

Vliv teploty forem na výslednou kvalitu výrobků

Bc. Patrik Lukáš

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Patrik Lukáš**
Osobní číslo: **T17566**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv teploty forem na výslednou kvalitu výrobků**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Návrh měření teploty taveniny a teplotního pole.
3. Měření deformace a vlastností výrobku v závislosti na změně parametrů teploty.
4. Zhodnocení naměřených výsledků.

Rozsah diplomové práce: cca 60 stran
Rozsah příloh: dle pokynů VDP
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 978-80-271-0614-1.
2. DANGEL, Rainer. Injection moulds for beginners. Munich: Hanser, [2016], xviii, 308 s. ISBN 978-1-56990-631-6.
3. ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Bednařík, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: 2. ledna 2019
Termín odevzdání diplomové práce: 17. května 2019

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby 1);
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou 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 2);
- beru na vědomí, že podle § 60 3) odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 3) odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou 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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské 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.

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

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

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

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby. 2) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo). 3) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá optimalizací procesu vstřikování plastů, která by měla zajistit zlepšení vlastností vstřikovaného dílce. Konkrétně se jedná o porovnání vlivů vstupních parametrů temperace z hlediska aktivních a pasivních druhů temperace.

V teoretické části jsou popsány jednotlivé druhy temperace. V praktické části se nachází shrnutí výsledků celého měření.

Klíčová slova: temperace, temperování, vstřikování, forma, simulace, deformace, teplota, morfologie

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the optimization of the plastic injection process which should improve properties of the injection molded part. Specifically, it is a comparison of the influence of the tempering input parameters in terms of active and passive types of tempering. Different types of tempering are described in the theoretical part. The practical part includes a summary of the results of the whole measurement.

Keywords: tempering, injection, shape, simulation, deformation, temperature, morphology

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu panu Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotně poskytnuté rady a pozornost, kterou mi věnoval při vypracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a kamarádům za podporu při studiu na vysoké škole.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ	12
1.1 PRINCIP TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	12
1.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	13
2 TEMPERAČNÍ SYSTÉM	14
2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY	15
2.1.1 Temperační jednotka	15
2.1.2 Temperační médium	16
2.1.3 Temperační kanály	16
2.2 AKTIVNÍ TEMPERACE.....	17
2.2.1 Kontinuální způsob temperování.....	18
2.2.2 Pulsní způsob temperování	18
2.2.3 Ranque – Hilsch vírová trubice	18
2.2.4 Systém plochých přepážek.....	19
2.2.5 Systém spirálových přepážek	19
2.2.6 Systém fontánek	20
2.2.7 Systém Contura	21
2.3 PASIVNÍ TEMPERACE	21
2.3.1 Tepelná trubice	21
3 TEPELNÁ BILANCE FOREM	23
3.1 TEPELNÝ TOK MEZI FORMOU A TAVENINOU – Q_{PL}	24
3.2 TEPELNÝ TOK MEZI TEMPERAČNÍM MÉDIEM A FORMOU – Q_{TM}	24
3.3 TEPELNÝ TOK MEZI FORMOU A OKOLÍM - Q_o	25
4 VLIV TEMPERACE FOREM NA KVALITU VÝSTŘIKU	27
4.1 VLIV TEMPERACE FORMY NA SMRŠTĚNÍ VÝSTŘIKU	28
4.1.1 Výrobní smrštění	28
4.1.2 Dodatečné smrštění.....	28
4.1.3 Vliv teploty stěny formy na výsledné parametry výrobku.....	29
4.2 VLIV TEMPERACE NA MORFOLOGII VÝSTŘIKU	30
5 MOŽNOSTI MĚŘENÍ TEPLoty DUTINY FORMY A TAVENINY	31
5.1 DOTYKOVÉ SNÍMAČE TEPLoty.....	31
5.1.1 Termočláňkové snímače teploty.....	31
5.1.2 Odporové snímače	31
5.2 BEZDOTYKOVÉ SNÍMAČE TEPLoty	32
5.3 NÁVRH MĚŘENÍ TEPLotNÍHO POLE	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
6 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	35
7 TESTOVANÝ DÍL	36

7.1	VÝROBNÍ NÁSTROJ	37
8	POUŽITÉ MATERIÁLY	39
8.1	PP – TIPPLEN R359	39
8.2	NÁVRH MĚŘENÍ PRO MATERIÁL PP.....	40
8.3	POM – HOSTAFORM C9021.....	41
8.4	NÁVRH MĚŘENÍ PRO MATERIÁL POM.....	42
9	TESTOVANÉ PARAMETRY	43
9.1	TEPLOTA TAVENINY BĚHEM PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ.....	43
9.1.1	Umístění senzorů	44
9.2	DEFORMACE	44
9.3	STATICÁ ZKOUŠKA TAHEM	45
9.3.1	Výroba zkušebních vzorků typu 1BA.....	45
9.4	MORFOLOGIE	46
10	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	47
10.1	TEPLOTA TAVENINY V PRŮBĚHU VSTŘIKOVÁNÍ.....	47
10.1.1	Materiál PP, materiál vložek ocel - ocel.	47
10.1.2	Materiál PP, materiál vložek ocel – Albromet 240W.....	48
10.1.3	Materiál POM, materiál vložek ocel – ocel.	49
10.1.4	Materiál POM, materiál vložek Albromet W240 - ocel.	50
10.2	DEFORMACE	51
10.2.1	Skutečné výsledky pro materiál PP, materiál vložek ocel – ocel.....	51
10.2.2	Výsledky simulací pro materiál PP, materiál vložek ocel – ocel.....	52
10.2.3	Skutečné výsledky pro materiál PP, materiál vložek ocel – Albromet W240.....	54
10.2.4	Výsledky simulací pro materiál PP, materiál vložek ocel – Albromet W240.....	55
10.2.5	Skutečné výsledky pro materiál POM, materiál vložek ocel – ocel.....	57
10.2.6	Výsledky simulací pro materiál POM, materiál vložek ocel – ocel.....	58
10.2.7	Skutečné výsledky pro materiál POM, materiál vložek Albromet W240 – ocel.	60
10.2.8	Výsledky simulací pro materiál POM, materiál vložek Albromet W240 – ocel.	61
10.2.9	Výsledky simulací pro materiál PP, materiál vložek Albromet W240 – ocel.....	63
10.2.10	Výsledky simulací pro materiál POM, materiál vložek Albromet W240 – ocel.	65
10.3	VYHODNOCENÍ STATICKE ZKOUŠKY TAHEM	67
10.4	MORFOLOGIE	73
11	DISKUSE VÝSLEDKŮ	74
	ZÁVĚR.....	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	78
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	81

SEZNAM OBRÁZKŮ	82
SEZNAM TABULEK	84
SEZNAM PŘÍLOH	86

ÚVOD

V současné době jsou obvyklé materiály jako dřevo, sklo, kov atd., nahrazovány polymerními materiály. Mezi nejobvyklejší způsoby zpracování těchto materiálů patří vstřikování, které vyžaduje větší série výrobků, zejména kvůli vysoké ceně nástroje.

Vyrobené dílce pomocí vstřikování doprovází velké množství možných vad jako např. neúplné výstřiky, přetoky a otřepy, propadliny, vtaženiny a deformace. Pod pojmem vada výstřiku se rozumí defekt, kdy je vzhled, rozměry a tvar odlišný od předem stanoveného standardu. Zdroje vad mohou být v použitém materiálu, v konstrukci dílce, ve vstřikovacím stroji a také ve zvolených technologických podmínkách.

Tato práce je zaměřena na vliv vstupních parametrů teploty (teplota stěny dutiny formy a použitého materiálu) na výslednou kvalitu vstřikovaných dílů, především z hlediska výsledné deformace.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

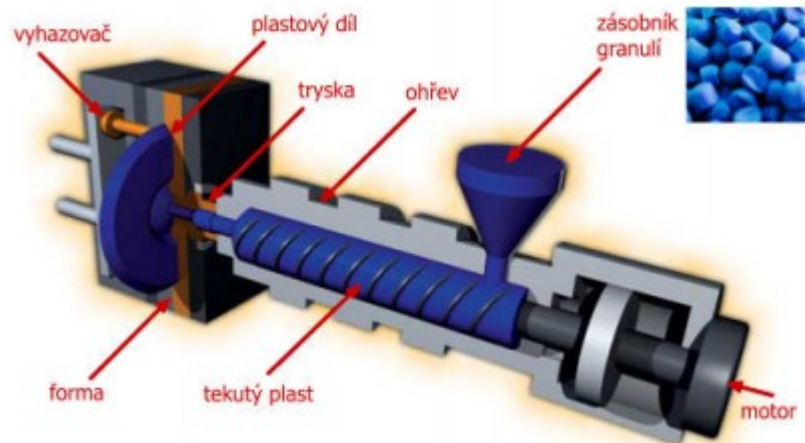
Vstřikování plastů je nejpoužívanější technologií ke zpracování termoplastů, polymerních směsí, termoplastických elastomerů, reaktoplastů, kaučuků a pryží.

1.1 Princip technologie vstřikování

Technologie vstřikování je způsob zpracování plastů, při kterém je požadovaná dávka materiálu ve formě taveniny vstříknuta do dutiny formy.

Postup vstřikování:

Plast nebo recyklát je přiveden do násypky, ze které je odebrán pracovní částí stroje, jenž směs dopravuje do tavicí komory. V tavicí komoře za účinku tepla a tlaku se směs taví a stává se z ní tavenina, která je vstřikována do prázdné dutiny formy. Po zaplnění celé dutiny získává tavenina její tvar a objem. Následuje fáze dotlaku, která zajišťuje snížení, smrštění a rozměrové změny. Díky teplotě odevzdá plast teplo a ztuhne ve finální výrobek. Následně je forma otevřena a výrobek je pomocí vyhazovačů vyhozen z formy. Tento proces je cyklicky opakován. [3]



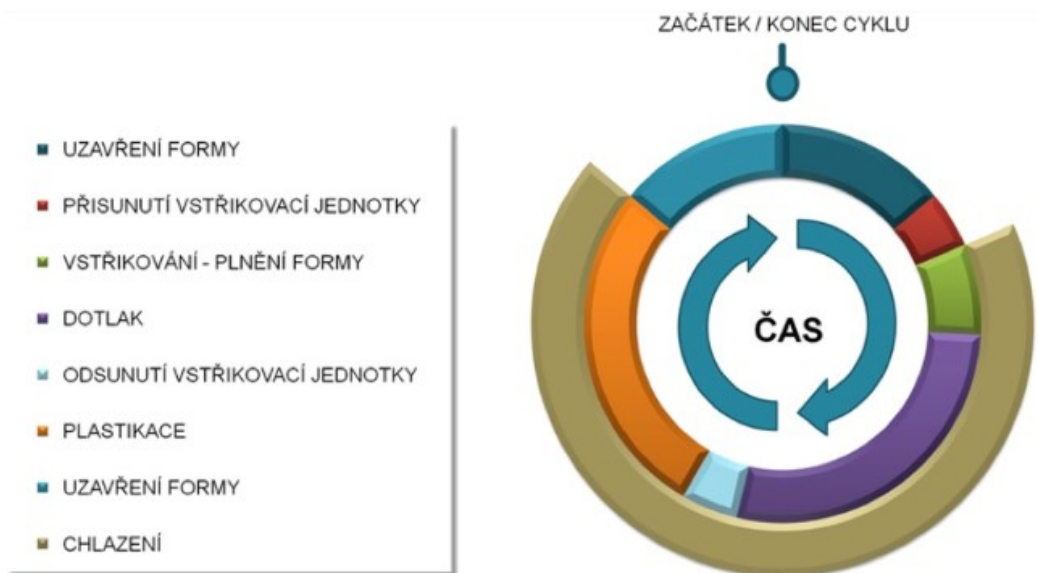
Obr. 1. Princip technologie vstřikování. [1]



Obr. 2. Příklad vstříkovaných dílů. [2]

1.2 Vstříkovací cyklus

Vstříkovací cyklus je tvořen přesně specifikovanými kroky, které se podílí na výrobě vstříkovaných dílů.



Obr. 3. Vstříkovací cyklus. [4]

Dle schématu na Obr. 3. znázorňujícím vstříkovací cyklus je patrné, že doba chlazení představuje nejdelší část cyklu.

2 TEMPERAČNÍ SYSTÉM

Zásadním faktorem ovlivňujícím proces vstřikování je teplota vstřikovací formy. Důležité je správně optimalizovat podmínky a způsob temperace, jelikož mají přímý vliv na:

- kvalitu vyráběných dílů,
- náklady na vstřikovaný díl,
- schopnost vyrobit požadovaný a správný povrch,
- velikost smrštění dílů.

Vhodnou volbou teploty formy a temperačních prostředků je možné dosáhnout stanovené kvality vstřikovaných dílů, tzn. kvalitního povrchu, rozměrové přesnosti, požadované mechanické a fyzikální vlastnosti, minimální deformace a zkrácení vstřikovacího cyklu, který má přímý vliv na zkrácení doby chlazení.

V průběhu vstřikování, kdy se materiál za působení tepelné a mechanické energie mění ve finální výrobek, se forma podílí na výsledné kvalitě, ale také na rentabilitě celé výroby. Pro splnění ekonomických požadavků, které jsou při výrobě důležité, musí být forma dobře zkonstruována nejen jako celek mechanických prvků, ale také prvků temperačního systému. Návržnost počáteční investice do vstřikovací formy a ekonomická výhodnost procesu je úzce spjata s hodinovou produkcí, které je forma schopna dosáhnout. S ohledem na tyto parametry je požadován krátký vstřikovací cyklus, avšak za dodržení požadované kvality výrobku. Dosažení této rovnováhy může být pouze v případě správné výměny tepla mezi formou a vstřikovaným materiálem. Dále je důležité rovnoměrné rozložení teploty na stěně formy po celou dobu vstřikování.

Nejdůležitější funkcí temperačního systému formy je zajistit požadovanou teplotu dutiny v krátkém čase a zachovat tuto teplotu v co nejmenším rozsahu. Temperace formy také zahrnuje činnost vyhřívání dutiny, pro dosažení požadované teploty pro vstříknutí materiálu. Teplota a její časový průběh ovlivňuje chování taveniny během výroby i poté, včetně výsledných vlastností. Délka chlazení může být ovlivněna provedením temperačního systému a typem vstřikovaného materiálu, který je konkretizován teplotou taveniny a teplotou dílu, při které probíhá odformování. [4], [5], [6]

Tab. 1 Příklad doporučených teplot v procesu vstřikování. [4]

TYP MATERIÁLU	TEPLOTA FORMY [°C]	TEPLOTA TAVENINY [°C]	TEPLOTA DÍLU PŘI ODFORMOVÁNÍ [°C]
PA	80-120	260-300	110-130
PC	80-100	280-320	140
ABS	60-80	220-260	80-100
PP	30-60	200-250	70-90

2.1 Základní principy

Přenos tepla, přivedeného taveninou do dutiny formy, je závislý na tepelné vodivosti materiálů použitých při výrobě jednotlivých dílů formy. Vysoko tepelně vodivé materiály jako měď mají tepelnou vodivost několikrát vyšší než ocel, a tudíž jsou schopny dané množství tepla odvést rychleji. Rychlost přenosu tepla může být zvýšena vhodným umístěním temperačních kanálů blíže k povrchu vstřikovací formy. Investice do použití vysoce tepelně vodivých materiálů pro díly formy nemusí být vždy obětována smysluplně, a to z důvodu, že přenos tepla není určen vedením tepla formou, ale nízkou tepelnou vodivostí plastu a vymezenou schopností temperačního média pojmout teplo. [5], [6]

Tab. 2. Hodnoty tepelné vodivosti vybraných materiálů. [7]

Materiál	λ_{20} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Ocel 0,2 % C	50
Cín	64
Mosaz	106
Hliník	229
Měď	395

λ_{20} - součinitel tepelné vodivosti při teplotě 20 °C.

2.1.1 Temperační jednotka

Temperační jednotka zajišťuje rychlý ohřev vstřikovací formy na definovanou teplotu a udržení dané teploty při minimálních výkyvech po dobu celé výroby. Běžně je temperační jednotka opatřena kompresorem, čerpadlem, kondenzátorem, výparníkem a zásobníkem na vodu.



Obr. 4. Tlakovodní temperovací zařízení do 100 °C: P100M. [8]

2.1.2 Temperační médium

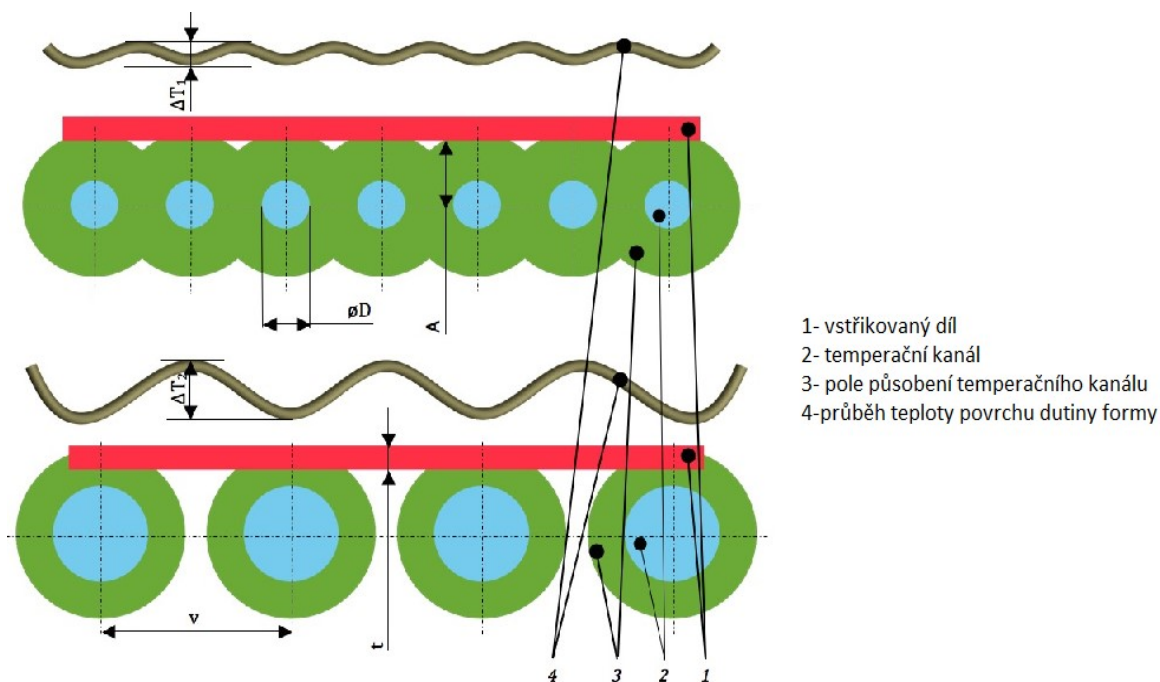
Druh temperačního média je volen podle svých tepelných vlastností, především stálostí za vyšších teplot. V praxi je stále nejčastěji používaným médiem voda (dostupnost, nízká cena, ekologická nezávadnost), která je používána pro chladicí okruhy pracující při nižších teplotách. Tato teplota se pohybuje do 90°C. Pro vyšší teploty se používají minerální nebo syntetické oleje, u kterých se pracovní teplota může pohybovat až do 150°C. [11]

2.1.3 Temperační kanály

Temperační kanály jsou vyráběny různého průřezu. Nejpoužívanější jsou průřezy kruhové, mezikruhové, čtvercové a obdélníkové. Pro zlepšení přestupu tepla mezi chladícím médiem a stěnou kanálu je nutné docílit turbulentního proudění. Toho je možné dosáhnout hrubým opracováním stěny kanálu (vrtání). Rychlost průtoku v kanálech je v rozmezí 0,5–4 m/s.

Při návrhu temperačního systému je nutné dodržovat tyto požadavky:

- temperační kanály je nezbytné konstruovat tak, aby chladící médium bylo přiváděno do nejteplejšího místa ve formě,
- kanály je vhodné umístit blíže k tvarové dutině formy, nesmí však dojít k narušení stěny formy,
- velikost průtočného průřezu nesmí oslabovat pevnost součástí.



Obr. 5. Porovnání efektu různého průměru temperačních kanálů.[4]

Tab. 3. Doporučené rozměry a uspořádání temperačních kanálů. [4]

TLOUŠŤKA STĚNY VSTŘIK. DÍLU [mm]	VZDÁLENOST OSY TEMPERAČNÍHO KANÁLU OD DUTINY FORMY [mm]	VZÁJEMNÁ VZDÁLENOST OS SOUSEDNÍCH TEMPERAČNÍCH KANÁLŮ [mm]	PRŮMĚR TEMPERAČNÍHO KANÁLU [mm]
0 - 1	10 - 14	10 - 12	5 - 6
1 - 2	10 - 20	12 - 16	6 - 8
2 - 4	20 - 25	16 - 22	8 - 10
4 - 6	25 - 35	22 - 28	10 - 12
6 - 8	32 - 42	28 - 36	12 - 16
8 - 12	42 - 55	36 - 50	16 - 20

2.2 Aktivní temperace

Souběžně s rostoucí technickou vyspělostí se objevuje více způsobů temperace vstřikovacích forem. Nejběžnějším způsobem, jak odvádět teplo z dutiny formy, je temperace s kapalným médiem proudícím v kanálech, které se řadí mezi metody konvekční.

