

Konstrukce vstřikovací formy pro součást ze světlometu za využití algoritmu pro posouzení smrštění

Bc. Marek Svoboda

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Marek Svoboda
Osobní číslo:	T20121
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Konstrukce vstřikovací formy pro součást ze světlometu za využití algoritmu pro posouzení smrštění

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Vytvoření nástroje na základě poznatků z teoretické části.
3. Konstrukce vstřikovací formy včetně vtokového a temperačního systému.
4. Vytvoření analýz na zadanou geometrii součásti.
5. Srovnání analýz.

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

Seznam doporučené literatury:

1. KENNEDY, Peter a Rong ZHENG. Flow analysis of injection molds. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Publishers, [2013], (xxviii). ISBN 9781569905227.
2. KUROWSKI, Paul M. Finite element analysis for design engineers. Warrendale, PA: SAE International, c2004. ISBN 9781615836451
3. Li, Tianyi; Luyé, Jean-François. 2018. „Optimization of Fiber Orientation Model Parameters in the Presence of Flow-Fiber Coupling“ J. Compos. Sci. 2, no. 4: 73.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vojtěch Šenkeřík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**

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

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

10.5.2022

Jméno a příjmení studenta:

Marek Svoboda

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem Nástroje pro posouzení smrštění. Za účelem ověření funkčnosti nástroje byl vypracován návrh vstřikovací formy na zadanou geometrii součásti, který byl podroben tokovým analýzám.

Teoretická část obsahuje základy vstřikovacího procesu. Dále se podrobně zabývá jevem smrštění a návrhem Nástroje pro posouzení smrštění.

Praktická část znázorňuje práci s Nástrojem, představuje návrh vstřikovací formy a ověřuje funkčnost nástroje na návrhu vstřikovací formy.

Klíčová slova: smrštění, vstřikování, vstřikovací forma, analýza, polymer

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design of a Tool for shrinkage assessment. In order to verify the functionality of the Tool, an injection mold design was developed for the specified geometry of the component that were subjected to flow analyzes.

The theoretical part contains the basics of the injection molding process. It also deals in detail with the phenomenon of shrinkage and the design of the Tool for shrinkage assessment.

The practical part shows work with proposed Tool, introduces design of injection mold and verifies the functionality of the Tool.

Keywords: shrinkage, injection molding, injection mold, analysis, polymer

Rád bych poděkoval Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, Ph.D. a Ing. Petru Pluskalovi, DiS. za cenné rady, připomínky a veškerý čas, který mi při konzultacích s úsměvem na tváři věnovali.

Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Dagmarě Měřínské, Ph.D. za pomoc v počátcích této práce.

Závěrem patří mé díky rodině a přátelům, kteří byli chápavou oporou při práci a vítaným uvolněním v časech odpočinku.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZPRACOVÁNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ – VSTŘIKOVÁNÍ	11
2 VSTŘIKOVACÍ FORMA	14
2.1 VTKOVÉ SYSTÉMY	15
2.1.1 Studený vtokový systém	15
2.1.2 Horký vtokový systém	16
2.2 TEMPERAČNÍ SYSTÉMY	17
2.3 VYHAZOVACÍ SYSTÉM	18
2.4 BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ	19
3 SMRŠTĚNÍ VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ	21
4 CO JE TO SMRŠTĚNÍ.....	22
5 ROZDĚLENÍ SMRŠTĚNÍ	23
6 NA ČEM JE SMRŠTĚNÍ ZÁVISLÉ?	26
6.1 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY	27
6.1.1 Doba dotlaku	27
6.1.2 Velikost dotlaku	27
6.1.3 Teplota dutiny formy	28
6.1.4 Teplota taveniny	29
6.1.5 Rychlost vstřikování	30
6.1.6 Vyhazovací teplota	31
6.1.7 Zahřívání/chlazení	31
6.2 GEOMETRIE TVAROVÉ DUTINY	33
6.2.1 Tloušťka stěny	33
6.2.2 Redukovaná tloušťka stěny na konci dráhy vstřikovaného materiálu	34
6.2.3 Žebrování	35
6.3 NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY Z POHLEDU OPTIMALIZACE SMRŠTĚNÍ	35
6.3.1 Typ vtokového ústí	36
6.3.2 Umístění vtokového ústí	37
6.4 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI	37
6.4.1 Materiálové vlastnosti z makroskopického pohledu	37
6.4.2 Morfologie materiálu	38
6.4.3 Krystalinita materiálu	38
7 METODY URČOVÁNÍ SMRŠTĚNÍ KONKRÉTNÍHO VÝROBKU.....	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	47
8 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	48
9 POUŽITÉ PROGRAMY	49

9.1	CATIA V5	49
9.2	AUTODESK SIMULATION MOLDFLOW INSIGHT	49
9.3	MICROSOFT EXCEL.....	49
10	NÁSTROJ PRO POSOUZENÍ SMRŠTĚNÍ	50
10.1	OBSAH NÁSTROJE	50
10.2	PRÁCE S NÁSTROJEM	52
11	SPECIFIKACE ZADANÉHO VÝROBKU	56
12	MATERIÁL VÝROBKU.....	57
13	NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	58
13.1	PRAVÁ STRANA VSTŘIKOVACÍ FORMY	59
13.2	LEVÁ STRANA VSTŘIKOVACÍ FORMY	60
13.3	BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ.....	61
13.3.2	Boční odformování 3 a 4.....	62
13.3.3	Boční odformování 5.....	63
13.4	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	64
13.5	TVÁRNICE	65
13.6	TVÁRNÍK	65
13.7	V TOKOVÝ SYSTÉM	66
13.8	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	68
14	VSTŘIKOVACÍ STROJ	70
15	TOKOVÉ ANALÝZY ZADANÉ GEOMETRIE SOUČÁSTI.....	71
15.1	VÝCHOZÍ TOKOVÁ ANALÝZA.....	71
15.2	VÝSLEDKY VÝCHOZÍ TOKOVÉ ANALÝZY	73
16	OVĚŘENÍ NÁSTROJE PRO POSOUZENÍ SMRŠTĚNÍ	87
16.1	NASTAVENÍ NÁSTROJE PRO POSOUZENÍ SMRŠTĚNÍ	87
16.2	NÁRŮST TEPLoty FORMY.....	88
16.3	NÁRŮST TEPLoty TAVENINY.....	88
16.4	NÁRŮST TEPLoty TAVENINY DO KRAJNÍ MEZE	89
16.5	POKLES TEPLoty FORMY.....	89
16.6	DISKUZE VÝSLEDKŮ	90
ZÁVĚR	92	
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	93	
SEZNAM OBRÁZKŮ	111	
SEZNAM TABULEK.....	114	
SEZNAM PŘÍLOH.....	115	

ÚVOD

Automobilový průmysl je rozsáhlé strojírenské odvětví zabývající se vývojem a výrobou motorových vozidel, následované jejich prodejem a podporované rozsáhlým marketingem. Do tohoto odvětví patří nejen všechny automobilky, ale i jejich subdodavatelé.

Mezi 50 největších subdodavatelů na světě patří německá společnost Hella, jejíž neúnavně rozrůstající se pobočka v ČR má sídlo v Mohelnici. Zde je primárním zaměřením vývoj a výroba osvětlovací techniky, spojená s elektronickými komponenty.

V oblasti výroby osvětlovací techniky je kladen čím dál větší důraz na přesnost vyráběných součástí. Přesnost rozměrů má v této oblasti velký vliv nejen na smontovatelnost jednotlivých dílčích součástí do jedné funkční sestavy a následnou zamontovatelnost výsledné sestavy do automobilu, ale i na optický výstup, který je klíčovou funkcí.

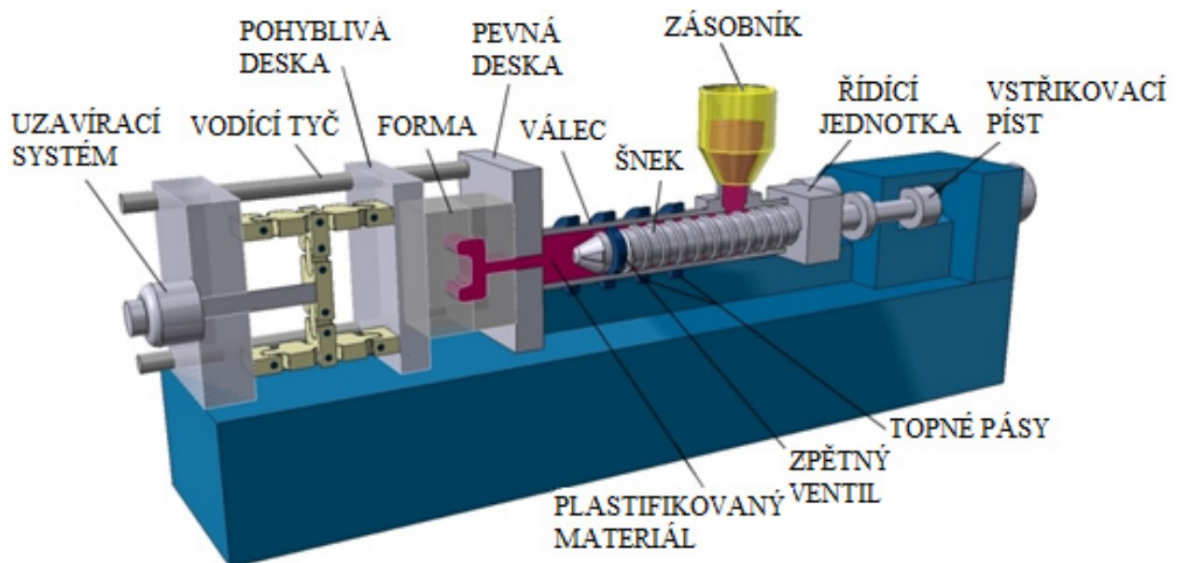
V případě polymerních materiálů má na výslednou odchylku od požadovaných rozměrů geometrie součásti zásadní vliv smrštění. Proto je při honbě za přesnými rozměry součástí zásadní pochopení tohoto jevu a všech faktorů, které jev ovlivňují, což je ústředním tématem této diplomové práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZPRACOVÁNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ – VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikovací proces probíhá na vstřikovacích strojích, které jsou většinou plně automaticky řízeny prostřednictvím mikroprocesorového řízení. U vstřikování se rozumí strojem vstřikovací stroj a nástrojem vstřikovací formu.

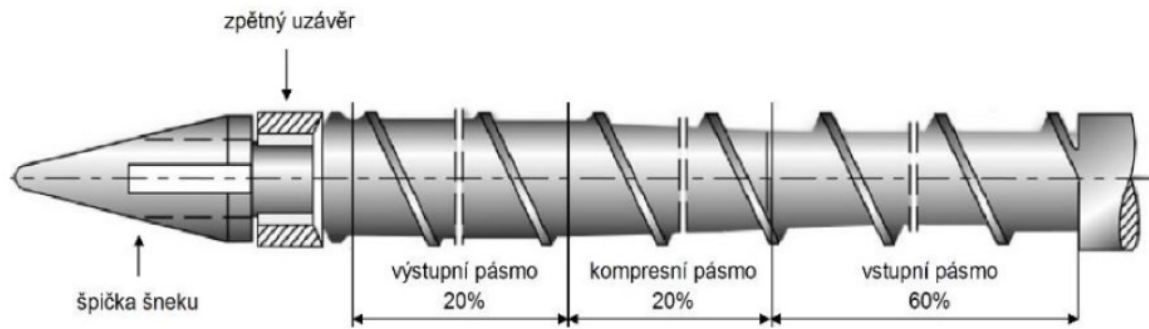
Materiál je v podobě prášku nebo granulátu nasypán do zásobníku vstřikovacího stroje (obrázek 1).



Obrázek 1 Vstřikovací stroj [1]

Odtud putuje do prostoru válce se šnekem. Za účelem co nejefektivnější plastikace by měl být šnek co možná nejhladší a válec co možná nejhrubší. Pohyb materiálu je vyvozený otáčením šneku. Princip si lze představit na příkladu matice se šroubem, u kterého se otáčí šnek kolem své osy, zatímco matice nikoliv. Výsledkem je v ideálním případě nerotující translační pohyb matice (v daném případě materiálu) v axiálním směru. Materiál po vstupu do prostoru mezi válcem a šnekem prochází postupně přes tři pásma, jak je vidět na obrázku 2.

Prvním pásmem je pásmo zásobovací neboli vstupní. Následuje pásmo přechodné, též zvané kompresní. V tomto přechodném pásmu se mění průměr šneku (zvětšuje se směrem ke vstřikovací formě). Toto zvětšení je charakterizováno tzv. kompresním poměrem, který je charakterizován jako poměr průměru šneku ve výstupním pásmu k průměru šneku ve vstupním pásmu. Třetím pásmem je pásmo výstupní. Šnek má takto stupňovaný průměr z důvodu změny objemu zpracovávaného materiálu, který má vlivem geometrie vstupních částic v sypkém stavu větší objem, než ve stavu taveniny (za stejné hmotnosti).



Obrázek 2 Šnek vytlačovacího stroje [2]

Válec a šnek jsou temperovány na předem stanovenou teplotu, která se v jednotlivých pásmech liší. Je vhodné, aby byl materiál neustále v kontaktu s válcem a šnekem co největší plochou tak, aby bylo tavení co nejúčinnější. K tavení materiálu dochází dále vlivem jevu, zvaném disipace. Disipací se rozumí vnitřní tření materiálu, jehož následkem dochází ke zvýšení teploty.

Roztavený materiál dále putuje před zpětný ventil, který funguje jako píst. V určitou dobu, která bude popsána dále na diagramu vstřikovacího cyklu, dojde ke vstříknutí roztaveného materiálu pístem. Píst vtlačí roztavený materiál do dutiny vstřikovací formy prostřednictvím vtokové soustavy. Uzavření vstřikovací formy a její udržení v uzavřeném stavu zabezpečuje uzavírací systém.

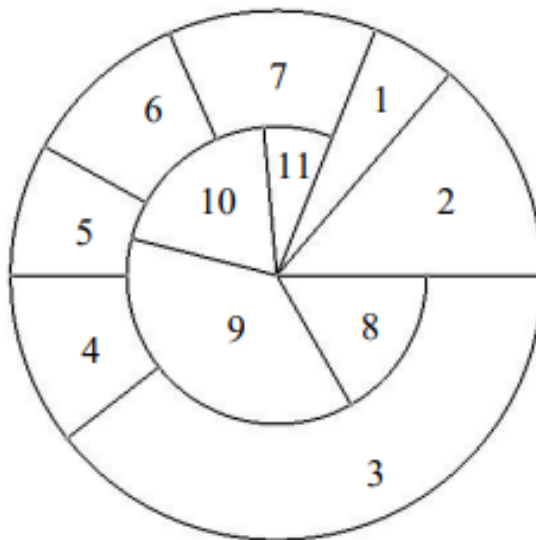
Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus popisuje přesně specifikované postupné kroky (fáze), kterými prochází nástroj (obrázek 3, vnější oblast) a stroj (obrázek 3, vnitřní oblast). Celková délka vstřikovacího cyklu je podstatná pro plánování výroby. Po odladění procesních parametrů je zaznamenána délka cyklu sloužící k výpočtu doby potřebné k naplnění potřeb zákazníka (například v případě lisoven plastů, které dodávají pouze dílčí součásti), nebo plánování výroby dalších dílčích součástí tak, aby bylo zabezpečeno plynulé zásobování linky (v případě montování sestav) atd.

Jak bylo zmíněno výše, vstřikovací cyklus se skládá ze dvou okruhů. Okruhu stroje a okruhu vstřikovací formy (nástroje). Jako začátek cyklu bývá označováno samotné vstřikování (1), které je s dotlakem (2) společné pro oba okruhy.

U formy následuje chlazení (3), které je zpravidla nejdelší fází vstřikovacího cyklu. Během této fáze dochází k ochlazení výrobku z teploty taveniny na vyhazovací teplotu.

Následně je forma otevřena (4) a výrobek s případným vtokovým zbytkem je vyhozen (5) z tvarové dutiny formy pomocí vyhazovacího systému.



Obrázek 3 Vstřikovací cyklus [3]

Po vyprázdnění formy je tvarová dutina připravována (6) na další vstříknutí. Když je forma připravena na další dávku, je uzavřena (7) a opět naplněna další dávkou taveniny.

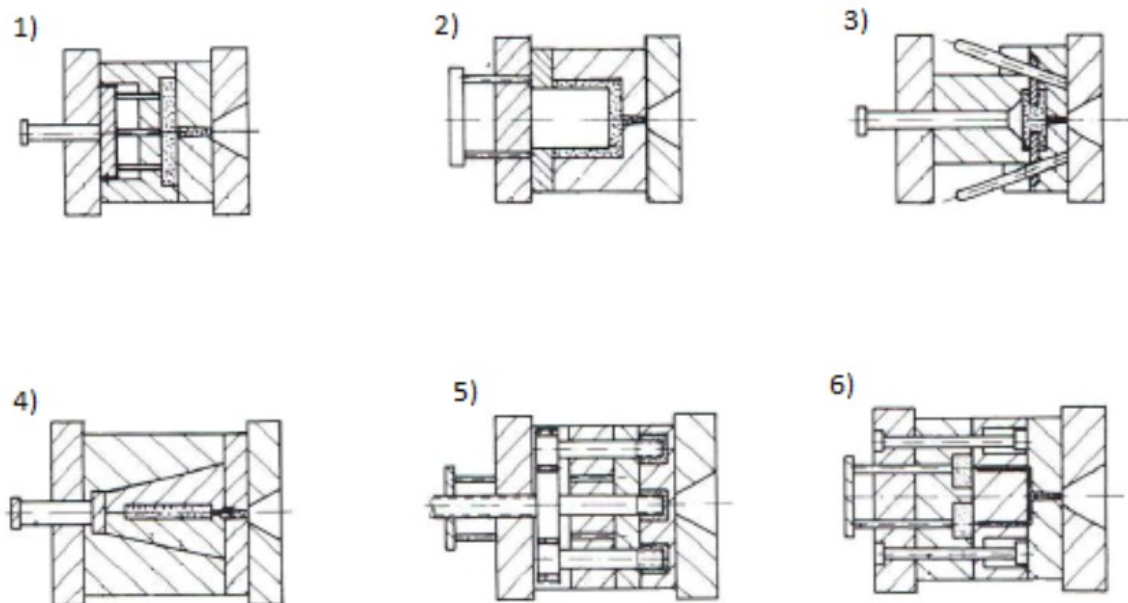
Z pohledu stroje dochází po fázi dotlaku k navrácení (8) plastikační jednotky do výchozí polohy. Když se nachází plastikační jednotka na výchozí pozici, začíná proces plastikace (9), tedy příprava další dávky taveniny. Po prodlevě (10), během které čeká stroj na dokončení operací potřebných z pohledu formy, je plastikační jednotka opět přisunuta (11) a je vstříknuta další dávka.

Jednotlivé fáze vstřikovacího cyklu trvají různou dobu, která je ovlivněna vstřikovaným materiálem, procesními parametry, konstrukcí výrobku, formy atd. Pořadí kroků bývá zachováno, pouze fáze dotlaku může být u specifických typů materiálu vynechána. [3]

2 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Jak bylo zmíněno výše, nástrojem při procesu vstřikování je vstřikovací forma. Vstřikovací forma je v dnešní době velice komplexním nástrojem. Její tvarová dutina je negativem budoucího výrobku a kvalita zpracování se odráží i na počtu vyrobených součástí, které mají požadovanou kvalitu. Nejen z těchto důvodů jsou na formu kladeny velké nároky z pohledu produktivity, spolehlivosti, kvality a automatizace výroby. [4]

Vstřikovací forma se skládá z mnoha částí, které jsou pomocí šroubů propojeny do funkčních celků. Dílčí části i funkční celky jsou vůči sobě středěny pomocí středících prvků. V dnešní době bývá aplikováno velké množství rozličných konstrukčních řešení vstřikovacích forem, z nichž základní provedení vidíme na obrázku 4.

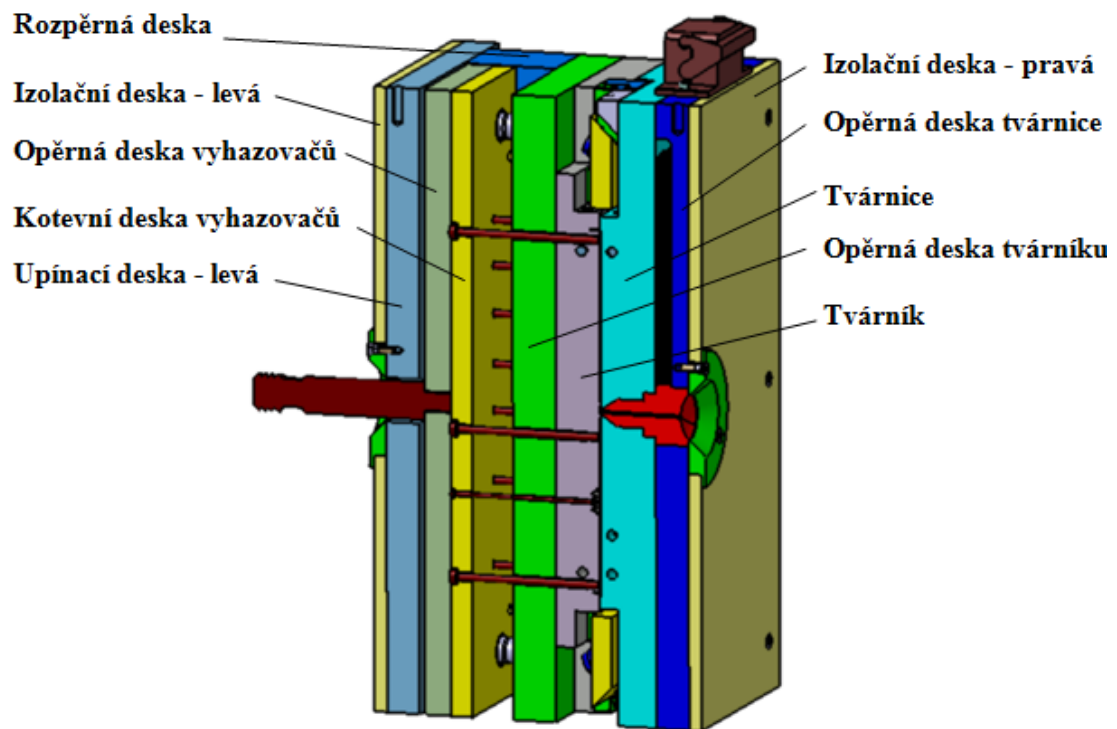


Obrázek 4 Základní typy vstřikovacích forem [4]

- 1) standardní vstřikovací forma
- 2) vstřikovací forma se stírací deskou
- 3) vstřikovací forma s šikmými čepy
- 4) klínová vstřikovací forma
- 5) vstřikovací forma s vyšroubovatelnými jádry
- 6) třidesková vstřikovací forma

U výchozího konstrukčního řešení (obrázek 5) se forma otevírá v dělicí rovině, která se nachází mezi tvárníkem a tvárnici. Tyto dvě části dohromady tvoří tvarovou dutinu, která po zaplnění dodá tvar výrobku. Tvárnice se nachází na pravé straně formy, která je nepohyblivá (pevně přichycena k rámu vstřikovacího stroje a vystředěna středícím kroužkem). Tvárník je připevněn k levé, pohyblivé části formy. Ta, po fázi plnění, dotlaku a chlazení (viz vstřikovací cyklus výše), odjíždí, čímž otevírá dělicí rovinu a vytváří tak prostor pro vyhození výrobku. Výrobek odjíždí s pohyblivou částí formy, čemuž následuje

jeho vyhození systémem vyhazovačů. Vyhazovače jsou vysunuty po dosažení horní úvrati otevření formy. [5]



Obrázek 5 Základní uspořádání vstřikovací formy [6]

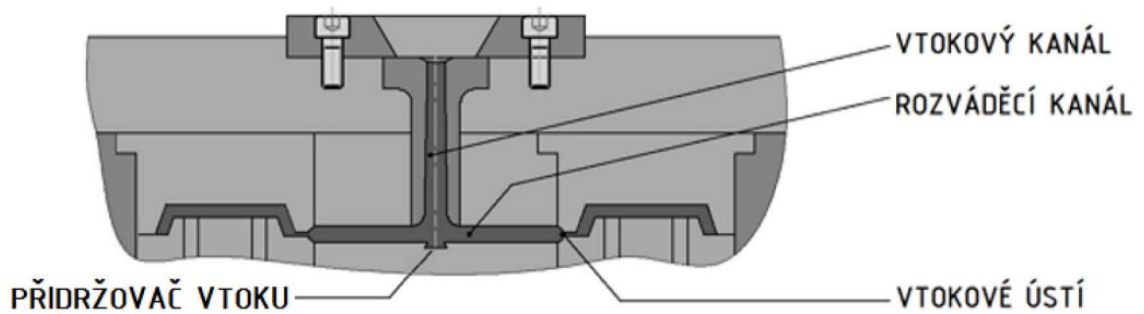
2.1 Vtokové systémy

Vtokovým systémem se rozumí dráha mezi tryskou vstřikovací jednotky a tvarovou dutinou vstřikovací formy. Vhodně navržený vtokový systém zaručuje rovnoměrné vyplnění tvarové dutiny taveninou a jednoduché odstranění vtokového zbytku (taveniny zatuhlé ve studeném vtokovém systému). Dále by měla být dráha taveniny (tedy dráha vtokového systému) co možná nejkratší. V případě vícenásobných forem (forem s více tvarovými dutinami) je důležité, aby byla dráha taveniny ke všem dutinám stejně dlouhá, případně aby byly všechny dutiny zaplněny ve stejnou chvíli. Vtokové systémy jsou děleny na dva základní typy: studené vtokové systémy a horké vtokové systémy. [5]

2.1.1 Studený vtokový systém

Na rozdíl od horkého vtokového systému není studený vtokový systém opatřen vyhřívanou tryskou ani žádným jiným typem vyhřívání. Polymerní tavenina přichází, hned po opuštění trysky vstřikovací jednotky, do kontaktu s chladnou vtokovou vložkou. Následně je rozvedena rozvodnými kanály do tvarových dutin a případného přidržovače vtoku, jak vidíme na obrázku 6. Vlivem nižší teploty vtokového systému dochází k růstu

viskozity taveniny v průběhu toku, čímž se zhoršuje její zpracovatelnost. V důsledku toho je nutná vyšší hodnota vstřikovacího tlaku. Objem materiálu zaplňující vtokový systém se nazývá vtokový zbytek, který je nutné oddělit od výrobku. Oddělení vtokového zbytku může být provedeno buďto přímo při vyhazování výrobku, nebo následnými procesy. Oddělený vtokový zbytek je možné částečně recyklovat, ale stále se jedná o nežádoucí vedlejší

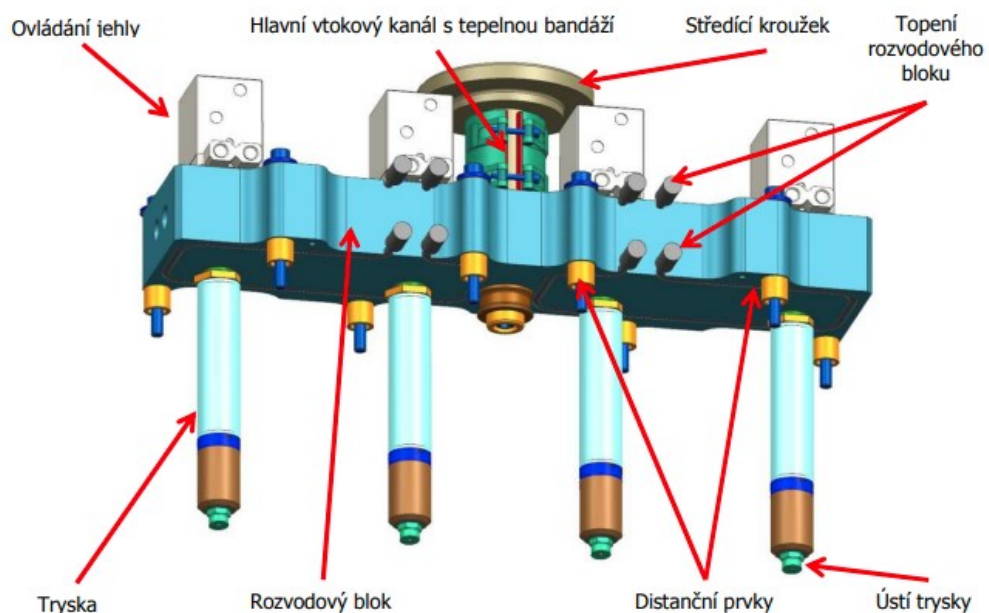


Obrázek 6 Schéma studeného vtokového systému [5]

produkt, a tak je preferováno jeho minimalizování. Mezi výhody studeného vtokového systému pak patří relativně nízké pořizovací a provozní náklady. [5]

2.1.2 Horký vtokový systém

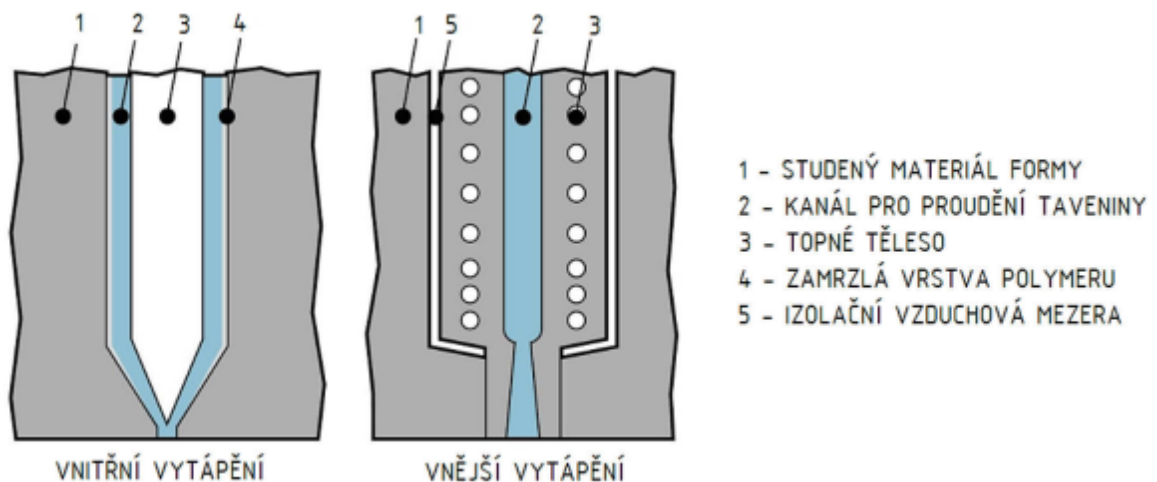
Zejména pro velkosériovou výrobu je výhodné užití horkého vtokového systému. Jak název napovídá, u horkého vtokového systému je dráha taveniny vyhřívána tak, aby bylo docíleno konstantní teploty polymerní taveniny po celou dobu tečení až k tvarové dutině.



Obrázek 7 Sestava rozvodného bloku s uzavírací jehlou [7]

Horký vtokový systém může mít podobu jedné vyhřívané trysky, či sestavy, jejíž hlavními částmi jsou hlavní vtok, rozvodný blok a horké trysky. Příklad sestavy rozvodného bloku ve variantě s jehlou uzavírající ústí trysky je včetně popisu zobrazen na obrázku 7. [7]

Varianta řešení ohřevu rozděluje trysky na topení s vnitřním a vnějším ohřevem. Ve variantě vnitřního ohřevu obtéká tavenina zahřívací těleso, jehož základ je tvořen topnou patronou umístěnou v ose trysky. V druhém případě je ohřev zajištěn navinutým topným svazkem a tavenina proudí osou trysky. Srovnání je zobrazeno na obrázku 8. [7]



Obrázek 8 Srovnání řešení trysek s vnitřním a vnějším vytápěním [8]

2.2 Temperační systémy

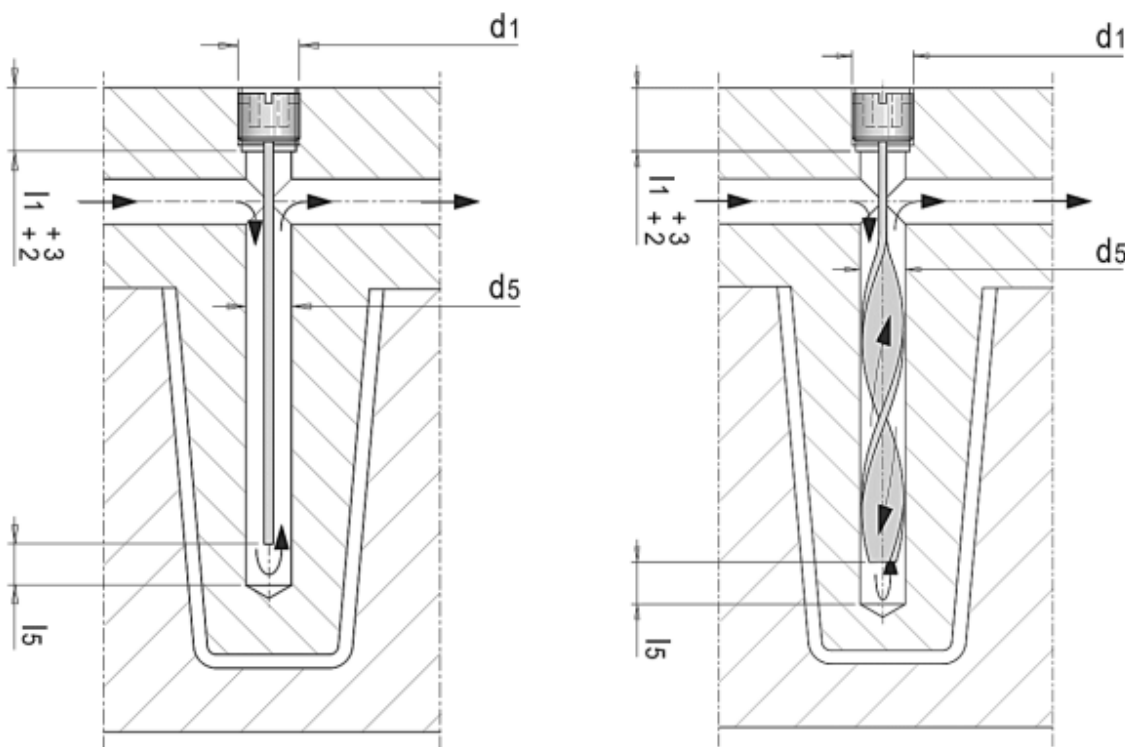
Temperační systémy vstřikovacích forem zásadně ovlivňují kvalitu vstřikovaného výrobku. Účelem těchto systémů je vytvoření a udržení stálého, co možná nejrovnoměrnějšího, teplotního pole v časovém úseku od vstřikování až po vyhození výrobku z tvarové dutiny vstřikovací formy. [9]

Vhodně navržený temperační systém je základním předpokladem správného plnění dutiny vstřikovací formy a následného rovnoměrného chladnutí. Při vstřikování dochází k ohřevu částí vstřikovací formy na vysokou teplotu. V této fázi vstřikovacího cyklu temperace snižuje rozdíl teplot mezi taveninou vysoké teploty a vstřikovací formou, jejíž teplota by byla bez použití temperace pokojová. Výsledný velký rozdíl teplot, vyrovnávaný v krátkém časovém úseku, by nejspíše vedl (u návrhu bez temperačního systému) k poškození tvarové dutiny vstřikovací formy již při prvním plnění. V následujících fázích dochází k odvádění tepla taveniny temperačním systémem až do bodu, kdy materiál výrobku dosáhne vyhazovací teploty. V průběhu této doby je nutné zabezpečit rovnoměrnost

tohoto procesu odvodu teplot. V opačném případě by byl výrobek na různých místech ochlazován různou rychlostí, což by vedlo (prostřednictvím srmštění) k deformaci tvaru.

Temperační systém bývá tvořen sestavou kanálků doporučeného průměru průřezu 6 – 12 mm, jimiž proudí temperační médium. Temperačním médiem bývá voda a glykol v různém poměru, případě olej. Počet a průměr průřezů kanálků by měl být volen tak, aby co nejlépe temperoval tvarovou dutinu s vtokovým systémem. Zároveň by však nemělo dojít k zhoršení tuhosti vstřikovací formy jako celku.

Aby byla zajištěna vhodná teplota u tvarově komplexnějších geometrií výrobků, využívají se záslepky určující dráhu temperačního média. V případě temperace hlubokých dutin a podobných případů je možné využít přepážky, či spirály, jejichž princip je znázorněn na obrázku 9.

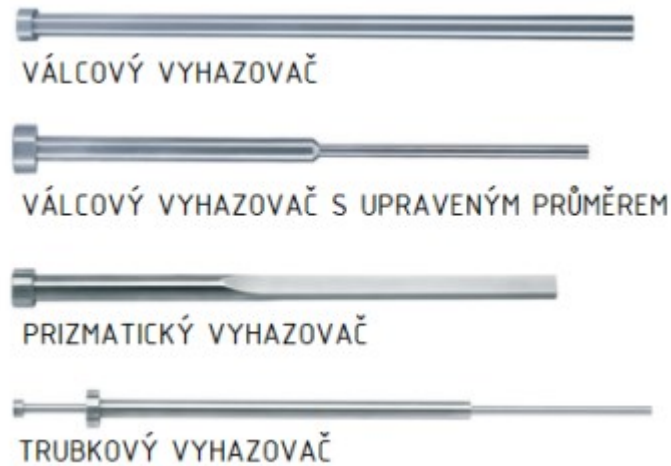


Obrázek 9 Temperační přepážka a spirála [10]

2.3 Vyhazovací systém

Po dosažení vyhazovací teploty je vstřikovací forma otevřena a výrobek je vyhozen z tvarové dutiny prostřednictvím vyhazovacího systému. Vyhazovací systém může být různě komplexní v závislosti na vstřikovaném výrobku. Nejčastěji používanými variantami jsou

mechanické vyhazovací systémy v podobě vyhazovacích kolíků, stíracích desek, či pružných vyhazovačů. Typy vyhazovacích kolíků jsou zobrazeny na obrázku 10.



