

Vliv teploty na výslednou kvalitu vstříkovaných dílů

Bc. Ondřej Diatel

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ondřej Diatel
Osobní číslo:	T18712
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv teploty na výslednou kvalitu vstříkovaných dílů

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Výroba zkušebních těles při použití jednotlivých typů aktivní a pasivní teploty.
3. Měření výsledné deformace a porovnání s výsledky simulace.
4. Zhodnocení a závěr.

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

Seznam doporučené literatury:

1. REES, Herbert. *Mold engineering*. 2nd ed. Munich: Hanser, 2002, xxiii, 688 s. ISBN 3446216596.
2. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN – technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
3. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 978-80-271-0614-1.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu 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 na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou reálného průběhu vstřikovacího procesu v závislosti na vybraných variantách temperačního systému. Cílem práce je ověřit vliv temperace na kvalitu finálního výrobku z hlediska výsledné deformace, prozkoumat využití vložek o různé tepelné vodivosti a následně reálně naměřené výsledky porovnat s hodnotami získanými ze simulace v programu Moldflow.

Kromě klasických metod temperace byl použit tvárník s konformním chlazením, u kterého byla v rámci praktické části provedena měření na základě výpočtů simulace.

Klíčová slova: ADAM, DMLS, Konformní chlazení, Temperace, Tepelná vodivost, Simulace Moldflow, Deformace, Teplotní pole, Teplota taveniny, Vstřikování

ABSTRACT

This diploma thesis deals with analysis of real course of injection process depending on selected variants of tempering system. The aim of the thesis is to verify the influence of tempering on the quality of the final product in terms of resulting deformation, to investigate the use of inserts of different thermal conductivity as well as to compare the real measured results with the values obtained from the simulation in the program Moldflow.

In addition to classical methods of tempering, a block with conformal cooling was used, which measurements were performed in the practical part based on simulation calculations.

Keywords: ADAM, DMLS, Conformal cooling, Tempering, Thermal conductivity, Moldflow simulation, Deformation, Temperature field, Melt temperature, Injection molding

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D. za pomoc, ochotu, vstřícnost, vynaložený čas, veškeré rady a cenné informace, které mi pomohly při řešení dané problematiky. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, Ph.D. za rady týkající se dané problematiky. Rád bych poděkoval i slečně Ing. Kateřině Hýblové za rady, pomoc a formální úpravu. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat i své rodině a svým blízkým za veškerou pomoc a podporu po celá léta mého studia.

Motto: „Never give up! – Nikdy se nevzdávej!“

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ A TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	11
1.1 CHARAKTERISTIKA TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU	13
1.1.1 Temperační jednotka	14
1.1.2 Temperační médium.....	15
1.1.3 Temperační kanály	15
1.2 TEPELNÁ BILANCE FORMY.....	16
1.3 VLIV TEMPERACE NA VLASTNOSTI A KVALITU VÝROBKŮ	16
1.3.1 Vliv temperace na morfologii výstřiku	17
1.3.2 Vliv teplot stěn formy na výsledné vlastnosti výrobku.....	18
1.4 ADITIVNÍ VÝROBA	19
2 AKTIVNÍ TEMPERACE.....	21
2.1 SYSTÉM FONTÁNEK	21
2.2 SYSTÉM PLOCHÝCH PŘEPÁŽEK	22
2.3 SYSTÉM SPIRÁLOVÝCH PŘEKÁŽEK.....	23
2.4 KONTINUÁLNÍ ZPŮSOB TEMPERACE.....	24
2.5 PULSNÍ ZPŮSOB TEMPERACE.....	24
2.6 RANQUE – HILSCH VÍROVÁ TRUBICE	24
2.7 SYSTÉM CONTURA	25
3 PASIVNÍ TEMPERACE	26
3.1 MATERIÁLY O RŮZNÉ TEPELNÉ VODIVOSTI.....	26
3.2 TEPELNÁ TRUBICE	28
4 KONFORMNÍ ZPŮSOB CHLAZENÍ.....	30
4.1 TECHNOLOGIE DMLS	31
4.2 TECHNOLOGIE ADAM	33
4.3 SELEKTIVNÍ SPÉKÁNÍ KOVŮ LASEREM (SLS).....	36
4.4 TECHNOLOGIE MLS (MIKRO LASEROVÉ SPÉKÁNÍ KOVŮ).....	37
4.5 LASEROVÉ TAVENÍ ZALOŽENÉ NA PRÁŠKOVÉM LOŽI (LMF).....	38
4.6 LASEROVÉ PRÁŠKOVÉ NAVAŘOVÁNÍ (LMD).....	39
5 MĚŘENÍ TEPLoty V DUTINĚ FORMY	40
5.1 DOTYKOVÉ SNÍMAČE.....	40
5.1.1 Termočlánek.....	40
5.1.2 Odporové snímače teploty.....	41

5.2	BEZDOTYKOVÉ SNÍMAČE	41
5.2.1	Infračervené senzory (IR).....	42
5.2.2	IR termovizní kamery	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	44
7	TESTOVANÝ DÍL A NÁSTROJ PRO JEHO VÝROBU	45
7.1	MATERIÁL TESTOVANÉHO DÍLU	46
7.2	NÁSTROJ PRO VÝROBU TESTOVANÉHO DÍLU	46
7.3	NÁVRH TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU	47
7.3.1	Varianta 1 – tvarové vložky (temperační systém) připravený klasickými metodami obrábění	48
7.3.2	Varianta 2 – tvarové vložky (temperační systém) připravený klasickými metodami obrábění a aditivní technologií	50
7.3.3	Pasivní prvky temperace	52
8	PROVEDENÍ EXPERIMENTU	54
8.1	SIMULACE V SOFTWARE MOLDFLOW SYNERGY	54
8.2	REÁLNÉ MĚŘENÍ	58
8.2.1	Měření teplotního pole vyrobeného dílu	58
8.2.2	Měření celkové deformace vyrobeného dílu	59
8.2.3	Měření teploty taveniny během procesu vstřikování	59
9	VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	61
9.1	TEPLOTNÍ POLE VYROBENÉHO DÍLU	61
9.2	CELKOVÁ DEFORMACE VYROBENÉHO DÍLU	63
9.2.1	Varianta 1 + ocelové jádrové trny	63
9.2.2	Varianta 1 + jádrové trny z materiálu Albromet	66
9.2.3	Varianta 2 + ocelové jádrové trny	68
9.2.4	Varianta 2 + jádrové trny z materiálu Albromet	68
9.3	TEPLOTA TAVENINY V DUTINĚ FORMY BĚHEM PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ	69
9.3.1	Ocelové jádrové trny, doba chlazení 12 s	69
9.3.2	Ocelové jádrové trny, doba chlazení 32 s	69
9.3.3	Jádrové trny z materiálu Albromet, doba chlazení 12 s	70
9.3.4	Jádrové trny z materiálu Albromet, doba chlazení 32 s	70
10	DISKUZE VÝSLEDKŮ	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
	SEZNAM TABULEK	85

ÚVOD

Vstřikování je celosvětově nejrozšířenější metoda určená pro zpracování polymerních materiálů, přičemž jednu z nejvýznamnějších úloh v tomto procesu zastává temperační systém. Pokud je zajištěna kvalitní temperace a jsou vhodně zvoleny definované podmínky a parametry, pak lze zkrátit výrobní cyklus a tím dosáhnout vyšších možností produktivity, což výrazně ušetří náklady na výrobu.

V současnosti se do popředí výrazně dostává použití 3D tisku kovu a s ním úzce spjaté konformní chlazení, které nabízí možnost libovolného vytvoření průřezů a tvarů temperačních kanálů, či dokonce jejich umístění v dutině formy. Lze tak navrhnout tvarovou vložku, jejíž temperační systém přímo kopíruje tvar budoucího výrobku.

Současné publikace a výzkumy jsou zaměřeny na simulace celého procesu temperace při použití aditivní výroby nebo pasivní temperace, ale velmi málo z nich se zabývá zkoumáním reálného děje, který probíhá přímo v dutině formy. Proto je cílem této práce zjistit a porovnat reálný děj při použití prvků pasivní a aktivní temperace, jež bude vyrobeno klasickými obráběcími metodami s vytvořenými simulacemi. Dílčím přínosem předložené diplomové práce je získání vědomostí ze simulací popisující průběh děje během procesu vstřikování při použití tvarových vložek temperačního systému připravených klasickými metodami a aditivní technologií.

Teoretická část práce charakterizuje rozdělení temperačního systému a jeho vliv na výslednou kvalitu finálních výrobků. V této části bude dále uveden přínos využití aditivní technologie při procesu vstřikování a v neposlední řadě také porovnání měření teploty v dutině formy kontaktními a bezkontaktními snímači.

Praktická část je spočívá v měření teplotního pole vyrobeného dílu, zjištění vzniklých deformací výrobku při použití klasické i aditivní výroby a zjištění průběhu teploty taveniny v dutině formy během procesu vstřikování. Teplotního pole výrobku a vzniklé deformace byly při využití aditivní technologie zkoumány pouze pomocí vytvořených simulací v programu Moldflow Synergy 2016.

I. TEORETICKÁ ČÁST

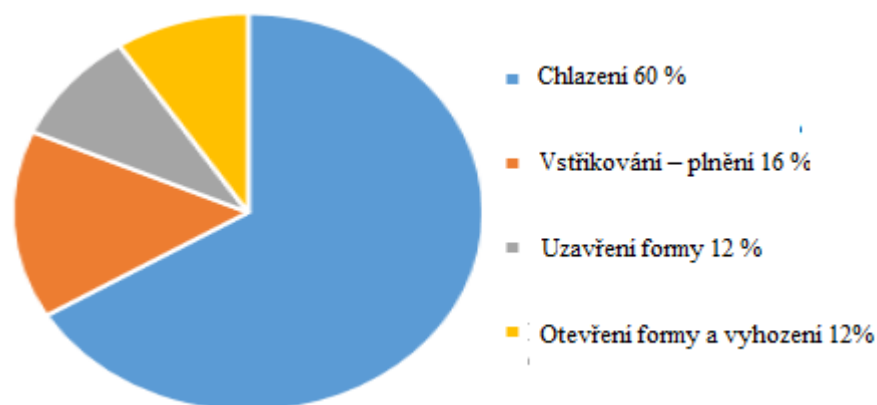
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ A TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM

Vstřikování patří mezi nejrozšířenější technologie pro zpracování termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, případně také kompozitů či reaktoplastů, kaučuků a pryží.

Do formy bývá roztavený polymer vstříknut pomocí vstřikovacího stroje za vysoké rychlosti a vysokého tlaku. Tato forma, v níž poté dochází k ochlazení a tuhnutí výstřiku je v průběhu vstřikovacího cyklu upnuta na vstřikovacím stroji. Po ochlazení taveniny ve formě je zhotoven výstřik požadovaného tvaru s požadovanými funkčními vlastnostmi, následně se celý cyklus opakuje. Pro opakovatelnost vstřikovacího cyklu jsou kladeny požadavky, které musí forma během své životnosti být schopna zajistit:

- Požadovaný rozměr a kvalita výstřiků
- Odolnost proti vysokým tlakům
- Snadné vyjmutí výstřiků
- Snadná obsluha a automatický provoz
- Snadná a rychlá výroba
- Vysoké využití zpracovávaných plastů
- Nízké pořizovací náklady [1]

Pro dosažení optimálních výsledků během technologie vstřikování, je zapotřebí zredukovat především dobu chlazení vstřikovacích forem, která představuje kolem 60 % z celkového vstřikovacího cyklu (viz Obr. 1). To představuje optimalizaci temperace.



Obr. 1. Vstřikovací cyklus. [16]

Pojem temperace představuje ochlazování či ohřívání celé formy nebo alespoň jejích tvářecích částí za pomoci temperačního média. Podstata spočívá ve snaze dosáhnout optimálního krátkého cyklu vstřikování, při zajištění všech technologických parametrů. Před začátkem výroby je temperační médium temperováno na požadovanou teplotu a během cyklického vstřikování dochází k udržení konstantního teplotního režimu v tolerančním rozmezí vstřikovacích forem, čemuž napomáhá odvod tepla z formy. [2, 3]

Během temperace dochází vlivem proudění temperačního média k zajištění optimálního tuhnutí polymerní taveniny a chlazení výstřiku. Proces temperace začíná už ve vstřikovací fázi, při plnění tvarové dutiny formy taveninou, dále pokračuje dotlakovou fází, při kompenzaci smrštění výstřiků a trvá až do doby, kdy dochází k otevření formy a vyhození vystříknutého výrobku z tvarové dutiny formy. [2]

Některé materiály jako například PC (polykarbonát) se zpracovávají při vyšších teplotách formy (tj. kolem 100 – 120 °C), což způsobuje vyšší tepelné ztráty formy. Pro zaručení dostatečné kvality výstřiků, je pak nutné formu ohřívát. [3]

Úkolem temperace je:

- Ohřev či ochlazení formy na požadovanou teplotu a udržení v tolerančním rozpětí
- Zajištění maximálně možné rovnoměrnosti rozložení teploty na tvářecím povrchu formy
- Odvod tepla z dutiny za dobu, kdy jsou splněny jakostní i ekonomické ukazatele [2]

Jak již bylo zmíněno, nejdůležitější funkcí temperačního systému je zajištění požadované teploty dutiny vstřikovací formy v krátkém časovém intervalu. Při optimální teplotě a zajištění vhodně řešeného temperačního systému a dostatečné hmotnosti vstřikovací formy, dochází nejenom ke zvýšení tepelné i rozměrové stability, ale také ke snížení deformace během vysokých vstřikovacích tlaků. Optimalizací parametrů, způsobů a podmínek temperace vstřikovací formy lze tedy zajistit:

- Kvalitu vyráběných dílů a jejich povrchu
- Požadované mechanické a fyzikální vlastností
- Snížení nákladů na výrobu vstřikovaných dílů
- Eliminaci velikosti výrobního a dodatečného smrštění
- Eliminaci vzniku deformací
- Zkrácení doby chlazení a tím i vstřikovacího cyklu [3]

Tab. 1. Doporučené teploty vybraných materiálů při procesu vstřikování. [3]

Materiál	Doporučená teplota formy [°C]	Teplota taveniny [°C]	Doporučená teplota dílu během odformování [°C]
ABS	60-80	220-260	80-100
PA	80-120	260-300	110-130
PC	80-100	280-320	140
PE	30-60	180-230	60-90
PP	30-60	200-250	70-90

Temperační systémy se svým působením rozdělují na aktivní a pasivní. Jejich volba závisí zejména na koncepci formy, parametrech, požadavcích a technologii výroby výstřiků, obvykle se tyto systémy používají ve vzájemné vazbě. [3]

Temperační systémy lze dále rozdělit na konvenční a nekonvenční. Konvenční jsou založeny na použití vrtaných kanálů uvnitř dutiny formy, nekonvenční systémy naproti tomu na použití tvarových vložek, které i pomocí své tepelné vodivosti zajišťují odvod tepla z formy. V praxi se často využívá i jejich kombinace.

1.1 Charakteristika temperačního systému

Temperování, ať už se jedná o ochlazování či ohřívání formy na požadovanou teplotu závisí na energetické bilanci formy a okolního prostředí. Jak už bylo řečeno, odvod nebo přívod tepla je zajištěn převážně temperačním systémem. Kolísání teplot, ke kterému dochází jak vlivem stoupání teploty po vstřiku taveniny do dutiny formy, tak i následným klesáním teploty důsledkem odvodu tepla působením temperačního systému, by mělo být co nejmenší. Optimalizaci temperačního procesu lze zajistit vhodnou volbou velikosti a umístění temperačních kanálů blízko povrchu dutiny formy, zvýšením rychlosti a správností nastavení parametrů teploty temperačního média.

Temperační systém tvoří soustava kanálů, kterými proudí temperační médium, udržující požadované konstantní teploty temperovaných částí. Systém dále tvoří spojovací prvky a temperační jednotka.

Pro materiály zpracovávané při vyšších teplotách je nutno zajistit ohřev formy pomocí elektrického vytápění, které může být umístěno buď v pevné (vtokové) části nebo v pohyblivé části vstřikovací formy. [3]

Přenos tepla, ke kterému dochází mezi taveninou a dutinou formy, závisí i na tepelné vodivosti jak temperačního média, tak i materiálů použitých při návrhu konstrukčního uspořádání

a následné výrobě formy. Části zhotovené z mědi nebo jejích slitin, mají tepelnou vodivost několikanásobně vyšší než běžná ocel, proto jsou schopné z určitého místa odvést dané množství tepla mnohem rychleji. [3]

Veličiny určující hodnotu součinitele tepelné vodivosti, kterou charakterizuje přenos tepla mezi povrchem stěny temperačního kanálu a temperačním médiem, lze rozdělit do dvou skupin. První skupina představuje veličiny související s vlastním temperačním médiem a jeho kinematickou viskozitou, druhou skupinu tvoří veličiny, které jsou vztažené k vlastnímu temperačnímu systému, což mimo jiné představuje i tvar a průměr chladicích kanálů a rychlost proudění temperačního média. Obě skupiny veličin jsou charakterizovány Reynoldsovým číslem Re , které taky definuje účinnost temperačního systému. Účinnost je dále závislá na druhu proudění, kdy pro správnou funkci temperačního systému musí být zajištěno turbulentní proudění. [4]

Tab. 2. Součinitel tepelné vodivosti některých materiálů a médií. [3]

Součinitel tepelné vodivosti λ	
Materiál	λ [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
Hliník	204
Měď	395
Ocel	40
Plasty	0,2-1,2
Vzduch (neproudící)	0,04
Voda	0,19
Olej	0,16

1.1.1 Temperační jednotka

Průběžné chlazení či temperování je v otevřeném i uzavřeném okruhu zajištěno temperačními přístroji s čerpadly s možností regulace temperačního i chladicího výkonu. Výkon čerpadla by měl být takový, aby zajistil turbulentní proudění vody v kanálcích vstřikovací formy. [2]

Vodní temperační systém přístroje je buď beztlakový (teplota do 95 °C), nebo přetlakový (teplota do 400 °C). Teplonosné médium je z přístrojů přivedeno do jednotlivých temperačních okruhů a správný průtok a regulaci množství temperačního média (vody) pak zajišťují rozvaděče. [2]

1.1.2 Temperační médium

Nejčastějším temperačním systémem je aktivní systém s cirkulujícím temperačním médiem. Tento systém bývá převážně založen na použití vody, které je však spojeno s rizikem vzniku vodního kamene, dále se k temperaci využívá i olej, glykol nebo vodní pára. Proudění média probíhá v uzavřeném nebo otevřeném oběhu beztlakového i tlakového režimu, s pulzním, či trvalým průtokem. Jak již bylo zmíněno, pro splnění optimálních podmínek je vhodné zajistit turbulentní proudění média. Teplota a množství proudícího chladícího média je pak řízena pomocí průtokoměrů. [2, 3]

Vzhledem ke své relativně malé účinnosti se vzduch používá ke chlazení pouze v případech, kdy není možné zajistit chlazení pomocí kapaliny z důvodu nedostatečného prostoru pro vedení kanálů. Vzduch je tedy vhodný pro chlazení tenkých tvárnků, jader nebo vyhazovačů. U vzduchu se využívá buď jeho volného proudění, kdy dochází k odvodu tepla z povrchu vstřikovací formy a pro ochlazení tvarových částí po dobu otevírání formy, nebo nuceného proudění vlivem přetlaku nebo podtlaku. [3]

Tab. 3. Vlastnosti temperačních médií. [3]

Typ	Výhody	Nevýhody	Poznámka
voda	vysoký přestup tepla, nízká viskozita, nízká cena, ekologická nezávadnost	použitelné do 90 °C ¹ , vznik koroze ² , usazování vodního kamene	¹ v tlakových okruzích lze využít vodu i při vyšších teplotách, ² lze potlačit úpravou vody
olej	možnost temperace i nad 100 °C	zhoršený přestup tepla	
glykol	omezení koroze a ucpávání systému	stárnutí, znečišťování prostředí	

1.1.3 Temperační kanály

Soustava temperačních kanálů a dutin tvoří základ temperačního systému, především kvůli rozvodu temperačního média uvnitř vstřikovací formy. Právě zde dochází k výměně tepla mezi formou a teplonosným médiem a následně k regulaci teploty formy na optimální teplotu.

Významnou roli hraje zvláště jejich počet, velikost, tvar a umístění ve formě, a to jak vzhledem k umístění a rozložení ostatních komponentů vstřikovací formy, tak i kvůli temperační účinnosti. Vyšší počet kanálů malých rozměrů zvyšuje tuto účinnost, což vede k zajištění

rovnoměrného rozložení teplot v dutině formy. Minimální vzdálenost temperačních kanálů od dutiny formy závisí na pevnosti a tuhosti materiálů a na vstřikovacím tlaku. [3]

Pro zamezení možného úniku temperačního média do prostoru formy se používá tzv. O-kroužků dle ČSN 029281 (těsnění nepohyblivých částí), které slouží k utěsnění funkčních vložek s temperačními kanály. O-kroužky jsou vyráběny z pryže, až do velikosti 250 mm a jejich kvalita a odolnost závisí na výši použité teploty média, která se běžně pohybuje do 80 °C. [3]

Mimo vstřikovací formu bývají temperační kanály propojeny přívodními hadicemi. Hadice jsou napojeny a utěsněny na koncovkách, kde jsou zajištěny pomocí zděří, stahovacích pásek případně spojeny šroubovitými spoji. [3]

1.2 Tepelná bilance formy

Za ustáleného stavu během cyklu vstřikování platí:

Teplu taveninou do formy přivedené = teplu z formy odvedeném pomocí temperačního systému a způsobeným ztrátám tepla do okolního prostředí.

$$Q_P = Q_t + Q_Z \quad (1)$$

Kde: Q_P je teplo přivedené taveninou [W], Q_t představuje největší část tepla, které je odvedené temperačním systémem [W] a Q_Z jsou ztráty vzniklé odvodem tepla do okolí například sáláním. [W]. [3]

1.3 Vliv teploty na vlastnosti a kvalitu výrobků

Vzhled, kvalita a vlastnosti výstřiku jsou dány souhrnem faktorů působících během celého procesu vstřikování. Největší vliv má druh použitého materiálu, budoucí tvar výrobku, konstrukce formy, technologické parametry a podmínky vstřikování. Vzhledem k tomu, že během vstřikování dochází k tuhnutí a tvarování výstřiků současně, jsou tak výrazně ovlivněny jak struktura materiálu, tak i fyzikální a mechanické vlastnosti výstřiku. [5]

Teplotou vstřikovací formy je ovlivněna zabíhavost hmoty, se kterou je částečně spojena i rychlost plnění dutiny formy. Kvalita dílu je ovlivněna především rychlostí a způsobem odvedení tepla z výstřiku, s čímž souvisí i rozmístění temperačního systému ve formě. Do jisté míry je tím ovlivněna i kvalita povrchu výstřiku, především jeho lesk – chladnější povrch dutiny zlepšuje konečný lesk výrobku. Rozmístění temperačního systému, musí zajišťovat

rovnoměrný odvod tepla konstantní rychlostí v celém objemu výstřiku, což je nutné zajistit obzvláště u složitých a velkoplošných součástí. [5, 6]

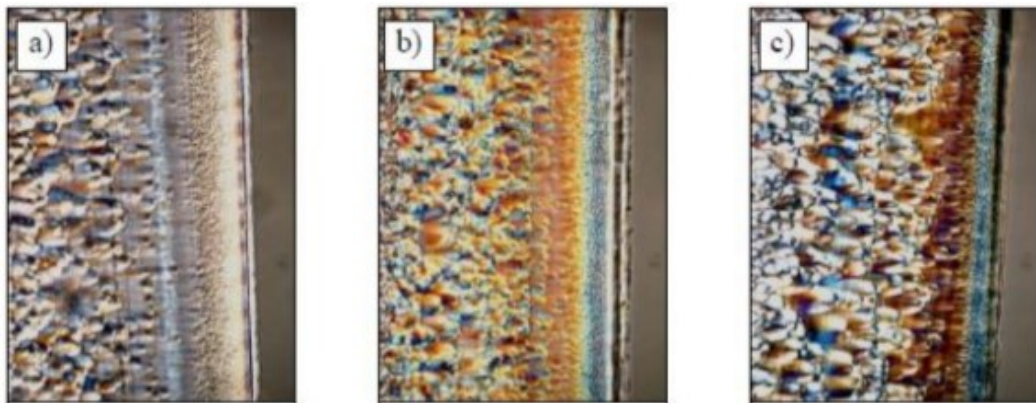
Použitím vyšších teplot formy, dochází k rovnoměrnějšímu chlazení výstřiku, čímž se sníží vnitřní pnutí a zlepší se tvarová stabilita. Nerovnoměrné chlazení způsobuje nejen vnitřní pnutí ve výstřiku, ale také kolísání vlastností v různých místech výrobku. U semikrystalických polymerů dochází ke zvýšení obsahu krystalické fáze, což zlepšuje jejich mechanické vlastnosti. [6]

Teperace ovlivňuje mnoho důležitých vlastností vstřikovaného výrobku, působí především na jeho deformaci, smrštění, kvalitu povrchu, morfologii atd.

