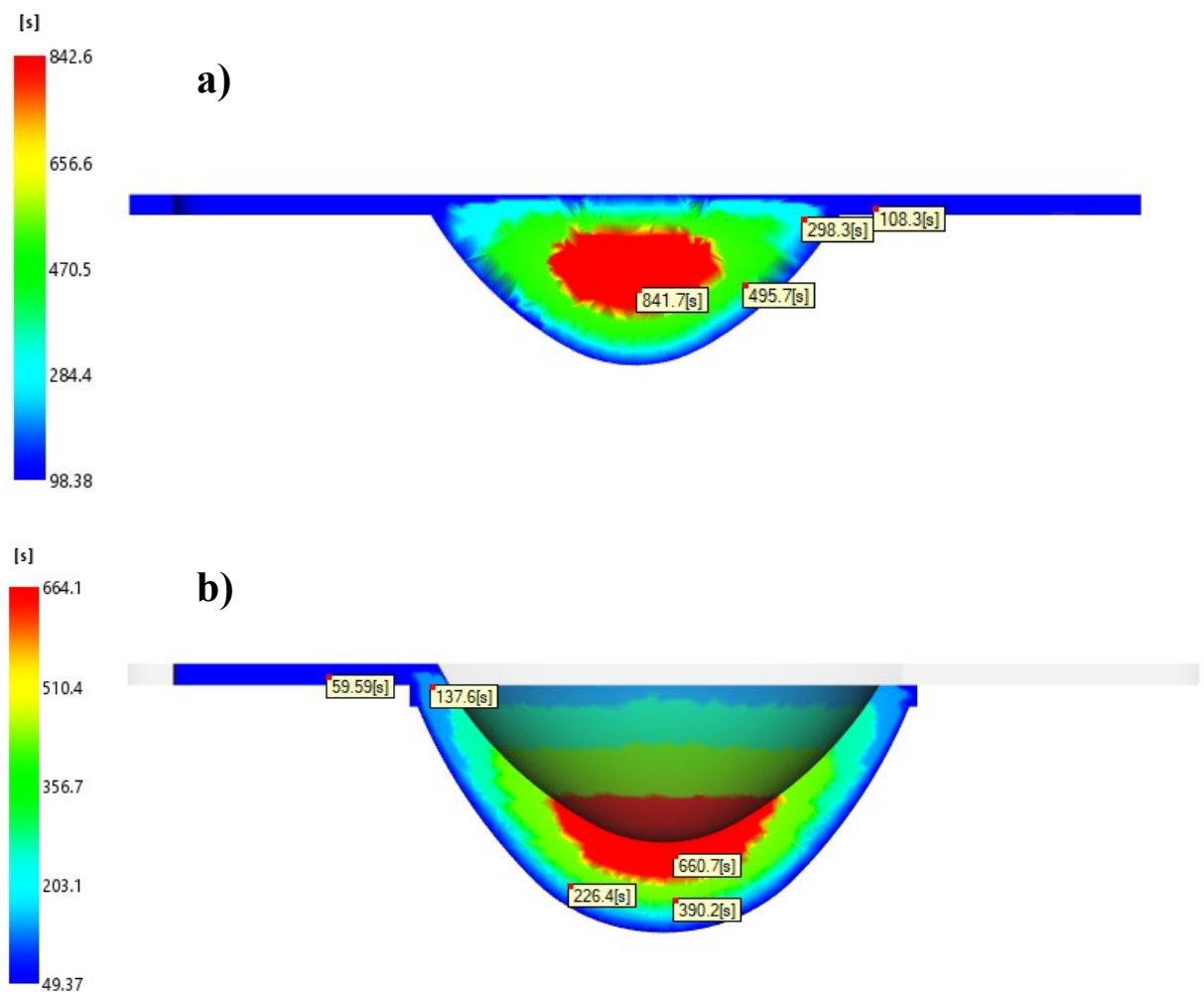
Postup provádění analýzy je totožný tak jako v kapitole 9.3.2 a nastavení procesní podmínky, tak jako u všech předešlých analýz vychází z nastavení v kapitole 9.1.2.

9.4.3 Výsledky analýzy

- **Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu (Time to reach ejection temperature, part)**

Čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty je zde téměř totožný jako v předešlé analýze vícevrstvého vstřikování. Jelikož se jedná o vícevrstvé vstřikování s ochlazováním mimo formu, je zde limitující hodnota času k dosažení vyhazovací teploty pro nástřik, nikoliv pro předstřík, jak tomu bylo v předchozím případě. Proces vstřikování probíhá následovně. Při otevření vstřikovací formy je do jedné z dutin umístěn předstřík. Následuje uzavření vstřikovací formy. Nyní proběhne samotné vstříknutí taveniny do dutiny pro výrobu

předstříku a do dutiny pro nástřík, ve které je již umístěn předstřík, který byl před svým umístěním ochlazován mimo formu. Následuje dotlak a chladnutí výrobku ve formě. Po uplynutí doby potřebné pro dosažení vyhazovací teploty nástříku, tedy 664 s což je 11 min a 4 s, dojde k otevření formy a odformování již hotové čočky tak také předstříku, u něhož nebylo dosaženo vyhazovací teploty v celém jeho objemu a bude umístěn k chladnutí mimo formu. Dále již chladný předstřík je umístěn opět do dutiny formy a proces se opakuje.

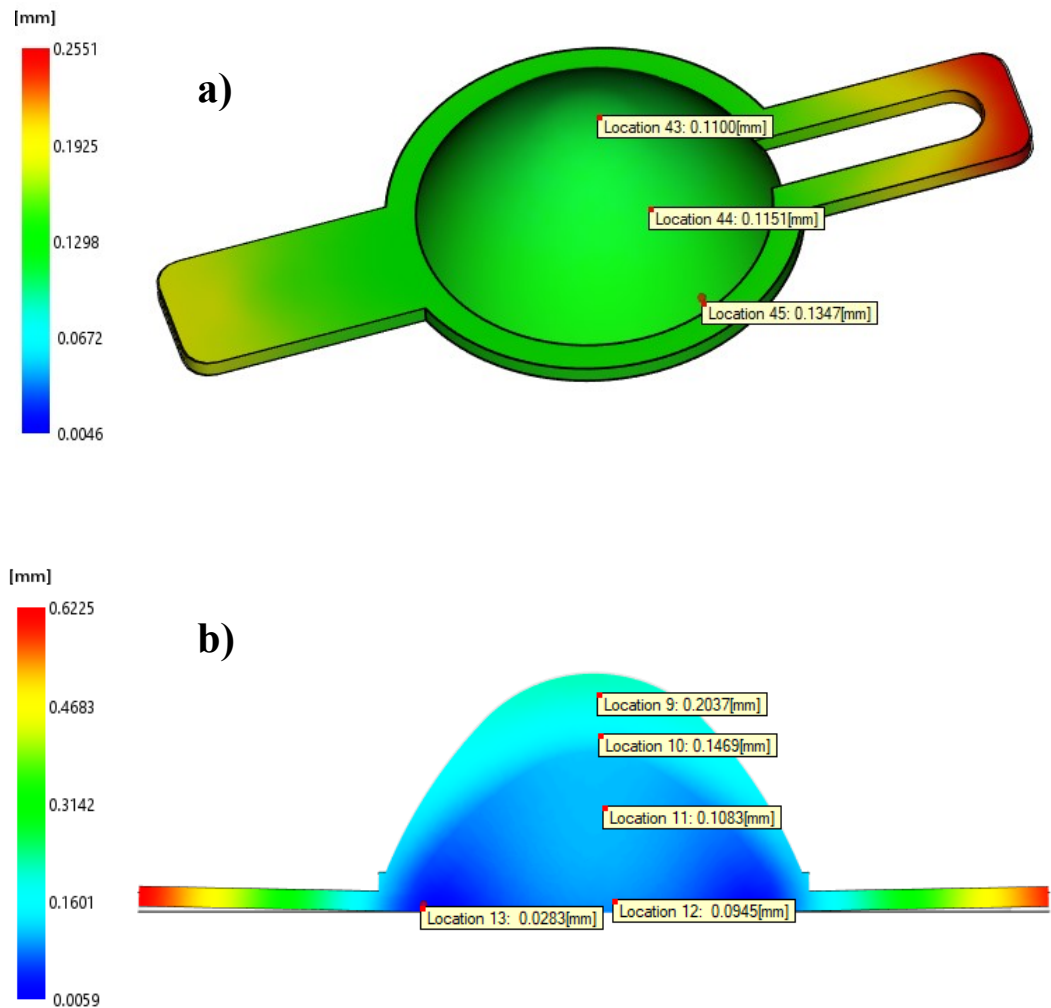


Obr. 53 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty a) předstříku, b) nástříku

- **Deformace od všech vlivů (Deflection, all effects)**

V případě tohoto způsobu vstřikování byly pro předstřík, který je zobrazen na obrázku (Obr. 54a) zjištěny deformace jejichž maximální hodnoty dosahují téměř až 0,26 mm. Ovšem tyto velké deformace jsou způsobeny na manipulačních plochách. Na funkční části předstříku se velikosti deformací pohybují kolem 0,12

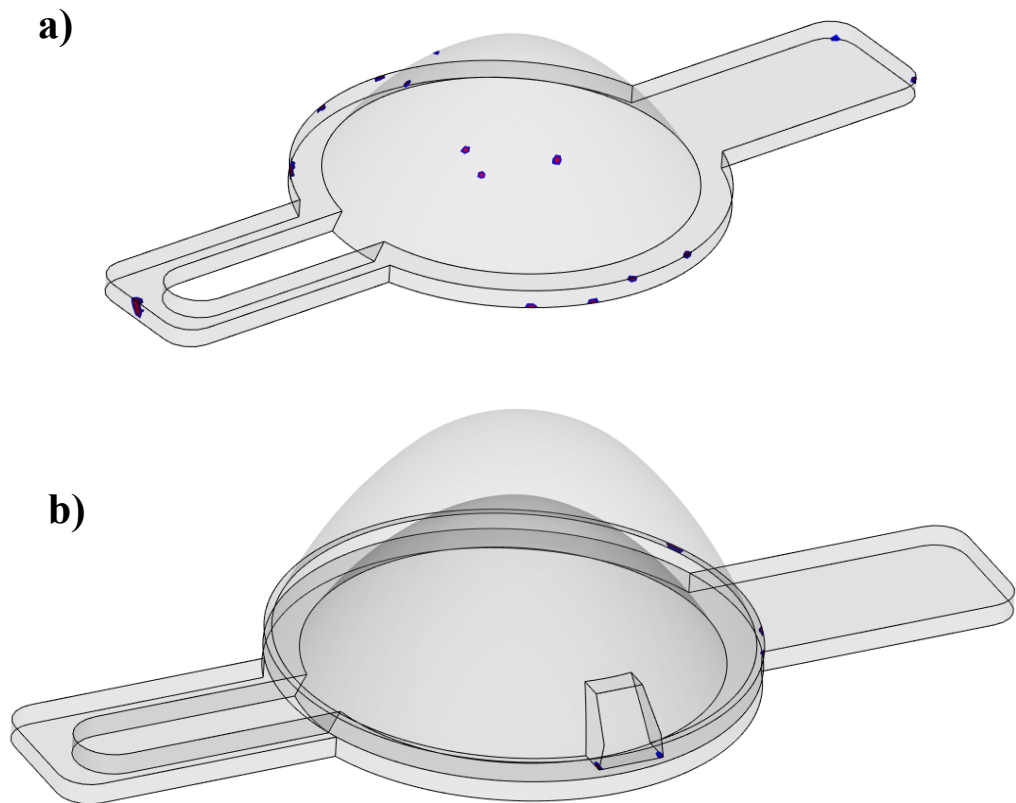
mm. Obrázek (Obr. 54b) popisuje vzniklé deformace po provedení nástřiku. Největšími deformacemi jsou opět ovlivněny oblasti manipulačních ploch, kde hodnota dosahuje 0,62 mm. Jelikož se nejedná o funkční části, je zde možno deformace zanedbat. Dále na funkční části nástřiku se maximální hodnota deformací pohybuje kolem 0,2 mm, které jsou lokalizovány na samotném vrcholu čochky. Směrem k ploché části čochky velikost vzniklých deformací klesá.