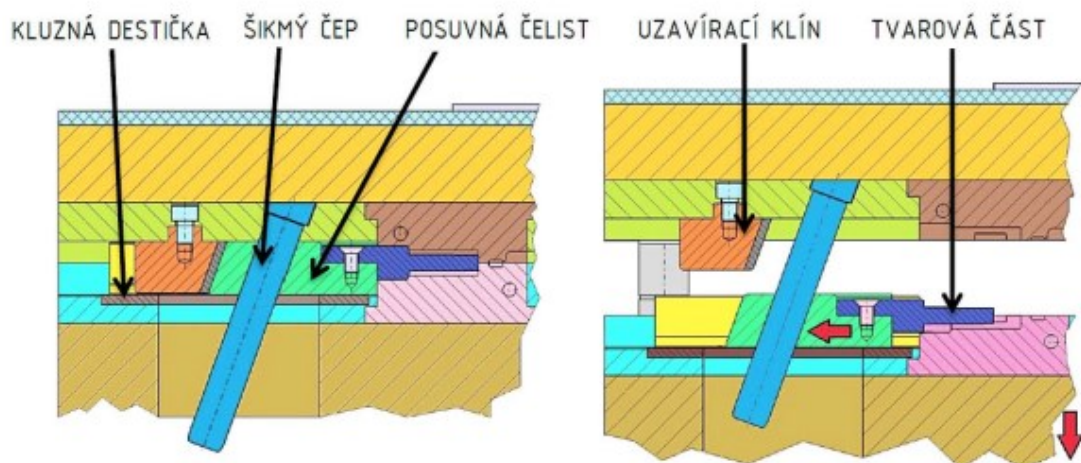
Obrázek 10 Typy vyhazovacích kolíků [11]

Základ nejběžněji používaného designu vyhazovacího systému tvoří kotevní a opěrná deska. V prostoru mezi nimi jsou ukotveny vyhazovací kolíky. Desky jsou vůči sobě vystředěny vodícími pouzdry a vzájemně přišroubovány. Pohyb sestavy je vyvozen prostřednictvím táhla a celá sestava je umístěna v levé, pohyblivé části vstřikovací formy.

Vyhazovače (s výjimkou stírací desky) zanechávají na výrobku stopy po působení. Z tohoto důvodu by neměly být umístěny na pohledové straně výrobku.

2.4 Boční odformování

Dutiny a profily, které není možné tvarovat tvárníkem či tvárnicí jelikož by výrobek nebyl odformovatelný, bývají odformovány prostřednictvím sestavy bočního odformování. Princip mechanického provedení bočního odformování je znázorněn na obrázku 11.



Obrázek 11 Princip bočního odformování [12]

V kontaktu s taveninou je pouze tvarová část doplňující tvarovou dutinu vstřikovací formy. Tvarová část je spojena s posuvnou čelistí. Posuvná čelist je v uzavřeném stavu zajištěna proti pohybu vodícími lištami a uzavíracím klínem. Při otevírání se šikmý čep opírá o dutinu v posuvné čelisti, čímž vyvozuje pohyb. Posuvná čelist klouže po kluzné destičce a je vedena vodícími lištami. Sestava by měla být dále opatřena zámkem otevřené polohy tak, aby ve fázi otevřené vstřikovací formy zůstala posuvná čelist v horní úvrati. Při zavírání je tak šikmý čep naváděn přímo do dutiny v posuvné čelisti.

3 SMRŠTĚNÍ VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ

V dnešní době je při konstrukci různých zařízení mimo jiné velmi silně zohledňován počet dílů v sestavě. Za účelem zminimalizování počtu dílů v sestavě jsou vyvíjeny díly tvarově složitě, u nichž je každá křivka, výběžek, či zahloubení opodstatněno a musí splňovat přísná rozměrová a tvarová kritéria. [13]

Ruku v ruce se zmíněnými požadavky jsou velmi hojně využívány polymerní materiály, u kterých jsou požadavky na přísné rozměrové tolerance obtížně dosažitelné.

Při návrhu dílu z polymerního materiálu musí konstruktér společně s designerem zohledňovat (kromě mechanických vlastností, statických a dynamických požadavků na součást a její elementy, vzhledu případných pohledových ploch a dalších) i reologické chování toku taveniny při vstřikování a vlastnosti materiálu závislé na čase a prostředí.

Jednou ze základních vlastností, na které je třeba brát zvýšeného ohledu při návrhu vstřikovací formy pro výrobu součásti, je smrštění v dutině formy a následné dodatečné smrštění mimo formu.

Smrštění materiálu by mělo být obsaženo v materiálovém listu. Toto smrštění je však pouze informativní, jelikož se měří na zkušebních tělíscích standardizovaných rozměrů (ISO 294 – 4 „Stanovení smrštění“). Naproti tomu se skutečné smrštění pozorovatelné na reálném výstřiku odvíjí od mnoha ovlivňujících faktorů, jenž jsou blíže popsány v této práci. [14]

Fenomén smrštění ve vstřikovací formě je zvláště relevantní u semikrystalických polymerů. Navzdory tomu je (ve srovnání s úsilím vynaloženým výzkumnými pracovníky v oblasti vývoje smrštění a termálního napětí amorfních polymerů) výzkum semikrystalických polymerů spíše vzácný. To je pravděpodobně způsobeno tím, že tento jev úzce souvisí s časovým, teplotním a tlakovým vývojem krystalinity, který je poměrně obtížně předvídatelný. [15]

4 CO JE TO SMRŠTĚNÍ

Existuje poměrně velké množství technologických parametrů, které ovlivňují finální vlastnosti zpracovávaných polymerních materiálů. Z pohledu aplikace jsou podstatné nejen výsledné mechanické vlastnosti, ale i finální rozměry dílů, a to hlavně z důvodu montáže. Finální rozměry dílů jsou přímo závislé na velikosti smrštění. [16]

Smrštěním se rozumí změna objemu plastového dílu, která je způsobena chlazením z teploty taveniny na pokojovou teplotu bez současného působení tlaku. Smrštění je děleno na rozměrové a objemové. Zatím co rozměrové smrštění udává změnu rozměru ve směru měření, objemové smrštění udává poměr objemu dutiny formy vůči objemu výrobku ochlazeného na standardní teplotu. Matematicky je rozměrové smrštění popsáno vztahem 1 a objemové smrštění vztahem 2. Vypočítané hodnoty se používají ke zvětšení dutiny vstřikovací formy a měly by být aplikovány s přesností alespoň 5 desetinných míst. [13, 16]

Rozměrové smrštění:

$$S = \frac{X_f - X_v}{X_f} \cdot 100 [\%] \quad (1)[16]$$

Kde:

S – výrobní smrštění [%]

X_f – rozměr v dutině formy [mm]

X_v – rozměr výrobku při standardních normovaných podmínkách (23 °C) [mm]

Objemové smrštění:

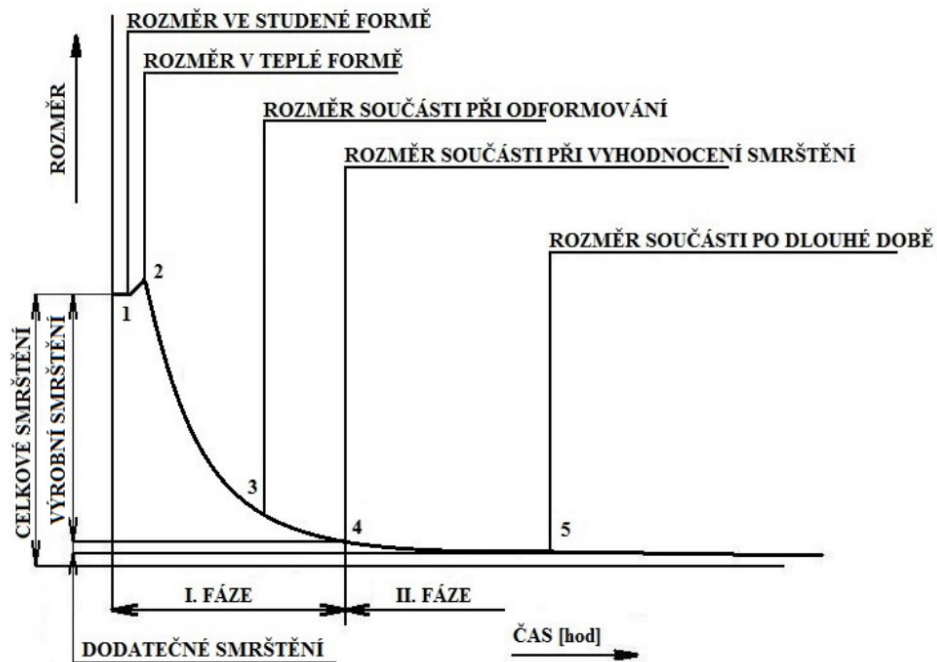
$$K = \frac{100 \cdot \frac{s}{100 - s} + 100}{100} = \frac{100}{100 - s} [-] \quad (2)[16]$$

Kde:

K – objemové smrštění [-]

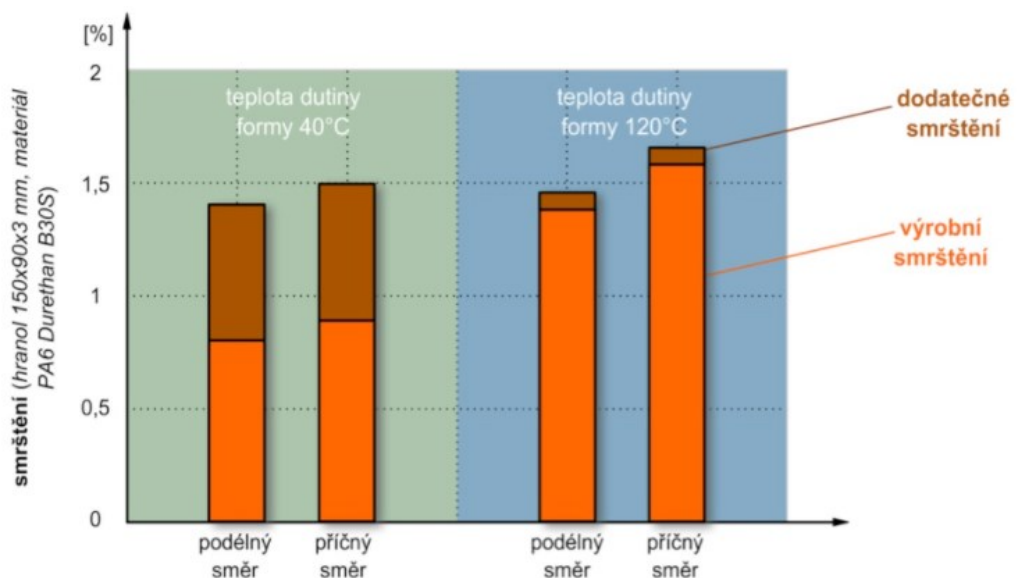
5 ROZDĚLENÍ SMRŠTĚNÍ

Smrštění je poměrně dlouhodobý proces, který se dělí na dvě fáze nazývané výrobní a dodatečné smrštění (obrázek 12). Dále se smrštění dělí na podélné a příčné, jejichž název je odvozen od směru toku materiálu (v oblasti průřezu vtokového ústí) při vstřikování.



Obrázek 12 Průběh smrštění [14]

Pro lepší představu o vlivu jsou hodnoty jednotlivých smrštění znázorněna v grafu na obrázku 13. Jako příklad byly zvoleny hodnoty smrštění pro polymer polyamid 6 s obchodním názvem Durethan B 30 S. [17]



Obrázek 13 Vliv teploty formy na průběh smrštění [16]

Výrobní smrštění

Fáze výrobního smrštění začíná v okamžiku začátku vstřikovacího procesu. Již při opouštění trysky začíná polymer ztrácet teplo vlivem přechodu do prostředí s teplotou nižší než zpracovatelskou, čímž dochází ke smrštění. Konec výrobního smrštění bývá 16 – 24 hodin po vyjmutí výstřiku z dutiny formy. Výrobní smrštění představuje okolo 90 % celkového smrštění výrobku. [14, 17, 18]

Výrobní smrštění ve směru podélném (S_{Mp}):

$$S_{Mp} = 100 \cdot \frac{l_c - l_1}{l_c} [\%] (3) [17]$$

Výrobní smrštění ve směru příčném (S_{Mn}):

$$S_{Mn} = 100 \cdot \frac{b_c - b_1}{b_c} [\%] (4) [17]$$

Kde:

l_c – délka ve středu tvarové dutiny [mm]

b_c – šířka ve středu tvarové dutiny [mm]

l_1 – délka výrobku [mm]

b_1 – šířka výrobku [mm]

[17]

Měření výrobku bývá prováděno 24 – 48 hodin po vyjmutí z dutiny formy, aby bylo zaručeno dokonalé zchlazení. Po tuto dobu by měl být výrobek uložen ve standardním prostředí o teplotě 23 ± 2 °C za relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 5 %. Ve stejném prostředí by mělo být i prováděno měření. [14, 18]

Následné dodatečné smrštění se uvažuje okolo 168 hodin od vyjmutí výrobku z dutiny formy. Během této doby dochází ke stabilizaci rozměrů například relaxací napětí, či sekundární krystalizací (v případě semikrystalických polymerů). Dodatečné smrštění může

být urychleno temperací. Stejně jako výrobní smrštění, i dodatečné smrštění je uváděno v procentech. Hodnoty však nelze sečíst, jelikož každá vychází z jiného rozměru. [14, 16]

Dodatečné smrštění ve směru podélném (S_{pp}):

$$S_{pp} = 100 \cdot \frac{l_1 - l_2}{l_1} [\%] (5) [17]$$

Dodatečné smrštění ve směru příčném (S_{pn}):

$$S_{pn} = 100 \cdot \frac{b_1 - b_2}{b_1} [\%] (6) [17]$$

Kde:

l_1 – délka výrobku [mm]

b_1 – šířka výrobku [mm]

l_2 – délka výrobku měřená s časovým odstupem [mm]

b_2 – šířka výrobku měřená s časovým odstupem [mm]

[17]

Z fyzikálního hlediska je příčinou smrštění tavenin polymerů jejich teplotní roztažnost, která se odvíjí od součinitele délkové teplotní roztažnosti. Součinitel délkové roztažnosti je závislý na teplotě. Dále v případě semikrystalických polymerů s rostoucím obsahem krystalického podílu klesá teplotní roztažnost. **Konečné objemové smrštění může být odečteno z pVT diagramu příslušného polymeru.** [19, 20]

Smrštění se u základních polymerů pohybuje v rozmezí od 6 do $24 \cdot 10^{-5} \%$, u vyztužených či plněných plastů od $1,5$ do $5 \cdot 10^{-5} \%$ v závislosti na obsahu plniva.

6 NA ČEM JE SMRŠTĚNÍ ZÁVISLÉ?

Ve skutečnosti je míra smrštění ovlivňována řadou faktorů a vnějších efektů, které budou následně popsány. Mezi relevantní faktory patří:

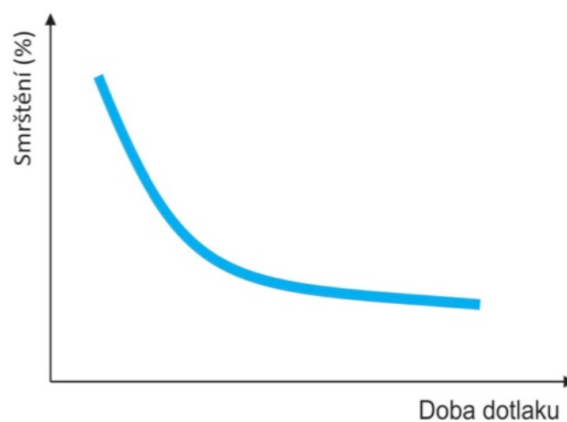
- technologické parametry
 - doba dotlaku
 - velikost dotlaku
 - doba chlazení
 - teplota dutiny formy
 - teplota taveniny
 - rychlost vstřikování
 - umístění vtoku
- geometrie tvarové dutiny
 - tloušťka stěny
 - přechody v tloušťce stěny
- typ vstřikovaného plastu
 - amorfní polymery
 - semikrystalické polymery
 - použítá plniva a aditiva

[13, 14, 15, 16, 21, 22]

6.1 Technologické parametry

6.1.1 Doba dotlaku

Účelem dotlaku je kompenzovat smrštění pomocí dopravy dodatečného množství taveniny do dutiny formy. Při dotlaku je materiál v dutině formy dotlačován, čímž je kompenzováno snížení měrného objemu chladícím procesem. Z tohoto důvodu má doba dotlaku primární vliv na množství taveniny, které je vstřikováváno do dutiny formy navíc a na kompenzaci smrštění. Čím delší bude doba dotlaku, tím menší bude výrobní smrštění, avšak, jak je vidět na obrázku 14, závislost není lineární. [9]



Obrázek 14 Závislost smrštění na době dotlaku [16]

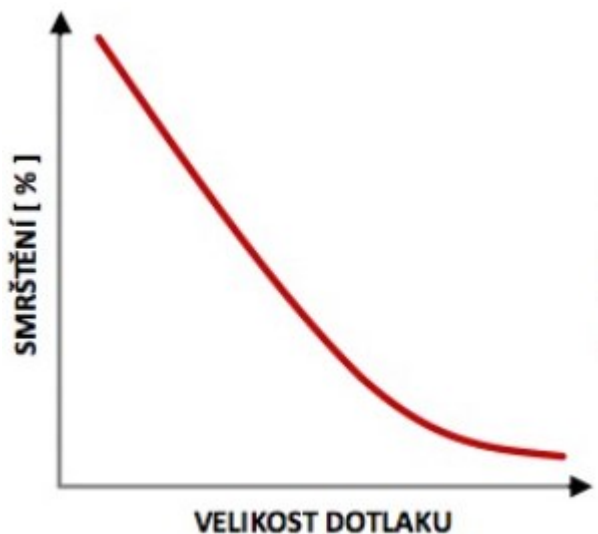
V případě amorfních materiálů má doba dotlaku mírně menší vliv než v případě materiálů semikrystalických. To je z důvodu menšího množství materiálu dopravovaného do dutiny formy navíc. [23]

Používání vtokových ústí velkých průřezů dramaticky prodlužuje dobu, během které může dotlak působit. Dále je vždy nutné umisťovat vtokové ústí do oblasti nejtlustšího průřezu výrobku. [23]

6.1.2 Velikost dotlaku

V případě obou typů termoplastů (amorfních i semikrystalických) má velikost dotlaku rozhodující vliv na velikost smrštění. Čím větší bude velikost dotlaku, tím menší bude

výrobní smrštění, avšak je nutné zdůraznit, že ani zde není závislost lineární, jak je vidět na obrázku 15. [23]



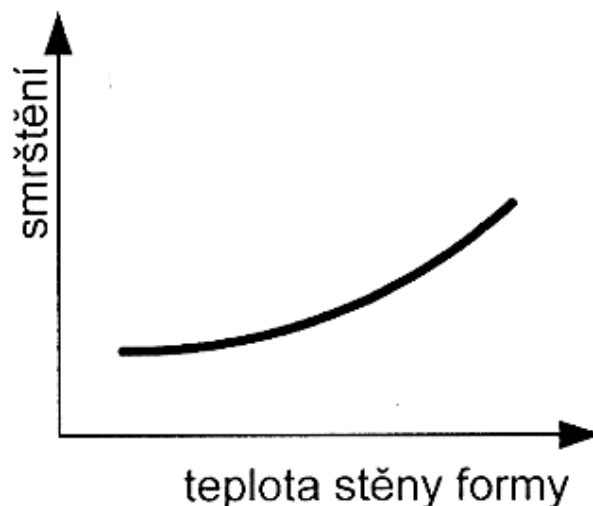
Obrázek 15 Závislost smrštění na velikosti dotlaku [13]

Vliv velikosti dotlaku na smrštění je regresivní. Jinými slovy, zvětšující se velikostí dotlaku je snižována kompenzace smrštění až do úrovně, kdy se stává další přírůstek velikosti dotlaku nepodstatný. [23]

S dobrým návrhem vtokového systému a vstřikovaného dílce je možné v případě semikrystalických termoplastů redukovat smrštění až o 0,5 % zvětšením velikosti dotlaku. V případě amorfních materiálů je však možné dosáhnout maximální hodnoty 0,2 % z důvodu nižšího potenciálu smrštění. [23]

6.1.3 Teplota dutiny formy

Společně s rostoucí teplotou povrchu dutiny formy roste i výrobní smrštění, jak je vidět na obrázku 16. Společně s tímto vlivem se překrývají i další rozličné faktory ovlivňující proces tečení, jako například dotlaková fáze. To platí především pro krystalické materiály.



Obrázek 16 Závislost smrštění na teplotě stěny vstřikovací formy [24]

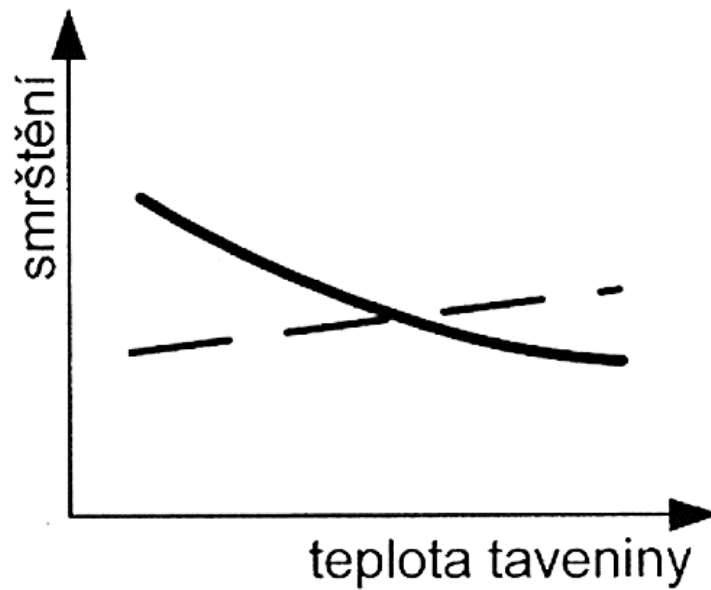
Kromě výrobního smrštění má teplota dutiny formy velký vliv i na rychlost chlazení. Nízká teplota (například 40 °C) vede k vysokému rozdílu teplot při procesu vstřikování. Ten pak k rychlejšímu chlazení, což má za důsledek nízkou úroveň krystality vstřikovaného materiálu. [23, 24]

Naproti tomu má vysoká teplota dutiny formy (120 °C, menší rozdíl teplot) za následek velké výrobní smrštění společně s vysokým stupněm krystality. Dodatečné smrštění je však v případě vyšší teploty dutiny formy výrazně redukováno. Celkové smrštění dosahuje v obou případech přibližně stejné hodnoty. [23]

6.1.4 Teplota taveniny

I teplota taveniny má vliv na velikost smrštění. Ve hře jsou dva efekty. Jednak zvýšená teplota taveniny zvyšuje potenciál termální kontrakce v materiálu (obrázek 17, křivka A – přerušovaná) a také vede ke snížení viskozity taveniny. Díky nižší viskozitě dochází k lepšímu plnění dutiny formy, což v závěru vede ke snížení hodnoty smrštění (viz křivka B – plná). Zatím co křivka A je teoretickým předpokladem, křivka B je naměřeným a pozorovaným jevem. Efekt zlepšeného plnění totiž dominuje nad potenciálem kontrakce. Nicméně, v případě nepříznivé tloušťky stěny a zhoršených plnicích podmínek, může převládnout efekt potenciálu kontrakce, což by vedlo ke zvětšování smrštění v závislosti na zvětšující se teplotě taveniny. [23]

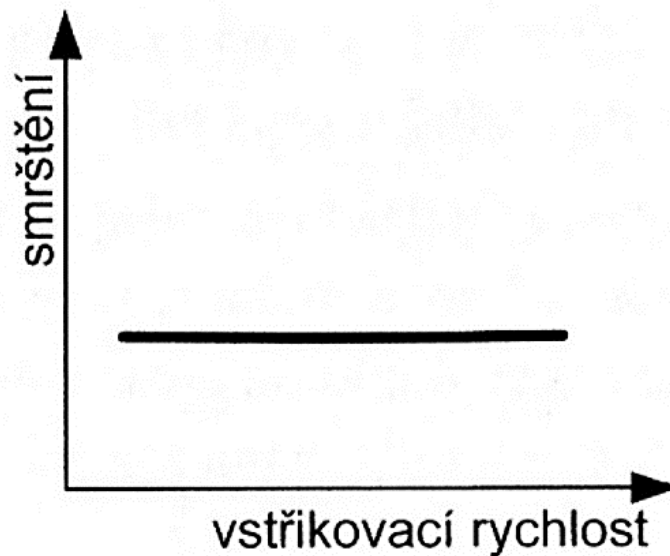
Při optimalizaci ostatních procesních parametrů bývá vhodné udržovat konstantní teplotu taveniny. [23]



Obrázek 17 Závislost smrštění na teplotě taveniny [25]

6.1.5 Rychlost vstřikování

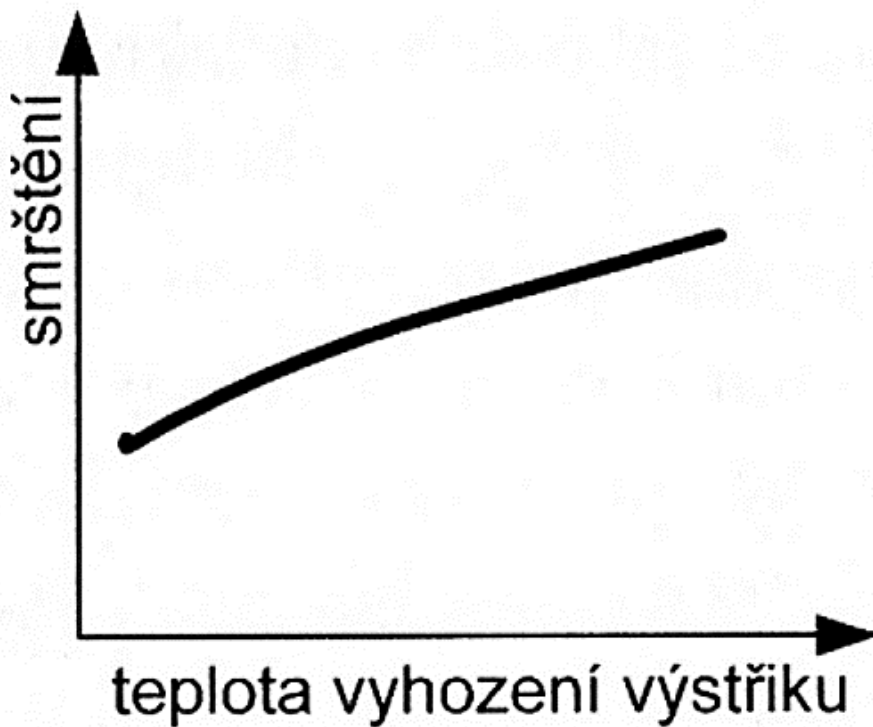
Rychlost vstřikování taveniny do dutiny formy nemá téměř žádný vliv na celkové smrštění. Z výsledků pokusů se zdá, že se zde vyrušují efekty orientace s přeorientováním a disipace s rozložením tlaku. Výsledný efekt je znázorněn na obrázku 18. [23]



Obrázek 18 Závislost smrštění na vstřikovací rychlosti [25]

6.1.6 Vyhazovací teplota

Čím déle zůstává výrobek v dutině formy, tím delší je doba chlazení, a tedy i nižší vyhazovací teplota. Zároveň s tím je výrobku zabraňováno v deformaci vlivem tvaru formy. Dále, zejména u semi-krystalických polymerů, klesá výrobní smrštění s klesající vyhazovací teplotou (obrázek 19). [23]

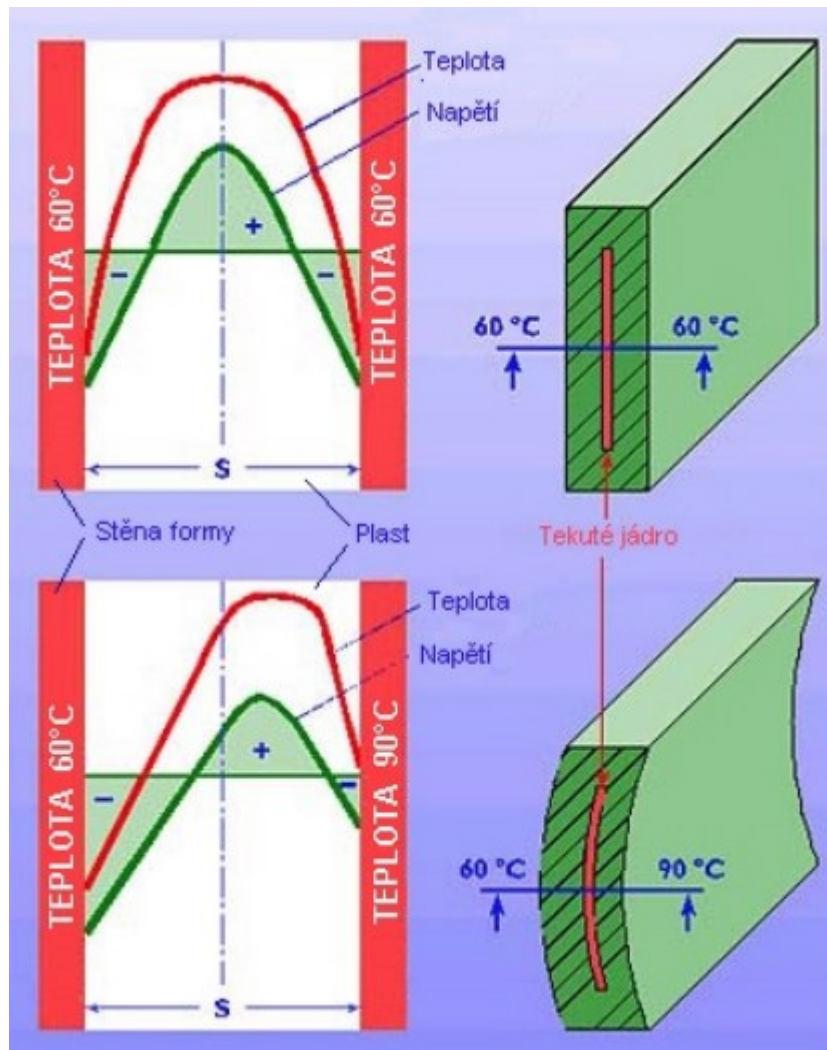


Obrázek 19 Závislost smrštění na vyhazovací teplotě [25]

Při vyšší vyhazovací teplotě (v důsledku kratšího času chlazení) je ve vnějších vrstvách výrobku znatelná výrazně vyšší teplota. Ta zmírňuje povrchové napětí a zvyšuje míru smrštění. [22]

6.1.7 Zahřívání/chlazení

Rozdílné úrovně chlazení a ohřevu v různých oblastech výrobku vytváří nesterjnorodé smrštění, což může vést k odlišným vlastnostem výrobku (obrázek 20). [23]



Obrázek 20 Deformace vlivem rozdílných teplot [26]

V případě, kdy je rozdílná teplota stěny na vnitřní straně vstřikovaného dílu vůči vnější, projeví se větší míra smrštění na straně s vyšší teplotou. V průběhu tohoto nerovnoměrného smršťování dochází k posunu teplotního profilu v postupně tuhnuící tavenině, což má za následek rozdílný potenciál smrštění a zamrzlá napětí. Tento typ rozdílného smrštění je možné přirovnat k efektu působení teplotního pole o zvyšující se teplotě na bimetalový plíšek. Rozdílné hodnoty koeficientu teplotní vodivosti pak vedou k teplotní deformaci tvaru (například do tvaru luku, jak je vidět na obrázku 20). [23]

Z tohoto důvodu je vhodné se ujistit, že má dutina vstřikovací formy na všech místech stejnou teplotu povrchu. Vliv zahřívání/chlazení ve formě je výrazně větší v případě nevyztužených termoplastů než například u termoplastů vyztužených skelnými vlákny. V případě termoplastů vyztužených skelnými vlákny mají na smrštění dominantní vliv vlákna. [23]

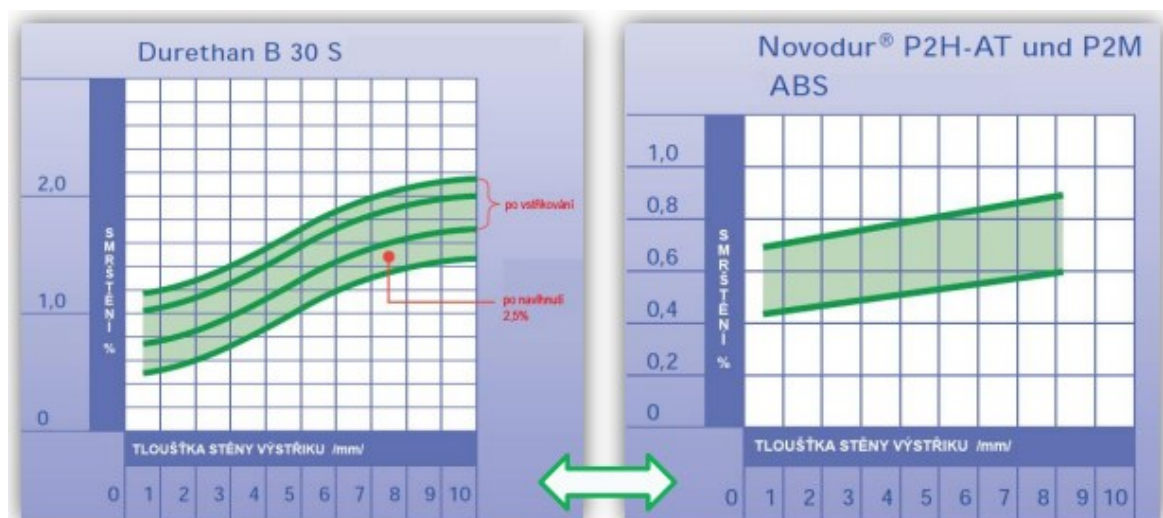
6.2 Geometrie tvarové dutiny

6.2.1 Tloušťka stěny

Proměnlivá tloušťka stěny vede ke kvantitativní změně u všech ostatních proměnných ovlivňujících smrštění, jakými jsou například působení dotlaku, nebo účinek chlazení. [9]

Za identických teplotních rozdílů formy a taveniny se bude součást s tenčí stěnou ochlazovat rychleji než součást se stěnou tlustší. V důsledku toho mají všechny tepelně podmíněné procesy (jako je krystalizace a vnitřní pnutí v důsledku ochlazování) méně času na působení. Vzhledem k tomuto faktu je velmi obtížné zformulovat obecné tvrzení o vlivu tloušťky na smrštění. Přesto je ale možné poukázat alespoň na základní korelace mezi smrštěním a tloušťkou výrobku. [23]

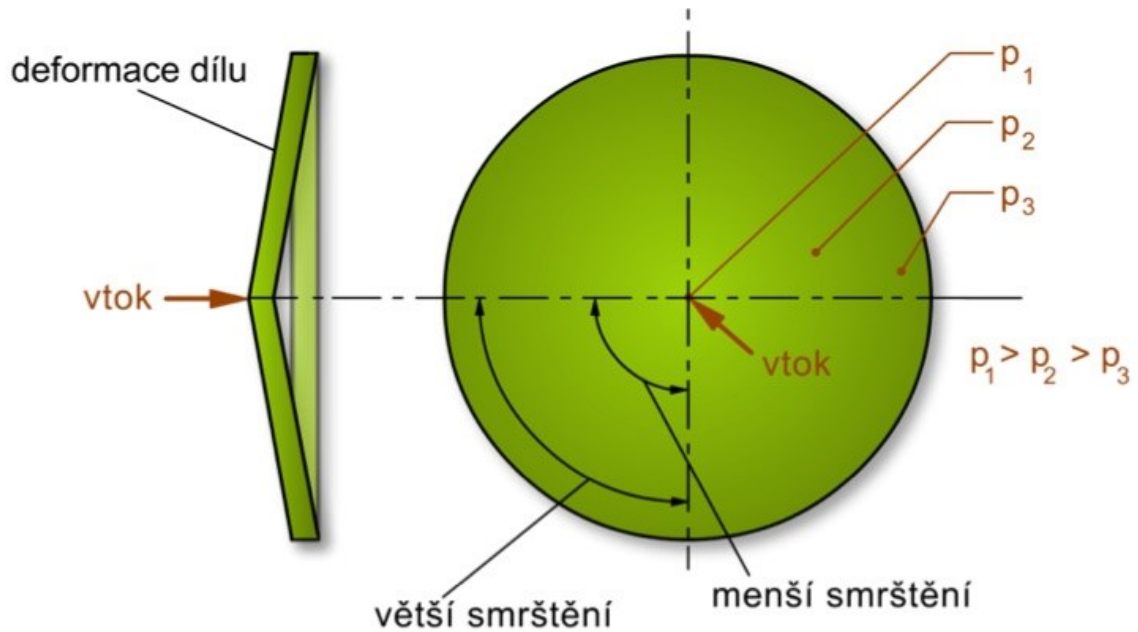
Obrázek 21 znázorňuje závislost mezi smrštěním a tloušťkou stěny pro semikrystalický a amorfní termoplast. Tloušťka stěny má zásadní vliv na smrštění zvláště v případě nevyztuženého semikrystalického termoplastu (obrázek 21, vlevo). Tlustší stěna se chladí pomaleji, což poskytuje příznivější podmínky pro krystalizaci. Vyšší stupeň krystality pak zvyšuje míru smrštění. Jak je vidět na obrázku 21, mohou se u rozdílných tlouštěk stěn vyskytovat různé hodnoty smrštění. Různá úroveň smrštění v rámci jedné součásti může vyústit ve změnu tvaru součásti, tzv. „warpage“ (volně přeloženo jako zborcení způsobené smrštěním). Tento termín označuje právě změnu tvaru způsobenou nerovnoměrnou distribucí teploty na součásti umístěné v prostoru. Jev je výraznější u semikrystalických termoplastů než u amorfních. [23]



Obrázek 21 Závislost smrštění na tloušťce stěny výrobku [27]