2.2.1 Kontinuální způsob temperování

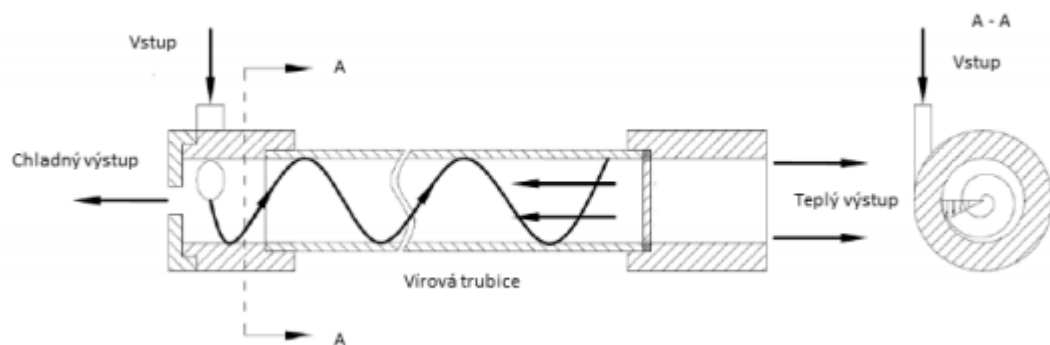
Kontinuální chlazení je temperování pomocí stálého průtoku a konstantní teploty temperačního média během vstřikovacího cyklu. Temperaci formy pomocí kapalného média zařizují nejčastěji dvě temperační jednotky. Zvlášť pro tvárník a zvlášť pro tvárnici. [9]

2.2.2 Pulsní způsob temperování

Díky pulsnímu chlazení lze zkrátit dobu cyklu až o 20 %, což je způsobeno menší diferenciací teplot vstřikovaného dílu při přestupu tepla v průběhu temperace než při kontinuální temperaci. Principem pulsní temperace je zaznamenávání rozdílné teploty ve formě pomocí čidel. Tato hodnota je následně odeslána do temperační jednotky, která z naměřených dat vytváří referenční křivku, jež se stává referenční křivkou pro další pulsy, podle kterých se řídí následující pulsy chladícího média. [9], [10]

2.2.3 Ranque – Hilsch vírová trubice

Vírová trubice je termálně-fluidní mechanismus, v němž dochází k přeměně tlakové energie proudu kapalného média na energii tepelnou. K přeměně energie dochází bez chemických reakcí nebo mechanických součástí. Stlačená tekutina je vedena do pracovní části trubice díky tangenciálně vložené dýzy, čímž vzniká vír. V místě víru dochází k přerozdělení energie tím, že vnitřní vrstvy víru mají nižší teplotu než vrstvy vnější. Proud média je přesunut na konec trubice, který je přizavřen regulačním ventilem, jenž pouští ven z trubice médium o vyšší teplotě z vnější vrstvy proudu a otáčí orientaci vnitřního proudu, který odchází na opačné straně trubice. [9]

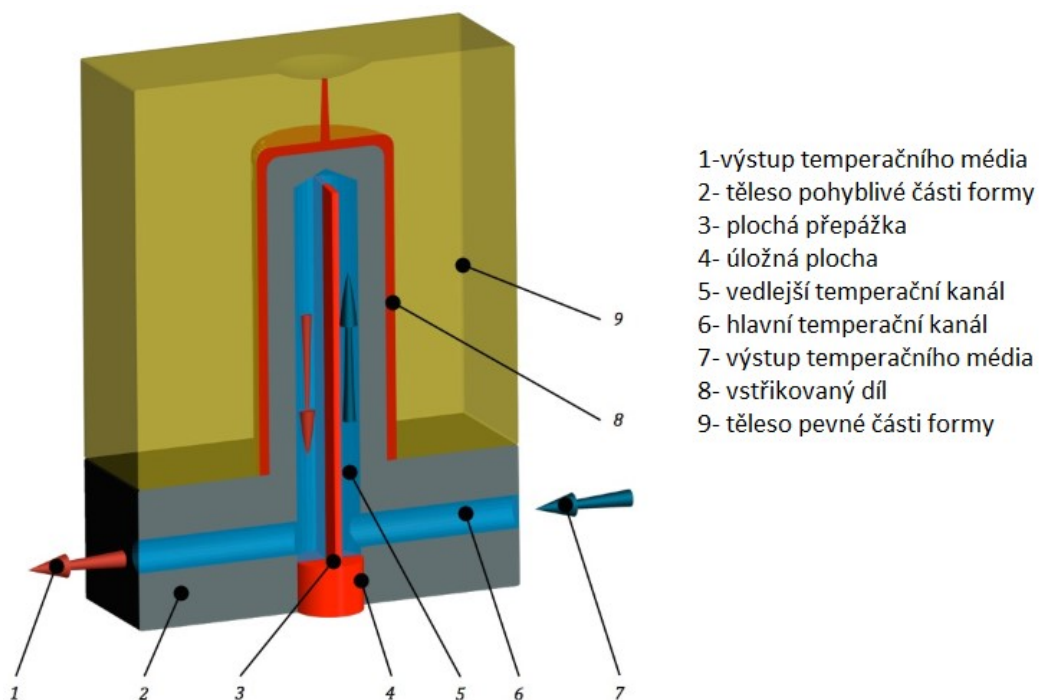


Obr. 6. Schéma protiproudé trubice. [12]

2.2.4 Systém plochých přepážek

Tento systém představuje vedlejší temperační kanál, který je uložen kolmo k hlavnímu temperačnímu kanálu. Vedlejší kanál je rozdělen pomocí přepážky, která jej rozděluje na dva polokruhové průřezy a současně přepažuje hlavní kanál. Temperační médium je vedeno z hlavního kanálu do vedlejšího, kde na konci přepážky změni směr proudění. Pomocí závitové vkládací plochy je přepážka ukotvena do předem obrobeného závitového otvoru. Dalším způsobem, jak přepážku ukotvit, je upevnění přímo mezi desky tvořící těleso formy a doplnění těsnícími kroužky.

Hlavní nevýhodou této metody je nutnost přesného umístění přepážky tak, aby byl vedlejší temperační kanál rozdělen přesně na dvě poloviny. Pokud tak učiněno není, dochází k odlišnosti temperačního efektu, což má za následek rozdílnou distribuci tepla v takto temperovaném tvárníku. Další nevýhodou je postupně se zvyšující teplota média směrem k výstupu systému. [4], [12], [14]

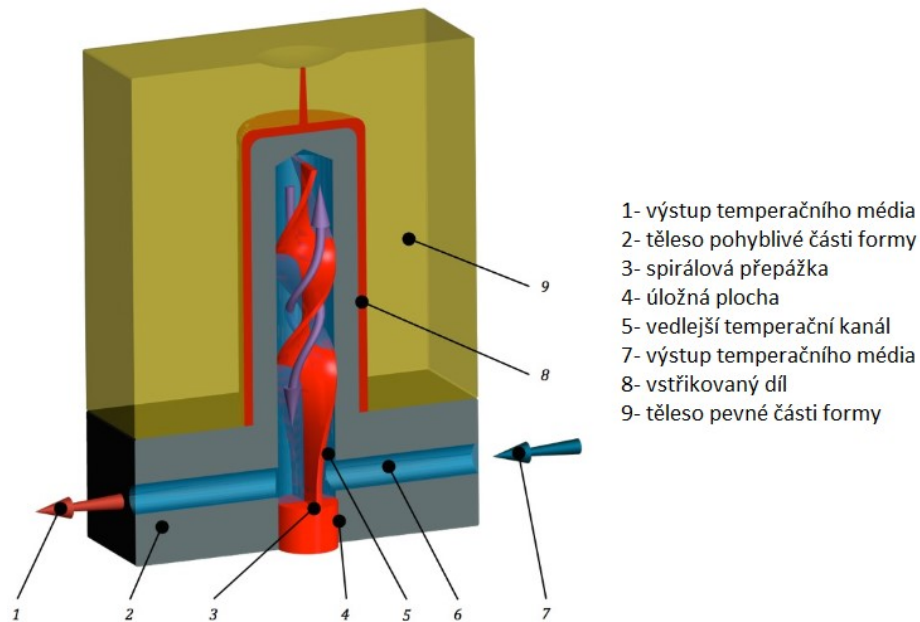


Obr. 7. Systém plochých přepážek. [4]

2.2.5 Systém spirálových přepážek

Princip spirálových přepážek je stejný jako systém plochých přepážek. Hlavní rozdíl spočívá ve tvaru přepážky, která je spirálovitá. Spirálou je vedlejší temperační kanál rozdělen na dva závity o velkém stoupání. Temperační médium je vedeno od hlavního

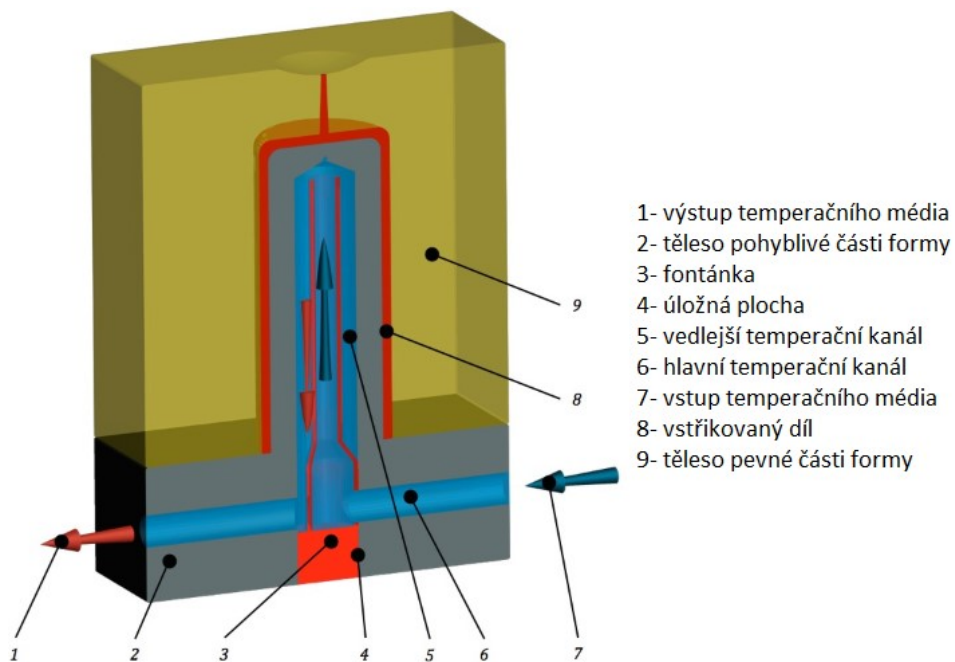
kanálu jedním závitem a podobně jako u ploché přepážky proud na konci změní směr a vrací se zpět do hlavního temperačního kanálu. U tohoto systému lze dosáhnout téměř homogenního teplotního pole v temperované oblasti. [4], [12], [14]



Obr. 8. Systém spirálových přepážek. [4]

2.2.6 Systém fontánek

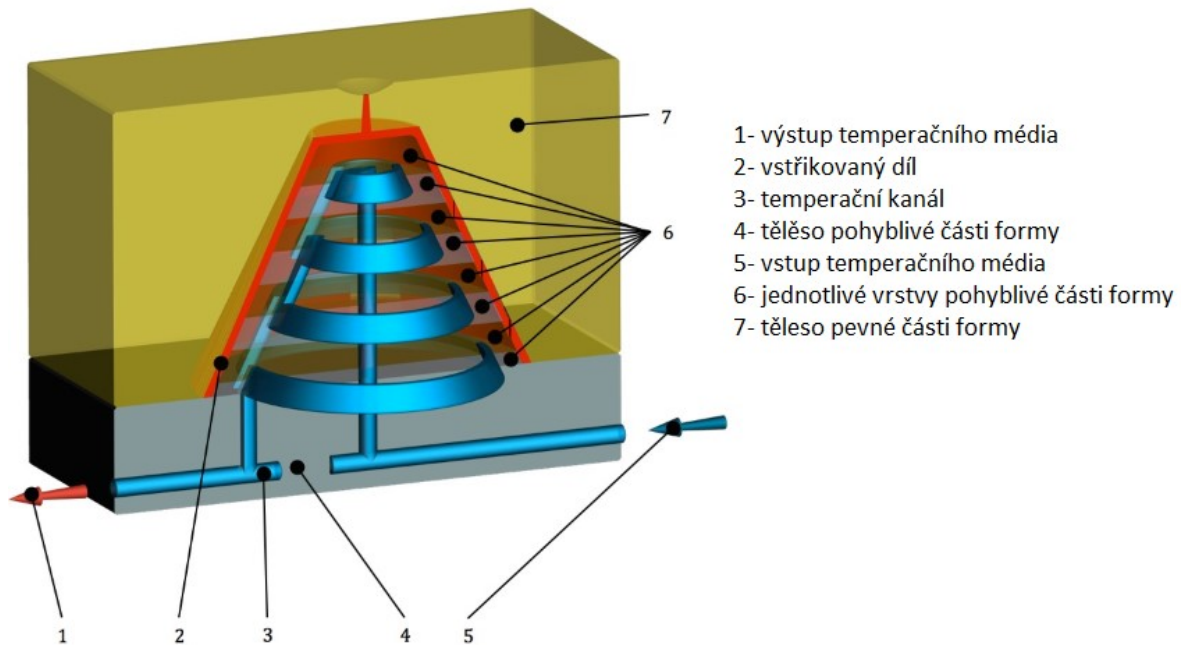
Fontánka je jistý druh přepážky, umístěný do vedlejšího temperačního kanálu. Přepážka má tvar trubičky. Proud temperačního média je obdobný jako v předešlých dvou případech.



Obr. 9. Systém fontánek. [4]

2.2.7 Systém Contura

Tento systém je založen na kopírování tvaru tvárníku temperačními kanály. Systém je podle náročnosti tvaru vstřikovaného dílce rozdělen do několika vrstev (2–7). Tyto temperační kanály jsou nejčastěji vytvářeny frézováním, popř. 3D tiskem. [4], [12], [14]



Obr. 10. Systém Contura. [4]

2.3 Pasivní temperace

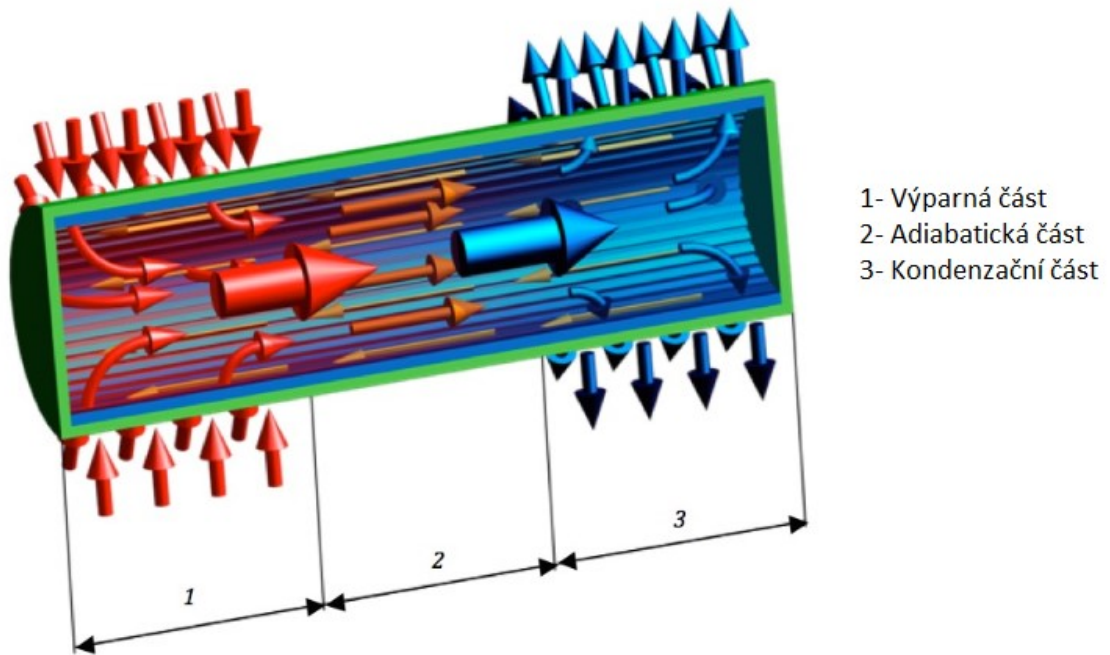
2.3.1 Tepelná trubice

Tepelně vodivé trubice se používají pro odvod tepla ze špatně přístupných míst. Trubice je dutá kovová trubka kruhového průřezu o průměru 2–10 mm, jenž obsahuje tekutou pracovní látku a jejíž vnitřní povrch je opatřen porézním materiálem. Pro menší teploty je používanou pracovní látkou voda. Výhodou tepelné trubice je její funkčnost v každé poloze. Ve výparné části se vztlínáním pohybuje kondenzát vody, který se promění v páru. Ta se následně vrací soustavou opět do kondenzační části.

Obal tepelné trubice je většinou hliníkový nebo měděný. Použitím tepelné trubice je dosaženo 10krát až 1000krát větší vodivosti než u mědi. [4], [15]

Tab. 4. Pracovní látky používané v tepelných trubcích a jejich charakteristika [4]

Pracovní látka	Pracovní teploty [°C]	Transportní činitel	Vhodný konstrukční materiál
Dusík	-200 ÷ -170	$9 \cdot 10^6$	Nerezová ocel
Čpavek	-70 ÷ 50	$1 \cdot 10^8$	Nikl, hliník
Freon	-60 ÷ 40	$1 \cdot 10^7$	Nerezová ocel, měď
Methanol	-30 ÷ 100	$5 \cdot 10^5$	Měď
Voda	10 ÷ 150	$5 \cdot 10^8$	Měď, nikl
Rtuť	190 ÷ 500	$9 \cdot 10^9$	Nerezová ocel
Draslík	400 ÷ 800	$5 \cdot 10^8$	Nerezová ocel
Sodík	500 ÷ 900	$2 \cdot 10^9$	Nerezová ocel
Lithium	900 ÷ 1500	$8 \cdot 10^9$	Tantal, TZM

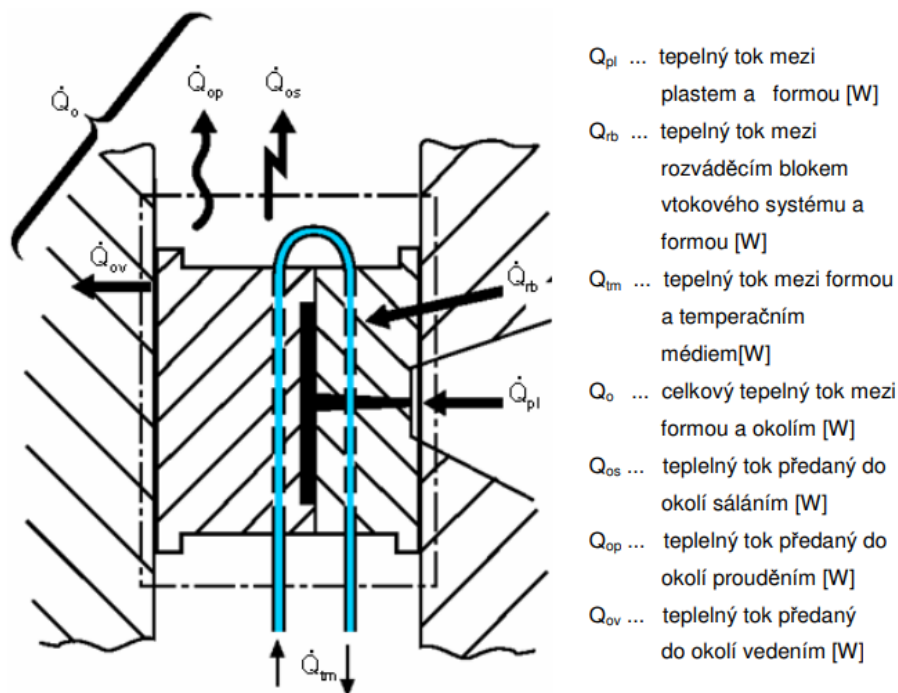


Obr. 11. Princip funkce tepelné trubice. [4]

3 TEPELNÁ BILANCE FOREM

Pokud chceme vyrobit kvalitní výrobek a snížit cenu, je potřeba znát zákonitosti související s přenosem tepla v dutině formy. Vstřikovací forma je termodynamický systém, ve kterém se akumuluje teplo z taveniny a toto teplo přestupuje do temperačního média, rámu stroje a do okolí. Při přestupech dochází k výměně tepla pomocí proudění, vedení a sálání. Tepelná bilance je sestavení toků do formy vstupujících a vystupujících. Ke stanovení tepelných toků se vychází z několika předpokladů: [15], [16]

- vstřikovací forma představuje uzavřený systém v tepelné rovnováze,
- tepelné toky ve formě i teploty samostatných částí formy jsou časově konstantní,
- uvažuje se sdílení tepla ve směru normály k teplosměnnému povrchu,
- nedbá se na kolísání teploty povrchu dutiny formy během vstřikovacího cyklu,
- za teplotu temperačního média se pokládá střední hodnota vstupní a výstupní teploty. [16]



Obr. 12. Tepelná bilance vstřikovací formy. [5]

Výsledek tepelné bilance je stav tepelné rovnováhy, kdy je teplo přivedené do dutiny formy rovno teplu odvedenému, platí tedy vztah:

$$Q_{pl} + Q_{rb} + Q_{tm} + Q_o = 0 \quad (1)$$

kde

$$Q_o = Q_{ov} + Q_{os} + Q_{op} \quad (2)$$

Jednotlivé tepelné toky se vypočítají díky výše uvedeným předpokladům a zjednodušením pomocí vztahů níže (Rov. 3-8).