Obr. 54 Velikost vzniklých deformací a) předstříku, b) celé čočky

- **Vzduchové kapsy (Air traps)**

Možnost výskytu vzduchových kapes je nejdříve zobrazena opět pouze pro předstřík (Obr. 55a) a následně pro celou čočku, kde analyzovanou částí je zase pouze nástřík (Obr. 55b). Predikce těchto vzduchových kapes se velmi podobá předchozí analýze vícevrstvého vstřikování pro samotný předstřík i nástřík.



Obr. 55 Vzduchové kapsy a) předstřík, b) celá čočka

- **Studené spoje (Weld lines)**

I pravděpodobnost výskytu studených spojů je poměrně nízká tak jako u předchozí metody vícevrstvého vstřikování. Obrázek (Obr. 56a) znázorňuje studené spoje na předstříku a na obrázku (Obr. 56b) je znázorněna celá čočka, kde je pouze opět analyzovanou částí nástřik, na jehož funkční části nebyl zjištěn žádný výskyt studených spojů. Možnost studených spojů byla pouze odhalena na manipulačních plochách, kde nedochází k žádnému omezení funkce čočky.



Obr. 56 Studené spoje a) předstřík, b) celá čočka

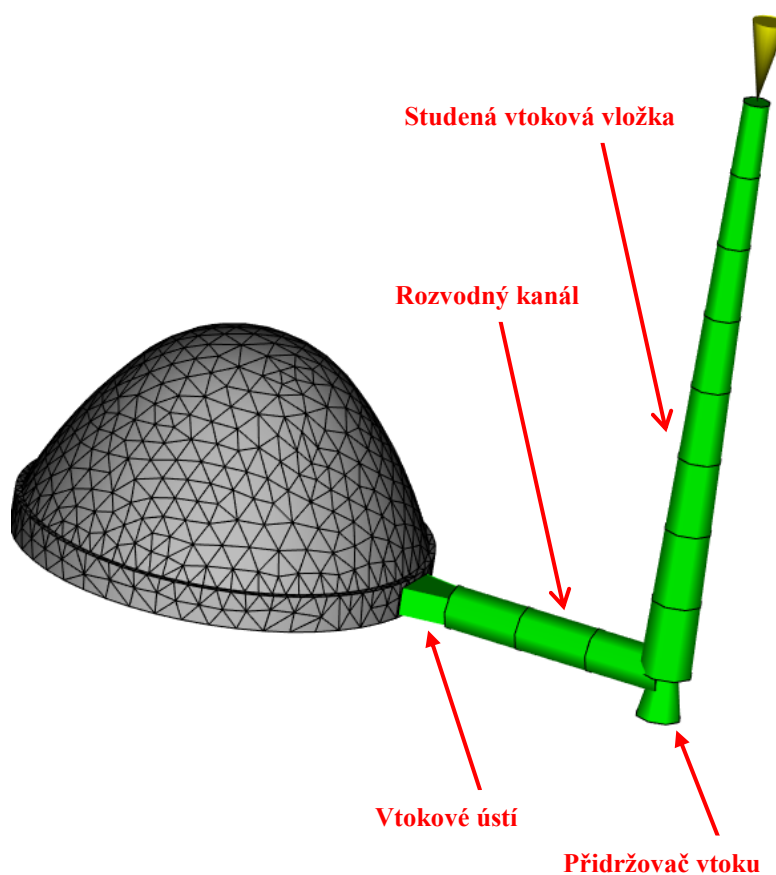
9.5 Vstřikování s dolisováním

9.5.1 Vtokový a temperační systém

Temperační systém je opět stejný jako v předchozích analýzách, tedy konformní temperační systém modifikace 1.

Definice kanálů pro vtokový systém:

- Studená vtoková vložka (Cold sprue): $D_{\text{start}} = 6 \text{ mm}$, $D_{\text{end}} = 3 \text{ mm}$.
- Rozvodný kanál (Cold runner): $D = 5 \text{ mm}$.
- Přidržovač vtoku (Cold runner): $D_{\text{start}} = 3 \text{ mm}$, $D_{\text{end}} = 5 \text{ mm}$.
- Vtokové ústí (Cold gate): $W_{\text{start}} = 4 \text{ mm}$, $W_{\text{end}} = 6 \text{ mm}$, $H_{\text{start}} = H_{\text{end}} = 3 \text{ mm}$.



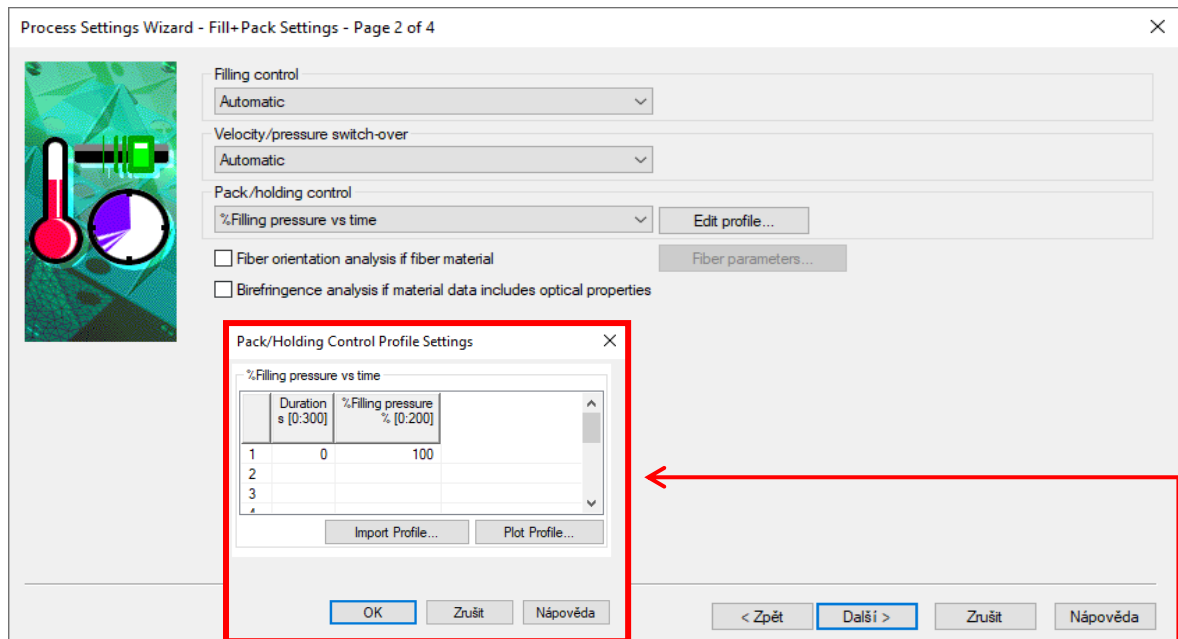
Obr. 57 Síť vtokového kanálu vůči modelu

9.5.2 Procesní podmínky

Jelikož se jedná o metodu vstřikování s dolisováním, bude se nastavení procesních podmínek lišit od klasické metody injekčního vstřikování. V tomto případě je dotlaková fáze nahrazena stlačením taveniny v dutině formy pohybem tedy dovřením levé poloviny vstřikovací formy, nebo její částí.

Co se týká temperačního média a volby procesních podmínek pro výpočet chladnutí (Cool Settings), lze konstatovat, že tato volba a nastavení zůstává totožná, jak je uvedeno v kapitole 9.1.2.

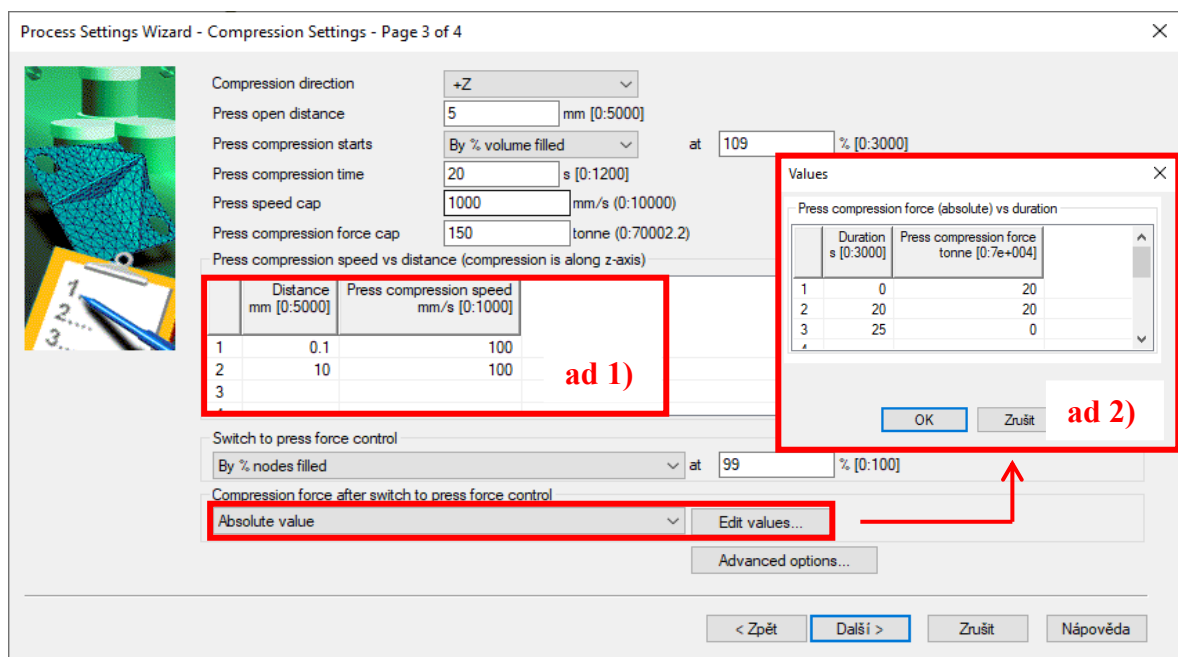
Část, která se již liší od původního nastavení, je část týkající se nastavení plnění a dotlakové fáze (Fill + Pack Settings).



Obr. 58 Procesní podmínky pro analýzu plnění a dotlaku

- Kontrola plnění: Automaticky
- Dotlaková fáze vypnuta

Další krok, který se u běžného vstřikování nenachází, je nastavení kompresní tedy dotlakové fáze (Compression Settings).



Obr. 59 Procesní podmínky pro analýzu dotlakové fáze

- Směrem komprese: +Z
- Velikost pootevření formy: 5 mm
- Start komprese dle zaplněného objemu: 109 %
- Maximální možná délka působení dotlaku 20 s
- Maximální možná rychlost uzavírání: 1000 mm/s
- Maximální možná síla při zavření: 150 t
- Rychlost komprese v závislosti na čase: ad 1)
- Přepnutí na uzavírací sílu dle zaplnění: 99 %
- Velikost kompresní síly v závislosti na čase: ad 2)

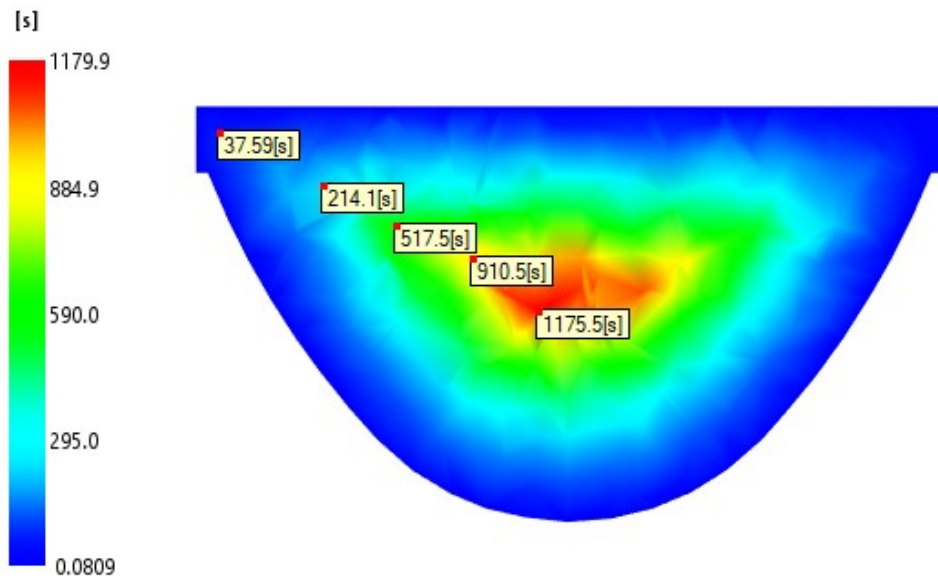
Proces vstřikování s dolisováním je velmi náročný na správné nastavení procesních podmínek. Tento proces zde závisí na mnoha proměnných, mezi které patří množství vstříknutého materiálu do pootevřené dutiny formy, rychlost uzavírání formy, velikost použité síly a čas působení této síly.

