ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace systému chlazení formy pro vstřikování plastů

Autor: **Bc. David Kočí**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZADÁNÍ

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: …….. …….

podpis autora

Autorská práva

Podle zákona o právu autorském. Č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za jeho výpomoc a odborné rady během zpracovávání práce. Také pak paní Ing. Ivaně Zetkové za odbornou pomoc a za cenné informace.

Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu oddělení konstrukce přípravků ve firmě KOSTAL Kontakt Systeme, panu Jaroslavu Kocourkovi, za veškerou jeho podporu, trpělivost a odbornou pomoc během zpracovávání práce ve firmě. Stejně tak všem ostatním kolegům z firmy, kteří mi byli nápomocni.

Také bych rád poděkoval mé rodině, za neuvěřitelnou podporu a toleranci během mých studií.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Bc. Kočí	**Jméno** David
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění	
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Ing. Zetek, Ph.D.	**Jméno** Miroslav
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO	

DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace systému chlazení formy pro vstřikování plastů		

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KTO		**ROK ODEVZD.**	2017

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	76		**TEXTOVÁ ČÁST**	62		**GRAFICKÁ ČÁST**	0

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Cílem práce je optimalizovat systém chlazení u vybrané části zadané formy pro vstřikování plastů, s využitím technologie 3D tisku k výrobě upravené součásti. Důvodem je snaha o snížení nákladů výroby vstřikovaného dílu.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	3D tisk, Rapid Prototyping, aditivní technologie, temperační systém, chlazení, Direct Metal Laser Sintering

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	**Surname** Bc. Kočí	**Name** David	
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Ing. Zetek, Ph.D.	**Name** Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	~~**BACHELOR**~~	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	Optimization of plastic injection mold cooling system.		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Machining Technology		**SUBMITTED IN**	2017

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	76		**TEXT PART**	62		**GRAPHICAL PART**	0

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	The goal of this thesis is to optimize the cooling system for selected part of plastic injection mold. Use the 3D printing technology to produce customized parts. The reason is to reduce the cost of plastic part, which is manufactured by selected injection mold.
KEY WORDS	3D printing, Rapid Prototyping, additive technology, temperating system, cooling, Direct Metal Laser Sintering

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů ... 3
1 Úvod ... 4
2 Rozbor současného stavu ... 5
2.1 Analýza vstupních informací pro zadanou formu ... 5
2.2 Analýza vstupních informací zadanou formu č. 2 ... 7
2.3 Zpracování plastových materiálů ... 10
2.3.1 Metoda vstřikování plastů ... 10
2.3.2 Vstřikovací forma ... 11
2.4 Temperační systém ... 13
2.4.1 Charakteristika temperačního systému ... 13
2.4.2 Zásady pro konstrukci temperačního systému ... 14
2.4.3 Metody výroby ... 16
2.5 Aditivní výroba ... 20
2.5.1 Popis metody ... 20
2.5.2 Základní technologie aditivní výroby ... 22
2.5.3 Metody aditivní výroby kovů ... 25
2.6 Direct Metal Laser Sintering ... 28
2.6.1 Popis metody DMLS ... 29
2.6.2 Postup při výrobě pomocí DMLS ... 30
2.6.3 Omezující aspekty technologie DMLS ... 31
2.7 Analýza výrobních možností ... 36
2.7.1 Výroba aditivní technologií ... 36
2.7.2 Obrábění ... 37
3 Návrh vlastního řešení ... 37
3.1 Forma č.1 ... 39
3.1.1 Omezující podmínky ... 39
3.1.2 Vlastní návrh konstrukce tvarového jádra pro formu č.1 ... 40
3.1.3 Návrh technologie výroby varianty kanálku A ... 43
3.1.4 Návrh technologie výroby varianty kanálku B ... 43
3.2 Forma č. 2 ... 44
3.2.1 Omezující podmínky pro formu č.2 ... 44