6.2.2 Redukovaná tloušťka stěny na konci dráhy vstřikovaného materiálu

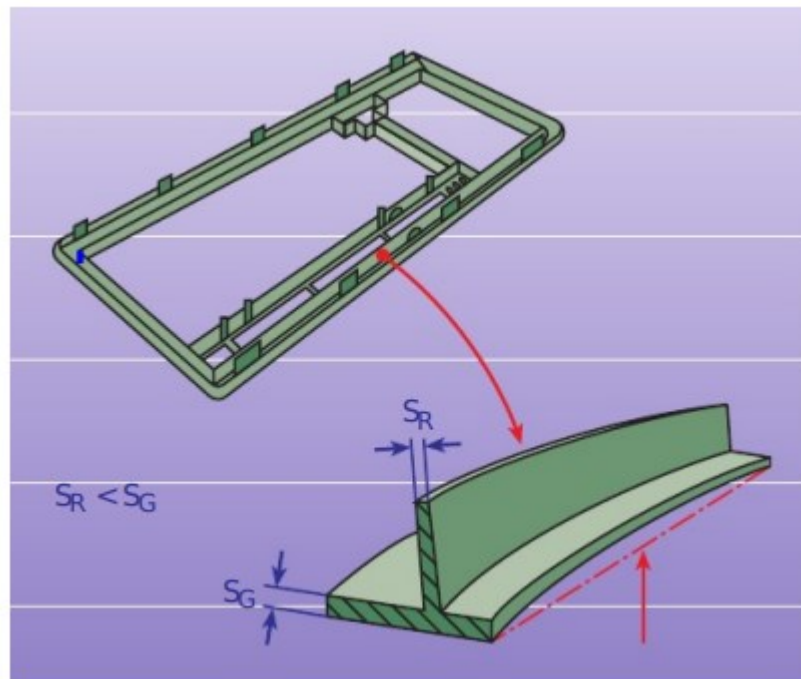
Jak ukazuje obrázek 22, efekt dotlaku se vzdáleností od vtokového ústí snižuje, což vede ke zvyšování hodnoty smrštění v oblastech vzdálených od vtokového ústí. Právě proto je vhodné zredukovat tloušťku stěny v oblastech konce toku taveniny. Zmenšením hodnoty tloušťky stěny je snížen potenciál smrštění, což vede ke zmenšení rozdílu mezi hodnotami smrštění u vtokového ústí a na konci toku taveniny. [23]



Obrázek 22 Redukovaná tloušťka stěny na konci dráhy vstřikovaného výrobku [28]

6.2.3 Žebrování

Žebrování může mít velký vliv na smrštění vstřikovaného výrobku, zejména na rovnoměrnost smrštění napříč celým objemem výrobku. Žebra by měla být navržena tenčí než stěna, ke které jsou připojena, a to dle předem stanoveného maximálního poměru tloušťky stěny žebra k tloušťce stěny. Žebra se obecně smršťují méně než jiné části vstřikovaného výrobku, což může při špatném poměru (tloušťka žebra/tloušťka stěny) vést ke zborcení výrobku (warpage), jak ukazuje obrázek 23. [23]



Obrázek 23 Znáornění zborcení žebra [23]

6.3 Návrh vstřikovací formy z pohledu optimalizace smrštění

Hlavním parametrem ovlivňujícím smrštění z pohledu návrhu vstřikovací formy je návrh vtokové sestavy. Čím delší je dráha toku taveniny, tím větší je pak výsledné smrštění. Významný vliv má také umístění a typ vtokového ústí. Za účelem zmenšení hodnoty smrštění tedy musí být optimalizovány parametry:

- umístění vtokového ústí,
- průměr rozvodného kanálu,
- délka trajektorie toku
- a musí být zajištěna co možná nejhladší dráha toku bez překážek. [29]

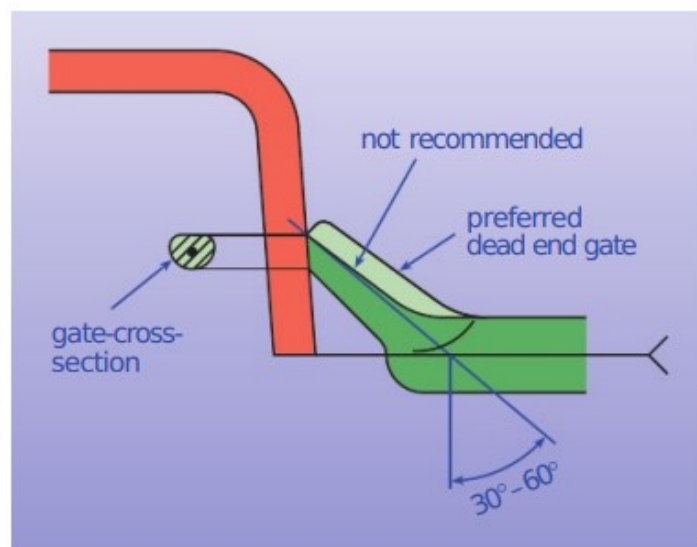
Špatně navržená vstřikovací forma může vést k asymetrickému teplotnímu poli formy, způsobenému nevyváženým přesunem tepla mezi dvěma stranami formy. Za těchto podmínek pak dochází ke zvyšování úrovně nesymetrického smrštění, a tedy zborcení. V souvislosti s tímto tématem je také nutné pečlivě navrhnout temperační systém (průměr kanálů, trajektorii). [29]

Dalším faktorem vstřikovací formy ovlivňujícím smrštění je materiál vstřikovací formy. Použitím kovové (například hliníkové) a epoxidové formy se teplotní profil formy mění. To má za následek rozdílnou distribuci tepla ve formě, a tedy i rozdílné smrštění. U krystalických materiálů je efekt výraznější než u materiálů amorfních. [29]

6.3.1 Typ vtokového ústí

Různé geometrie vstřikovaných dílů často vyžadují různé typy vtokových ústí. Vtoková ústí by měla být navrhována tak, aby umožňovala bezproblémový průběh dotlakové fáze bez ohledu na typ vtokového ústí (filmový, tunelový vtok a další). V případě správně navrženého vtokového ústí je dotlak mnohem efektivnější ve své snaze kompenzovat smrštění. [23]

Modifikovaný tunelový vtok (obrázek 24) poskytuje optimální podmínky pro efektivní fázi dotlaku (ve smyslu vlivu na smrštění výrobku), ovšem za předpokladu, že se jedná o optimální konstrukční řešení z pohledu materiálu a geometrie vstřikovaného dílu. U varianty s nevhodným návrhem vtokového ústí dochází nejen ke snižování efektivity fáze dotlaku, ale také k ukládání většího teplotního a mechanického napětí do materiálu v průběhu plnění. [23]



Obrázek 24 Doporučený design pro modifikovaný tunelový vtok [23]

Volný překlad/význam:

Gate – cross – section – Průřez vtokového ústí

Not recommended – Nedoporučuje se

Preferred dead end gate – Preferované vtokové ústí se slepým koncem

6.3.2 Umístění vtokového ústí

Vtokové ústí je vhodné umísťovat do oblasti největšího objemu materiálu kdykoliv je to možné. Toto řešení umožňuje v případě potřeby minimalizovat rozdíly ve smršťování úpravou tloušťky stěny.

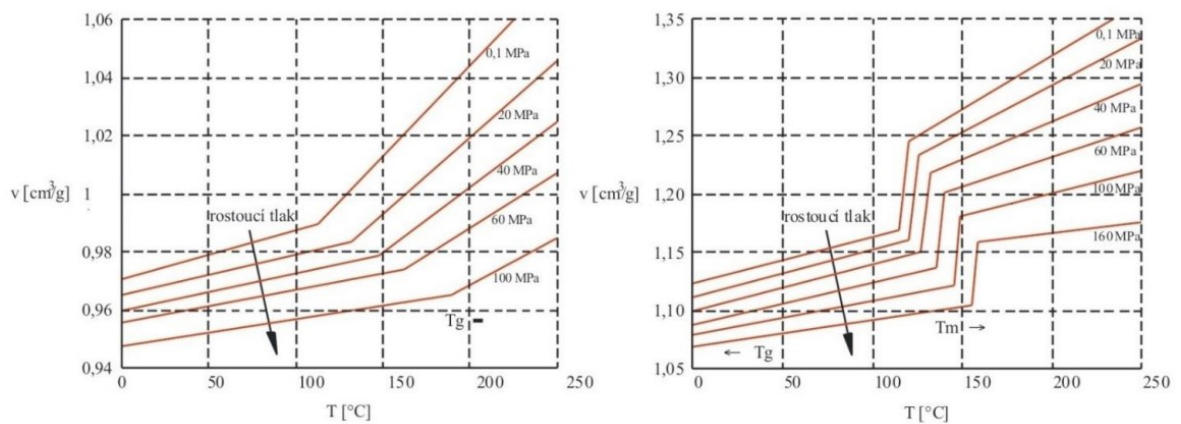
6.4 Materiálové vlastnosti

Pod tímto pojmem jsou zahrnuty aspekty jako například chování tlak-měrný objem-temperatura (obecně popisováno formou pV_T diagramu), vnitřní struktura/morfologie a krystalinita materiálu. Všechny tyto materiálové vlastnosti mají vliv na průběh procesu smrštění materiálu a musí být zahrnuty. [29]

6.4.1 Materiálové vlastnosti z makroskopického pohledu

Vnitřní příčinou smrštění vstřikovaných dílců je termodynamické chování materiálu. Stlačitelnost a tepelná roztažnost amorfního a semikrystalického termoplastu je znázorněna jako trend v pV_T diagramu, který je vidět na obrázku 25. Z tohoto obrázku je patrné, že se liší chování amorfního termoplastu od semikrystalického, což musí být zohledněno. Při srovnání těchto dvou grafů je v oblasti taveniny zjevná lineární závislost měrného objemu na teplotě. Naproti tomu je možné pozorovat v oblasti pevné fáze zřetelný rozdíl v průběhu křivky grafu. Z důvodu krystalizace zde dochází v případě semikrystalických materiálů k exponenciálnímu snižování měrného objemu při snižování teploty, zatím co je tato závislost lineární u materiálů amorfních. Tento rozdíl je důvodem většího smršťování semikrystalických termoplastů. V grafech je dále možné pozorovat průběh při různých

velikostech dotlaku. Z průběhů křivek je vidět snižování smrštění v závislosti na zvyšování dotlaku. [29]



Obrázek 25 pVT diagramy amorfního (vlevo) a semikrystalického (vpravo) polymeru [30]

6.4.2 Morfologie materiálu

Morfologické aspekty jako rozdílná hustota krystalické fáze před a po zamrznutí a efekt toku (ve smyslu orientace makromolekul) mohou ovlivňovat velikost smrštění. Experimentální výsledky ukázaly, že má proces plnění formy převládající vliv na orientaci makromolekul v dutině formy. Při vstřikování jsou polymerní řetězce v tavenině orientovány ve směru toku. Dále bylo pozorováno vytvoření zamrzlých vrstev v roztaveném polymeru v oblastech kontaktu s povrchem formy během vstřikovací fáze. Tyto vrstvy vykazovaly orientované řetězce molekul, které ovlivňují smrštění a indukují zbytková vnitřní napětí v souvislosti s rozměrovými odchylkami. Vrstvená struktura se objevuje na vnější ploše lisovaného dílu a poměr objemu jádra k povrchu je třeba považovat za faktor, který silně ovlivňuje smrštění. [29]

6.4.3 Krystalinita materiálu

Rozměrová stabilita vstřikovaného dílce je spjata s jeho krystalinitou – čím větší podíl krystalické fáze materiál obsahuje, tím více se smršťuje. V určitých případech je možné pozorovat krystalizaci materiálu dílce i den po procesu vstřikování, jelikož proces krystalizace pokračuje i pod teplotou tání a nad teplotou skelného přechodu. Proces smrštění tedy začíná již v dutině formy v momentě, kdy dílčí vrstvy polymeru ztuhnou. [29]

7 METODY URČOVÁNÍ SMRŠTĚNÍ KONKRÉTNÍHO VÝROBKU

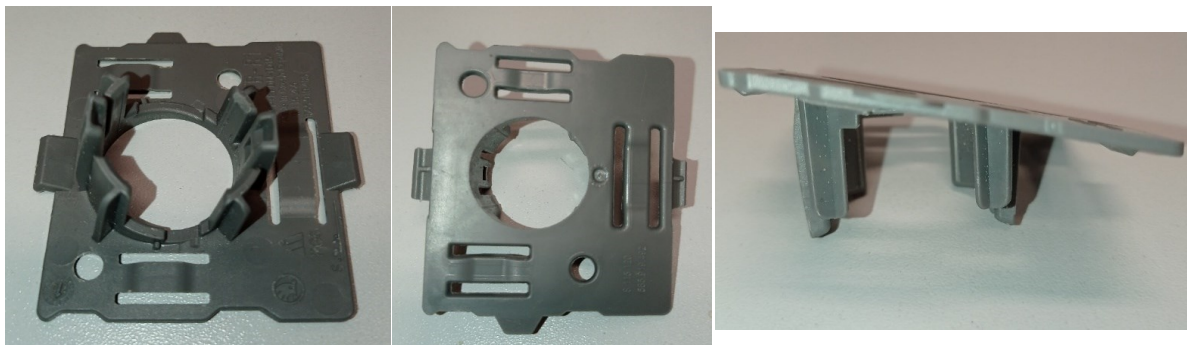
Z výčtu všech vlivů ovlivňujících smrštění je zřejmé, že nelze zcela zohlednit všechny faktory a předem stanovit přesnou hodnotu smrštění.

Pro co možná nejpřesnější predikci smrštění jsou používány simulační softwary (MoldFlow, CadMold atd.), které zohledňují zmíněné aspekty. V databázi aplikace Autodesk Moldflow Synergy jsou pro některé polymery data smrštění již naměřená na zkušební formě. K datům jsou připojeny informace o tlaku a teplotě, což mimo jiné umožňuje korigovat výpočty smrštění semikrystalických polymerů z pVt diagramů pomocí modelu CRIMS (Correct Residual In-mold Stress). Model CRIMS do výpočtu smrštění zahrnuje vliv krystalické fáze i vliv orientace makromolekul či vláken ve směru toku a ve směru kolmém na tok taveniny. Při požadavku na rozměrově velmi přesné díly se dokonce vyplatí výroba prototypové formy, na níž se ověří technologie a následně se odečtou přesné hodnoty smrštění. Je však důležité, aby se prototypová forma co nejvíce přiblížila budoucí formě výrobní, a to jak z hlediska tvaru, tak konstrukce vtokové soustavy, temperačního a vyhazovacího systému. [13, 20]

Z praktického (technologického) hlediska je pak výhodnější vytvořit konstrukční návrh prototypové dutiny formy z pohledu vzdáleností menší než naopak. Je totiž vždy jednodušší materiál z dutiny formy odebrat a tím zvětšovat dutinu formy nežli materiál přidávat navařováním. V případě otvorů a dutin v budoucím výrobku (tedy vyčnívajících profilů tvárníku, tvárnice, či bočního odformování) je ze stejného důvodu výhodnější navrhnout hodnoty větší.

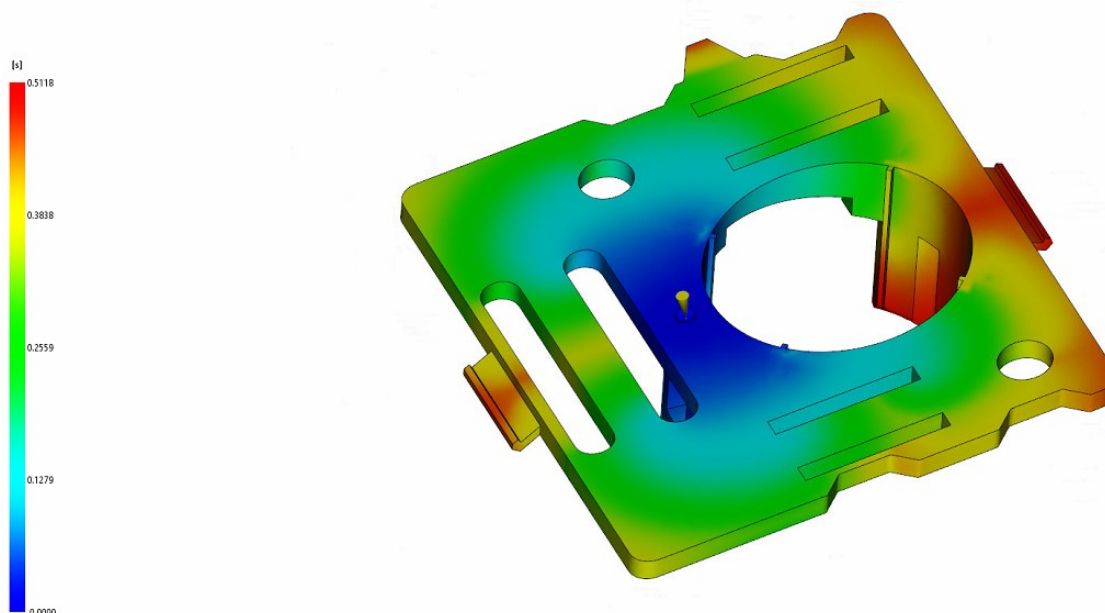
Určení smrštění pomocí programu Autodesk Moldflow Synergy

Pro ilustraci principu určování koeficientů kompenzace smrštění byla vytvořena analýza ve zmíněném programu. Předmětem analýzy byl držák senzoru parkovacího radaru pro přední nárazník vozu Škoda Kodiaq vyrobený firmou Magna (obrázek 26).



Obrázek 26 Fotografie držáku senzoru parkovacího radaru

Výrobek byl vymodelován (podle originálních rozměrů, bez jakéhokoliv zvětšení), model převeden do aplikace Moldflow a zde následně vysítován dle zásad vedoucích k vhodné podobě sítě. Typem analýzy byla zvolena analýza: „Fill + Pack + Warp“. Za účelem zkoumání smrštění na libovolném výrobku je nutné, aby byl součástí analýzy i

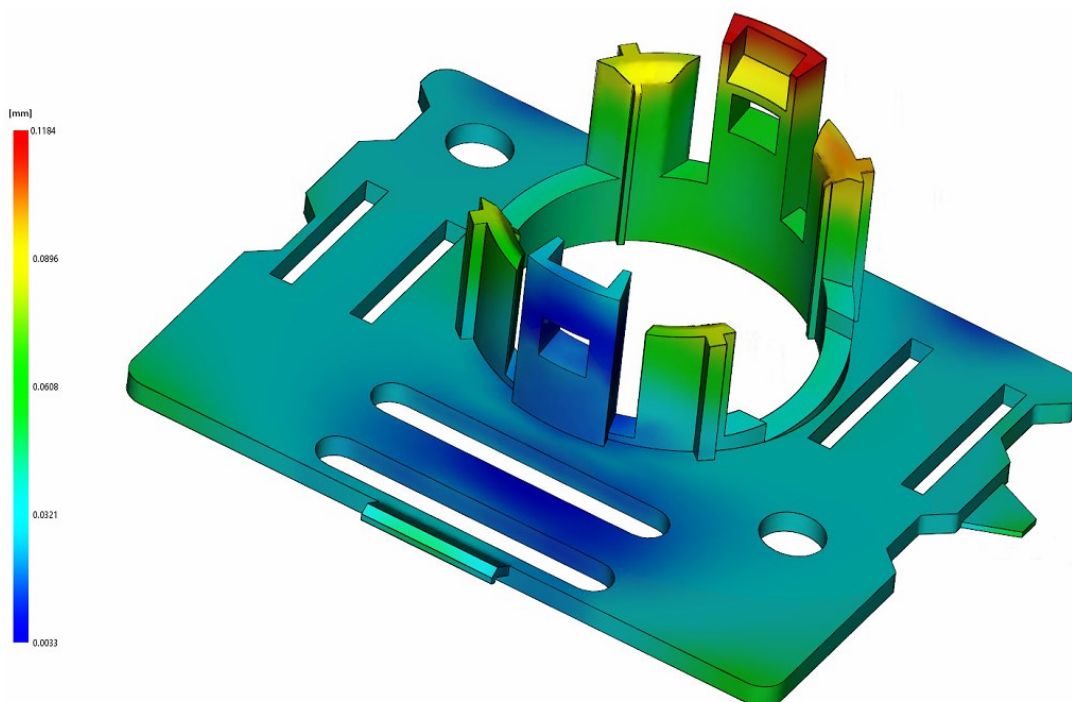


Obrázek 27 Určení smrštění – Čas plnění

oddíl „Warp“, v rámci kterého program počítá deformace součásti vlivem procesních parametrů a dalších vlivů popsaných výše. Dále bylo provedeno kompletní nastavení parametrů analýzy a analýza byla spuštěna. Analýza smrštění by byla bezpředmětná, dokud

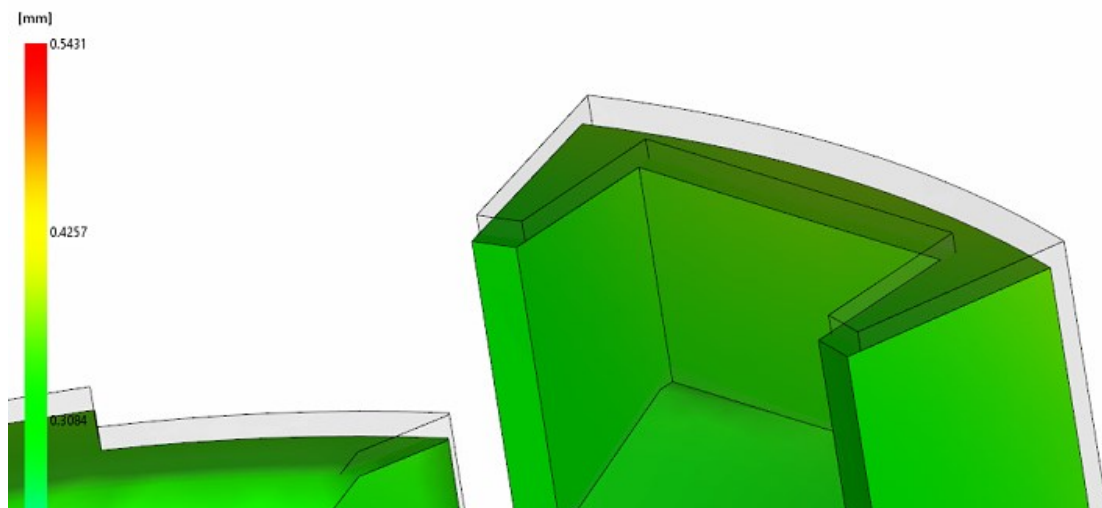
by nebyla celá simulace kompletně zefektivněna. Výsledky první analýzy byly zhodnoceny. Na základě zhodnocení byly upraveny vstupní parametry a byla spuštěna druhá analýza. Postupnou úpravou bylo docíleno vhodných hodnot vstupních parametrů.

Nyní bylo možné začít s hodnocením smrštění daného výrobku. V sekci výsledků byl otevřen v oddíle „Warp“ výsledek analýzy s názvem „Deflection, all effects: Deflection“ zahrnující všechny vlivy ve všech třech osách výrobku (X, Y, Z) – koeficient kompenzace změny rozměrů tvarové dutiny je hledán za účelem zpřesnění rozměrů výsledného výrobku. Dále tvoří smrštění materiálu převážnou část celkové deformace. Z těchto důvodů je hodnota koeficientu kompenzace smrštění zkoumána na celkové deformaci výrobku.



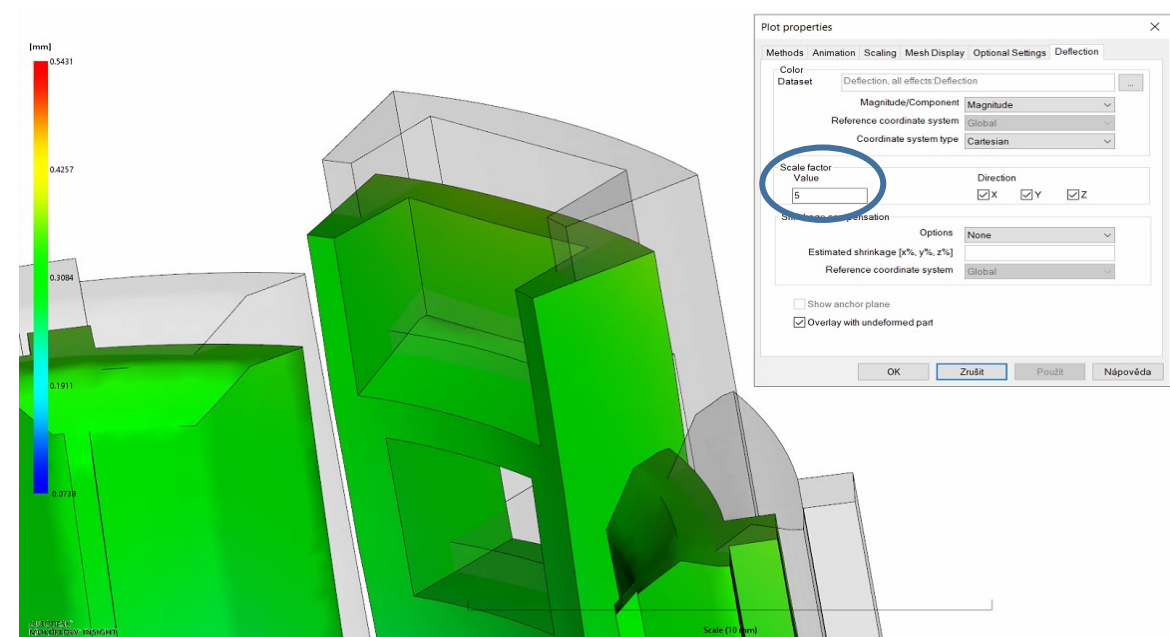
Obrázek 28 Určení smrštění – Celková deformace

Výsledek analýzy ukazuje, v jakých oblastech je výrobek nejvíce deformován vůči svému původnímu tvaru. Jak je vidět na stupnici (levý okraj obrázku 28), tmavě modrá barva označuje oblasti s nejmenšími deformacemi, zatím co červená barva oblasti s deformacemi největšími. Stupnice je také vybavena hodnotami těchto deformací spojenými s barvou oblasti. Přiblíží-li se výsledek, je možné vidět konturu původní hrany výrobku (obrázek 29).



Obrázek 29 Určení smrštění – Celková deformace, detail, měřítko 1

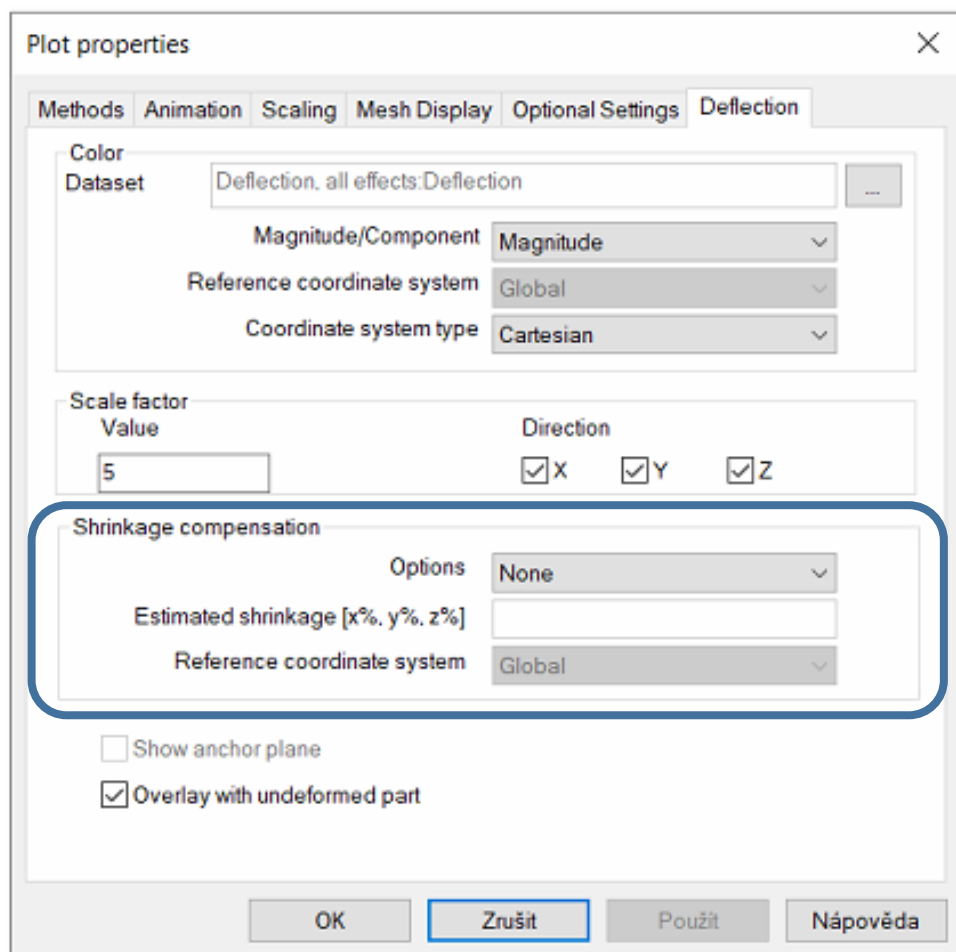
Měřítko deformace je možné nastavit v nastavení výsledku (Properties »Deflection »Scale factor). Pro lepší názornost byla v tomto případě původní hodnota 1 (tedy 100 %) změněna na 5 (tedy 500 %). Jedná se pouze o vizualizaci problému. Změnu je možné vidět na obrázku 30 v modrém kruhu.



Obrázek 30 Určení smrštění – Celková deformace, detail, měřítko 5

Jak je vidět na obrázku 30 a jak bylo naznačeno výše, program zohlednil veškeré faktory ovlivňující smrštění a s ním spojenou deformaci tvaru. V rámci výpočtů byly zohledněny všechny vstupní parametry, tedy uživatelem nastavené procesní parametry (teplota formy, teplota taveniny a další), typ vstříkovaného materiálu, geometrie výrobku i případná plniva. Následovalo přesunutí do tabulky vlastností („Plot properties“).

Zde, ve spodní části (vyznačené na obrázku 31), je vidět sekci s názvem „Shrinkage compensation“. Tato sekce slouží k určení koeficientů kompenzace smrštění. Ve výchozím stavu program smrštění nekompensuje: „Options – None“. Jeho výstupem je pouze znázornění deformací v situaci, kdy by smrštění nebylo nijak kompenzováno. Taková situace by mohla nastat, například když by se jednalo o výrobek se zanedbatelnými hodnotami deformací, o výrobek, u něhož by přesnost rozměrů neměla význam, nebo v případě, kdy by byl do programu nahrán model o rozměrech předem kompenzovaných hodnotou smrštění z materiálového listu při modelování apod.



Obrázek 31 Určení smrštění – Výchozí nastavení koeficientu kompenzace smrštění

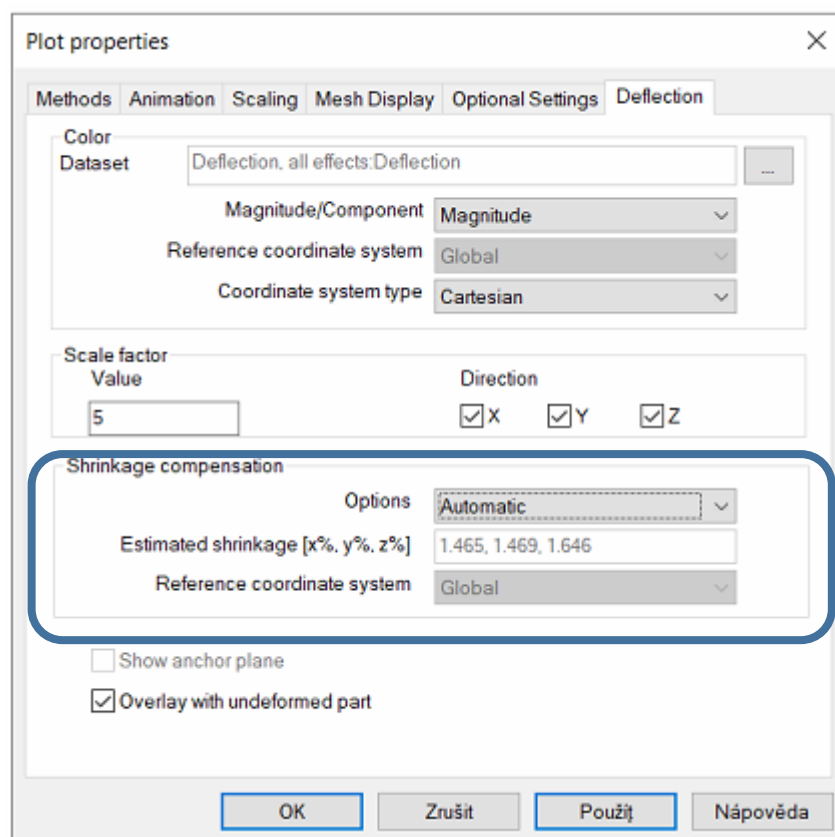
V tomto případě je zapotřebí rozměry teprve kompenzovat. Program v této sekci nabízí tři možnosti:

- Automatic – automatické vyhodnocení nejvhodnějších koeficientů kompenzace smrštění,

- Isotropic – kompenzace smrštění ve všech směrech (x, y, z) stejným dílem nastavitelnou hodnotou,
- Anisotropic – kompenzace smrštění v různých směrech různými nastavitelnými hodnotami.

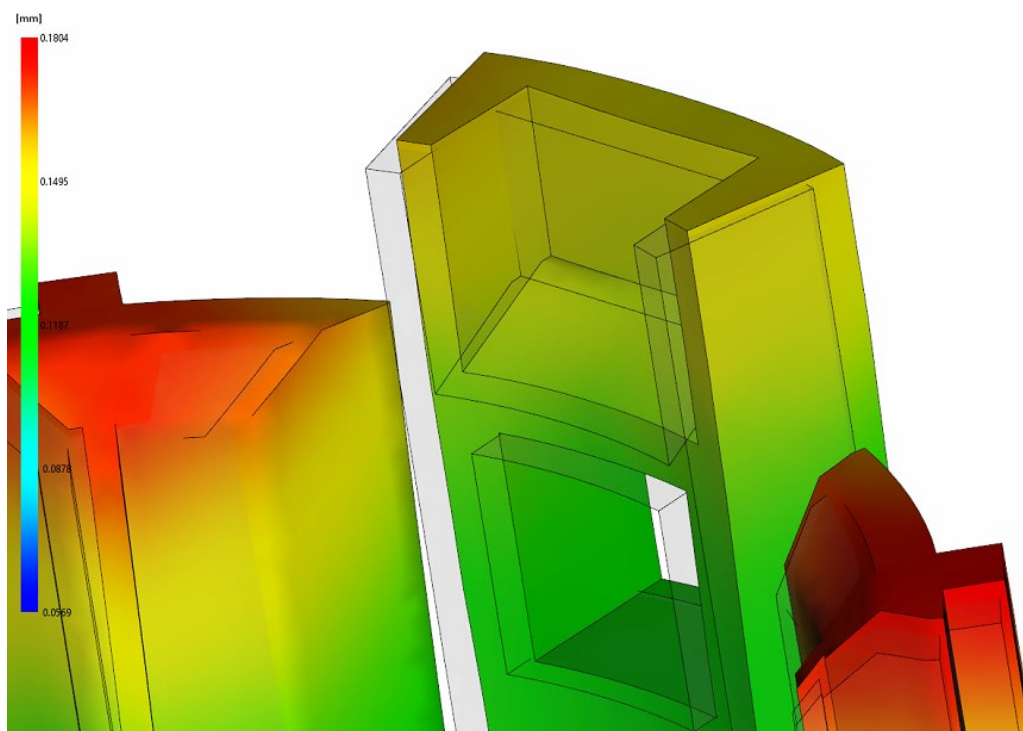
Na základě informací od společnosti Autodesk a zkušeností s programem je doporučen následující postup:

Nejprve zadat možnost Automatic. Zadáním této možnosti program vypíše doporučené koeficienty kompenzace smrštění, které nelze měnit (viz obrázek 32).



Obrázek 32 Určení smrštění – Automatické nastavení koeficientu kompenzace smrštění

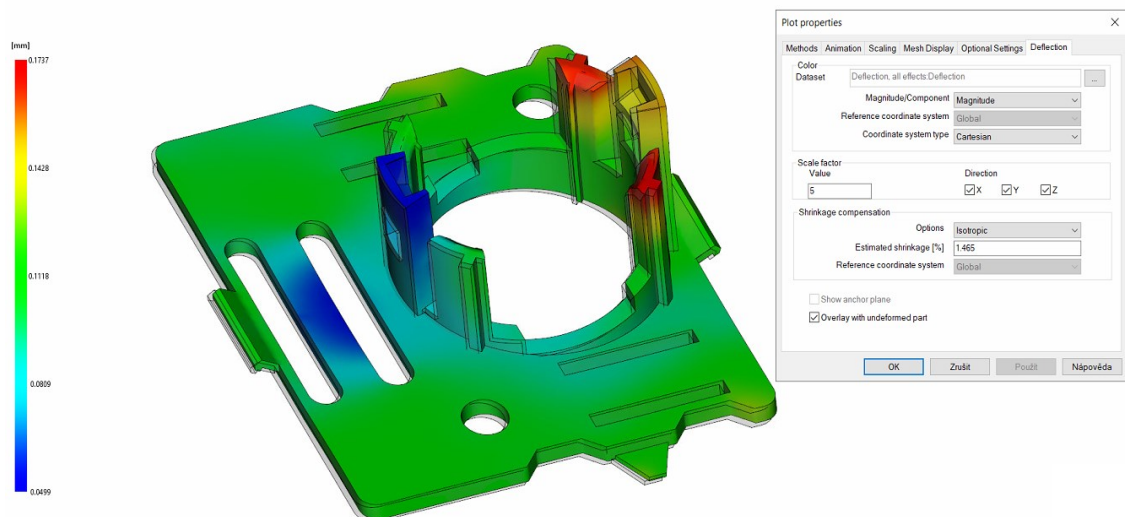
Stisknutím tlačítka „Použít“ program vizualizuje variantu, ve které by byla dutina formy předem kompenzována vypsánými hodnotami, tedy zvětšena v ose X o 1,465 %, v ose Y o 1,469 % a v ose Z o 1,646 %. Výsledek je vidět na obrázku 33.



Obrázek 33 Určení smrštění – Celková deformace, detail, automatická kompenzace, měřítko 5

Jak je vidět, hodnota maximální odchylky vůči původní geometrii se zmenšila z 0,5431 mm na 0,1804 mm. Nyní je vhodné udělat zhodnocení tohoto stavu na základě barevné vizualizace a vyhodnotit, zda je červená barva (největší odchylka) v oblastech výrobku u kterých je nutné dosahovat přesnějších rozměrů, či nikoliv.