Poslední částí související s nastavením procesních podmínek je nastavení podmínek pro výpočet smrštění (Warp Settings). Nastavení těchto podmínek je shodné s nastavením uvedeným v kapitole 9.1.2.

9.5.3 Výsledky analýzy

- **Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu (Time to reach ejection temperature, part)**

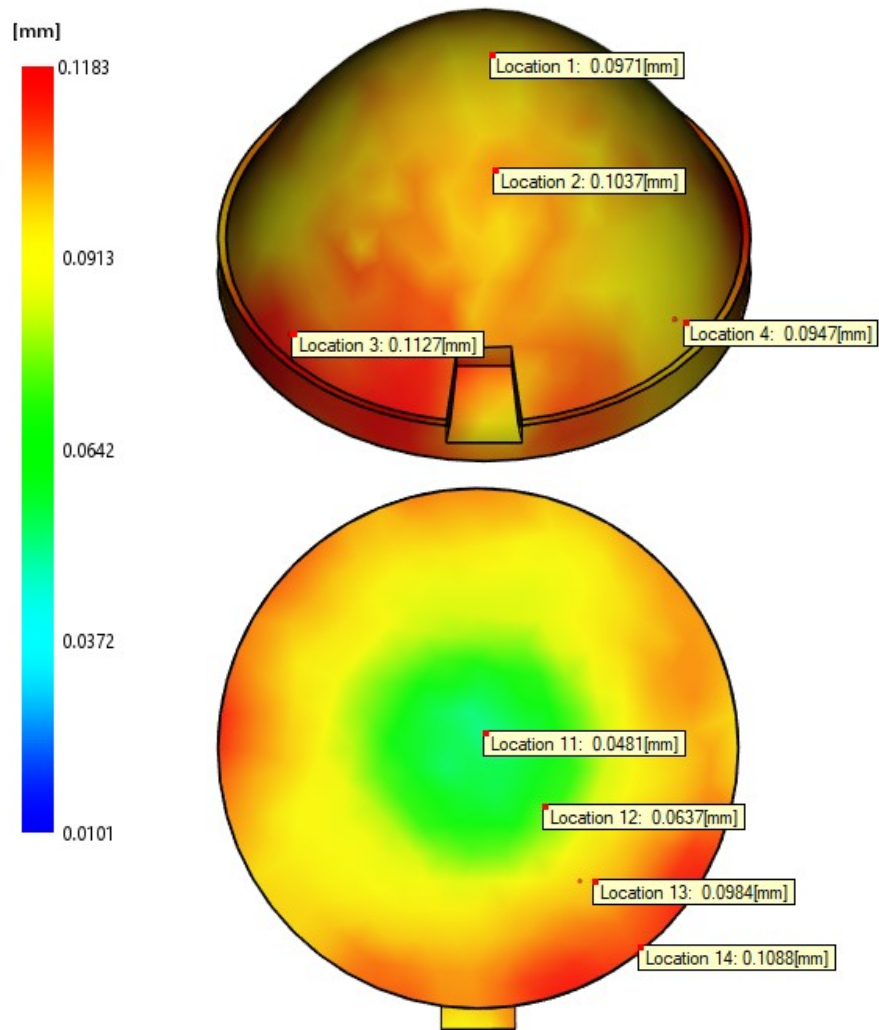
Při vstřikování s dolisováním byl zjištěn čas pro dosažení vyhazovací teploty téměř 1180 s, což je 19 min a 40 s. Vlivem kompresní fáze a přitlačení polymerní taveniny na relativně chladnou stěnu dutiny formy dojde k rychlejšímu ochlazení materiálu do větší hloubky ve srovnání s plněním celé dutiny při klasické metodě vstřikování. To lze pozorovat na obrázku (Obr. 59), kde modrá zóna dosahuje poměrně větší tloušťky.



Obr. 60 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu

- **Deformace od všech vlivů (Deflection, all effects)**

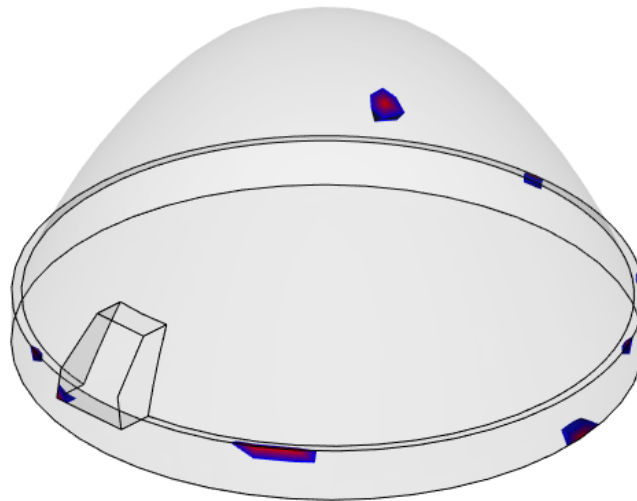
U metody vstřikování s dolisováním byly zjištěny nejmenší hodnoty deformací, které byly způsobeny vlivem smrštění materiálu a vlivem teploty. Maximální vzniklá hodnota deformace byla zjištěna téměř 0,12 mm. Z výsledků na obrázku (Obr. 60) lze vidět průběh těchto deformací, kde se prolínají žluté a červené oblasti (na povrchu součásti). Směrem ke středu čočky velikost deformací klesá, tedy tyto oblasti jsou znázorněny zelenou až modrou barvou. Lze říci, že vliv komprese ve srovnání s dotlakovou fází při plnění dutiny jedním nebo třemi vtoky, je v ohledu na vznik deformací příznivější. Jelikož je metoda vstřikování s dolisováním velmi náročná na nastavení procesních podmínek, je docela pravděpodobné, že lze jinou kombinací těchto parametrů a volbou hodnot docílit lepších výsledků analýzy.



Obr. 61 Velikost vzniklých deformací

- **Vzduchové kapsy (Air traps)**

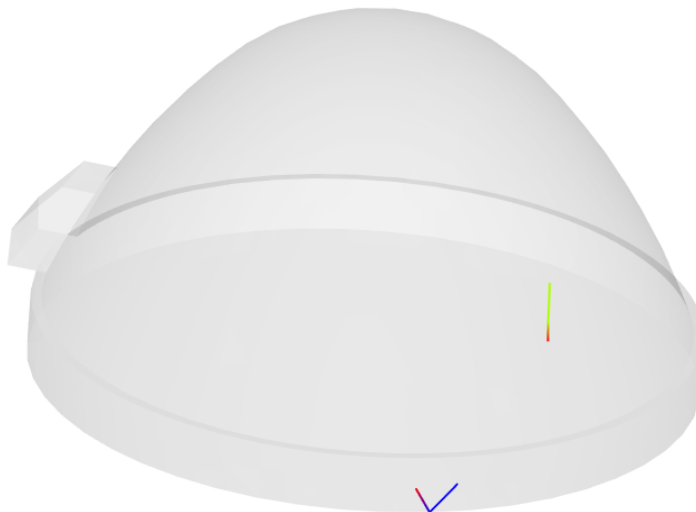
Pravděpodobnost výskytu vzduchových kapes je zobrazena na obrázku (Obr. 61), ze kterého je patrné, že jejich množství je převažující hlavně v oblasti rovinné plochy čočky, tudíž by mohlo dojít k odvodu vzduchu dělicí rovinou. Na konvexní části čočky byly taktéž predikovány místa pro vznik vzduchových kapes, k jejichž eliminaci by mohlo dojít vhodnějším nastavením procesních podmínek při nastavování dotlakové (kompresní) fáze.



Obr. 62 Vzduchové kapsy

- **Studené spoje (Weld lines)**

Výskyt studených spojů je u metody vstřikování s dolisováním velmi příznivý. Výsledek analýzy predikuje pouze dvě místa vzniku studených spojů, což je znatelný rozdíl v porovnání s analýzou, kde dutina formy byla plněna jedním nebo třemi vtoky.



Obr. 63 Studené spoje

9.6 Vyhodnocení analýz

9.6.1 Porovnání provedených tokových analýz

Tato kapitola se zabývá porovnáním a vyhodnocením provedených tokových analýz. V tabulce (Tab. 3) jsou pro porovnání uvedeny jednotlivé výsledky analýz, tedy čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty dílu, maximální velikost zjištěné deformace, množství výskytu vzduchových kapes a studených spojů.

V případě dvouvrstvého vstřikování jsou výsledky uvedeny jak pro předstřík tak také pro nástřík (předstřík / nástřík), kde rozhodující hodnota pro setrvání výrobku ve formě a velikost vzniklé deformace je zvýrazněna červenou barvou.

Co se týká hodnocení výskytu vzduchových kapes a studených spojů, je toto množství výskytu hodnoceno číselně od 1 do 5, kde hodnota 1 představuje nejmenší výskyt a hodnota 5 představuje naopak největší výskyt vzduchových kapes nebo studených spojů.

Tab. 3 Výsledky jednotlivých analýz

Typ analýzy	Čas potřebný k vyhození	Maximální zjištěná deformace	Výskyt vzduchových kapes	Výskyt studených spojů
Plnění dutiny formy jedním vtokem	1619 s (26 min 59 s)	0,20 mm	3	5
Plnění dutiny formy třemi vtoky	1619 s (26 min 59 s)	0,20 mm	4	5
Dvouvrstvé vstřikování předstřík / nástřík	842 s (14 min 2 s) / 664 s (11 min 4 s)	0,15 mm / 0,18 mm	3/1	3/1
Dvouvrstvé vstřikování (dochlazení mimo formu) předstřík / nástřík	843 s (14 min 3 s) / 664 s (11 min 4 s)	0,13 mm / 0,20 mm	3/1	3/1
Vstřikování s dolisováním	1180 s (19 min 40 s)	0,12 mm	2	2

Na základě tohoto porovnání výsledků byla pro výrobu zadaného tlustostěnného optického prvku zvolena varianta dvouvrstvého vstřikování s dochlazením mimo formu. Pro tuto metodu je čas potřebný k vyhození nejkratší, což má pozitivní význam na ekonomiku

výroby. Velikost vzniklých deformací je srovnatelná s plněním dutiny formy jedním a třemi vtoky. Predikce výskytu studených spojů a vzduchových kapes je v tomto případě vyhovující.

9.6.2 Porovnání použitých materiálů

Ze všech prováděných tokových analýz byla na základě výsledků a srovnání zvolena analýza vícevrstvého vstřikování s dochlazením mimo formu. Následně se tato zvolená analýza provedla pro pět vybraných materiálů. Jedná se o PMMA, PC, PS, COC a PEI, kde konkrétní typy těchto materiálů jsou uvedeny v kapitole 8.1.

Srovnání jednotlivých materiálů bylo provedeno na základě času potřebného pro dosažení vyhazovací teploty a dále na základě velikosti deformací. Hodnoty těchto výsledků jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4). Výsledek pro každý z materiálů je uveden jak pro předstřík tak také pro nástřík (předstřík / nástřík), kde rozhodující čas pro dosažení vyhazovací teploty je pro nástřík, který je opět v tabulce pro zřetelnost označen červenou barvou. Predikce míst pro vznik vzduchových kapes a studených spojů již nejsou dále hodnoceny, protože u všech materiálů je jejich výskyt stejného charakteru jako pro materiál PMMA.