3.2.2 Vlastní návrh konstrukce tvarového jádra pro formu č. 2 ... 44
3.2.3 Optimalizace návrhů z hlediska výroby pomocí DMLS ... 48
3.3 Návrh výrobní technologie jader pro formu č. 2 ... 50
3.4 Výroba ... 50
3.4.1 Orientace součásti ... 50
3.4.2 Nastavení parametrů tisku ... 51
3.4.3 Výrobní proces ... 52
3.4.4 Postprocesing ... 52
3.4.5 Kontrolní měření ... 52
3.4.6 Obrobení na přesné rozměry ... 55
3.4.7 Úprava souvisejících částí formy ... 56
3.4.8 Zkoušení nově navržených jader ... 56
3.4.9 Průběh testování ... 57
4 Analýza konečného stavu ... 58
4.1 Analýza vytisknuté součásti. ... 58
4.2 Vyhodnocení zkušebního provozu ... 61
4.2.1 Získaná úspora ... 64
5 Závěr ... 65
Seznam použité literatury ... 66
Seznam obrázků ... 69
Seznam tabulek ... 70

Seznam použitých zkratek a symbolů

DMLS	Přímé spékání kovů laserem - z anglického direct metal laser sintering
TS	temperační systém
TM	temperační médium
SLA	z anglického Stereolitography
LOM	z anglického Laminated Object Manufacture
SGC	z anglického Solid Ground Curing
FDM	z anglického Fusion Deposition Modeling
SLS	z anglického Selective Laser Sintering
BPM	z anglického Ballistic Particle Manufacturing
MJM	z anglického Multi Jet Modelling
DSPC	z anglického Direct Shellt Production Casting
DLF	z anglického Direct Laser Forming
EBM	z anglického Electron Beam Melting
MJS	z anglického Multiphase Jet Solidification
LENS	z anglického Laser Engineered Net Shaping
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
PET	polyethylentereftalát
POM	polyoxymethylen
CAD	počítačem podporované projektování – z anglického computer aided design
CNC	číslicové řízené počítačem – z anglického computer numeric control
μm	mikrometr
mm	milimetr
m	metr
h	hodina
min	minuta
Ra	drsnost povrchu – střední aritmetická odchylka profilu
Rz	drsnost povrchu – maximální odchylka profilu
R	poloměr
č.	číslo

1 Úvod

Hromadná a velkosériová výroba je v dnešní době často orientována na produkci výrobků vstřikovaných z plastu. Použití plastových dílů je podněcováno specifickými vlastnostmi a širokými možnostmi použití toho materiálu. Výroba vstřikovaných plastových dílů umožňuje výrobu velkého počtu relativně tvarově složitých výrobků během krátké doby. Tato technologie je nejvíce využívána u hromadné a velkosériové výroby, kde je zaručena návratnost vysoké ceny výrobního nástroje (formy). Zhotovení samotné formy je dnes již poměrně rozšířenou činností některých firem, ale je stále podstatnou částí investic pro spuštění výroby konečného výrobku.

Ve výrobních podnicích zabývajících se vstřikováním plastových dílu, jsou často používány nástroje zkonstruované v době, kdy výrobní technologie a pomůcky pro návrh forem nebyly na tak vyspělé úrovni jako dnes. Díky tomu jsou formy, vyrobené v současné době, mnohem více optimalizovány pro snížení výrobních nákladů vstřikovaného výrobku.

Výroba nástroje pro vstřikování plastů je i v současnosti velice náročná a složitá. Jedná se o sestavu různého počtu tvarově velice složitých komponent, většinou navržených z hůře obrobitelných materiálů. Těmito materiály jsou z největší části tepelně zpracované ušlechtilé nástrojové oceli. Součásti formy často vyžadují jak vnější obrobení s vysokými požadavky na rozměrovou a geometrickou přesnost, tak i obrábění vnitřních ploch. Těmito vnitřními plochami jsou nejčastěji vrtané nebo hloubené otvory k vedení média, které slouží k chlazení či ohřívání požadované části formy.