1.3.1 Vliv teperace na morfologii výstřiku

Morfologie polymerů představuje vytváření polykrystalických útvarů během tvrdnutí reálných výrobků, tím vznikají tzv. sférolity. Morfologie závisí jak na strukturních předpokladech, tak i na vhodných kinematických podmínkách. Kinematické podmínky souvisí s pohyblivostí makromolekul a jejich částí a jsou závislé především na teplotě a době tuhnutí, tedy na podmínkách a vlastnostech teperace formy. Z výše uvedených informací vyplývá, že pokud nejsou podmínky tuhnutí stejné ve všech částech materiálu, krystalizace polymeru bude nerovnoměrná. Ze strukturního hlediska tak vzniká anizotropní, nestejnorodý materiál. [5, 7]

Krystalizující polymery v reálných podmínkách technologického zpracování nemají možnost dokonalé krystalizace, proto jsou ve skutečnosti tyto látky semikrystalické. Látky jsou tedy charakterizovány stupněm krystalinity, což udává oblast krystalického zastoupení v polymeru. Práci s vysokými teplotami formy, lze dosáhnout vysoké úrovně krystalinity, která je rozšířena až do povrchové vrstvy výstřiku. [7]



Obr. 2. Morfologie výstřiku během různých teplot temperace PE Liten MB 77. [7]

Na Obrázku 2 jsou uvedeny výsledky morfologie lineárního kopolymeru z PE Liten MB 77, o tloušťce 2 mm, během různých teplot temperace, kde jsou použity teploty a) 20 °C, b) 40 °C a c) 80 °C. Lze zde pozorovat charakteristické rozdíly struktury na povrchu výrobku a v jeho objemu. Lineární makromolekuly zde vytváří pravidelné shluky krystalické struktury, které závisí na architektuře makromolekulárního řetězce. [7]

1.3.2 Vliv teplot stěn formy na výsledné vlastnosti výrobku

Zvyšující se teplota stěn formy ovlivňuje vlastnosti vstřikovaných výrobků následujícím způsobem:

- zaručuje lepší reprodukci povrchu tvarových dutin formy – lesk, matová úprava, dezén
- zvyšuje délku pro zatečení taveniny v tokovém kanálku dutiny formy
- u semikrystalických polymerů zvyšuje obsah krystalinity a má tak vliv na vznik rovnoměrné vnitřní struktury
- zvyšuje odolnost proti tepelným deformacím
- zlepšuje tuhost, odolnost proti oděru a povrchovou tvrdost
- zlepšuje kluzné vlastnosti
- zlepšuje rozměrovou stabilitu
- snižuje obsah vnitřního pnutí u amorfních polymerů
- snižuje smrštění a dokrystalizaci
- snižuje odpor proti toku taveniny
- snižuje orientační jevy [2]

1.4 Aditivní výroba

Additive Manufacturing (dále AM) je souhrnné označení pro 3D tisk, který je využíván pro výrobu trojrozměrných dílů, navržených v CAD softwaru nebo v jiném vhodném programu. Technologie představuje tzv. laserové spékání (sintrování) kovového prášku nanášeného v tenkých vrstvách. Po slinutí dochází k tuhnutí a vyjmutí hotového výrobku z dutiny formy. Technologie umožňuje vytvoření relativně složitějších tvarů, které konvenčně dostupnými metodami (odlévání, třískové obrábění atp.) vyrobit nelze. [8]

První 3D tiskárny byly vynalezeny již koncem 80. let, avšak až po vypršení patentů v roce 2009 se staly dostupnější. V současnosti pozorujeme výrazný trend směrem k přechodu z rychlé výroby prototypových dílů z kovu RP (Rapid Prototyping) k AM. 3D tisk je tedy i přes vysoké náklady na zařízení využíván v následujících odvětvích:

- Automobilový průmysl – prototypová výroba je v současnosti rozšiřována do sériové výroby (jedná se o výrobu komponentů motoru, karosérií, chladících kanálů a dalších nosných i nenosných dílů či součástí)
- Letecký průmysl – opravy a sériová výroba, pro výrobu odlehčených součástí (části palivového systému nebo lopatky turbín motoru)
- Zdravotnictví – vysoce kvalitní zubní komponenty (korunky, šrouby či můstky), kostní náhrady, netypické prototypy implantátů a nástrojů
- Výroba forem – tvarové vložky, vytvoření chladících kanálů, které přímo kopírují tvar výrobku (pro vyšší produktivitu, delší životnost forem a minimalizování zmetkovitosti důsledkem lepšího chlazení)
- Umělecké obory – v průmyslových oborech (šperkařství, architektura) [8]

Zařízení pro 3D tisk kovů (metal 3D printing) lze řadit dle technologie, kterou používají. Principově jsou technologie podobné, liší se pouze technickými detaily a jejich názvy, přičemž každá z technologií má jisté výhody. Nejznámější a nejpoužívanější je skupina pracující na principu spékání kovů laserovým paprskem LS (Laser Sintering), mezi nejčastěji využívané technologie patří například:

- SLS – selektivní laserové spékání (Selective Laser Sintering)
- MLS – mikro-laserové spékání kovů (Micro Laser Sintering)
- DMLS – přímé kovové laserové spékání (Direct Metal Laser Sintering)
- ADAM – (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) [8]

Mezi výhody 3D tisku kovů patří zejména:

- Snížení nákladů na zařízení a nástroje – 3D tiskem součástí není nutné využití dalších obráběcích strojů a speciální nástrojů
- Šetrný ekologický proces – nižší nároky na množství materiálu (využití 98 % zbytkového materiálu)
- Rychlá výroba – vysoká efektivita využití času
- Nové geometrické a konstrukční možnosti – možnost výroby vysoce komplexních, geometrický tvarů
- Vysoká kvalita a pevnost vytištěných součástí [8]

2 AKTIVNÍ TEMPERACE

Pojem aktivní temperace charakterizuje odvod nebo přívod tepla pomocí temperačního média proudícího v rozvodných kanálcích přímo v dutině formy. Jedná se o systémy zajišťující odvod chladící kapaliny do oblastí, které jsou těžko dostupné, takže by zde nebylo možné zajistit optimální chlazení. Kanály jsou obvykle vrtány skrz dutinu formy a jádro. Mezi aktivní temperování se zařazuje:

- Kontinuální způsob temperace
- Pulsní způsob temperace
- Ranque – Hilsch vírová trubice
- Systém Contura [9, 10]

Do aktivní temperace se dále řadí i přepážkové systémy, které umožňují temperačnímu médiu rozvod ve vstříkovací formě do míst, kam se pomocí temperačních kanálů nelze dostat. Podle typu použité přepážky lze dosáhnout požadovaného rozložení teplotního pole ve vstříkovaném dílu. Existují tři typy přepážkových systémů, jedná se o:

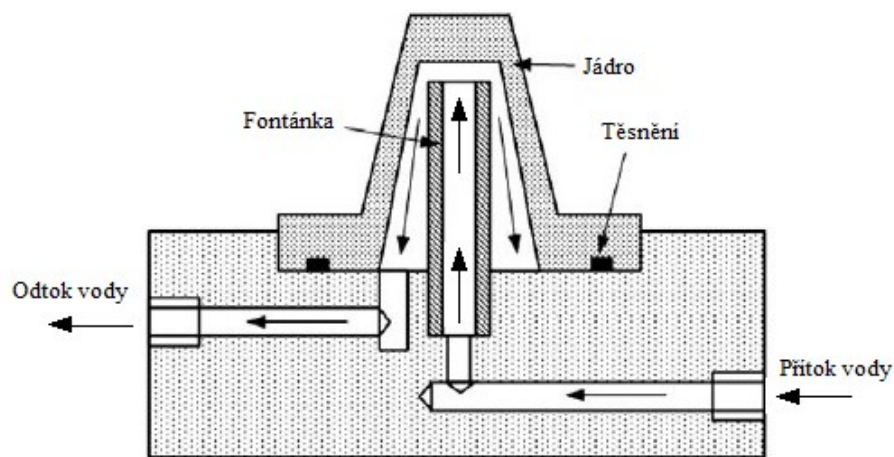
- Systém fontánek
- Systém plochých přepážek
- Systém spirálových přepážek [10]

2.1 Systém fontánek

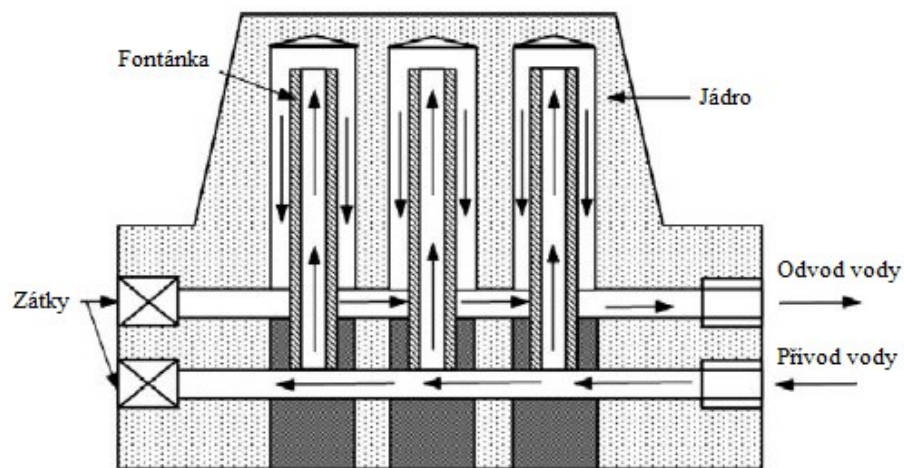
Fontánka je malá trubička umístěná ve vedlejším kanálu kolmém na hlavní temperační kanál uvnitř jádra. Jedním koncem trubičky vstupuje temperační médium a proudí ve směru od hlavního temperačního kanálu až ke konci vedlejšího, kde změni směr a po stěnách vedlejšího kanálu pak teče zpět do hlavního. Konstrukce fontánky bývá považována za účinnější než systém plochých přepážek. [11]



Obr. 3. Fontánka. [12]



Obr. 4. Princip systému jedné fontánky. [11]



Obr. 5. Princip systému s využitím více fontánek. [11]

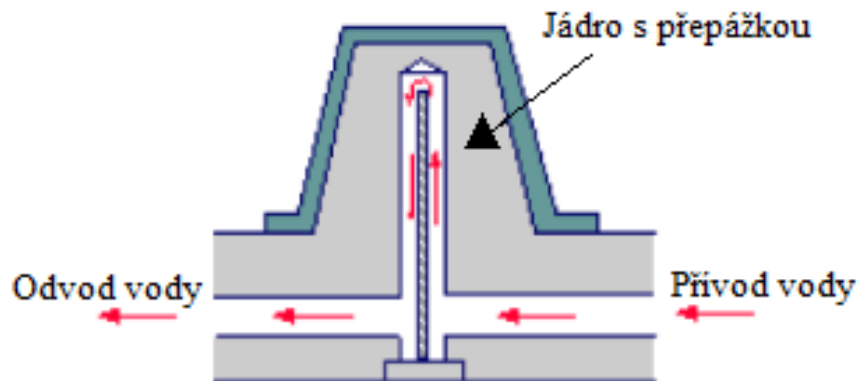
2.2 Systém plochých přepážek

Ploché přepážky představují systém, kdy je vedlejší temperační kanál uložen kolmo k hlavnímu. Přepážka rozděluje vedlejší kanál na dva polokruhové průřezy, temperační médium proudí z hlavního do vedlejšího kanálu, přičemž na konci přepážky se směr proudění změní a proudí zpět do hlavního. [10]

Nevýhoda tohoto systému spočívá v přesném uložení přepážky tak, aby byl průřez vedlejšího temperačního kanálu rozdělen přesně na dvě části. Chladicí účinek a tím i teplotní rozložení na jedné straně jádra se může lišit od rozložení na druhé straně. [10]



Obr. 6. Plochá přepážka. [12]



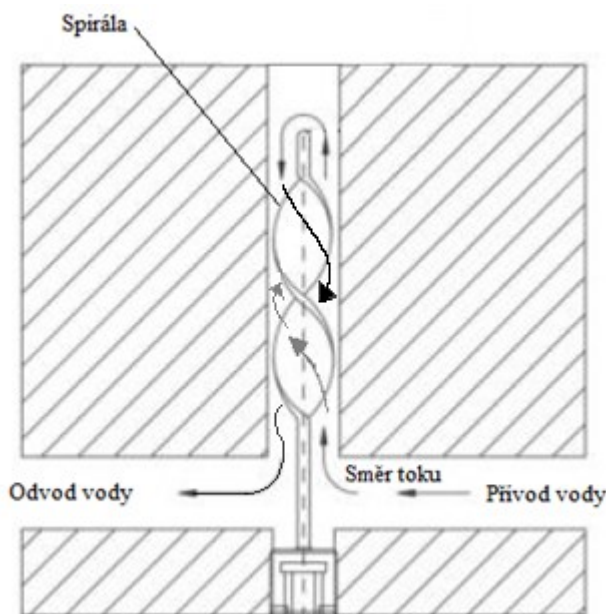
Obr. 7. Princip systému plochých přepážek. [10]

2.3 Systém spirálových překážek

Princip funkce spirálových překážek je obdobný principu plochých překážek, pouze s rozdílem spirálového tvaru přepážky. Spirálová přepážka rozděljuje vedlejší temperační kanál na dva závity s velkým stoupáním. Temperační médium proudí jedním závitem spirály z hlavního temperačního kanálu do vedlejšího kanálu, na konci přepážky se směr proudění otočí a proudí zpět do hlavního (tak jako u systému plochých přepážek). [10]



Obr. 8. Spirálová přepážka. [12]



Obr. 9. Princip systému spirálových překážek. [13]

2.4 Kontinuální způsob temperace

Kontinuálním způsobem se myslí chlazení se stálým průtokem temperačního média za konstantní teploty během vstřikování. Každá vložka má pro temperaci formy svou temperační jednotku (jedna pro tvárník a jedna pro tvárnici). [9]

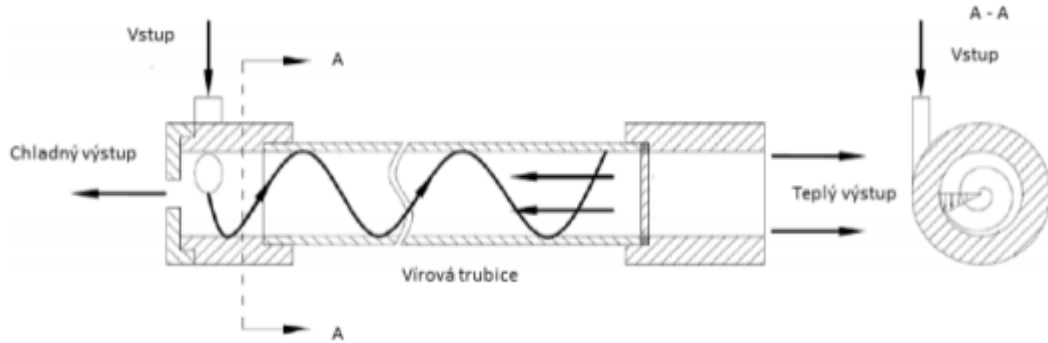
2.5 Pulsní způsob temperace

Pulsním chlazením lze zkrátit dobu cyklu o téměř 20 %, což u vstřikovaného dílu způsobuje menší diference teplot přestupem tepla během temperace. Pomocí čidel je zaznamenána rozdílná teplota formy. Z naměřených hodnot je pomocí temperační jednotky vytvořena referenční křivka pulsů, řídících pulsy chladícího média. [9]

2.6 Ranque – Hilsch vírová trubice

Termálně-fluidní mechanismus představuje vírová trubice, v níž dochází u proudu temperačního média bez chemických reakcí a mechanických součástí k přeměně tlakové energie na energii tepelnou. Vznik víru je způsoben tangenciálním umístěním dýzy v pracovní části trubice, do které je přiváděna stlačená kapalina. Kvůli nižším teplotám ve vnitřní vrstvě víru

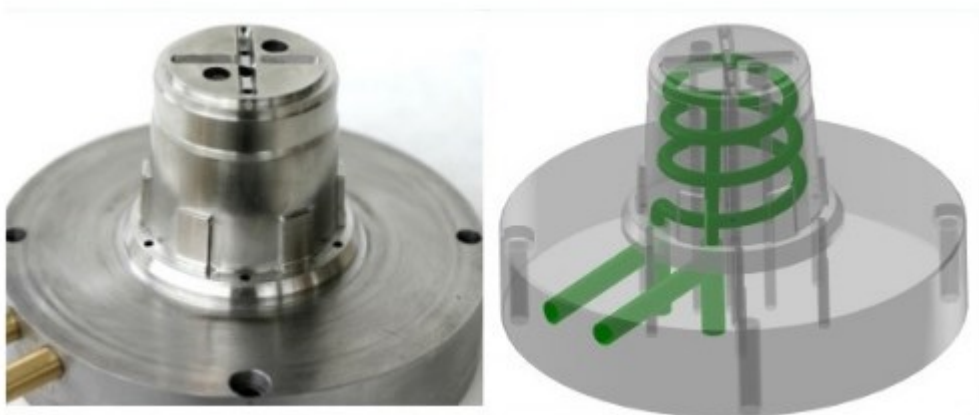
dochází ve víru k přerozdělení energie. Proud média o vyšší teplotě je z vnější vrstvy dopravován na konec trubice, odkud je pomocí regulačního ventilu vypouštěn, otáčí směr vnitřního proudu a ten vychází ven na druhé straně trubice. [9]



Obr. 10. Princip protiproudé vírové trubice. [14]

2.7 Systém Contura

Princip systému je založen na kopírování tvaru tvárníku nebo tvárnice temperačními kanál. Systém je rozložen do několika vrstev. Na stykových plochách jsou frézováním vytvořeny temperační kanál, které jsou přizpůsobeny tvaru výstřiku. Jednotlivé vrstvy jsou těsně k sobě spojeny pomocí pájení natvrdo v podtlaku. [4]



Obr. 11. Princip systému Contura. [4]

3 PASIVNÍ TEMPERACE

Pasivní temperace představuje takovou temperaci, která svými fyzikálními vlastnostmi ovlivňuje tepelný režim formy. Nejčastěji se jedná o takové materiály, které zaručují velmi dobrou teplotní vodivost, mimo jiné lze zmínit měď, hliník nebo jejich slitiny. Materiály pasivní temperace se využívají zejména ve špatně dostupných místech s malou plochou pro odvod tepla, jedná se převážně o:

- Tepelně izolační materiály
- Tepelně vodivé materiály [3]

Izolační materiály se používají například pro formy, které se musí předehtřívát na požadovanou teplotu. Pro zabránění úniku tepla vedením či sáláním, se formy odizolovávají izolačními deskami. Tyto desky nemusí izolovat pouze upínací desky, ale také boky formy na tvárnici a tvárníku. Pro montáž a demontáž formy je vhodné izolační desky opatřit otvory nad hlavami šroubů. Izolační desky, které jsou upnuty na upínacích deskách mohou dále sloužit jako ochrana proti úniku tepla z formy. [15]

Nejúčinnější odvod tepla však zajišťují temperační vložky, které mohou být vyrobeny např. technologií DMLS – laserovým spékáním kovových prášků po vrstvách o tloušťce (0,02 – 0,04) mm. Ve vložkách je tak umožněno vytvořit prakticky libovolné tvary temperačních kanálů o různém průměru a tím tak zajistit rovnoměrný a optimalizovaný odvod tepla z místa výstřiku. Tento způsob odvádění tepla ze vstřikovací formy se též nazývá konformní chlazení. [4]

Tepelně vodivé vložky jsou také využívány pro zabránění přestupu tepla do upínacích desek ve chvíli, kdy je zapotřebí vysoká teplota formy. Zde jsou voleny tepelně a pevnostně odolné materiály z nekovových anorganických látek nebo materiály na bázi vyztužených reaktoplastů. [15]

3.1 Materiály o různé tepelné vodivosti

Materiály s tepelnou vodivostí jsou využívány k odvodu, respektive přívodu tepla z míst obtížně temperovaných, jako jsou tenké tvárníky nebo vtokové vložky, na místa, kde už lze přívod tepla zajistit obvyklými způsoby. Nejčastěji jsou využívány vložky, které jsou kombinovány s aktivním temperačním systémem.

Další využití těchto materiálů je možné u členitých výrobků, jež jsou obtížně temperovány, zejména se jedná o tenké výstupky a dlouhé tvárníky. Tak jako u výrobků s lokální teplotní nehomogenitou, lze použít způsobu chlazení za pomoci vložek z vysoce tepelně vodivých materiálů (popřípadě se může jednat o nástřík na povrch tvarových dutin formy) na bázi slitin Al, Cu, Be, Co, které se často doplňují temperačním systémem s nucenou konvekcí vody. [7]

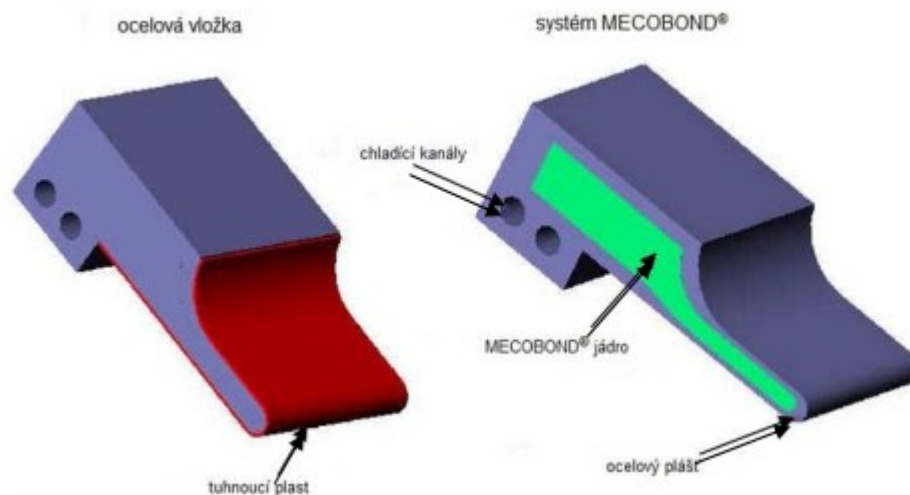
Využitím vložek z vysoce tepelně vodivých materiálů v blízkosti tvarových dutin formy, lze zajistit rovnoměrně zvýšeného odvodu tepla ze vstřikovací formy (obzvlášť při nižších teplotách temperace) tak, aby došlo k zajištění rovnoměrného teplotního zatížení nástroje i výrobku v celém jeho objemu najednou a tím zajistit zvýšení produktivity práce. [7]

Ve studii [16] byl zkoumán vliv materiálů o vysoké tepelné vodivosti na zkrácení doby chlazení testovaném na víčku z kosmetického produktu formou vložek. Pro testování byly použity materiály z mědi a slitina mědi a beryllia (berylliová měď), které byly porovnávány s běžnou nástrojovou ocelí. Slitina mědi vykazovala vyšší pevnost a tvrdost než čistá měď. Naměřené výsledky byly následně porovnány pomocí simulace Moldflow.