Tab. 4 Srovnání výsledků analýz pro vybrané materiály

	PMMA	PC	PS	COC	PEI
Čas potřebný k vyhození předstřík / nástřík	842 s / 664 s (14 min 2 s / 11 min 4 s)	421 s / 326 s (7 min 1 s / 5 min 26 s)	435 s / 434 s (7 min 15 s / 7 min 14 s)	649 s / 434 s (10 min 49 s / 7 min 14 s)	401 s / 247 s (6 min 41 s / 4 min 7 s)
Velikost deformací předstřík / nástřík	0,13 mm / 0,20 mm	0,19 mm / 0,28 mm	0,13 mm / 0,20 mm	0,16 mm / 0,22 mm	0,18 mm / 0,27 mm

Z těchto výsledků jsou zřejmé dva extrémy. Jeden z nich představuje vstřikování materiálu PMMA a druhý naopak PEI. Pro materiál PMMA byla zjištěna nejdelší doba pro dosažení vyhazovací teploty a to konkrétně 11 min 4 s. U tohoto materiálu byla zjištěna deformace dosahující velikosti 0,2 mm. Materiál PEI představuje druhý extrém, u něhož byla zjištěna nejkratší doba pro dosažení vyhazovací teploty, která činí 4 min 7 s, přičemž zde deformace dosahuje hodnoty 0,27 mm. Jelikož procesní podmínky byly voleny pro všechny analýzy stejně, bylo by možné jejich změnou pro každý materiál docílit příznivějších výsledků.

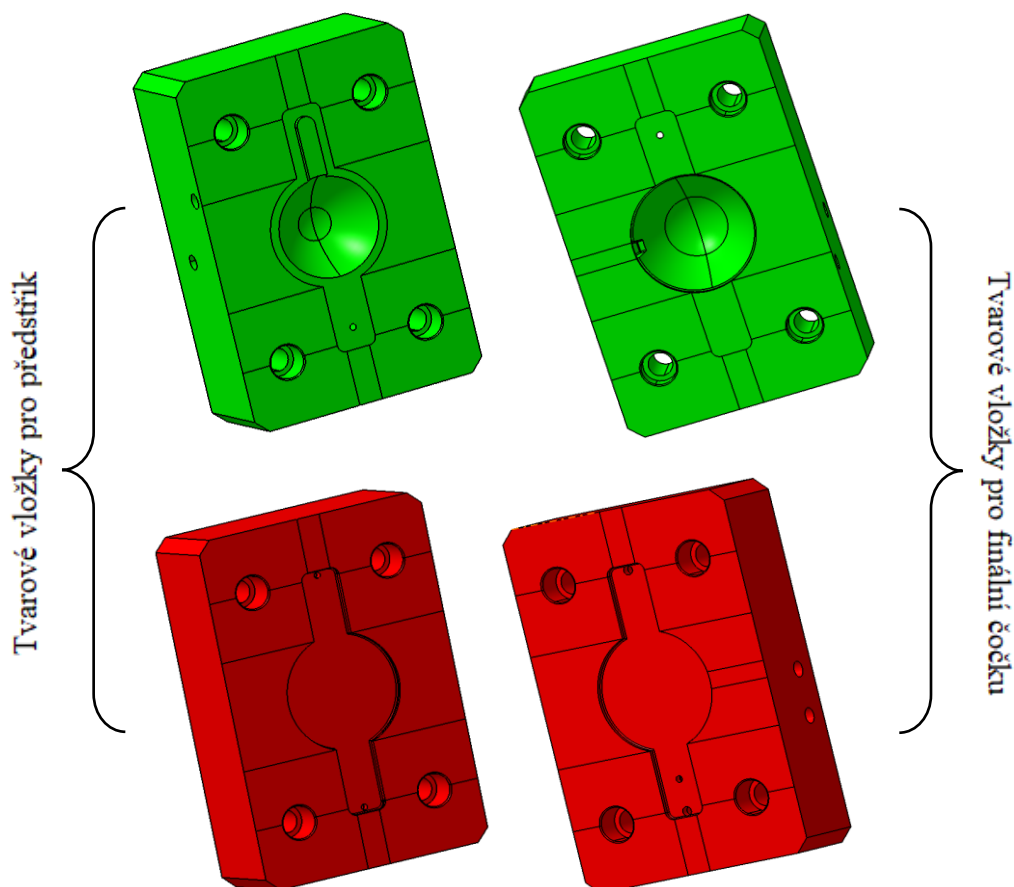
10 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Na základě provedených analýz v kapitole 9 byla navržena pro nejpříznivější analýzu vstříkovací forma. Návrh je tedy zhotoven pro metodu dvouvrstvého vstříkovaní s dochlazením mimo formu.

Konstrukční návrh vstříkovací formy byl proveden pomocí softwaru Catia V5R19. Při konstrukci bylo snahou použít co nejvíce normalizovaných dílů. Byly využity knihovny HASCO a FESTO.

10.1 Tvarové části

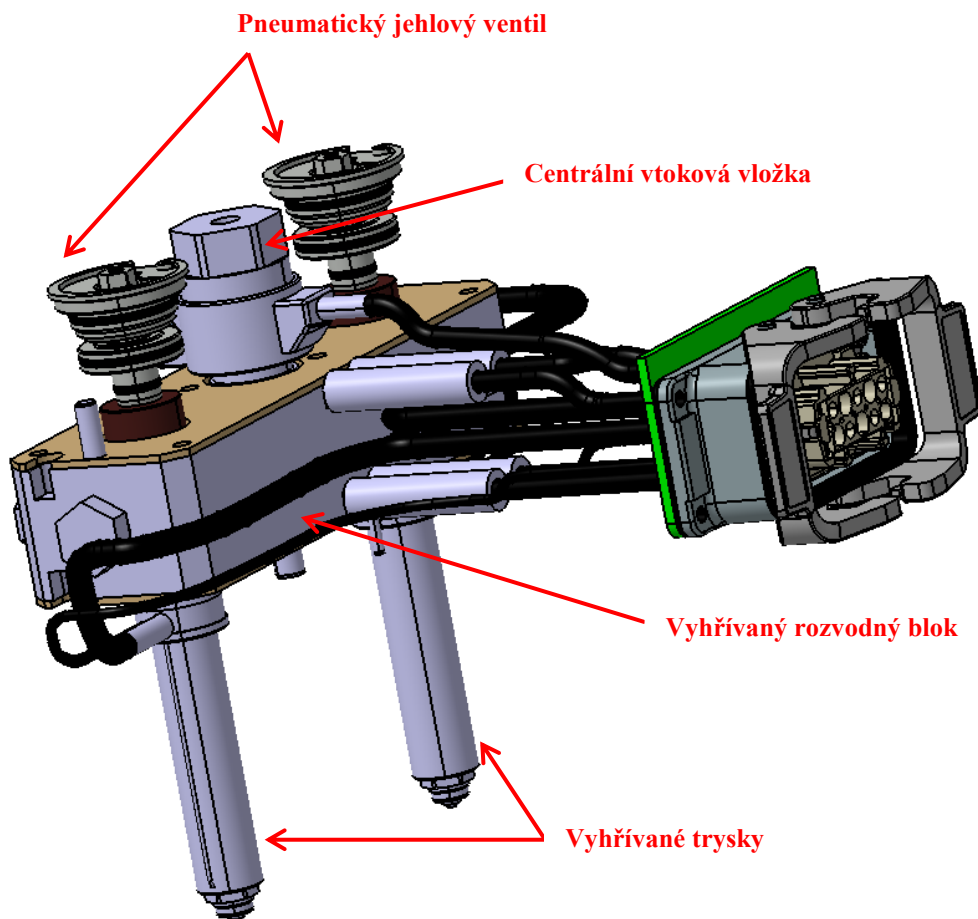
Provedení formy je jednonásobné, avšak obsahuje dvě dutiny. První dvojice tvarových vložek tvoří dutinu pro předstřík a druhá dvojice tvarových vložek tvoří dutinu pro získání finální čočky. Do této druhé dutiny je vložen již zhotovený předstřík a zbylé místo je vyplněno vstříkнутou taveninou, je tedy proveden nástřik druhé vrstvy, čímž je docíleno získání finálního tvaru čočky. Tvarové vložky jsou vsazeny do pravé či levé tvarové desky, kde je každá z nich ukotvena pomocí čtyř šroubů.



Obr. 64 Tvarové vložky vstříkovací formy

10.2 Vtokový systém

Pro tento případ vstřikování byl zvolen vyhřívaný vtokový systém. Jelikož během vstřikování dochází k plnění dvou dutin, které nejsou shodné, bylo pro řízení plnění každé z dutin použito uzavírání trysek. Konkrétně byl zvolen pneumatický jehlový uzávěr typu H107910, jehož montáž je provedena přímo do pravé upínací desky. Vzduch je přiváděn k ventilům vrtanými kanály v upínací desce. Kanály jsou zakončeny rychlospojkami. Zvolený rozvodný blok je typu H106, který je osazen dvěma vyhřívanými tryskami typu Z3345 a centrální vtokovou vložkou Z1055. Všechny tyto komponenty jsou z katalogu HASCO, kromě rychlospojek pro přívod vzduchu, které jsou od výrobce FESTO.

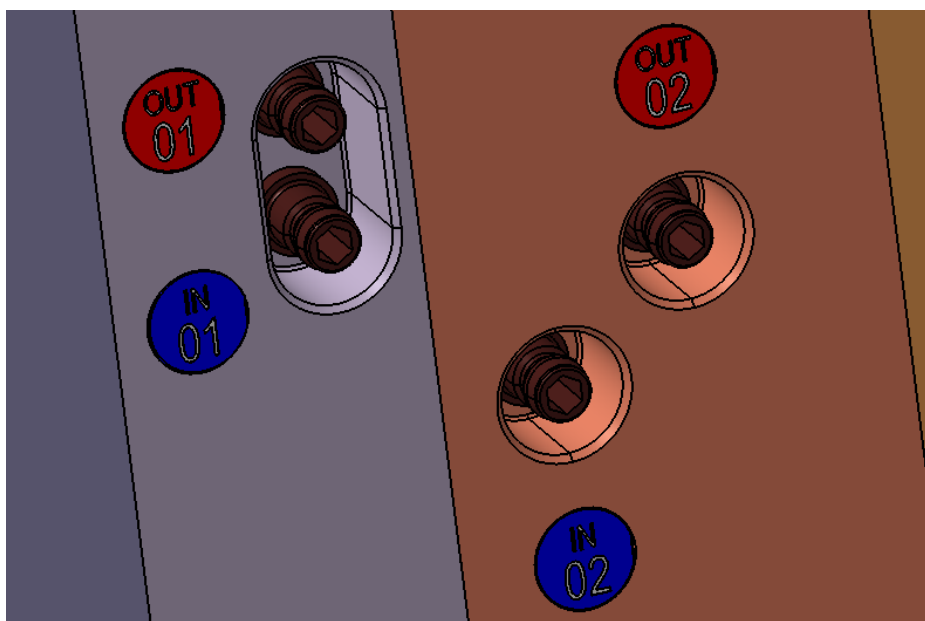


Obr. 65 Vyhřívaný vtokový systém včetně pneumatických ventilů

10.3 Temperační systém

Temperační kanály při konstrukci vstřikovací formy byly zvoleny totožné, jako v kapitole 9.3.1, kde se při analýzách způsob této temperace osvědčil. Jelikož se jedná o konformní

způsob temperace, jsou tvarové vložky zhotovené technologií DMLS, jelikož konvenčními způsoby obrábění by nebylo možno dosáhnout požadovaných tvarů kanálů. Materiál tvarových vložek je ocel 1.2709, která je vhodná pro DMLS technologii a také vyhovuje vlastnostem, které jsou potřebné pro tvarové vložky. Temperační kanály jsou na výstupu zakončeny rychlospojky s vnitřním šestihranem. Jednotlivé vstupy a výstupy temperace jsou označeny barevnými žetony. Přechody kanálů mezi deskami a tvarovými vložkami jsou utěsněny pomocí o-kroužků.