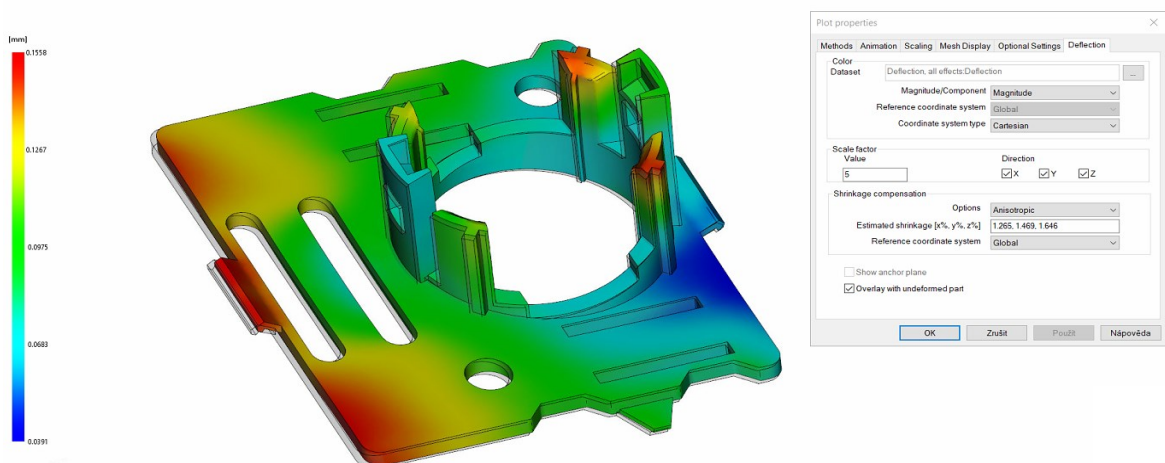
Je-li nutné kompenzovat smrštění ve všech směrech stejnou hodnotou, přepneme na možnost „Isotropic“ (obrázek 34). Program následně propíše hodnotu koeficientu kompenzace smrštění v ose x, kterou odhadl v možnosti „Automatic“. Jestliže nebyla před tímto krokem zadána možnost „Automatic“ program vypíše nulu. V obou případech je nyní možné tuto hodnotu měnit. V tomto scénáři je vhodné hodnotu postupně měnit a aktualizovat vizualizaci tlačítkem „Použít“ až do chvíle, kdy je výsledek uspokojivý. Kompenzovat takto smrštění stejnou hodnotou ve všech směrech není obecně doporučeno, jelikož je výrobek deformován smrštěním (opět vlivem mnoha faktorů popsanych výše) v každém směru jinou hodnotou.



Obrázek 34 Určení smrštění – Celková deformace, detail, izotropní kompenzace, měřítko 5

Je-li to možné, doporučuje se po použití možnosti „Automatic“ použít možnost „Anisotropic“. Program následně propíše hodnoty odhadnuté možností „Automatic“ a povolí jejich úpravu, což otevírá mimo jiné i možnost nastavit kompenzaci pouze ve dvou směrech s tím, že ve třetím zadáme hodnotu 0. Postupnou úpravou koeficientů se zaměřením na oblasti nutných přesných rozměrů (montážní, tvarové geometrie a další) s ohledem na souřadnicový systém a aktualizací stavu tlačítkem „Použít“ je možné postupně dosáhnout vyhovujícího stavu.

Postupným zkoušením bylo také zjištěno, že lze touto metodou dosáhnout nižší hodnoty maximální odchylky rozměru na výrobku (obrázek 35). Změnou hodnoty koeficientu kompenzace smrštění v ose X z původních 1,465 % na 1,265 % bylo dosaženo snížení maximální odchylky z 0,1804 mm (odhadnutá hodnota možností „Automatic“) na hodnotu 0,1558 mm.



Obrázek 35 Určení smrštění – Celková deformace, detail, anizotropní kompenzace, měřítko 5

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je bližší seznámení s fenoménem smrštění u vstřikovaných dílů. Toto téma bylo zvoleno firmou Hella Autotechnik Nova, s.r.o. (dále jen Hella) na základě neustále zvyšujících se požadavků na přesnost vstřikovaných dílů v automotive. Dále na základě získaných poznatků vytvořit nástroj přibližující chování smrštění při změně podmínek vstřikování a následné ověření tvrzení, které z něj vyplývá pro konkrétní proces vstřikování. Toto ověření je pak prováděno na výrobku zadaném firmou Hella. Za účelem plnosti ověření je vhodné zhotovení návrhu vstřikovací formy včetně vtokového a temperačního systému. Samotný návrh je pak podroben tokovým analýzám, ověřujícím správnost návrhu. Na těchto analýzách jsou následně ověřena tvrzení vyplývající z nástroje.

Byly stanoveny následující cíle:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Vytvoření nástroje na základě poznatků z teoretické části.
3. Konstrukce vstřikovací formy včetně vtokového a temperačního systému.
4. Vytvoření analýz na zadanou geometrii součásti.
5. Srovnání analýz.

9 POUŽITÉ PROGRAMY

9.1 Catia V5

Catia je modelovací software určený k návrhu produktů, který vyvinula a vytvořila nadnárodní společnost Dassault Systems sídlící ve Francii. Jedná se o celosvětově používaný software, který poskytuje možnost vytvořit 3D návrh různých výrobků od klasických strojních součástí až po rozmanité geometrie prostřednictvím křivkového kreslení. Dále umožňuje počítačově podporovaná inženýrská a výrobní řešení i kompletní PLM (Product Lifecycle Management). Software je běžně používán ve zpracovatelském průmyslu. [31]

V této práci byl software využit k návrhu vstřikovací formy, včetně temperačního a vyhazovacího systému.

9.2 Autodesk Simulation Moldflow Insight

Simulační software Autodesk Moldflow (původním názvem Simulation Moldflow) je nástroj pro simulaci procesu vstřikování na digitálním prototypu. Prostřednictvím tohoto nástroje mohou výrobci optimalizovat technologický design vstřikovacích forem a plastových dílů na základě predikce a vyhodnocení vstřikovacího procesu. [32]

V této práci byl software využit ke kontrole návrhu vstřikovací formy a optimalizaci temperačního a vyhazovacího systému. Dále ke kontrole výstupů z nástroje posuzujícího smrštění.

9.3 Microsoft Excel

Software Microsoft Excel je nástroj od společnosti Microsoft sloužící k práci s daty. Prostřednictvím rozmanitých, nejen matematických, funkcí je v tomto nástroji možné zpracovávat téměř neomezené množství dat a to (ve srovnání s jinými metodami) snadno a za nižší pravděpodobnosti chyby. Jak bylo naznačeno, v dnešní době se tento software již nepoužívá jen k výpočtům, ale slouží i k prezentování výsledků, zapisování/plánování postupů a dalším. [33]

V této práci byl v tomto softwaru navržen nástroj posuzující smrštění.

10 NÁSTROJ PRO POSOUZENÍ SMRŠTĚNÍ

Na základě poznatků z teoretické části byl vypracován nástroj v aplikaci Microsoft Excel 2016 za účelem lepší představy o tendenci, jakou faktory ovlivňují smrštění v konkrétních případech. Jelikož, jak bylo popsáno výše, je těchto vlivů mnoho a mají různý vliv na výsledné výrobní smrštění, nebylo možné sestavit univerzální nástroj, který by byl schopen předpovědět smrštění pro jakýkoli materiál či geometrii v intervalu spolehlivosti alespoň 1σ . Proto byl nástroj vytvořen na základě praktických experimentů, jejichž výstupy byly převedeny do tabulky v aplikaci Microsoft Excel 2016 s názvem „Nástroj pro posouzení smrštění“.

10.1 Obsah nástroje

Za účelem zpřehlednění byl proto nástroj rozdělen do několika celků, které se vyskytují zpravidla na samostatném listu.

List s názvem „Procesní parametry – Makro“ obsahuje výsledky experimentů zaměřených na procesní parametry vstřikování (doba chlazení, velikost dotlaku, atd.) v makroskopickém měřítku. Označení „makroskopické měřítko“ znamená, že experimenty na tomto listu byly prováděny na geometriích rozeznatelných lidským okem.

List „Procesní parametry – Mikro“ je podobně jako předchozí list zaměřený na změny v procesních parametrech. V tomto případě se však jedná o geometrie, které je těžké (případně není možné) pozorovat pouhým okem a je zapotřebí opticky zvětšující nástroj (lupa, mikroskop nebo jiný).

Zatím co předchozí listy byly zaměřeny na procesní parametry procesu vstřikování, list „Design“ je zaměřen na vliv změny geometrie vzorku (respektive výrobku) a vstřikovací formy na výrobní smrštění.

Následující dva listy „Kritické procesní parametry“ a „Kritické procesní parametry (95)“ obsahují sumarizaci faktorů výrazně ovlivňujících výrobní smrštění společně s tendencí vlivu z dostupných experimentů. Označením „(95)“ disponuje list s výsledky, u nichž byl vliv prokázán v intervalu spolehlivosti 2σ . Tato sumarizace jednoznačně **nebude platit pro všechny geometrie ani všechny materiály**. Tento nástroj je připraven pro postupné rozšiřování o další veřejně dostupné výzkumy a zkušenosti firmy Hella, pro kterou byl primárně vytvořen. V případě získávání nových poznatků je pak možné tyto

dva listy využít jako orientační naznačení tendencí úprav procesních parametrů za účelem snížení hodnoty smrštění.

V mnoha experimentech se vyskytovala geometrie zkušebního vzorku s označením ASTM D955. Její popis se nachází na posledním listu s označením „Geometrie ASTM D955“.

Obsah listů

Každý list nástroje obsahuje nadpis oblasti zkoumání, jednotlivé filtrovatelné sloupce a legendu. Jednotlivé řádky v listech je pak možné považovat za samostatné experimenty. Význam sloupců v listech „Procesní parametr – Makro“ a „Procesní parametr – Mikro“:

- Procesní parametr – parametr, jehož referenční hodnota byla zvyšována, na základě čehož byla zkoumána tendence smrštění (zmenšení/zvětšení hodnoty smrštění, viz legenda),
- Zdroj – číselné označení zdroje informace o experimentu,
- Materiál – materiál zkoušeného tělesa,
- Geometrie – tvar zkoušeného tělesa,
- Tendence smrštění při zvyšování referenční hodnoty – chování smrštění při zvyšování referenční hodnoty procesního parametru (v daném řádku).

Význam sloupců v listu „Design“:

- Rozměrové měřítko – velikost zkoumaného prvku geometrie (viz popis výše),
- Oblast zkoušení – oblast výskytu zkoumaného prvku geometrie (tvarová dutina/ostatní oblasti vstřikovací formy),
- Zdroj – číselné označení zdroje informace o experimentu,
- Materiál – materiál zkoušeného tělesa,
- Prvek geometrie – část výrobku (případně vstřikovací formy), jejíž rozměry byly zvětšovány, na základě čehož byla zkoumána tendence smrštění (zmenšení/zvětšení hodnoty smrštění, viz legenda),
- Tendence smrštění při zvětšování rozměrů prvku geometrie – chování smrštění při zvětšování referenčních rozměrů prvků geometrie (v daném řádku).

Význam sloupců v listech „Kritické procesní parametry“ a „Kritické procesní parametry (95)“:

- Rozměrové měřítko – velikost zkoumaného prvku geometrie (viz popis výše),
- Procesní parametr – parametr, jehož referenční hodnota byla zvyšována, na základě čehož byla zkoumána tendence smrštění (zmenšení/zvětšení hodnoty smrštění, viz legenda),
- Vliv na smrštění při zvětšování procesního parametru – chování smrštění při zvyšování referenční hodnoty procesního parametru (v daném řádku),
- Kvalita replikace výsledků – označuje úspěšnost shody výsledků při opakování experimentu za obdobných podmínek (například při opakování experimentu jiným týmem).

10.2 Práce s nástrojem

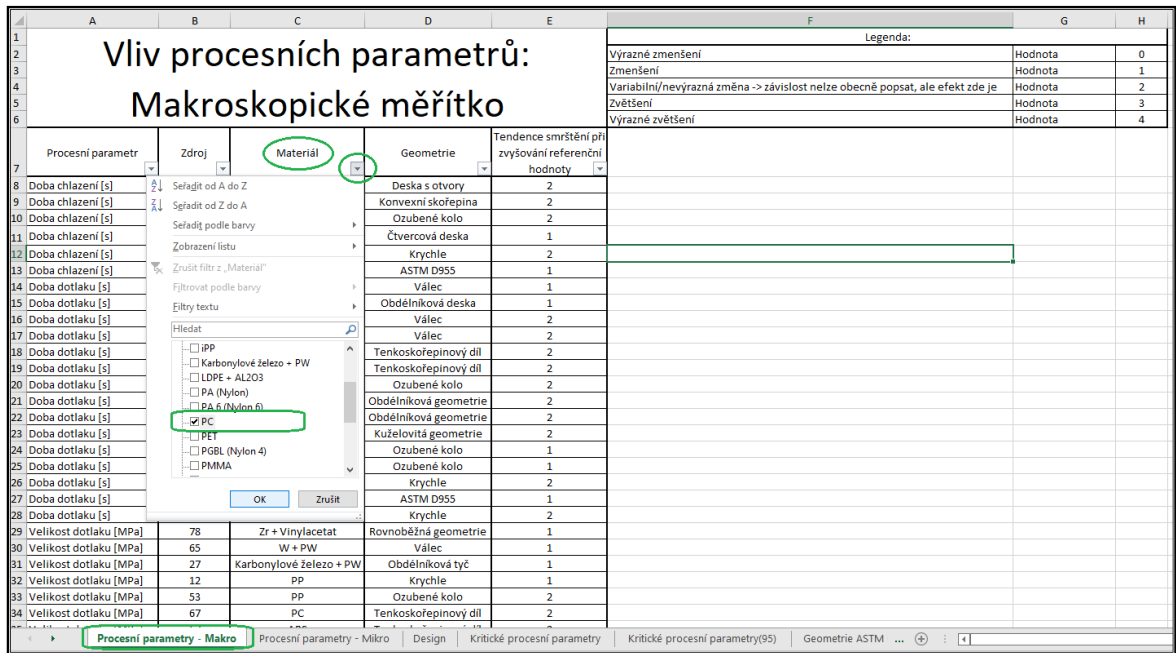
Základní funkcí nástroje je určení následného postupu při optimalizaci návrhu dílu ve smyslu zmenšení výrobního smrštění. Po nastavení a spočítání analýzy následované případnou úpravou procesních a technologických parametrů může být žádoucí zmenšení hodnoty předpokládaného smrštění. V takovém případě je možné využít nástroj přiložený k této práci.

Ukázka práce s nástrojem

Při určování dalšího postupu za využití Nástroje pro posouzení smrštění pro výrobek připomínající svým tvarem obdélníkovou desku makroskopických rozměrů (maximální rozměry geometrie v osách x, y, z [mm]: 100 x 200 x 10) z materiálu PC by byl postup následující:

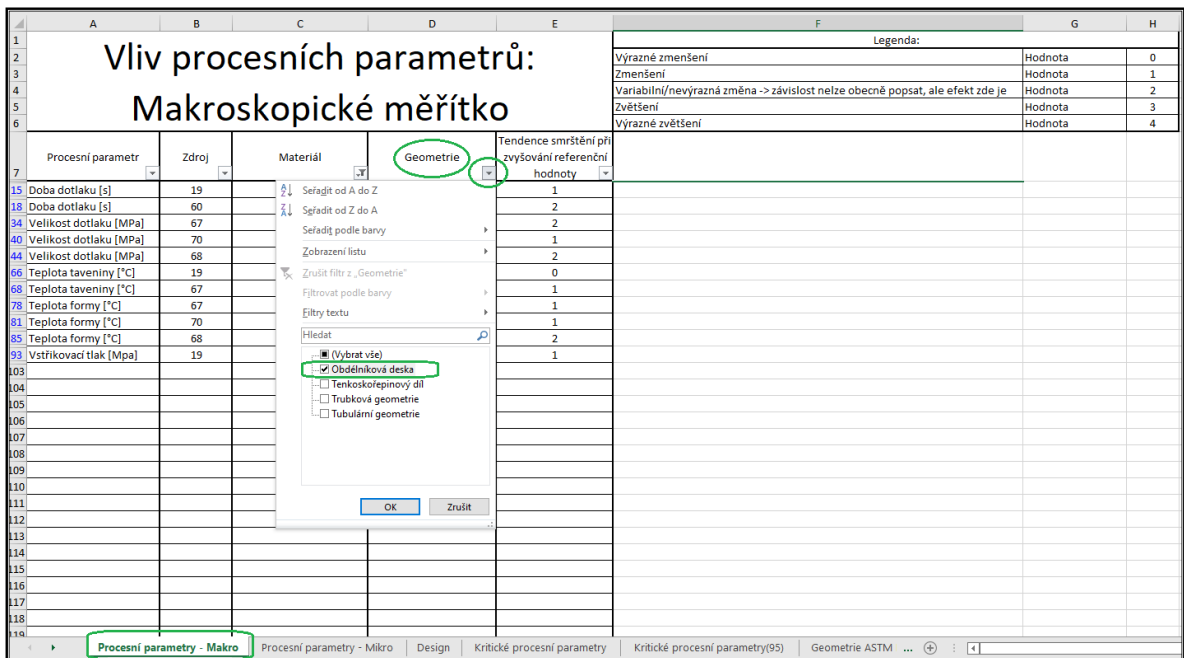
1) Procesní parametry

Jelikož se jedná o geometrii běžných rozměrů, nástroj je přepnut na list s názvem „Procesní parametry – Makro“ (zkratka „PP“). Na tomto listu je následně vyfiltrován materiál „PC“, viz obrázek 36.



Obrázek 36 Ukázka nástroje (PP) – vyfiltrování materiálu

Následně je zvolena geometrie, která se co nejvíce podobá zkoumané geometrii. V tomto případě se jedná o geometrii „Obdélníková deska“. Volba je provedena, stejně jako v předchozím případě, vyfiltrováním (obrázek 37).



Obrázek 37 Ukázka nástroje (PP) – vyfiltrování geometrie

Po zvolení filtrů se zobrazí pouze experimenty vyhovující zadaným kritériím (obrázek 38). Nyní je možné prostřednictvím legendy (obrázek 39) vyhodnotit následující postup.

A	B	C	D	E
Vliv procesních parametrů: Makroskopické měřítko				
Procesní parametr	Zdroj	Materiál	Geometrie	Tendence smrštění při zvyšování referenční hodnoty
Doba dotlaku [s]	19	PC	Obdélníková deska	1
Teplota taveniny [°C]	19	PC	Obdélníková deska	0
Vstříkovací tlak [Mpa]	19	PC	Obdélníková deska	1

Obrázek 38 Ukázka nástroje (PP) – vyfiltrované experimenty

Legenda:		
Výrazné zmenšení	Hodnota	0
Zmenšení	Hodnota	1
Variabilní/nevýrazná změna -> závislost nelze obecně popsat, ale efekt zde je	Hodnota	2
Zvětšení	Hodnota	3
Výrazné zvětšení	Hodnota	4

Obrázek 39 Ukázka nástroje (PP) – legenda

Z vyfiltrovaného výčtu vyplývá, že má na smrštění v ukázkovém případě zásadní vliv teplota taveniny. Tudíž, je-li zapotřebí zmenšit hodnotu smrštění, je vhodné začít zvýšením hodnoty teploty taveniny. Dále prodloužit dobu dotlaku a zvýšit vstříkovací tlak. Pro bližší informace je možné vyhledat zdroj informací o experimentu, který je ukryt pod číselným označením [19].

2) Design

Při vyhodnocování vlivu geometrie je postup obdobný postupu vyhodnocení vlivu procesních parametrů. Nástroj je přepnut na list „Design“ (zkratka „D“). Zde je stejným postupem vyfiltrován materiál „PC“ a Rozměrové měřítko „Makroskopické“. Ostatní filtry jsou volitelné dle uvážení uživatele.

Po zvolení filtrů se zobrazí experimenty vyhovující zadaným kritériím (obrázek 40). Nyní je možné prostřednictvím legendy (obrázek 41) vyhodnotit následující postup.

Vliv designu						
Rozměrové měřítko	Oblast zkoušení	Zdroj	Materiál	Prvek geometrie	Tendence smrštění při zvětšování prvku geometrie	Poznámka
Makroskopické	Vstřikovací forma	98	PC	Délka dráhy taveniny	3	
Makroskopické	Vzorek	133	PC	Krychle	2	
Makroskopické	Vzorek	19	PC	Vzdálenost od vtokového ústí v kolmém směru	3	

Obrázek 40 Ukázka nástroje (D) – vyfiltrované experimenty

Legenda:		
Výrazné zmenšení	Hodnota	0
Zmenšení	Hodnota	1
Variabilní/nevýrazná změna -> závislost nelze obecně popsat, ale efekt zde je	Hodnota	2
Zvětšení	Hodnota	3
Výrazné zvětšení	Hodnota	4

Obrázek 41 Ukázka nástroje (D) – legenda

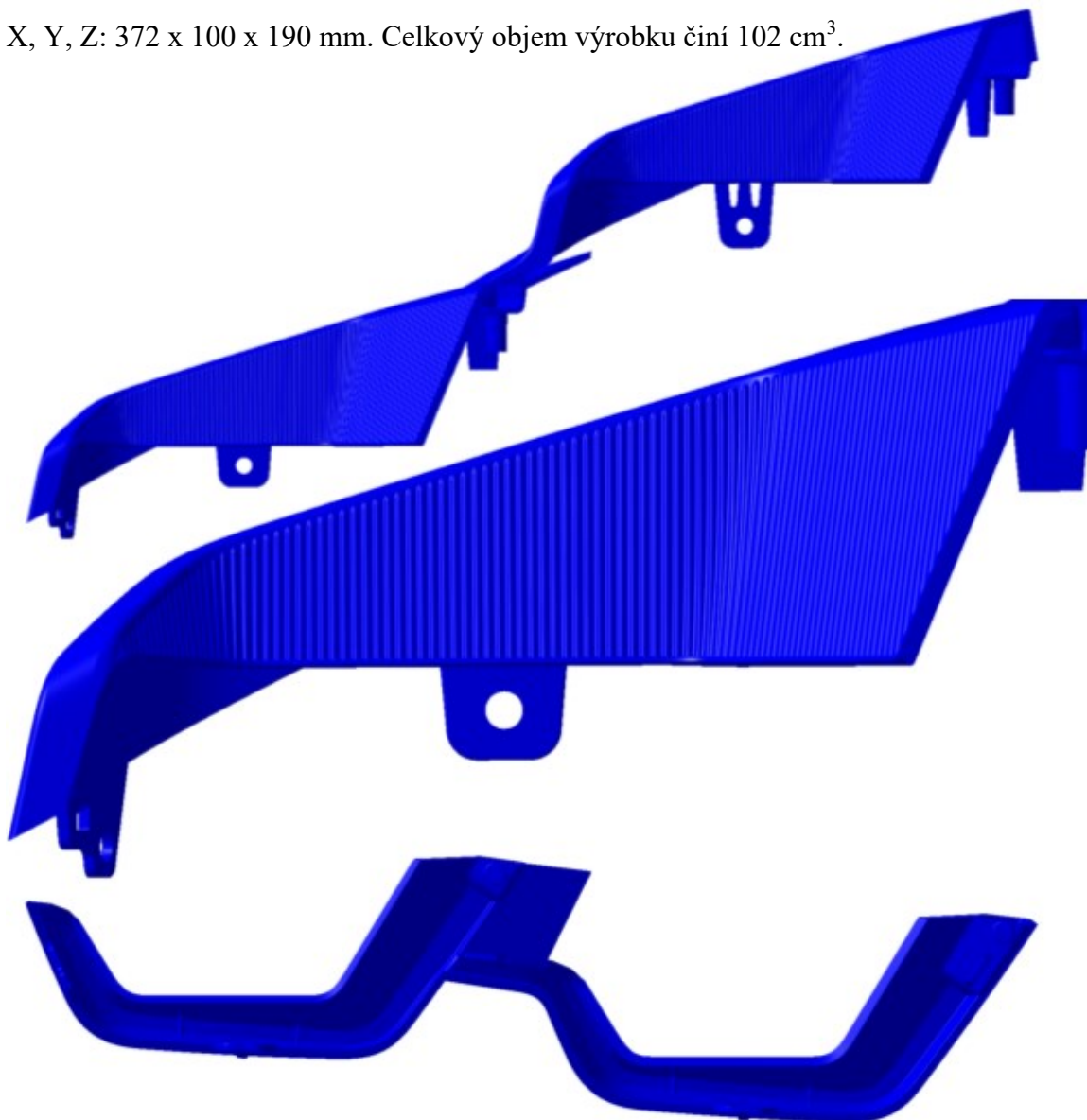
Z vyfiltrovaného výčtu vyplývá, že má na smrštění v ukázkovém případě vliv délka dráhy taveniny a vzdálenost od vtokového ústí v kolmém směru. Tudiž, je-li zapotřebí zmenšit hodnotu smrštění, je vhodné umístit vtokové ústí do kratší strany obdélníkové desky (plocha rovnoběžná s rovinou XZ) a navrhnout vtokový systém co možná nejkratší. Pro bližší informace je možné vyhledat zdroj informací o experimentu, který je ukryt pod číselným označením [19] a [98].

3) Kritické procesní parametry

Neobsahují-li předchozí listy dostatek informací potřebných k zmenšení hodnoty výrobního smrštění (případně nejsou vyhodnocení aplikovatelná), je možné využít informace v listech „Kritické procesní parametry“ a „Kritické procesní parametry (95)“. V těchto listech jsou vypsána obecná shrnutí tendencí smrštění v závislostech na procesních parametrech a rozměrovém měřítku. Při volbě dalšího postupu je doporučeno zohlednit rozměrové měřítko (na základě konkrétního případu) a kvalitu replikace výsledků, určující úspěšnost shody výsledků při opakování experimentu za obdobných podmínek. Dále je doporučeno upřednostnit list s koncovým označením „(95)“ z důvodů popsaných výše.

11 SPECIFIKACE ZADANÉHO VÝROBKU

Výrobek pro ověření nástroje byl zvolen vstříkovaný díl nesoucí název „bezel“ (volně přeložitelné jako fazeta, obrázek 42), který je částí světlometu. Jedná se o tenkoskořepinový díl o střední tloušťce stěny 2,5 mm opatřený třemi zácvaky, dvěma dutinami, čtyřmi technickými žebry, trojím naváděním v podobě dvou válcových geometrií a jedné deskové geometrie a vtokovým žebrem. Dále je výrobek opatřen na některých plochách řadou vlnek. Celkové rozměry výrobku jsou 405,5 x 97 x 119 mm, avšak z důvodu kaskádovitého rozložení jsou rozměry výrobku v souřadnicovém systému X, Y, Z: 372 x 100 x 190 mm. Celkový objem výrobku činí 102 cm³.



Obrázek 42 Zadaný výrobek

12 MATERIÁL VÝROBKU

Materiálem výrobku byl zvolen lineární, amorfní co–polycarbonát s obchodním názvem Apec 1895, který je určený k vstřikování a je běžně používaným materiálem v automotive. Materiál vyniká svou dobrou zatékavostí a dobrou žáruvzdorností pohybující se od 158 do 203 °C. Je běžně používán k výrobě krytů brzdových i směrových světel, zapuštěných svítidel/reflektorů apod. V tabulce 1 je výčet klíčových vlastností materiálu Apec 1895. [34, 35]

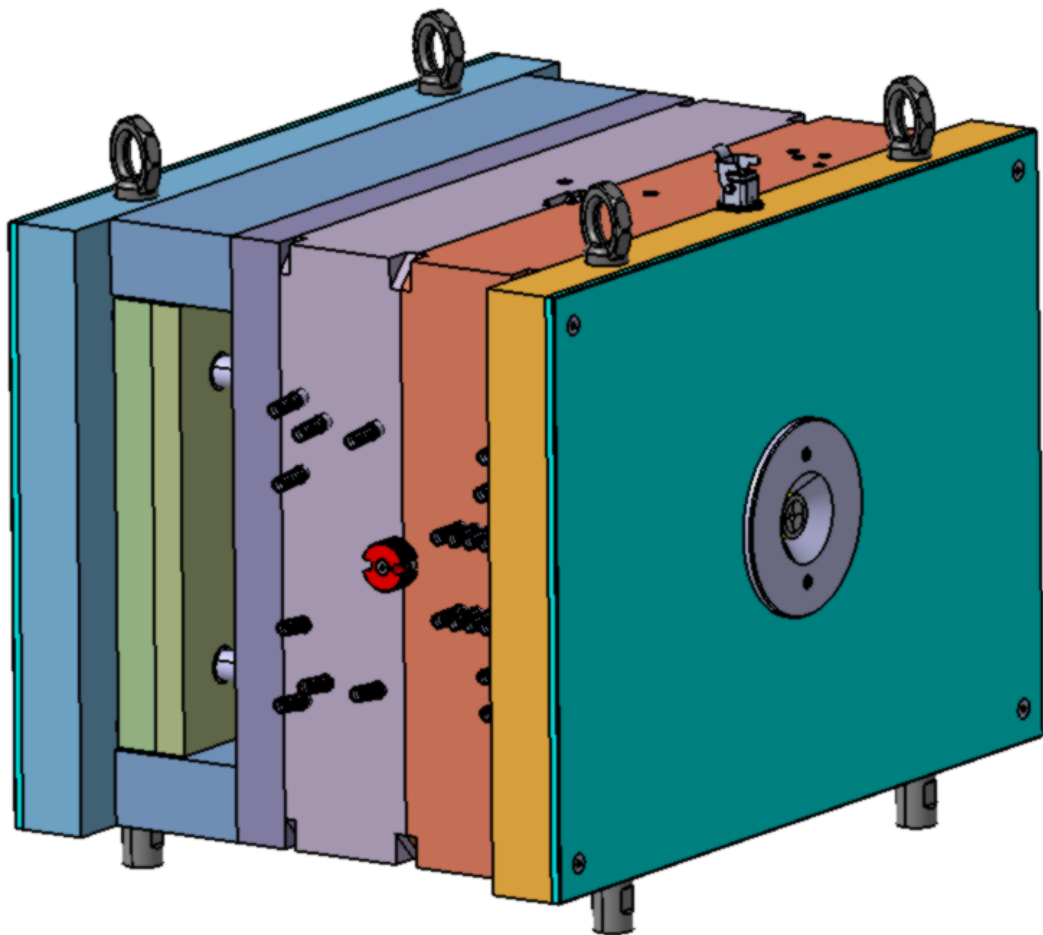
Tabulka 1 Vlastnosti materiálu Apec 1895

Parametr	Hodnota
Doporučená minimální teplota taveniny	330 °C
Doporučená maximální teplota taveniny	340 °C
Teplota degradace materiálu	380 °C
Doporučená minimální teplota formy	120 °C
Doporučená maximální teplota formy	140 °C
Doporučená vyhazovací teplota	163 °C
Maximální rychlost smykové deformace	40 000 s ⁻¹
Maximální smykové napětí	0,5 MPa
Hustota materiálu v tuhém stavu	1,1533 g/cm ³
Hustota materiálu v podobě taveniny	1,031 g/cm ³
Poissonův poměr	0,38
Modul pružnosti v tahu	2450 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2450 MPa
Modul pružnosti ve smyku	900 MPa
Smrštění naměřené na zkušebním tělese	0,85

13 NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací forma je dvojnásobná s tím, že jsou na jeden cyklus vstřikovány dva symetrické výrobky. V závislosti na poptávce může mít tato forma hned několik duplikátů. V takovém případě může být jedna, či více forem neprovozuschopná (například z důvodu vady, údržby či změny), ale poptávce bude teoreticky vždy alespoň částečně vyhověno. Při návrhu byla snaha o co nejmenší přípustné rozměry z důvodu nižších nákladů.

Návrh (obrázek 43) se skládá z pravé (nepohyblivé) a levé (pohyblivé) části s jednou dělicí rovinou. Levá část pak disponuje vyhazovacím systémem. Vstřikovací forma je plněna prostřednictvím kombinovaného vtoku, který se skládá z centrální horké trysky, jenž napájí studený rozvodný systém vedoucí k dutinám. Dále je vstřikovací forma temperována temperačním systémem o 6 větvích v nepohyblivé části a 4 větvích v části pohyblivé.



Obrázek 43 Návrh vstřikovací formy

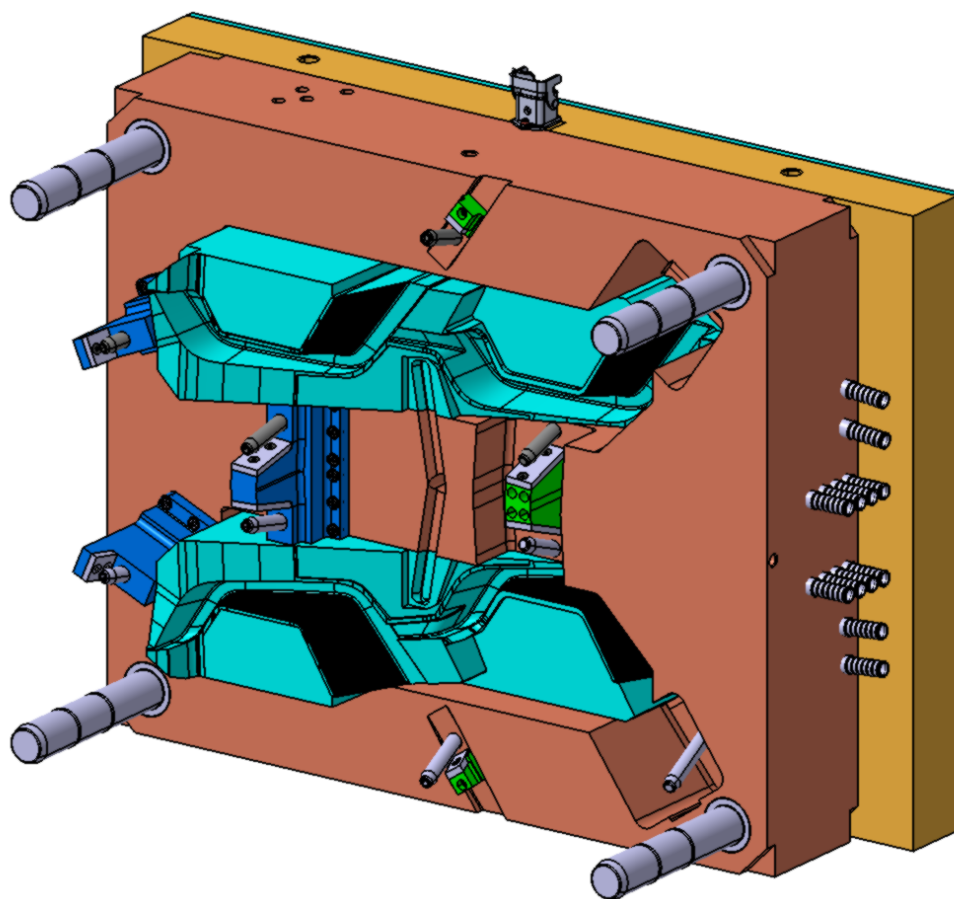
Vstřikovací forma je dále opatřena logistickými prvky, kterými jsou zámky dělicí roviny (dva, každý z jedné strany), čtyři otočná závěsná oka a čtyři distanční podložky.

Jednotlivé desky mají odebrány části rohů pro jejich snadnější oddělení mimo vstřikovací stroj.

Celkové rozměry vstřikovací formy jsou 696 x 496 x 538 mm (bez táhla vyhazovacího systému) a hmotnost bez výrobku 278 kg.

13.1 Pravá strana vstřikovací formy

Základ pravé strany vstřikovací formy tvoří upínací deska společně s kotevní deskou (obrázek 44). Do kotevní desky jsou vloženy dvě tvarové vložky (tvárnice). Řešení tvarové dutiny prostřednictvím tvarových vložek bylo zvoleno za účelem snadnější manipulace při údržbě a případných úpravách tvarové dutiny.



Obrázek 44 Pravá strana vstřikovací formy

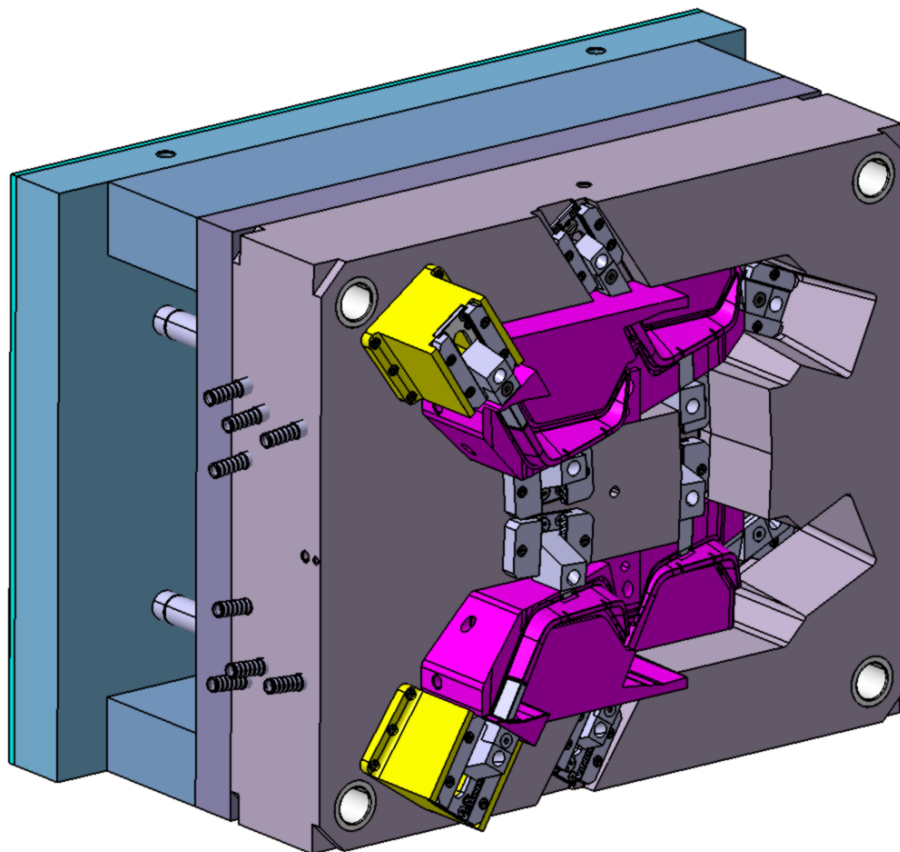
Kotevní deska je sestavou tvořenou ze zmíněných tvarových vložek a prvků bočního odformování. Každé boční odformování zde má základ tvořený šikmými kolíky a kluznou podložkou. Zámky jsou ve čtyřech z pěti případů navrženy jako samostatné součásti, pátý zámek je obroben v kotevní desce. Zámky mezi tvarovými dutinami jsou pro obě tvarové

dutiny společné. Sestavou kotevní desky je provrtána temperace utěsněna o-kroužky u přechodů z kotevní desky do tvarové dutiny.