3.1 Tepelný tok mezi formou a taveninou – Q_{pl}

Je dán rozdílem entalpií plastu při teplotě zpracování a při střední teplotě vyjmutí z formy, definováno vztahem:

$$Q_{pl} = \frac{M_V \cdot \Delta h_p}{t_{chl}} \quad (3)$$

kde: m_v - hmotnost výstřiku [kg]

Δh_p - rozdíl měrných entalpií plastu při teplotě zpracování a při střední teplotě vyjmutí z formy [$J \cdot kg^{-1}$]

t_{chl} - doba chlazení [s]

3.2 Tepelný tok mezi temperačním médiem a formou – Q_{tm}

Je proveden pomocí přenosu tepla, které se vytváří z vedení složenou rovinnou stěnou a následného přestupu do temperačního média. Výsledek tepelného toku mezi temperačním médiem a formou je definován vztahem:

$$Q_{tm} = k \cdot S \cdot (T_f - T_m) \quad (4)$$

kde: k - součinitel prostupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

S - teplosměnný povrch [m^2]

T_f - teplota dutiny formy [$^{\circ}C$]

T_m - teplota temperovacího média [$^{\circ}C$]

Součinitel prostupu tepla k , lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5)$$

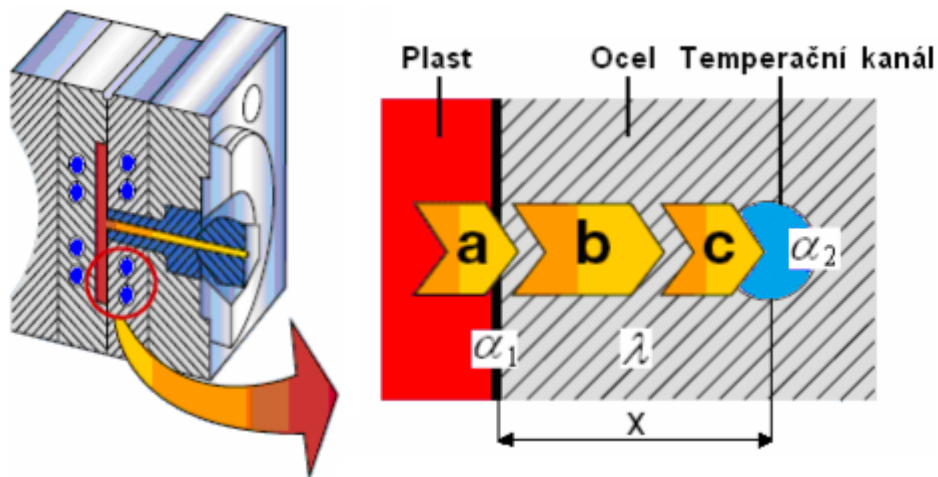
kde: α_1 - součinitel přestupu tepla mezi taveninou a formou [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

α_2 - součinitel přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a temperačním médiem [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

λ - součinitel tepelné vodivosti materiálu formy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

x - vzdálenost mezi plastem a temperačním kanálem [m]

Nejjednodušším způsobem, jak navýšit temperační výkon, je zvětšení součinitele prostupu tepla k . Toho lze dosáhnout změnou velikosti součinitele prostupu tepla mezi temperačním médiem a stěnou temperačního kanálu. Tato hodnota je funkcí Reynoldsova čísla a průměru temperovacího kanálu. To znamená, že je nutné zajistit v kanálech turbulentní proudění temperačního média, při kterém je vlivem proudění a vedení odvod tepla účinnější než u laminárního proudění. [16]



Obr. 13. Prostup tepla formou. [17]

3.3 Tepelný tok mezi formou a okolím - Q_o

Je složen ze tří tepelných toků, které definují jednotlivé vztahy:

Tepelný tok předaný z formy do okolí vedením Q_{ov} definuje Fourierův zákon:

$$Q_{ov} = S_v \cdot \lambda \cdot (T_m - T_o) \quad (6)$$

kde: S_v - povrch styčné plochy mezi formou a rámem stroje [m^2]

λ - součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

T_m - teplota temperačního média [K]

T_o - teplota okolí [K]

Tepelný tok odevzdaný z formy do okolí prouděním Q_{op} definuje Newtonův zákon:

$$Q_{op} = S_p \cdot \alpha_p \cdot (T_m - T_o) \quad (7)$$

kde: S_p - povrch styčné plochy mezi formou a okolím [m^2]

α_p - součinitel přestupu tepla z formy do okolí [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

Tepelný tok odevzdaný z formy do okolí sáláním Q_{OS} definuje Stefan-Boltzmanův zákon:

$$Q_{OS} = S_p \cdot \varepsilon \cdot \xi_c \cdot \left[\left(\frac{T_{tm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

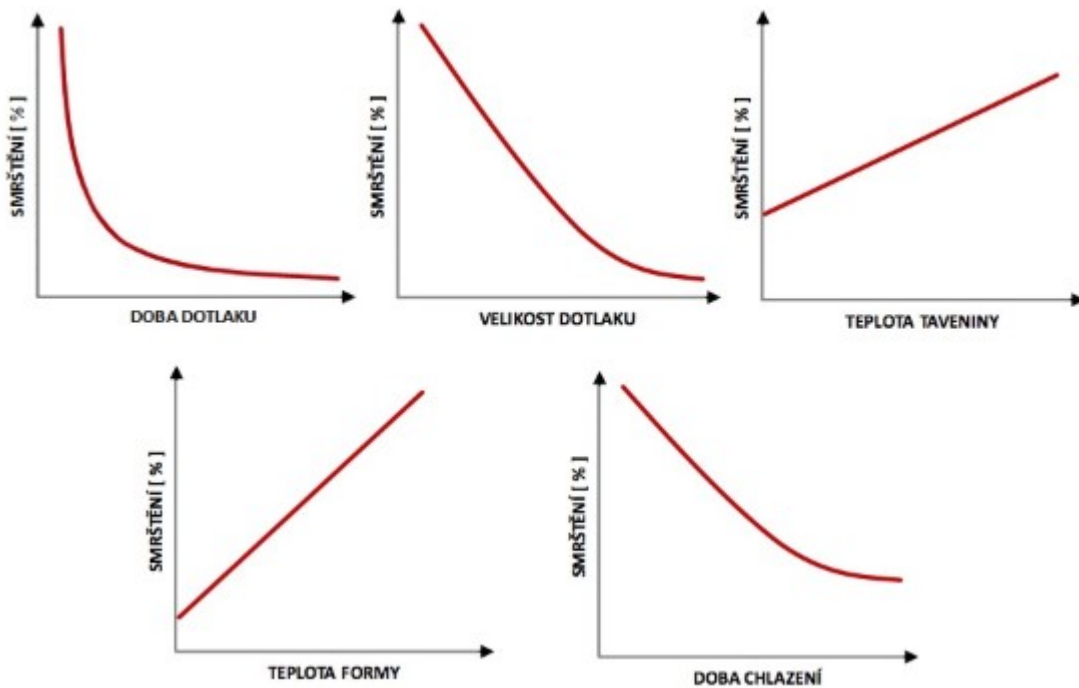
kde: ε - emisivita povrchu

ξ_c - součinitel záření absolutně černého tělesa [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

4 VLIV TEMPERACE FOREM NA KVALITU VÝSTŘIKU

Kvalita, vzhled a vlastnosti vstřikovaného výrobku jsou dány souhrnem faktorů, které navzájem působí během celého procesu vstřikování. Hlavním faktorem je použitý druh materiálu a tvar výrobku, dále konstrukce formy a technologické podmínky. Jelikož společně s tuhnutím probíhá při vstřikování tvarování součásti, ovlivňují technologické podmínky výrazně výslednou strukturu plastu, především pak jeho mechanické a fyzikální vlastnosti.

Hlavními technologickými parametry, kterými je možné ovlivnit kvalitu dílu, jsou rychlost a způsob odvodu tepla z výstřiku. Zvláště u velkoplošných a složitých součástí je nutné dbát na provedení a rozmístění temperačního systému, který musí zajišťovat rovnoměrný odvod tepla z celého objemu výstřiku stejnou rychlostí. Rozdílná teplota by výrazně zhoršila vlastnosti výrobku a zároveň by obsahoval vnitřní pnutí. [18]



Obr. 14. Vliv vybraných technologických parametrů vstřikování termoplastů na smrštění vstřikovaných dílů. [18]

4.1 Vliv temperace formy na smrštění výstřiku

V důsledku chladnutí a tuhnutí materiálu vznikají u výstřiku rozměrové změny, které jsou nazývány smrštění. Smrštění je definováno jako změna objemu v důsledku tepelné stlačitelnosti a roztažnosti plastických materiálů. Rozsáhlost rozměrových změn u plastů je časově závislá. Pokud dojde ke smrštění do 24 hodin po vyjmutí z formy, jde o smrštění výrobní. Jestliže dojde ke smrštění po uplynutí více jak 24 hodin, jedná se o smrštění dodatečné. [18], [19]

4.1.1 Výrobní smrštění

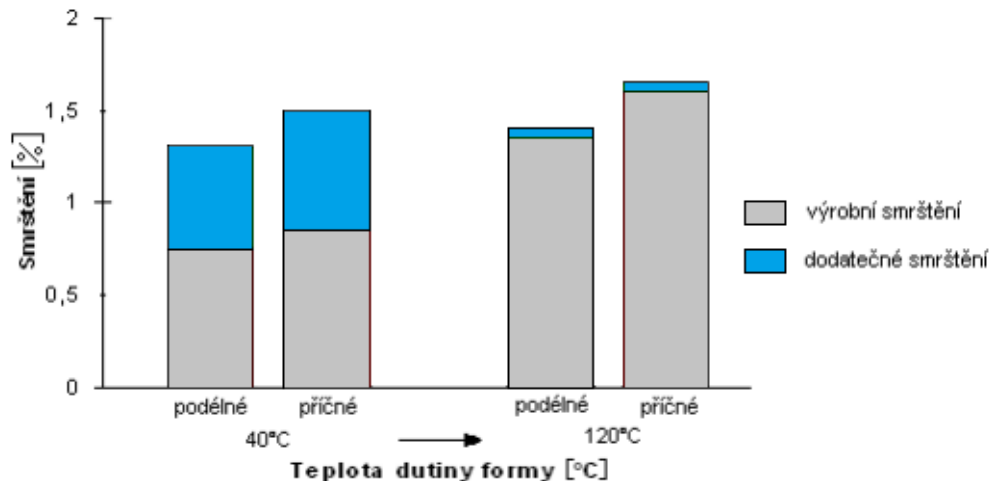
Tento druh smrštění závisí na:

- druhu použitého materiálu a jeho nadmolekulární struktury (amorfní termoplasty mají menší výrobní smrštění než krystalické),
- tloušťce stěny a tvaru výrobku (čím je tloušťka větší, tím výstřik chladne pomaleji),
- konstrukci formy (temperační systém, umístění vtokové soustavy),
- technologických podmínkách vstřikování (vstřikovací tlak a doba působení dotlaku),

4.1.2 Dodatečné smrštění

Dodatečné smrštění je u semikrystalických plastů zapříčiněno uvolňováním vnitřního pnutí ve spojení s dokrystalizací. V naprosté většině je hodnota výrobního smrštění větší než hodnota smrštění dodatečného. Z Obr. 15 je patrné, že nižší teplota formy při vstřikování a následném ochlazení zapříčiní nižší hodnotu výrobního smrštění. Při vyšší teplotě dutiny formy je prakticky vymazán efekt dodatečného smrštění.

Pro výpočet velikosti dutiny formy je zásadní hodnota výrobního smrštění, hodnotu dodatečného smrštění nelze předem stanovit. Z tohoto důvodu je efektivnější ohřát dutinu formy na vyšší teplotu, ovšem v závislosti na prodloužení času vstřikovacího cyklu. [9], [19]



Obr. 15. Poměr velikosti výrobního a dodatečného smrštění v závislosti na teplotě formy.

[19]

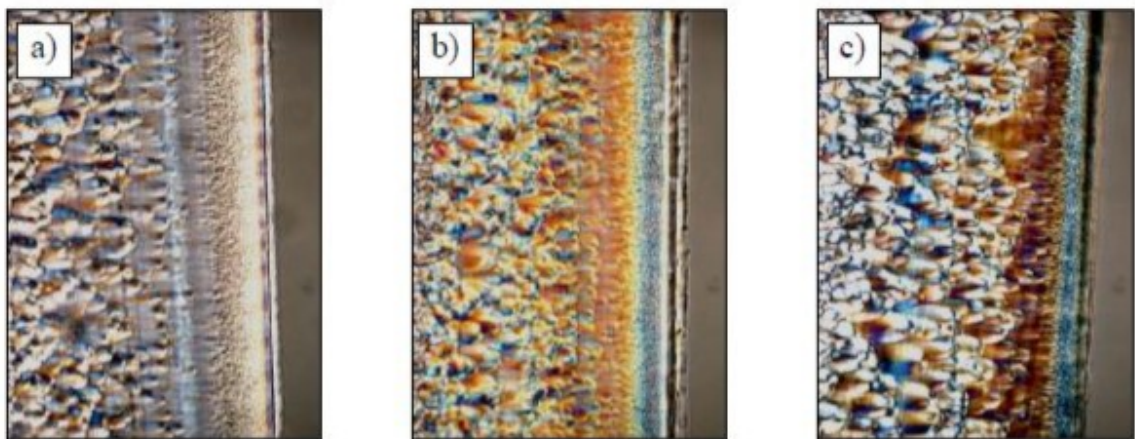
4.1.3 Vliv teploty stěny formy na výsledné parametry výrobku

Vliv zvyšující se teploty stěny formy na vlastnosti vstříkovaných výrobků lze shrnout do následujících bodů:

- je výhodnější pro lepší reprodukci povrchu tvarové dutiny formy – lesk, dezén, matová úprava,
- zvyšuje délku zatečení taveniny v tokovém kanálu – v dutině formy,
- u amorfních materiálů snižuje obsah vnitřního pnutí,
- u částečně krystalických materiálů zvyšuje krystalinitu a má za následek vznik rovnoměrnější vnitřní struktury,
- zmenšuje dokrystalizaci a dosmrštění,
- zvyšuje odolnost proti tepelné deformaci,
- zvyšuje tuhost, povrchovou tvrdost, odolnost proti otěru,
- zlepšuje kluzné vlastnosti,
- zlepšuje rozměrovou stabilitu,
- snižuje obsah vnitřního pnutí,
- snižuje orientační jevy,
- snižuje odpor proti toku taveniny. [20]

4.2 Vliv teploty na morfologii výstřiku

Morfologie polymerních materiálů, neboli vytváření polykrystalických útvarů při tvrdnutí reálných výrobků zvaných sférolity, závisí jak na strukturních předpokladech, tak na vhodných kinetických podmínkách, které souvisí s pohyblivostí makromolekul nebo jejich částí. Ideální kinematické podmínky závisí především na teplotě a času, který má materiál při tuhnutí k dispozici, tedy na podmínkách teploty vstřikovací formy. Dle výše zmíněných informací je zřejmé, že nejsou-li podmínky tuhnutí ve všech částech výrobku stejné, je krystalizace takového polymeru nerovnoměrná a ze strukturního hlediska vzniká nestejnorodý, anizotropní materiál. [21], [22]



Obr. 16. Morfologie výstřiku z PE Liten MB 77 o tloušťce 2 mm, při různých teplotách teploty. [14]

Na Obr. 16 jsou uvedeny jednotlivé výsledky morfologie výstřiku z PE Liten MB, při různých teplotách teploty. Obrázek a) 20°C, b) 40°C, c) 80°C. Krystalizující polymery nemají v reálných podmínkách technologického zpracování možnost dokonalé krystalizace, proto jsou tyto látky ve skutečnosti semikrystalické, charakteristické stupněm krystalinity, který udává zastoupení krystalických oblastí v polymeru. Pro dosažení vysoké úrovně krystalinity, která se rozšíří až přímo do povrchové vrstvy výstřiku, je nezbytné pracovat s vysokými teplotami formy. [14]

5 MOŽNOSTI MĚŘENÍ TEPLoty DUTINY FORMY A TAVENINY

Pro měření teploty se obvykle používají teplotní snímače, které lze rozdělit na dotykové a bezdotykové.

5.1 Dotykové snímače teploty

5.1.1 Termočláňkové snímače teploty

Tyto snímače jsou složeny ze dvou drátů z různých kovů, které jsou spojeny na jednom konci. Změny teploty na tomto konci způsobují změnu termoelektrické síly mezi dvěma druhými konci. [24]



Obr. 17. Vysokoteplotní termočlánek. [23]

5.1.2 Odporové snímače

Tyto snímače teploty jsou založeny na změně odporu v kovu. Ten s teplotou lineárně vzrůstá, a tím jsou zaznamenávány změny teploty. [24]



Obr. 18. Odporové teploměry. [23]

5.2 Bezdotykové snímače teploty

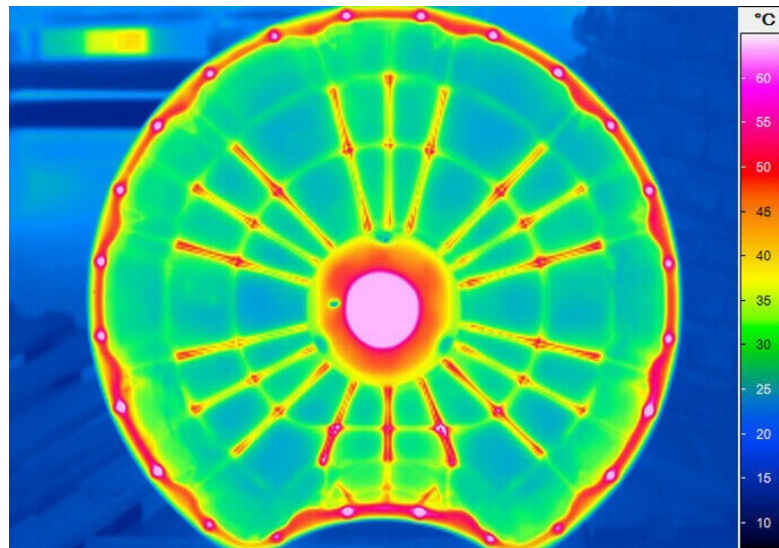
Měření teploty bezdotykovými teploměry je založeno na vyhodnocování tepelného záření těles. Část tepelné energie látek se neustále přeměňuje v energii, kterou tyto látky vysílají ve formě elektromagnetického záření. [24]



Obr. 19. Bezdotykový snímač teploty. [23]

5.3 Návrh měření teplotního pole

K vizualizaci teplot na povrchu výstřiku a povrchu formy lze využít bezdotykového termovizního měření, jehož princip je založen na Stefan-Boltzmanova zákonu, využívajícím tepelné záření sledovaného tělesa. Další možností k vizualizaci teplotního pole jsou simulace.



Obr. 20. Záznam výstřiku termokamerou. [24]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

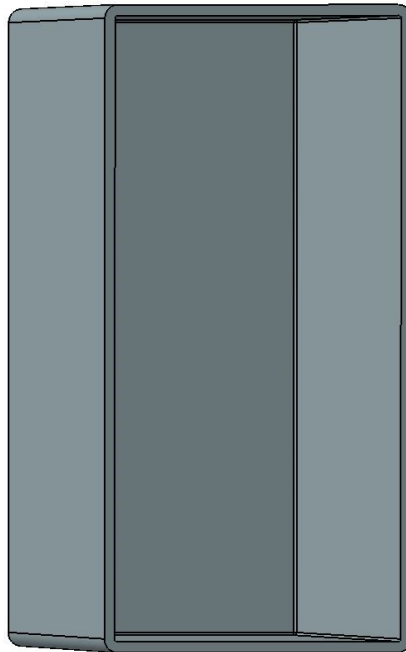
6 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo porovnat vliv vstupních parametrů aktivní (teplota stěny dutiny formy) a pasivní (typ použitého materiálu dutiny formy) teploty na výslednou kvalitu vstříkovaných dílů, především z hlediska výsledné deformace. Reálně naměřené výsledky byly porovnány s výsledky, které byly získány ze simulací provedených v softwaru Autodesk Moldflow. Dále byla zjišťována teplota taveniny během procesu vstříkování, k jejímuž zjištění byly využity IR senzory od firmy Futaba.

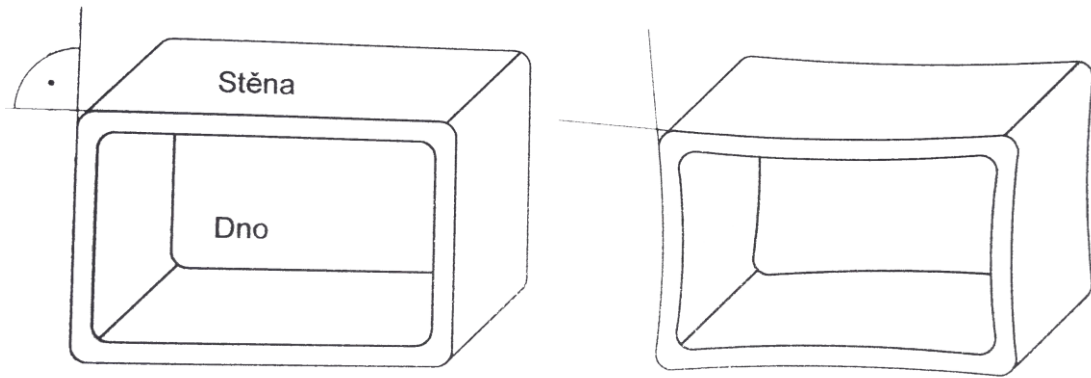
7 TESTOVANÝ DÍL

K testování daných parametrů byl navržen výrobek s rovinnými plochami, které během chladnutí vytváří tzv. krabicový efekt neboli deformace rovinných stěn z důvodu nerovnoměrného chlazení ostrých rohů, ve kterých se stěny dílu stýkají. Venkovní strana rohu je chlazená intenzivněji větším povrchem formy na rozdíl od strany vnitřní, kde tavenina tuhne později. Toto nerovnoměrné chlazení, tuhnutí a smrštění materiálu v rohu dílu způsobí pnutí, které rovněž navržené stěny zbortí směrem dovnitř dílu (Obr. 21). [25]

Jestliže je teplota stěny formy na vnější a vnitřní straně výstřiku různá, materiál ve styku s teplejší stěnou formy bude mít větší smrštění. Jak uvádí (L. Zeman 2009), tohoto jevu je možné využít alespoň k částečné eliminaci deformací. Při tom je nutno mít na paměti, že do výstřiku je tím přiváděno větší vnitřní pnutí. Z tohoto důvodu byl vybrán díl s rovinnými plochami, které jsou ideální pro zjištění velikosti deformací.