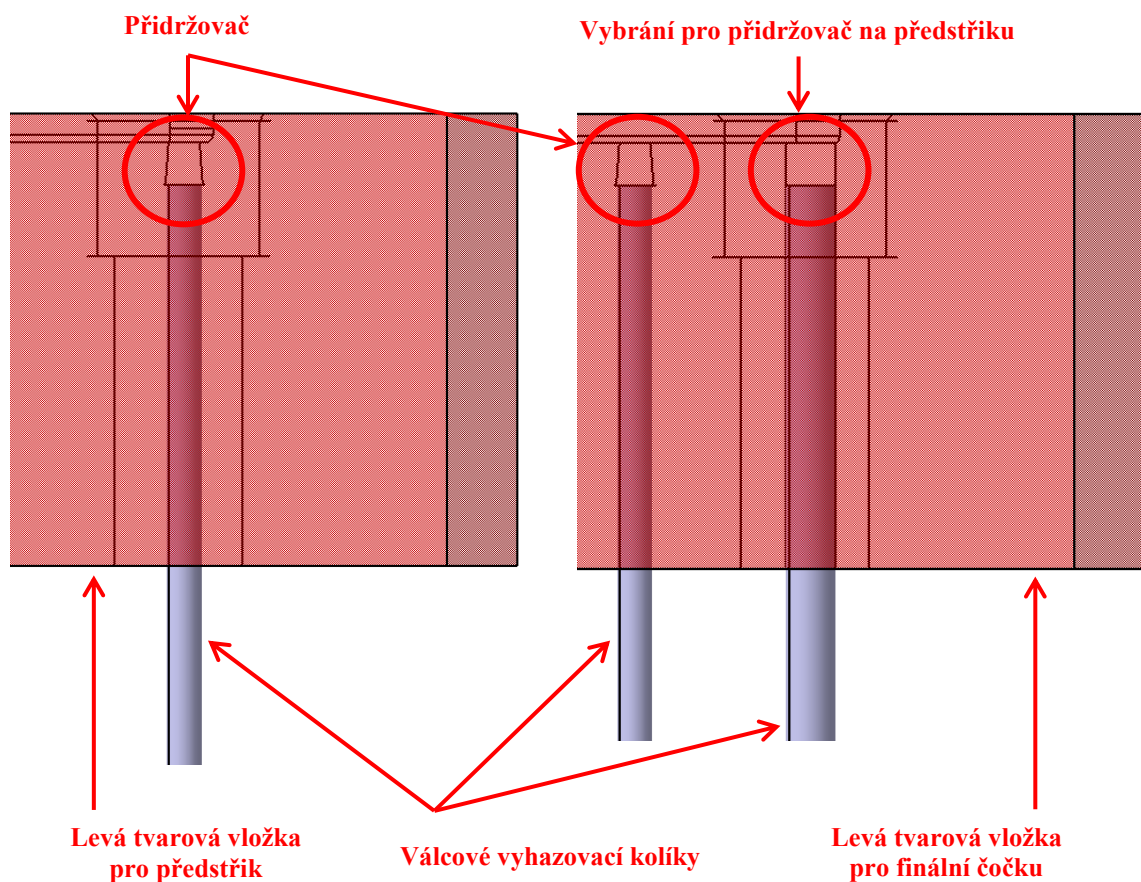
Obr. 66 Vyústění a označení temperačních kanálů

Každá tvarová vložka obsahuje svůj temperační okruh, z důvodu, že dochází k plnění rozdílných tvarových dutin. Tímto způsobem je možno nastavovat teplotu temperačního média pro dutinu předstříku a dutinu finální čočky nezávisle na sobě. Nevýhodou je ovšem ekonomická stránka, protože je potřeba čtyř temperačních jednotek.

10.4 Odformování výrobku

Odformování předstříku i finální čočky je uvažováno pomocí robotického ramene se současným působením válcových vyhazovacích kolíků. Uvažované rameno vybaveno podtlakovou pumpou s přísavkami uchopí jak předstřík tak také zhotovenou čočku za manipulační plochy a se současným dopředným pohybem vyhazovacích kolíků dojde k odformování. Robotické rameno slouží i pro zakládání předstříků mezi tvarové vložky

sloužící ke zhotovení finálního produktu – čočky. Aby bylo docíleno přidržení obou výstřiků na levé straně vstřikovací formy, jsou na každém z tvárníku zhotoveny přidržovače, jejichž podkos umožní požadované odformování. Proti těmto přidržovačům působí právě zmíněné válcové vyhazovače. Průměr válcových vyhazovačů pro odformování přidržovače je 2,5 mm. Průměr vybrání pro přidržovač na předstříku v tvarové vložce levé je 3 mm, proto i vyhazovač pod tímto vybráním byl zvolen o průměru 3 mm.



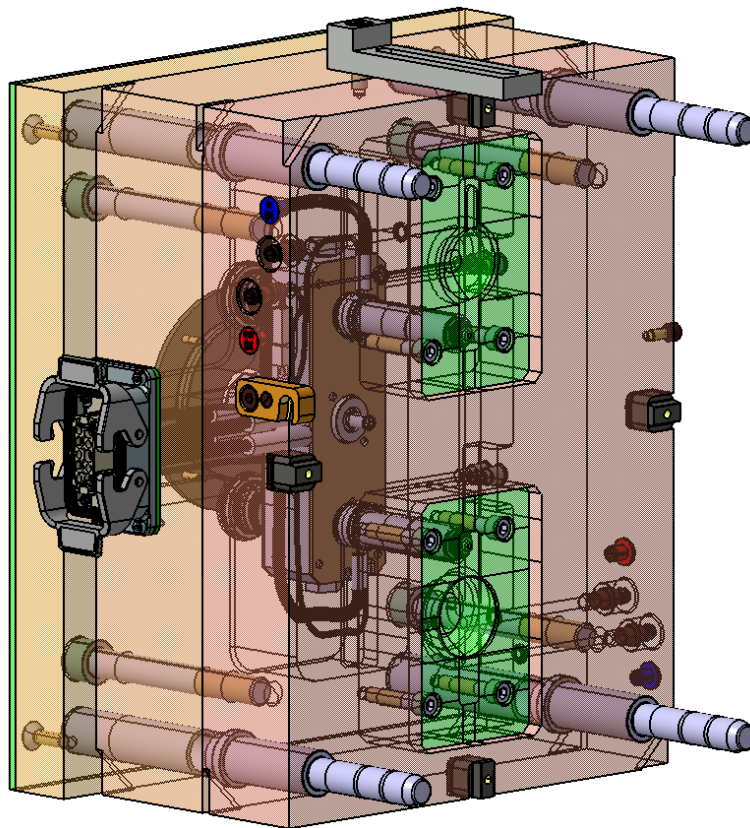
Obr. 67 Volba a rozložení vyhazovacích kolíků

10.5 Vodící, středící a upínací prvky

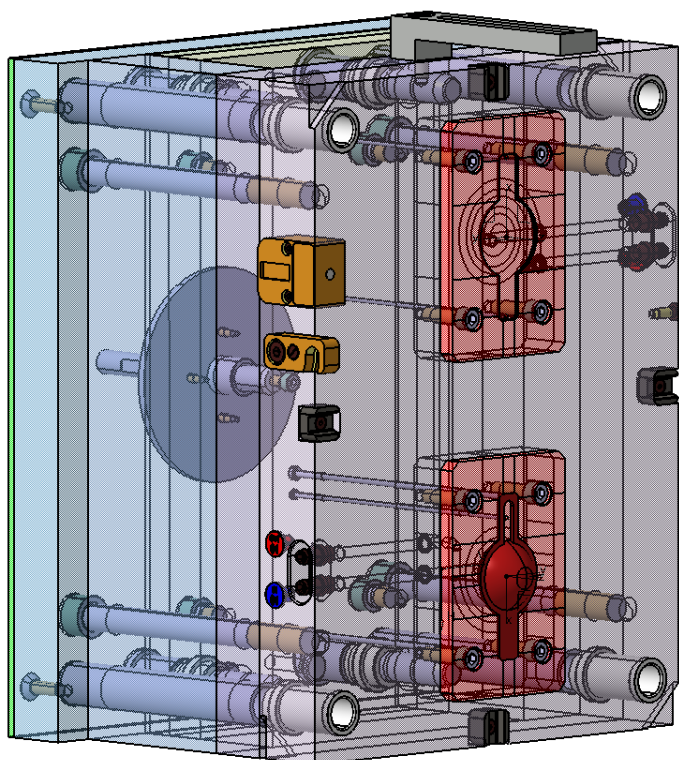
Konstrukční návrh vstřikovací formy se odvíjí hlavně od normalizovaných částí, jejichž CAD data poskytují společnosti zabývající se těmito normáliemi. Desky, ze kterých se vstřikovací forma skládá, jsou vůči sobě vystředěny pomocí vodících čepů, vodících pouzder a středících pouzder. Vodící pouzdra a vodící čepy jak již název napovídá, představují také vodící části vstřikovací formy. Následně jsou tyto desky sešroubovány ve

funkční celky – pravou polovinu, levou polovinu a vyhazovací část. Pravá a levá polovina vstřikovací formy jsou vůči sobě vystředěny pomocí středících kostek. Vůči stroji je forma vystředěna pomocí středících kroužků, kterým je opatřena jak pravá tak i levá strana. Forma je dále vybavena transportním můstkem a transportními pojistkami, které drží formu pohromadě během manipulace. Na levé části formy je umístěno počítadlo zdvihů.

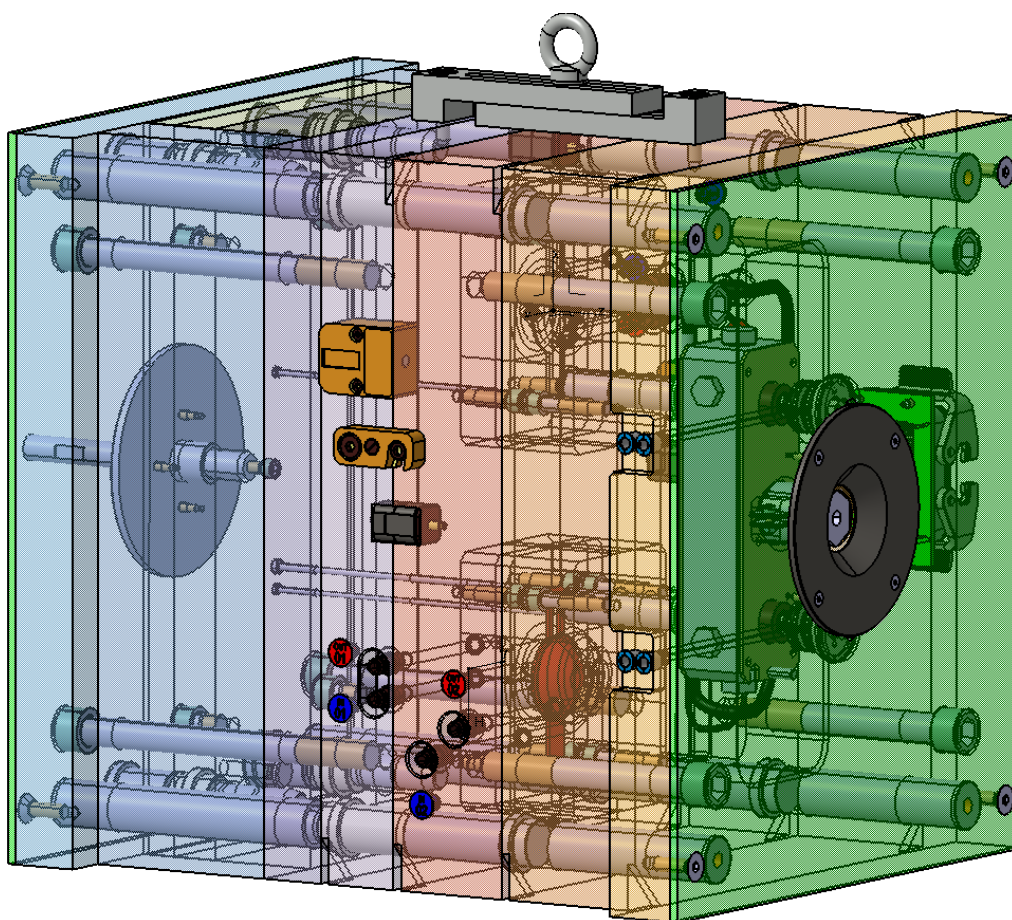
Provedený konstrukční návrh je podložen výkresem sestavení vstřikovací formy včetně kusovníku a dále je ve výkresové dokumentaci zobrazen pohled na levou a pravou stranu formy včetně naznačení jednotlivých řezů.