Celá sestava pravé strany vstřikovací formy je dále doplněna o izolační desku, vodící prvky a středící kroužek. Jednotlivé desky a středící kroužek jsou k sobě přišroubovány. Ve středu sestavy je navržen vtokový systém, od něhož je vyvedena přípojka ze strany vstřikovací formy.

13.2 Levá strana vstřikovací formy

Základ levé strany vstřikovací formy je tvořen kotevní deskou tvárníku, opěrnou deskou, rozpěrnými deskami a upínací deskou (obrázek 45). V prostoru mezi rozpěrnými deskami jsou pak umístěny desky vyhazovacího systému.



Obrázek 45 Levá strana vstřikovací formy

Kotevní deska tvárníku obsahuje tvarové vložky tvárníku a systémy bočního odformování, jejichž základ je tvořen posuvnými kostkami vedenými vodícími lištami po kluzných deskách. Ve třech případech jsou k posuvným kostkám přišroubována jádra tvořící negativ budoucích dutin výrobku. Ve zbylých dvou případech jsou jádra obrobena přímo v posuvných kostkách. Každá sestava bočního odformování je opatřena zámkem

krajní polohy. Sestavou kotevní desky je provrtána temperace utěsněna o-kroužky u přechodů z kotevní desky do tvarové dutiny. Ve středu kotevní desky je přídržovač vtoku zajišťující přidržení vtokového zbytku na pohyblivé straně formy a zachytávající studené čelo taveniny.

Sestava levé strany vstřikovací formy je dále doplněna o izolační desku, vodící prvky a středící kroužek. Jednotlivé desky a středící kroužek jsou k sobě přišroubovány.

13.3 Boční odformování

Návrh vstřikovací formy je opatřen deseti sadami bočního odformování, z toho pěti pro každou tvarovou dutinu. Stejně jako tvarové dutiny jsou i boční odformování symetrická z důvodu levnější výroby. Ze stejného důvodu byla při navrhování snaha o využívání shodných součástí napříč jednotlivými bočními odformováními. Každé boční odformování je opatřeno zámkem uzavřené a otevřené polohy.

13.3.1 Boční odformování 1 a 2

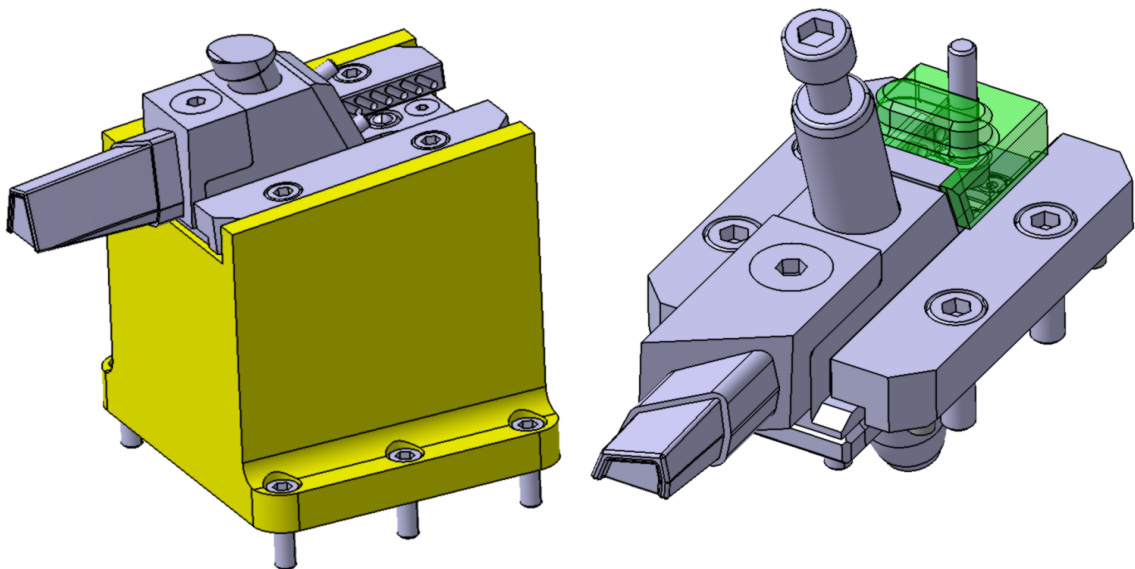
Boční odformování 1 a 2 (obrázek 46) slouží k tvarování dutin v geometrii výrobku. Krajní dutina se nachází hluboko v pravé straně vstřikovací formy. Aby nemusel být polotovár levé kotevní desky příliš vysoký (což by obnášelo odebrání velkého množství materiálu), byla navržena věž, do které je vedení bočního odformování usazeno.

Věž je vůči levé kotevní desce středěna geometrií tvaru pera (drážka v kotevní desce tvárníku je snadno vyrobitelná odpovídající, obecně dostupnou, frézou) a je přišroubována šesti šrouby. Do věže jsou přišroubovány vodící lišty (vystředěné kolíky) a kluzná deska.

Posuvná čelist je v obou případech složena ze dvou částí (tvarové a pojezdové), které jsou vůči sobě přišroubovány. Toto řešení bylo zvoleno opět z ekonomických důvodů tak, aby nebylo nutné opracovávat případný velký polotovár kvalitního materiálu tvarové části. Pohyb posuvné čelisti je vyvozen odjezdem šikmého kolíku o sklonu 20 °. Ten je v případě bočního odformování 1 ustaven v kotevní desce tvárnice a v případě bočního odformování 2 ke stejné desce přišroubován. Pohyb je veden vodícími lištami po kluzné desce.

Návrh bočního odformování 1 je opatřen zámkem otevřené polohy v podobě kuličky na pružině a odpovídající drážky v posuvné čelisti. Zámek zavřené polohy je v tomto případě obroben v kotevní desce tvárnice a je opatřen kluznou deskou.

Sestava bočního odformování 2 je opatřena zámkem uzavřené polohy a zámkem otevřené polohy. Zámek uzavřené polohy je přišroubován ke kotevní desce tvárnice, vůči které je středěn geometrií tvaru pera. Je opatřen kluznou deskou. Zámek otevřené polohy má (stejně jako ve všech zbylých případech) průřez trojúhelníku s odpovídající drážkou v posuvné čelisti.



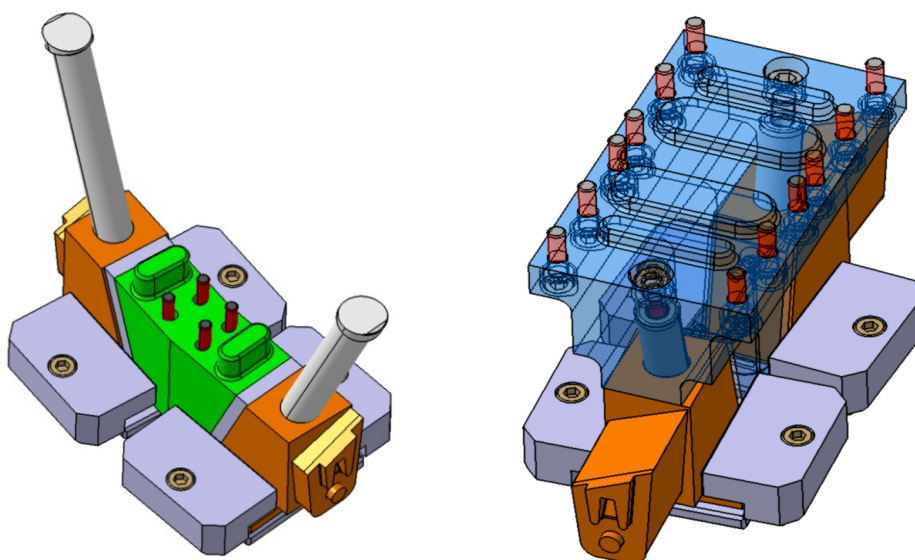
Obrázek 46 Boční odformování 1 (vlevo) a 2 (vpravo)

13.3.2 Boční odformování 3 a 4

Třetí a čtvrté boční odformování je vyobrazeno na obrázku 47 pro obě tvarové dutiny. Z důvodu úspory prostoru, a tedy i materiálu byl navržen společný zámek zavřené polohy pro obě symetrická odformování.

Společný zámek je opatřen dvěma kluznými deskami (pro každou posuvnou čelist). Je středěn geometriemi tvaru pera a přišroubován ke kotevní desce tvárnice šrouby. Toto řešení bylo možné díky potřebě vysunutí posuvných čelistí o krátkou vzdálenost (cca 2,5 mm).

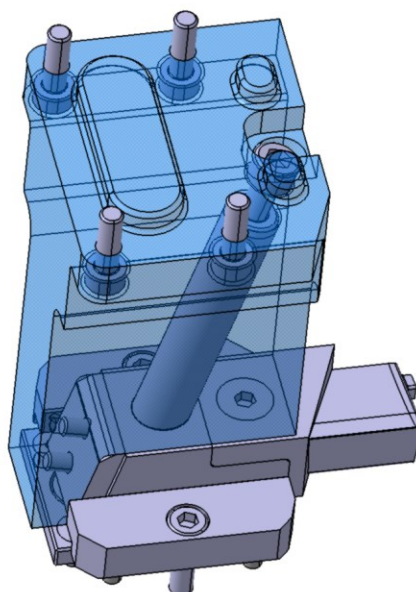
Posuvné čelisti jsou tvořeny vždy jednou součástí. Jsou vedeny i středěny vodícími lištami (středěnými kolíky a přišroubovanými ke kotevní desce tvárníku). Posuvná čelist je posouvána po kluzné desce. Úhel šikmého kolíku je 20° v případě bočního odformování 3 (ukotven v kotevní desce tvárnice) a 12° v případě bočního odformování 4 (přišroubován k zámku uzavřené polohy).



Obrázek 47 Boční odformování 3 (vlevo) a 4 (vpravo)

13.3.3 Boční odformování 5

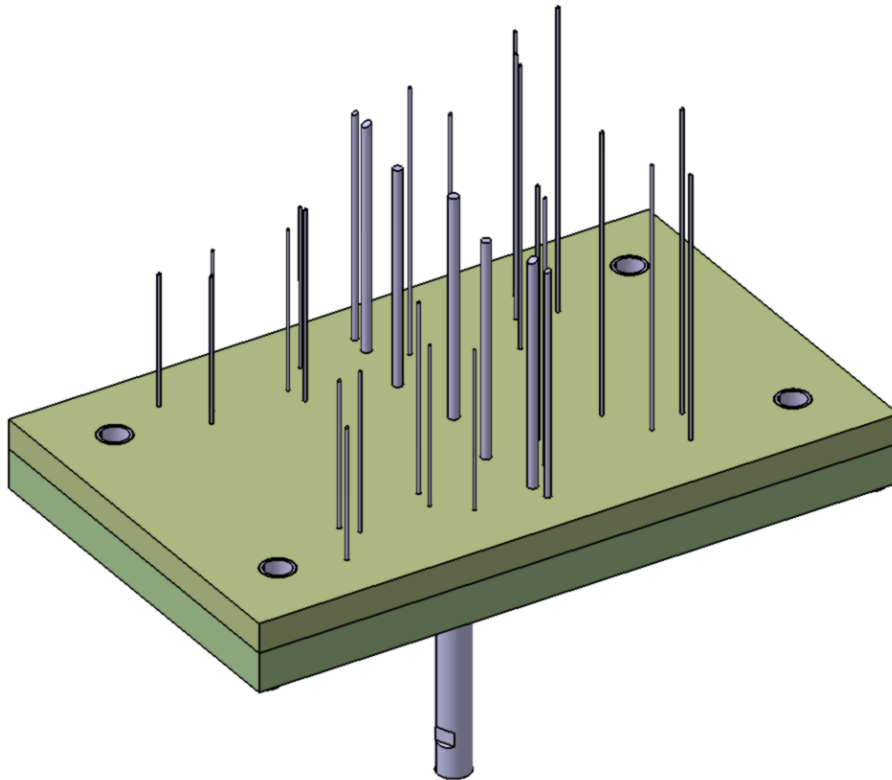
Páté boční odformování (obrázek 48) tvaruje dva otvory v naváděcím výstupku geometrie výrobku. Tato část geometrie se nachází hluboko v kotevní desce tvárníku. Stejně jako v podobném případě bočního odformování 1 to bylo vyřešeno prostřednictvím věže, která v tomto případě tvoří zámek zavřené polohy. Věž je středěna třemi geometriemi tvaru pera a je přišroubována ke kotevní desce tvárnice čtyřmi šrouby. Posuvná čelist se opět skládá z tvarové a pojezdové části z důvodu zmíněného výše. Vedení posuvné čelisti zajišťují vodící lišty středěné kolíky a přišroubované ke kotevní desce tvárníku. Šikmý kolík je v tomto případě usazen v zámku zavřené polohy, ke kterému je přišroubován. Úhel šikmého kolíku je 15° , jelikož toto boční odformování musí odjet pouze o cca 2 mm.



Obrázek 48 Boční odformování 5

13.4 Vyhazovací systém

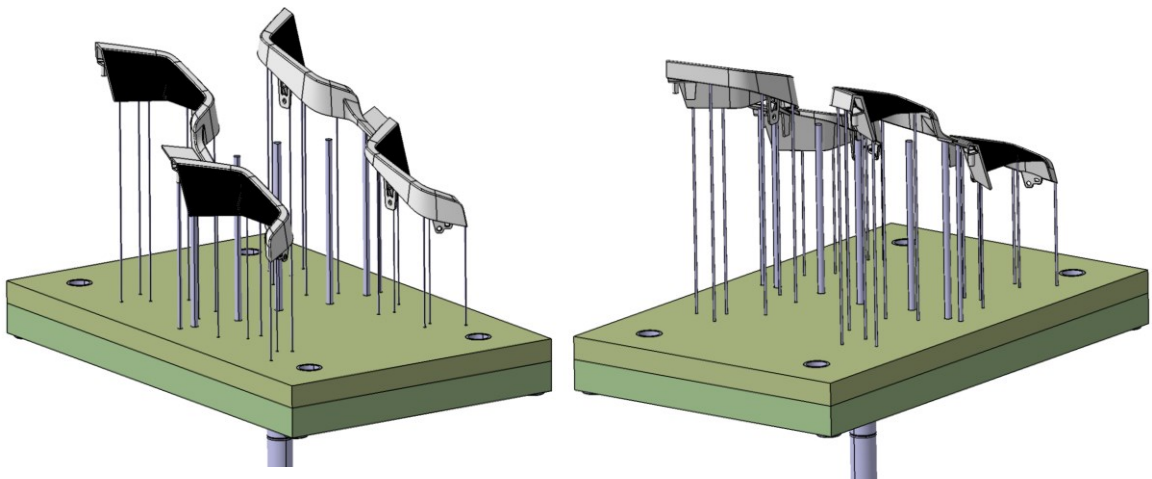
Základem vyhazovacího systému jsou kotevní a opěrná deska, mezi kterými jsou připevněny vyhazovače (obrázek 49). V kontaktu s výrobkem je 2 x 13 ks (o průměrech 2 a 2,5 mm) válcových vyhazovačů a v kontaktu s vtokovým zbytkem je 2 x 1 ks (o průměru 8 mm) vyhazovačů umístěných pod přídržovači vtokového ústí (obrázek 50).



Obrázek 49 Vyhazovací systém

Ve středu celé sestavy je umístěn vyhazovač přídržovače vtoku o průměru 9 mm. Celkem je tedy v sestavě 29 vyhazovačů. Všechny vyhazovače byly zvoleny válcové vzhledem k jednodušší instalaci i výrobě, což vede k nižší ceně. Vyhazovačům, jejichž plocha kontaktu s výrobkem není rovná, byl odebrán materiál v oblasti velkého průměru tak, aby se výsledná plocha přesně opřela o stěny vyfrézované drážky v kotevní desce.

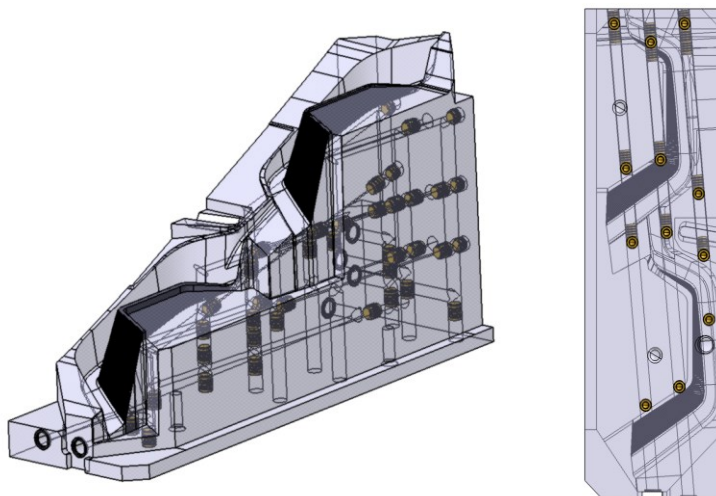
Pohyb vyhazovacího systému je ovládán prostřednictvím táhla, které je k deskám přišroubováno prostřednictvím samojistícího šroubu. Vedení je zajištěno vodícími pouzdry, klouzajícími po vodících čepech uchycených v upínací desce. Krajiní poloha vyhazovacího systému je zajištěna dosednutím dorazových destiček (umístěných na levé straně sestavy) na upínací desku vstřikovací formy.



Obrázek 50 Rozmístění výrobku vůči vyhazovačům

13.5 Tvárnice

Tvarová vložka tvárnice (obrázek 51) je opatřena těsněním a zápustkami, určujícími trajektorii toku temperačního média. Dále tvárnice obsahuje koncovou částí rozvodného kanálu vtokového systému.



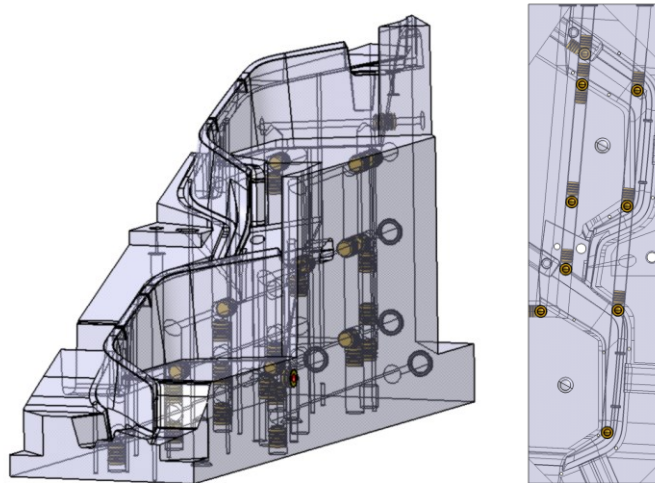
Obrázek 51 Tvárnice se zápustkami a o-kroužky

Tvárnice disponuje dvěma dírami se závitem pro závěsné oko za účelem snadné manipulace při montáži/demontáži.

13.6 Tvárník

Tvarová vložka tvárníku (obrázek 52) je, stejně jako tvárnice, opatřena těsněním a zápustkami, určujícími trajektorii toku temperačního média. Dále tvárník obsahuje tunelové

vtokové ústí. Tvárník také disponuje dvěma dírami se závitem pro závěsné oko za účelem snadné manipulace při montáži/demontáži.



Obrázek 52 Tvárník se zápustkami a o-kroužky

13.7 Vtokový systém

Tvarové dutiny jsou plněny prostřednictvím kombinovaného vtokového systému (obrázek 53). Tavenina ze vstřikovacího stroje nejprve putuje do centrální vyhřívané trysky o světlosti 8 mm. Odtud je její trajektorie dále prodloužena v ose Z do dělicí roviny pomocí studeného, postupně rozšiřujícího se, kuželového kanálu. Menší průměr kanálu je 12 mm, větší 16 mm a průměry jsou od sebe vzdáleny 23 mm. Pod tryskou s kanálem se nachází přídržovač vtoku usnadňující přidržení vtokového zbytku na pohyblivé straně vstřikovací formy, a tedy jeho vytažení z kruhového kanálu při odformování. Ze středu je tavenina vedena rozvodnými kanály lichoběžníkových průřezů (kratší podstava má rozměr 8 mm, delší 16 mm a výška je 7 mm) k jednotlivým tvarovým vložkám. Rozvodné kanály jsou obrobena v dělicí rovině nepohyblivé strany vstřikovací formy. Vtokovým ústím byl zvolen tunelový vtok pod úhlem 45° s ústím ve vtokovém žeburu zadané geometrie (ústí má průměr 2 mm). Oba tunelové vtoky jsou vybaveny přídržovačem vtoku.

Délka dráhy taveniny prostřednictvím studeného vtokového systému byla volena co nejkratší (tedy přímá) mimo jiné i s ohledem na informace získané z Nástroje pro posouzení smrštění. Z Nástroje totiž vyplývá, že má velikost smrštění narůstající tendenci v závislosti na prodlužující se délce dráhy taveniny (obrázek 54).



Obrázek 53 Geometrie vtokového systému v aplikaci Moldflow

Dále Nástroj poskytuje informaci o směru plnění tvarové dutiny (třetí řádek). Informaci je možné rozvést následovně: Výsledná orientace makromolekulárních řetězců má u tohoto materiálu významný vliv na výsledné smrštění, a to konkrétně tak, že se makromolekulární řetězce při smršťování zkracují podstatně menší měrou, než se zužuje prostor mezi nimi. V případě zobecněné geometrie na kvádr (a všechny ostatní parametry, orientace i podmínky by zůstaly stejné) by bylo vhodné zvážit umístění vtokového ústí do roviny kolmé na nejdelší stranu geometrie. V tomto zadaném případě je však vtokové ústí vedeno do vtokového žebra, které svým tvarem směřuje tok polymeru, a tak orientuje makromolekulární řetězce do směru podél nejdelšího rozměru výrobku.

Vliv designu						
Rozměrové měřítko	Oblast zkoušení	Zdroj	Materiál	Prvek geometrie	Tendence smrštění při zvětšování prvku geometrie	Poznámka
Makroskopické	Vstřikovací forma	98	PC	Délka dráhy taveniny	3	
Makroskopické	Vzorek	133	PC	Tlustostěnný díl	2	
Makroskopické	Vzorek	19	PC	Vzdálenost od vtokového ústí v kolmém směru	3	

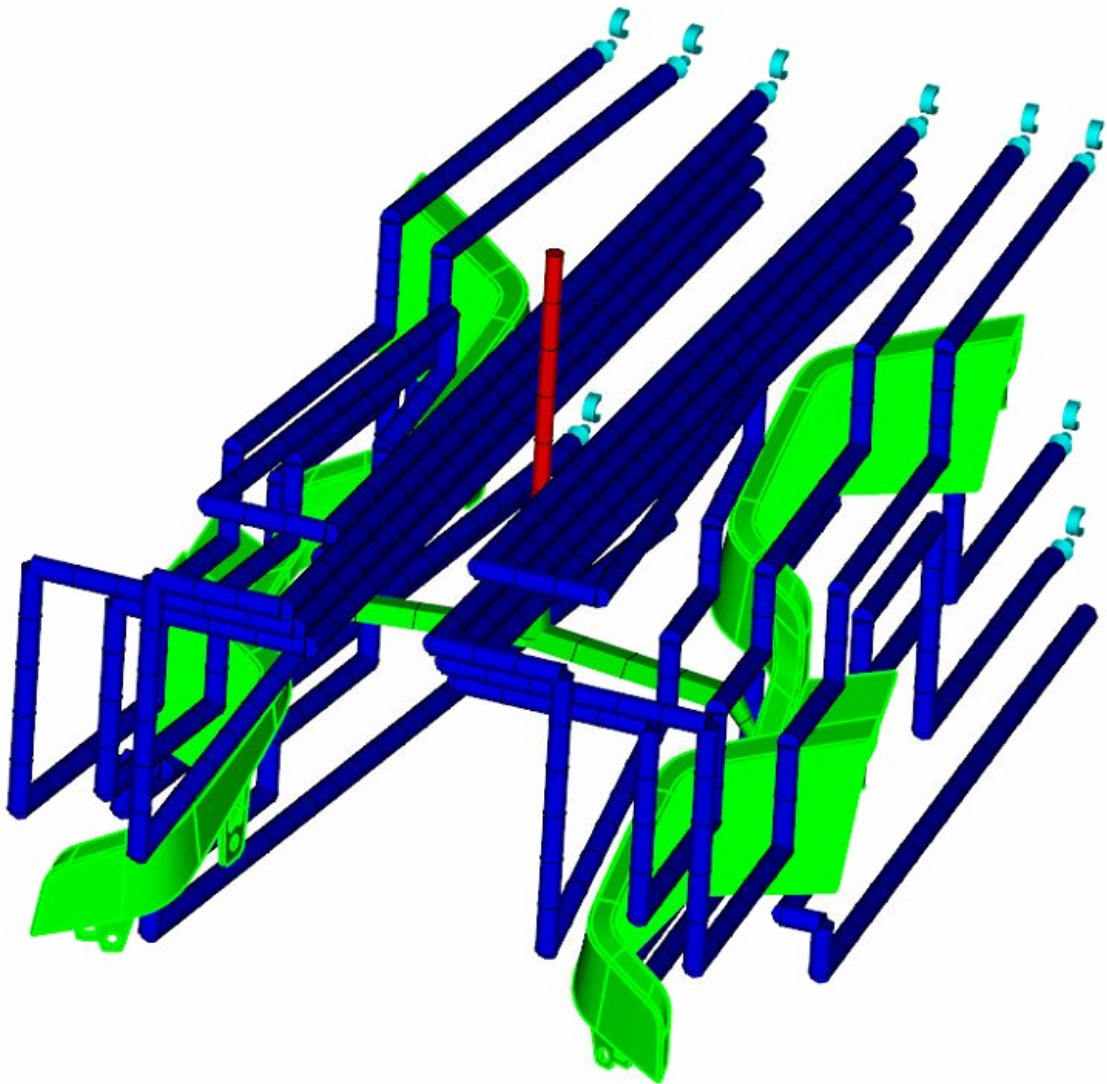
Obrázek 54 Vliv designu na smrštění zadané geometrie

Při zanedbání vtokového žebra by zohlednění vyžadovalo plnění ze dvou stran výrobku tak, aby byla dutina vyplněna celá, což by vedlo k prodloužení dráhy taveniny,

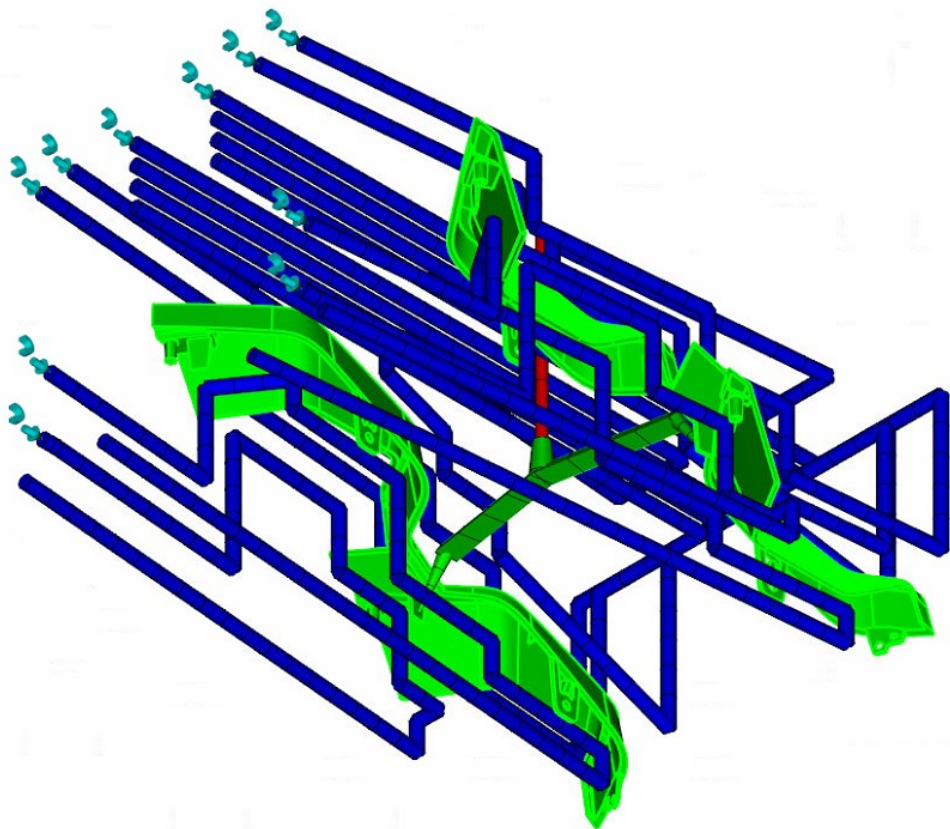
případně k prodražení celé vstříkovací formy rozšířením o další vyhřívané trysky, či k jiným komplikacím za účelem zmenšení hodnoty smrštnění o zanedbatelnou hodnotu.

13.8 Temperační systém

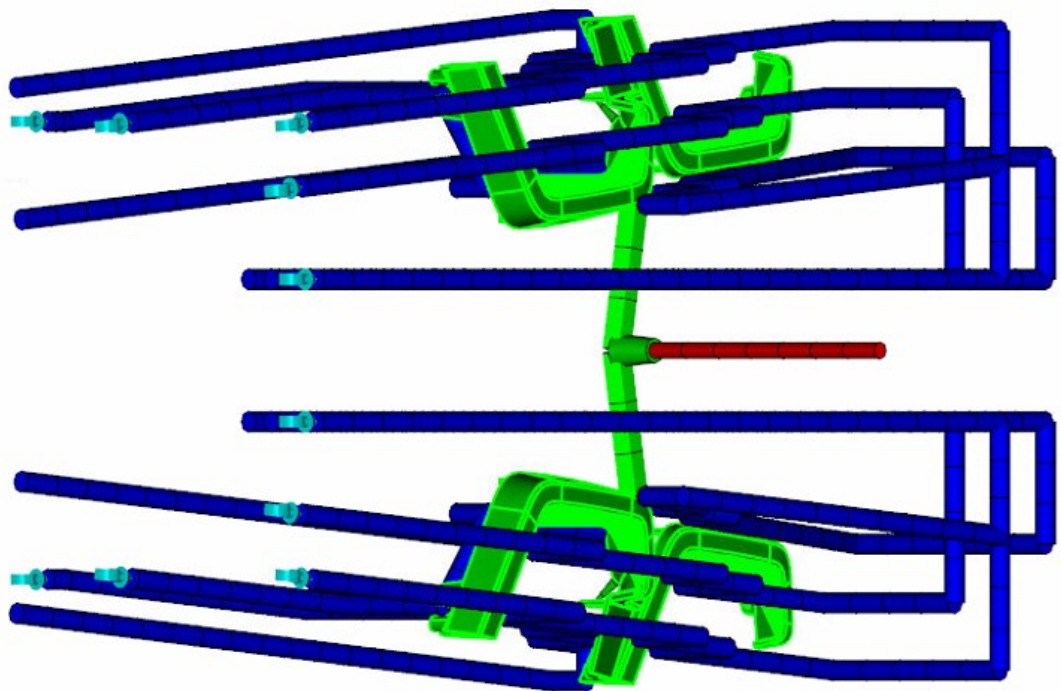
Temperační systém byl volen tak, aby co nejlépe vyhříval tvarovou dutinu. Tento přístup vyústil v deset temperačních okruhů, pět pro každou tvarovou dutinu (obrázek 55, 56 a 57). Z těchto pěti tři temperují tvárnici a dva tvárník. Všechny okruhy mají jednotnou velikost průměru kanálu 10 mm a byly vyvedeny na jednu stranu vstříkovací formy, kde jsou zakončeny naznačením připojení na temperační jednotku. Temperačním médiem je z 80 % voda a 20 % etylen glykol a je vháněno do okruhu pod tlakem 0,24 MPa. V rámci jednotlivých tvarových vložek je dráha temperačního média vymezena záslepkami.



Obrázek 55 Temperace zadané geometrie součásti 1



Obrázek 56 Temperace zadané geometrie součásti 2



Obrázek 57 Temperace zadané geometrie součásti 3

14 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Vstřikovací stroj byl zvolen Arburg Allrounder 630 S o vstřikovací jednotce s označením 800 disponující šnekem průměru 45 mm. Vstřikovací stroj byl zvolen na základě parametrů uvedených v tabulce 2 a jeho fotografie je vidět na obrázku 58. [35]

Tabulka 2 Hodnocené parametry vstřikovacího stroje

Hodnocený parametr	Požadavek	Hodnota zvoleného stroje
Rozměry vstřikovací formy (rozteč sloupků) [mm]	696 x 496	630 x 630
Výška formy v otevřeném stavu [mm]	700	900
Uzavírací síla [kN]	2194,7	2500
Vstřikovací tlak [MPa]	95,33	247
Objem výstřiku [cm ³]	13,11	318
Průměr středícího kroužku [mm]	160	160



Obrázek 58 Arburg Allrounder 630 S, 2500 – 800 [13]

15 TOKOVÉ ANALÝZY ZADANÉ GEOMETRIE SOUČÁSTI

Návrh vstřikovací formy byl podroben tokovým analýzám. Nejprve byly vypracovány tokové analýzy na základě doporučených procesních parametrů z materiálového listu. Následně byly tyto parametry upraveny na základě Nástroje pro posouzení smrštění za účelem dosažení co možná nejmenší hodnoty smrštění za přijatelných procesních parametrů.

15.1 Výchozí toková analýza

Vytvořená síť

Geometrie výrobku byla vysítována 2,5D sítí z důvodu (v porovnání s 2D a 3D sítí) uspokojivé kvality a nižších nároků na hardware výpočetní techniky. Informace o kvalitě sítě jsou vypsány na obrázku 59.

Aspect Ratio:		
Maximum	Average	Minimum
19.29	2.40	1.15
Edge details:		
Free edges		0
Manifold edges		296712
Non-manifold edges		0
Orientation details:		
Elements not oriented		0
Intersection details:		
Element intersections		0
Fully overlapping elements		0
Match percentage:		
Match percentage		68.9%
Reciprocal percentage		59.8%

Obrázek 59 Kvalita sítě

Poměr stran trojúhelníků (Aspect ratio) by neměl přesáhnout hodnotu 20. V opačném případě by mohlo dojít ke zkreslení výsledků analýzy. Podmínky bylo po úpravě sítě docíleno. Dále by neměl být počet volných hran (Free edges), nespojitých hran (Non-manifold edges), neorientovaných elementů (Elements not oriented), protínajících se elementů (Element intersections) a plně překrývajících se elementů (Fully overlapping elements) větší než 0. Tyto podmínky byly splněny.

Dalšími zohledňovanými faktory kvality vysítování jsou hodnoty procentuální shody sítě se zkoumanou geometrií. Hodnota procentuální shody (Match percentage) a recipročního procenta (Reciprocal percentage) nesmí být nižší, než 50 %. Tato podmínka je

v obou případech splněna. Na druhou stranu by se však tyto hodnoty měly co nevíce přibližovat hodnotě 100 %. V tomto případě by s největší pravděpodobností pomohlo odstranění malých rádiusů, pokrývajících poměrně velkou plochu výrobku, jejichž poloměr je menší než 2 mm. To však nebylo možné z důvodu omezených možností práce s geometrií výrobku.

Procesní parametry

První toková analýza vychází z hodnot uvedených v materiálovém listu. Jedná se o kontrolu návrhu vstřikovací formy. Použité procesní parametry jsou uvedeny v tabulce 3. Kontrola plnění byla nastavena jako lineární závislost objemu vstřikované dávky na průtoku.