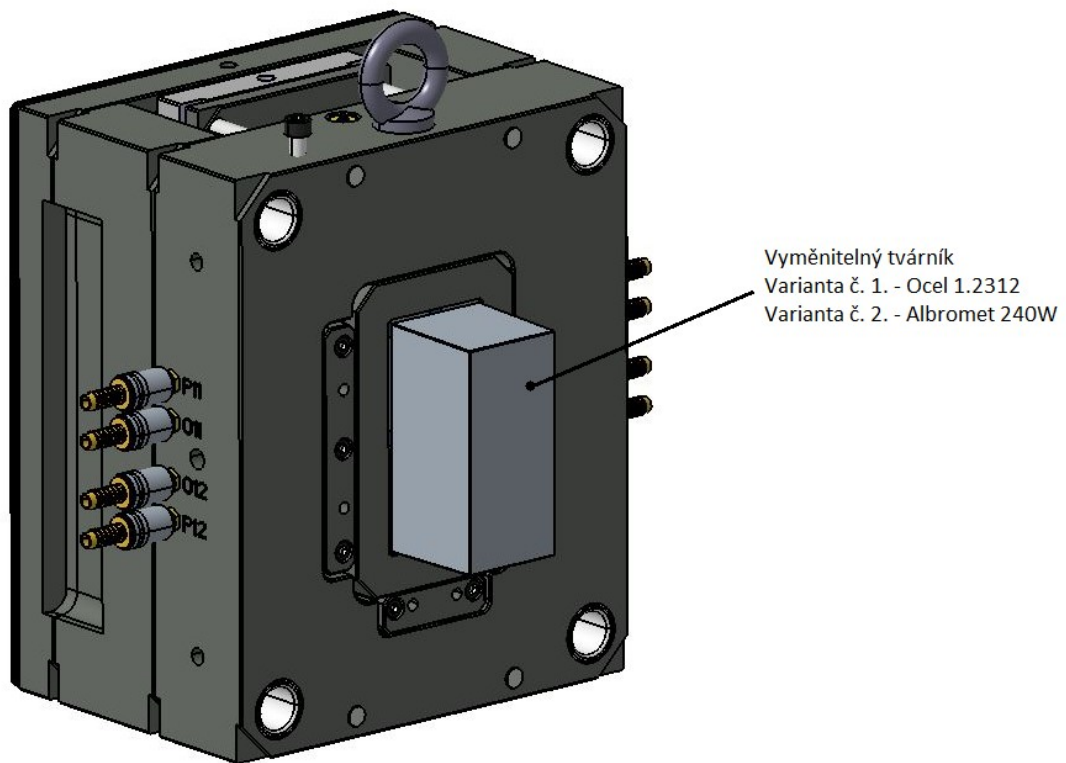
Obr. 21. Model testovaného dílce.



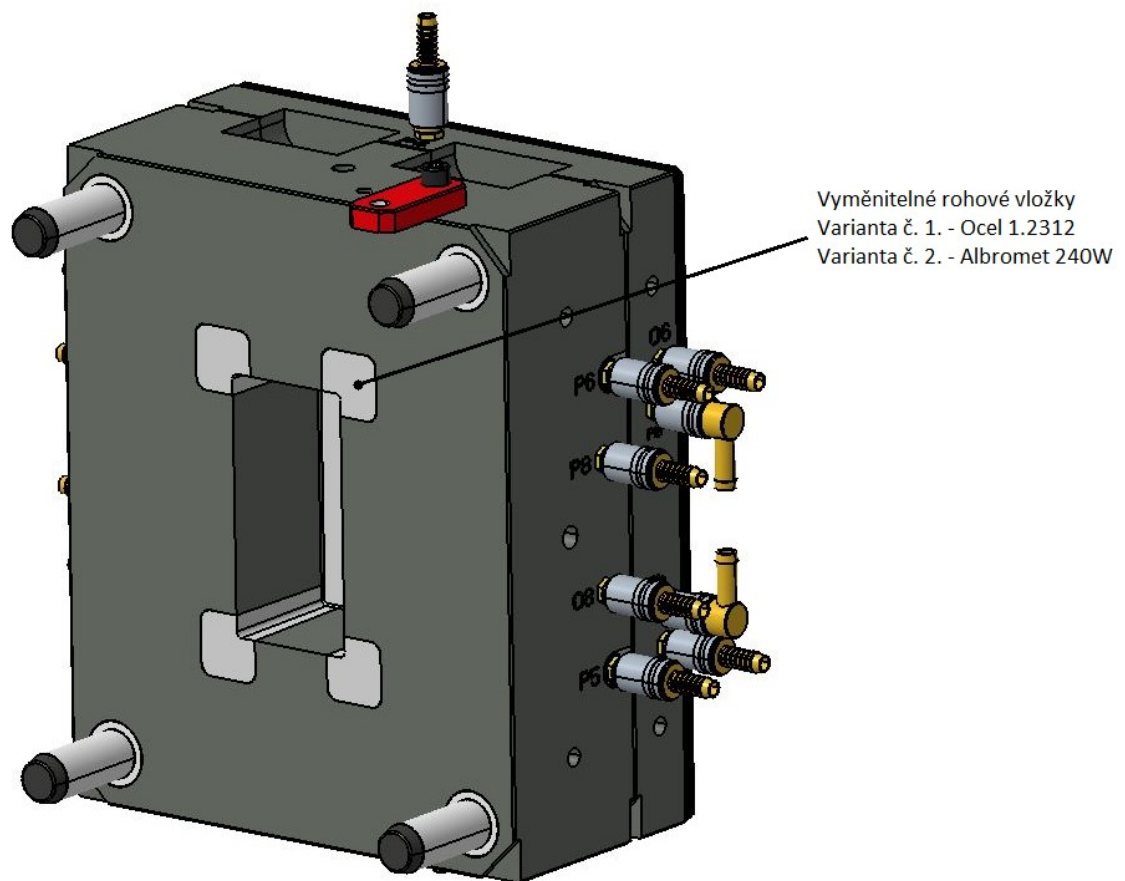
Obr. 22. Deformace stěny výstřiku. [11]

7.1 Výrobní nástroj

Pro výrobu zkušebních vzorků byla použita vstřikovací forma, jejíž model je zobrazen na Obr. 22 a 23. Tato forma byla opatřena výměnným tvárníkem a rohovými vložkami, které byly vyrobeny z oceli 1.2312 a ze slitiny mědi (Albromet 240W). Při vstřikování byly použity kombinace materiálů tvárníku a tvárnice viz Tab. 7 a 10.



Obr. 23. Pohled do levé části vstřikovací formy



Obr. 24. Pohled do pravé části vstříkovací formy

8 POUŽITÉ MATERIÁLY

Na výrobu testovaného dílce byly použity dva typy polymeru: PP-Tiplen R3559 a POM - Hostaform C9021.

8.1 PP – Tiplen R359

Tento typ kopolymeru obsahuje nukleační činidlo a vyznačuje se vysokou transparentností a leskem. TIPPLEN R 359 lze použít jako náhradu za PVC, PS a PET. TIPPLEN R 359 je vhodný pro vstřikování výrobků pro domácnost a kuchyň, kontejnerů, tenkostěnných obalů na kosmetiku a toaletní potřeby. [26]

Tab. 5. Vstřikovací parametry.

Čas vstříku [s]	1,79
Vstřikovací tlak [bar]	900
Vstřikovací rychlost [mm/s]	60
Dotlak [bar]	400
Čas dotlaku [s]	6
Čas chlazení [s]	30
Teplota taveniny [°C]	230

Tab. 6. Teploty pásem plastikační jednotky.

Teplota pod násypkou	60
Teplota v pásmu 1 [°C]	190
Teplota v pásmu 2 [°C]	200
Teplota v pásmu 3 [°C]	220
Tryska [°C]	200

8.2 Návrh měření pro materiál PP.

V Tab. 7 jsou uvedeny jednotlivé kombinace materiálu vložek a teplot formy pro vstřikování materiálu PP. V případě prvního měření byl použit materiál tvárníku a vyměnitelných vložek ocel 1.2311. U druhého měření byl použit materiál tvárníku a vyměnitelných vložek ocel 1.2311 a Albromet 240W. U těchto dvou variant bylo provedeno reálné měření a také simulace. U poslední varianty byl použit materiál tvárníku Albromet 240W a materiál vložek ocel 1.2312. V případě této varianty byla provedena pouze simulace.

Tab. 7. Tabulka materiálu vložek a teploty formy pro PP.

Použitý materiál	Materiál vložek		Teplota formy [°C]		Simulace	Reálné měření
	Tvárník	Vyměnitelné vložky	Tvárník	Tvárnice		
PP	Ocel 1.2312	Ocel 1.2312	30	30	•	•
			50	50	•	•
			70	70	•	•
			30	50	•	•
			30	70	•	•
PP	Ocel 1.2312	Albromet 240W	30	30	•	•
			50	50	•	•
			70	70	•	•
			30	50	•	•
			30	70	•	•
PP	Albromet 240W	Ocel 1.2312	30	30	•	-
			50	50	•	-
			70	70	•	-
			30	50	•	-
			30	70	•	-

8.3 POM – Hostaform C9021

Polyoxymethylenový kopolymer Hostaform se vyznačuje spojením vynikající odolnosti proti oděru, odolnosti proti dlouhodobé únavě, houževnatosti a odolnosti proti krípu na jedné straně a výborné odolnosti vůči vlhkosti, rozpouštědlům a silným alkáliím na druhé straně. [27]

Tab. 8 Vstřikovací parametry.

Čas vstříku [s]	1,75
Vstřikovací tlak [bar]	900
Vstřikovací rychlost [mm/s]	60
Dotlak [bar]	400
Čas dotlaku [s]	6
Čas chlazení [s]	30
Teplota taveniny [°C]	210

Tab. 9 Teploty pásem plastikační jednotky.

Teplota pod násypkou	60
Teplota v pásmu 1 [°C]	180
Teplota v pásmu 2 [°C]	195
Teplota v pásmu 3 [°C]	200
Tryska [°C]	205

8.4 Návrh měření pro materiál POM.

V Tab. 10 jsou uvedeny jednotlivé kombinace materiálu vložek a teplot formy pro vstřikování materiálu POM. Jednotlivé kombinace materiálů tvárníku a vyměnitelných vložek jsou stejné jako při vstřikování materiálu PP. I zde bylo v případě prvních dvou variant provedeno reálné měření i simulace. U varianty č. 3 byla provedena simulace bez reálného ověření.

Tab. 10. Tabulka materiálu vložek a teploty formy pro POM.

Vstřikovaný materiál	Materiál vložek		Teplota formy [°C]		Simulace	Reálné měření
	Tvárník	Vyměnitelné vložky	Tvárník	Tvárnice		
POM	Ocel 1.2312	Ocel 1.2312	60	60	•	•
			90	90	•	•
			120	120	•	•
			60	90	•	•
			60	120	•	•
POM	Ocel 1.2312	Albromet 240W	60	60	•	•
			90	90	•	•
			120	120	•	•
			60	90	•	•
			60	120	•	•
POM	Albromet 240W	Ocel 1.2312	60	60	•	-
			90	90	•	-
			120	120	•	-
			60	90	•	-
			60	120	•	-

9 TESTOVANÉ PARAMETRY

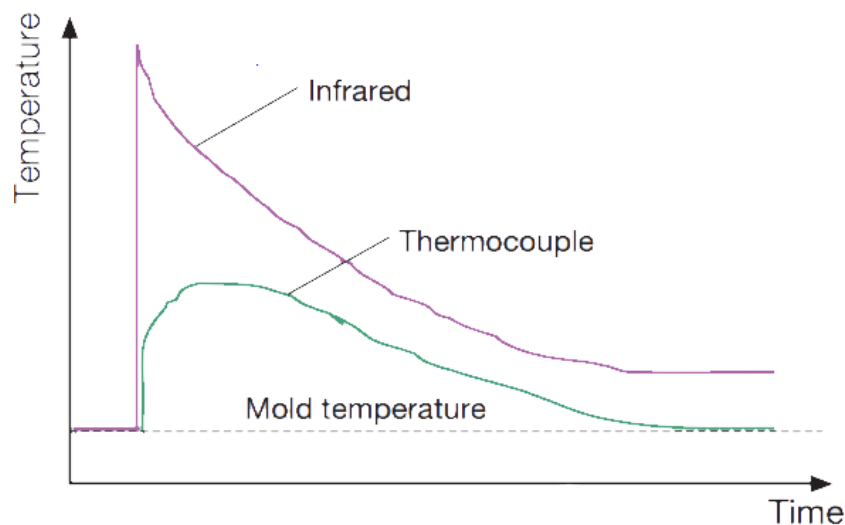
9.1 Teplota taveniny během procesu vstřikování

Během celého procesu vstřikování byla zaznamenávána teplota taveniny v dutině formy pomocí moderních teplotních čidel FUTABA EPT-001S, které jsou schopné zaznamenávat teplotu každou 1 m/s. Tyto čidla pracují na principu zaznamenávání infračerveného záření.



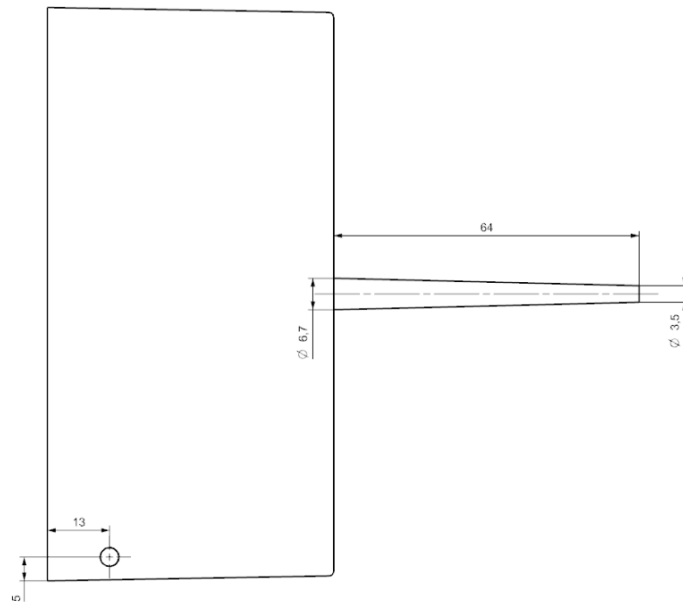
Obr. 25. Měřicí zařízení FUTABA EPT-001S. [29]

Na Obr. 26 je uveden rozdíl měření teploty taveniny při použití termočlávkových měřidel a zařízení pracujících na principu zaznamenávání pomocí infračerveného záření. Jelikož tyto zařízení dokáží zaznamenat teplotu v menším časovém intervalu, jsou tyto výsledky daleko přesnější.



Obr. 26. Rozdíl zaznamenávání teploty pomocí IR senzorů. [29]

9.1.1 Umístění senzorů

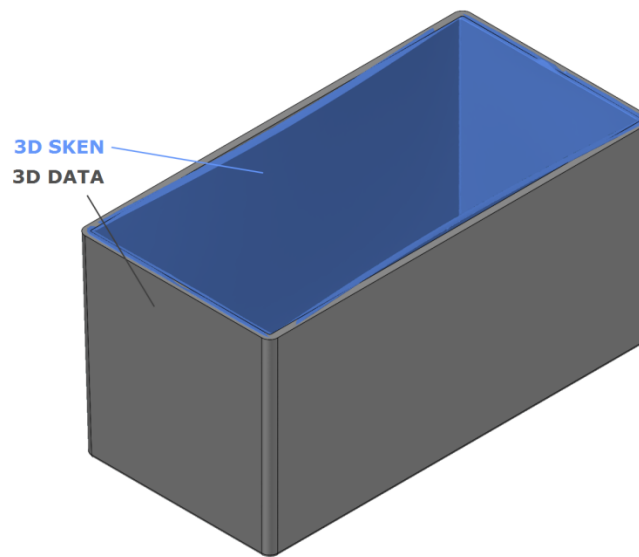


Obr. 27. Pozice pro měření teploty taveniny - č. 1 a rozměry upraveného vtoku.

Tyto senzory byly umístěny s ohledem na výměnné rohové vložky tvárnice formy tak, aby zaznamenávaly teplotu taveniny právě v místech, kde jsou použity vložky z běžné oceli a také z vysoko tepelně vodivého materiálu.

9.2 Deformace

U každého výstříku byla zaznamenávána velikost deformace neboli rozdíl tvaru výstříku, oproti CAD modelu. Po vyjmutí dílce z formy a následném vychladnutí byly všechny výrobky naskenovány pomocí 3D Skeneru ATOS, a dále porovnány. Tyto deformace se zásadně měnily, a to vlivem různých teplot formy a materiálu vložek.



Obr. 28 Porovnání 3D skenu a 3D modelu.

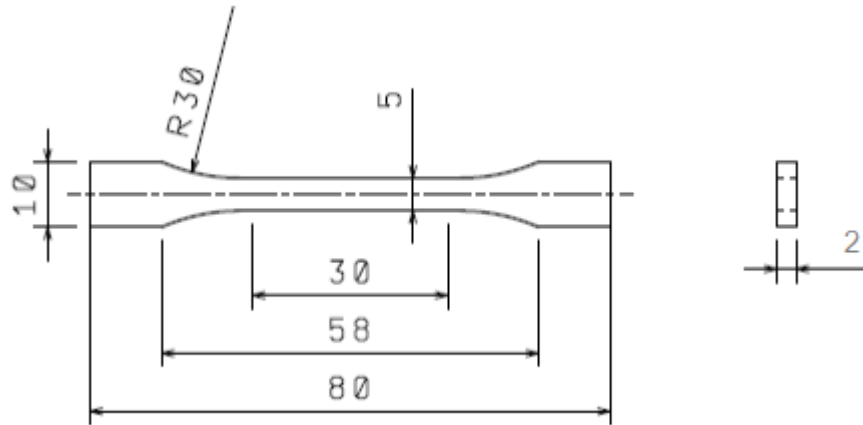
9.3 Statická zkouška tahem

Podstatou této zkoušky je protahování tělesa ve směru své hlavní osy konstantní rychlostí. Těleso je natahováno až do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu nebo protažení dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení.

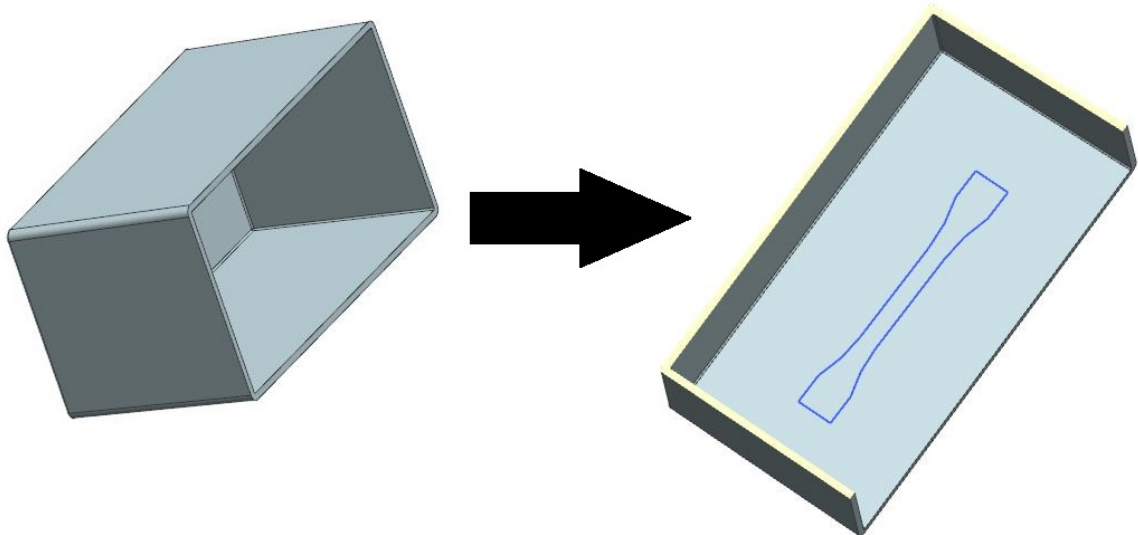
Pro samotné zkoušení se používají tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 1A a 1B. Pokud z nějakého důvodu nelze použít zkušební tělesa typu 1, mohou být použita zkušební tělesa typu 1BA a 1BB, které jsou tvarově úměrná typu 1B, s redukčním faktorem 1:2 a 1:5. Pro stanovení tahových vlastností byly použity zkušební vzorky typu 1BA.

9.3.1 Výroba zkušebních vzorků typu 1BA.

Zkušební vzorky pro statickou zkoušku tahem byly vyrobeny z vystříknutých testovaných dílů. Tyto díly byly rozděleny na dvě poloviny. Dále byl z každé poloviny vyroben jeden zkušební vzorek typu 1BA.



Obr. 29. Rozměry zkušebního tělesa.



Obr. 30. Výroba zkušebních vzorků.