Obr. 68 Náhled na pravou polovinu vstřikovací formy



Obr. 69 Náhled na levou polovinu vstřikovací formy včetně vyhazovací části



Obr. 70 Náhled na kompletní sestavu vstřikovací formy

10.6 Volba vstřikovacího stroje

Vzhledem k technologickým parametrům a rozměrům vstřikovací formy byl zvolen vstřikovací stroj od výrobce ARBURG, konkrétně typ **ALLROUNDER 420 C GOLDEN EDITION – 1000 – 290 (30)**. Tabulka (Tab. 5) uvádí důležité parametry zjištěné z analýzy nebo přímo z konstrukčního návrhu vstřikovací formy, sloužící k porovnání s parametry uvedenými v katalogu zvoleného vstřikovacího stroje. Na základě toho porovnání lze konstatovat, že zvolený vstřikovací stroj vyhovuje navržené formě.

Tab. 5 Porovnání zjištěných parametrů a parametrů vstřikovacího stroje

		Zjištěné parametry	Parametry vstřikovacího stroje
Rozměr formy (šířka x výška x délka) / Vzdálenost mezi sloupky	[mm]	346 x 396 x 424	420 x 420
Velikost uzavírací síly	[kN]	43	1000
Vstřikovací tlak	[bar]	240	2500
Objem vstřikovaného materiálu	[cm ³]	26	106
Minimální délka vstřikovací formy	[mm]	-	250
Průměr středícího kroužku	[mm]	-	125H7
Průměr šneku	[mm]	-	30

ZÁVĚR

Zpracování této diplomové práce se odvíjelo od jednotlivých bodů zmíněných v oficiálním zadání práce. Jsou zde obsaženy dvě hlavní kapitoly a to teoretická, která se zaměřuje na problematiku vstřikování optických prvků a praktická, osahující analýzy a konstrukční návrh vstřikovací formy.

V části praktické nejvíce prostoru zaujímají analýzy vstřikování zadaného tlustostěnného prvku. Byly zvoleny materiály, pro které se budou analýzy provádět a dále byly zvoleny samotné metody vstřikování zadaného dílu. Jednalo se o plnění dutiny jedním vtokem, plnění dutiny formy třemi vtoky současně, dále byla aplikována metoda vícevrstvého vstřikování, konkrétně dvouvrstvého a dvouvrstvého vstřikování s dochlazením mimo vstřikovací formu. Poslední metoda vstřikování, která byla zvolena, je vstřikování s kompresní fází, tedy s dolisováním. První ze zmíněných analýz, sloužila také jako referenční analýza pro zvolení vhodného temperačního systému. Jednotlivé analýzy byly mezi sebou porovnávány na základě času pro dosažení vyhazovací teploty, množství a velikosti vzduchových kapes, dále na základě množství a orientaci studených spojů a poslední výsledek se týkal velikosti vzniklých deformací. Tyto analýzy byly prováděny pro materiál PMMA. Jednotlivé výsledky z každé analýzy byly zaznamenány do tabulky a bylo provedeno vyhodnocení. Na základě výsledků byla jako nejpříznivější metoda zvolena metoda dvouvrstvého vstřikování s dochlazením mimo formu. Pro tuto metodu se následně provedl výpočet i pro ostatní materiály, tedy pro PC, PS, PEI a COC. Z porovnání výsledků bylo zjištěno, že čas pro dosažení vyhazovací teploty je nejdelší u materiálu PMMA a nejkratší pro materiál PEI. Za zvážení by určitě také stálo provedení analýzy pro třívrstvé vstřikování.

Následně byl pro metodu vícevrstvého vstřikování proveden konstrukční návrh vstřikovací formy. Byla zvolena jednonásobná forma, která se však skládá ze dvou dutin. Jedna slouží pro provedení předstříku a druhá slouží pro umístění předstříku a provedení nástříku, čímž je docíleno finálního tvaru čočky. Vtokový systém byl zvolen vyhřívaný s jehlovým uzavíráním trysek pomocí pneumatických ventilů, aby bylo možno řídit vstřikování do každé dutiny nezávisle na sobě. Návrh vstřikovací formy je podložen výkresem sestavení včetně kusovníku a výkresem obsahující pohled do pravé a levé poloviny vstřikovací formy. Byl zhotoven i výkres vstřikované součásti, tedy čočky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141.
- [2] VLČEK, Jiří; MAŇAS, Miroslav. *Aplikovaná reologie*. 1. vydání – Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001. 144s. ISBN 8073180391.
- [3] MCMURRY, John. *Organic chemistry*. 6th ed. Belmont, CA: Thomson-Brooks/Cole, 2004, 1 v. (various pagings). ISBN 0534390013.
- [4] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 8085920727.
- [5] PEACOCK, A. J. a A. R. CALHOUN. *Polymer chemistry: properties and applicati-ons*. Cincinnati, Ohio: Hanser Gardner Publications, c2006, xix, 397 s. ISBN 9783446222830.
- [6] THOMAS, Sabu a P. M., Visakh P. M., VISAKH. *Handbook of engineering and specialty thermoplastics*. Hoboken: Wiley, c2011,xxi, 538 s. ISBN 9780470639269.
- [7] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 9788073002503.
- [8] BEAUMONT, John P. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2007, xvi, 308 s. ISBN 9781569904213.
- [9] KENNEDY, Peter K. *Practical and scientific aspects of injection molding simulation*. Eindhoven: Eindhoven: Technische Universiteit, 2008. ISBN 978-90-386-1275-1.
- [10] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování*. Brno: Code Creator, s.r.o., 2016. ISBN 978-80-88058-74-8.
- [11] 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.

- [12] CHEN, Shia-Chung a Lih-Sheng TURNG, ed. *Advanced injection molding technologies*. Munich: Hanser Publishers, 2019, xv, 426 s. Progress in polymer processing (PPP) series. ISBN 9781569906033.
- [13] MCKEEN, Laurence W. *The effect of UV light and weather on plastics and elastomers*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013, xi, 388 s. PDL handbook series. ISBN 9781455728510.
- [14] OSSWALD, Tim A. a Natalie RUDOLPH. *Polymer Rheology, Fundamentals and Applications*. Munich: Hanser Publishers, 2013. ISBN 978-1-56990-517-3.
- [15] JANOŠTÍK, Václav. *Vliv pigmentů na vlastnosti plastového výrobku*. Zlín, 2019. Teze disertační práce. Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická. Vedoucí práce Michal Staněk.
- [16] MALKIN, Aleksandr Jakovlevič a Avraam I. ISAYEV. *Rheology: concepts, methods, and applications*. 3rd edition. Toronto: ChemTec Publishing, [2017], xiv, 486 s. ISBN 9781927885215.
- [17] EYERER, Peter. *Polymers - Opportunities and Risks I: General and Environmental Aspects*. Springer, 2010. ISBN 9783540884170.
- [18] BIRON, Michel. *Thermoplastics and thermoplastic composites*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier/WA, 2013, 1 online zdroj (xxvii, 1044 pages). PDL handbook series. ISBN 9781455730353. Dostupné také z: <http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpTTCE0001>
- [19] ROSATO, Dominick V. a Marlene G. ROSATO. *Injection Molding Handbook: Edition 3*. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 9781461545972.
- [20] KINGSLAKE, Rudolf a R. Barry JOHNSON. *Lens design fundamentals*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2010, 1 online zdroj (xix, 549 pages). ISBN 9780080921563. Dostupné také z: http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpLDFE0007/lens_design_fundamentals_2nd_edition
- [21] Polymethylmetakrylát (PMMA) - PLEXISKLO. *Koplast* [online]. Jedovnice [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>

- [22] MAIER, Christian, Josef GIESEAU a Georg STEINBICHLER. Make more efficient the production: Thick-walled parts. *Plastix-World* [online]. Austria, 2014 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.plastix-world.com/make-more-efficient-the-production/>
- [23] SOVA, Miloš. Polystyrén standardní. *TECHportal.cz* [online]. Verlag Dashöfer, 2015 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/33/polystyren-standardni-ps-gpps-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EhIUR5OAm__zjI7ygF8_ko/
- [24] HALAŠKA, Petr. Vliv reziduálních napětí na kvalitu vstřikovaných dílů. *PlasticPortal* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/vliv-rezidualnich-napeti-na-kvalitu-vstrikovanych-dilu/c/1713/>
- [25] SASTRI, Vinod R. *Plastics in medical devices: properties, requirements, and applications*. 2nd ed. Burlington: Elsevier Science, [2013], 1 online zdroj (xvii, 305 pages). Plastics Design Library. ISBN 9780323265638. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781455732012>
- [26] Compression Moulding Technology. *Sumitomo (SHI) DEMAG* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.sumitomo-shi-demag.eu/processes/compression-moulding.html>
- [27] Hesitation. *Santa Clara University The Jesuit University in Silicon Valley* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/trouble/hesitate/f2000001.htm
- [28] Chlazení forem aplikací konformního chlazení. *PlasticPortal* [online]. Innomia, 2010 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/chlazeniform-aplikaci-konformniho-chlazen.html/c/260/>
- [29] VOJNOVÁ, Eva. The Benefits of a Conforming Cooling Systems the Molds in Injection Moulding Process. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2016, s. 535-543 [cit. 2020-02-24]. ISBN 1877-7058. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581631219X?via%3Dihub>

- [30] SOVA, Miloš. Smrštění a dodatečné smrštění při vstřikování plastů. *TECHportal* [online]. Verlag Dashöfer, 2015 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/smrsteni-a-dodatecne-smrsteni-pri-vstrikovani-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxXa2VafSdbW0/>
- [31] Polyetherimide (PEI): A Comprehensive Review: Polyetherimide Features and Applications. *Omnexus* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetherimide-pei-high-heat-plastic>
- [32] HALAŠKA, Petr. Snižování výrobních nákladů pomocí Autodesk Moldflow analýzy. *ANZDOC* [online]. SMARTPLAST, Zlín [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://adoc.tips/sniovani-vyrobnich-naklad-pomoci-autodesk-moldflow-analyzy.html>
- [33] Vstřikování plastů dovedené k dokonalosti. *Autodesk Simulation Moldflow* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/dl/Autodesk-Simulation-Moldflow.pdf>
- [34] Aplikovaná reologie: prof. Ing. Martin Zatloukal, Ph.D. DSc. Zlín, 2018/2019. T7AR. Přednášky. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**Zkratky polymerů:**

PS	Polystyrén
HI-PS	Vysoce odolný polystyrén
ABS	Akrylonitril butadien styrén
SAN	Styrén akrylonitril
ASA	Akrylonitril styrén akrylát
PVC	Polyvinylchlorid
PMMA	Polymethylmethakrylát
PC	Polykarbonát
PPO	Polyfenylenoxid
CA	Acetát celulózy
CAB	Acetát celulózy butyrát
CAP	Acetát celulózy ftalát
CP	Propionát celulózy
PET-G	Polyethylentereftalát-glykol
PA6-3-T	Polytriethylhexamethylen-tereftalamid
PSU	Polysulfan
PEI	Polyetherimid
COC	Cyklický olefinový kopolymer
LDPE	Polyethylen nízkohustotní
HDPE	Polyethylen vysokohustotní
PP	Polypropylen
EVA	Ethylenvinylacetát
PA	Polyamid
PPA	Polyftalamid

POM	Polyoxymethylen
PBT	Polybutylentereftalát
PET	Polyethylentereftalát
PPS	Polyfenelsulfid
PEK	Polyetherketon
PEEK	Polyetheretherketon
LCP	Polymery tekutých krystalů
PFA	Perfluoroalkoxy alkan
PTFE	Polytetrafluorethylen
SEBS	Styren-ethylen-butylen-styren
SBS	Styren-butadien-styren

Zkratky použitých veličin:

T_g	teplota skleného přechodu
T_m	teplota tání
T_f	teplota tečení
T	teplota
η	viskozita
m	index konzistence
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace
n	index neneutonského chování, počet vrstev čočky
η_0	newtonská viskozita
λ	relaxační čas
α	hodnota ostrosti přechodu z newtoské do pseudoplastické oblasti
S_L	výrobní lineární smrštění
L_F	rozměr formy při teplotě 23 °C
L_V	rozměr výstřiku při teplotě 23 °C

S_{VV}	objemové výrobní smrštění
V_F	objem dutiny formy při teplotě 23 °C
V_V	objem výstřiku při teplotě 23 °C
D_{start}	počáteční průměr
D_{end}	koncový průměr
D	průměr
W_{start}	počáteční šířka
W_{end}	koncová šířka
H_{start}	počáteční výška
H_{end}	koncová výška
S_0	tloušťka předstříku
S_{total}	tloušťka celé čočky
S_1	tloušťka nástříku

Zkratky použitých jednotek:

ShA	Shore A
ShD	Shore D
s^{-1}	reciproká sekunda
Pa · s	Pascal-sekunda
s	sekunda
min	minuta
mm	milimetr
°C	stupeň Celsia
%	procento
mm^3	milimetr krychlový
bar	bar
MPa	megapascal

kPa kilopascal

Další použité zkratky:

ITT Index toku taveniny

ICM Injection Compression Molding

DMLS Direct Metal Laser Sintering

MAD Molding Area Diagram

CAD Computer-Aided Design

CAE Computer-Aided Engineering

CAM Computer-Aided Manufacturing

FEM Finite Element Method

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Základní rozdělení polymerů</i>	12
<i>Obr. 2 Fontánový tok [15]</i>	23
<i>Obr. 3 První způsob technologie vícevrstvého vstřikování čočky [22]</i>	25
<i>Obr. 4 Druhý způsob technologie vícevrstvého vstřikování čočky [22]</i>	26
<i>Obr. 5 Třetí způsob technologie vícevrstvého vstřikování čočky [22]</i>	26
<i>Obr. 6 Závislost času chladnutí a produktivity na počtu vrstev [22]</i>	27
<i>Obr. 7 Časové znázornění chladnutí ve formě a chladnutí mimo formu [22]</i>	29
<i>Obr. 8 Závislost teploty na čase pro tři varianty vstřikování vzorku [22]</i>	30
<i>Obr. 9 Cyklus vstřikování s dolisováním [26]</i>	32
<i>Obr. 10 Stagnace toku vlivem nestejných tloušťek stěn [27]</i>	33
<i>Obr. 11 Temperační kanály zhotovené konvenčními způsoby obrábění [28]</i>	34
<i>Obr. 12 Konformní temperační kanál zhotovený metodou DMLS [28]</i>	35
<i>Obr. 13 Zpracovatelské okno, závislost tlaku na teplotě</i>	39
<i>Obr. 14 Vliv vývoje na celkové náklady a vliv jednotlivých etap na růst nákladů [32]</i>	44
<i>Obr. 15 Konečně prvkové sítě Midplane, Dual Domain, 3D tetra [32]</i>	45
<i>Obr. 16 3D model výrobku</i>	50
<i>Obr. 17 Statistika 3D sítě výrobku</i>	52
<i>Obr. 18 Síť výrobku</i>	53
<i>Obr. 19 Síť vtokového a temperačního systému vůči modelu</i>	54
<i>Obr. 20 Volba temperačního média</i>	55
<i>Obr. 21 Procesní podmínky pro analýzu chladnutí</i>	55
<i>Obr. 22 Procesní podmínky pro analýzu plnění a dotlaku</i>	56
<i>Obr. 23 Pokročilé nastavení plnění a dotlaku</i>	57
<i>Obr. 24 Procesní podmínky pro analýzu smrštění</i>	57
<i>Obr. 25 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu</i>	58
<i>Obr. 26 Velikost vzniklých deformací, zamrznutí vtokového systému</i>	59
<i>Obr. 27 Vzduchové kapsy</i>	60
<i>Obr. 28 Studené spoje</i>	61
<i>Obr. 29 Konvenční temperační kanály</i>	61
<i>Obr. 30 Účinnost odvodu tepla konvenčních temperačních kanálů</i>	62
<i>Obr. 31 Tlak temperačního média konvenčního způsobu temperace</i>	63
<i>Obr. 32 Konformní temperační kanály (modifikace 1)</i>	63
<i>Obr. 33 Účinnost odvodu tepla konformních kanálů (modifikace 1)</i>	64
<i>Obr. 34 Tlak temperačního média konformního způsobu temperace (modifikace 1)</i>	65

<i>Obr. 35 Konformní temperační kanály (modifikace 2)</i>	65
<i>Obr. 36 Účinnost odvodu tepla konformních kanálů (modifikace 1)</i>	66
<i>Obr. 37 Tlak temperačního média konformního způsobu temperace (modifikace 2)</i>	66
<i>Obr. 38 Síť vtokových kanálů vůči modelu</i>	68
<i>Obr. 39 Časové znázornění plnění dutiny formy třemi vtoky současně</i>	68
<i>Obr. 40 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu</i>	69
<i>Obr. 41 Velikost vzniklých deformací</i>	70
<i>Obr. 42 Vzduchové kapsy</i>	71
<i>Obr. 43 Studené spoje</i>	71
<i>Obr. 44 Rozdělení čočky do dvou vrstev</i>	72
<i>Obr. 45 Síť vtokových kanálů vůči modelu</i>	73
<i>Obr. 46 Síť temperačních kanálů vůči modelu</i>	74
<i>Obr. 47 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty a) předstříku, b) nástříku</i>	75
<i>Obr. 48 Velikost vzniklých deformací a) předstříku, b) celé čočky</i>	76
<i>Obr. 49 Vzduchové kapsy a) předstřík, b) celá čočka</i>	77
<i>Obr. 50 Studené spoje a) předstřík, b) celá čočka</i>	78
<i>Obr. 51 Rozdělení čočky do dvou vrstev pro chlazení mimo formu</i>	79
<i>Obr. 52 Síť vtokových kanálů vůči modelu</i>	80
<i>Obr. 53 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty a) předstříku, b) nástříku</i>	81
<i>Obr. 54 Velikost vzniklých deformací a) předstříku, b) celé čočky</i>	82
<i>Obr. 55 Vzduchové kapsy a) předstřík, b) celá čočka</i>	83
<i>Obr. 56 Studené spoje a) předstřík, b) celá čočka</i>	84
<i>Obr. 57 Síť vtokového kanálu vůči modelu</i>	85
<i>Obr. 58 Procesní podmínky pro analýzu plnění a dotlaku</i>	86
<i>Obr. 59 Procesní podmínky pro analýzu dotlakové fáze</i>	86
<i>Obr. 60 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty dílu</i>	88
<i>Obr. 61 Velikost vzniklých deformací</i>	89
<i>Obr. 62 Vzduchové kapsy</i>	90
<i>Obr. 63 Studené spoje</i>	90
<i>Obr. 64 Tvarové vložky vstřikovací formy</i>	93
<i>Obr. 65 Vyhřívavý vtokový systém včetně pneumatických ventilů</i>	94
<i>Obr. 66 Vyústění a označení temperačních kanálů</i>	95
<i>Obr. 67 Volba a rozložení vyhazovacích kolíků</i>	96
<i>Obr. 68 Náhled na pravou polovinu vstřikovací formy</i>	97
<i>Obr. 69 Náhled na levou polovinu vstřikovací formy včetně vyhazovací části</i>	98

Obr. 70 *Náhled na kompletní sestavu vstřikovací formy*98

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Výrobní smrštění vybraných termoplastů [30]</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 2 Materiálové parametry z databáze Moldflow.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 3 Výsledky jednotlivých analýz</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 4 Srovnání výsledků analýz pro vybrané materiály.....</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 5 Porovnání zjištěných parametrů a parametrů vstřikovacího stroje</i>	<i>99</i>

SEZNAM PŘÍLOH

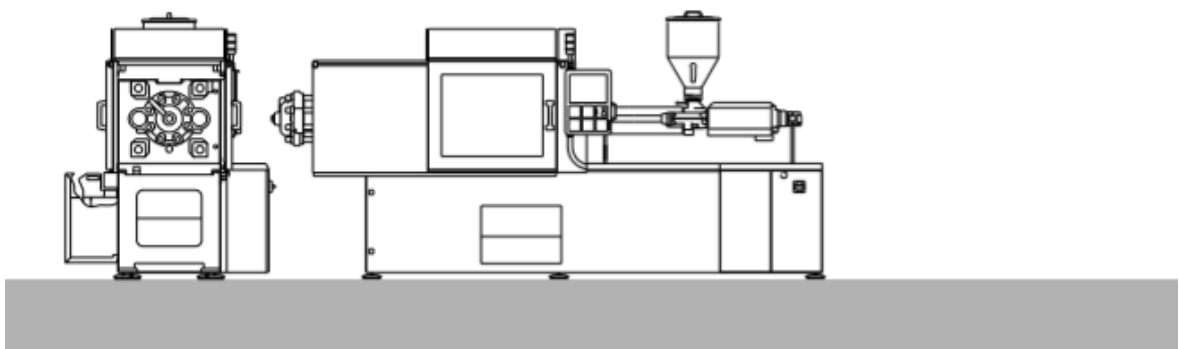
P I Parametry zvoleného vstřikovacího stroje

P II Výkresová dokumentace:

- Sestava vstřikovací formy
- Pohled na pravou a levou stranu
- Čočka

PŘÍLOHA P I: PARAMETRY ZVOLENÉHO VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Facts and figures