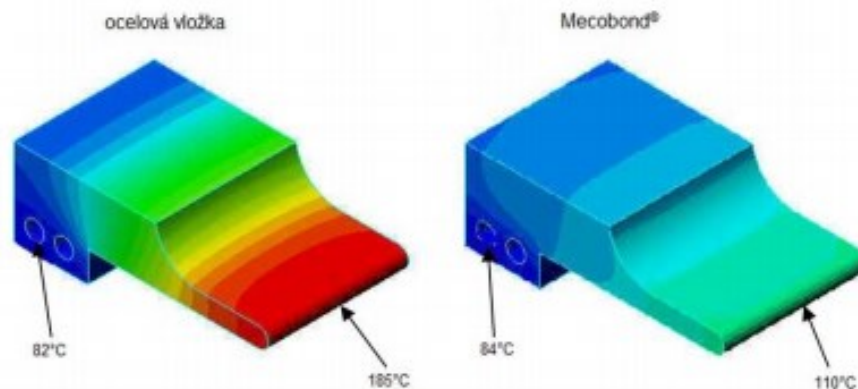
Měřením bylo zjištěno, že tyto materiály mají velký vliv na zkrácení doby cyklu důsledkem zkrácení doby chlazení a tím i minimalizování vad vzniklých vlivem deformací. Díky vyšší tepelné vodivosti mohou tyto materiály odvádět více tepla v porovnání s nástrojovou ocelí, která vyžaduje více času na ochlazení součásti.

Tyto simulace dávají výrobcům formy znalosti o tom, jak vybrat lepší materiál vložek pro snížení doby chlazení, zvýšení produktivity, snížení diferenciálního smrštění a tím i snížení deformací. [16]

Jako příklad lze uvést princip využití vložek z materiálu o vysoké tepelné vodivosti systémem MECOBOND® (Mold Equipment Composite Bond), který je založen na konstrukci tvarových vložek z oceli a mědi. Požadavkem, který byl kladen u vložky, bylo zajistit v celém objemu materiálu vysokou tepelnou vodivost při vhodných mechanických vlastnostech. Ocel zde vytváří plášť povrchu, v němž je měděné jádro (který lze tepelným zpracováním povrchově upravovat), čímž zajišťuje ochranu proti opotřebení a mechanické stabilitě, měděné jádro formy pak provádí rovnoměrný a rychlý odvod tepla. Měď a ocel jsou vzájemně difuzně spojeny. [17]



Obr. 12. Princip systému MECOBOND® ve srovnání s čistě ocelovou vložkou. [17]



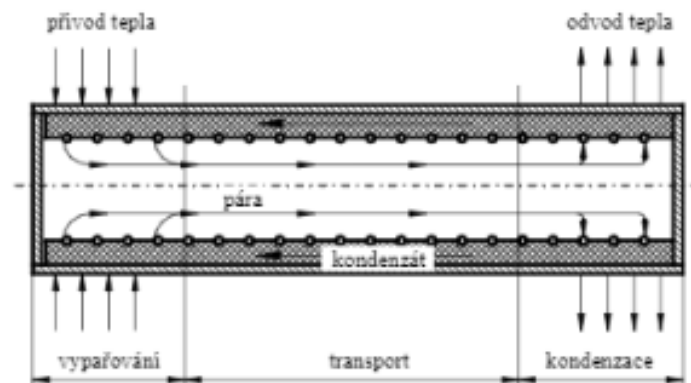
Obr. 13. Výsledky simulace teplotních polí na povrchu vložky využitím systému MECOBOND® ve srovnání s ocelovou vložkou. [17]

3.2 Tepelná trubice

Tepelná trubice je zařízení, které umožňuje intenzivní přenos tepla z míst o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou.

Trubici opatřenou měděným, hliníkovým nebo ocelovým pláštěm z obou stran uzavřenou zátkami částečně vyplňuje teplotně stálá látka. Zahříváním jedné strany v části se zdrojem tepla, dochází k vypařování teplotně stálého média. Vzniklá pára proudí do druhé ochlazené části trubice, kde následně kondenzuje. Kondenzát se pomocí gravitačních, odstředivých nebo kapilárních sil vrací zpět do části se zdrojem tepla a celý cyklus se tak opakuje.

K intenzivní výměně tepla dochází fázovou změnou teplotně stálého média uvnitř trubice, mezi které patří např. čpavek, methylalkohol, voda, rtuť aj. [3]



Obr. 14. Princip využití tepelné trubice. [18]

Pro trubice jsou zpravidla charakteristické malé průměry, které jsou v rozsahu od 2 do 20 mm v délkách od 50 do 300 mm. Nejčastěji jsou chladicí trubice forem využívány zejména pro tvarově členité výrobky, chlazení tvárnků nebo vstřikování tenkých a dlouhých výstřiků, kdy nahrazují složité umístění temperačních kanálů. [3, 18]

Tepelné trubice jsou často využívány současně s použitím dosavadních systémů temperace s nuceným prouděním vody. Umožňují nahrazení stabilizace teploty v materiálech formy a svým intenzivním průběhem umožňují zkrácení pracovního cyklu až o 30 %. [3, 18]

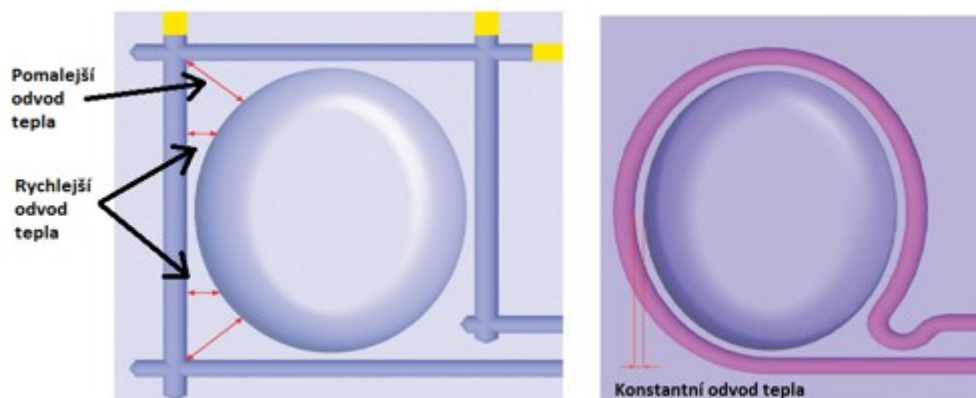
4 KONFORMNÍ ZPŮSOB CHLAZENÍ

Během vstřikování dochází ke složitým tepelným, fyzikálním a mechanickým dějům v nástroji, což nelze dostatečně ošetřit pomocí konvenčních způsobů, proto se jako vhodné řešení této problematiky nabízí využití konformního chlazení. Konformním chlazením rozumíme takový způsob temperace, při němž temperační kanál různých rozměrů a tvarů co nejpřesněji kopíruje tvar výrobku v minimální vzdálenosti dutiny formy. [19]

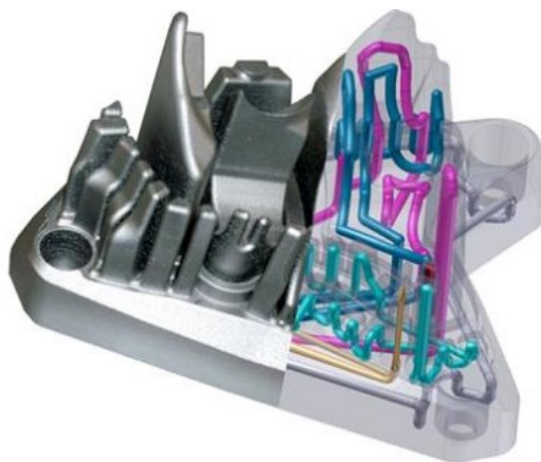
U velkoplošných a složitých dílů, kdy dochází k vystavování vstřikovací formy rozdílným teplotám, lze temperační okruh konformního chlazení rozdělit na dílčí okruhy. Nehomogenní teplotní pole má negativní vliv v důsledku zhoršení vlastností a deformací. [20]

Použitím klasických vrtaných temperačních kanálů vznikají problémy s jejich přizpůsobením k povrchu dutiny vstřikovací formy. Konvenční způsob umožňuje použít pouze temperační systém formou svislých, vodorovných nebo šikmých temperačních kanálů (případně jejich kombinaci), což může mít negativní vliv na celkovou dobu vstřikovacího cyklu i na výslednou kvalitu výrobků. Komplikace nastávají také u možnosti optimalizace odvodu tepla vlivem konstrukční složitosti, kdy je nutno brát ohledy na umístění vtokového systému, vyhazovačů atp. [21]

Technologií konformního chlazení za pomoci 3D tisku kovu lze vytisknout tvarové vložky i s rozvodem temperačních kanálů. Výhodou tohoto systému je, že lze navrhnout a zhotovit takové součásti, které disponují rovnoměrným odvodem tepla. Lze si tedy připravit takový způsob temperace, kdy temperační kanály mají negativní tvar výrobku v jeho těsné blízkosti (v minimální vzdálenosti od povrchu v dutině formy), a tímto způsobem zajistit, že bude vzniklé teplo rovnoměrně odváděno stejnou rychlostí ze všech míst současně. [19]



Obr. 15. Temperační okruh klasický (vlevo) a konformní chlazení (vpravo). [22]

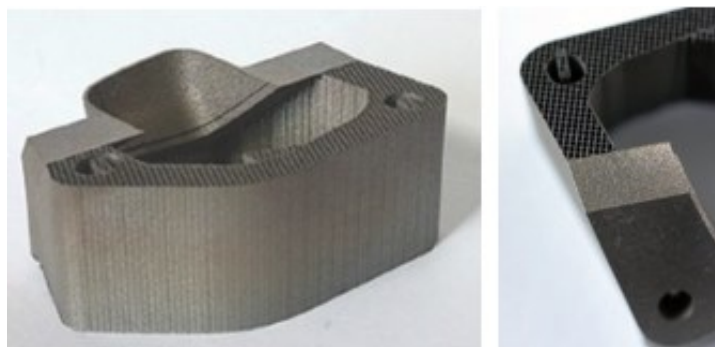


Obr. 16. Díl s využitím konformního chlazení. [23]

4.1 Technologie DMLS

Technologie DMLS neboli Direct Metal Laser Sintering představuje konformní způsob chlazení spadající do oblasti aditivní výroby, kdy je vymodelovaný díl z CAD softwaru importován do 3D tiskárny (nejčastěji ve formátu STL). Vznik trojrozměrného výrobku je dán nanášením materiálu v jednotlivých tenkých vrstvách na sebe (obvyklá tloušťka se pohybuje okolo 0,02 nebo 0,04 mm). Tloušťka vrstvy ovlivňuje rychlost a přesnost výroby – tenčí vrstva sice prodlužuje výrobní čas, ale umožňuje tisk s vyšší přesností. [24, 25, 26]

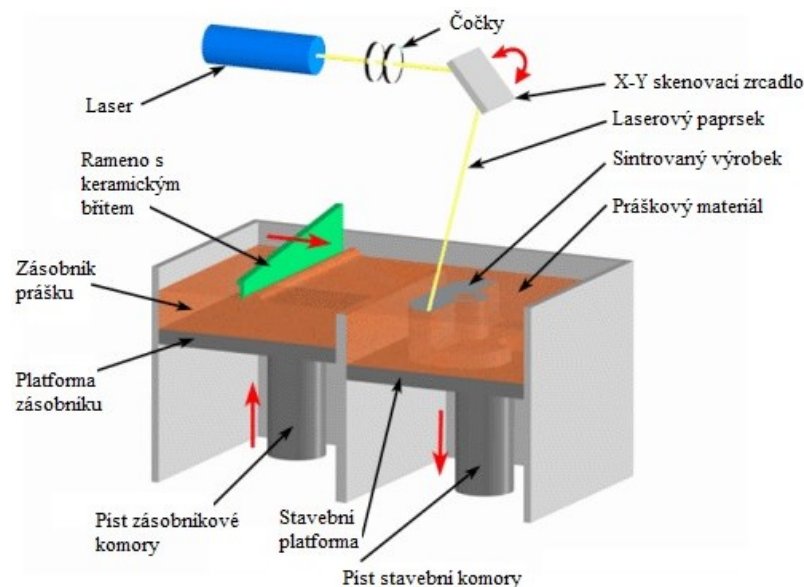
Pro vytvoření součásti se stejnými vlastnostmi, jakými disponoval původní materiál je kovový prášek bez pojiva o průměru přibližně 20 μm roztaven vlivem koncentrovaného paprsku energie (laserového paprsku) o výkonu (200 – 400) W. Po ochlazení dochází k tuhnutí a následně k vlastnímu vzniku součásti. Výhodou DMLS, která tak umožňuje výrobu složitějších tvarů součástí, je zejména vysoké rozlišení detailů díky použití tenkých vrstev dané menším průměrem kovového prášku. [24, 26]



Obr. 17. 3D tisk dílu technologií direct metal laser sintering. [26]

U většiny materiálů je během 3D tisku pracovní komora vyplněna dusíkem z důvodu zajištění ochrany vyráběných dílů proti oxidaci. V případě použití titanu, tvoří ochrannou atmosféru argon. [26]

Proces DMLS lze provést dvěma způsoby nanášením prášku nebo práškovým ložem, kdy rozdíl spočívá ve způsobu nanášení jednotlivých vrstev prášku. U metody nanášení prášku je kovový prášek v násypce, která jej roztaví a poté nanese v tenké vrstvě na stavební podložku. Výhodou je, že lze použít více druhů materiálu současně z vlastní násypky. Metoda práškového lože nabízí využití pouze jednoho druhu materiálu, ale zato rychlejší sestavení součástí, kdy pohyblivý práškový dávkovač s pístem pro přívod prášku nahrne pomocí ramene s keramickým břitkem z dávkovací komory kovový prášek do práškového lože. Pomocí laseru se vrstva kovového prášku sline, takto vznikají další vrstvy a následně po ochlazení pak slinutý výrobek, ze kterého je následně odstraněna podpurná konstrukce. Ta je během tisku ukotvena k základní stavební platformě a zajišťuje tak fixaci dílu ve správné poloze. Oba způsoby umožňují, že přebytečný prášek lze znovu použít pro další tisk. [24, 26]



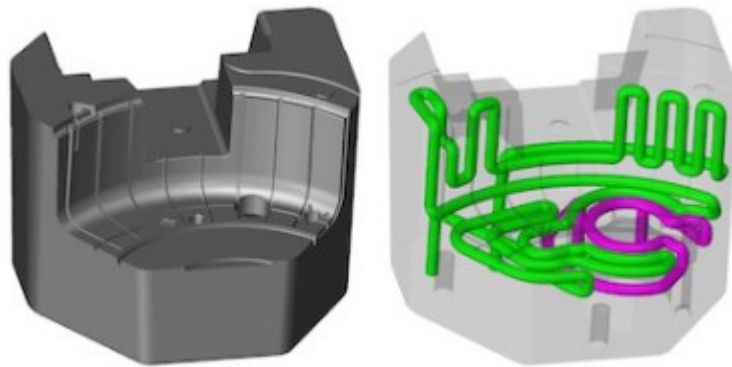
Obr. 18. Princip technologie direct metal laser sintering. [24]

Mezi materiály, které jsou pro tuto technologii vhodné, lze jmenovat zejména: legovanou ocel, nerezovou ocel, bronz, hliník, kobalt-chrom a titan. Mezi nejpoužívanější materiály se řadí martenzitická nástrojová ocel s označením 1.2709, která nabízí dílům z ní vyrobených homogenní strukturu o tvrdosti (36 – 39) HRC. Tyto díly mohou být následně po dobu 6 hodin a při 490 °C zušlechťeny až na tvrdost (52 – 54) HRC, při této tvrdosti pak materiál

vykazuje pevnost v tahu okolo 1900 MPa. Hotové díly lze následně dále opracovávat (obrábět, erodovat a leštit) stejně jako konvekční nástrojové oceli. [24, 27]

Technologie DMLS nabízí široké spektrum možností, jak při návrhu, tak i při samotné výrobě temperační soustavy z hlediska tvarů a umístění kanálů v dutině formy. Takto zhotovené temperační kanály zajišťují konstantní odvod tepla, rovnoměrné rozložení teplot v dutině formy a zároveň i rychlejší chlazení (popř. ohřev), což zvyšuje i rozměrovou přesnost a stálost plastových výstřiků zároveň umožňuje zkrácení výrobního cyklu až o 40 %.

U DMLS také zpravidla platí, že čím je geometrie budoucího výrobku složitější, tím je metoda ekonomicky výhodnější a efektivnější. V současnosti je tato technologie využívána pro výrobu součástí forem s chladicími kanály nebo také pro výrobu temperačních vložek. [25]



Obr. 19. Využití direct metal laser sintering při konformním chlazení. [21]

4.2 Technologie ADAM

Atomic Diffusion Additive Manufacturing je technologie vyvinutá společností MarkForged Inc. a oproti DMLS bývá považována za dostupnější a levnější variantu. Sintrováním v peci lze při použití ADAM získat z křehkého výtisku vysoce pevný celistvý kovový díl.

Pro vznik kovového dílu je zapotřebí návrh 3D modelu pomocí Eiger softwaru uložený ve formátu STL., který pak software pošle vymodelovaný včetně vlastních parametrů do 3D tiskárny Metal X společnosti MarkForged. Tvar budoucího dílu je tištěn po jednotlivých vrstvách pomocí kovového prášku s dočasným termoplastickým pojivem, model je zvětšen tak, aby se kompenzovalo smrštění ve fázi sintrování.

Po vytištění dochází k omytí částí pojiva a dalších nečistot. Vytištěný křehký díl s rozlišením výtisku (50 – 200) μm je sintrován v peci při vysokých teplotách, kde dochází k roztavení kovu, vypálení zbytkového pojiva a následně ke vzniku celokovového pevného dílu. I když

je funkční díl připraven k používání, může být ještě provedena povrchová úprava např. pís-kováním, broušením atp., jako u jiných metod kovového 3D tisku. Dočasné podpory z ter-moplastického polymeru lze lehce odstranit pomocí keramické separační vrstvy. [29, 30]

3D tiskárny MarkForged Metal X o vysoké provozní spolehlivosti mají vyhřívanou tiskovou komoru o rozměrech (300 x 220 x 180) mm, kdy maximální velikost výtisku je (250 x 183 x 150) mm a maximální hmotnost 10 kg.

Tisk probíhá pomocí materiálu dodávaného na cívkách. 3D tiskárna má 2 trysky, přičemž jedna tiskne samotný materiál, což je kovový prášek vázaný v plastovém nosiči, druhá tiskne na dočasných podporách keramický materiál pro separační vrstvu. Ve speciálním roztoku ve stanici Wash-1 (o objemu 18,36 l) je primární spojovací materiál vymyt, přičemž zanechává výtisk částečně porézní, aby mohl být spolehlivě zbytkový plastový nosič vypálen. Zpevnění dílu probíhá za vysokých teplot v ochranné atmosféře sintrovací pece označené jako Sinter-1 o objemu 4,76 litru s maximální přípustnou teplotou 1300 °C. V 3D tiskárně se standartně používají zvláště plyny argon a směs argonu a vodíku. [29]

Parametry procesu ADAM jsou navrženy automaticky pomocí zmíněného softwaru Eiger. Jedná se o CAM software, který řídí celý proces od návrhu součásti (CAD modelu) až po fázi slinování. Jelikož jsou parametry procesu předem dány softwarem, nelze je již později měnit s výjimkou tloušťky vrstvy, která může být 0,050 mm, 0,125 mm nebo 0,250 mm. Jakmile je tloušťka vrstvy nastavena, software MarkForged Eiger vypočítá zvětšení objemu, aby se zohlednilo smrštění součásti během operací po tisku. Následně poskytne konečnou geometrii, která má být vytištěna a vypočte minimální čas potřebný pro odstranění polymer-ního pojiva (doba praní). Software také navrhne a definuje tepelné zpracování – slinování. [30]

Ve studii [30], jejíž cílem je poskytnout předběžnou charakterizaci technologie ADAM po-mocí systému MarkForged Metal X, je zkoumána hustota tištěného materiálu 17-4 PH, drs-nost povrchu a rozměrová přesnost (mění se tloušťka a velikost vzorku), přičemž rozmě-rová přesnost této technologie je vyhodnocena pomocí stupňů ISO IT. Přesnost procesu do-sahuje třídy IT13, která je srovnatelná s tradičními procesy výroby kovových polotovarů.

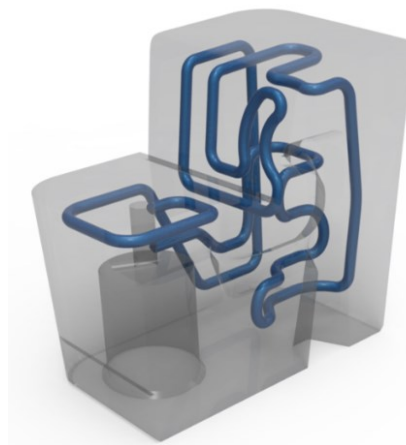
Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že software Eiger odhadl smrštění zelené části (tzv. „Green Part“ – vytištěný díl s obsahem pojiva a kovového materiálu) po zpracování na 20 %, což je měřítkový faktor implementovaný do softwaru pro lineární dimenzi. Odhado-vané smršťování objemu zde bylo naměřeno na hodnotu 72,8 %.

Analýza hustoty prokázala, že proces ADAM nemůže dosáhnout stejné úrovně hustoty pozorované u jiných procesů AM, které využívají tepelný zdroj k lokálnímu tavení kovových prášků. Součásti byly vyrobeny s výplní o plné hustotě (FD) nebo s trojúhelníkovou buňkou (TC). Pokud se použije výplň FD, maximální hustota dosažená na konci slinovací fáze je přibližně 90 %, zatímco polovina této hodnoty je dosažena pomocí jiné strategie výplně.

Z této skutečnosti vyplývá, že dutiny zanechané trojúhelníkovými prázdnými buňkami nemohou být vyplněny během posledního slinovacího kroku v peci, přesto je rozměrová přesnost finálních částí ADAM poměrně dobrá také pro výplň TC i pro nižší rozlišení vrstvy. Pro zajištění optimální přesnosti součásti a drsnosti povrchu, by měly být použity další obráběcí operace. [30]

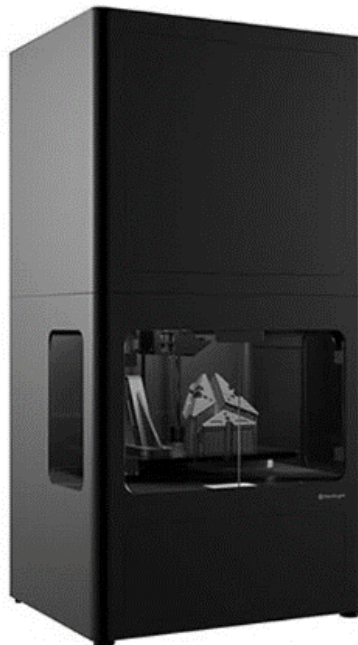


Obr. 20. Princip technologie atomic diffusion additive manufacturing. [30]



Obr. 21. Konformní chlazení metodou atomic diffusion additive manufacturing. [28]

Technologie ADAM vychází z technologie MIM (Metal Injection Moulding). V současnosti lze s určitostí tvrdit, že 3D tiskárna Metal X umožňuje až 50násobně zkrátit výrobní čas za zlomek investičních nákladů, oproti jiným tradičním metodám. Technologii lze uplatnit pro tyto materiály: Inconel 625, nástrojové oceli H13, D2 a A2, nerezová ocel 17-4 PH; předpokládá se použití pro Titan Ti-6Al-4V, měď, hliník a nerezovou ocel 316L. [29]



Obr. 22. 3D tiskárna MarkForged Metal X. [31]

Pomocí cloudového softwaru Eiger a laserového senzoru na tiskové hlavě lze skenovat součást během tisku proto, aby byla zajištěna rozměrová přesnost. [31]

4.3 Selektivní spékání kovů laserem (SLS)

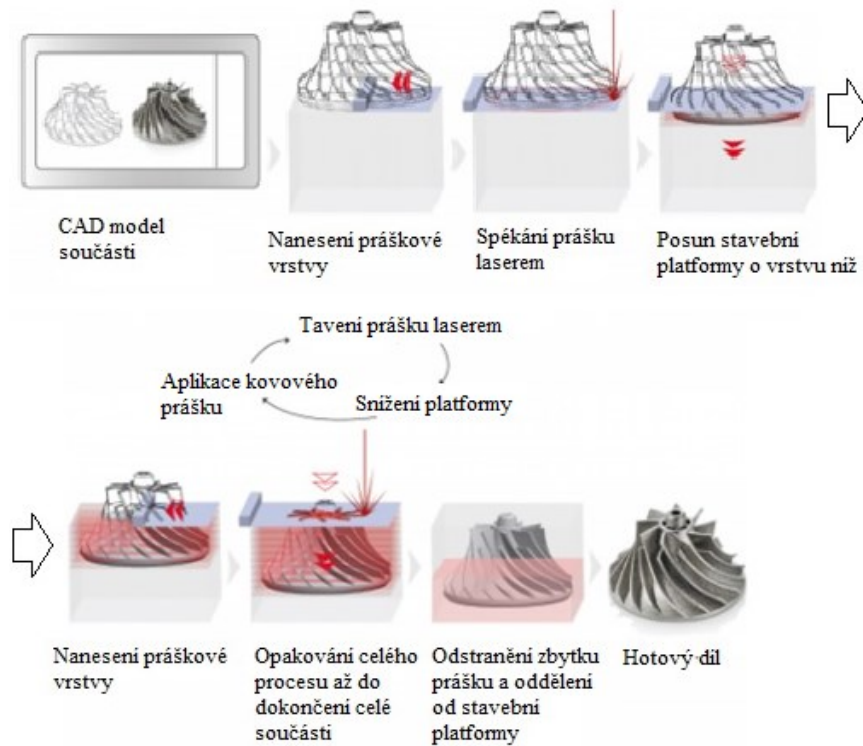
Mezi metody aditivní výroby patří také SLS (Selective Laser Sintering), u níž vznik výrobku probíhá pomocí tavení práškového materiálu, kterým může být jak kov, tak i keramika, plast nebo sklo. Materiál je v tomto případě spékán po tenkých vrstvách v ploše řezů pomocí vysoce výkonného laseru dle digitálního modelu přeneseného z příslušného softwaru do 3D tiskárny.