9.4 Morfologie

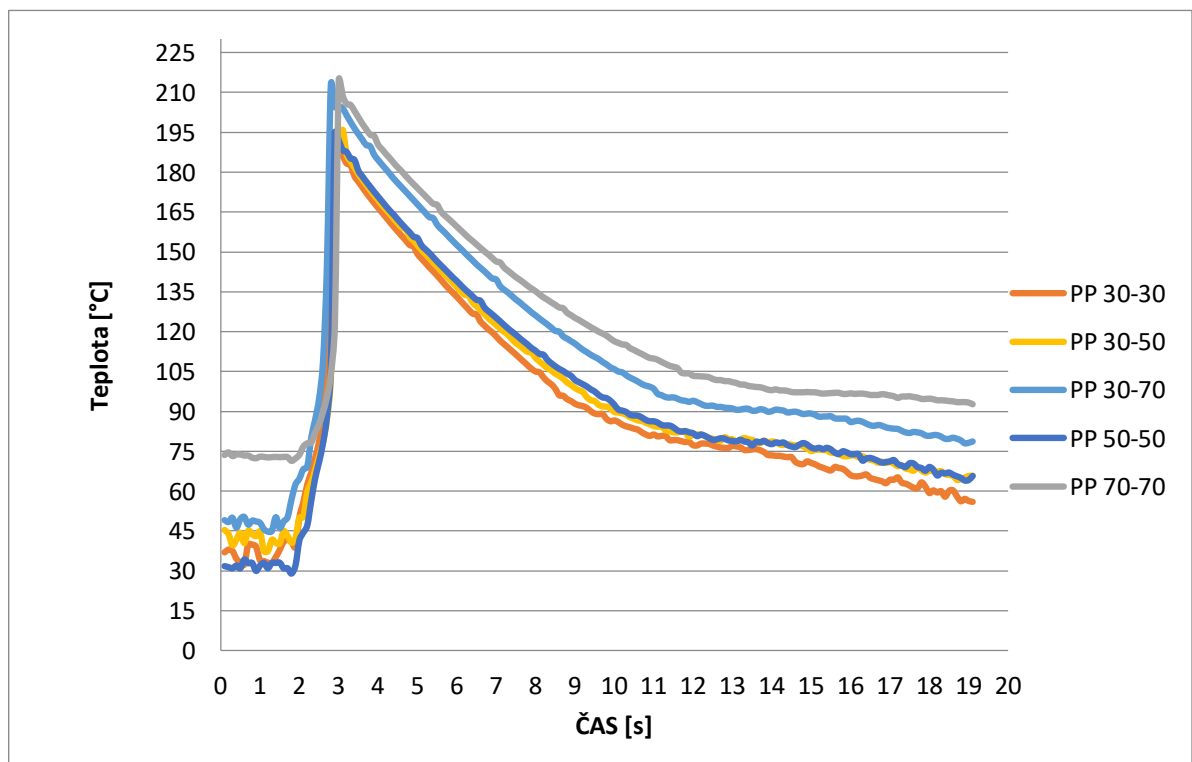
Míru uspořádanosti ve struktuře vyjadřujeme tzv. stupněm krystalinity. Stupeň krystalinity tedy udává relativní podíl krystalických oblastí ve hmotě. Pro vznik semikrystalické struktury je nutná tvorba krystalických zárodků, na nichž teprve poté rostou krystality. K nukleaci dochází při ochlazování taveniny, která má amorfni strukturu.

10 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Během celého procesu vstřikování byla zaznamenávána teplota taveniny v dutině formy pomocí teplotních čidel.

10.1 Teplota taveniny v průběhu vstřikování

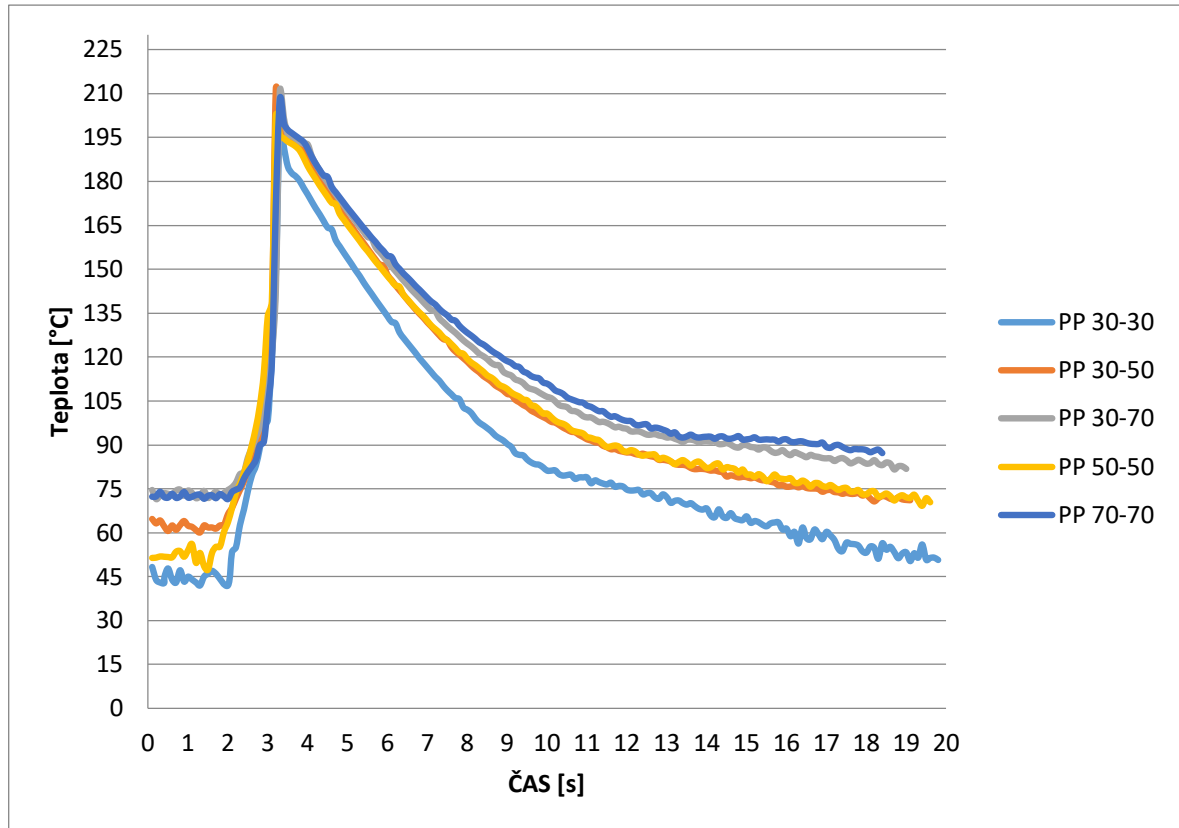
10.1.1 Materiál PP, materiál vložek ocel - ocel.



Obr. 31. Závislost teploty taveniny na době chlazení.

Na Obr. 31 lze vidět závislost teploty taveniny v dutině formy během vstřikovacího procesu na čase. V tomto případě byl vstřikovaný materiál PP. Nejrychlejšího odvodu tepla bylo dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice na 30 °C, naopak nejdelšího potřebného času pro ochlazení bylo dosaženo při teplotě formy na 70 °C. V čase 10 sekund byl rozdíl teploty taveniny u těchto dvou kombinací teploty 23,9 °C.

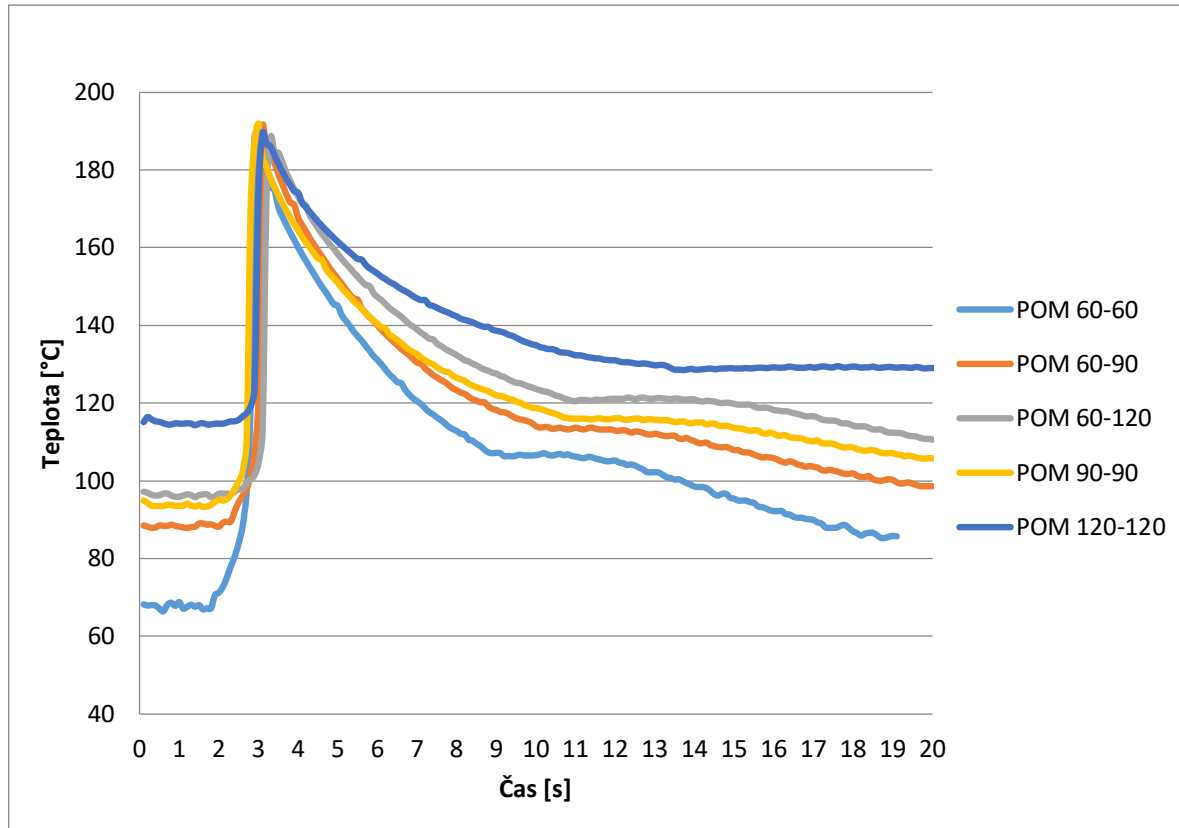
10.1.2 Materiál PP, materiál vložek ocel – Albromet 240W.



Obr. 32. Závislost teploty taveniny na době chlazení.

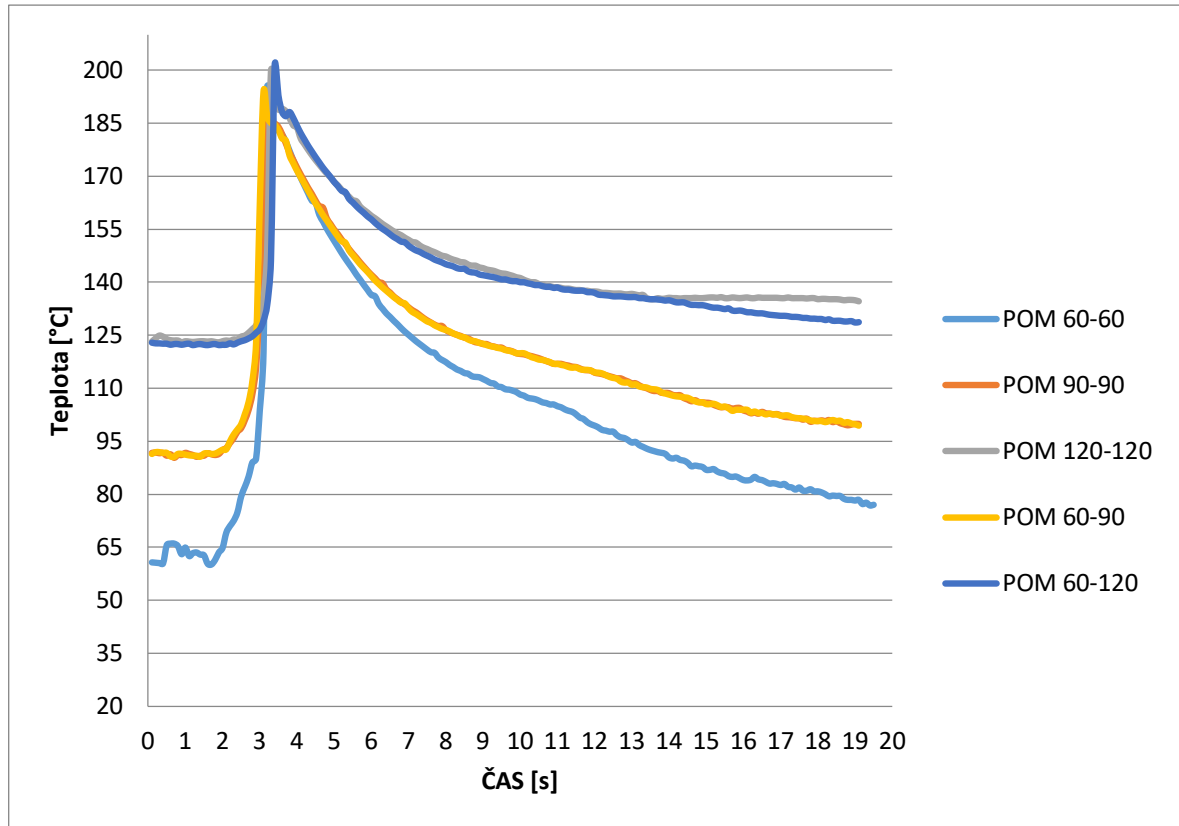
V tomto případě měření byly použity rohové vložky ze slitiny mědi. Na Obr. 32 lze vidět závislost teploty taveniny v dutině formy během vstřikovacího procesu na čase. V tomto případě byl vstřikovaný materiál PP. Nejrychlejšího odvodu tepla bylo dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice na 30 °C, naopak nejdelšího potřebného času pro ochlazení bylo dosaženo při teplotě formy na 70 °C. V čase 10 sekund byl rozdíl teploty taveniny u těchto dvou kombinací teploty 28,8 °C.

10.1.3 Materiál POM, materiál vložek ocel – ocel.



Obr. 33. Závislost teploty taveniny na době chlazení.

Na Obr. 33. lze vidět závislost teploty taveniny v dutině formy během vstřikovacího procesu na čase. V tomto případě byl vstřikován materiál POM. Nejrychlejšího odvodu tepla bylo dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice na 60 °C, naopak nejdelšího potřebného času pro ochlazení bylo dosaženo při teplotě formy na 120 °C. V čase 10 sekund byl rozdíl teploty taveniny u těchto dvou kombinací teploty 28,3 °C.

10.1.4 Materiál POM, materiál vložek Abromet W240 - ocel.

Obr. 34. Závislost teploty taveniny na době chlazení.

Na Obr. 34 lze vidět závislost teploty taveniny v dutině formy během vstřikovacího procesu na čase. V tomto případě byl vstřikovaný materiál POM. Nejrychlejšího odvodu tepla bylo dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice na 60 °C, naopak nejdelšího potřebného času pro ochlazení bylo dosaženo při teplotě formy na 120 °C. V čase 10 sekund byl rozdíl teploty taveniny u těchto dvou kombinací teploty 32,1 °C.

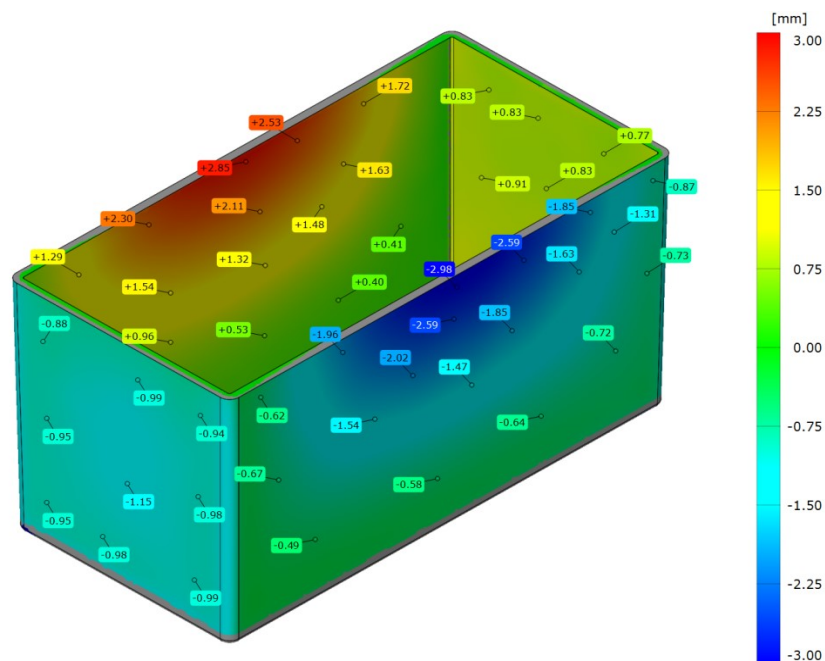
10.2 Deformace

10.2.1 Skutečné výsledky pro materiál PP, materiál vložek ocel – ocel.

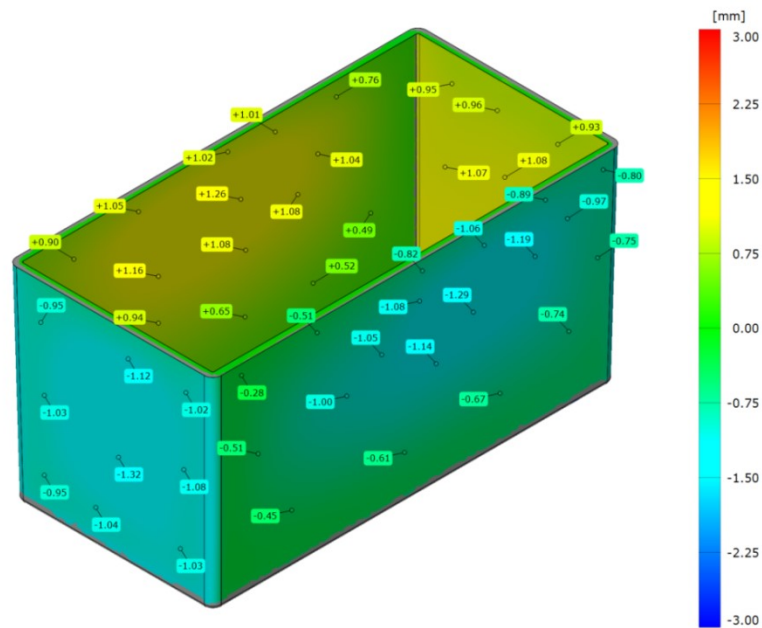
Tab. 11. Výsledky deformací pro materiál PP.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
30	30	2,85	1,06
50	50	3,04	1,02
70	70	2,79	1,11
30	50	1,64	1,03
30	70	1,31	1,15

V Tab. 13 jsou uvedeny velikosti deformací v ose x a y při různých teplotách tvárníku a tvárnice. Největších deformací dosáhl výrobek při teplotě na 50 °C. Tyto deformace dosáhly na ose x 3,04 mm a na ose y 1,11 mm (Obr. 35). Nejmenších deformací bylo dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice na 30 a 70 °C. Tyto hodnoty dosahovaly na ose x 1,31 mm a na ose y 1,15 mm (Obr. 36).



Obr. 35. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem, teplota 50 a 50 °C.



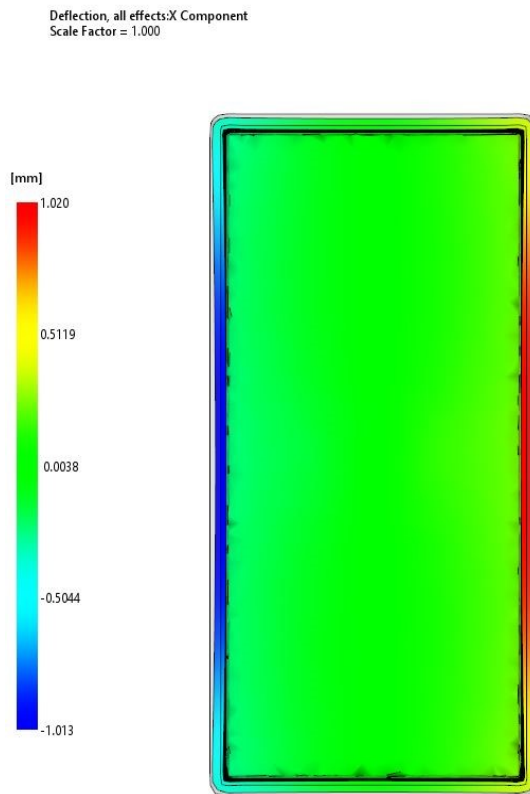
Obr. 36. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem, teploty 30 a 70 °C.

10.2.2 Výsledky simulací pro materiál PP, materiál vložek ocel – ocel.

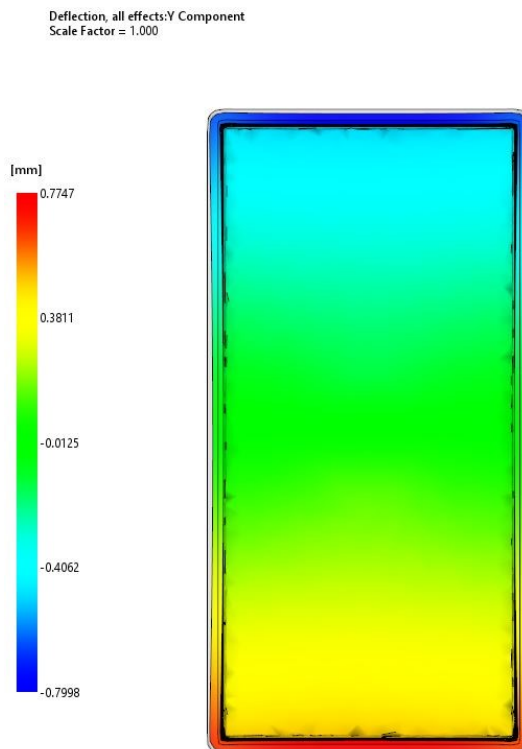
Tab. 12. Výsledky deformací pro materiál PP.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
30	30	1,02	0,79
50	50	0,96	0,79
70	70	0,97	0,79
30	50	0,85	0,78
30	70	0,65	0,77

Pro porovnání měření byly navrženy simulace procesu vstřikování v programu Autodesk Moldflow 2016. Z Tab. 14 je zřejmé, že při teplotě tvárníku a tvárnice na stejnou teplotu docházelo k větším deformacím než při kombinaci teplot. Změna teploty formy zapříčinila pokles deformace o 37,3 %. Hodnoty simulací se liší od hodnot naměřených, jelikož v simulacích jsou měřeny hodnoty deformace ihned po vyhození výrobku z formy a jsou zanedbány dodatečné deformace. I tak lze pozorovat postupné zmenšení deformace v závislosti na teplotě formy.