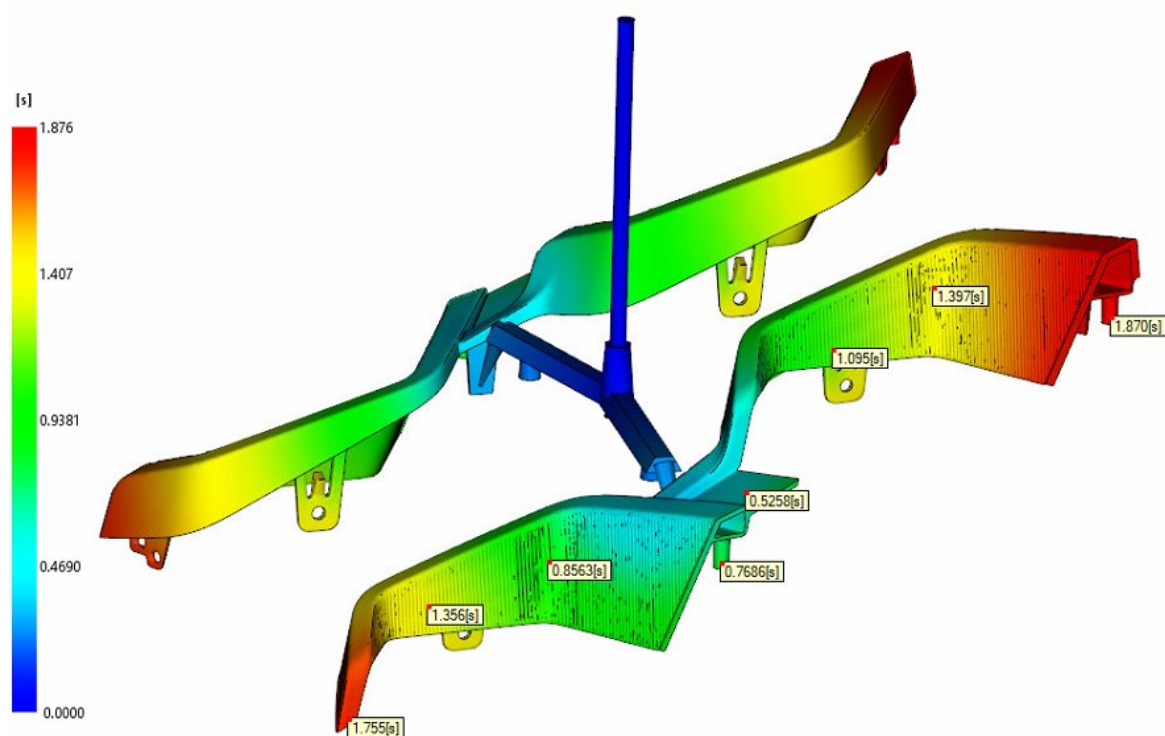
Tabulka 3 Procesní parametry – výchozí analýza

Název v aplikaci	Význam	Nastavení
Melt temperature	Teplota taveniny	335 °C
Mold-open time	Doba, kdy je forma otevřená	5 s
Mold surface temperature	Teplota povrchu formy	120 °C
Ejection temperature	Teplota při vyhození	163 °C
Minimum part frozen percentage at ejection temperature	Minimální procentuální zchladnutí při vyhazovací teplotě	90 %
Mold-open time	Čas otevření formy	5 s
Nominal injection time	Nominální čas vstřiku	1,6 s
Velocity/pressure switch-over	Přepnutí na dotlak	Při zaplnění tvarové dutiny z 98 %
Pack/holding control	Dotlaková fáze	lineární, 15 s, 90 % vstřikovacího tlaku
Coolant inlet temperature	Teplota temperačního média při vstupu do okruhu	115 °C

15.2 Výsledky výchozí tokové analýzy

Čas plnění (Fill time)

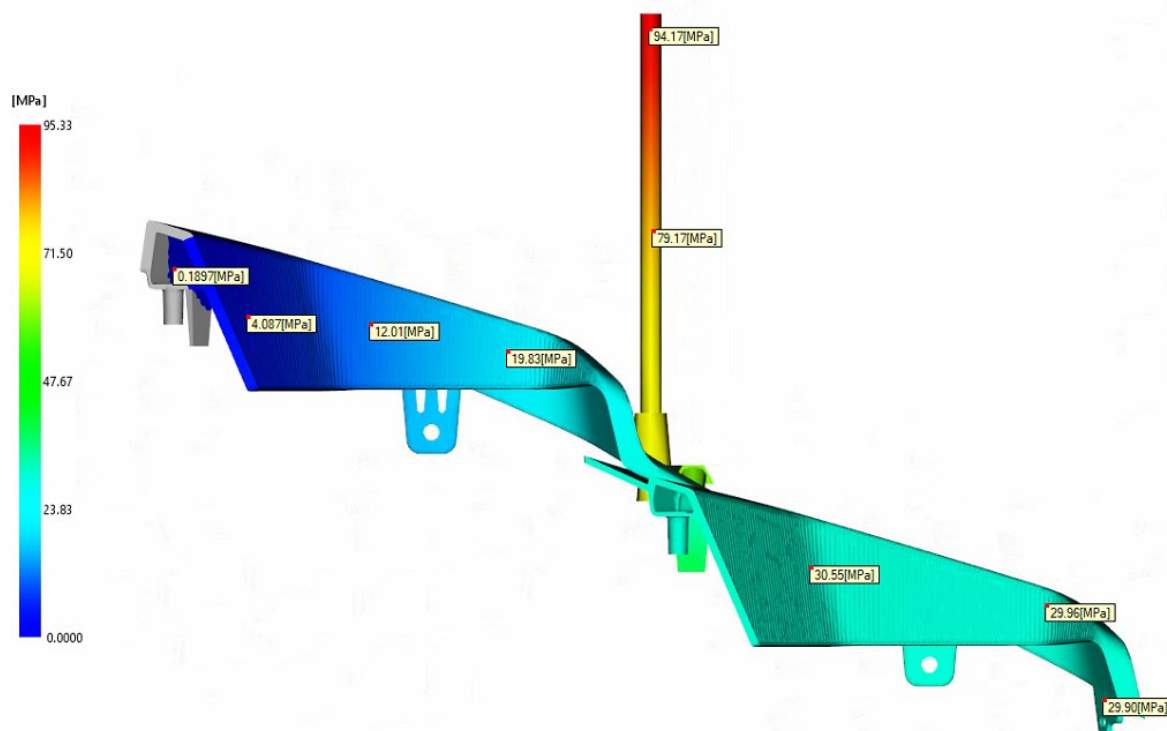
Prvním výstupem analýzy plnění a dotlaku je čas plnění (obrázek 60). Grafické znázornění zobrazuje doby, při kterých se zaplní vždy daná část výrobku. Maximální hodnota (červená) poskytuje informaci za jak dlouho se zaplní celý výrobek. V tomto případě je čas naplnění dutiny formy 1,876 sekundy. Oblast, která se zaplní jako poslední, je v nejbližších místech od vtokového ústí. V případě výskytu šedé barvy by dutina nebyla kompletně zaplněna a bylo by nutné upravit procesní parametry.



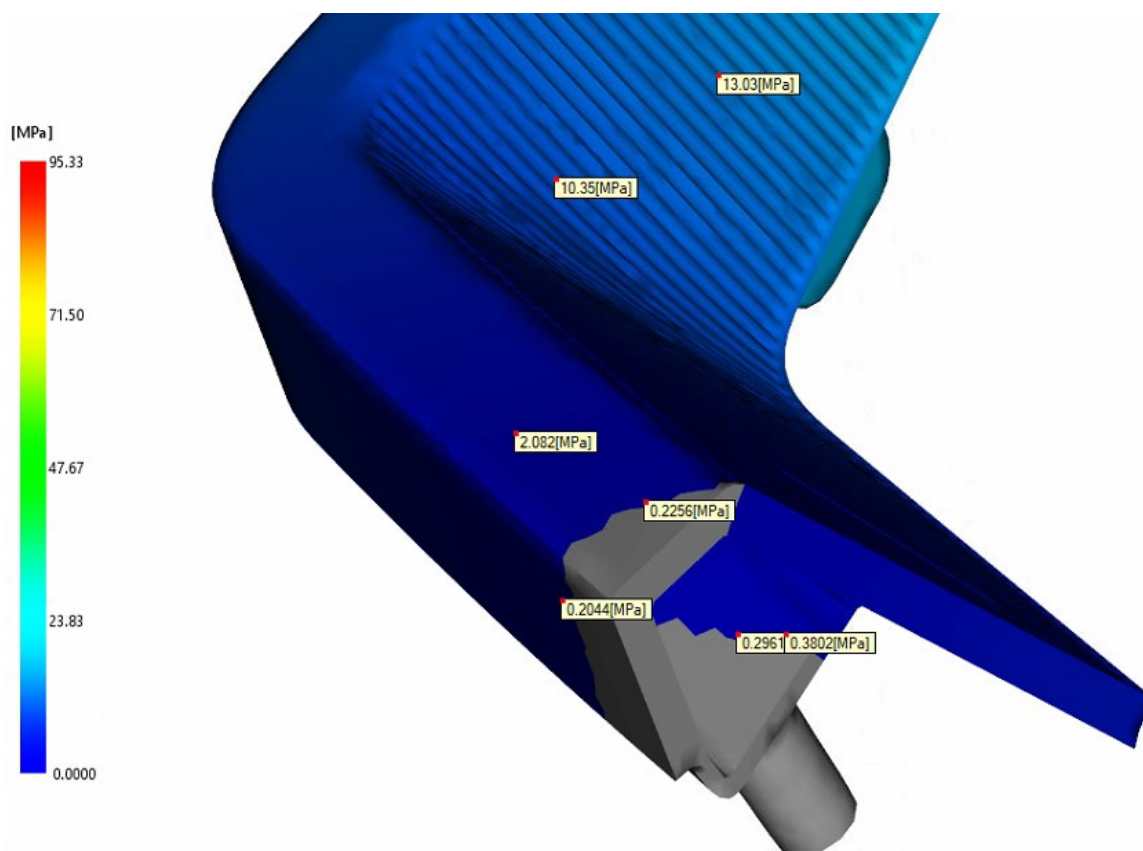
Obrázek 60 Výchozí analýza – Čas plnění

Tlak při přepnutí na dotlak (Preassure at V/P switchover)

Výstup analýzy graficky znázorňuje rozložení tlaku v časovém bodě přepnutí na dotlak. Tlak by měl směrem od vtokového ústí klesat až do bodu, kde tavenina zatím nevyplnila tvarovou dutinu (šedá barva). Na hranici mezi taveninou a prázdnou dutinou by měla být hodnota tlaku nulová. Tato podmínka byla splněna, jak je vidět na obrázku 61 a detailu na obrázku 62. Rozpětí tlaku je od 0 do 95,33 MPa, horní hranice určuje maximální vstřikovací tlak, který musí vstřikovací stroj zabezpečit. Dále je tímto výsledkem znázorněno kam až byla dutina vyplněna při fázi plnění. Za povšimnutí také stojí fakt, že byla spodní část tvarové dutiny při fázi plnění zaplněna celá, zatím co horní ne.



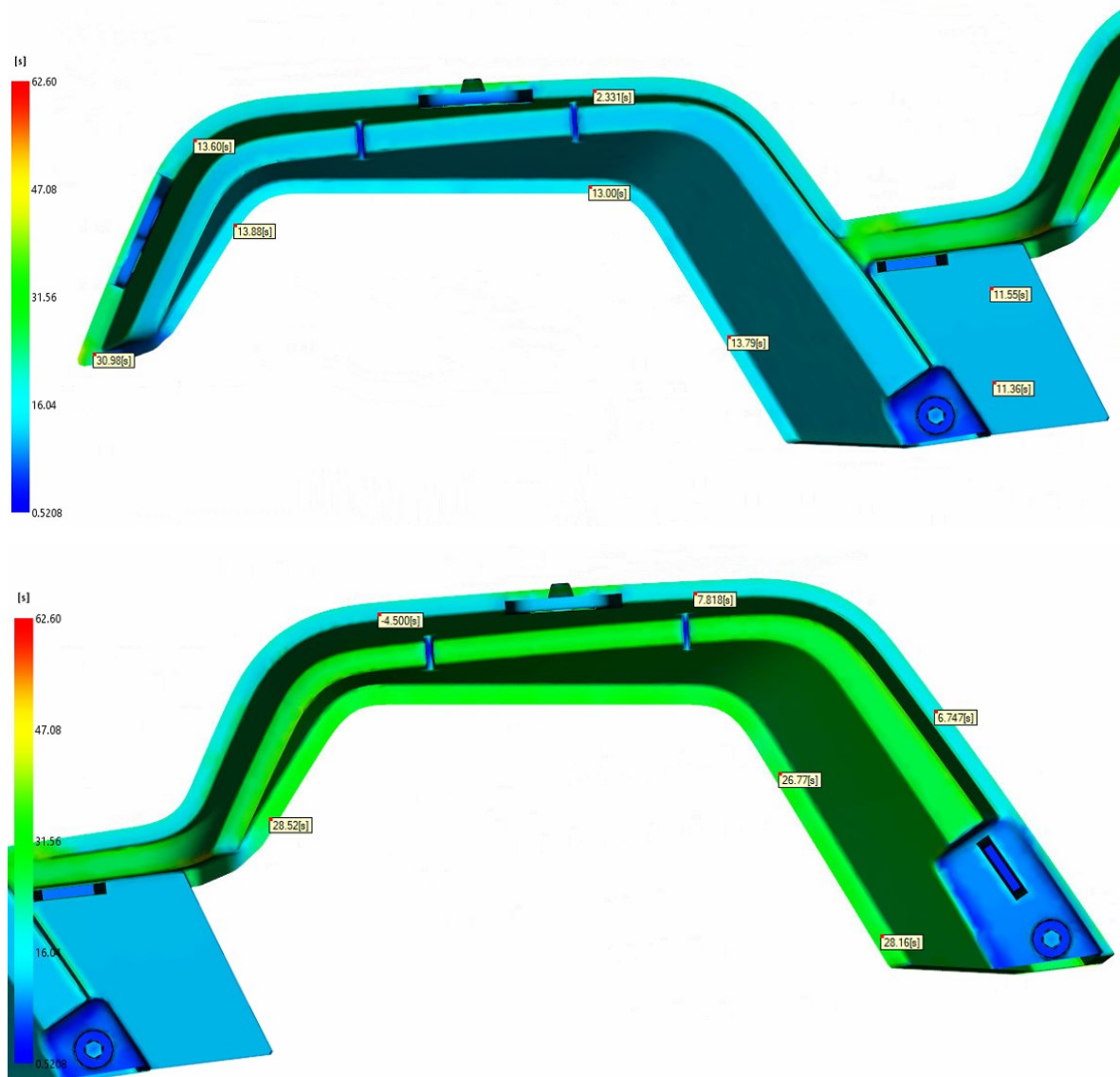
Obrázek 61 Výchozí analýza – Tlak při přepnutí na dotlak



Obrázek 62 Výchozí analýza – Tlak při přepnutí na dotlak, detail

Čas dosažení vyhazovací teploty na součásti (Time to reach ejection temperature, part)

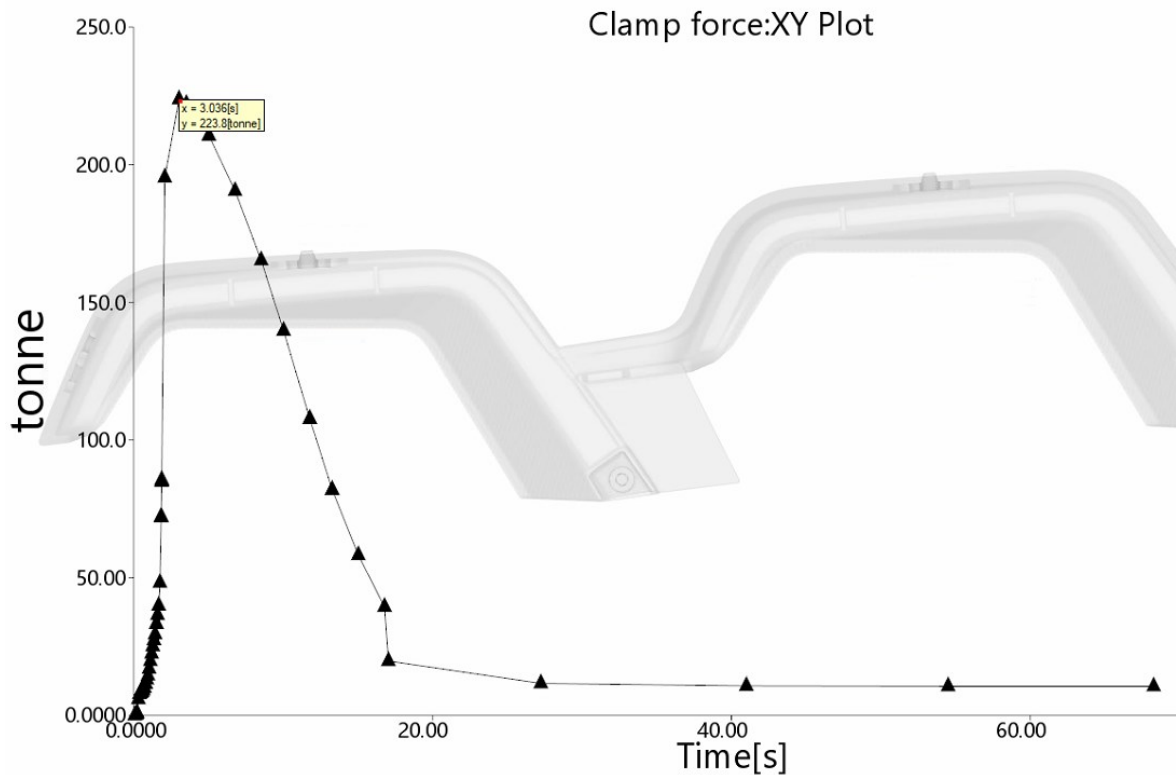
Výstupem je grafické znázornění času potřebného k dosažení vyhazovací teploty (v tomto případě 163 °C) na součásti. Nejdelší čas je znázorněn červenou barvou, nejkratší naopak barvou modrou. Na obrázku 63 byly vyznačeny časy potřebné k ochlazení ploch pod vyhazovači na vyhazovací teplotu. Čas potřebný k ochlazení výrobku na vyhazovací teplotu se pohybuje okolo 31 s. Tato doba začíná počátkem vstřikování. Na stupnici je vidět maximální hodnota 62,6 s, která platí pro jádro výrobku a pro vyhodnocení doby nutné k vyhození výrobku je zanedbatelná.



Obrázek 63 Výchozí analýza – Čas dosažení vyhazovací teploty na součásti

Uzavírací síla (Clamp force: XY Plot)

Výsledkem (obrázek 64) je graf závislosti velikosti uzavírací síly (v dělicí rovině XY) na čase a je významným parametrem pro volbu vstřikovacího stroje. Maximální uzavírací síla je dosažena v čase 3 s a její hodnota je 2194,7 kN.

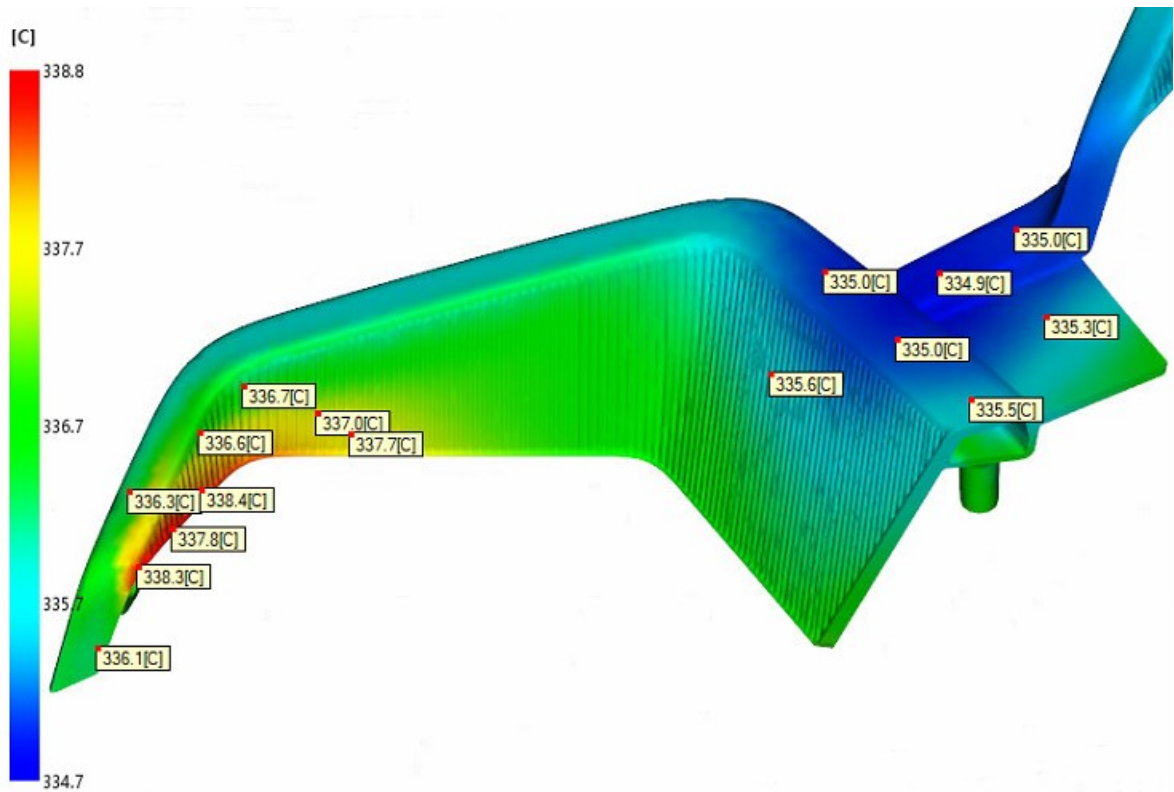


Obrázek 64 Výchozí analýza – Uzavírací síla

Teplota čela taveniny (Temperature at flow front)

V průběhu plnění se mění teplota čela taveniny zaplňující tvarovou dutinu výrobku. Výsledkem je barevná mapa, znázorňující teplotu čela taveniny v konkrétních bodech. V žádném z bodů nesmí teplota přesáhnout horní kritickou hranici, kterou je teplota degradace materiálu. Teplota zároveň musí být vyšší, než je dolní kritická hranice, aby nedocházelo k zamrznání čela taveniny.

Na obrázku 65 jsou vyznačeny hodnoty v oblastech s nejnižší a nejvyšší teplotou čela taveniny. Na stupnici v levé části obrázku lze odečíst interval 334,7 – 338,8 °C, ve kterém se teplota pohybuje. Doporučený interval je 330 – 340 °C (absolutně maximální teplota taveniny je dle Moldflow 380 °C). Na výrobku by nemělo docházet k degradaci materiálu ani k zamrznání čela taveniny.



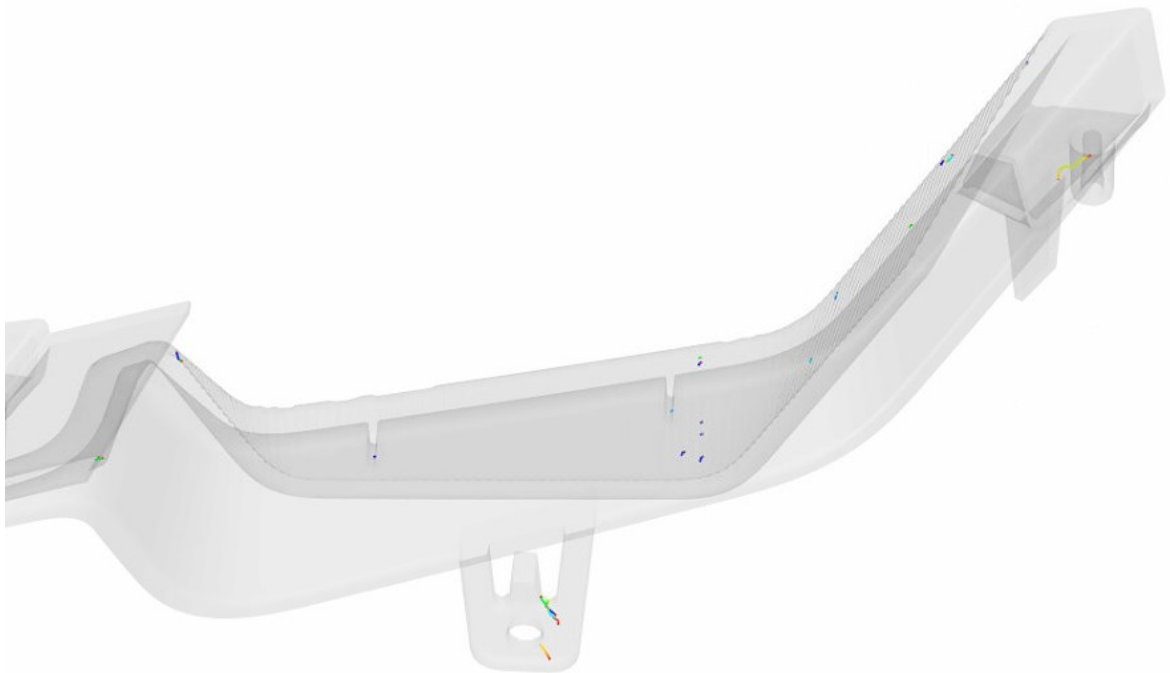
Obrázek 65 Výchozí analýza – Teplota čela taveniny

Studené spoje (Weld lines)

Výsledek znázorňuje místa studených spojů. Studené spoje mohou být z pohledu mechanického chování výsledného výrobku kritické. Dále, jsou-li na pohledové straně, mohou být považovány za pohledové vady výrobku. Předpoklad vzniku studených spojů zadaného výrobku vidíme na obrázcích 66 a 67.



Obrázek 66 Výchozí analýza – Studené spoje 1



Obrázek 67 Výchozí analýza – Studené spoje 2

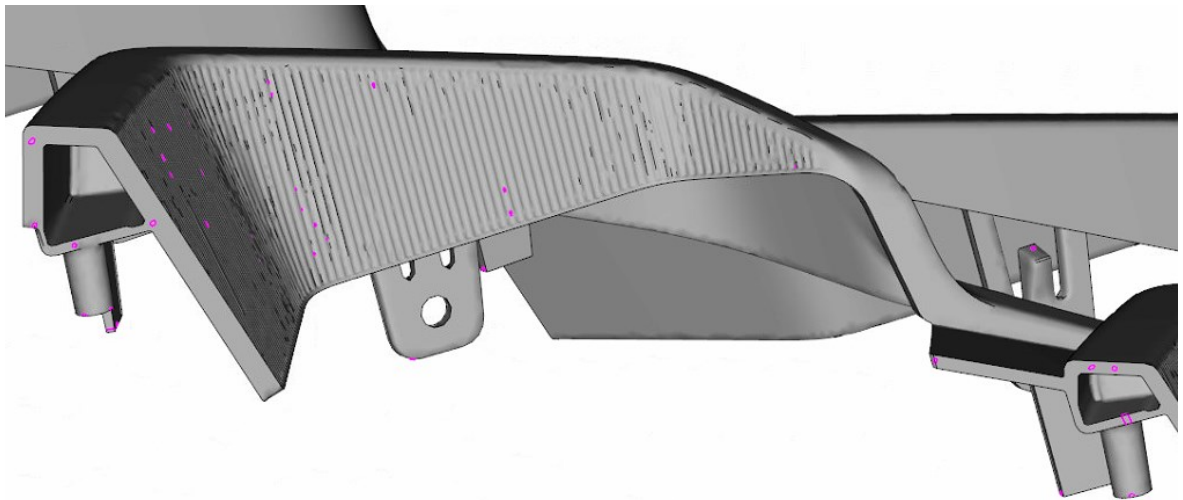
Studené spoje na výrobku (tak jak je navržený) prakticky není možné odstranit. Je možné se pokusit zlepšit parametry jeho vzniku změnami technologických nastavení. Například je možné zvýšit teplotu formy, či teplotu taveniny za účelem lepšího spojení v těchto místech.

Vzduchové kapsy (Air traps)

Výsledek znázorňuje místa, kde je předpoklad vytvoření vzduchových kapes, bublin, lunkrů a dalších. Tato předpokládaná místa jsou na obrázcích 68 a 69.



Obrázek 68 Výchozí analýza – Vzduchové kapsy 1

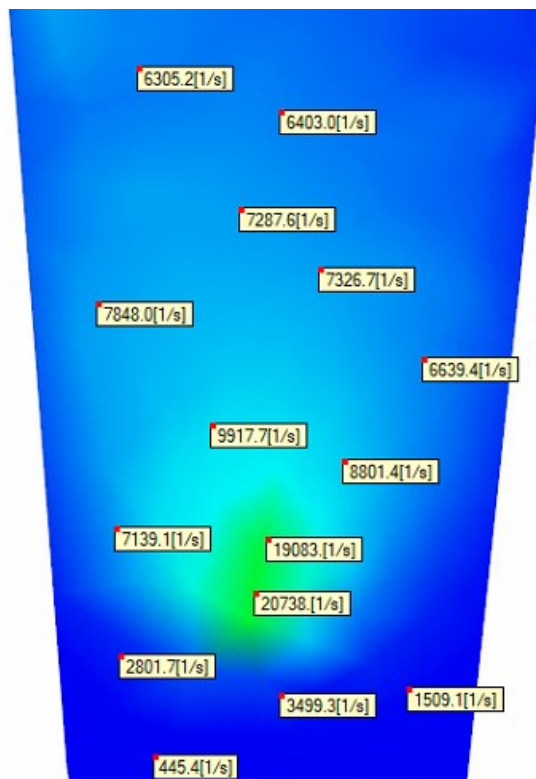


Obrázek 69 Výchozí analýza – Vzduchové kapsy 2

V oblastech, znázorněných na výrobku fialovou barvou, bude nutné zabránit vzniku vzduchových kapes například pomocí návrhu odvzdušnění. Dále je možné vzniku kapes zabránit vhodným umístěním vyhazovačů a některým bude zabráněno díky přirozenému úniku vzduchu dělicí rovinou.

Rychlost smykové deformace (Shear rate, bulk)

Výsledek analýzy ukazuje extrém rychlosti smykové deformace. Obecně se většinou maximum této hodnoty nachází ve vtokovém ústí a je tomu tak i v tomto případě.

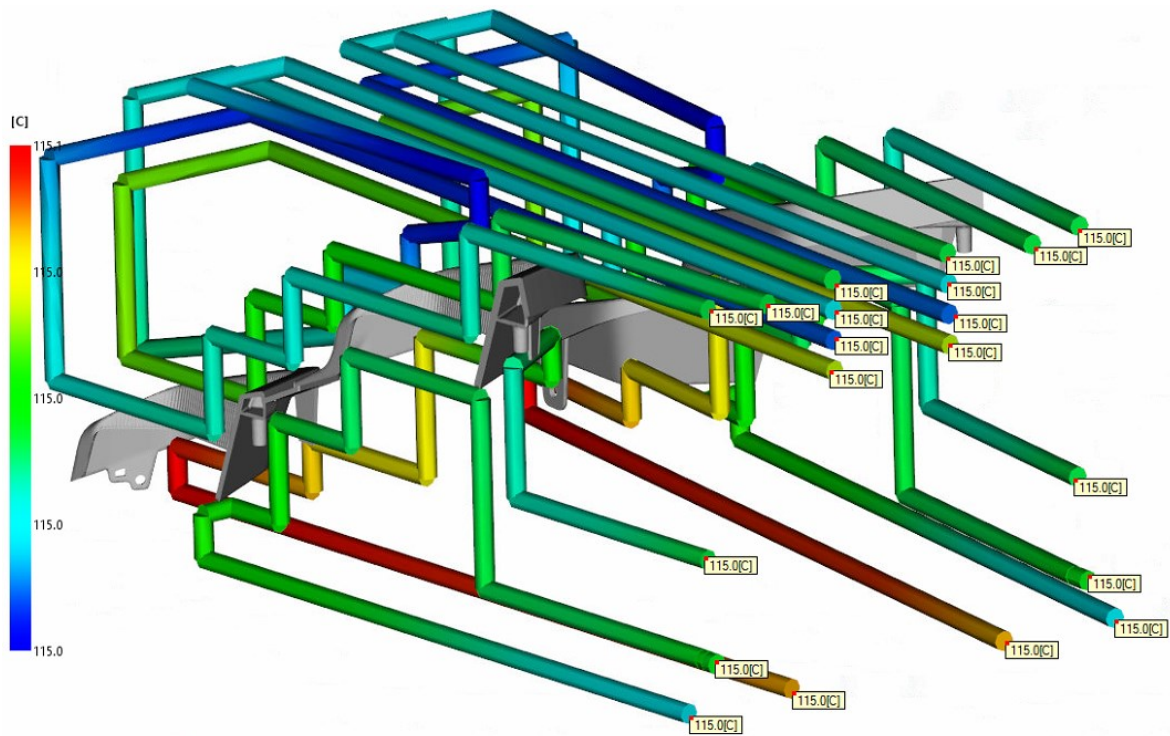


Obrázek 70 Výchozí analýza – Rychlost smykové deformace, plnicí žebro

Obrázek 70 ukazuje, že se rychlosti smykové deformace pohybují okolo hodnoty $20\,000\text{ s}^{-1}$. Maximální dovolená hodnota rychlosti smykové deformace je dle materiálového listu $40\,000\text{ s}^{-1}$, tato hodnota je tedy v pořádku.

Teplota v temperačním okruhu (Circuit coolant temperature)

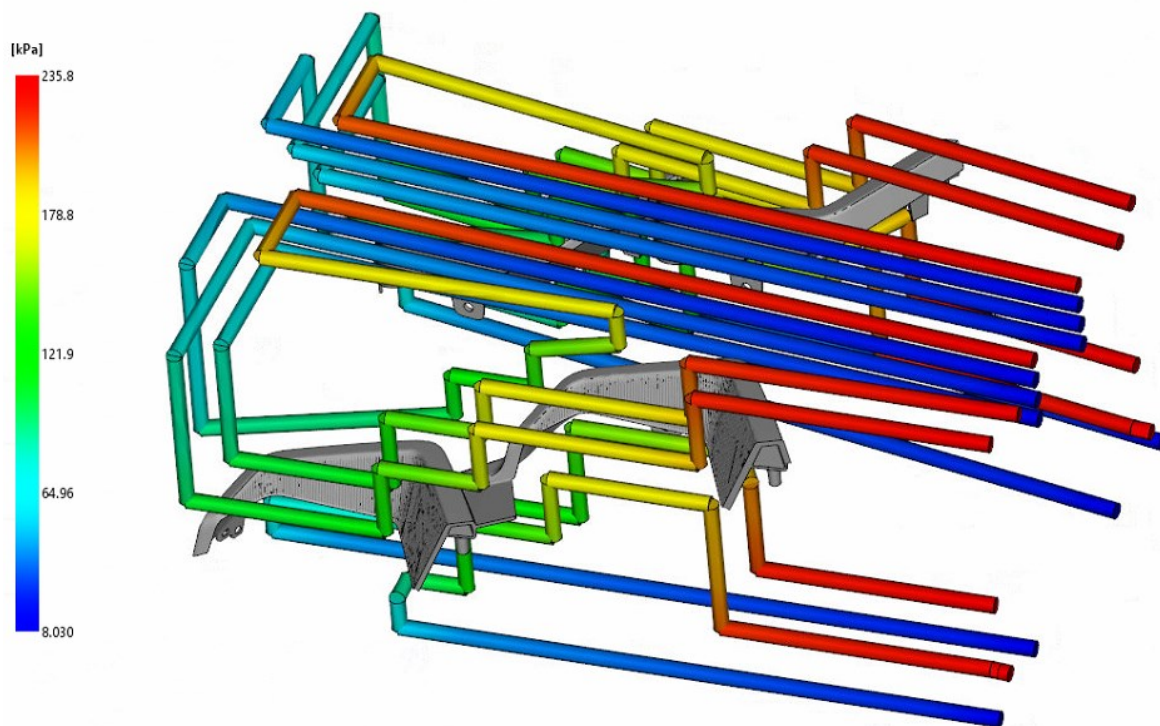
Tento výstup znázorňuje průběh teplot v rámci temperačních okruhů. Nejvyšší teploty ($115,1\text{ °C}$) dosahuje temperační médium na výstupu, což je také znázorněno na obrázku 71 červenou barvou. Naopak nejnižší je teplota temperačního média na vstupu (zadaná hodnota 115 °C , modrá barva). Maximální teplotní spád je tedy $0,1\text{ °C}$, což je přijatelná hodnota. Za situace, kdy by byl teplotní spád vyšší než 3 °C (max. 5 °C), muselo by dojít k úpravě temperace (geometrie, typ média).



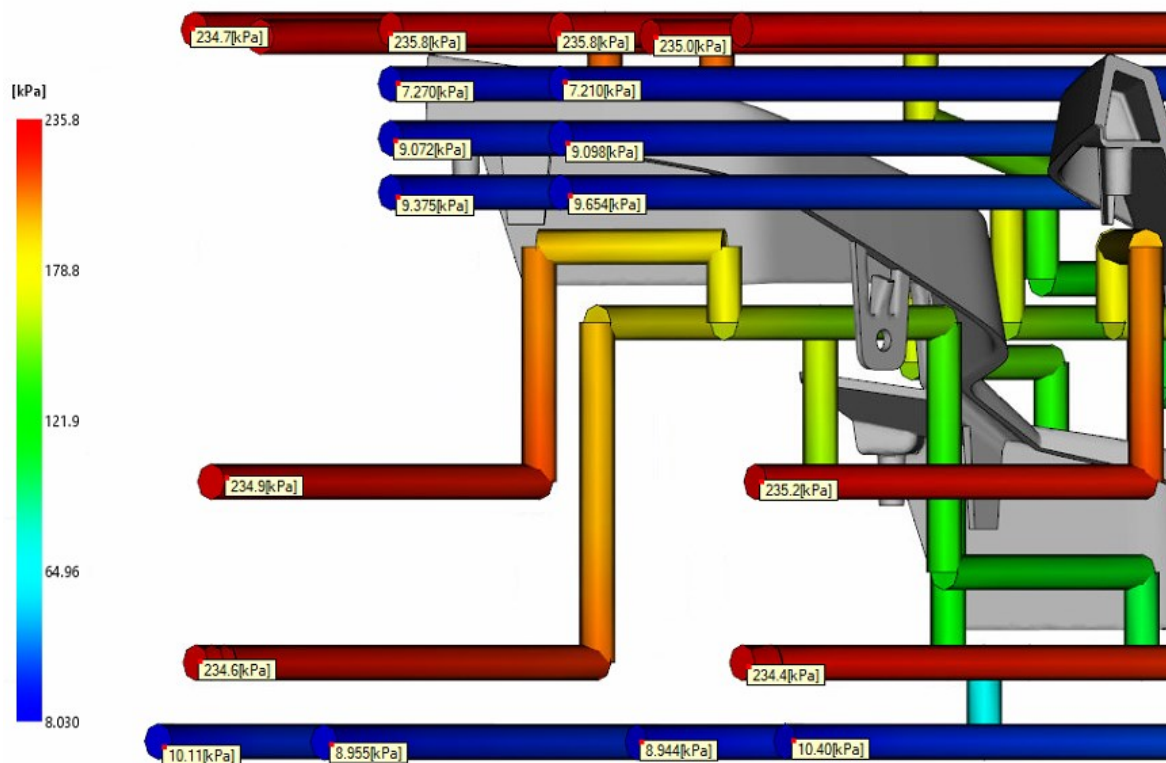
Obrázek 71 Výchozí analýza – Teplota v temperačním okruhu

Tlak v temperačním okruhu (Circuit pressure)

Výsledek analýzy graficky znázorňuje průběh tlaků na větvích temperačních okruhů (obrázek 72). Na vstupu (obrázek 73) dosahuje tlak nejvyšší hodnoty $235,8\text{ kPa}$ (červená barva). Tlak je postupně spotřebováván až na výstupní hodnotu $8,03\text{ kPa}$ (modrá barva).