Nejdříve je vrstva práškového materiálu nanášena po celé ploše stavební platformy, pak dojde k předehřevu materiálu na teplotu blízkou teploty tání, tak aby bylo umožněno laseru využít veškeré energie k spékání materiálu v ploše vytvářeného řezu modelem. Když je příslušná plocha osvětlena laserem, klesne stavební platforma o tloušťku jedné vrstvy níž, poté se nanese další vrstva materiálu a proces se opakuje, až do dokončení celého výrobku.

Mezi výhody, kdy vyráběný model je po celou dobu tisku obklopen zbytkem práškového materiálu patří fakt, že nastává eliminace využití dočasných podpor. SLS tedy nabízí vznik velmi složitých struktur s kvalitou srovnatelnou s běžnými konvenčními technologiemi.[32]

4.4 Technologie MLS (Mikro Laserové Spékání kovů)

MLS (Micro Laser Sintering) je aditivní technologie výroby na bázi práškové lože, spadající do selektivního laserového sinterování SLS a selektivního laserového tavení SLM, jedná se tedy o úplně stejný princip výroby s tím rozdílem, že MLS nabízí výrobu mikro-kovových součástí v několika průmyslových odvětvích. [33]



Obr. 23. Princip laserového sinterování. [33]

Tímto způsobem výroby lze vyrobit mikro-kovové díly s maximální přesností, rozlišením detailů a kvalitou povrchu, což umožňuje vyrábět pohyblivé části a sestavy v jednom kroku. Základem je kombinace velmi malé velikosti bodu laserového paprsku, speciálního mikro prášku a velmi tenkých vrstev o tloušťce menší než 0,001 mm.

Metoda je používána v jakémkoliv průmyslu vyžadujícím malé kovové díly s vysokou přesností, hladkou povrchovou úpravou, vynikajícím rozlišením detailů a složitými tvary. V současné době jsou hlavními průmyslovými odvětvími lékařský, strojírenský, letecký a kosmický průmysl, dále pak také energetika a chemie, šperky a hodinářství. [33]

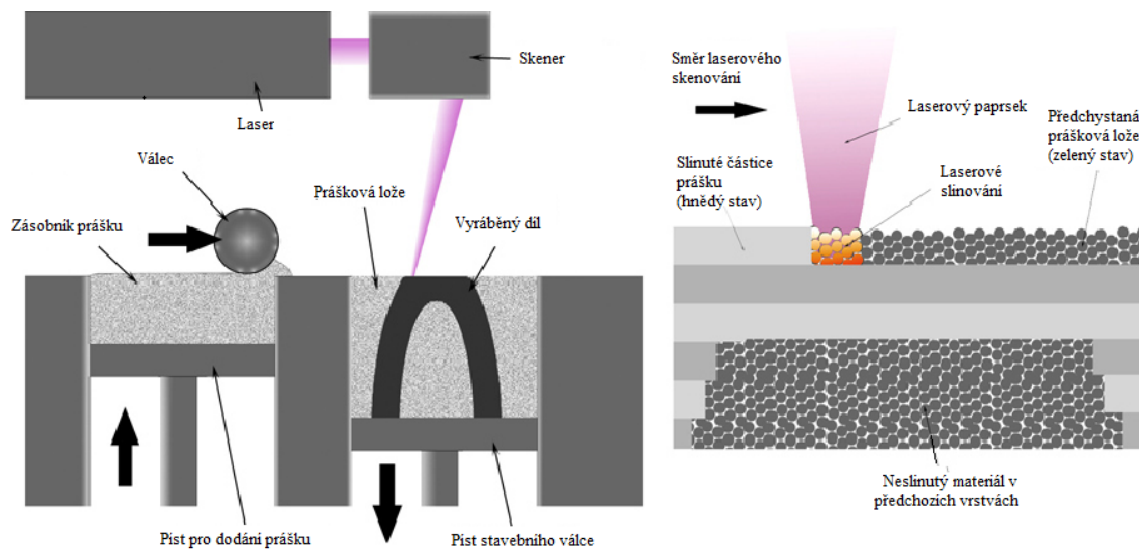
4.5 Laserové tavení založené na práškovém loži (LMF)

Laser metal fusion (LMF) je technologie aditivní výroby, kdy je obrobek vytvořen po vrstvách v práškovém loži. Laser roztaví kovový prášek ve vrstvách materiálu přesně v těch místech, která jsou udávána konstrukčními údaji CAD dílu. Z tohoto důvodu je postup často označován jako 3D tisk, často je používán i pojem laserové sintrování a laserové tavení.

Metoda je hojně využívána u sériové výroby pro geometricky komplexní díly s vnitřními kanály a dutinami, které nelze konvenčními metodami vyrobit vůbec, nebo pouze s nízkou efektivitou. Díky 3D tisku kovů vznikají součásti s nízkou hmotností a o vysoké stabilitě, což je vítáno například u lehkých konstrukcí, implantátů nebo i protéz zhotovených na míru. Technologie je často využívána i k opravám dílů a navařování povlaků. [34]

Pro samotný tisk nebo opravu už zhotoveného dílu za pomoci dotisknutí kovové části je zapotřebí 3D návrh dílu vymodelovaný v příslušném softwaru. Následně jsou data převedeny do stroje a díl je umístěn na desku s kovovým substrátem. V případě potřeb se mohou nasadit podpůrné struktury. Pro proces tisku je díl rozložen do jednotlivých vrstev („Slicen“), pak jsou nastaveny a definovány příslušné dráhy laseru („Hatchen“).

Samotný tisk konstrukce dílu probíhá po vrstvách na desce se substrátem v ochranné atmosféře. V procesní komoře, ve které tisk probíhá jsou v jedné ose vedle sebe osazeny zásobovací, stavební a přepadový válec. Nanášecí zařízení nahrne prášek ze zásobovacího do stavebního válce (1), pak je laserem roztavena první prášková vrstva dle obrysu dílu společně s vrstvou pod ním (2), následně se stavební válec posune o jednu vrstvu níž (3). Přebytečný materiál (prášková lože), ve kterém je díl téměř ponořen je pak naveden do přepadového válce. Proces je opakován tak dlouho, dokud není zhotoven celý díl (příp. opravena potřebná část). Za účelem zvýšení produktivity je u společnosti TRUMPF využíváno více laserů pracujících současně (tzv. princip multilaseru). Vytisknutý díl je ve vybalovacím zařízení zbaven zbytkového kovového prášku, následně je od desky oddělen (příp. jsou odstraněny použité podpůrné struktury). Hotový díl může být v případě potřeby finálně opracován. [34]



Obr. 24. Princip metody laser metal fusion. [35]

4.6 Laserové práškové navařování (LMD)

Laser Metal Deposition bývá často označováno také jako direct metal deposition (DMD) nebo direct energy deposition (DED). Jedná se o proces, kdy laser na povrchu dílu vytvoří tavnou lázeň, pomocí trysky je automaticky nanesen kovový prášek, čímž vzniknou vzájemně spojené svarové housenky vytvářející struktury na stávajících základních tělesech. Touto metodou lze vyrobit i celé díly, uplatnění tedy nachází v odvětvích jako letecký průmysl, kosmonautika, energetika, automobilový průmysl, petrochemie, lékařství atd. Tuto technologii lze kombinovat mimo jiné se svařováním a řezáním laserovým paprskem.

Během jednoho procesu lze použít několik práškových zásobníků současně nebo dokonce materiály mezi sebou měnit. Kombinací různých druhů materiálů lze vyrobit i sendvičové struktury, přičemž navařování 3D struktury může probíhat i na nerovných plochách.

Princip metody spočívá v lokálním ohřevu obrobku laserovým paprskem s cílem vytvořit tavnou lázeň. Z trysky umístěné v pracovní optice tryská přímo do tavné lázně jemný kovový prášek, který se zde roztaví a následně se spojí se základním materiálem. Takto vznikne vrstva o tloušťce (0,2 – 1) mm, na které lze dle potřeby vytvářet další vrstvy. V pracovní komoře s ochranným plynem argonem se během nanášení čar, ploch nebo tvarů automaticky řízená optika pohybuje přímo nad obrobkem, při čemž inteligentní sensorika zajišťuje rovnoměrnou tloušťku vrstvy.

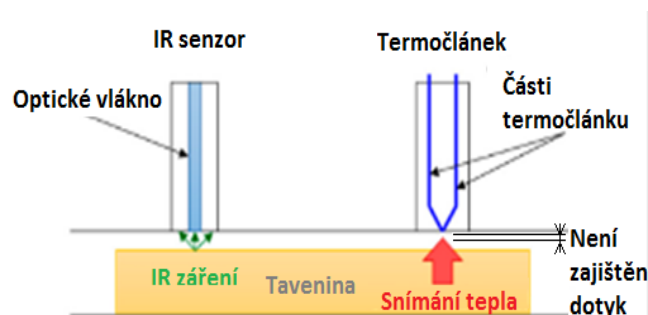
Nejčastěji je tato metoda využívána pro výplně trhlín, vytváření celistvých dílců, opravy komponent či povlakování. [36]

5 MĚŘENÍ TEPLoty V DUTINĚ FORMY

Vzhledem k tomu, že teplotní senzor musí být zabudován do dutiny formy a značné množství tepla je tak přenášeno z hlavičky senzoru do okolních částí formy, mohou senzory v důsledku této skutečnosti mít při měření fázovou prodlevu a chybu v ustáleném stavu. [37]

Měření teploty se v dutině formy provádí za pomoci teplotních snímačů, které jsou dále rozděleny na:

- dotykové (kontaktní), mezi které patří termočlánekové snímače
- odporové snímače
- bezdotykové (bezkontaktní) snímače teploty využívající ke svému měření účinku infračerveného záření (IR) [38]



Obr. 25. Porovnání měření kontaktním a bezkontaktním snímačem teploty. [37]

Z Obr. 25 je zřejmé, že infračervené snímače teploty umožňují rychlé a snadné měření při vysokých teplotách, kdy vyhodnocení probíhá z tepelného záření (vysálaného tepla), proto nemusí být zajištěn kontakt (dotyk) s taveninou (hlavně při smršťování – viz dotykové snímače) tak, jako je tomu u termočlánekových senzorů.

5.1 Dotykové snímače

U dotykových snímačů je nutností zajistit kontakt (dotyk) s taveninou, což může přivést značnou nevýhodu. Během ochlazování taveniny mimo jiné dochází k jejímu smršťování, což může způsobit to, že nedojde ke styku (dotyku) s taveninou.

5.1.1 Termočlánek

Zapuštěné termočláneky do povrchu dutiny formy jsou většinou vyrobeny z kovového materiálu, což způsobuje, že senzory účinně měří povrchovou teplotu formy namísto, objemové teploty taveniny. [37, 39]

Termočlánky se obvykle skládají ze dvou různých materiálů kovových drátů spojených na jednom konci, kdy druhé dva konce jsou připojeny k termočlánekovému měřiči teploty. Za jednu z hlavních výhod lze považovat, využití termočláneků při měření v širokém rozsahu teplot. [38]



Obr. 26. Termočlánekový senzor teplot. [38]

5.1.2 Odporové snímače teploty

Odporové snímače jsou založeny na změnách odporů v kovu. Odpor s teplotou lineárně roste, a tím jsou změny teplot zaznamenávány. Tyto snímače bývají většinou tvořeny tenkým drátem, vyrobeným nejčastěji z materiálů jako platina, nikl nebo měď. [40]



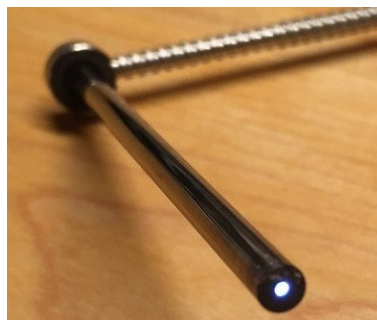
Obr. 27. Odporový senzor teplot. [38]

5.2 Bezdotykové snímače

Měření je u těchto snímačů založeno na vyhodnocování tepelného záření z těles, kdy se část energie přeměňuje na energii, která je následně z těchto těles vysílána formou elektromagnetického záření. Bezdotykové snímače se používají pro měření povrchové teploty a mezi jejich hlavní výhody patří rychlost a snadnost měření. [38, 40]

5.2.1 Infračervené senzory (IR)

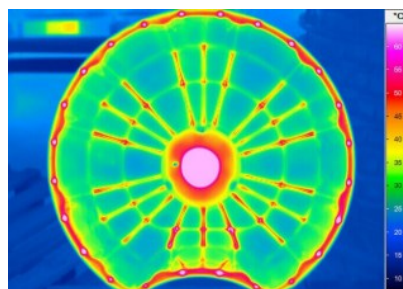
Na rozdíl od termočlánků nejsou infračervené senzory ovlivněny vedením tepla nebo konvekcí tepla. Detekce vzniku rychlých změn teplot během plnění a následného ochlazení je zajištěna velmi rychlou dobou odezvy (1 – 240) ms. IR senzory snímají vysálané teplo přímo z taveniny, bezkontaktní snímání umožňuje měření záření nejen z jejího povrchu, ale také z hlubších vrstev taveniny. Používají se při teplotách až do 3000 °C a lze jimi měřit teploty během fáze plnění, chlazení i otevírání formy. Následné vyhodnocování tepelného záření pak probíhá z měření celé tloušťky materiálu. [37, 38]



Obr. 28. Infračervený senzor teplot. [38]

5.2.2 IR termovizní kamery

Infračervené termokamery se často používají k vizualizaci dutin a částí lisovaných za horka nebo pro vizualizaci teplot na povrchu formy a také výstřiku na základě vlnových délek elektromagnetického spektra, které jsou z objektů vyzařovány. Taková kamera může poskytnout mapy teplot formy, které ukazují „horká místa“ v plastových částech, což indikuje distribuci nevyvážených chladicích zón. Tepelné skenování plastových dílů ihned po demontáži poskytuje důležité informace o možných zdrojích deformace součástí. Princip je odvozen od Stefan-Boltzmanova zákona, při němž je využíváno tepelné záření sledovaného tělesa. Další možnosti pro vytvoření vizualizace teplotního pole jsou také simulace. [37, 39, 40, 41]



Obr. 29. Průběh výstřiku zaznamenan termovizní kamerou. [40]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

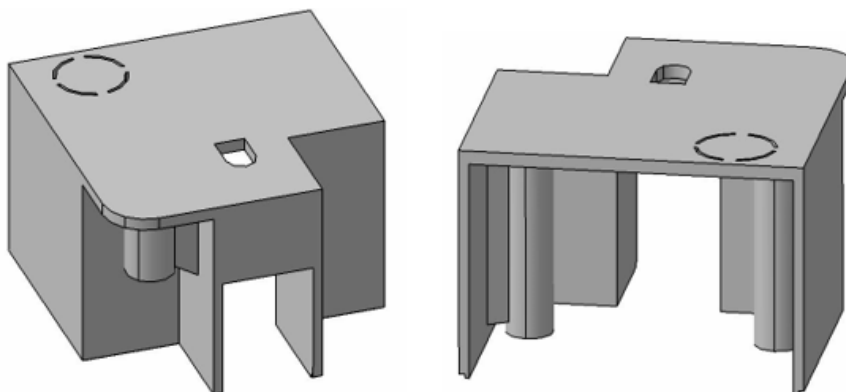
Hlavní cíle diplomové práce jsou:

- Ověřit vliv vybraných typů aktivní a pasivní teploty na finální kvalitu vstříkovaných dílů, především z hlediska výsledné deformace.
- Prozkoumat efekt využití vložek o rozdílné tepelné vodivosti jako prvků pasivní teploty.
- Reálně naměřené výsledky porovnat s hodnotami získanými ze simulace v programu Moldflow.

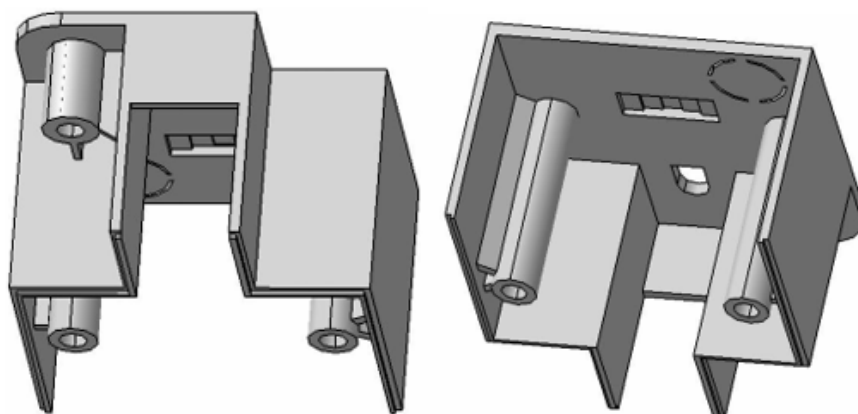
7 TESTOVANÝ DÍL A NÁSTROJ PRO JEHO VÝROBU

Pro samotné testování byl zvolen díl s hlubokými nálitky, které způsobují oproti rovinným plochám pomalejší odvod tepla z dutiny formy. V místech s montážními nálitky dochází ke kumulaci tepla. Tento negativní jev je způsoben vysokým poměrem hmoty termoplastické taveniny vzhledem k povrchu chlazené formy. Nerovnoměrné chlazení a tuhnutí vyvolávající smrštění posléze vede ke vzniku vnitřního pnutí uvnitř výrobku. V oblasti nálitků je nutné odvádět teplo intenzivněji než z jiných částí formy, protože v těchto místech dochází k zatuhnutí taveniny později. Intenzivnější odvod tepla z oblastí s hlubokými nálitky je zajištěn jádrovými trny z vysoce tepelně vodivého materiálu.

Pokud je teplota stěny vstřikovací formy na vnitřní a vnější straně výstřiku rozdílná, lze pozorovat, že materiál bude mít ve styku s teplejší stěnou formy výrazně větší smrštění než ve styku s chladnější stěnou formy. Dle (L. Zemana 2009) lze tohoto jevu využít k alespoň částečné eliminaci vzniklých deformací, přičemž je nutno brát zřetel na přívod většího vnitřního pnutí do výstřiku.



Obr. 30. Model zvoleného výrobku – přední a zadní strana (pohled seshora).



Obr. 31. Model zvoleného výrobku – přední a zadní strana (pohled zespodu).

7.1 Materiál testovaného dílu

Pro výrobu zadaného výrobku byl zvolen materiál Polypropylen (PP) – Tatren IM 2575. Jedná se o kopolymer polypropylenů s obsahem nukleační a antistatické látky. Vyznačuje se vysokou rázovou houževnatostí i při minusových teplotách. Je určen zejména pro výrobu skladovacích a přepravních kontejnerů a jako díly v automobilovém průmyslu, či pro výrobu hraček. PP zaručuje zdravotní nezávadnost, takže je vhodný i při styku s potravinami nebo také pro výrobu farmaceutického balícího produktu. Doporučená teplota ke zpracování je kolem (190 – 250) °C. [43]

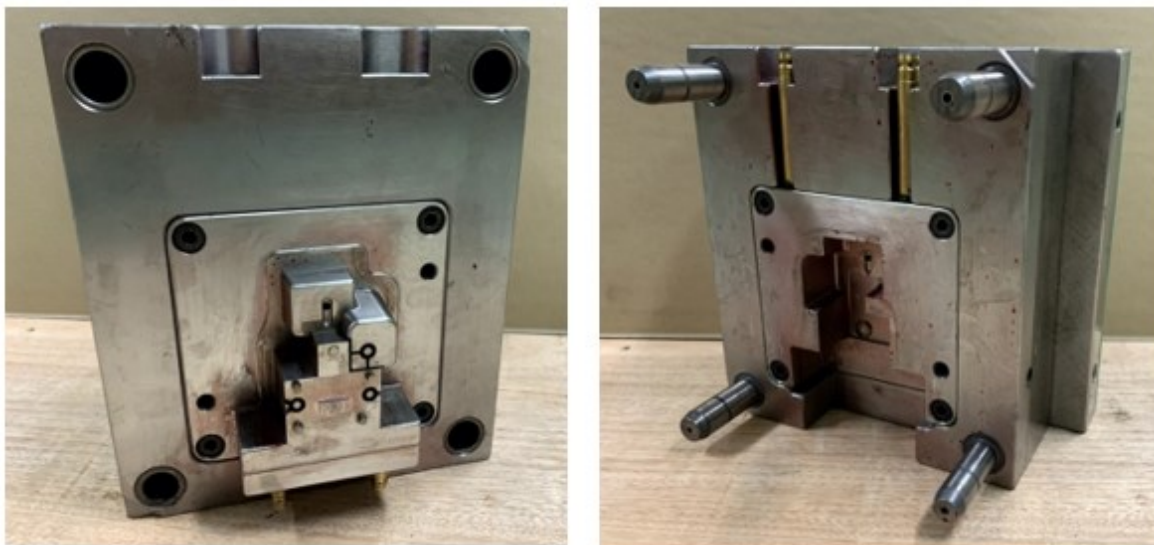
Tab. 4. Vstřikovací parametry.

Teplota taveniny [°C]	240
Teplota formy [°C]	30-70
Teplota pod násypkou [°C]	60
Teplota v pásmu 1 [°C]	230
Teplota v pásmu 2 [°C]	220
Teplota v pásmu 3 [°C]	210
Teplota v pásmu 4 [°C]	200

7.2 Nástroj pro výrobu testovaného dílu

Pro výrobu zadaného dílu byla použita vstřikovací forma o rozměrech 246 x 266 x 295 mm se studeným rozvodným systémem. Vstřikovací forma je složena z pravé (nepohyblivé) části, kde je umístěna tvárnice a z levé (pohyblivé) části, kde se nachází tvárník. Levá část formy zahrnuje vyhazovací systém, jehož úkolem je po otevření formy pomocí vyhazovacích kolíků vyhodit zhotovený výrobek. Pro zabránění tepelných ztrát do okolí z vytemperované vstřikovací formy jsou plochy, jež jsou v kontaktu se vstřikovacím strojem, opatřeny tepelně izolační deskou. Rám formy je vyroben z uhlíkové nástrojové oceli s označením 1.1730.