Obr. 37. Velikost deformace v ose x , teplota 30 a 30 °C.



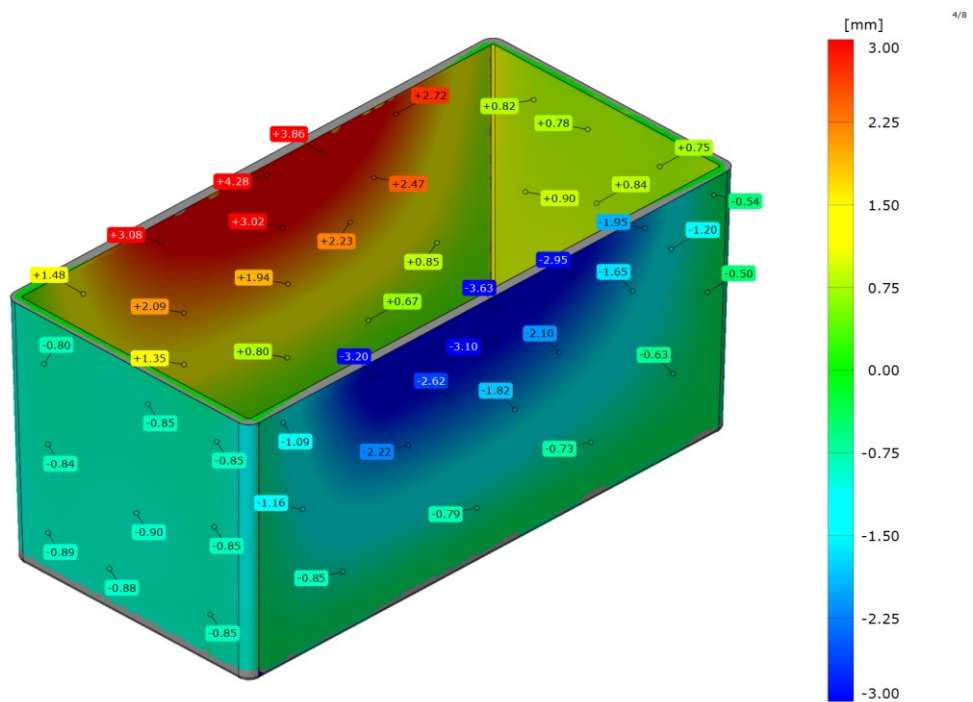
Obr. 38. Velikost deformace v ose y , teplota 30 a 30 °C.

10.2.3 Skutečné výsledky pro materiál PP, materiál vložek ocel – Albromet W240.

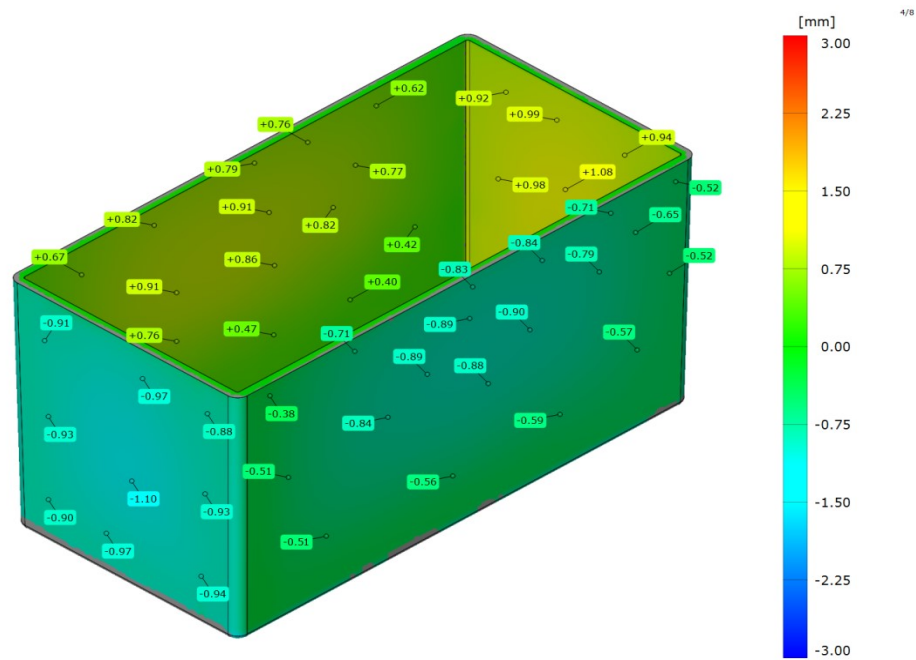
Tab. 13. Výsledky deformací pro materiál PP.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
30	30	2,32	0,94
50	50	2,38	1,09
70	70	4,39	0,90
30	50	1,90	1,05
30	70	0,94	1,10

V případě tohoto měření byly použity vyměnitelné rohové vložky z materiálu Albromet W240. Průběh deformací byl podobný jako při použití vložek z oceli. Největší deformace bylo dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice na 70 °C. Tyto hodnoty dosáhly na ose x 4,39 mm a na ose y 0,90 mm (Obr. 39). Výsledek nejmenší deformace oproti předchozímu měření byl v ose x o 0,37 mm menší a v ose y o 0,05 mm. Tohoto výsledku bylo dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice na 30 a 70 °C (Obr. 40).



Obr. 39. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem, teplota 70 a 70 °C.



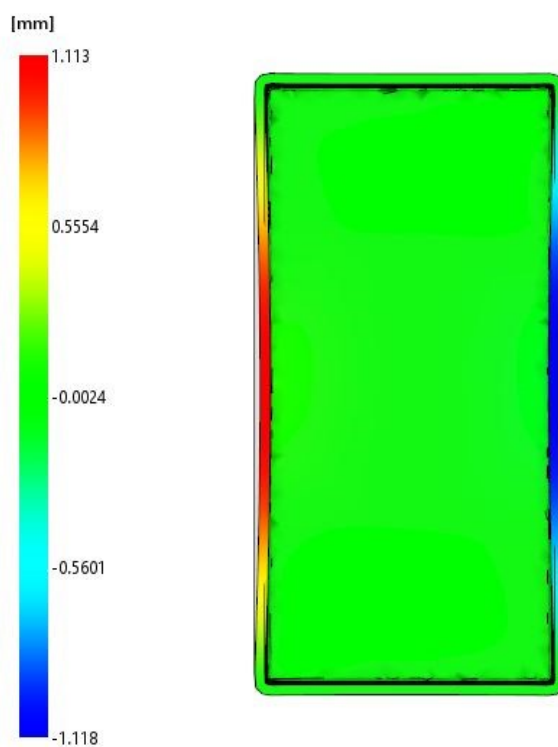
Obr. 40. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem, teplota 30 a 70 °C.

10.2.4 Výsledky simulací pro materiál PP, materiál vložek ocel – Albromet W240.

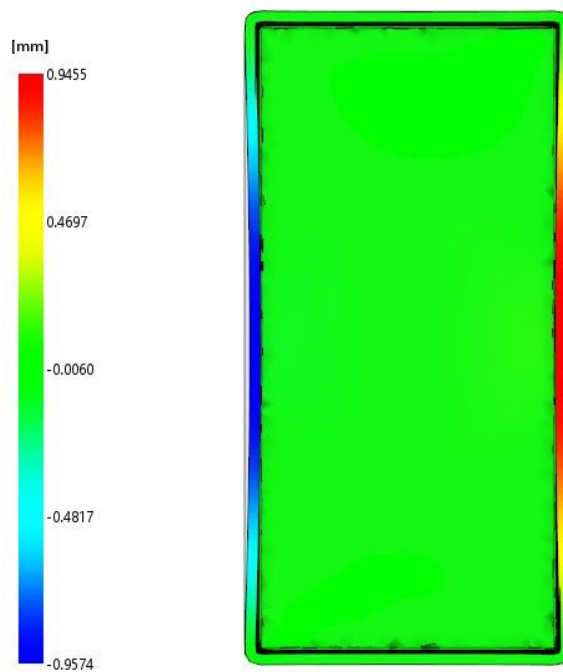
Tab. 14. Výsledky deformací pro materiál PP.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
30	30	1,07	0,08
50	50	0,95	0,08
70	70	0,97	0,09
30	50	1,07	0,07
30	70	1,11	0,08

Při simulování vstřikovacího procesu za použití vyměnitelných vložek docházelo k velkým rozdílům oproti skutečným výsledkům. V Tab. 16 můžeme vidět, že výsledky deformací nebyly změnou teploty formy nijak zásadně ovlivněny. Největších deformací bylo dosaženo při teplotě tvárníku na 30 °C a teplotě tvárnice na 70 °C. Hodnoty těchto deformací dosahovaly v ose x 1,11 mm a v ose y 0,08 mm (Obr. 41). Nejmenších deformací bylo dosaženo při teplotě formy na 50 °C. Hodnoty těchto deformací dosahovaly v ose x 0,95 mm a v ose y 0,08 mm (Obr. 42).



Obr. 41. Velikost deformace v ose x , teplota 30 a 70 °C.



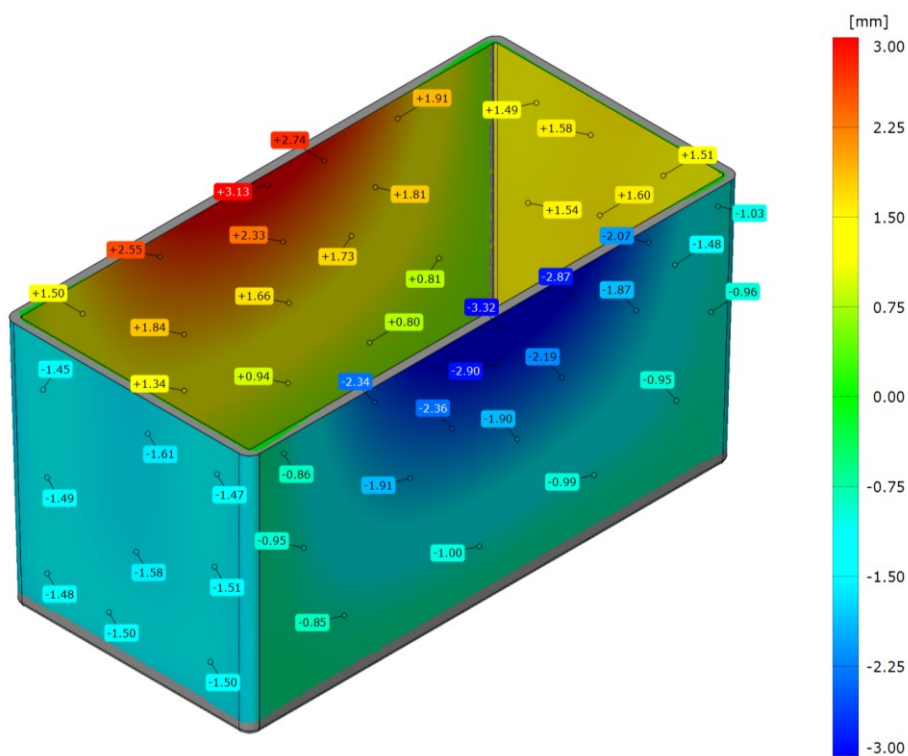
Obr. 42. Velikost deformace v ose x , teplota 50 a 50 °C.

10.2.5 Skutečné výsledky pro materiál POM, materiál vložek ocel – ocel.

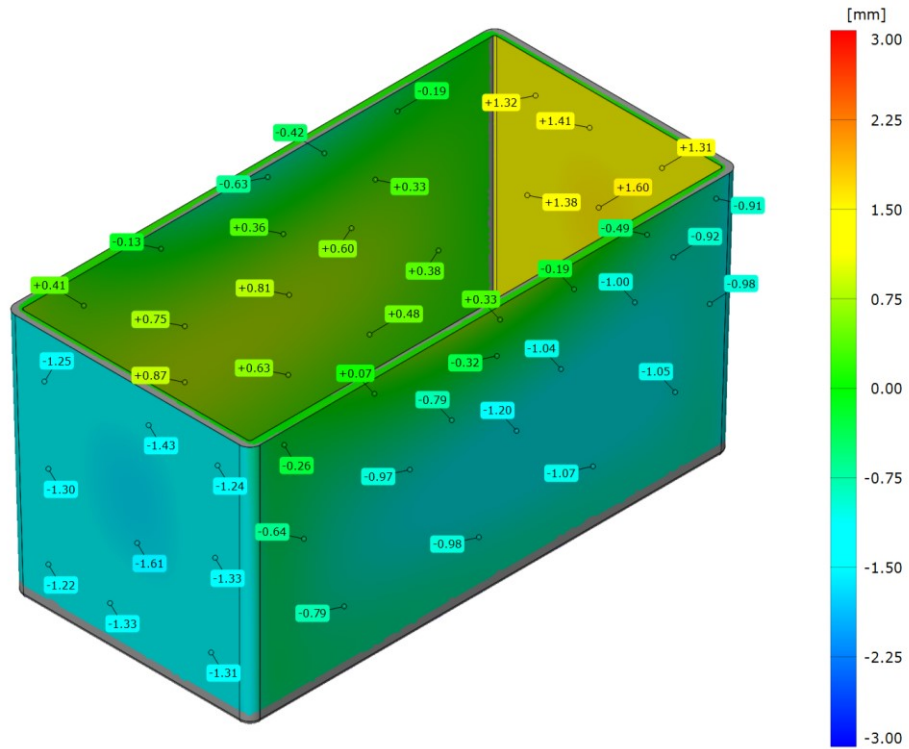
Tab. 15. Výsledky deformací pro materiál POM.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
60	60	2,39	1,19
90	90	2,48	1,44
120	120	3,45	1,63
60	90	1,26	1,26
60	120	1,20	1,61

U tohoto měření byl použit vstřikovaný materiál polyoxymethylen. Podobně jako u vstřikování polypropyleny docházelo k největším deformacím při teplotě tvárníku a tvárnice na teplotu 120 °C. V tomto případě dosahovaly největší deformace na ose x 3,45 mm a na ose y 1,63 mm (Obr. 43). V případě teploty tvárníku na 60 °C a tvárnice na 120 °C byla velikost deformace v ose x zmenšena o 65,2 % (Obr. 44).



Obr. 43. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem, teplota 120 a 120 °C.



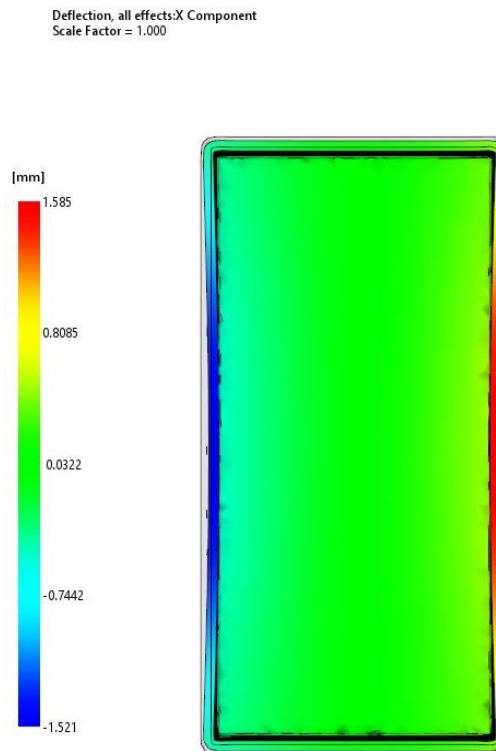
Obr. 44. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem, teplota 60 a 120 °C.

10.2.6 Výsledky simulací pro materiál POM, materiál vložek ocel – ocel

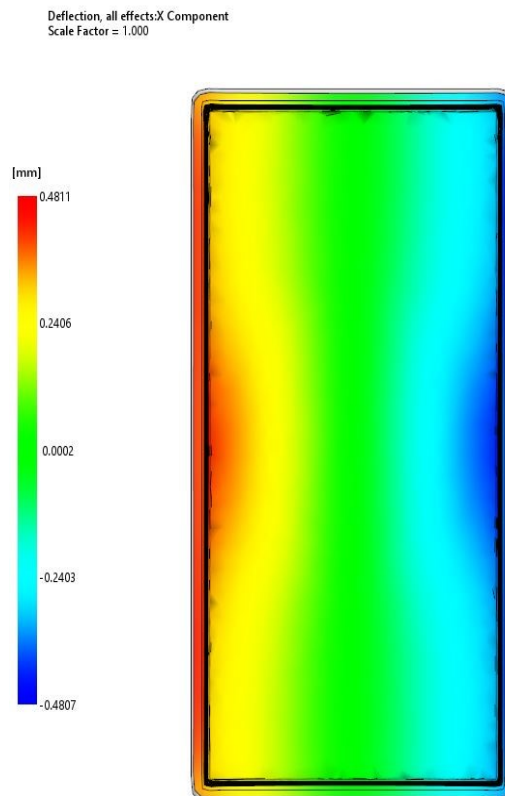
Tab. 16. Výsledky deformací pro materiál POM.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
60	60	0,94	0,81
90	90	0,96	0,83
120	120	1,58	1,05
60	90	0,69	0,81
60	120	0,48	0,85

Stejně jako u skutečných výsledků, i simulace potvrdily, že největší deformací výrobek dosahuje při teplotě formy na 120 °C (Obr. 45). Nejmenších deformací bylo dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice na 60 a 120 °C (Obr. 46). Tyto deformace dosahovaly na ose x 0,48 mm a na ose y 0,85 mm.



Obr. 45. Velikost deformace v ose x , teplota 120 a 120 °C.



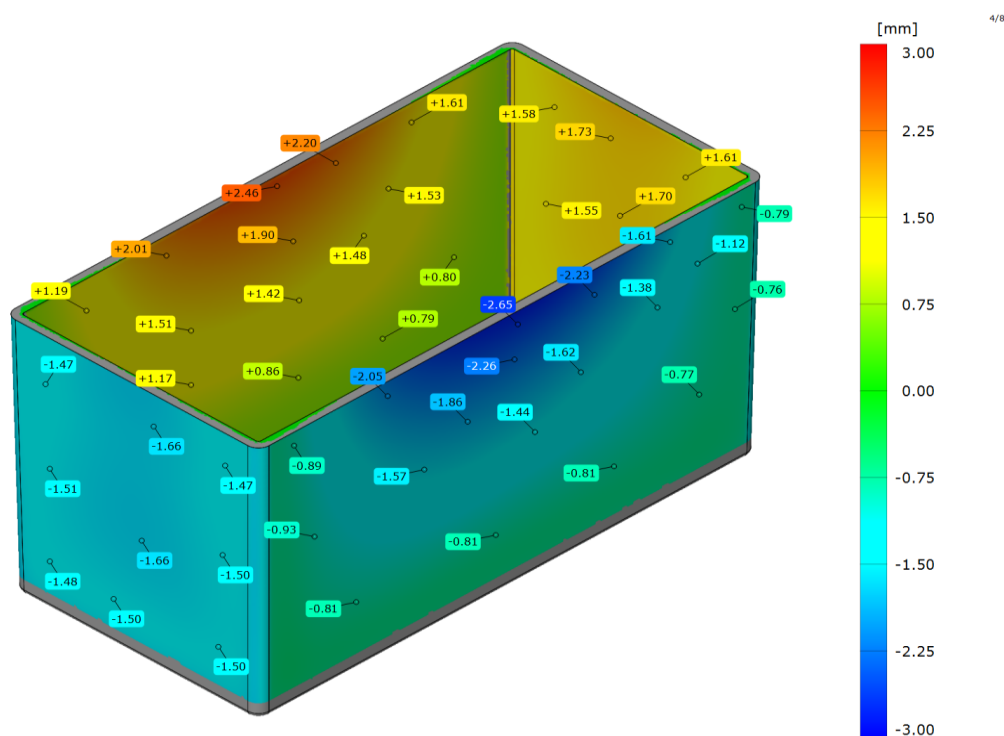
Obr. 46. Velikost deformace v ose x , teplota 60 a 120 °C.

10.2.7 Skutečné výsledky pro materiál POM, materiál vložek Albromet W240 – ocel.

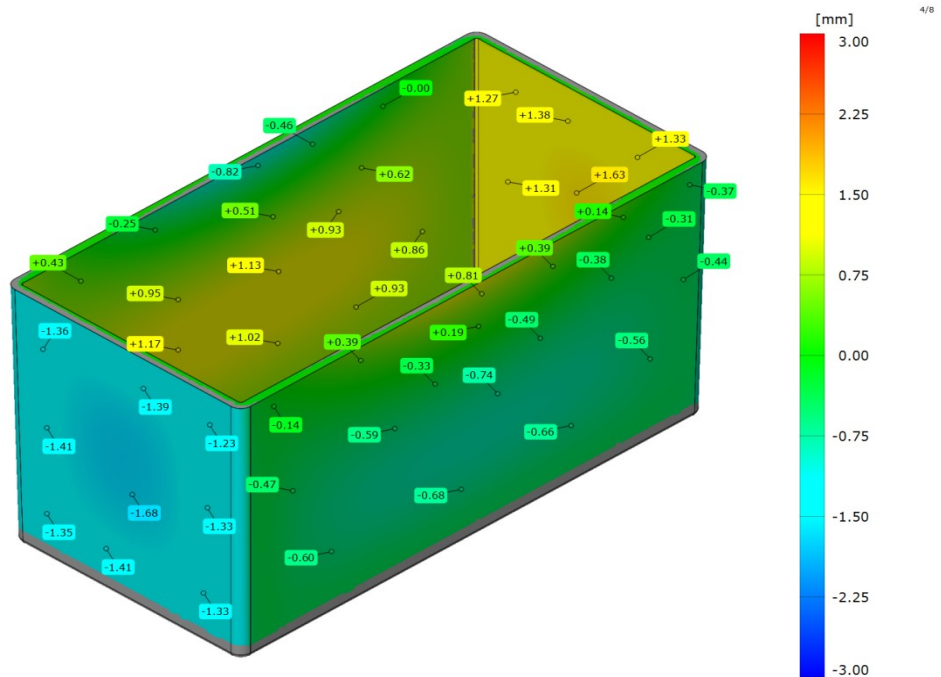
Tab. 17. Výsledky deformací pro materiál POM.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
60	60	2,22	1,21
90	90	2,54	1,35
120	120	2,77	1,66
60	90	1,21	1,32
60	120	1,16	1,68

Z Tab. 19 je zřejmé, že velikost deformací byla nejvyšší při teplotě tvárníku a tvárnice na 120 °C (Obr. 47). Tyto deformace dosáhly na ose x 2,77 mm a na ose y 1,66 mm. Nejmenší deformace na ose x bylo dosaženo při teplotě tvárníku na 60 °C a tvárnice na 120 °C (Obr. 48). Tato deformace byla menší o 58,1 %.