Temperační systém (TS) vstřikovací formy je jednou nejdůležitějších částí vstřikovacího nástroje. Během vstřikování je forma cyklicky vystavena kontaktu s roztaveným plastem. To znamená, že součásti formy, které se dostanou do styku s rozehřátou hmotou, se vlivem přenosu tepla rychle ohřejí a po vyhození výlisku opět zchladnou. Mezi vstřikem a vyhozením vychladlého výrobku dochází k poměrně vysokému technologickému prostoji, při kterém je nutné výrobek přirozeně nebo nuceně ochladit na teplotu vhodnou k vyjmutí z formy. Tento čas je třeba, při sériové a hromadné výrobě, zkrátit na co nejkratší dobu. Temperační systém formy má za úkol udržovat, v různých částech formy, požadovanou teplotu v dané době lisovacího cyklu. Před vstřikem materiálu je nutné funkční části formy ohřát. Po vyplnění dutiny je naopak nutné je ochladit. Systém kanálků pro vedení temperačního média (TM) je důležité navrhnout s ohledem na mnoho faktorů, které následně velice ovlivňují požadavky na jejich výrobu. V praxi se pak často stává, že tento systém není veden optimálně kvůli dostupným možnostem výroby.

Díky moderním technologiím se však možnosti výroby značně rozšířili a lze vyrobit i součásti, které ještě nedávno byli dostupnými metodami nevyrobitelné. V případě vstřikovacích forem je typickým případem tvarová část formy s požadovaným temperačním systémem, který je nevyrobitelný konvenčními metodami. Například jádro tvořící dutinu v lisovaném výrobku je extrémně tepelně namáháno a zároveň se většinou nachází ve vnitřní části formy. Toto umístění neumožňuje přirozené chlazení přestupem tepla z jádra do okolního prostoru. Je-li takové jádro malých rozměrů, konvenční metody jen málokdy umožňují vytvořit kanálek pro chlazení, a téměř nikdy jej v takovém případě nelze vyrobit optimálně. Jednou z moderních technologií umožňující výrobu součástí s vnitřními, tvarově složitými dutinami, je aditivní technologie výroby. Jinak také nazývána 3D tisk či Rapid Prototyping. Tato technologie výroby kovových ale i nekovových součástí je, v současné době, nasazována ve veliké míře právě při výrobě funkčních částí forem na vstřikování plastů.

2 Rozbor současného stavu

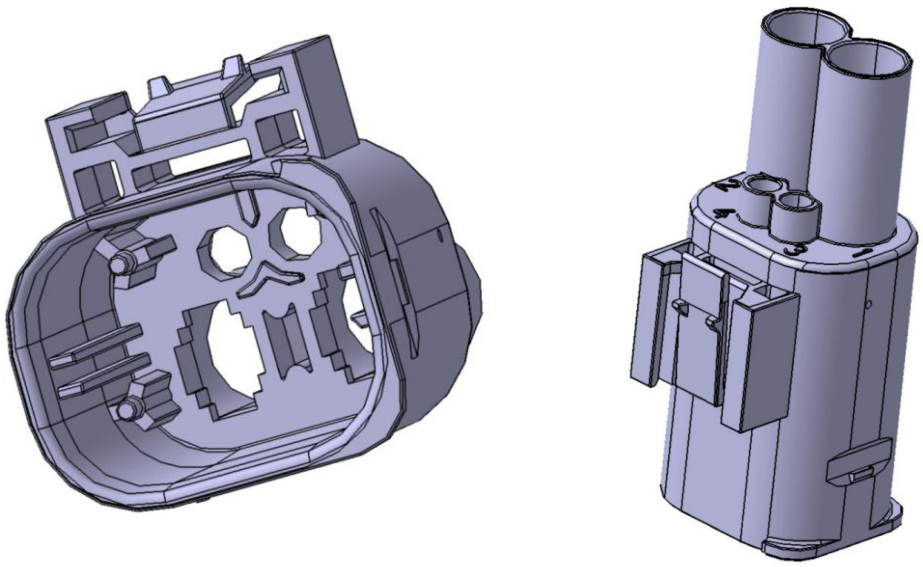
Cílem této práce je optimalizovat temperační systém vybrané části formy pro vstřikování plastů s využitím technologie 3D tisku. Jde o v současnosti používanou formu, zkonstruovanou v době, kdy výrobní technologie, pro výrobu tvarově složitých vnitřních otvorů, nebyly dostatečně dostupné. Optimalizace by měla být provedena pouze na jednom vybraném kusu v sestavě vstřikovací formy, který se v současné době zdá být kritický. Vstupními informacemi jsou údaje o formě, výrobní dokumentace a popis problému který výrobu provází při současném řešení. Výstupem by měl být nově navržený a vyrobený díl ze sestavy formy, a výsledek jeho testování v provozních podmínkách.