Tvarové vložky formy jsou vyrobeny ze středně legované chrom-vanadové oceli 1.2210, která má koeficient tepelné vodivosti $\lambda = 42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



Obr. 32. Pohled do levé a pravé části vstřikovací formy.

Společně se vstřikovací formou byl pro výrobu testovaných dílů zvolen elektrický vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 E 1000-290 (GE).

Tab. 5. Parametry vstřikovacího stroje.

Vstřikovací jednotka [-]	290
Uzavírací síla [kN]	1000
Vyhazovací síla [kN]	40
Vzdálenost mezi sloupky [mm]	470 x 470
Rozměry upínací desky [mm]	637 x 637
Průměr šneku [mm]	35
Maximální objem materiálu [cm]	144

7.3 Návrh Temperačního systému

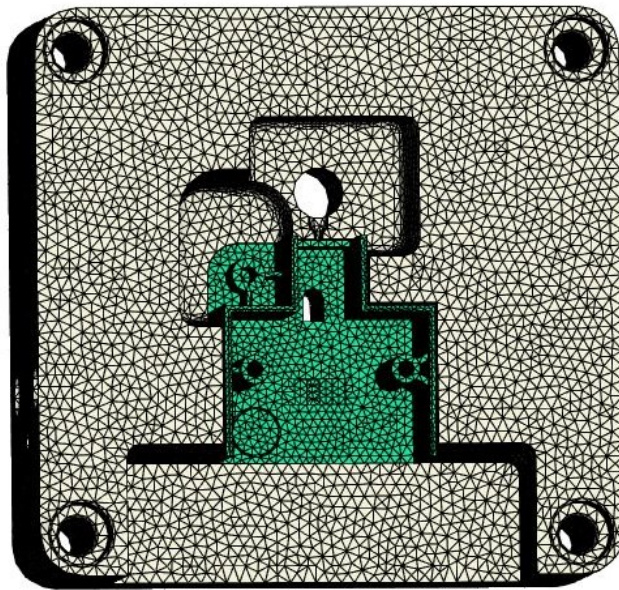
Správně navržený temperační systém by měl zajistit rovnoměrný a konstantní odvod tepla ze všech míst vstřikovaného dílu.

Pro získání vyšší účinnosti odvodu tepla z dutiny formy bylo navrženo kombinované řešení, které představuje využití aktivních i pasivních prvků temperace. V rámci aktivních prvků temperace byly zvoleny dvě varianty výroby tvarových vložek a s tím souvisejících temperačních kanálů. První varianta spočívala ve výrobě tvarových vložek (tvárník a tvárnice) klasickými metodami obrábění, jako je např. frézování, vrtání atd. Druhá varianta kombinovala výrobu pomocí klasických metod obrábění (výroba tvárnice) s metodami aditivní výroby (výroba tvárníku).

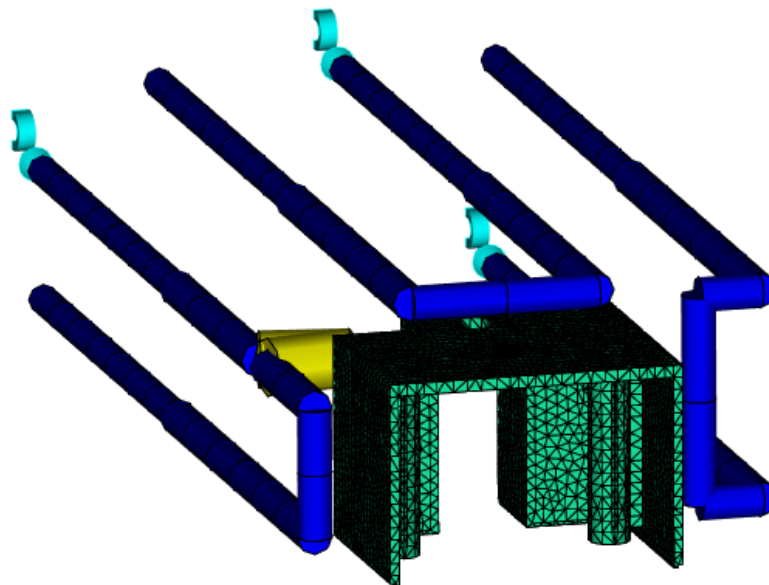
Vzhledem k tomu, že zadaný díl obsahuje tři hluboké nálitky, byly aktivní prvky temperace doplněny prvky pasivními ve formě 3 výměnných jádrových trnů ze slitiny mědi, která vyniká především vysokými hodnotami koeficientu tepelné vodivosti.

7.3.1 Varianta 1 – tvarové vložky (temperační systém) připravený klasickými metodami obrábění

Temperační systém připravený klasickými metodami obrábění disponuje pouze rovnými trasami s přepážkou. Plochá přepážka byla využita jak u tvárníku, tak i u tvárnice.



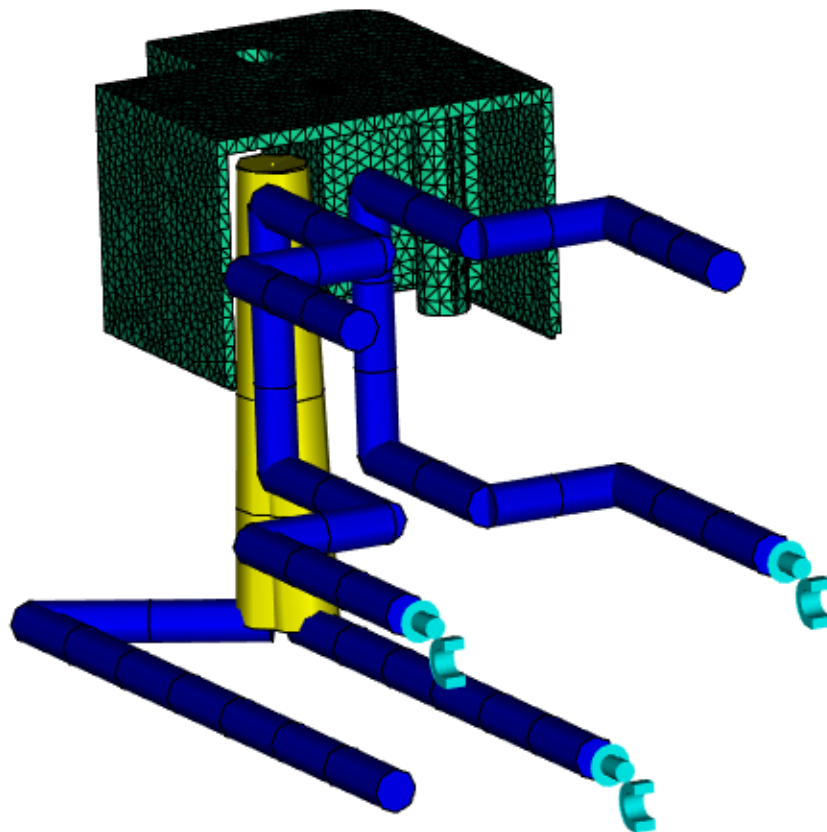
Obr. 33. Tvárnice vyrobená klasickými metodami.



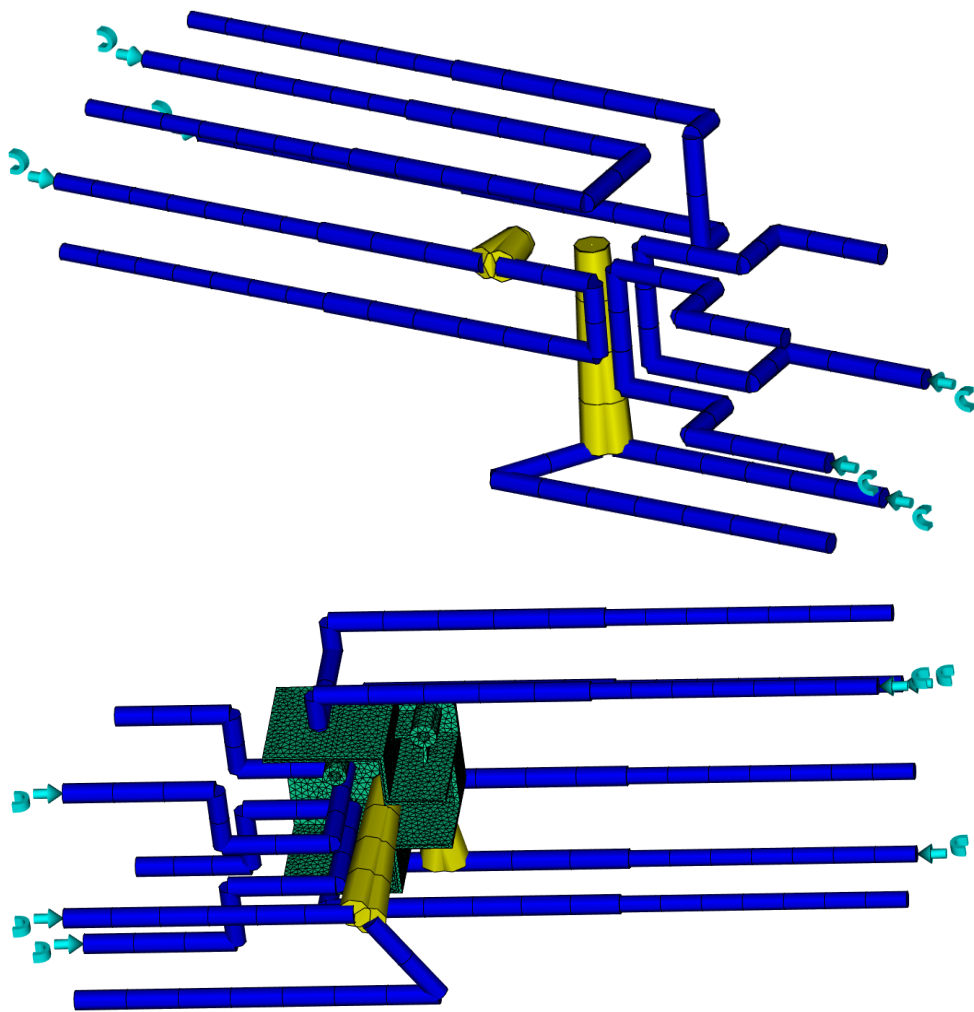
Obr. 34. Temperační systém tvárnice (klasické metody výroby).



Obr. 35. Tvárník vyrobený klasickými metodami.



Obr. 36. Temperační systém tvárníku (klasické metody výroby).



Obr. 37. Temperační systém tvárníku a tvárnice – varianta 1.

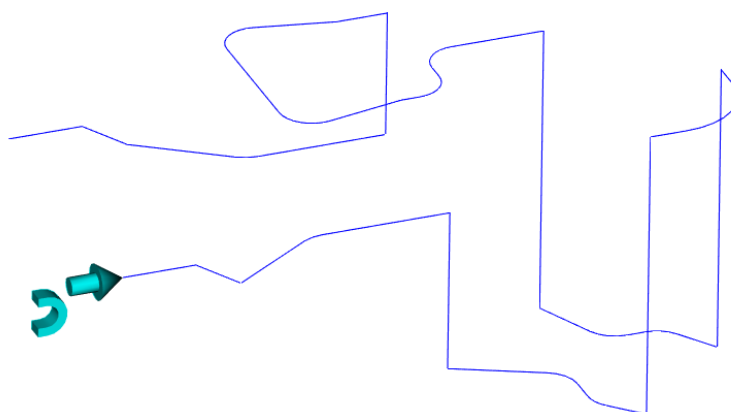
7.3.2 Varianta 2 – tvarové vložky (temperační systém) připravený klasickými metodami obrábění a aditivní technologií

Pro porovnání s klasickými metodami výroby byl navržen tvárník s konformním chlazením, který by měl zajistit rovnoměrnější odvod tepla z dutiny formy. Celý tvárník byl vyroben na 3D tiskárně MarkForged Metal X metodou ADAM. Pro účely diplomové práce byla tato varianta řešena pouze z hlediska simulace.

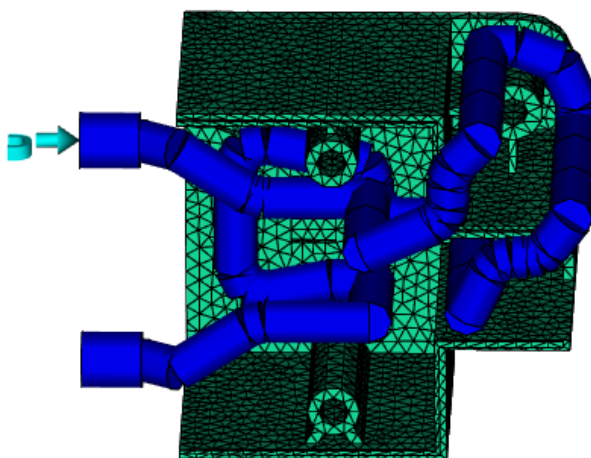
Tvárnice byla totožná jako u varianty 1, tzn. vyrobená klasickými metodami obrábění.



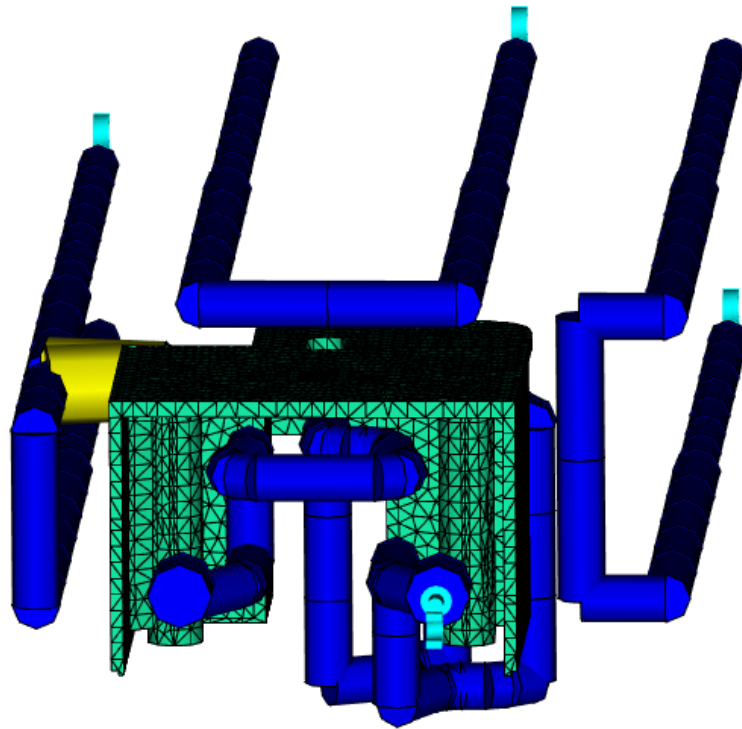
Obr. 38. Tvárník s konformním chlazením.



Obr. 39. Trajektorie konformního chlazení na straně tvárníku.



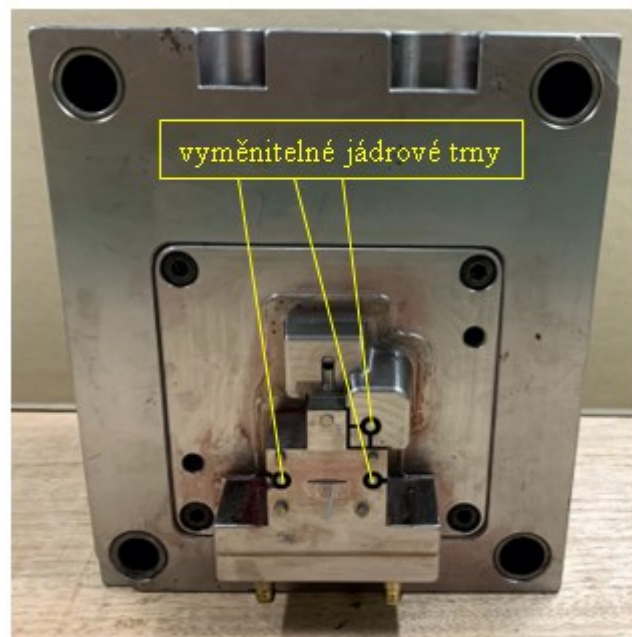
Obr. 40. Konformní chlazení na straně tvárníku.



Obr. 41. Temperační systém tvárníku a tvárnice – varianta 2.

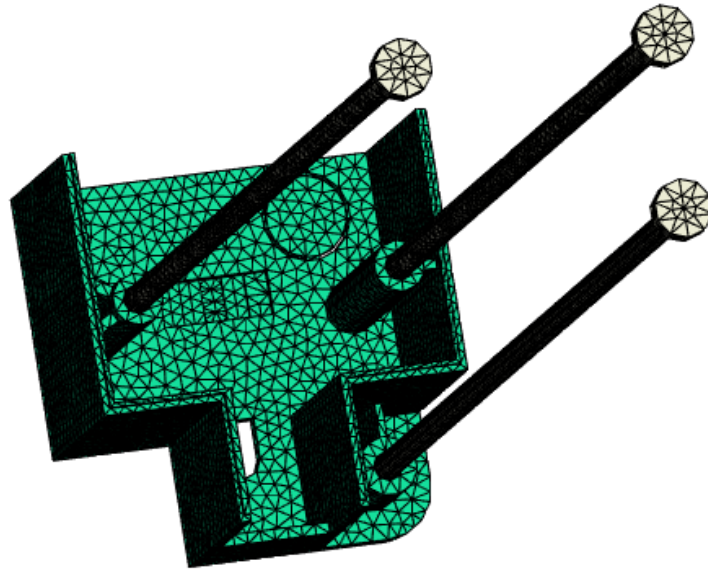
7.3.3 Pasivní prvky temperace

Jak již bylo uvedeno v kapitole 7.3, tak pro zajištění rovnoměrnějšího teplotního pole byly v místech hlubokých nálitků umístěny vyměnitelné jádrové trny (Obr. 42).



Obr. 42. Tvárník s vyměnitelnými jádrovými trny.

Tyto trny jsou vyhotoveny ve dvou variantách a plní funkci jako prvky pasivní temperace. Pro první variantu byla použita středně legovaná chróm-vanadová ocel 1.2210 s koeficientem tepelné vodivosti $\lambda = 42 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. U druhé varianty byl zvolen materiál s označením Albromet W200, což je tepelně upravená slitina mědi s vysokými hodnotami pevnosti a s vysokým koeficientem tepelné vodivosti $\lambda = 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.



Obr. 43. Umístění jádrových trnů v hlubokých nálitcích.

8 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Pro samotný experiment byla navržena matice závislostí vstupních proměnných a byl zkoumán jejich vliv na výsledné vlastnosti vyrobeného dílu. Jako vstupní proměnné byly zvoleny:

- způsob výroby tvarových vložek,
- materiál jádrových trnů,
- čas chlazení,
- teplota formy (teplota na tvárníku a tvárnici).

Tab. 6. Návrh experimentu.

Materiál	Způsob výroby tvarových vložek	Materiál jádrových trnů	Čas chlazení [s]	Teplota [°C] tvárník x tvárnice	Simulace	Reálné měření	
PP	Klasické metody obrábění	Ocel 1.2210	12	30 x 30 70 x70	✓ ✓	✓ ✓	
			32	30 x 30 70 x70	✓ ✓	✓ ✓	
		Albromet W200	12	30 x 30 70 x70	✓ ✓	✓ ✓	
				30 x70	✓	✓	
			32	30 x 30 70 x70	✓ ✓	✓ ✓	
				30 x70	✓	✓	
		Aditivní technologie	Ocel 1.2210	12	30 x 30 70 x70	✓ ✓	✗ ✗
				32	30 x 30 70 x70	✓ ✓	✗ ✗
	Albromet W200		12	30 x 30 70 x70	✓ ✓	✗ ✗	
				30 x70	✓	✗	
	32	30 x 30 70 x70	✓ ✓	✗ ✗			
			30 x70	✓	✗		

8.1 Simulace v softwaru Moldflow Synergy

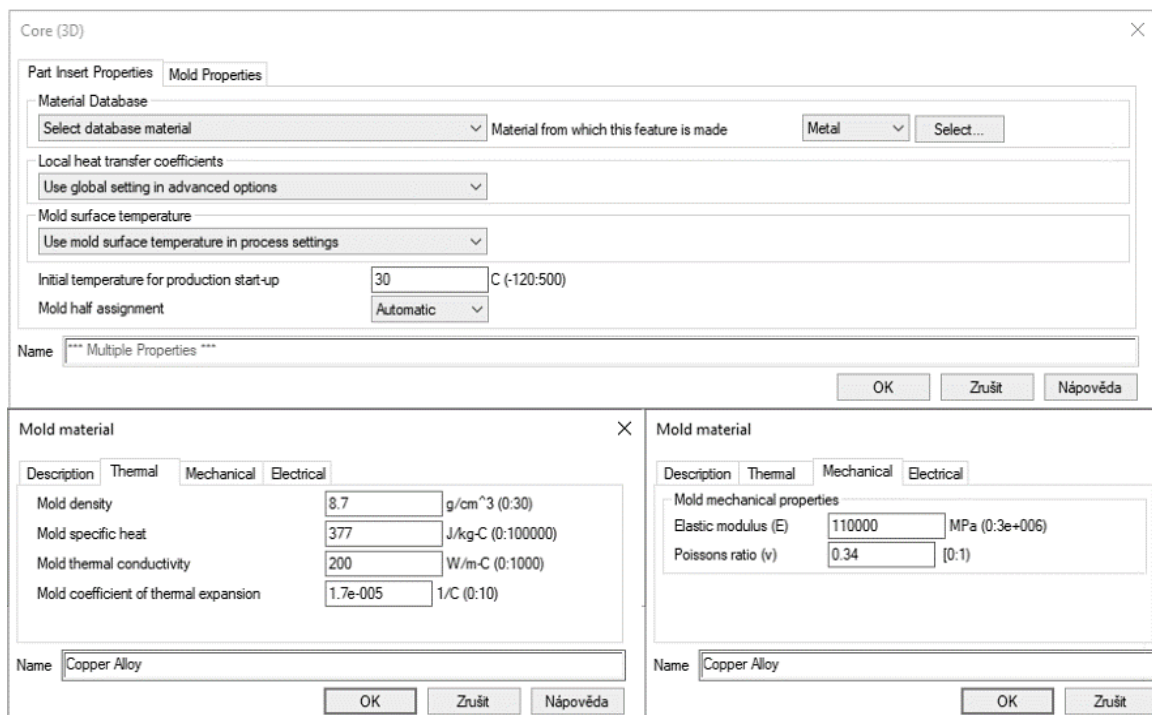
Po vložení vymodelovaného dílu z CAD softwaru byla vytvořena 3D síť výrobku (viz. Obr. 43). Následně po vložení a vysítování temperačního systému byly nastaveny parametry (tlak a teplota) temperačního média, kterým byl olej.

Jako příklad jsou níže uvedeny parametry nastavení simulace pro variantu 1 s jádrovými trny z materiálu Albromet W200.



Obr. 44. Nastavení temperačního média v programu Moldflow Synergy 2016.

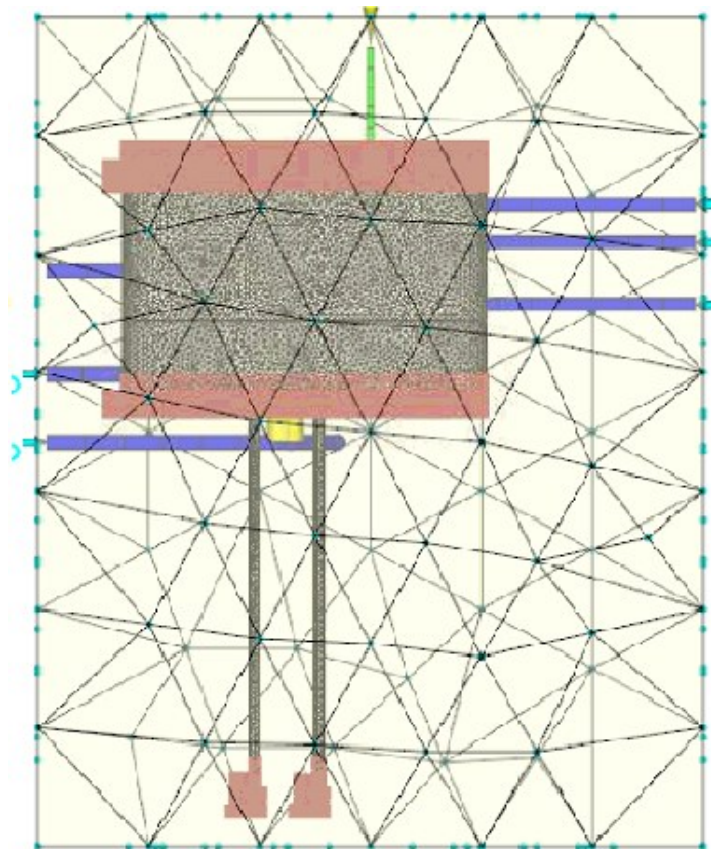
Po vložení a vytvoření 3D sítě jádrových trnů byly nastaveny i jejich parametry. Povrch jádrových trnů byl nastaven ve dvou variantách (ocel a slitina mědi).