Obr. 47. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem, teplota 120 a 120 °C.



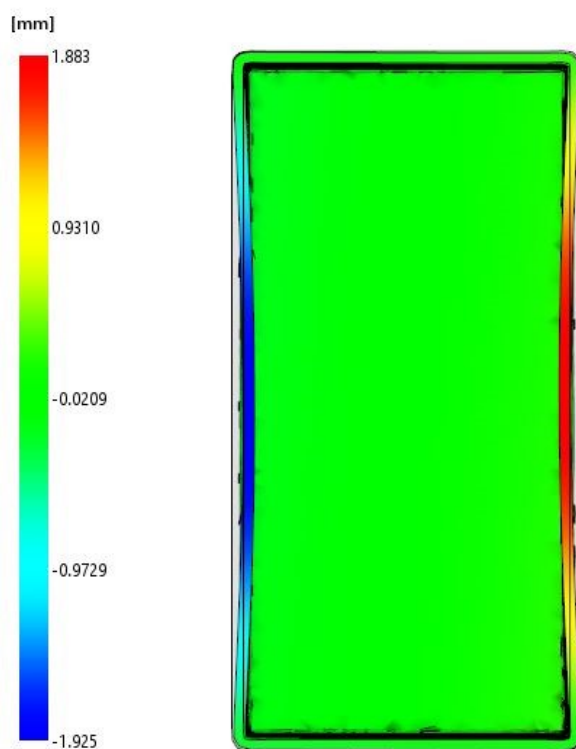
Obr. 48. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem, teplota 60 a 120 °C.

10.2.8 Výsledky simulací pro materiál POM, materiál vložek Albromet W240 – ocel.

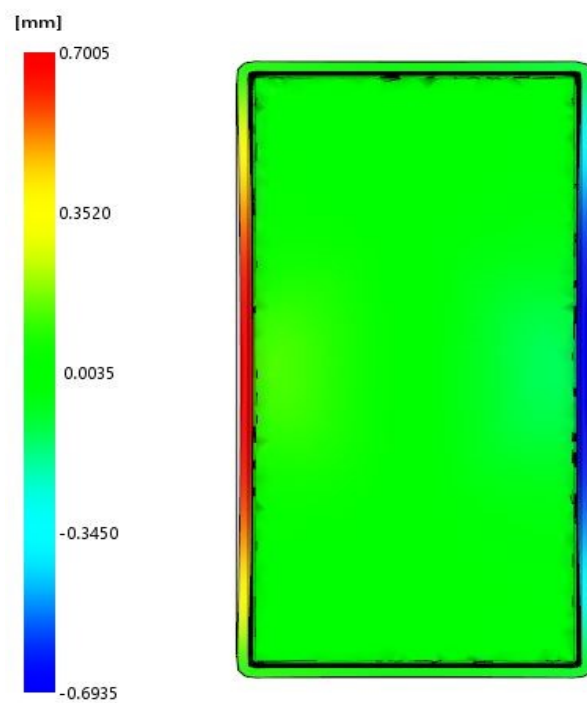
Tab. 18. Výsledky deformací pro materiál POM.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
60	60	0,74	0,19
90	90	0,82	0,18
120	120	1,92	0,51
60	90	0,70	0,17
60	120	0,74	0,29

Z Tab. 20 je zřejmé, že velikost deformací byla nejvyšší při teplotě tvárníku a tvárnice na 120 °C (Obr. 49). Tyto deformace dosáhly na ose x 1,92 mm a na ose y 0,51 mm. Nejmenší deformace na ose x bylo dosaženo při teplotě tvárníku na 60 °C a tvárnice na 90 °C (Obr. 50). Tato deformace byla menší o 61,4 %.



Obr. 49. Velikost deformace v ose x , teplota 120 a 120 °C.



Obr. 50. Velikost deformace v ose x , teplota 60 a 90 °C

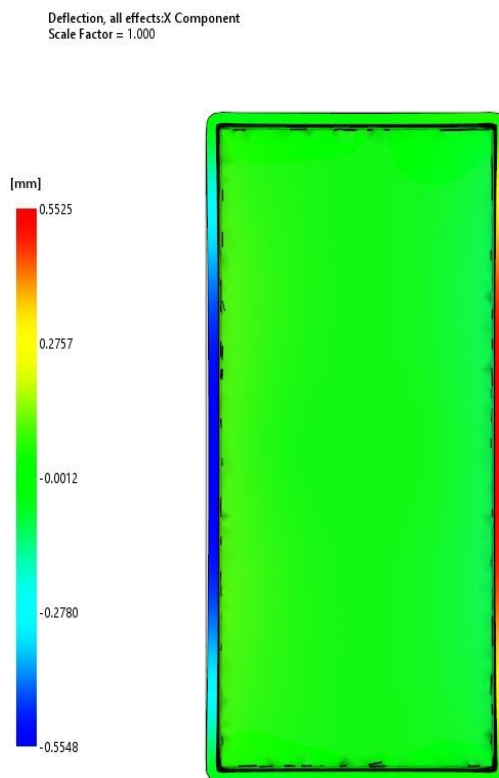
Pro další porovnání deformací byly vytvořeny simulace, při kterých byl nadefinován celý tvárník z materiálu Albromet W240.

10.2.9 Výsledky simulací pro materiál PP, materiál vložek Albromet W240 – ocel.

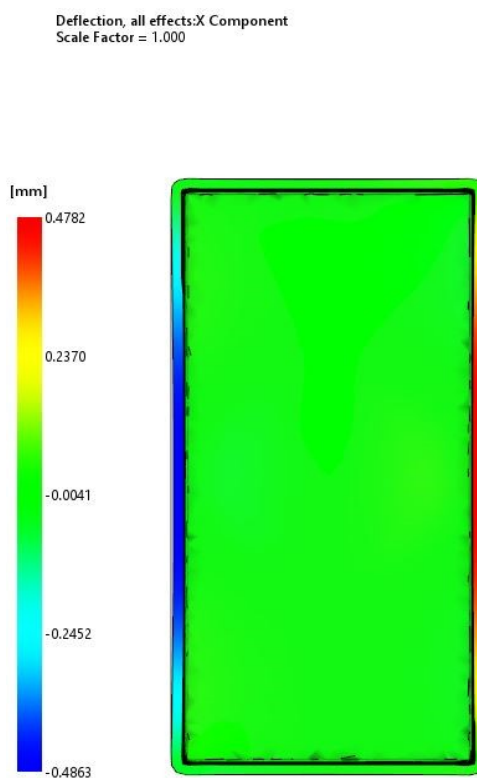
Tab. 19. Výsledky deformací pro materiál PP.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
30	30	0,55	0,23
50	50	0,55	0,17
70	70	0,59	0,12
30	50	0,52	0,18
30	70	0,48	0,12

Při použití tvárníku vyrobeného z materiálu Albromet W240 bylo dosaženo menších deformací, než při použití běžné oceli a při použití vyměnitelných vložek. Tyto deformace byly zmenšeny téměř na polovinu, a to díky rychlejšímu odběru tepla z dutiny formy. Zároveň se také zkrátil čas chlazení, což má zásadní vliv na výslednou cenu výrobku.

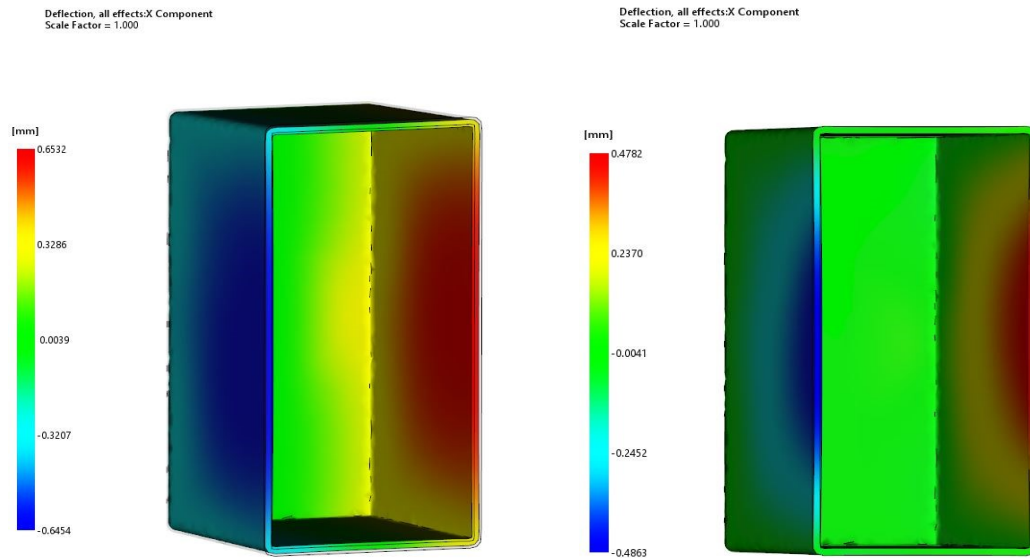


Obr. 51. Velikost deformace v ose x , teplota 30 a 30 °C.



Obr. 52. Velikost deformace v ose x , teplota 30 a 70 °C.

Na Obr. 53 můžeme vidět rozdíl vzniku deformací při použití tvárníku z běžné oceli (vlevo) a při použití materiálu s větší tepelnou vodivostí (vpravo). Díky rychlejšímu odběru tepla z dutiny formy dochází k deformacím pouze na okrajích vstřikovaného dílce, což mu zaručuje větší rozměrovou přesnost.



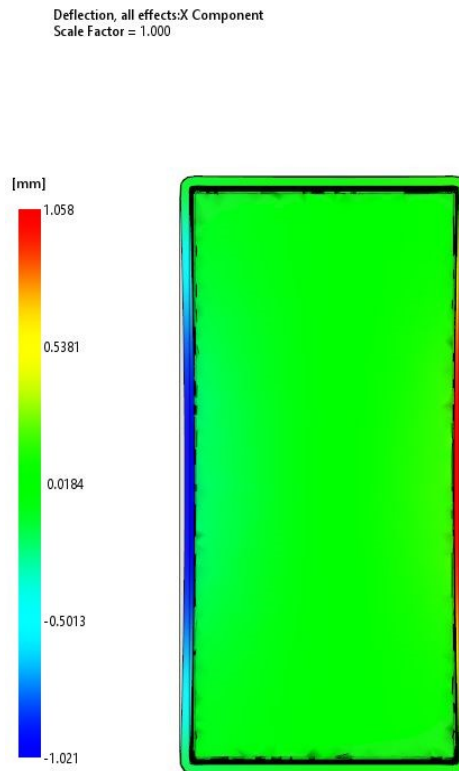
Obr. 53. Rozdíl vzniku deformací.

10.2.10 Výsledky simulací pro materiál POM, materiál vložek Albromet W240 – ocel.

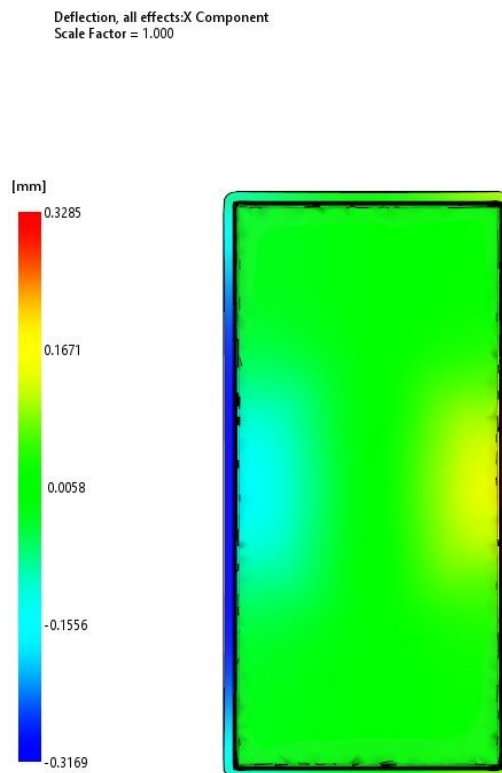
Tab. 20. Výsledky deformací pro materiál POM.

Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y
60	60	0,60	0,18
90	90	0,63	0,21
120	120	1,05	0,34
60	90	0,48	0,21
60	120	0,32	0,25

I v případě dalšího měření bylo potvrzeno snížení velikosti deformace použitím tvárníku vyrobeného z materiálu, který má lepší tepelnou vodivost. Tyto deformace dosáhly při teplotě tvárníku 60 °C a teplotě tvárnice 120 °C velikosti 0,328 mm v ose x a 0,255 mm v ose y (Obr. 55). Při teplotě formy na 120 °C byly deformace větší o 69,5 %.



Obr. 54. Velikost deformace v ose x, teplota 120 a 120 °C.



Obr. 55. Velikost deformace v ose x, teplota 60 a 120 °C.

10.3 Vyhodnocení statické zkoušky tahem

Z výrobků připravených vstřikováním byly vyrobeny zkušební vzorky pro tahovou zkoušku. Tato zkouška byla prováděna pro všechny kombinace teplot tvárníku a tvárnice, při použití vložek z oceli 1.2312.

Tab. 21. PP 30 x 30.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
PP 30x30	1	783,3	27,0	14,0
	2	836,4	27,0	14,7
	3	818,4	27,7	13,7
	4	851,6	27,3	14,0
	5	849,2	27,6	14,5
	6	864,1	28,7	14,3
	7	781,2	26,7	14,6
	8	950,4	26,7	15,4
	9	866,7	28,9	13,8
	10	906,6	27,0	15,1
Aritmetický průměr		850,8	27,5	14,4
Střední chyba průměru		17,4	0,3	0,2

Tab. 22. PP 70 x 70.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
PP70x70	1	863,4	27,8	14,4
	2	978,6	27,8	15,2
	3	851,6	27,6	15,1
	4	846,3	27,9	14,8
	5	811,6	27,5	13,5
	6	909,9	28,0	15,1
	7	821,8	27,7	14,9
	8	820,4	27,2	16,6
	9	817,2	29,0	14,8
	10	723,1	27,4	15,7
Aritmetický průměr		844,4	27,8	15,0
Střední chyba průměru		22,5	0,2	0,3

Tab. 23. PP 50 x 50.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
PP70x70	1	1104,7	28,1	15,6
	2	797,6	27,4	15,5
	3	994,5	28,4	14,6
	4	956,1	28,3	15,3
	5	888,4	27,7	15,3
	6	819,8	28,1	15,3
	7	788,6	25,2	14,6
	8	1047,1	27,3	15,1
	9	799,7	26,3	14,8
	10	1029,0	28,8	15,1
Aritmetický průměr		922,6	27,6	15,1
Střední chyba průměru		35,6	0,3	0,1

Tab. 24. PP 30 x 50.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
PP70x70	1	992,5	27,8	15,6
	2	923,4	27,1	15,0
	3	737,9	26,5	15,7
	4	866,0	27,4	15,6
	5	850,4	26,6	15,0
	6	802,0	27,1	15,6
	7	942,7	26,9	15,5
	8	896,1	27,5	15,6
	9	964,3	27,3	14,0
	10	910,1	25,9	15,0
Aritmetický průměr		888,5	27,0	15,3
Střední chyba průměru		23,1	0,2	0,2

Tab. 25. PP 30 x 70

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
PP70x70	1	789,6	27,4	15,5
	2	1021,1	28,5	15,6
	3	750,7	25,9	15,1
	4	957,8	27,4	15,6
	5	944,6	27,6	14,7
	6	843,6	26,4	15,7
	7	853,3	28,7	15,0
	8	925,4	27,3	14,7
	9	877,4	27,4	15,3
	10	826,3	26,3	16,2
Aritmetický průměr		879,0	27,3	15,3
Střední chyba průměru		24,9	0,3	0,1

Během statické zkoušky tahem byly zaznamenávány tři veličiny. První veličinou byl modul pružnosti v tahu, který vyjadřuje tuhost materiálu. Čím vyšší je hodnota modulu, tím vyšší je jeho tuhost. Hodnota modulu pružnosti (E) je vypočítána z deformačních křivek v oblasti, kde je patrná lineární závislost napětí na poměrném prodloužení.

Druhou měřenou veličinou bylo napětí na mezi pevnosti neboli maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle F_{MAX} . Jeho hodnota se u plastů pohybuje v rozmezí 15–100 MPa. Poslední měřenou veličinou byla tažnost neboli trvalá deformace (prodloužení) měrné délky vyjádřené v procentech původní měřené délky.

Z Tab. 23-27 je zřejmé, že teplota formy neměla zásadní vliv na vlastnosti vstřikovaného materiálu PP. Modul pružnosti v tahu byl přibližně u všech vzorků stejný, pouze při temperaci tvárníku a tvárnice na 50 °C došlo ke zvýšení modulu pružnosti o 6,7 %. Ostatní měřené parametry se nijak zásadně nelišily.

Tab. 26. POM 60 x 60.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
POM 60x60	1	1295,6	66,2	13,2
	2	1315,9	63,5	18,8
	3	1548,6	94,9	16,4
	4	1572,6	65,2	16,6
	5	1506,6	65,1	21,5
	6	1929,9	65,8	15,5
	7	1496,8	65,6	18,9
	8	1707,3	65,4	17,1
	9	1432,7	65,2	12,7
	10	1866,1	64,2	14,6
Aritmetický průměr		1567,2	68,1	16,5
Střední chyba průměru		71,1	3,2	0,9

Tab. 27. POM 120 x 120.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
POM 120x120	1	1408,2	65,0	21,0
	2	1428,1	62,9	16,2
	3	3040,4	65,1	11,3
	4	1665,1	63,1	20,4
	5	1822,2	64,7	14,1
	6	1850,6	66,2	20,9
	7	2467,6	66,0	13,4
	8	1931,7	65,4	22,4
	9	1075,1	65,4	16,9
	10	2422,0	66,1	17,4
Aritmetický průměr		1911,1	65,0	17,4
Střední chyba průměru		176,2	0,3	1,1

Tab. 28. POM 90 x 90.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
POM 90x90	1	2882,9	65,1	10,5
	2	1946,6	66,7	21,0
	3	1683,0	65,4	17,2
	4	1819,5	64,4	26,2
	5	1499,3	66,2	11,4
	6	2289,3	64,9	12,5
	7	1259,0	65,3	20,2
	8	1820,4	65,8	14,8
	9	1519,6	66,6	11,4
	10	2011,9	64,9	18,8
Aritmetický průměr		1873,2	65,5	16,4
Střední chyba průměru		137,9	0,2	1,6

Tab. 29. POM 60 x 90.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
POM 60x90	1	2174,6	66,1	12,4
	2	1040,1	65,6	18,2
	3	2563,7	66,9	10,2
	4	2621,3	65,7	11,0
	5	2394,0	65,1	15,0
	6	3016,0	64,9	11,9
	7	2417,7	65,3	11,3
	8	2602,8	65,2	11,8
	9	2358,7	65,2	20,3
	10	1869,2	64,9	16,5
Aritmetický průměr		2305,8	65,5	13,9
Střední chyba průměru		161,0	0,2	1,0

Tab. 30. POM 60 x 120.

Materiál a teplota	Č. měření	Modul pružnosti v tahu	Napětí na mezi pevnosti	Tažnost na mezi pevnosti
		MPa	MPa	%
POM 60x120	1	1371,9	65,4	18,1
	2	2486,2	65,3	14,9
	3	2320,3	65,3	17,4
	4	2655,3	66,5	17,1
	5	1979,2	64,7	15,8
	6	1621,4	64,4	19,1
	7	1912,9	66,2	18,9
	8	3436,4	66,0	16,1
	9	1684,5	64,5	14,6
	10	2987,8	64,3	11,9
Aritmetický průměr		2245,6	65,3	16,4
Střední chyba průměru		196,2	0,2	0,7

V případě měření vlastností materiálu POM docházelo se zvyšováním teploty tvárníku a tvárnice ke zvýšení velikosti modulu pružnosti. V porovnání s temperací formy na 60 a 120 °C byl modul pružnosti navýšen o 21,9 %. V případě kombinace teplot na tvárníku a tvárnici bylo dosaženo zvětšení modulu pružnosti o 47 %. Ostatní měřené parametry se nijak zásadně nelišily.

10.4 Morfologie

Pro RTG difrakční analýzu byl použit přístroj X'Pert PRO od firmy PANalytical (Nizozemí). Přístroj je osazen rentgenkou $\text{CuK}\alpha$, Ni filtrem a rychlým lineárně pozičně citlivým detektorem X'Celerator. Při měření byla použita konfigurace na průchod, napětí 40 kV, proud 30 mA. Měření bylo provedeno v rozsahu $2\Theta = 5^\circ - 30^\circ$.