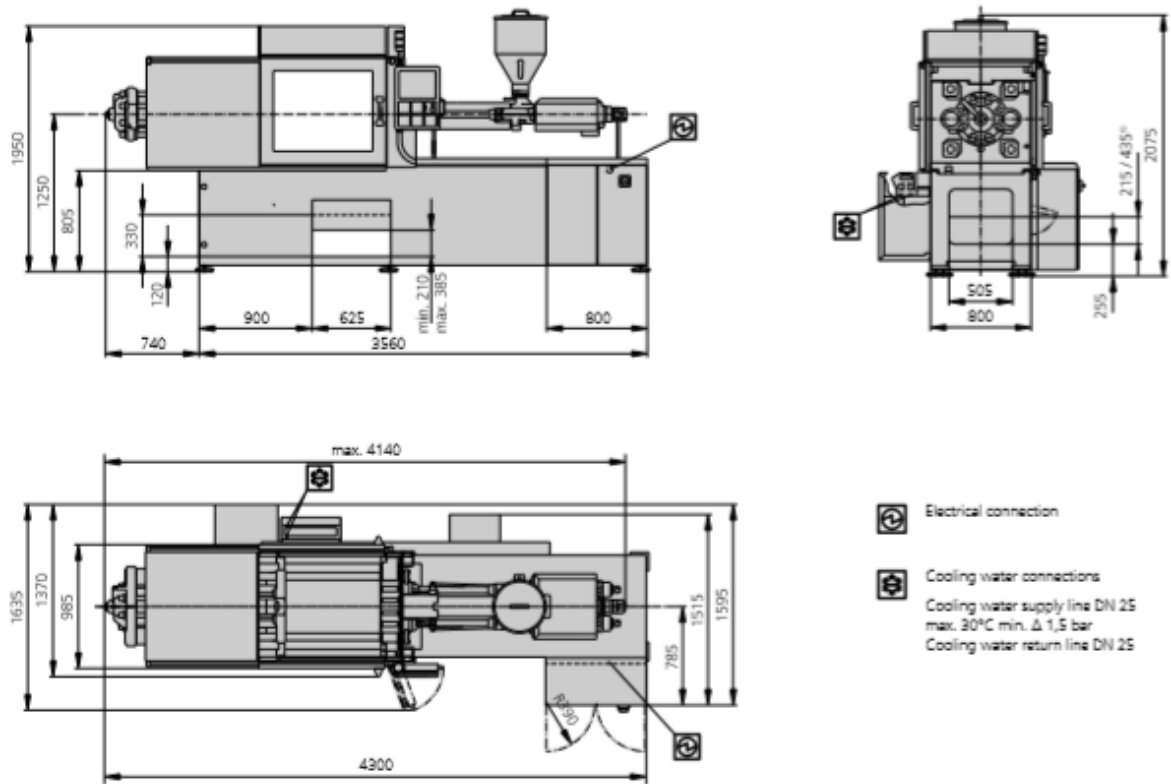
ALLROUNDER 420 C GOLDEN EDITION

Tie bar distance: 420 x 420 mm

Clamping force: 1000 kN

Injection unit (according to EUROMAP): 290

ARBURG



1) Dimension only valid in conjunction with conveyor belt

Machine model		420 C GOLDEN EDITION
EUROMAP size indication ¹⁾		1000-290
Clamping unit		
Clamping force	max. kN	1000
Closing force	max. kN	50
Opening force / increased	max. kN	35 / 250
Opening stroke	max. mm	500
Mould height	min. mm	250
Daylight	max. mm	750
Distance between tie bars	mm	420 x 420
Platen size (hor. x vert.)	mm	570 x 570
Weight of mov. mould half	max. kg	600
Ejector force	max. kN	40
Ejector stroke	max. mm	175
Hydraulics, drive, general		
Drive power of the hydraulic pump	kW	15
Dry cycle time for opening stroke ²⁾	s/mm	1,8-294
Total connected load ³⁾	kW	23,9
Colour: plastic coated, structure light grey / mint green / canary yellow		
Control cabinet		
Safety standard according to		DIN EN 60204
Socket combination (1 single phase, 1 three-phase)		1 x 16 A
Injection unit		
		290
Screw diameter	mm	30 / 35 / 40
Effective screw length	L/D	23,3 / 20 / 17,5
Screw stroke	max. mm	150
Calculated injection volume	max. cm ³	106 / 144 / 188
Shot weight	max. g PS	97 / 132 / 172
Material throughput ⁴⁾	max. kg/h PS	17 / 20,5 / 24,5
	max. kg/h PA 6.6	8,5 / 10,5 / 12,5
Injection pressure ⁵⁾	max. bar	2500 / 2000 / 1530
Injection flow ⁵⁾	max. cm ³ /s	102 / 140 / 182
Back pressure positive / negative	max. bar	350 / 200
Circumferential screw speed	max. m/min	46 / 54 / 62
Screw torque	max. Nm	320 / 380 / 430
Nozzle contact force	max. kN	60
Nozzle retraction stroke	max. mm	240
Installed cylinder heating power / heating zones	kW	5,8 / 4
Installed nozzle heating power	kW	0,6
Material hopper capacity	l	50
Machine dimensions and weights of the basic machine		
Oil capacity	l	235
Net weight	kg	2650
Electrical connection (pre-fused) ⁵⁾	A	80

1) 1st figure: clamping force (kN), 2nd figure: max. dosage volume (cm³) x max. injection pressure (kbar)

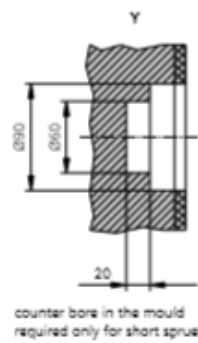
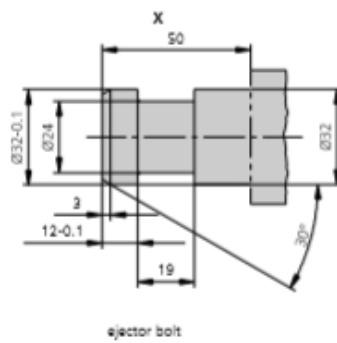
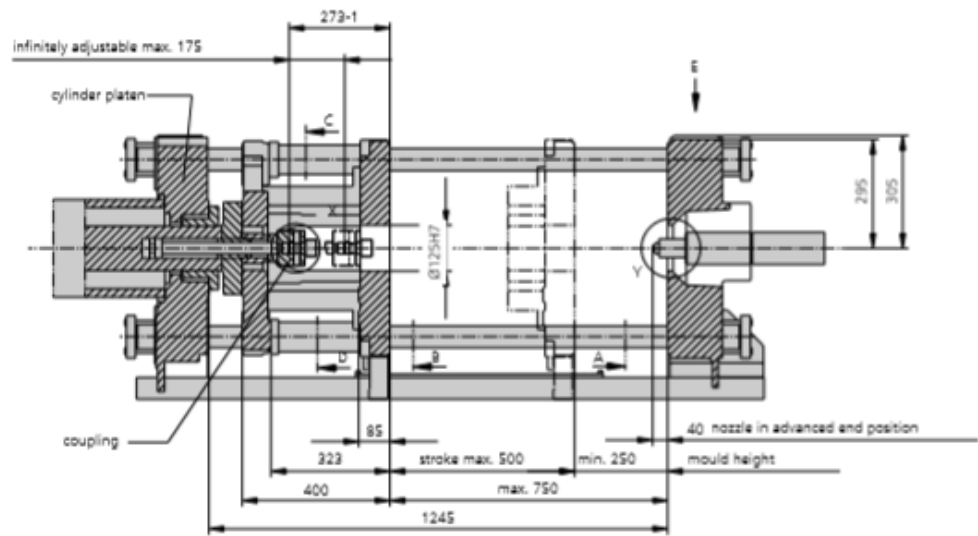
2) Values refer to 400 V/50 Hz. The load is symmetrically distributed on three phases (observe phase loading when installing new equipment)

3) A combination of max. injection pressure and max injection flow (max. injection capacity) can be mutually exclusive, depending on the equipment-related motor output

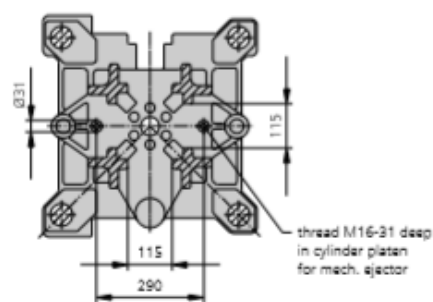
4) Deviations are possible depending upon process settings and material type

5) According to EURO-IAF

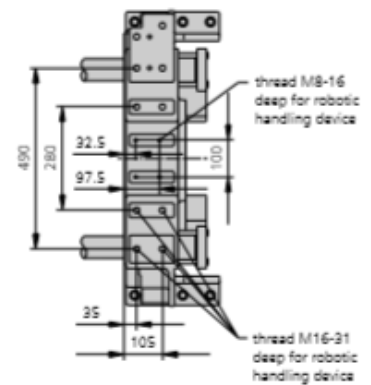
These technical data specifications refer to the state at the time of printing. We reserve the right to modify specifications in the interest of a continuous program of further development.



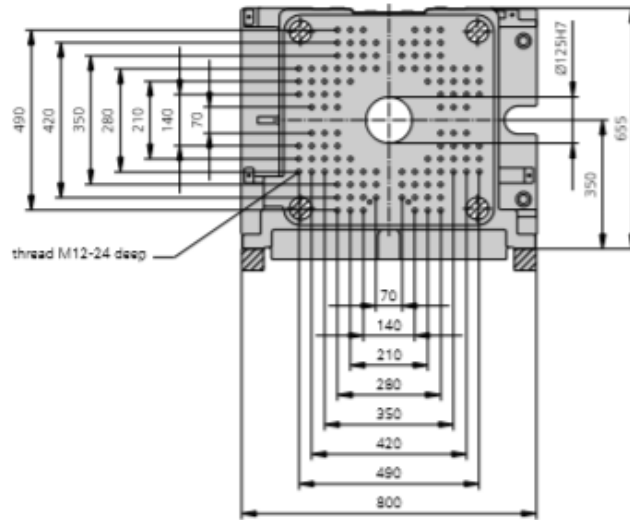
View C-D



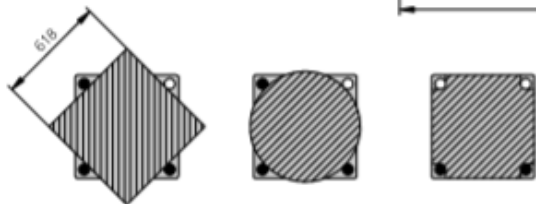
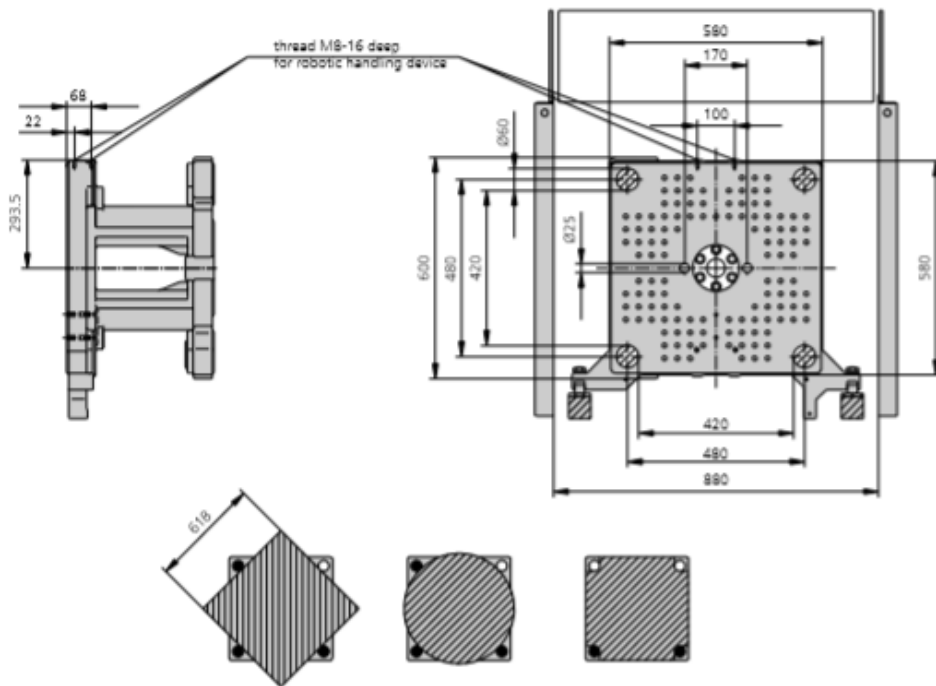
View E



Fixed platen
View A



Movable platen
View B



Useable mounting surface with tie bars removed

Maximum theoretical shot weights for the most important injection moulding materials (in grams)				
Injection units according to EUROMAP		290		
Screw diameter	mm	30	35	40
Polystyrene	PS	97	132	172
Styrene heteropolymerizates	SB	95	129	168
	SAN, ABS ¹⁾	93	126	165
Cellulose acetate	CA ¹⁾	109	148	194
Celluloseacetobutyrate	CAB ¹⁾	101	138	180
Polyethyl methacrylate	PMMA	100	136	178
Polyphenylene ether, mod.	PPE	90	122	160
Polycarbonate	PC	102	139	181
Polysulphone	PSU	105	143	187
Polyamides	PA 6.6, PA 6 ¹⁾	96	131	171
	PA 6.10, PA 11 ¹⁾	90	122	160
Polyoximethylene (Polyacetal)	POM	120	163	213
Polyethylene terephthalate	PET	115	157	205
Polyethylene	PE-LD	73	100	130
	PE-HD	76	103	134
Polypropylene	PP	77	105	137
Fluoropolymerides	FER, PFA, PCTFE ¹⁾	155	211	276
	ETFE	136	185	242
Polyvinyl chloride	PVC-U	117	159	208
	PVC-P ¹⁾	108	147	192

1) average value

ARBURG GmbH + Co KG

Postfach 11 09 · 72296 Lossburg · Tel.: +49(0)7446 33-0 · Fax: +49(0)7446 33-3365 · www.arburg.com · e-mail: contact@arburg.com

With locations in Europe: Germany, Belgium, Denmark, France, United Kingdom, Italy, Netherlands, Austria, Poland, Switzerland, Slovakia,

Spain, Czech Republic, Turkey, Hungary | Asia: People's Republic of China, Indonesia, Malaysia, Singapore, Thailand, United Arab Emirates | America: Brazil, Mexico, USA

For more information, please go to www.arburg.com.

© 2013 ARBURG GmbH + Co KG

The brochure is protected by copyright. Any utilisation, which is not expressly permitted under copyright legislation, requires the previous approval of ARBURG.

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



ARBURG GmbH + Co KG

DIN EN ISO 9001 + 14001 + 50001 certified