Obr. 45. Nastavení parametrů jádrových trnů.

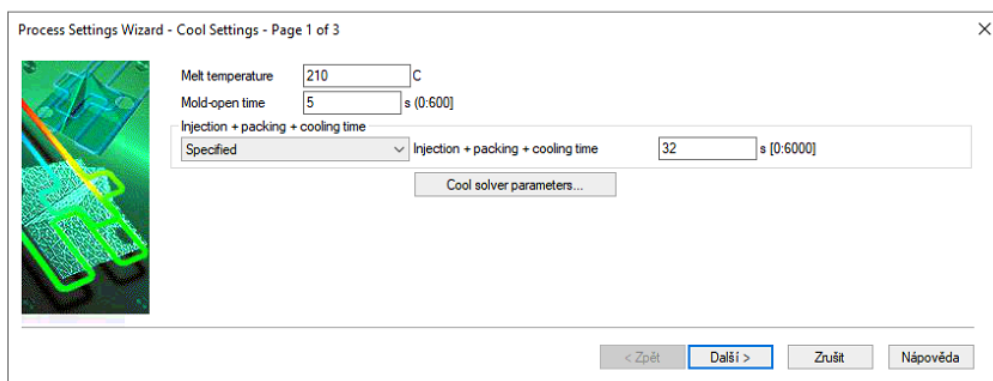
Síťování a parametry tvárníku a tvárnice byly nastaveny obdobně jako u jádrových trnů, přičemž jejich povrch tvořila nástrojová ocel 1.2210.

Jádrové trny i tvárník s tvárnicí byly pomocí funkce fix ukotveny do bloku formy.

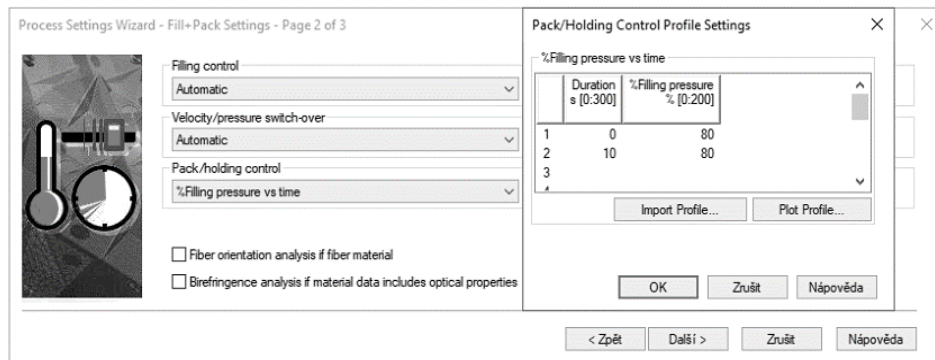


Obr. 46. Vazby vložek.

Poté byly nastaveny procesní podmínky procesu vstřikování. Většina hodnot byla nastavena automaticky tak, aby co nejvíce odpovídala reálnému ději.

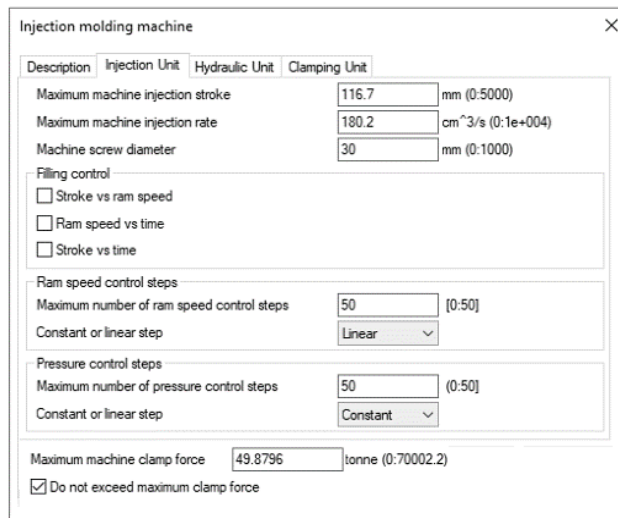


Obr. 47. Nastavení procesních podmínek – krok 1.



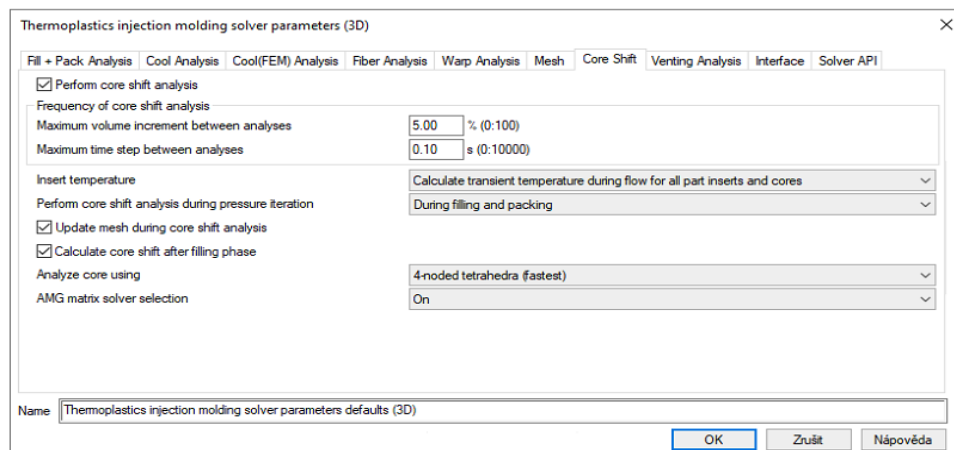
Obr. 48. Nastavení procesních podmínek – krok 2.

Poté byly nastaveny parametry vstřikovacího stroje (Obr. 49).

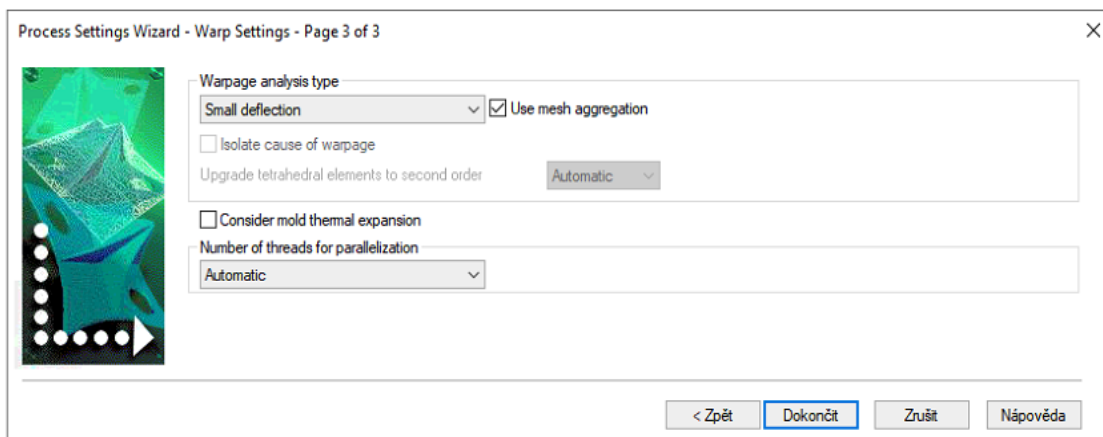


Obr. 49. Nastavení parametrů vstřikovacího stroje.

Vzhledem k tomu, že byly použity vložky jako pasivní temperace výrobku, bylo nutno pro správnost výpočtu nastavit parametry vložek.



Obr. 50. Nastavení parametrů vložek



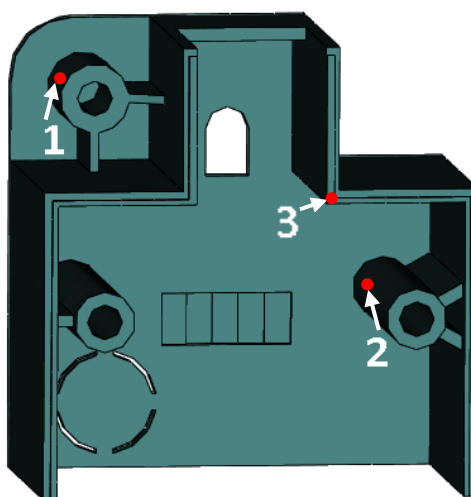
Obr. 51. Nastavení procesních podmínek – krok 3.

8.2 Reálné měření

Jak vyplývá z výše uvedené tabulky Návrhu experimentu (Tab. 6), tak část výsledků získaných ze simulace byla následně ještě porovnána s výsledky získanými z reálného měření.

8.2.1 Měření teplotního pole vyrobeného dílu

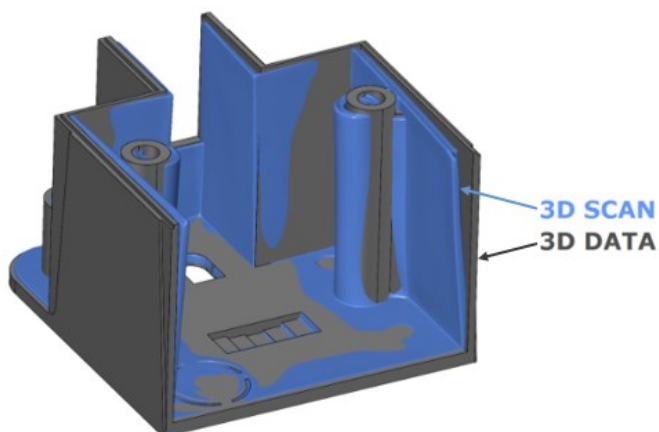
Pro měření teplotního pole na povrchu dílu byla zvolena termokamera Flir 425 s teplotní citlivostí 0,05. Teplota byla měřena ihned po vyjmutí vyrobeného dílu z formy, tj. cca 5 s po konci cyklu. Vybrané pozice, ve kterých byly určeny konkrétní teploty, jsou znázorněny na následujícím obrázku (Obr. 52).



Obr. 52. Vybrané pozice pro měření teploty vyrobeného dílu.

8.2.2 Měření celkové deformace vyrobeného dílu

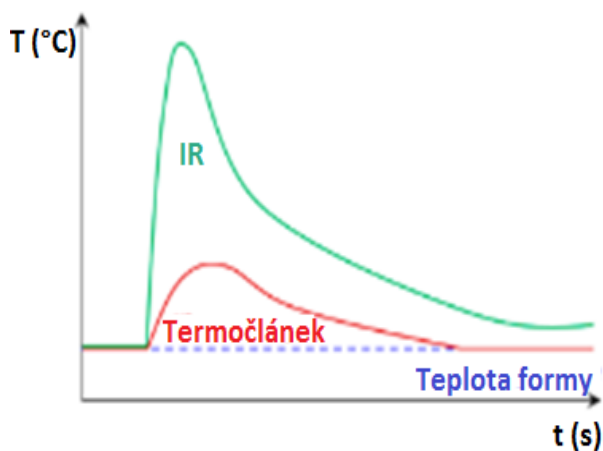
Pro určení celkové deformace vyrobeného dílu bylo využito technologie skenování za pomoci 3D skeneru ATOS. Samotné měření bylo provedeno tak, že se 3D sken (reálného výrobku) proložil CAD modelem (Obr. 53). Na základě tohoto proložení byly určeny odchylky reálného dílu od CAD modelu.



Obr. 53. Proložení reálného dílu CAD modelem.

8.2.3 Měření teploty taveniny během procesu vstřikování

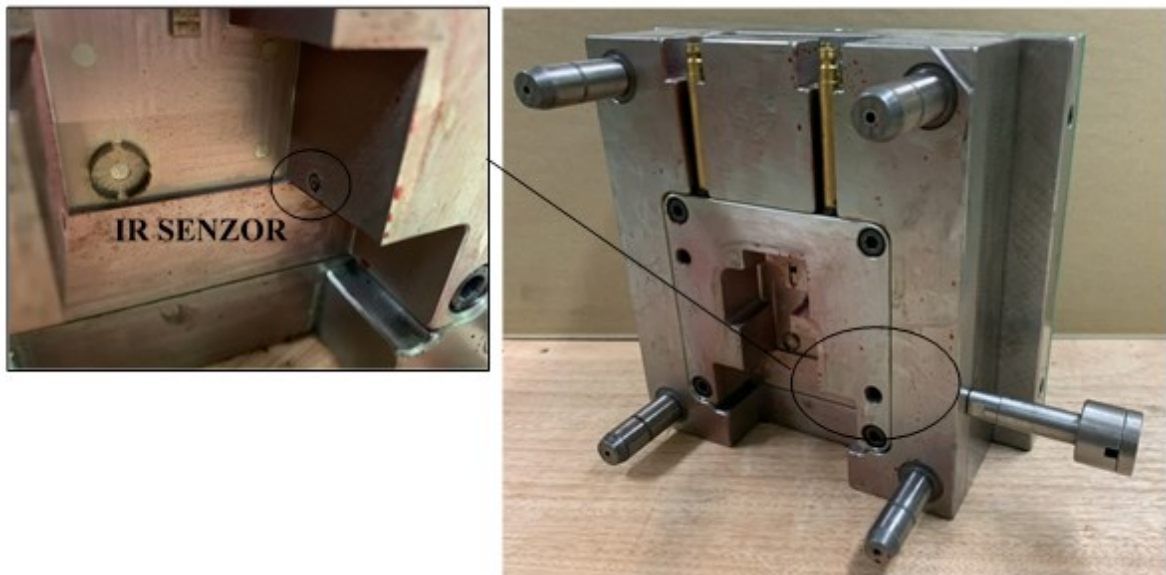
Během procesu vstřikování byla uvnitř dutiny formy měřena teplota taveniny za pomoci teplotních IR senzorů Futaba EPT-001S pracujících na principu detekce infračerveného záření. Předností tohoto řešení je velice rychlá doba odezvy, která se pohybuje okolo 8 ms (u klasicky používaných termočlánků se doba odezvy pohybuje v řádu několika sekund) (Obr. 54).



Obr. 54. Porovnání teploty zaznamenané IR senzorem a termočlánkem. [37]

Oproti termočládkům nejsou IR senzory ovlivněny konvekcí tepla a velmi rychle reagují na změny tepla uvnitř dutiny formy. Umístění senzorů uvnitř dutiny formy může mít dopad na fázovou prodlevu, čímž by mohla vzniknout chyba měření v ustáleném stavu kvůli přenášení tepla z hlavice senzoru do okolních částí formy. Tento jev je charakteristický především při použití termočládků, proto byly pro měření teploty v dutině formy použity IR senzory, které během měření využívají účinku infračerveného záření, kdy nemusí být zajištěn dotyk, a tak nedochází k přenosu tepla do jiných částí vstříkovací formy, nýbrž k vyhodnocení výsledků vysálaného tepla. [37 ,38]

Pozice IR senzorů je znázorněna na obrázku níže (Obr. 55). Tyto senzory byly uchyceny v dilatačním pouzdře tak, aby čela senzorů lícovala s dutinou formy.



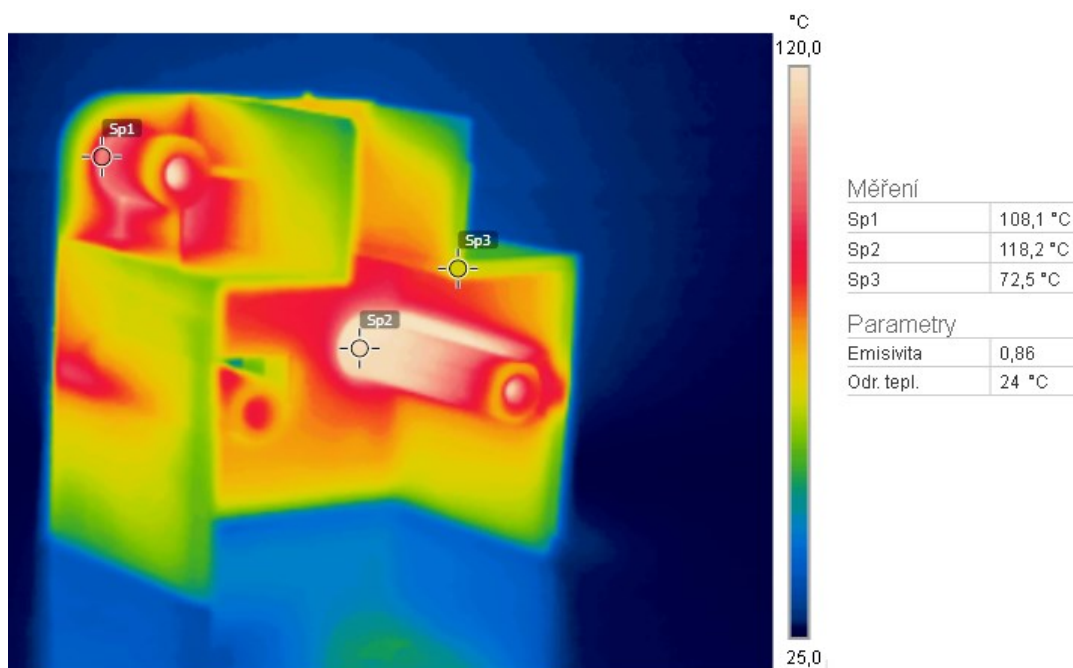
Obr. 55. Umístění IR senzorů ve formě.

9 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Jak již bylo uvedeno výše, cílem práce je ověření vlivu teploty (teplota stěny formy, materiál vyměnitelných trnů, způsob výroby tvarových vložek) na výslednou kvalitu vyrobených dílů, především z hlediska výsledné deformace. Mimo celkovou deformaci bylo zjišťováno teplotní pole na povrchu výrobku na konci výrobního cyklu a teplota taveniny během procesu vstřikování.

9.1 Teplotní pole vyrobeného dílu

Za pomoci termokamery bylo naměřeno a zaznamenáno teplotní pole vyrobeného dílu. U varianty 1 byly reálně naměřené teploty ve vybraných pozicích (dle Obr. 52) porovnány s teplotami získanými ze simulace. U varianty 2 byla v rámci realizace DP provedena pouze simulace bez ověření reálným měřením.



Obr. 56. Teplotní pole reálného výrobku při použití ocelových trnů o teplotě formy 70 °C.

Naměřené teploty na reálném výrobku pomocí termokamery mají obdobný trend jako teploty získané ze simulací. Nižší hodnoty teplot získaných reálným měřením mohou být způsobeny tím, že byl výrobek snímán cca po 5 s po konci výrobního cyklu a otevření formy, kdežto hodnoty teplot získaných ze simulací jsou zaznamenány ihned po konci cyklu.

Tab. 7. Porovnání teplot naměřených s teplotami ze simulací pro variantu 1 + simulace teplot u varianty 2 s použitými ocelovými trny.

Doba chlazení [s]	Teplota [°C] tvárník x tvárnice	Měřená pozice	Teplota ze simulace, vrtané [°C]	Naměřená teplota [°C]	Teplota ze simulace, konformní [°C]
12	30x30	1	94,7	88,5	92,1
		2	136,0	106,2	136,7
		3	40,9	48,9	44,3
	70x70	1	117,4	108,1	113,9
		2	149,9	118,2	152,3
		3	74,4	72,5	74,4
32	30x30	1	66,8	63,4	64,8
		2	88,4	86,8	88,4
		3	35,3	41,3	37,0
	70x70	1	96,5	83,6	92,6
		2	114,1	103,0	112,3
		3	71,4	65,0	70,8

V tabulce 7 jsou shrnuty výsledky měření a simulací teplot na povrchu výrobku při využití ocelových trnů. Při porovnání reálně naměřených hodnot s hodnotami získanými ze simulací je patrný trend, kdy vždy nejvyšší teploty byly zaznamenány v bodě 2 a naopak nejnižší teploty v bodě 3.

Dle předpokladu byla reálným měřením i simulací zjištěna nejvyšší teplota při době chlazení 12 s a teplotě na tvárníku a tvárnici 70 °C. Naopak nejnižší teplota byla zaznamenána při nejdelší době chlazení (32 s) a teplotě na tvárníku a tvárnici 30 °C.

Tab. 8. Porovnání teplot naměřených s teplotami ze simulací pro variantu 1 + simulace teplot u varianty 2 s použitými Albromet trny.

Doba chlazení [s]	Teplota [°C] tvárník x tvárnice	Měřená pozice	Teplota ze simulace, vrtané [°C]	Naměřená teplota [°C]	Teplota ze simulace, konformní [°C]
12	30x30	1	74,1	90,9	70,8
		2	105,8	105,8	107,4
		3	40,9	54,5	44,3
	30x70	1	93,9	99,4	87,8
		2	114,5	105,7	120,2
		3	54,4	54,4	64,8
	70x70	1	100,5	102,6	94,7
		2	126,5	115,1	126,5
		3	74,4	70,8	74,5

32	30x30	1	52,9	52,3	50,7
		2	71,9	62,1	72,7
		3	35,3	37,6	37,0
	30x70	1	76,6	71,3	69,9
		2	83,5	74,4	90,0
		3	49,8	48,1	59,2
	70x70	1	84,7	75,6	80,0
		2	101,0	90,5	100,2
		3	71,2	64,3	70,6

Obdobně jako v předchozím případě byly i při využití trnů z materiálu Albromet nejvyšší teploty zaznamenány v bodě 2 a nejnižší teploty v bodě 3 (Tab. 8).

Ze simulace i z reálného měření byla nejvyšší teplota zaznamenána u času chlazení 12 s a teploty na tvárníku a tvárnici 70 °C. Oproti tomu nejnižší teplota byla zjištěna při času chlazení 32 s a teplotě na tvárníku a tvárnici 30 °C

9.2 Celková deformace vyrobeného dílu

Nejprve byla zjišťována celková deformace ve všech směrech výrobku a poté jen ve směru osy y. Naměřené vzniklé deformace reálného výrobku u varianty 1 byly porovnávány s hodnotami zjištěnými ze simulací.

9.2.1 Varianta 1 + ocelové jádrové trny

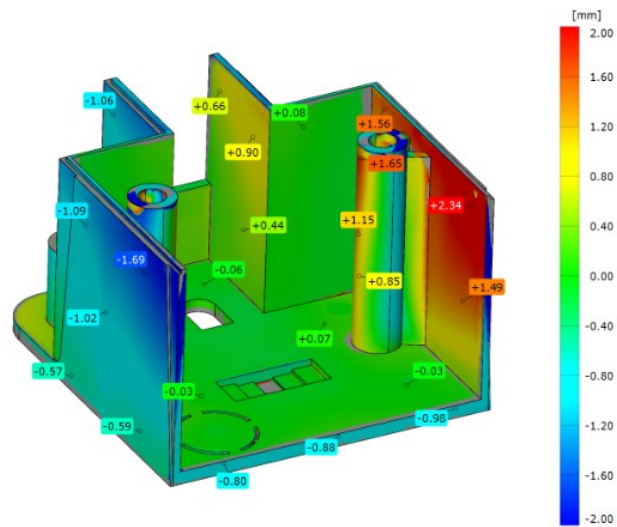
Tato varianta popisuje porovnání velikostí deformace reálného výrobku s výsledky zjištěnými ze simulace. Teplo bylo z hlubokých nálitků odváděno pomocí ocelových trnů.