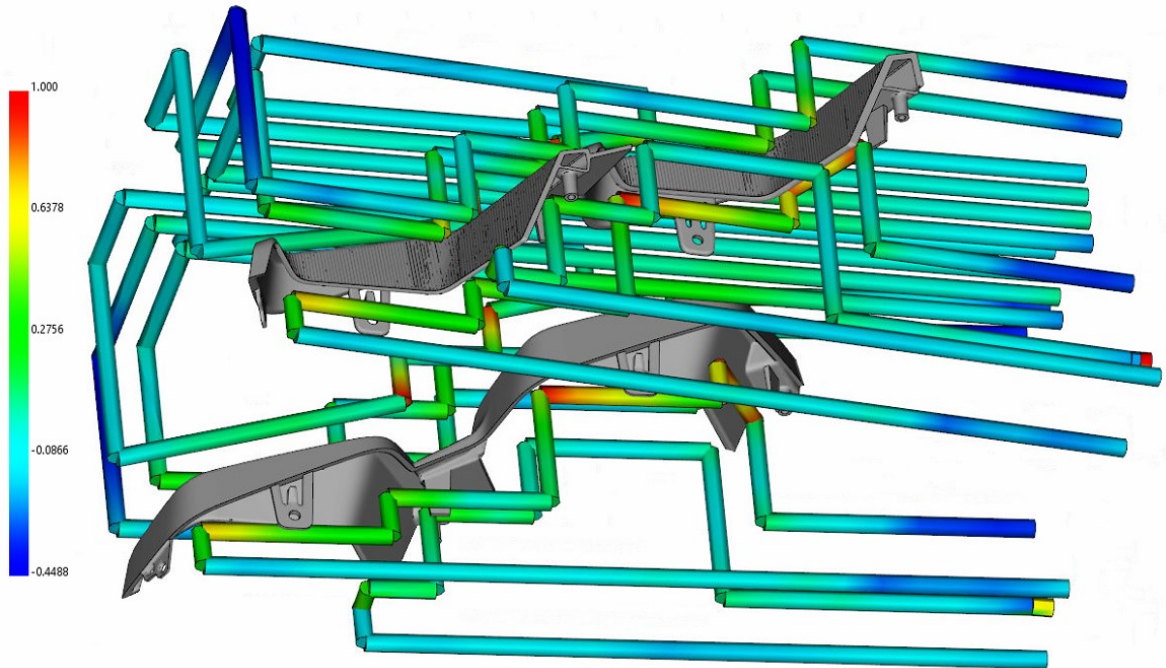
Obrázek 72 Výchozí analýza – Tlak v temperačním okruhu



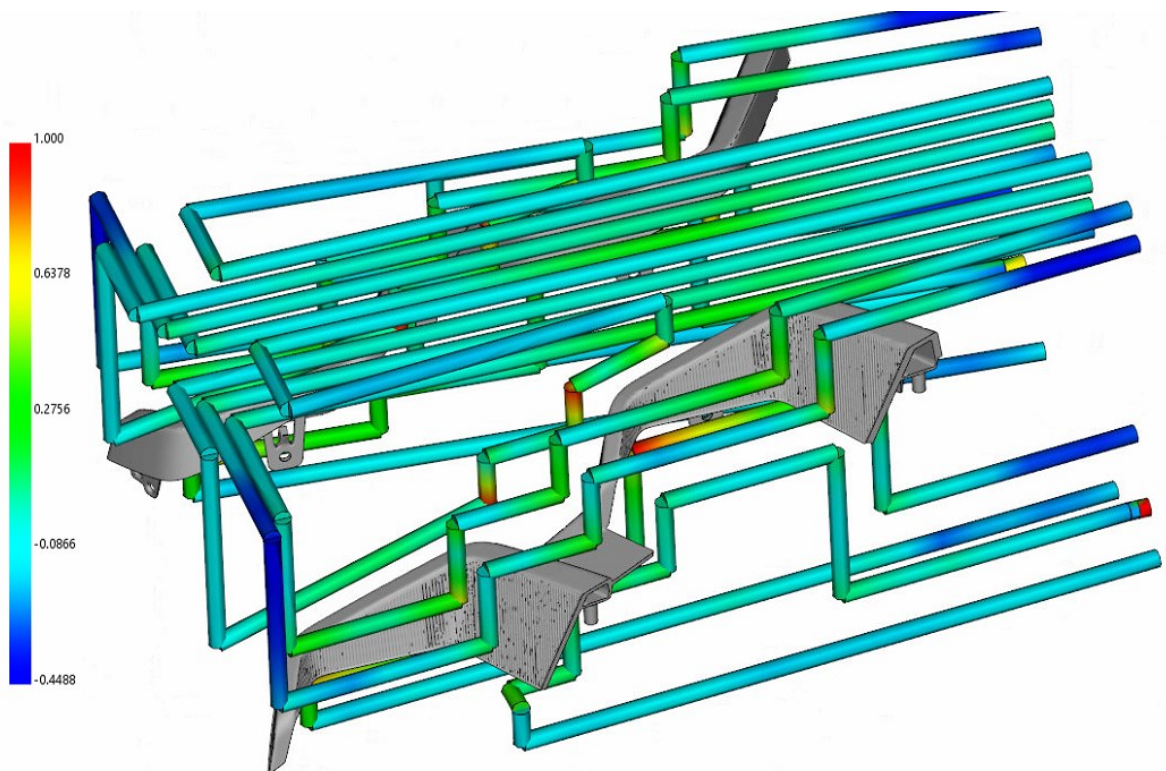
Obrázek 73 Výchozí analýza – Tlak v temperačním okruhu, hodnoty

Účinnost odvodu tepla temperačním systémem (Circuit heat removal efficiency)

Výstupem je grafické znázornění účinnosti odvodu tepla temperačním systémem v průběhu geometrie větví. Pro lepší názornost je doplněn o vstříkované součásti.



Obrázek 74 Výchozí analýza – Účinnost odvodu tepla, pohled 1

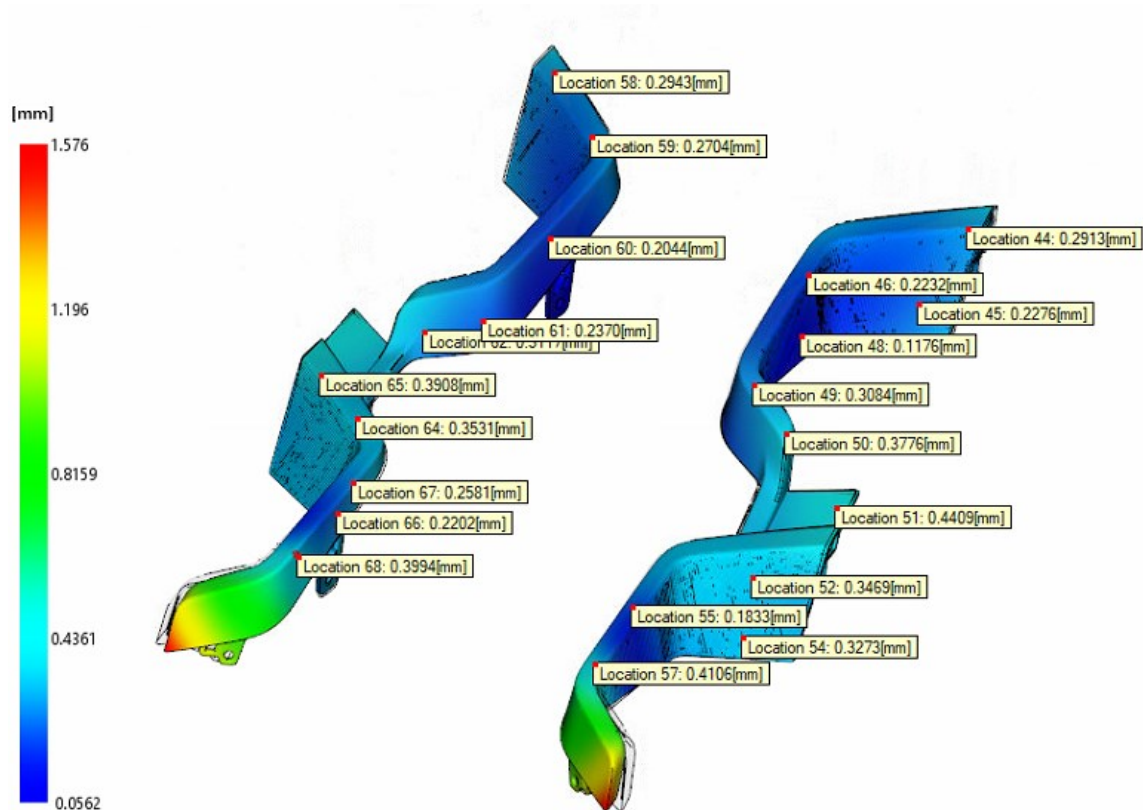


Obrázek 75 Výchozí analýza – Účinnost odvodu tepla, pohled 2

Účinnost je vyjádřena v procentech s tím, že červená barva označuje oblasti s nejvyšší účinností odvodu tepla (až 100 %). Přechod k modré barvě na stupnici značí zhoršování účinnosti odvodu tepla až do případných záporných hodnot označujících dodávání tepla temperací do systému. Z obrázků 74 a 75 je patrné, že barvy poměrně dobře kopírují objem součástí. Sytě modré barvy se objevují pouze v oblastech vstupu temperačního média do okruhu a na pomocných větvích, sloužících k návratu temperačního média. Naopak oblasti v blízkosti tvarových dutin jsou zbarveny od zelené do červené barvy.

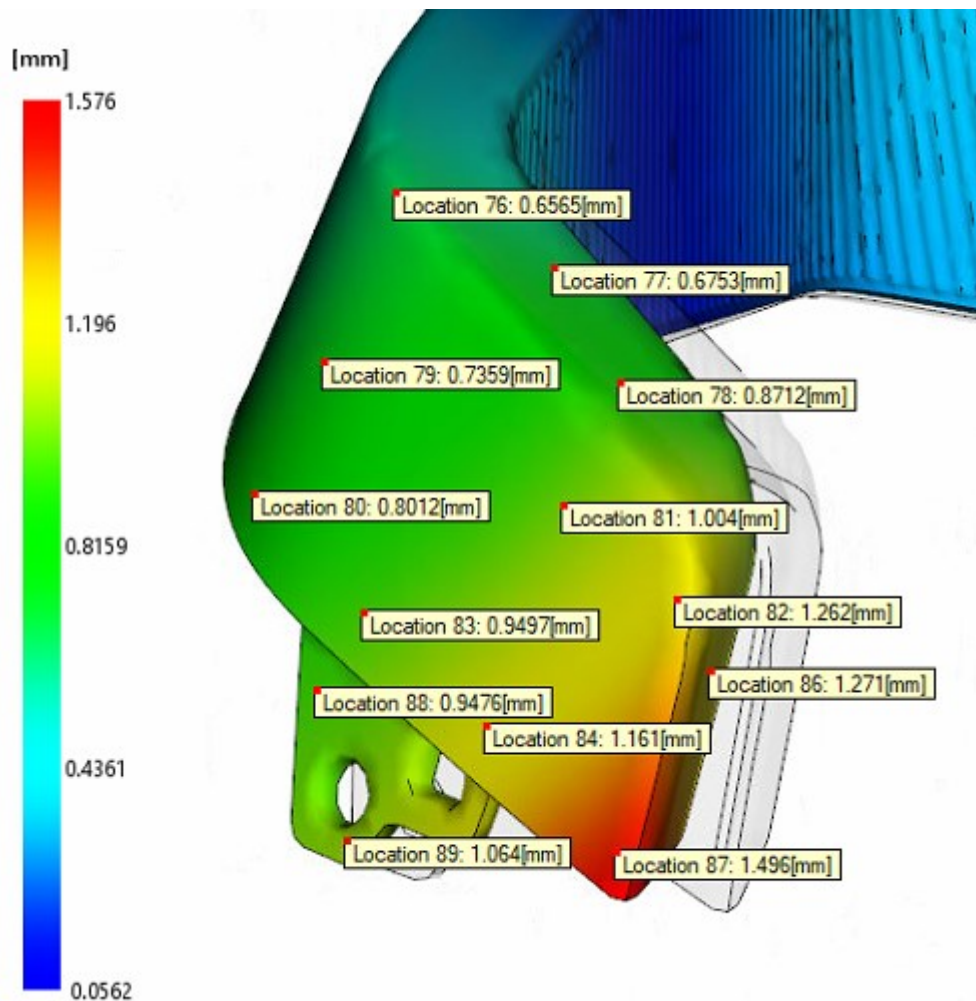
Celková deformace vlivem všech efektů (Deflection, all effects; Deflection)

Výsledkem analýzy je celková deformace, jež byla způsobena vlivem všech jevů během procesu vstřikování ve všech směrech (osách X, Y, Z). Výsledek je zobrazen na obrázku 76 v měřítku 5.



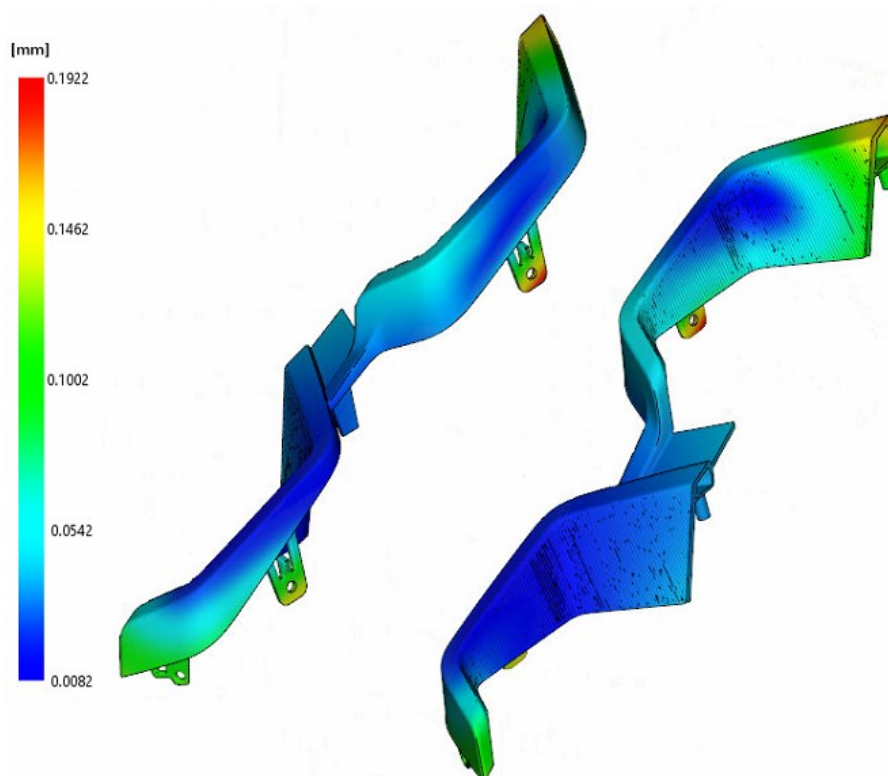
Obrázek 76 Výchozí analýza – Celková deformace

Z výsledku je patrné, že se výrobek smršťuje ve většině oblastí o hodnotách do 0,5 mm. To platí na celém výrobku až na oblast zobrazenou na obrázku 77 (měřítko 5).



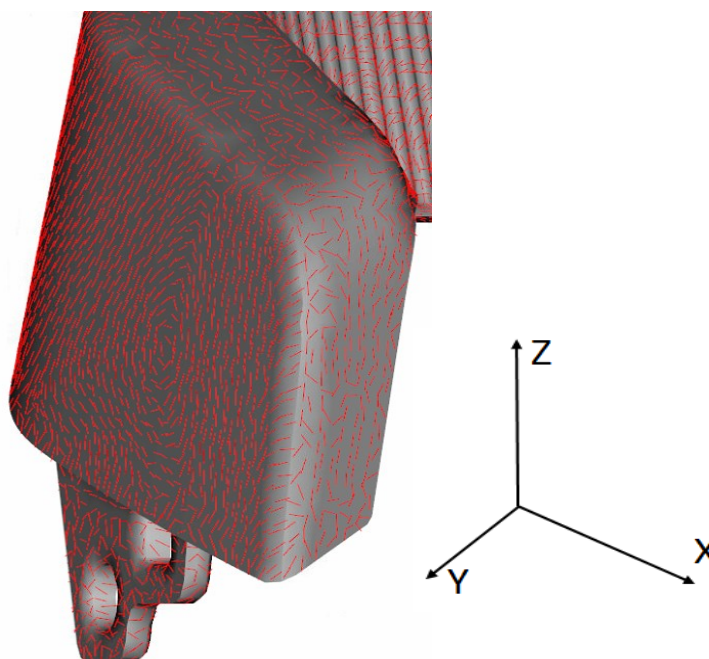
Obrázek 77 Výchozí analýza – Celková deformace, problematická oblast

Tato problematická oblast vykazuje až trojnásobně větší deformaci oproti zbytku výrobku a to až 1,576 mm. Na základě výsledku analýzy „Deformace způsobená rozdíly teplot během chlazení (Deflection, differential cooling; Deflection)“ (obrázek 78) byl jako příčina vyloučen vliv špatného návrhu temperace. Výsledek totiž ukázal, že temperace má na celkovou deformaci vliv, ale výrobek deformuje pouze do maxima 0,1922 mm.



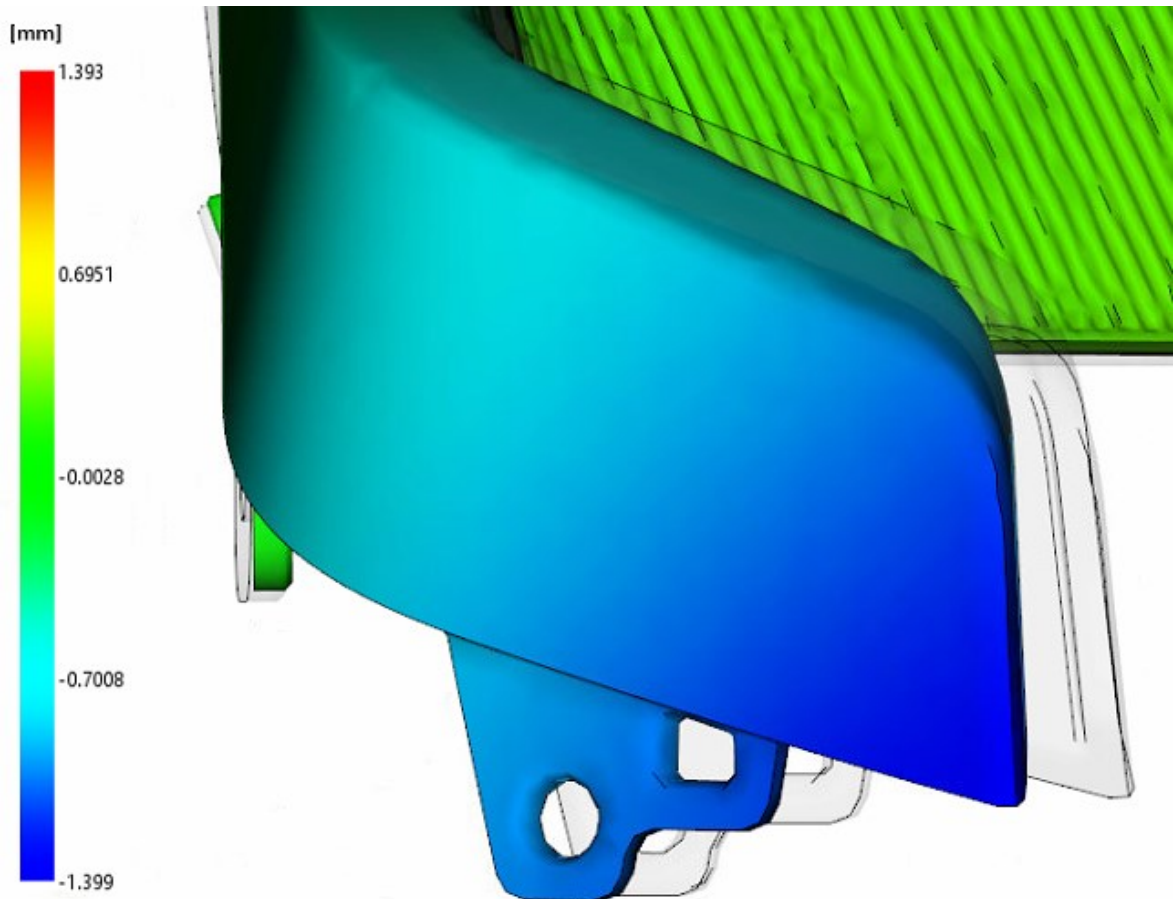
Obrázek 78 Výchozí analýza – Deformace způsobená rozdíly teplot během chlazení

Bližším zkoumáním byla zjištěna rozdílná vnitřní orientace oproti zbytku součásti (obrázek 79). Řetězce jsou zde orientovány podél směru Z. Jak bylo zmíněno výše, materiál má významně větší smrštění ve směru kolmém na orientaci vláken.



Obrázek 79 Výchozí analýza – Vnitřní orientace, problémová oblast

Toto tvrzení podporuje i výsledek analýzy „Celková deformace vlivem všech efektů ve směru X (Deflection, all effects; X Component)“. Výsledek (obrázek 80, měřítko 5) ukazuje podíl deformace v ose X (1,399 mm) který je výrazně větší než ve zbývajících směrech Y (0,4157) a Z (0,1734 mm).



Obrázek 80 Výchozí analýza – Celková deformace vlivem všech efektů ve směru X

16 OVĚŘENÍ NÁSTROJE PRO POSOUZENÍ SMRŠTĚNÍ

Za účelem ověření funkčnosti Nástroje pro posouzení smrštění byly zpracovány analýzy, u nichž byl vůči výchozí analýze změněn jeden, či dva parametry na základě čehož bylo vyhodnocováno chování smrštění. Vyhodnocení bylo prováděno na základě výsledku „Celková deformace vlivem všech efektů (Deflection, all effects; Deflection)“.

16.1 Nastavení Nástroje pro posouzení smrštění

Zadaný výrobek obsahuje pouze geometrie makroskopických rozměrů. Nástroj byl tedy nastaven na listech „Procesní parametry – Makro“ a „Design“.

Na listu „Procesní parametry – Makro“ byl na základě vstříkovaného materiálu (Apec 1895) nastaven materiál PC. Dále je, z dostupných možností v Nástroji, geometrie výrobku nejlépe vystihnuteľná jako tenkostěnný díl. Nástrojem známé chování dané kombinace je zobrazeno na obrázku 81.

Procesní parametr	Zdroj	Materiál	Geometrie	Tendence smrštění při zvyšování referenční hodnoty
Doba dotlaku [s]	60	PC	Tenkostěnný díl	2
Velikost dotlaku [MPa]	67	PC	Tenkostěnný díl	2
Velikost dotlaku [MPa]	68	PC	Tenkostěnný díl	2
Teplota taveniny [°C]	67	PC	Tenkostěnný díl	1
Teplota formy [°C]	67	PC	Tenkostěnný díl	1
Teplota formy [°C]	68	PC	Tenkostěnný díl	2

Obrázek 81 Nástrojem známé výsledky pro zadanou kombinaci (PP)

Prostřednictvím legendy z Nástroje plynou pro danou kombinaci tvrzení:

1. Na základě zdroje 67 se hodnota smrštění zmenšuje v závislosti na zvyšování teploty taveniny.
2. Na základě zdroje 67 se hodnota smrštění zmenšuje v závislosti na rostoucí teplotě formy.

Pro druhé tvrzení je dostupný další výzkum 68 s výsledkem hodnocení závislosti 2. Dá se tedy předpokládat, že vliv parametru teploty formy nejspíš nebude příliš výrazný.

Na listu „Design“ bylo na základě zadání nastaveno makroskopické rozměrové měřítko a materiál PC. Nástrojem známé chování dané kombinace bylo pro zadaný případ popsáno výše.

16.2 Nárůst teploty formy

Na základě informací z Nástroje byla zvýšena teplota temperačního média a povrchu vstříkovací formy. Změny ve vstupních parametrech a výsledcích analýzy jsou sepsány v tabulce 4.

Tabulka 4 Měněné parametry a vliv na výsledky – nárůst teploty formy

Měněný parametr	Výchozí	Po úpravě
Teplota temperačního média [°C]	115	130
Teplota povrchu formy [°C]	120	135
Vliv na výsledky	Výchozí	Po úpravě
Maximum celkové deformace [mm]	1,576	1,547
Čas dosažení vyhazovací teploty na součásti [s]	62,6	76,48

Z tabulky 4 dle předpokladu vyplývá, že je celková maximální deformace mírně zmenšena o hodnotu 0,029 mm. Naproti tomu byl čas, potřebný k dosažení vyhazovací teploty na součásti, prodloužen o 13,88 s (jedná se o čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty v celém objemu součásti). Bylo by také nutné dodávat více tepelné energie do temperačního média. Ostatní výsledky byly vzájemně srovnány také, jejich rozdíly byly zanedbatelné.

16.3 Nárůst teploty taveniny

Na základě informací z Nástroje byla zvýšena teplota taveniny. Teplota taveniny byla zvolena pod teplotou degradace materiálu, která začíná na 380 °C. Změny ve vstupních parametrech a výsledcích analýzy jsou sepsány v tabulce 5.

Tabulka 5 Měněné parametry a vliv na výsledky – nárůst teploty taveniny

Měněný parametr	Výchozí	Po úpravě
Teplota taveniny [°C]	335	360
Vliv na výsledky	Výchozí	Po úpravě
Maximum celkové deformace [mm]	1,576	1,346
Čas dosažení vyhazovací teploty na součásti [s]	62,60	66,79

Tlak při přepnutí na dotlak [MPa]	95,33	74,30
Uzavírací síla [tuna]	223,8	182,4
Teplota čela taveniny [°C]	338,8	363,4

Z tabulky 5 vyplývá, že došlo k celkovému zlepšení výsledků. Maximum celkové deformace bylo sníženo o 0,23 mm, což je již poměrně výrazné zlepšení. Zmenšil se i potřebný vstříkovací tlak a uzavírací síla, což může vést až k volbě menšího vstříkovacího stroje. Negativním vlivem této změny je prodloužení času potřebného k vyhození výrobku. Tento čas byl prodloužen o 4,19 s. Zda je toto prodloužení vzhledem k výhodám přijatelné, či nikoliv, je relativní.

16.4 Nárůst teploty taveniny do krajní meze

Na základě informací z předchozího pokusu o zlepšení výsledků byla nastavena další analýza. Tato analýza má opět vstupy shodné s výchozí analýzou, pouze byla zvětšena teplota taveniny do krajní přípustné meze. Tato teplota je nižší, než je maximální dovolená teplota taveniny z důvodu zohlednění jevu disipace a bezpečnostní rezervy. Změny ve vstupních parametrech a výsledcích analýzy jsou sepsány v tabulce 6.

Tabulka 6 Měněné parametry a vliv na výsledky – nárůst teploty taveniny do krajní meze

Měněný parametr	Výchozí	Po úpravě
Teplota taveniny [°C]	335	370
Vliv na výsledky	Výchozí	Po úpravě
Maximum celkové deformace [mm]	1,576	1,252
Čas dosažení vyhazovací teploty na součásti [s]	62,60	67,52
Tlak při přepnutí na dotlak [MPa]	95,33	67,11
Uzavírací síla [tuna]	223,8	167,4
Teplota čela taveniny [°C]	338,8	373,1

Dle očekávání došlo k dalšímu zlepšení výsledků analýzy. Maximální celková deformace byla snížena oproti výchozí analýze o 0,324 mm. Tento výsledek potvrzuje trend naznačený Nástrojem.

16.5 Pokles teploty formy

Na základě informací z předchozí změny byl zvolen pokus o opačný případ. Teplota temperačního média a povrchu vstříkovací formy byla snížena za účelem zkrácení času

dosažení vyhazovací teploty na součásti. Zkrácení této doby vede k úsporám času celého vstřikovacího cyklu, což má (obzvláště v případě velkosériové výroby) za důsledek další úspory. Změny ve vstupních parametrech a výsledcích analýzy jsou sepsány v tabulce 7.

Tabulka 7 Měněné parametry a vliv na výsledky – pokles teploty formy

Měněný parametr	Výchozí	Po úpravě
Teplota temperačního média [°C]	115	90
Teplota povrchu formy [°C]	120	95
Vliv na výsledky	Výchozí	Po úpravě
Maximum celkové deformace [mm]	1,576	1,656
Čas dosažení vyhazovací teploty na součásti [s]	62,6	50,36

Výsledky, zobrazené v tabulce x, potvrzují předpoklad daný Nástrojem. Čas potřebný k ochlazení součásti na vyhazovací teplotu byl zkrácen o 12,24 s. Naproti tomu se však zvětšilo maximum celkové deformace o 0,08 mm. Vyhodnocení je pak na individuálním posouzení jednotlivých případů.

16.6 Diskuze výsledků

Na základě informací z Nástroje potvrzených výsledky analýz je doporučeno pro materiál Apec 1895 a zadanou geometrii součásti nastavit vyšší teplotu taveniny. Tato úprava může snížit hodnotu smrštění až o 0,324 mm změnou teploty z 335 na 370 °C. Výsledek kopíruje informaci z Nástroje. Snížení smrštění je doprovázeno dalšími pozitivními vlivy, jako je snížení potřebného vstřikovacího tlaku, uzavírací síly a další. Naproti tomu dochází k mírnému prodloužení času potřebného k ochlazení součásti na vyhazovací teplotu.

Dále Nástroj poskytl informaci o potenciálním snižování hodnoty smrštění se zvyšující se teplotou vstřikovací formy. V nástroji byly obsaženy dvě studie, z nichž jedna toto tvrzení podporuje a druhá je neprůkazná. Výsledný předpoklad tedy byl, že snížení smrštění nebude výrazné. Tento předpoklad byl potvrzen. Zvýšením teploty ze 120 na 135 °C bylo dosaženo snížení hodnoty smrštění o 0,029 mm za nepříznivých doprovodných změn ostatních výsledků.

Tendence závislosti velikosti smrštění byla prokázána i opačným směrem, tedy poklesem teploty formy. V tomto případě došlo k poměrně výraznému zkrácení doby

potřebné k ochlazení součásti na vyhazovací teplotu o 12,24 s za cenu zvětšení maxima celkové deformace o 0,08 mm.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout Nástroj, který by pomohl snížit hodnotu deformace způsobené smrštěním. Následně navrhnout vstříkovací formu na zadanou geometrii součásti a prostřednictvím analýz vyzkoušet funkčnost Nástroje.

Na základě poznatků získaných při vypracovávání teoretické části této diplomové práce byl navržen Nástroj pro posouzení smrštění v aplikaci Microsoft Excel. Tento Nástroj bude sloužit jako základní zdroj informací při posuzování faktorů ovlivňujících smrštění, bude dále aktualizován a doplňován o nové poznatky a je jednoduše převeditelný do podoby samostatné aplikace.

Za účelem ověření funkčnosti Nástroje byla navržena vstříkovací forma pro výrobu zadané geometrie součásti. Vstříkovací forma byla navržena včetně vtokového, temperačního a vyhazovacího systému tak, aby mohly být informace z Nástroje vyzkoušeny na kompletní analýze. Při návrhu byla zohledněna i vyrobitelnost vstříkovací formy a návrh byl také doplněn o prvky usnadňující logistiku.

Pro návrh vstříkovací formy byla zpracována výchozí analýza. Vstupní hodnoty výchozí analýzy byly upraveny tak, aby analýza simulovala funkční vstříkovací proces.

Nakonec byly vyhotoveny analýzy vycházející z výchozí analýzy, u nichž byl zpravidla změněn jeden vstupní parametr na základě informací z Nástroje. Výsledky těchto analýz byly srovnávány s výchozí analýzou nejen z pohledu maximálního celkového smrštění, ale i dalších výsledků potenciálně ovlivňujících konečné rozhodnutí o uplatnění daných změn vstupních parametrů.

Analýzy pro zadanou geometrii součásti prokázaly platnost informací z Nástroje v teoretické rovině. Následovat by měli zkoušky dalších geometrií a materiálů doprovázené praktickým ověřením.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Rutland plastic limited: *Plastic Injection Moulding Machine*. Rutland plastic limited [online]. 2013 [cit. 15.03.2022]. Dostupné z: http://www.rutlandplastics.co.uk/advice/moulding_machine.htm
- [2] *Technologie výroby plastového držáku střešního nosiče*; Ing. Lukáš Nevřivý (2015–93069) – VUT. Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright © 2022 VUT [cit. 18.03.2022]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace?zp_id=93069
- [3] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů II. díl – Vstřikování termoplastů*. 1. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999. 214 s.
- [4] MENGES, Georg., MICHAELLI, Walter., MOHREN, Paul. *How to Make Injection Molds. 3rd. ed.* Munich: Hanser Publisher, 2001. 612 s. ISBN 3-446-21256-6.
- [5] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování*. Brno: Code Creator, s.r.o., 2016. ISBN 978-80-88058-74-8.
- [6] Pařenica, Martin, 2017 *Konstrukce vstřikovací formy pro plastový díl obal CD*. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 03.05.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/35855359-Konstrukce-vstrikovaci-formy-pro-plastovy-dil-obal-cd-martin-parenica.html>
- [7] *HORKÉ VTOKY: Plastové díly* [online], 2004. 12 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Horke_vtoky.pdf
- [8] BOBEK, Jiří V.: *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. Brno: Code Creator, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-88058-65-6.
- [9] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů – teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [10] MEUSBURGER [online]. [cit. 2018-2-18]. Dostupný z: <https://ecom.meusburger.com/files/pdf/e/e2100.pdf>
- [11] MOULD TECHNOLOGY [online]. [cit. 2018-2-23]. Dostupný z: <http://mouldtechnology.blogspot.com/2007/11/when-need-slider-parts.html>

- [12] ARBURG [online]. [cit. 2018-2-16]. Dostupné z: <https://www.aburg.com/cs/cz/spektrum-sluzeb/vstrikovani/vstrikovaci-stroje/>
- [13] KREBS, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8
- [14] VRÁNA, Petr. Technologie výroby plastového dílce světloometu automobilu [online]. Brno, 2014 [cit. 02.02.2022]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32058>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Bohumil Kandus.
- [15] (PDF) *As-molded shrinkage on industrial polypropylene injection molded parts: Experiments and analysis* | Vito Speranza and Roberto Pantani - Academia.edu. Academia.edu - Share research [online]. Copyright ©2022 [cit. 02.02.2022]. Dostupné z: https://www.academia.edu/21046595/As_molded_shrinkage_on_industrial_polypropylene_injection_molded_parts_Experiments_and_analysis
- [16] ŠTĚPEK, J., ZELINGER, J., KUTA, A. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. SNTL, Praha, 1989.
- [17] ČSN EN ISO 294-4, 2003. *Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů: Část 4: Stanovení smrštění*.
- [18] *Smrštění a dodatečné smrštění při vstřikování plastů* [online]. [cit. 08.02.2022]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/smrsteni-a-dodatecne-smrsteni-pri-vstrikovani-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxXa2VafSdbW0/>
- [19] AZDAST, Taher, 2019. *Experimental assessment and optimization of shrinkage behavior of injection molded polycarbonate parts*. IOPscience [online]. © 2019 IOP Publishing [cit. 11.03.2022]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab4b19>
- [20] *Vady výstřiků – 2. díl: Vady tvaru a rozměrové vady* | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum – nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 04. 03. 2022].

- Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-2-dil-vady-tvaru-a-rozmerove-vady>
- [21] MIKULÍK, David. *Technologie injekčního vstřikování termoplastů* [online]. Brno, 2014 [cit. 01. 03. 2022]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/31478>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav chemie materiálů.
- [22] Ya-Jun Xu, Wei Yang, Bang-Hu Xie, Zheng-Ying Liu & Ming-Bo Yang (2009) *Effect of Injection Parameters and Addition of Nanoscale Materials on the Shrinkage of Polypropylene Copolymer*, Journal of Macromolecular Science, Part B, 48:3, 573-586, DOI: 10.1080/00222340902837741
- [23] Olaf Zoellner -Chupagem. Share and Discover Knowledge – DOKUMEN.TIPS [online]. Copyright © Meyer Nitu Teuber Z [cit. 08. 03. 2022]. Dostupné z: <https://dokumen.tips/documents/olaf-zoellner-chupagem.html>
- [24] [ZEMAN, L.: *Vstřikování plastů. 1. vydání*. Praha: BEN – technická literatura, 2009. 248s. ISBN 978-80-7300-250-3
- [25] ŠOLTÝS, Jan, 2013. *Rozbor vlivu technologických parametrů vstřikování a druhu plastu na deformace jednoduchých konstrukcí dílů*. Liberec. Bakalářská práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Vedoucí práce Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.
- [26] TECHNIK, Jiří, 2007. *Analýza a optimalizace chlazení vstřikovacích forem*. Liberec. Diplomová práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Vedoucí práce Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.
- [27] Viana, J. C.: *Structural interpretation of the strain-rate, temperature and morphology dependence of the yield stress of injection molded semicrystalline polymers*. Polymer, Vol. 46, Issue 25, 2005.
- [28] Obrázek 100: Vztah mezi průměrem šneku a maximálním doporučeným zpracovávaným materiálu. [online]. [cit. 7. 5. 2014]. Převzato a upraveno z <http://any-book.org/download/16915.html>
- [29] D. Annicchiarico and J. R. Alcock, *Review of Factors that Affect Shrinkage of Molded Part in Injection Molding, Materials and Manufacturing Processes*, 29, 2014, pp. 662-682.

- [30] KREBS J; SOVA M. *Termoplasty v praxi: praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů*. 5. aktualizované vydání. Praha: Verlag Dashofer, 1999-2000
- [31] What is CATIA | Learn the Concepts and Advantages of CATIA. *Best Online Training & Video Courses* | eduCBA [online]. Copyright © 2022 [cit. 15.03.2022]. Dostupné z: <https://www.educba.com/what-is-catia/>
- [32] Arcance systems: Autodesk Moldflow [online], 2022. Nizozemsko: Arcance systems [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.arkance-systems.cz/produkty/cad-cam-pro-strojirenstvi/autodesk-moldflow>
- [33] MICROSOFT EXCEL 2016 ESSENTIALS: FORMULAS AND FUNCTIONS [online], 2022. Severní Amerika: Skillsoft [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www2.skillsoft.com/certificates/microsoft-excel-2016-essentials-formulas-and-functions/>
- [34] Plastics: APEC 1895 [online], 2021. Covestro [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: https://solutions.covestro.com/es/products/apec/apec-1895_56968915-00009063?SelectedCountry=US
- [35] Technical Datasheet: APEC 1895 [online], 2021. Omnexus [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/product/t-covestro-apec-1895>
- [36] Prodej použitých strojů – strojní a průmyslové vybavení – Exapro [online]. Copyright ©2004 [cit. 26.04.2022]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/arburg-a-630-s-2500-800-multilift-v-p210625028/#prettyPhoto>
- [37] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů*. Nakladatelství BEN, 2009 ISBN 80-7300-026-1
- [38] F. de Santis, R. Pantani; V., Speranza, G. Titomanlio, *Analysis of Shrinkage Development of a Semicrystalline Polymer during Injection Molding*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010. 5(49), pp. 2469–2476.
- [39] KRMAŠ, Antonín, 2006. Vliv talku, teploty formy a tepelného zatížení výstřiku na jeho smrštění. Liberec. Diplomová práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Vedoucí práce Ing. Luboš Běhálek.
- [40] BILER, Michal, 2014. *Návrh a výroba vstřikovací formy*. Ostrava. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Dr. Ing. Jaroslav Melecký.