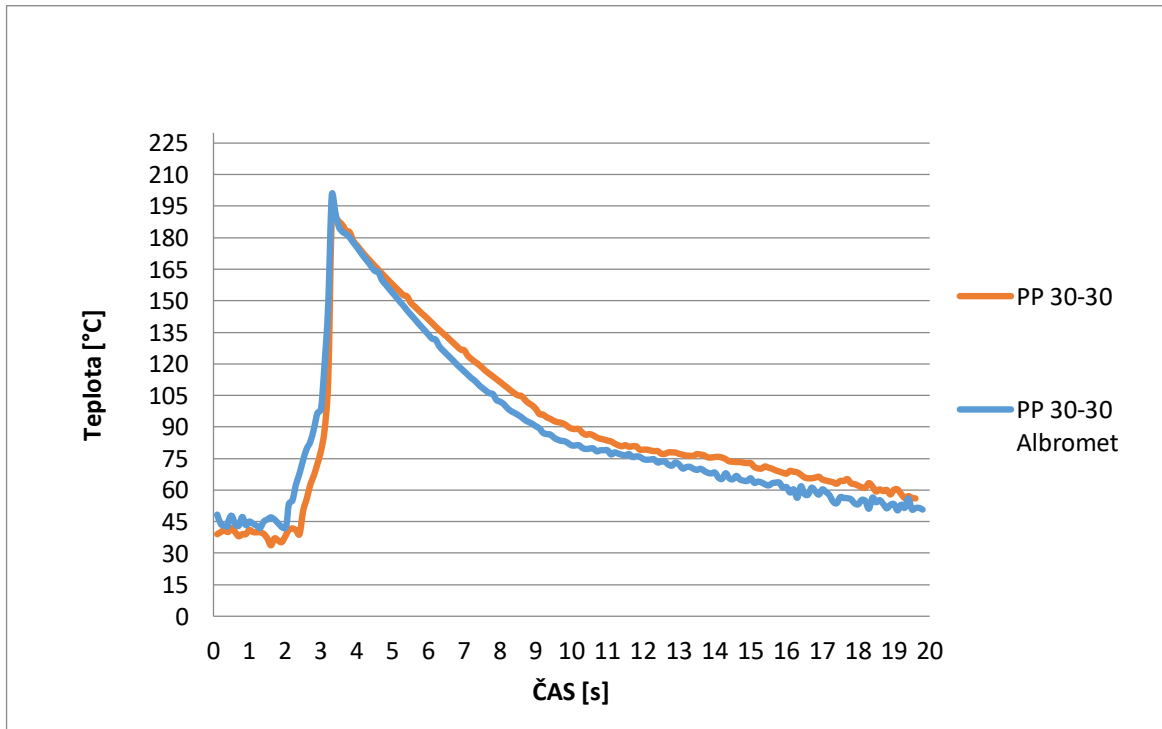
Tab. 31. Výsledky krystalinity.

Vstříkovaný materiál	Teplota [°C]		Hodnota krystalinity [%]
	Tvárník	Tvárnice	
PP	30	30	59,78
	50	50	61,23
	70	70	59,67
POM	60	60	50,78
	90	90	50,72
	120	120	52,55

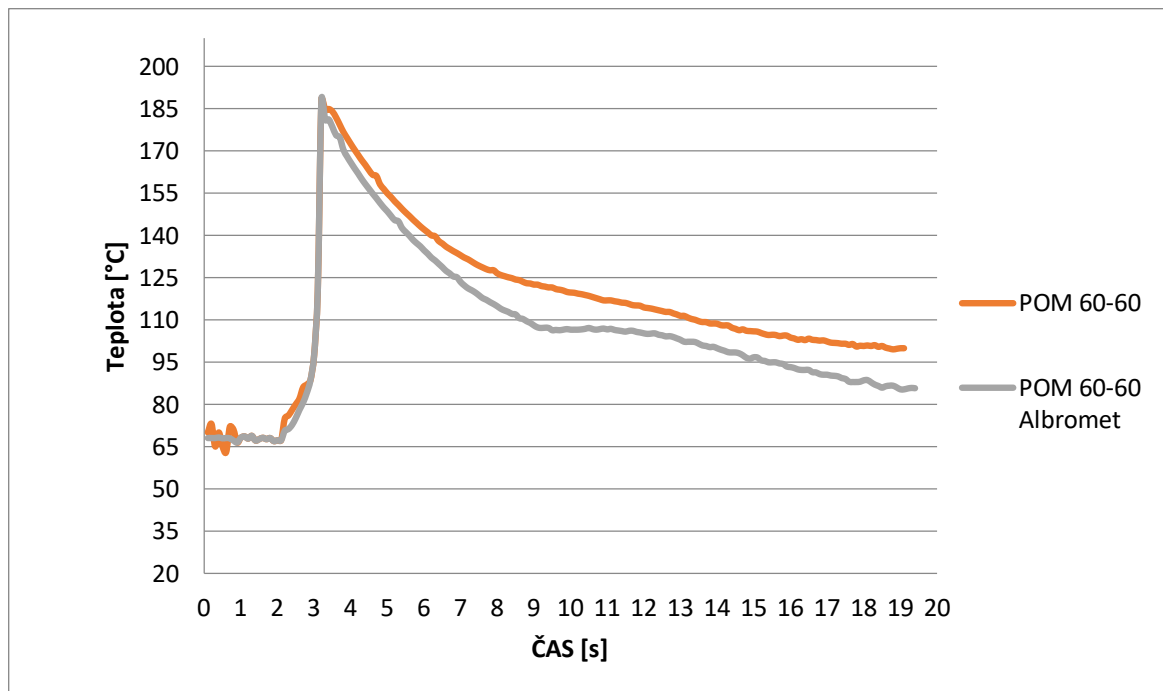
V Tab. 33 jsou uvedeny výsledky krystalinity na průchod skrz vzorkem. V případě materiálu PP bylo dosaženo změny krystalinity o 1,56 %. V případě materiálu POM byla hodnota krystalinity zvýšena o 1,83 %. Z těchto výsledků je zřejmé, že teplota formy nemá zásadní vliv na tuto zkoušku krystalinity.

11 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Prvním měřeným parametrem v praktické části byla teplota taveniny během procesu vstřikování.



Obr. 56. Teplota taveniny PP.



Obr. 57. Teplota taveniny POM.

Obr. 56 a 57 zobrazují rozdíl chladnutí taveniny v dutině formy při použití výměnných vložek z oceli 1.2312 a ze slitiny mědi Albromet 240W. Z těchto obrázků je zřejmé, že materiál s lepší tepelnou vodivostí má vliv na rychlost odvodu tepla z formy. Tím dochází ke zkrácení rychlosti vstřikovacího procesu.

Dalším měřeným parametrem byla velikost deformací. Zde byly stejně jako v předchozím měření použity dva materiály.

Deformace byly porovnány jak se simulacemi, tak s výrobky, které byly vyrobeny s pomocí vyměnitelných vložek z oceli a ze slitiny mědi. V Tab. 13-22 jsou zaznamenány jednotlivé velikosti deformací jak reálných, tak simulací.

Tab. 32. Nejmenší deformace skutečných výsledů.

Vstřikovaný materiál	Materiál vložek		Velikost deformací [mm]		Temperace formy [°C]
	Tvárník	Vyměnitelné vložky	Osa x	Osa y	
PP	Ocel 1.2312	Albromet 240W	0,94	1,15	30 - 70
POM	Ocel 1.2312	Albromet 240W	1,16	1,68	60 - 120

V Tab. 34 jsou uvedeny hodnoty nejmenších deformací ze skutečných výsledků. Nejmenších deformací bylo dosaženo při použití vyměnitelných vložek ze slitiny mědi a při kombinaci teplot na tvárníku a tvárnici.

Tab. 33. Nejmenší deformace při simulacích.

Vstříkovaný materiál	Materiál vložek		Velikost deformací [mm]		Teperace formy [°C]
	Tvárník	Tvárnice	Osa x	Osa y	
PP	Albromet 240W	Ocel 1.2312	0,48	0,12	30 - 70
POM	Albromet 240W	Ocel 1.2312	0,32	0,25	60 - 120

V dalším kroku byly vytvořeny simulace, při kterých byl použit tvárník vyrobený celý ze slitiny mědi. Tyto simulace ukazují největší eliminaci deformací. Při použití takového tvárníku bylo dosaženo zmenšení deformací na polovinu. Nejmenších deformací bylo také dosaženo při kombinaci teplot na tvárníku a tvárnici.

Při měření statické zkoušky tahem bylo zjištěno, že teperace formy nemá zásadní vliv na vlastnosti materiálu PP. U měření materiálu POM docházelo k postupnému zvětšování modulu pružnosti.

ZÁVĚR

Dle požadavků zmíněných v oficiální zadání byla zpracována celá diplomová práce. Hlavním cílem diplomové práce bylo sledovat výsledné vlastnosti výrobků a samotných vstříkovaných materiálů v závislosti na změně parametrů teploty.

První část této diplomové práce zahrnuje teoretické poznatky zabývající se technologií vstříkování, druhy temperačních systémů a také příklady jednotlivých vad spojených s temperací forem.

V praktické části je uvedeno zhodnocení naměřených výsledků. Prvním měřeným parametrem byla teplota taveniny během procesu vstříkování pomocí IR senzorů. Zde bylo prokázáno urychlení odvodu tepla z dutiny formy za použití výměnných vložek ze slitiny mědi. Další měření bylo zaměřeno na velikost deformací v závislosti na změně teploty a materiálu vložek. Z naměřených výsledků bylo zjištěno, že jak materiál, tak i teplota formy má velký vliv na velikost deformací. Dále byla navržena simulace při použití tvárníku z materiálu Albromet 240W. Tyto simulace vyšly jako nejlepší řešení pro eliminaci deformací, proto bych tuto variantu doporučil vyzkoušet v praxi. Reálně naměřené výsledky byly ověřeny formou simulací, které byly vytvořeny za použití softwaru Autodesk Moldflow.

V případě měření statické zkoušky tahem nebyly u materiálu PP zjištěny žádné zásadní změny v závislosti na teplotě formy. U materiálu POM docházelo pouze ke zvětšování modulu pružnosti. Pro upřesnění výsledků by bylo vhodné využít vyšší opakovatelnosti měření.

U měření krystalinity na průchod skrz vzorkem nebyly zjištěny žádné významné změny spojené s teplotou forem. Tyto výsledky nicméně nekorespondují se zjištěními, které jsou uvedeny v některých z předchozích studií [28]. Zde by bylo vhodné použít některou z jiných doporučených metod pro určení krystalického podílu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LENFELD, P. Technologie II. - 2. část (Zpracování plastů). Katedra strojírenské technologie - Oddělení tváření kovů a plastů: TUL, 2006. ISBN 80-7372-037-X.
- [2] www.rimoto.cz/765-plasty-a-sedla-pro-mx-motocykly?p=4
- [3] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů. Liberec: TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3.
- [4] Lenfeld, P. Technologie vstřikování, dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [5] BĚHÁLEK, L.: Teplotní analýza vstřikovacích forem s ohledem na kvalitu plastových výrobků. In Mezinárodní vědecké sympozium u příležitosti 25. výročí katedry tváření a plastů, 14.-15. září 2004. Liberec : TU v Liberci, 2004, s. 29-36. ISBN 80-7083-856-6.
- [6] ZEMAN, Lubomír. Temperace vstřikovacích forem - důležitá podmínka výroby výstřiků z termoplastů. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/temperacia-vstrekovacich-foriem-dolezita-podmienka-vyroby-vystrekov-z-termoplastov-1-cast/c/3085>
- [7] KREBS, Josef; SOVA, Miloš. Termoplasty v praxi: praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů. 5. aktualizované vydání. Praha : Verlag Dashöfer, 1999-2000. 1 CD-ROM. ISBN 80-86229-15-7
- [8] KOTZAB, Werner. *Method for tempering an injection mold having at least one heated nozzle or hot runner*. U.S. Patent No 5,772,933, 1998.
- [9] POUPA, T.: Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování Ranque-Hilsch vírovou trubicí
- [10] ŠAFARÍK, M.: Nástroje pro tváření kovů a plastů-cvičení. TU v Liberci, 1991, ISBN 80-7083-014-X
- [11] ZEMAN, L.: Cesty ke zvyšování účinnosti výměny tepla mezi formou, výstřikem a temperačním systémem formy. In 19. Mezinárodní konference. Plasty – konstrukční materiály a jejich zpracování. Praha: Plast form service s. r. o., 2009, s. 203-212. ISSN 1213-2640
- [12] BĚHÁLEK, Luboš. Speciální temperační prostředky. In: Sova, Miloš – Krebs, Josef: Termoplasty v praxi, Verlag Dashöfer: Nakladatelství spol. s.r.o., Praha, 2004, ISBN 8086229-15-7

- [13] BOBEK, Jiří. Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů. publi.cz, 2016. ISBN 978-8088058-65-6
- [14] BĚHÁLEK, Luboš, Petr LENFELD, Aleš AUSPERGER a Tomáš POUPA. Temperace vstřikovacích forem s ohledem na vlastnosti a morfologii výstříků
- [15] BOBČÍK, Ladislav. Formy pro zpracování plastů II. díl - Vstřikování termoplastů. Brno: UNIPLAST Brno, 1999
- [16] BĚHÁLEK, Luboš. Teorie zpracování nekovových materiálů: Průvodní a následné jevy při zpracování plastů [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/6.pdf
- [17] The Chemical Company BASF: Estimating cooling times in injection molding. Technical Expertise. Publikováno na <http://www.plasticsportal.com/usa> (duben 2008)
- [18] TECHNIK, Jiří. Analýza a optimalizace chlazení vstřikovacích forem. Liberec, 2007. Technická Univerzita v Liberci.
- [19] http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp (únor 2008)
- [20] <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-1-dil-priciny-vzniku-vad-a-studene-spoje.html>
- [21] TECHNIK, Jiří. Analýza a optimalizace chlazení vstřikovacích forem. Liberec, 2007. Technická Univerzita v Liberci.
- [22] YANG, Xiaoniu, et al. Morphology and thermal stability of the active layer in poly (p-phenylenevinylene)/methanofullerene plastic photovoltaic devices. *Macromolecules*, 2004
- [23] <https://www.omegaeng.cz/pptst/XTA-W5R26.html>
- [24] KURT, Mustafa, et al. Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Materials & Design*, 2009
- [25] GABRIEL, Jiří. Školící materiály “Kurz vstřikování plastů” firmy Kompozity Brno.
- [26] <https://www.granulat.com.pl/media/pdf/tiplen%20r%20359.pdf>
- [27] <https://www.resinex.co.uk/products/hostaform.html>

[28] KANTZ, M. R.; NEWMAN JR, H. D.; STIGALE, F. H. The skin-core morphology and structure–property relationships in injection-molded polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 1972, 16.5: 1249-1260.

[29] http://www.fjthai.com/pdf/MMS_VOL8.1_EN_WEB_S.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PP	Polypropylen
POM	Polyoxymethylene
mm	Milimetr
%	Procento
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
°C	Stupeň celsia
MPa	Megapascal
3D	Trojrozměrný
CAD	Počítačem podporované projektování
°	Stupeň

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Princip technologie vstřikování. [1]</i>	12
<i>Obr. 2. Příklad vstřikovaných dílů. [2]</i>	13
<i>Obr. 3. Vstřikovací cyklus. [4]</i>	13
<i>Obr. 4. Tlakovodní temperovací zařízení do 100 °C: P100M. [8]</i>	16
<i>Obr. 5. Porovnání efektu různého průměru temperačních kanálů. [4]</i>	17
<i>Obr. 6. Schéma protiproudé trubice. [12]</i>	18
<i>Obr. 7. Systém plochých přepážek. [4]</i>	19
<i>Obr. 8. Systém spirálových přepážek. [4]</i>	20
<i>Obr. 9. Systém fontánek. [4]</i>	20
<i>Obr. 10. Systém Contura. [4]</i>	21
<i>Obr. 11. Princip funkce tepelné trubice. [4]</i>	22
<i>Obr. 12. Tepelná bilance vstřikovací formy. [5]</i>	23
<i>Obr. 13. Prostup tepla formou. [17]</i>	25
<i>Obr. 14. Vliv vybraných technologických parametrů vstřikování termoplastů na smrštění vstřikovaných dílů. [18]</i>	27
<i>Obr. 15. Poměr velikosti výrobního a dodatečného smrštění v závislosti na teplotě formy. [19]</i>	29
<i>Obr. 16. Morfologie výstřiku z PE Liten MB 77 o tloušťce 2 mm, při různých teplotách temperace. [14]</i>	30
<i>Obr. 17. Vysokoteplotní termočlánek. [23]</i>	31
<i>Obr. 18. Odporové teploměry. [23]</i>	32
<i>Obr. 19. Bezdotykový snímač teploty. [23]</i>	32
<i>Obr. 20. Záznam výstřiku termokamerou. [24]</i>	33
<i>Obr. 21. Model testovaného dílce.</i>	36
<i>Obr. 22. Deformace stěny výstřiku. [11]</i>	37
<i>Obr. 23. Pohled do levé části vstřikovací formy</i>	37
<i>Obr. 24. Pohled do pravé části vstřikovací formy</i>	38
<i>Obr. 25. Měřicí zařízení FUTABA EPT-001S. [29]</i>	43
<i>Obr. 26. Rozdíl zaznamenávání teploty pomocí IR senzorů. [29]</i>	43
<i>Obr. 27. Pozice pro měření teploty taveniny - č. 1 a rozměry upraveného vtoku.</i>	44
<i>Obr. 28 Porovnání 3D skenu a 3D modelu.</i>	45
<i>Obr. 29. Rozměry zkušebního tělesa.</i>	46

<i>Obr. 30. Výroba zkušebních vzorků.</i>	46
<i>Obr. 31. Závislost teploty taveniny na době chlazení.....</i>	47
<i>Obr. 32. Závislost teploty taveniny na době chlazení.....</i>	48
<i>Obr. 33. Závislost teploty taveniny na době chlazení.....</i>	49
<i>Obr. 34. Závislost teploty taveniny na době chlazení.....</i>	50
<i>Obr. 35. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem,</i>	51
<i>Obr. 36. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem,</i>	52
<i>Obr. 37. Velikost deformace v ose x, teplota 30 a 30 °C.....</i>	53
<i>Obr. 38. Velikost deformace v ose y, teplota 30 a 30 °C.....</i>	53
<i>Obr. 39. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem,</i>	54
<i>Obr. 40. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem,</i>	55
<i>Obr. 41. Velikost deformace v ose x, teplota 30 a 70 °C.....</i>	56
<i>Obr. 42. Velikost deformace v ose x, teplota 50 a 50 °C.....</i>	56
<i>Obr. 43. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem,</i>	57
<i>Obr. 44. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem,</i>	58
<i>Obr. 45. Velikost deformace v ose x, teplota 120 a 120 °C.....</i>	59
<i>Obr. 46. Velikost deformace v ose x, teplota 60 a 120 °C.....</i>	59
<i>Obr. 47. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem,</i>	60
<i>Obr. 48. Porovnání 3D skenu (reálného výrobku) s CAD modelem,</i>	61
<i>Obr. 49. Velikost deformace v ose x, teplota 120 a 120 °C.....</i>	62
<i>Obr. 50. Velikost deformace v ose x, teplota 60 a 90 °C.....</i>	62
<i>Obr. 51. Velikost deformace v ose x, teplota 30 a 30 °C.....</i>	64
<i>Obr. 52. Velikost deformace v ose x, teplota 30 a 70 °C.....</i>	64
<i>Obr. 53. Rozdíl vzniku deformací.....</i>	65
<i>Obr. 54. Velikost deformace v ose x, teplota 120 a 120 °C.....</i>	66
<i>Obr. 55. Velikost deformace v ose x, teplota 60 a 120 °C.....</i>	66
<i>Obr. 56. Teplota taveniny PP.</i>	74
<i>Obr. 57. Teplota taveniny POM.....</i>	74

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Příklad doporučených teplot v procesu vstřikování. [4]</i>	15
<i>Tab. 2. Hodnoty tepelné vodivosti vybraných materiálů. [7]</i>	15
<i>Tab. 3. Doporučené rozměry a uspořádání temperačních kanálů. [4]</i>	17
<i>Tab. 4. Pracovní látky používané v tepelných trubcích a jejich charakteristika [4]</i>	22
<i>Tab. 5. Vstřikovací parametry.</i>	39
<i>Tab. 6. Teploty pásem plastikační jednotky.</i>	39
<i>Tab. 7. Tabulka materiálu vložek a teploty formy pro PP.</i>	40
<i>Tab. 8 Vstřikovací parametry.</i>	41
<i>Tab. 9 Teploty pásem plastikační jednotky.</i>	41
<i>Tab. 10. Tabulka materiálu vložek a teploty formy pro POM.</i>	42
<i>Tab. 13. Výsledky deformací pro materiál PP.</i>	51
<i>Tab. 14. Výsledky deformací pro materiál PP.</i>	52
<i>Tab. 15. Výsledky deformací pro materiál PP.</i>	54
<i>Tab. 16. Výsledky deformací pro materiál PP.</i>	55
<i>Tab. 17. Výsledky deformací pro materiál POM.</i>	57
<i>Tab. 18. Výsledky deformací pro materiál POM.</i>	58
<i>Tab. 19. Výsledky deformací pro materiál POM.</i>	60
<i>Tab. 20. Výsledky deformací pro materiál POM.</i>	61
<i>Tab. 21. Výsledky deformací pro materiál PP.</i>	63
<i>Tab. 22. Výsledky deformací pro materiál POM.</i>	65
<i>Tab. 23. PP 30 x 30.</i>	67
<i>Tab. 24. PP 70 x 70.</i>	67
<i>Tab. 25. PP 50 x 50.</i>	68
<i>Tab. 26. PP 30 x 50.</i>	68
<i>Tab. 27. PP 30 x 70</i>	69
<i>Tab. 28. POM 60 x 60.</i>	70
<i>Tab. 29. POM 120 x 120.</i>	70
<i>Tab. 30. POM 90 x 90.</i>	71
<i>Tab. 31. POM 60 x 90.</i>	71
<i>Tab. 32. POM 60 x 120.</i>	72
<i>Tab. 33. Výsledky krystalinity.</i>	73
<i>Tab. 34. Nejmenší deformace skutečných výsledů.</i>	75

Tab. 35. Nejmenší deformace při simulacích. 76

SEZNAM PŘÍLOH

Všechny přílohy jsou uloženy na přiloženém CD – ROM.