Tab. 9. Varianta 1 + ocelové jádrové trny

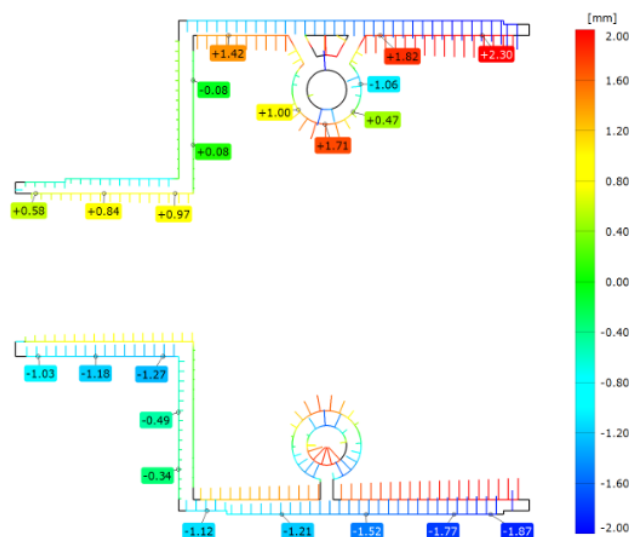
Doba chlazení [s]	Teplota formy [°C]		Velikost deformace reálného měření [mm]		Velikost deformace ze simulací [mm]	
	Tvárník	Tvárnice	Celková	Osa y	Celková	Osa y
12	30	30	2,09	2,04	0,54	0,51
	70	70	2,34	2,30	0,51	0,46
32	30	30	1,41	1,39	0,40	0,35
	70	70	1,60	1,57	0,39	0,33

Dle tabulky 9 je zřejmé, že největší deformace při reálném měření byla zjištěna při době chlazení 12 s a teplotě na tvárníku a tvárnici 70 °C (Obr. 57 a 58). Nejvyšší hodnota deformace získaná ze simulace, byla zjištěna při době chlazení 12 s a teplotě na tvárníku a tvárnici 30 °C (viz. Obr. 59 a 60).

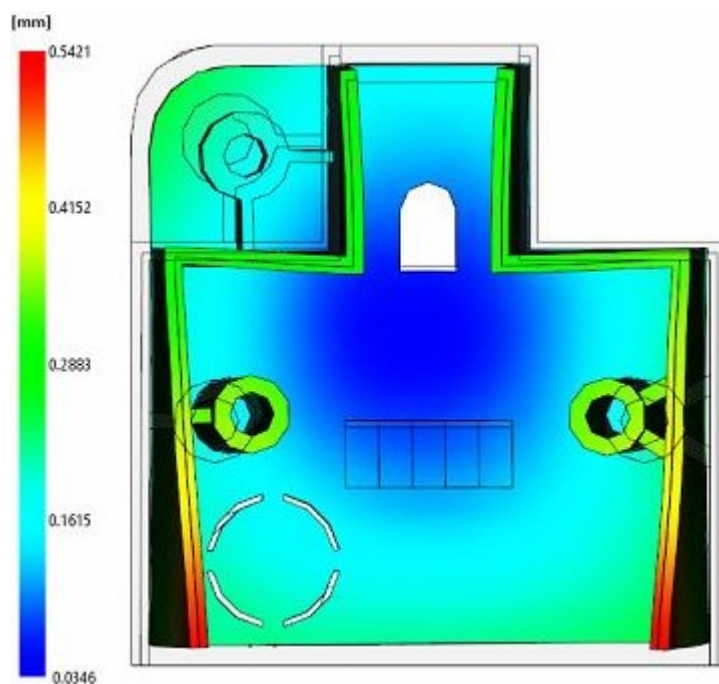
Nejnižší hodnota deformace byla zjištěna jak pro simulaci, tak i pro reálné měření u času chlazení 32 s a teploty na tvárníku a tvárnici 30 °C (pro reálné měření) a 70 °C (pro simulaci).



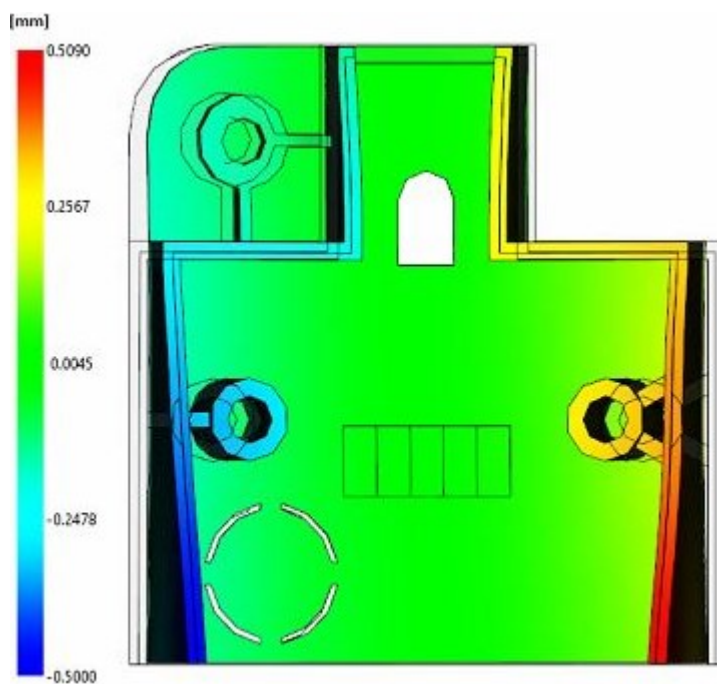
Obr. 57. Největší celková deformace reálného výrobku při kombinaci teplot tvárníku a tvárnice 70 °C a době chlazení 12 s u varianty 1 s ocelovými trny.



Obr. 58. Největší deformace reálného výrobku v ose y při kombinaci teplot tvárníku a tvárnice 70 °C a době chlazení 12 s u varianty 1 s ocelovými trny.



Obr. 59. Největší dosažená celková deformace výrobku ze simulace při kombinaci teplot tvárničku a tvárniče 30 °C a době chlazení 12 s u varianty 1 s ocelovými trny.



Obr. 60. Největší dosažená deformace výrobku v ose y ze simulace při kombinaci teplot tvárničku a tvárniče 30 °C a době chlazení 12 s u varianty 1 s ocelovými trny.

9.2.2 Varianta 1 + jádrové trny z materiálu Albromet

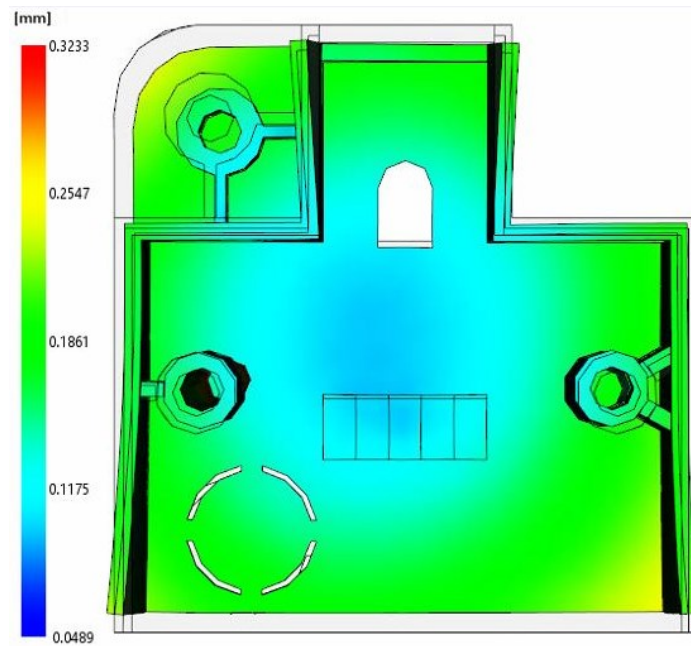
Tato varianta popisuje porovnání velikostí deformace reálného výrobku s výsledky zjištěnými ze simulace. Teplo bylo z hlubokých náliček odváděno pomocí trnů, které byly vyrobeny z materiálu Albromet.

Tab. 10. Varianta 1 + jádrové trny z materiálu Albromet

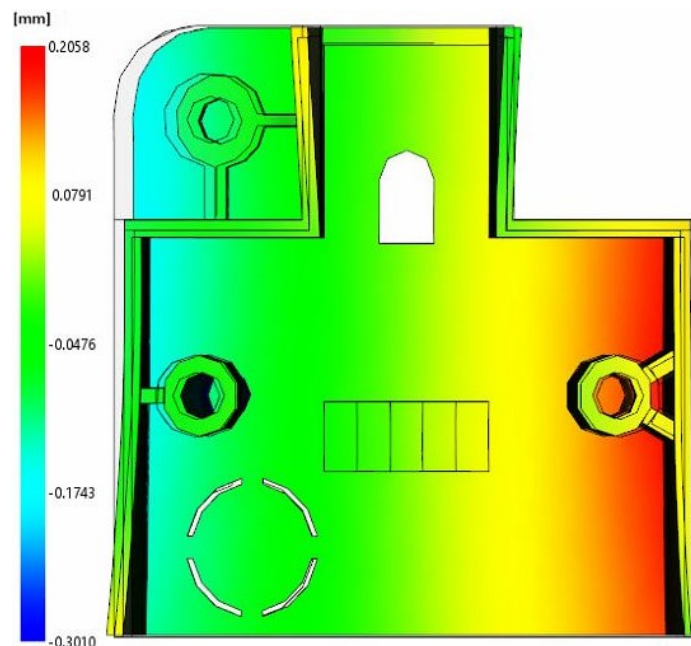
Doba chlazení [s]	Teplota formy [°C]		Velikost deformace reálného měření [mm]		Velikost deformace ze simulací [mm]	
	Tvárník	Tvárnice	Celková	Osa y	Celková	Osa y
12	30	30	1,56	1,51	0,51	0,48
	30	70	1,01	1,07	0,33	0,21
	70	70	1,95	1,91	0,47	0,42
32	30	30	1,15	1,13	0,39	0,34
	30	70	0,95	0,98	0,32	0,21
	70	70	1,25	1,21	0,38	0,32

Dle Tab. 10 lze pozorovat, že při shodné teplotě tvárníku a tvárnice 70 °C byla při době chlazení 12 s naměřena největší deformace reálného výrobku. Podle simulací bylo při stejné době chlazení největší deformace dosaženo při teplotě tvárníku a tvárnice 30 °C.

Nejmenší deformace vznikla během doby chlazení 32 s a byla u reálného výrobku naměřena při použití kombinace teplot tvárníku 30 °C a tvárnice 70 °C. Tyto výsledky z reálného měření korespondují i s výsledky získanými ze simulace, kdy nejnižší deformace byly zaznamenána u času chlazení 32 s u kombinace teplot 30 °C na straně tvárníku a 70 °C na straně tvárnice.



Obr. 61. Nejmenší dosažená celková deformace ze simulace výrobku při kombinaci teplot tvárníku a tvárnice 30 a 70 °C a době chlazení 32 s u varianty 1 s trny Albromet



Obr. 62. Nejmenší dosažená deformace v ose y ze simulace výrobku při kombinaci teplot tvárníku a tvárnice 30 a 70 °C a době chlazení 32 s u varianty 1 s trny Albromet

9.2.3 Varianta 2 + ocelové jádrové trny

Bez možnosti ověření na reálném výrobku u varianty 2 byly vzniklé deformace při procesu vstřikování zjišťovány za pomoci vytvořených simulací. Odvod tepla z hlubokých nálitků byl zajištěn ocelovými jádrovými trny.

Tab. 11. Varianta 2 + ocelové jádrové trny.

Doba chlazení [s]	Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
	Tvárník	Tvárnice	Celková	Osa y
12	30	30	0,53	0,50
	70	70	0,46	0,40
32	30	30	0,38	0,33
	70	70	0,36	0,29

Největší deformace zjištěná ze simulací dle Tab. 11 vznikla během doby chlazení 12 s a teplotě na tvárníku a tvárnici 30 °C. Nejmenší výsledná hodnota deformace byla zjištěna při době chlazení 32 s a teplotě tvárníku a tvárnici 70 °C.

9.2.4 Varianta 2 + jádrové trny z materiálu Albromet

U této varianty byl odvod tepla z hlubokých nálitků zajištěn jádrovými trny ze slitiny mědi (materiál Albromet).

Tab. 12. Varianta 2 + jádrové trny z materiálu Albromet.

Doba chlazení [s]	Teplota formy [°C]		Velikost deformace [mm]	
	Tvárník	Tvárnice	Celková	Osa y
12	30	30	0,51	0,48
	30	70	0,45	0,22
	70	70	0,45	0,39
32	30	30	0,46	0,35
	30	70	0,41	0,21
	70	70	0,46	0,30

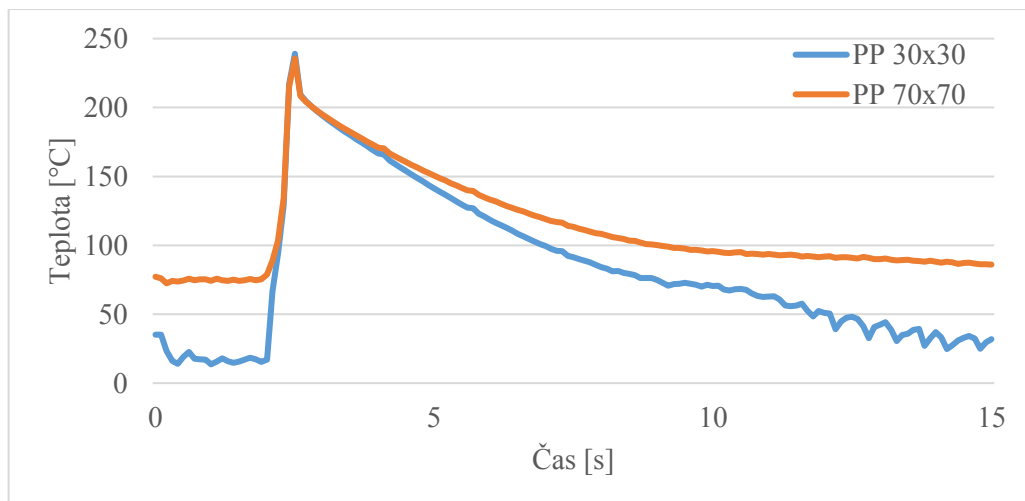
Z Tab. 12 je zřejmé, že největší zjištěné hodnoty deformace dle výsledků simulací byly zjištěny při teplotě 30 °C na tvárníku i tvárnici během doby chlazení 12 s. Nejmenší hodnoty deformace bylo dosaženo při teplotě tvárníku na 30 °C a tvárnice na 70 °C a času chlazení 32 s.

9.3 Teplota taveniny v dutině formy během procesu vstřikování

Během procesu vstřikování byla pro variantu 1 uvnitř dutiny formy měřena teplota taveniny. Průběh teplot byl zaznamenáván ve chvíli uzavření formy, kde následný teplotní nárůst znázorňuje průběh vstříknutí taveniny do dutiny formy. Teplotní spád popisuje pokles teploty formy během dané doby chlazení výrobku.

9.3.1 Ocelové jádrové trny, doba chlazení 12 s

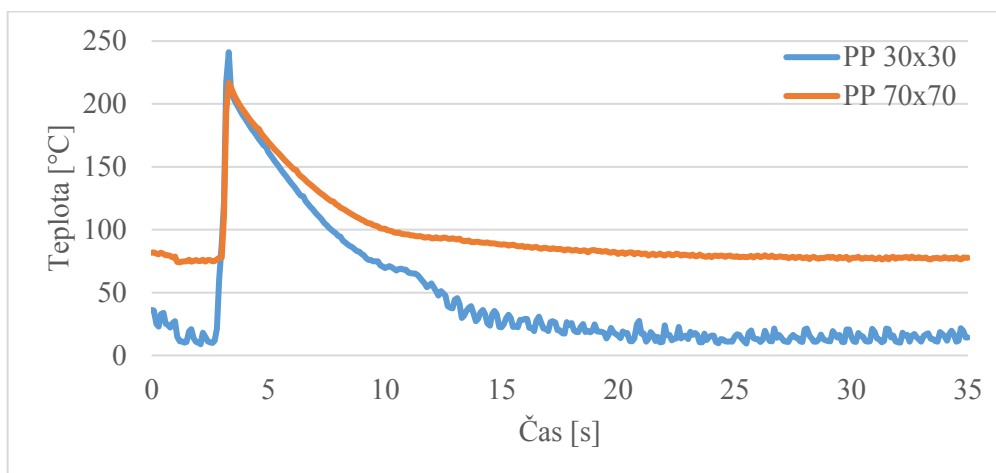
Na Obr. 63 měla teplota taveniny v dutině formy během procesu vstřikování nejrychlejší odvod tepla z dutiny formy při vytemperování tvárníku a tvárnice na 30 °C. Naopak nejdelší potřebný čas chlazení hotového výrobku byl naměřen, když byly tvárník s tvárnicí vytemperovány na 70 °C. V čase 12 s byl mezi těmito kombinacemi naměřen rozdíl teploty taveniny v dutině formy 30,7 °C.



Obr. 63. Teplota taveniny v dutině formy s ocelovými trny během chlazení 12 s.

9.3.2 Ocelové jádrové trny, doba chlazení 32 s

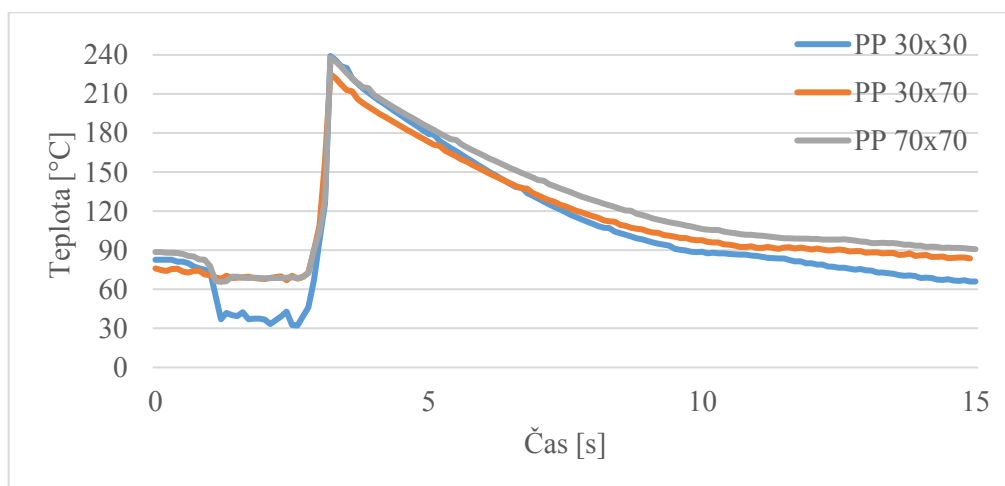
Dle Obr. 64 byla závislost teploty taveniny v dutině formy měřena při době chlazení 32 s, přičemž rychlejší odvod tepla z dutiny formy byl dosažen při teplotě formy na 30 °C. Rozdíl teplot během chlazení 12 s 34,5 °C a při 32 s 56 °C.



Obr. 64. Teplota taveniny v dutině formy s ocelovými trny během chlazení 32 s.

9.3.3 Jádrové trny z materiálu Albromet, doba chlazení 12 s

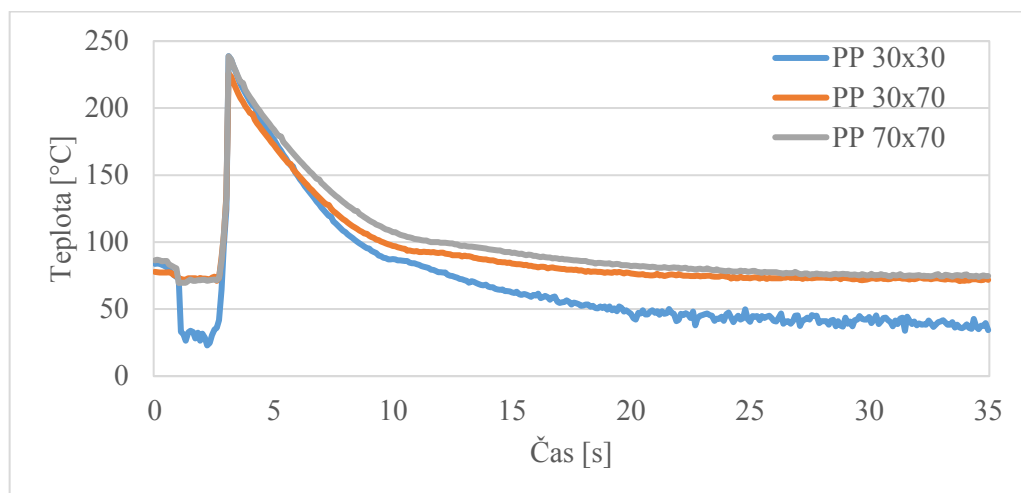
Během doby chlazení 12 s (dle Obr. 65) docházelo k nejrychlejšímu odvodu tepla z dutiny formy při teplotě tvárníku a tvárnice na teplotu 30 °C. Nejpomalejší průběh chlazení vykazovala teplota tvárníku a tvárnice na 70 °C. Rozdíl teplot při vytemperování tvárníku a tvárnice 30x30 °C a 70x70 °C byl v době chlazení 12 s 19 °C.



Obr. 65. Teplota taveniny v dutině formy s trny Albromet po dobu chlazení 12 s.

9.3.4 Jádrové trny z materiálu Albromet, doba chlazení 32 s

Nejrychlejší odvod tepla z dutiny formy byl dosažen při teplotě tvárníku a tvárnice na 30 °C. Nejpomalejší odvod tepla byl zaznamenán při teplotě tvárníku a tvárnice na teplotu 70 °C. Během doby chlazení byl v čase 12 s zaznamenán rozdíl 21,5 °C mezi teplotami tvárníku a tvárnice 30x30 °C a 70x70 °C a v čase chlazení 32 s byl rozdíl 36,1 °C.



Obr. 66. Teplota taveniny v dutině formy s trny Albromet po dobu chlazení 32 s.

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z výsledků teplotního pole výrobku v případě použití ocelových trnů byla z reálného měření zjištěna teplota 41,3 °C na měřené pozici 3 při teplotách tvárníku a tvárnice 30 a 30 °C během doby chlazení 32 s. Pro porovnání byla vytvořena simulace reálného děje, kterou popisuje varianta 1. Na základě simulace, při které byly zadány stejné parametry se na pozici 3 zjistila teplota 35,3 °C. Využitím trnů Albromet byla reálně naměřena nejnižší teplota 37,6 °C na pozici 3 při teplotách tvárníku a tvárnice 30 a 30 °C během doby chlazení 32 s. Při stejných podmínkách byla dle simulace na pozici 3 zjištěna teplota 35,3 °C.

Tab. 13. Nejmenší dosažené hodnoty teplotního pole výrobku.

Materiál vložek	Doba chlazení [s]	Teplota [°C] tvárník x tvárnice	Měřená pozice	Teplota ze simulace, vrtané [°C]	Naměřená teplota [°C]	Teplota ze simulace, konformní [°C]
Ocel 1.2210	32	30x30	1	66,8	63,4	64,8
			2	88,4	86,8	88,4
			3	35,3	41,3	37,0
Albromet W200	32	30x30	1	52,9	52,3	50,7
			2	71,9	62,1	72,7
			3	35,3	37,6	37,0

Dle Tab. 14 byla nejmenší dosažená deformace výrobku u varianty 1 při teplotě tvárníku 30 °C a tvárnice 70 °C během doby chlazení 32 s. Velikost celkové deformace reálného výrobku byla 0,95 mm, přičemž ze simulací byla její hodnota 0,32 mm. V ose y byla reálně naměřena velikost deformace 0,98 mm, hodnota deformace ze simulace je 0,21 mm.

Tab. 14. Nejmenší dosažená deformace varianty 1 s trny Albromet.