- [41] Gabriel, K. J.; Ed. Engineering Microscopic Machines, 150th Anniversary Issue, Scientific American: Technology in the 21st Century Scientific American: New York, 1995.
- [42] Micro Engineering Solutions, MICROMOLDING – The Growth Market for Injection Molders in the Near Future. http://www.microengineeringsolutions.com/mes_news_events/micromolding-the-growth-market-for-injection-molders-in-the-near-future/ (accessed June 2013).
- [43] GIA. Metal and Ceramic Injection Molding; San Jose, CA: Global Industry Analysts, Inc., 2011.
- [44] Anonymous. Shrinkage and Warpage. http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/process/physics/b3500001.htm (accessed September 2013).
- [45] Anonymous. Molding Sink Mark and Void. <http://viewmold.com/injection%20mold%20management/Injection%20molding%20defects/Molding%20sink%20mark%20and%20void.html> (accessed December 2013).
- [46] Anonymous. Kinetics – MIM Design Guide. <http://www.kinetics.com/guide/> (accessed December 2013).
- [47] Shen , C.; Wang, L.; Cao, W.; Qian , L. Investigation of the effect of molding variables on sink marks of plastic injection molded parts using Taguchi DOE technique . Polymer-Plastics Technology and Engineering 2007, 43 (3), 219–225.
- [48] Fischer, J. M. Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage – Determination of Shrinkage; Beckley, B., Ed., Plastics Design Library/William Andrew Pub.: Norwich, NY, 2003; p. 10.
- [49] Stan, D.; Tulcan, A.; Tulcan, L.; Iclanzan, T. Influence factors on the dimensional accuracy of the plastic parts. Materiale Plastice 2008, 45 (1), 119–124.
- [50] Liu, F.; Zeng, S.; Zhou, H.; Li, J. A study on the distinguishing responses of shrinkage and warpage to processing conditions in injection molding. Journal of Applied Polymer Science 2012, 125 (1), 731–744.
- [51] Annicchiarico, D.; Attia, U. M.; Alcock, J. R. A methodology for shrinkage measurements in micro-injection moulding . Polymer Testing 2013, 32, 769–777.

- [52] Wang, J.; Die, P.; Yang, W.; Ding, Y. Online pressure-volume-temperature measurements of polypropylene using a testing mold to simulate the injection-molding process. *Journal of Applied Polymer Science* 2010, 118 (1), 200 – 208.
- [53] Wang, Y. PVT Properties of Polymers for Injection Molding. http://cdn.intechopen.com/pdfs/33643/InTech-Pvt_properties_of_polymers_for_injection_molding.pdf (access February 15, 2013).
- [54] Kate, K.H. ; Onbattuvelli, V.P. ; Enneti, R.K. ; Lee, S.K. ; Park, S.J. ; Atre, S. V. Measurements of powder–polymer mixture properties and their use in powder injection molding simulations for aluminum nitride. *JOM* 2012, 64 (9), 1048 – 1058.
- [55] Azdast , T.; Behravesch , A. H.; Mazaheri , K.; Darvishi , M. M. Numerical simulation and experimental validation of residual stress induced constrained shrinkage of injection molded parts . *Polymery* 2008, 53 (5), 304 – 310.
- [56] Chang, R. Y. C. H.; Chen, C. H.; Su, K. S. Modifying the Tait equation with cooling-rate effects to predict the pressure-volume-temperature behaviors of amorphous polymers: modeling and experiments . *Polymer Engineering & Science* 1996, 36 (5), 1789 – 1795.
- [57] Kirchberg, S. Simulation and injection molding of ring-shaped polymer bonded nickel braze metal composite preforms based on rheological and thermal analyses . *Open Journal of Composite Materials* 2013, 3, 24 – 29.
- [58] Sin , L.T. ; Rahman , W. A. W. A. ; Rahmat , A.R. ; Ting Tee , T. ; Bee, S.T. ; Yu, L.C. Computer aided injection moulding process analysis of polyvinyl alcohol–starch green biodegradable polymer compound . *Journal of Manufacturing Processes* 2012 , 14 , 8 – 19 .
- [59] Zuidema , H.; Peters, G.W.M.; Meijer , H.E.H. Influence of cooling rate on pVT-data of semicrystalline polymers . *Journal of Applied Polymer Science* 2001 , 82 (5), 1170 – 1186.
- [60] Ahn , S.; Chung , S. T. ; Park , S.J. ; German, R. M. Modeling and simulation of metal powder injection molding . In *ASM Handbook* , vol. 22B – Metal Process Simulation, ASM International: Materials Park, OH, USA, 2010; pp. 343–357.
- [61] Lenz, J.; Enneti , R. K. ; Park, S.; Atre , S. V. Powder injection molding process design for UAV engine components using nanoscale silicon nitride powders . *Ceramics International* 2014, 40 (1 Part A), 898 – 900 .

- [62] Lenz , J. ; Enneti , R.K. ; Onbattuvelli , V.P. ; Kate , K.H. ; Martin , R. ; Atre , S.V. Powder injection molding of ceramic engine components for transportation . JOM 2012 , 64 (3), 388 – 392 .
- [63] Lee , D.J. ; Kim , M.W. ; Kim , S.Y. ; Lee , S.H. ; Youn , J.R. Three dimensional flow simulation and structural analysis on stiffness of fiber reinforced anisotropic parts . Korea-Australia Rheology Journal 2010 , 22 (2), 95 – 103 .
- [64] Greene , C.D. ; Heaney , D.F. The PVT effect on the final sintered dimensions of powder injection molded components . Materials and Design 2007 , 28 , 95 – 100 .
- [65] Kate , K.H. ; Enneti , R.K. ; Onbattuvelli , V.P. ; Atre , S.V. Feedstock properties and injection molding simulations of bimodal mixtures of nanoscale and microscale aluminum nitride . Ceramics International 2013 , 39 , 6887 – 6897 .
- [66] Tan , H. ; Yu , Y. ; Xing , L. ; Zhao , L. ; Sun , H. Density and shrinkage of injection molded impact polypropylene copolymer/coir fiber composites . Polymer – Plastics Technology and Engineering 2013 , 52 (3), 257 – 260 .
- [67] Isayev , A.I. ; Kwon , K. ; Kim , K.H. Anisotropic shrinkage in injection molding of various polyesters. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 3, Charlotte, NC, USA, May 7–11 2006; pp. 1190.
- [68] Chang , Y. ; Liu , C.S. ; Huang , S.T. ; Huang , C. ; Chen , M. ; Yang , W. Dynamic property of the frozen-layer and its effects on warpage in injection molded parts. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 5, Chicago, IL, USA, June 22–24 2009; p. 2905.
- [69] Giroud , T. ; Vincent , M. Evaluation of residual stresses in short fiber reinforced thermoplastic molded parts . Mecanique et Industries 2004 , 5 (4), 481 – 487 .
- [70] Shen , C. ; Kramschuster , A. ; Ermer , D. ; Turng , L. Study of shrinkage and warpage in microcellular co-injection molding . International Polymer Processing 2006 , 21 (4), 393 – 401 .
- [71] Sepe , M. Dimensional stability after molding – Part 2 . Plastics Technology 2013 , 59 (2), 17 – 19 .
- [72] De Santis , F. ; Pantani , R. ; Speranza , V. ; Titomanlio , G. Analysis of shrinkage development of a semicrystalline polymer during injection moulding . Industrial & Engineering Chemistry Research 2010 , 49 , 2469 – 2476 .

- [73] Greene , C.D. ; Heaney , D.F. The PVT effect on final sintered MIM components. In Annual Technical Conference–ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 1, Chicago, IL, USA, May 16–20 2004, p. 713.
- [74] Yao , D. ; Kim , B. Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials . Journal of Micromechanics and Microengineering 2002 , 12 (5), 604 – 610 .
- [75] Chang , T.C. ; Faison , E. A study of the effect of process conditions on the shrinkage of plastic parts in injection molding by the Taguchi method . Polymer Engineering & Science May 2001 , 41 (5), 703 – 710 .
- [76] Yang , S.Y. ; Huang , C.K. ; Lin , B.C. ; Wei , W.C.J. Kneading and molding of ceramic microparts by precision powder injection molding (PIM) . Journal of Applied Polymer Science 2006 , 100 (2), 892 – 899 .
- [77] Huang , C.K. ; Chiu , S.W. Formability and accuracy of micropolymer compound with added nanomaterials in microinjection molding . Journal of Applied Polymer Science 2005 , 98 (5), 1865 – 1874 .
- [78] Zhang , J. ; Huang , B. ; Li , Y. ; Li , S. Influence of microcrystalline wax on properties of MIM multi-component wax matrix binder . Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering 2004 , 33 (10), 1084 – 1088 .
- [79] Amin , S.Y.M. ; Jamaludin , K.R. ; Muhamad , N. Rheological properties of SS316L MIM feedstock prepared with different particle sizes and powder loadings . The Institution of Engineers, Malaysia 2009 , 71 (2), 59 – 63 .
- [80] Zauner , R. ; Binet , C. ; Heaney , D.F. ; Piemme , J. Variability of feedstock viscosity and its correlation with dimensional variability of green powder injection moulded components . Powder Metallurgy 2004 , 47 (2), 151 – 156 .
- [81] Fanghui , L. ; Chao , G. ; Xian , W. ; Xinyuan , Q. ; Hong , L. ; Jie , Z. Morphological comparison of isotactic polypropylene parts prepared by micro-injection molding and conventional injection moulding . Polymers for Advanced Technologies 2012 , 23 , 686 – 694 .
- [82] Jingsong , C. ; Hrymak , A. ; Kamal , M. R. Microstructural characteristics of micro-injection molded thermoplastics. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 4, Cincinnati, OH, USA, May 6–11 2007; pp. 1973.

- [83] Giboz , J. ; Copponnex , T. ; Mélé , P. Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review . *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2007 , 17 (6), R96 – R109 .
- [84] Chu , J. ; Kamal , M.R. ; Derdouri , S. ; Hrymak , A. Effects of processing conditions on mechanical properties and crystallinity of micro injection molded thermoplastics. In *Technical Papers, Regional Technical Conference – Society of Plastics Engineers, Vol. 4, Milwaukee, WI, USA, May 4–8 2008*; p. 2451.
- [85] Injection Moulding Process. http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/3400/8/08_chapter%202.pdf (accessed June 2013).
- [86] Autronic Plastic , I. Glossary of Plastic Injection Moulding. http://www.apisolution.com/images/glossary_plastic_injection_moulding_engineering_manufacturing.pdf (accessed January 2013).
- [87] Azdast , T. ; Behraves , A.H. An analytical study of constrained shrinkage of injection molded semi-crystalline plastic parts . *Polymer – Plastics Technology and Engineering* 2008 , 47 (12), 1265 – 1272 .
- [88] Chen , C.-A. ; Chang , S. Shrinkage analysis on convex shell by injection molding . *International Polymer Processing* 2008 , 23 (1), 65 – 71 .
- [89] Mehat , N.M. ; Kamaruddin , S. ; Othman , A.R. A study of hybrid optimization of injection moulding process parameters for plastic gear . *Advanced Materials Research* 2012 , 591–593 , 2135 – 2138 .
- [90] Elleithy , R. ; Ali , I. ; Al-Haj Ali , M. ; Al-Zahrani , S.M. Different factors affecting the mechanical and thermo-mechanical properties of HDPE reinforced with micro-CaCO₃ . *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2011 , 30 (9), 769 – 780 .
- [91] Xu , Y. ; Yang , W. ; Xie , B. ; Liu , Z. ; Yang , M. Effect of injection parameters and addition of nanoscale materials on the shrinkage of polypropylene copolymer . *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics* 2009 , 48 (3), 573 – 586 .
- [92] Kramschuster , A. ; Cavitt , R. ; Ermer , D. ; Chen , Z. ; Turng , L.S. Quantitative Study of Shrinkage and Warp Behavior for Microcellular and Conventional Injection Molding. <http://www.trexel.com/download/UWisconsinStudy.pdf> (accessed Apr 24, 2013).

- [93] Othman , M.H. ; Shamsudin , S. ; Hasan , S. The effects of parameter settings on shrinkage and warpage in injection molding through cadmould 3D-F simulation and Taguchi method. *Applied Mechanics and Materials* 2012, 229–231, 2536–2540.
- [94] Jayanarayanan , K. ; Karthick , H.S. ; Suganya , V. ; Shivashankari , A.L. ; Bhagawan , S.S. Optimization of process parameters of an injection moulded gear using Taguchi methodology. In *Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 2, 2006*; pp. 1088.
- [95] AlKaabneh , F.A. ; Barghash , M. ; Mishael , I. A combined analytical hierarchical process (AHP) and Taguchi experimental design (TED) for plastic injection molding process settings . *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012 , 1 – 16 .
- [96] Oktem , H. ; Erzurumlu , T. ; Uzman , I. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part . *Materials and Design* 2007 , 28 (4), 1271 – 1278 .
- [97] Kramschuster , A. ; Cavitt , R. ; Ermer , D. ; Chen , Z. ; Turng , L. Warpage comparison between microcellular and conventional injection molding. In *Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 2, Boston, MA, USA, May 1–5 2005*; pp. 151.
- [98] Kramschuster , A. ; Cavitt , R. ; Ermer , D. ; Chen , Z.B. ; Turng , L. Effect of processing conditions on shrinkage and warpage and morphology of injection moulded parts using microcellular injection moulding . *Plastics, Rubber and Composites* 2006 , 35 (5), 198 – 209 .
- [99] Yadav , A.J. ; Dravid , S.V. ; Rajput , V.D. Taguchi technique in optimization of injection molding process parameters for manufacturing plastic parts. In *Proceeding of the NCNTE-2012, Navi Mumbai, Maharashtra, India, February 24–25 2012*.
- [100] Rezavand , S.A.M. ; Behravesht , A.H. An experimental investigation on dimensional stability of injected wax patterns of gas turbine blades . *Journal of Materials Processing Technology* 2007 , 182 , 580 – 587 .
- [101] Luo , T.G. ; Qu , X.H. ; Qin , M.L. ; Ouyang , M.L. Dimension precision of metal injection molded pure tungsten. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2009, 27 (3), 615–620.

- [102] Wu , C. ; Huang , Y. The influence of cavity deformation on the shrinkage and warpage of an injection-molded part . International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2007 , 32 (11–12), 1144 – 1154 .
- [103] Jin , J. ; Yu , H.Y. ; Lv , S. Optimization of plastic injection molding process parameters for thin-wall plastics injection molding . Advanced Materials Research 2009 , 69–70 , 525 – 529 .
- [104] Chiang , K. ; Chang , F. Application of grey-fuzzy logic on the optimal process design of an injection-molded part with a thin shell feature . International Communications in Heat and Mass Transfer 2006 , 33 (1), 94 – 101 .
- [105] Alam , M.M. ; Kumar , D. Reducing shrinkage in plastic injection moulding using Taguchi method in Tata magic head light . International Journal of Science and Research 2013 , 2 (2), 107 – 110 .
- [106] Pontes , A.J. ; Pouzada , A.S. Ejection force in tubular injection moldings. Part I: Effect of processing conditions . Polymer Engineering and Science 2004 , 44 (5), 891 – 897 .
- [107] Passilla , J. ; Zupancic , K. Warpage study on two-shot injection molding. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 10, Boston, MA, USA, May 1–5 2005; pp. 93.
- [108] Koppi , K.A. ; Barger , M.A. ; Chang , D. ; Shields , C. In-mold part shrinkage rate measurement. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 1, Cincinnati, OH, USA, May 6–11 2007; pp. 561.
- [109] Pontes , A.J. ; Oliveira , M.J. ; Pouzada , A.S. The effect of holding pressure on the shrinkage and birefringence of injection moulded polypropylene plates . Materials Science Forum 2004 , 455–456 , 814 – 817 .
- [110] Trejo , M. ; Villablanca , V. ; Sánchez , J.J. ; Morales , R.A. ; Villarroel , S. ; Gordillo , A. Use of linear relationships and simulation to assess the effect of the injection parameters on the dimensions of polypropylene test specimens. In Technical Papers, Regional Technical Conference – Society of Plastics Engineers, Vol. 1, Milwaukee, WI, USA, May 4–8 2008; pp. 445.
- [111] Altan , M. Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods . Materials and Design 2010 , 31 (1), 599 – 604 .
- [112] Othman , M.H. ; Hasan , S. ; Muhammad , W.N.A.W. ; Zakaria , Z. Optimising injection moulding parameter setting in processing polypropylene-clay

- composites through Taguchi method . Applied Mechanics and Materials 2013 , 271 (PART 1), 272 – 276 .
- [113] Kusić , D. ; Kek , T. ; Slabe , J.M. ; Svečko , R. ; Grum , J. The impact of process parameters on test specimen deviations and their correlation with AE signals captured during the injection moulding cycle . Polymer Testing 2013 , 32 (3), 583 – 593 .
- [114] Tseng , W.J. Statistical analysis of process parameters influencing dimensional control in ceramic injection molding . Journal of Materials Processing Technology 1998 , 79 (1–3), 242 – 250 .
- [115] Chen , R. ; Ho , C. ; Fan , H. Shrinkage properties of ceramic injection moulding part with a step-contracted cross-section in the filling direction . Ceramics International 2004 , 30 (6), 991 – 996 .
- [116] Pomerleau , J. ; Sanschagrin , B. Injection molding shrinkage of PP: experimental progress . Polymer Engineering and Science 2006 , 46 (9), 1275 – 1283 .
- [117] Chih , C.C. ; Pao , L.S. ; Yan , C.L. Analysis and modeling of effective parameters for dimension shrinkage variation of injection molded part with thin shell feature using response surface methodology . International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2009 , 45 , 1087 – 1095 .
- [118] Sepe , M. Dimensional stability after molding: Part 1 . Plastics Technology 2013 , 59 (1), 13 – 14 .
- [119] Fernandes , C. ; Pontes , A.J. ; Viana , J.C. ; Gaspar-Cunha , A. Using multiobjective evolutionary algorithms in the optimization of operating conditions of polymer injection molding . Polymer Engineering and Science 2010 , 50 (8), 1667 – 1678 .
- [120] Pontes , A.J. ; Pouzada , A.S. Predicting shrinkage in semi-crystalline injection mouldings – The influence of pressure . Materials Science Forum 2006 , 514–516 (PART 2), 1501 – 1505.
- [121] Bryce, D. M. Injection Moulding Stages. http://www.plastictroubleshooter.com/ThePlasticTroubleshooter/molding_process.htm (accessed June 2013).
- [122] Mulyana , R. ; Daniel , T. ; Min , Y. ; Castro , J.M. ; Lee , L.J. The use of water containing TPO/activated carbon in injection molding. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 2, Orlando, FL, USA, May 16–20 2010; p. 1339.

- [123] Zhang, Z.; Jiang, B. Optimal process design of shrinkage and sink marks in injection molding . Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition 2007, 22 (3), 404 – 407.
- [124] Dangayach , G.S. ; Kumar, D. Reduction in defect rate by Taguchi method in plastic injection molded components . Advanced Materials Research 2012 , 488–489 , 269 – 273 .
- [125] Huang , M.; Hsu , H. Influence of injection moulding and sintering parameters on properties of 316L MIM compact . Powder Metallurgy 2011 , 54 (3), 299 – 307.
- [126] Ozek , C. ; Celik , Y.H. Calculating molding parameters in plastic injection molds with ANN and developing software. Materials and Manufacturing Processes 2012, 27, 160–168.
- [127] Guan , W. ; Huang , H. Effect of backward melt flow on injection-compression molded part thickness distribution. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 2, Boston, MA, USA, May 4–8 2011; pp. 1523.
- [128] Yoshihara , N. Molding shrinkage and warpage for reinforced poly(ethylene terephthalate) . Journal of Polymer Engineering 2008 , 28 (6–7), 449 – 465 .
- [129] Rudolph , N. ; Kühnert , I. ; Ehrenstein , G.W. Compression induced solidification (CIS) – A novel injection molding strategy for high precision parts. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 4, Chicago, IL, USA, June 22–24 2009; pp. 2087.
- [130] Zhang , H. ; Li , M. ; Yang , L. Optimization of packing pressure curve in injection molding based on numerical simulation . Advanced Materials Research 2011 , 221 , 522 – 527 .
- [131] Subramanian , N.R. ; Tingyu , L. ; Seng , Y.A. Optimizing warpage analysis for an optical housing . Mechatronics 2005 , 15 (1), 111 – 127 .
- [132] Huang , H. ; Yang , C. ; Li , K. Effects of process parameters on shrinkage uniformity and birefringence of injection-compression molded parts. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings, Vol. 15, Lake Buena Vista, FL, USA, November 13–19 2009; pp. 193.
- [133] Chang , Y. ; Huang , S.T. ; Huang , S. ; Chen , S. ; Huang , C. ; Chen , M.C. ; Yang , V. Warpage management using three dimensional thickness control method in injection molding. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 4, Chicago, IL, USA, June 22–24 2009; pp. 2429.

- [134] Hussin , R. ; Mohd Saad , R. ; Hussin , R. ; Mohd Dawi , M. An optimization of plastic injection molding parameters using Taguchi optimization method. *Asian Transaction of Engineering – ATE* ISSN: 2221–4267 2012, 2 (5), 75–80.
- [135] Huang , H. ; Li , K. ; Li , S. Effects of processing parameters on shrinkage uniformity of injection-compression molded part. In *Technical Papers, Regional Technical Conference – Society of Plastics Engineers, Vol. 1, Milwaukee, WI, USA, May 4–8 2008*; pp. 400.
- [136] Huang , H. ; Li , K. ; Li , S. Injection-compression molded part shrinkage uniformity comparison between semicrystalline and amorphous plastics . *Polymer – Plastics Technology and Engineering* 2009 , 48 (1), 64 – 68 .
- [137] Chen , C. ; Su , P. ; Lin , Y. Analysis and modeling of effective parameters for dimension shrinkage variation of injection molded part with thin shell feature using response surface methodology . *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009 , 45 (11–12), 1087 – 1095 .
- [138] Rajalingam , S. ; Bono , A. ; Sulaiman , J. Determining Optimal Moulding Process Parameters by Two Level Factorial Design with Center Point. <http://www.sljol.info/index.php/SLJASStats/article/view/4968> (accessed April 24, 2013).
- [139] Prashantha , K. ; Soulestin , J. ; Lacrampe , M.F. ; Lafranche , E. ; Krawczak , P. ; Dupin , G. ; Claes , M. Taguchi analysis of shrinkage and warpage of injection-moulded polypropylene/multiwall carbon nanotubes nanocomposites . *eXpress Polymer Letters* 2009 , 3 (10), 630 – 638 .
- [140] Liang , J. ; Qi , W. ; Li , Y. ; Liu , C. Microcellular injection molding process for car instrument panel . *Gaofenzi Cailiao Kexue Yu Gongcheng/Polymeric Materials Science and Engineering* 2008 , 24 (3), 113 – 117 .
- [141] Hwang , S. ; Hsu , P.P. ; Chiang , C. Shrinkage study of textile roller molded by the microcellular injection process. In *Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 2, Cincinnati, OH, USA, May 6–11 2007*; p. 737.
- [142] Liu , Y. ; Song , M.C. ; Wang , M.J. ; Zhang , C.Z. Quality defects and analysis of the microfluidic chip injection molding . *Materials Science Forum* 2009 , 628–629 , 417 – 422 .
- [143] Xie , L. ; Shen , L. ; Jiang , B. Modelling and Simulation for Micro-Injection Molding Process. <http://cdn.intechopen.com/pdfs/16394/InTech->

- Modelling_and_simulation_for_micro_injection_molding_process.pdf (accessed July 2013).
- [144] Thakur , V. ; Angstadt , D.C. Influence of temperature on micro-feature replication at ambient pressure in micro-molding. In Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 5, Cincinnati, OH, USA, May 6–11 2007; p. 2936.
- [145] Ong , N.S. ; Zhang , H. ; Woo , W.H. Plastic injection molding of high-aspect ratio micro-rods . *Materials and Manufacturing Processes* 2006 , 21 (8), 824 – 831 .
- [146] Huang , C.K. ; Chiu , S.W. Formability and accuracy of micropolymer compound with added nanomaterials in microinjection molding . *Journal of Applied Polymer Science* 2005 , 98 (5), 1865 – 1874 .
- [147] Lee , J.L. ; Ho , C.H. ; Lin , Y. ; Shen , Y.K. Fabrication and detection for the skeletons of micro aerial vehicle using precision injection molding . *Key Engineering Materials* 2010 , 443 , 75 – 80 .
- [148] Wang , J. ; Yang , W. Numerical simulation of shrinkage in the microinjection molding of multi-microparts produced in one mold . *Advanced Materials Research* 2011 , 221 , 649 – 656 .
- [149] Wen , J. ; Wen , P. Simulation and optimization of aspheric plastic lens injection molding . *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition* 2005 , 20 (2), 86 – 89 .
- [150] Shen , Y.K. ; Wu , W.Y. An analysis of the three-dimensional micro injection moulding . *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 2002 , 29 (3), 423 – 431 .
- [151] Shaa , B. ; Dimova , S. ; Griffithsa , C. ; Packianather , M.S. Investigation of micro-injection moulding: Factors affecting the replication quality . *Journal of Materials Processing Technology* 2007 , 12 , 284 – 296 .
- [152] Chen , C. ; Chen , S. ; Liao , W. ; Chien , R. ; Lin , S. Micro injection molding of a micro-fluidic platform . *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2010 , 37 (9), 1290 – 1294 .
- [153] Berger , G.R. ; Gruber , D.P. ; Friesenbichler , W. ; Teichert , C. ; Burgsteiner , M. Replication of stochastic and geometric micro structures – Aspects of visual appearance . *International Polymer Processing* 2011 , 26 (3), 313 – 322 .

- [154] Fu , G. ; Loh , N.H. ; Tor , S.B. ; Murakoshi , Y. ; Maeda , R. Replication of metal microstructures by micro powder injection molding . *Materials & Design* 2004 , 25 (8), 729 – 733 .
- [155] Chien , R.-D. Micromolding of biochip devices designed with microchannels . *Sensors and Actuators A: Physical* 2006 , 128 (2), 238 – 247 .
- [156] Angelov , A.K. ; Coulter , J.P. The development and characterization of polymer microinjection molded gratings . *Polymer Engineering and Science* 2008 , 48 (11), 2169 – 2177 .
- [157] Chen , C. ; Lin Su , P. ; Chiou , C. ; Chiang , K. Experimental investigation of designed parameters on dimension shrinkage of injection molded thin-wall part by integrated response surface methodology and genetic algorithm: a case study . *Materials and Manufacturing Processes* 2011 , 26 , 534 – 540 .
- [158] Beck , M. ; Piotter , V. ; Ruprecht , R. ; Haußelt , J. Dimensional tolerances of micro precision parts made by ceramic injection moulding . In Menz , W. , Dimov , S. , Fillon , B. , Eds.; *4M 2006 – Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture* ; Elsevier : Oxford , 2006 ; 135 – 138 .
- [159] Thakur , V. ; Mosaddegh , P. ; Angstadt , D.C. Micro-feature replication via polymer molding at ambient pressure. In *Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference 2007, MSEC2007, Atlanta, GA, USA, October 15–18 2007*; p. 171.
- [160] Tay , B.Y. ; Liu , L. ; Loh , N.H. ; Tor , S.B. ; Murakoshi , Y. ; Maeda , R. Injection molding of 3D microstructures by μ pIM . *Microsystem Technologies* 2005 , 11 (2–3), 210 – 213 .
- [161] Sotomayor , M.E. ; Várez , A. ; Levenfeld , B. Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316L powder injection moulding feedstocks. *Powder Technology* 2010, 200 (1–2), 30–36.
- [162] Shaw , H.M. ; Edirisinghe , M.J. Shrinkage and particle packing during removal of organic vehicle from ceramic injection mouldings . *Journal of the European Ceramic Society* 1995 , 15 , 109 – 116 .
- [163] Nian , S.C. ; Yang , S.Y. Molding of thin sheets using impact micro-injection molding . *International Polymer Processing* 2005 , 20 (4), 441 – 448 .
- [164] Surace , R. ; Trotta , G. ; Bellantone , V. ; Fassi , I. The Micro Injection Moulding Process for Polymeric Components Manufacturing. <http://cdn.intechopen.com/pdfs/34671/InTech->

- The_micro_injection_moulding_process_for_polymeric_components_manufacturing.pdf (accessed February 8, 2013).
- [165] Zhao , J. ; Mayes , R.H. ; Chen , G. ; Xie , H. ; Chan , P.S. Effects of process parameters on the micro molding process . *Polymer Engineering and Science* 2003 , 43 (9), 1542 – 1554 .
- [166] Plastic Engineering Company. PLENCO Processing Guide. http://www.plenco.com/plenco_processing_guide/Sect%204%20Injection%20Molding.pdf (accessed June 2013).
- [167] Lee , B. ; Hwang , C.J. ; Kim , D.S. ; Kwon , T.H. Replication quality of flow-through microfilters in microfluidic lab-on-a-chip for blood typing by microinjection molding . *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* 2008 , 130 (2), 1 – 8 .
- [168] Amaranan , S. ; Manonukul , A. Aspect ratio of green MIM parts on shrinkage during sintering. In *The Minerals, Metals and Materials Society – 3rd International Conference on Processing Materials for Properties 2008, PMP III, Vol. 2, Bangkok, Thailand, December 7–10 2009*; pp. 880.
- [169] Kabanemi , K.K. ; Vaillancourt , H. ; Wang , H. ; Salloum , G. Residual stresses, shrinkage, and warpage of complex injection molded products: Numerical simulation and experimental validation . *Polymer Engineering & Science* 1998 , 38 (1), 21 – 37 .
- [170] Song , M. ; Jing , X. ; Zhao , D. Experimental research on injection molding shrinkage characteristics of plastic parts . *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering* 2006 , 17 (SUPPL.), 180 – 182 .
- [171] Othman , M.H. ; Hassan , S. ; Ibrahim , S.Z. ; Li , L. The effects of mould design on shrinkage and warpage of polypropylene integral hinges. In *3rd International Conference on Trends in Mechanical and Industrial Engineering (ICTMIE 2013), Kuala Lumpur (Malaysia), January 8–9, 2013*.
- [172] Chen , S. ; Chang , Y. ; Hsu , P. ; Huang , S. ; Chang , Y. ; Huang , C. Simulation on the part warpage and photoelastic stress when molding discontinuous-thickness-variation parts combined with differential mold cooling. In *Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 2, Boston, MA, USA, December 7–10 2011*; pp. 1740.

- [173] Park , H. ; Dang , X. Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold . International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 2010 , 11 (6), 879 – 890 .
- [174] Harris , R.A. ; Newlyn , H.A. ; Hague , R.J.M. ; Dickens , P.M. Part shrinkage anomalies from stereolithography injection mould tooling . International Journal of Machine Tools and Manufacture 2003 , 43 (9), 879 – 887 .
- [175] Vasco , J.C. ; Selada , A. ; Neves , T. ; Pouzada , A.S. A Study on the Mouldability of POM Micro Details in Moulding Blocks Using Micro Manufacturing Technologies, 2010. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/20365/1/Vasco%20JC%202010.pdf> (accessed June 2013).
- [176] Erzurumlu , T. ; Ozcelik , B. Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method . Materials and Design 2006 , 27 (10), 853 – 861 .
- [177] Anonymous, Center for Nanoscale Science and Technology – Fluctuations and Nanoscale Control. http://www.nist.gov/cnst/nrg/nano_control.cfm (accessed August 2013).

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Vstřikovací stroj [1]	11
Obrázek 2 Šnek vytlačovacího stroje [2]	12
Obrázek 3 Vstřikovací cyklus [3]	13
Obrázek 4 Základní typy vstřikovacích forem [4]	14
Obrázek 5 Základní uspořádání vstřikovací formy [6]	15
Obrázek 6 Schéma studeného vtokového systému [5]	16
Obrázek 7 Sestava rozvodného bloku s uzavírací jehlou [7]	16
Obrázek 8 Srovnání řešení trysek s vnitřním a vnějším vytápěním [8]	17
Obrázek 9 Temperační přepážka a spirála [10]	18
Obrázek 10 Typy vyhazovacích kolíků [11]	19
Obrázek 11 Princip bočního odformování [12]	19
Obrázek 12 Průběh smrštění [14]	23
Obrázek 13 Vliv teploty formy na průběh smrštění [16]	23
Obrázek 14 Závislost smrštění na době dotlaku [16]	27
Obrázek 15 Závislost smrštění na velikosti dotlaku [13]	28
Obrázek 16 Závislost smrštění na teplotě stěny vstřikovací formy [24]	29
Obrázek 17 Závislost smrštění na teplotě taveniny [25]	30
Obrázek 18 Závislost smrštění na vstřikovací rychlosti [25]	30
Obrázek 19 Závislost smrštění na vyhazovací teplotě [25]	31
Obrázek 20 Deformace vlivem rozdílných teplot [26]	32
Obrázek 21 Závislost smrštění na tloušťce stěny výrobku [27]	33
Obrázek 22 Redukovaná tloušťka stěny na konci dráhy vstřikovaného výrobku [28]	34
Obrázek 23 Znázornění zborcení žebra [23]	35
Obrázek 24 Doporučený design pro modifikovaný tunelový vtok [23]	36
Obrázek 25 pvT diagramy amorfního (vlevo) a semikrystalického (vpravo) polymeru [30]	38
Obrázek 26 Fotografie držáku senzoru parkovacího radaru	40
Obrázek 27 Určení smrštění – Čas plnění	40
Obrázek 28 Určení smrštění – Celková deformace	41
Obrázek 29 Určení smrštění – Celková deformace, detail, měřítko 1	42
Obrázek 30 Určení smrštění – Celková deformace, detail, měřítko 5	42
Obrázek 31 Určení smrštění – Výchozí nastavení koeficientu kompenzace smrštění	43
Obrázek 32 Určení smrštění – Automatické nastavení koeficientu kompenzace smrštění	44

Obrázek 33 Určení smrštění – Celková deformace, detail, automatická kompenzace, měřítko 5	45
Obrázek 34 Určení smrštění – Celková deformace, detail, izotropní kompenzace, měřítko 5	46
Obrázek 35 Určení smrštění – Celková deformace, detail, anizotropní kompenzace, měřítko 5	46
Obrázek 36 Ukázka nástroje (PP) – vyfiltrování materiálu	53
Obrázek 37 Ukázka nástroje (PP) – vyfiltrování geometrie	53
Obrázek 38 Ukázka nástroje (PP) – vyfiltrované experimenty	54
Obrázek 39 Ukázka nástroje (PP) – legenda	54
Obrázek 40 Ukázka nástroje (D) – vyfiltrované experimenty	55
Obrázek 41 Ukázka nástroje (D) – legenda	55
Obrázek 42 Zadaný výrobek	56
Obrázek 43 Návrh vstřikovací formy	58
Obrázek 44 Pravá strana vstřikovací formy	59
Obrázek 45 Levá strana vstřikovací formy	60
Obrázek 46 Boční odformování 1 (vlevo) a 2 (vpravo)	62
Obrázek 47 Boční odformování 3 (vlevo) a 4 (vpravo)	63
Obrázek 48 Boční odformování 5	63
Obrázek 49 Vyhazovací systém	64
Obrázek 50 Rozmístění výrobku vůči vyhazovačům	65
Obrázek 51 Tvárnice se zápustkami a o-kroužky	65
Obrázek 52 Tvárník se zápustkami a o-kroužky	66
Obrázek 53 Geometrie vtokového systému v aplikaci Moldflow	67
Obrázek 54 Vliv designu na smrštění zadané geometrie	67
Obrázek 55 Temperace zadané geometrie součásti 1	68
Obrázek 56 Temperace zadané geometrie součásti 2	69
Obrázek 57 Temperace zadané geometrie součásti 3	69
Obrázek 58 Arburg Allrounder 630 S, 2500 – 800 [13]	70
Obrázek 59 Kvalita sítě	71
Obrázek 60 Výchozí analýza – Čas plnění	73
Obrázek 61 Výchozí analýza – Tlak při přepnutí na dotlak	74
Obrázek 62 Výchozí analýza – Tlak při přepnutí na dotlak, detail	74
Obrázek 63 Výchozí analýza – Čas dosažení vyhazovací teploty na součásti	75
Obrázek 64 Výchozí analýza – Uzavírací síla	76
Obrázek 65 Výchozí analýza – Teplota čela taveniny	77

Obrázek 66 Výchozí analýza – Studené spoje 1	77
Obrázek 67 Výchozí analýza – Studené spoje 2	78
Obrázek 68 Výchozí analýza – Vzduchové kapsy 1	78
Obrázek 69 Výchozí analýza – Vzduchové kapsy 2	79
Obrázek 70 Výchozí analýza – Rychlost smykové deformace, plnicí žebro	79
Obrázek 71 Výchozí analýza – Teplota v temperačním okruhu	80
Obrázek 72 Výchozí analýza – Tlak v temperačním okruhu	81
Obrázek 73 Výchozí analýza – Tlak v temperačním okruhu, hodnoty	81
Obrázek 74 Výchozí analýza – Účinnost odvodu tepla, pohled 1	82
Obrázek 75 Výchozí analýza – Účinnost odvodu tepla, pohled 2	82
Obrázek 76 Výchozí analýza – Celková deformace	83
Obrázek 77 Výchozí analýza – Celková deformace, problematická oblast	84
Obrázek 78 Výchozí analýza – Deformace způsobená rozdíly teplot během chlazení	85
Obrázek 79 Výchozí analýza – Vnitřní orientace, problémová oblast	85
Obrázek 80 Výchozí analýza – Celková deformace vlivem všech efektů ve směru X	86
Obrázek 81 Nástrojem známé výsledky pro zadanou kombinaci (PP)	87

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti materiálu Apec 1895.....	57
Tabulka 2 Hodnocené parametry vstřikovacího stroje	70
Tabulka 3 Procesní parametry – výchozí analýza	72
Tabulka 4 Měněné parametry a vliv na výsledky – nárůst teploty formy	88
Tabulka 5 Měněné parametry a vliv na výsledky – nárůst teploty taveniny	88
Tabulka 6 Měněné parametry a vliv na výsledky – nárůst teploty taveniny do krajní meze	89
Tabulka 7 Měněné parametry a vliv na výsledky – pokles teploty formy.....	90

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: STRANA VSTŘIKOVÁNÍ – VÝKRES

Příloha P II: STRANA VYHAZOVÁNÍ – VÝKRES

Příloha P III: VYHAZOVACÍ SYSTÉM – VÝKRES

Příloha P IV: KOMPLETNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMA, LOGISTICKÉ PRVKY – VÝKRES

Příloha P V: KUSOVNÍK

Příloha P VI: CD obsahující:

- Textový soubor diplomové práce
- 3D data návrhu vstřikovací formy
- Výkresovou dokumentaci
- Kusovník
- Soubory analýz