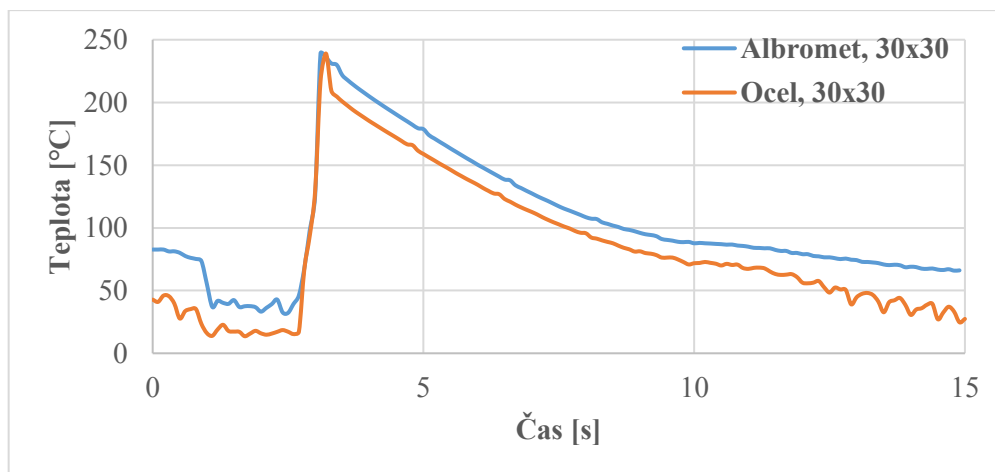
Doba chlazení [s]	Teplota formy [°C]		Velikost deformace reálného měření [mm]		Velikost deformace ze simulací [mm]	
	Tvárník	Tvárnice	Celková	Osa y	Celková	Osa y
32	30	70	0,95	0,98	0,32	0,21

V Tab. 15 jsou uvedeny hodnoty nejmenších zjištěných deformací ze simulace Moldflow varianty 2. Bylo zjištěno, že pro vznik malých deformací výrobku by bylo vhodné trny z oceli použít při kombinaci teplot 70 a 70 °C během doby chlazení 32 s. Při takto zvolených podmínkách měla celková deformace velikost 0,36 mm a v ose y 0,29 mm. Trny z materiálu Albromet jsou vhodné pro kombinaci teplot 30 a 70 °C, kdy byla naměřena celková deformace 0,41 mm a v ose y 0,21 mm.

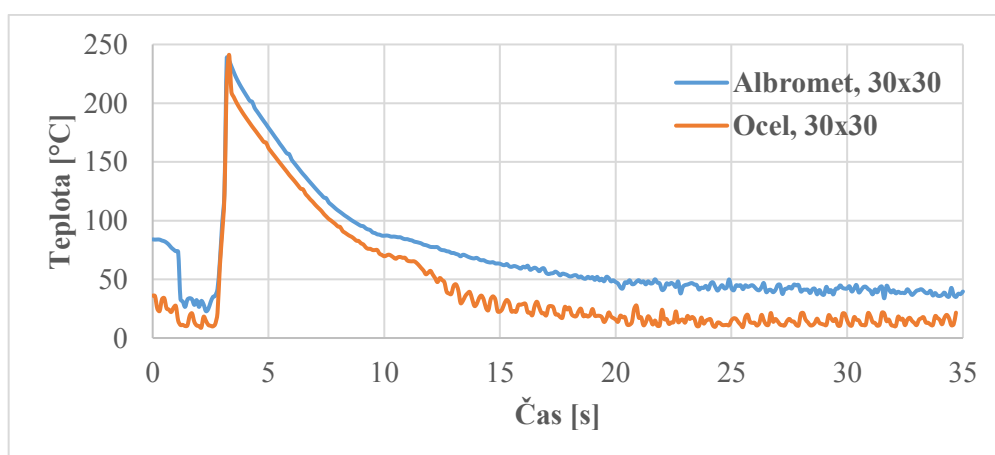
Tab. 15. Nejmenší dosažená deformace varianty 2.

Doba chlazení [s]	Teplota formy [°C]		Velikost deformace ze simulací [mm]		Materiál trnů
	Tvárník	Tvárnice	Celková	Osa y	
32	70	70	0,36	0,29	Ocel 1.2210
32	30	70	0,41	0,21	Albromet W200

Vzhledem k tomu, že nebyly reálně naměřeny hodnoty pro variantu 2, kde byl použit tvárník s konformní temperací, lze dle zjištěných poznatků konstatovat, že nejmenší deformace výrobku, jak dle reálného měření, tak i dle simulací vznikne při použití klasického temperačního systému s využitím jádrových trnů z materiálu Albromet W200.



Obr. 67. Teplota taveniny během doby chlazení 12 s.



Obr. 68. Teplota taveniny během doby chlazení 32 s.

Obr. 67 a 68 zobrazují rozdíl v ochlazování teploty taveniny v dutině formy použitím trnů ze slitiny mědi Albromet W200 a z oceli 1.2210. Z obrázků vyplývá, že slitina mědi nemá u zadaného výrobku vliv na rychlost odvodu tepla z dutiny formy.

ZÁVĚR

Pro porovnání výsledků reálného měření deformací na výrobku z PP byly pomocí programu Autodesk Moldflow Synergy 2016 navrženy simulace odpovídající procesu vstřikování, dle kterých lze definovat deformace vzniklé ihned po otevření formy.

Varianta, kde temperace tvárnice byla vyrobena klasickými metody obrábění v kombinaci s temperací tvárníku vytvořené aditivní technologií, byla pro předloženou diplomovou práci zpracována pouze formou simulací.

Na základě výsledků bylo zjištěno, že nejúčinnější odvod tepla z dutin hlubokých nálitků byl zajištěn využitím jádrových trnů z materiálu Albromet W200, při kombinaci teplot na tvárníku a tvárnici 30 a 30 °C během doby chlazení 32 s. Z toho vyplývá skutečnost, že použití trnů ze slitiny mědi umožňuje při zadaných parametrech, zkrácení doby chlazení výrobku.

Nejvhodnější varianta, kdy finální výrobek prokazoval nízké hodnoty deformace, byla při použití temperačního systému vytvořeného klasickými metodami s jádrovými trny ze slitiny mědi Albromet W200. Z naměřených reálných výsledků byly zjištěny nejmenší deformace při použití kombinace teplot tvárníku 30 °C a tvárnice 70 °C během doby chlazení 32 s, což bylo následně ověřeno porovnáním výsledků se simulací.

Pro porovnání velikostí deformace výrobku při použití klasických metod, či u jejich kombinace s aditivní technologií, by bylo vhodné naměřit i reálné hodnoty při použití aditivní výroby tvárníku.

Z výsledků teploty taveniny v dutině formy bylo zjištěno, že využití jádrových trnů ze slitiny mědi Albromet nemá podstatný vliv na rychlost odvodu tepla z dutiny formy.

Posouzením výsledků teplotního pole a teploty taveniny v dutině formy lze konstatovat, že trny nemají vliv na rychlost ochlazování taveniny, protože jejich funkce je určena pouze na odvod tepla z dutin hlubokých nálitků.

V rámci analýzy bylo zjištěno, že navržený konformní temperační systém není pro výrobu zadaného dílu efektivní variantou. Využití klasického způsobu temperačního systému je relevantnější, a to jak z hlediska rychlejšího odvodu tepla z dutiny formy, tak ze vzniku malých deformací výrobku. Pro zvýšení účinnosti by bylo vhodné navrhnout přijatelnější řešení konformní temperace tak, aby více kopírovala tvar zadaného dílu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] 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
- [2] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141
- [3] BOBČÍK, Ladislav. Formy pro zpracování plastů. II. díl, Vstřikování termoplastů. Brno: Uniplast Brno, 1999, 214 s.
- [4] ZEMAN, Lubomír. Temperace vstřikovacích forem – důležitá podmínka výroby výstřiků z termoplastů: 1.-4. část. Strojírenská technologie [online]. PLAST FORM SERVICE, 2015 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/temperacia-vstrekovacich-forem-dolezita-podmienka-vyroby-vystrekov-z-termoplastov-1-cast/c/3085/>
- [5] TECHNIK, Jiří.: Analýza a optimalizace chlazení vstřikovacích forem. Liberec, 2007. Technická Univerzita v Liberci.
- [6] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů – část 1. Liberec: TU v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8
- [7] BĚHÁLEK, Luboš, Petr LENFELD, Aleš AUSPERGER a Tomáš POUPA. TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM S OHLEDEM NA VLASTNOSTI A MORFOLOGII VÝSTŘIKŮ. Strojírenská technologie. Ústí nad Labem: ÚTRV, UJEP Ústí nad Labem, 2005, 10, 9-13 [cit. 2020-01-14]. ISSN 1211-4162.
- [8] Technologie 3D tisku kovů: 3D tisk kovů, Technologie a trendy. LASCAM [online]. c2019, 7. 09. 2016 [cit. 2020-12-22]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/technologie-3d-tisku-kovu-2/>
- [9] POUPA, Tomáš. Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování Ranque-Hilsch vírovou trubicí: Thermal analysis of injection mould at unconventional cooling system by Ranque-Hilsch vortex tube. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005.

- [10] Injection Mold Cooling Design. UPMOLD Molding Solutions [online]. Upmold, c2016-2018, December 18th, 2017 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://upmold.com/injection-mold-cooling-design/>
- [11] OPTIONS FOR CORE COOLING. In: WALSH'S PLASTIC CONSULTING. [online]. February 13, 2015 [cit. 2020-12-24]. Dostupné z: <https://plasticmolddesign.wordpress.com/2015/02/13/options-for-core-cooling/>
- [12] Přepážky [online]. In: Brno: Svoboda, c2020 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.jansvoboda.cz/prepazovani-vnitrnich-kanalu-c74901>
- [13] Spirial Blade Baffles. In: TMS [online]. Budapest, c2020 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: http://demoshop.mauriceward.com/index.php?route=product/product&product_id=171
- [14] BĚHÁLEK, Luboš. Speciální temperační prostředky. In: Sova, Miloš – Krebs, Josef: Termoplasty v praxi, Verlag Dashöfer, Praha, 2004, ISBN 8086229-15-7
- [15] HYNEK, M. a kolektiv. Temperace vstřikovacích forem. [online]. Západočeská univerzita, 2013 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.kks.zcu.cz/>
- [16] PRASHANTH REDDY, K. a Bhramara PANITAPU. High thermal conductivity mould insert materials for cooling time reduction in thermoplastic injection moulds. Materials Today: Proceedings [online]. 2017, 4(2), 519-526 [cit. 2020-01-10]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.052>
- [17] The principle of MECOBOND®. [online]. [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <http://www.mecobond.de/english/index.htm>
- [18] BĚHÁLEK, Luboš a Petr LENFELD. TEMPERAČNÍ SYSTÉM S VYSOCE TEPELNĚ VODIVÝM MATERIÁLEM. In: Články původní a přehledné. Plasty a kaučuk, 2002, 39, s. 196-199 [cit. 2020-01-14]. ISSN 0322-7340.
- [19] ROZKOŠNÝ, L.: Konformní chlazení vstřikovacích forem a jeho přínos pro optimalizaci vstřikování plastů. In 19. mezinárodní konference. Plasty – konstrukční materiály a jejich zpracování. Praha: Plast form service., 2009, s. 213-221. ISSN 1213-2640
- [20] WESTHOFF, R.: Kontrufolgende Temperierung auf dem Vormarsch, In: Kunststoffe 8/2006, s. 24-26 [cit. 2020-01-16].

- [21] Co je to konformní chlazení? In: Konformní chlazení [online]. Jaroměř: Innomia, c2017 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <http://www.konformni-chlazení.cz/>
- [22] Chlazení forem aplikací konformního chlazení: Vstřikovací formy. In: PlasticPortal.eu [online]. Innomia. ICOSA, 12.07.2010 [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/chlazení-forem-aplikací-konformního-chlazení.html/c/260/>
- [23] Průmyslové aplikace Renishaw technologie aditivní výroby z kovu: lisovací nástroje a konformní chlazení. In: RENISHAW... [online]. Renishaw, c2001-2020, [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/prumyslove-aplikace-renishaw-technologie-aditivni-vyroby-z-kovu--15256>
- [24] Direct Metal Laser Sintering. In: CUSTOMPART.NET [online]. CustomPartNet, c2020 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://www.custompартnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- [25] WANG, Wego. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, ISBN 978-1-4398-0630-2
- [26] ROZKOŠNÝ, Luboš. Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering. INNOMIA. Konstrukter.cz [online]. Brno: Nová média, c2019, 9. 3. 2015 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [27] ROZKOŠNÝ, Luboš. Technologie DMLS – 3D tisk kovů [online]. INNOMIA. Praha: MM publishing, c2020, 12.04.2017, 108 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-dmls-3d-tisk-kovu.html>
- [28] Co děláme: Nástroje s konformním chlazením. In: TECRON [online]. Praha: Tecron [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: <https://tecron.cz/cs/>
- [29] Markforged Metal X: Dostupnější 3D tisk kovů – poprvé i v Česku. In: 3D wisser... [online]. 3Dwisser, c2019 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://3dwisser.com/3d-tiskárny/3d-tisk-kovu/markforged-metal-x/>
- [30] GALATI, Manuela a Paolo MINETOLA. Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. Mater. [online]. 9 December 2019, 12(24) [cit. 2020-01-20]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12244122>

- [31] Markforged – Metal X – 3D-Printer. In: Mark3D Print Stronger [online]. Birmingham: Mark3D UK Limited, c2018 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.mark3d.com/en/product/professional-markforged-3d-printer/markforged-metal-x-3d-printer/>
- [32] HOMOLA, Jan. Selective Laser Sintering. In: 3D-tisk.cz [online]. Brno: Nová média, c2019, 30. 4. 2013 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [33] What is Micro Laser Sintering? In: 3D micro PRINT [online]. Chemnitz: 3D MicroPrint, c2020 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.3dmicro-print.com/technology/what-is-micro-laser-sintering/>
- [34] Laser Metal Fusion – výhody, funkční principy a aplikace aditivní technologie. In: TRUMPF [online]. c2020 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-fusion-lmf/
- [35] What is Laser Metal Fusion? In: SPI Lasers [online]. Southampton: SPI LASERS LIMITED, c2020 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/what-is-laser-metal-fusion/>
- [36] Laserové práškové navařování (LMD). In: TRUMPF [online]. c2020 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/
- [37] AGEYEVA, Tatyana, Szabolcs HORVÁTH a József Gábor KOVÁCS. In-Mold Sensors for Injection Molding: On the Way to Industry 4.0. Sensors [online]. 15 August 2019, 19(16) [cit. 2020-01-23]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s19163551>
- [38] OMEGA a spectris company [online]. JAKAR Electronics, c1995-2020 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: https://www.omegaeng.cz/temperature/index_cz.html
- [39] Bula, K.; Róžański, L.; Marciniak-Podsadna, L.; Wróbel, D. The use of ir thermography to show the mold and part temperature evolution in injection molding. Arch. Mech. Technol. Mater. 2016, 36, 40–43

- [40] 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
- [41] Schwalme, G. Inline infrared thermography applied for quality gates and for mould temperature control in the injection molding process. In *Proceedings of the 58th Ilmenau Scientific Colloquium*, Ilmenau, Germany, 8–12, September 2014.
- [42] Futaba: In-mold resin temperature measuring system [online]. Turkey: Futaba, c2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: http://futabamms.com/portfolio/in-mold_resin_temperature_measuring_system
- [43] PP-POLYPROPYLENE: Tatren IM 25 75. ITI POLYMERS [online]. Ferrara: I.T.I. Polymers [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <http://www.itipolymers.com/it-prodotti-e-certificazioni/mol/tatren>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ADAM	Atomic Diffusion Additive Manufacturing
Al	hliník
AM	Additive Manufacturing
Be	Beryllium
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
Co	kobalt
Cu	měď
DED	Direct Energy Deposition
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FD	Full Density
HRC	Hardness Rockwell C (jednotka tvrdosti de Rockwella)
IT	Index toku tatveniny
IR	infračervené záření
LMF	Laser Metal Fusion
LS	Laser Sintering
MLS	Micro Laser Sintering
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PC	Polykarbonát
PP	Polypropylen

PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
Re	Reynoldsovo číslo
RP	Rapid Prototyping
SLS	Selective Laser Sintering
STL	formát pro Stereolitografii
TC	Triangular Cell (trojúhelníková buňka)
Q_P	teplo přivedené taveninou
Q_t	teplo odvedené temperačním systémem
Q_Z	ztráty vzniklé odvodem tepla do okolí
3D	trojdimenzionální rozměr
λ	součinitel tepelné vodivosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Vstřikovací cyklus. [16]</i>	11
<i>Obr. 2. Morfologie výstřiku během různých teplot temperace PE Liten MB 77. [7]</i> .	18
<i>Obr. 3. Fontánka. [12]</i>	21
<i>Obr. 4. Princip systému jedné fontánky. [11]</i>	22
<i>Obr. 5. Princip systému s využitím více fontánek. [11]</i>	22
<i>Obr. 6. Plochá přepážka. [12]</i>	23
<i>Obr. 7. Princip systému plochých přepážek. [10]</i>	23
<i>Obr. 8. Spirálová přepážka. [12]</i>	23
<i>Obr. 9. Princip systému spirálových překážek. [13]</i>	24
<i>Obr. 10. Princip protiproudé vírové trubice. [14]</i>	25
<i>Obr. 11. Princip systému Contura. [4]</i>	25
<i>Obr. 12. Princip systému MECOBOND® ve srovnání s čistě ocelovou vložkou. [17]</i>	28
<i>Obr. 13. Výsledky simulace teplotních polí na povrchu vložky využitím systému MECOBOND® ve srovnání s ocelovou vložkou. [17]</i>	28
<i>Obr. 14. Princip využití tepelné trubice. [18]</i>	29
<i>Obr. 15. Temperační okruh klasický (vlevo) a konformní chlazení (vpravo). [22]</i>	30
<i>Obr. 16. Díl s využitím konformního chlazení. [23]</i>	31
<i>Obr. 17. 3D tisk dílu technologií direct metal laser sintering. [26]</i>	31
<i>Obr. 18. Princip technologie direct metal laser sintering. [24]</i>	32
<i>Obr. 19. Využití direct metal laser sintering při konformním chlazení. [21]</i>	33
<i>Obr. 20. Princip technologie atomic diffusion additive manufacturing. [30]</i>	35
<i>Obr. 21. Konformní chlazení metodou atomic diffusion additive manufacturing. [28]</i>	35
<i>Obr. 22. 3D tiskárna MarkForged Metal X. [31]</i>	36
<i>Obr. 23. Princip laserového slinování. [33]</i>	37
<i>Obr. 24. Princip metody laser metal fusion. [35]</i>	39
<i>Obr. 25. Porovnání měření kontaktním a bezkontaktním snímačem teploty. [37]</i>	40
<i>Obr. 26. Termočlánekový senzor teplot. [38]</i>	41
<i>Obr. 27. Odporový senzor teplot. [38]</i>	41
<i>Obr. 28. Infračervený senzor teplot. [38]</i>	42
<i>Obr. 29. Průběh výstřiku zaznamenan termovizní kamerou. [40]</i>	42

<i>Obr. 30. Model zvoleného výrobku – přední a zadní strana (pohled seshora)</i>	45
<i>Obr. 31. Model zvoleného výrobku – přední a zadní strana (pohled zespodu)</i>	45
<i>Obr. 32. Pohled do levé a pravé části vstřikovací formy</i>	47
<i>Obr. 33. Tvárnice vyrobená klasickými metodami</i>	48
<i>Obr. 34. Temperační systém tvárnice (klasické metody výroby)</i>	48
<i>Obr. 35. Tvárník vyrobený klasickými metodami</i>	49
<i>Obr. 36. Temperační systém tvárníku (klasické metody výroby)</i>	49
<i>Obr. 37. Temperační systém tvárníku a tvárnice – varianta 1</i>	50
<i>Obr. 38. Tvárník s konformním chlazením</i>	51
<i>Obr. 39. Trajektorie konformního chlazení na straně tvárníku</i>	51
<i>Obr. 40. Konformní chlazení na straně tvárníku</i>	51
<i>Obr. 41. Temperační systém tvárníku a tvárnice – varianta 2</i>	52
<i>Obr. 42. Tvárník s vyměnitelnými jádrovými trny</i>	52
<i>Obr. 43. Umístění jádrových trnů v hlubokých nálitcích</i>	53
<i>Obr. 44. Nastavení temperačního média v programu Moldflow Synergy 2016</i>	55
<i>Obr. 45. Nastavení parametrů jádrových trnů</i>	55
<i>Obr. 46. Vazby vložek</i>	56
<i>Obr. 47. Nastavení procesních podmínek – krok 1</i>	56
<i>Obr. 48. Nastavení procesních podmínek – krok 2</i>	57
<i>Obr. 49. Nastavení parametrů vstřikovacího stroje</i>	57
<i>Obr. 50. Nastavení parametrů vložek</i>	57
<i>Obr. 51. Nastavení procesních podmínek – krok 3</i>	58
<i>Obr. 52. Vybrané pozice pro měření teploty vyrobeného dílu</i>	58
<i>Obr. 53. Proložení reálného dílu CAD modelem</i>	59
<i>Obr. 54. Porovnání teploty zaznamenané IR senzorem a termočlánkem. [37]</i>	59
<i>Obr. 55. Umístění IR senzorů ve formě</i>	60
<i>Obr. 56. Teplotní pole reálného výrobku při použití ocelových trnů o teplotě formy 70 °C</i>	61
<i>Obr. 57. Největší celková deformace reálného výrobku při kombinaci teplot tvárníku a tvárnice 70 °C a době chlazení 12 s u varianty 1 s ocelovými trny</i>	64
<i>Obr. 58. Největší deformace reálného výrobku v ose y při kombinaci teplot tvárníku a tvárnice 70 °C a době chlazení 12 s u varianty 1 s ocelovými trny</i>	64

- Obr. 59. Největší dosažená celková deformace výrobku ze simulace při kombinaci teplot tvárničku a tvárnice 30 °C a době chlazení 12 s u varianty 1 s ocelovými trny.....65
- Obr. 60. Největší dosažená deformace výrobku v ose y ze simulace při kombinaci teplot tvárničku a tvárnice 30 °C a době chlazení 12 s u varianty 1 s ocelovými trny. 65
- Obr. 61. Nejmenší dosažená celková deformace ze simulace výrobku při kombinaci teplot tvárničku a tvárnice 30 a 70 °C a době chlazení 32 s u varianty 1 s trny Albromet67
- Obr. 62. Nejmenší dosažená deformace v ose y ze simulace výrobku při kombinaci teplot tvárničku a tvárnice 30 a 70 °C a době chlazení 32 s u varianty 1 s trny Albromet67
- Obr. 63. Teplota taveniny v dutině formy s ocelovými trny během chlazení 12 s.....69
- Obr. 64. Teplota taveniny v dutině formy s ocelovými trny během chlazení 32 s.....70
- Obr. 65. Teplota taveniny v dutině formy s trny Albromet po dobu chlazení 12 s.70
- Obr. 66. Teplota taveniny v dutině formy s trny Albromet po dobu chlazení 32 s.71
- Obr. 67. Teplota taveniny během doby chlazení 12 s.73
- Obr. 68. Teplota taveniny během doby chlazení 32 s.73

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Doporučené teploty vybraných materiálů při procesu vstřikování. [3]</i>	13
<i>Tab. 2. Součinitel tepelné vodivosti některých materiálů a médií. [3]</i>	14
<i>Tab. 3. Vlastnosti temperačních médií. [3]</i>	15
<i>Tab. 4. Vstřikovací parametry.</i>	46
<i>Tab. 5. Parametry vstřikovacího stroje.</i>	47
<i>Tab. 6. Návrh experimentu.</i>	54
<i>Tab. 7. Porovnání teplot naměřených s teplotami ze simulací pro variantu 1 + simulace teplot u varianty 2 s použitými ocelovými trny.</i>	62
<i>Tab. 8. Porovnání teplot naměřených s teplotami ze simulací pro variantu 1 + simulace teplot u varianty 2 s použitými Albromet trny.</i>	62
<i>Tab. 9. Varianta 1 + ocelové jádrové trny</i>	63
<i>Tab. 10. Varianta 1 + jádrové trny z materiálu Albromet.</i>	66
<i>Tab. 11. Varianta 2 + ocelové jádrové trny.</i>	68
<i>Tab. 12. Varianta 2 + jádrové trny z materiálu Albromet.</i>	68
<i>Tab. 13. Nejmenší dosažené hodnoty teplotního pole výrobku.</i>	72
<i>Tab. 14. Nejmenší dosažená deformace varianty 1 s trny Albromet.</i>	72
<i>Tab. 15. Nejmenší dosažená deformace varianty 2.</i>	73