Práce je zpracovávána ve firmě KOSTAL Kontakt Systeme Čenkov. Firma se zabývá vývojem, výrobou a prodejem elektromechanických součástí pro automobilový průmysl. Konkrétně se jedná o konektory pro převodovky a hybridní automobily.

2.1 Analýza vstupních informací pro zadanou formu

Výrobek vyráběný zadanou formou, je hlavní část konektoru pro automobilový průmysl. Jedná se o skelet konektoru, ve kterém jsou následně usazeny vodiče a piny. Je vyráběno několik variant, které se od sebe lehce odlišují, ale hlavní tvar zůstává stejný. Konektor je dutého tvaru s jedním velkým hlavním otvorem pro protikus a s dvěma otvory pro přívod kabelů. Dále se na skeletu nacházejí dva menší otvory, sloužící pro rychlé rozlišení jednotlivých variant.

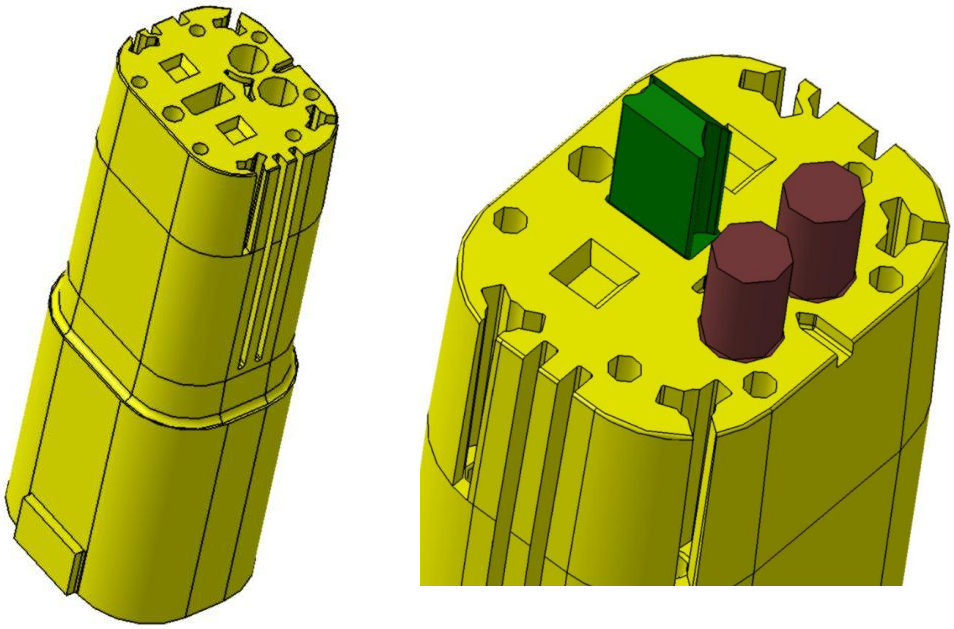
Uvnitř hlavní dutiny se nacházejí čtyři válcovité výstupky, sloužící pro spojení skeletu s další částí konektoru. Po sestavení s druhou částí, se výstupky nataví a vytvoří nerozebíratelný spoj. Na jedné vnější stěně skeletu se nachází zajišťovací systém konektoru pro zajištění spojení s protikusem. Tloušťka stěny výlisku je přibližně 1,5 mm a výrobek je lisován z polyamidu s příměsí skelných vláken.



Obr. 1: Dvouhlavňový konektor

V sestavě výrobní formy jsou během jednoho cyklu lisovány čtyři kusy výrobku. Hlavní dutina na konektoru je tvořena tvarovým jádrem formy. Jedná se o samostatný díl a ve formě jsou čtyři kusy jádra.

Samotným jádrem, v originálním řešení, prochází jedenáct kusů vyhazovačů pro vyhození výlisku z formy. Dále jsou jádrem vedeny další tři malá jádra pro vytvoření tvarových dutin uvnitř hlavní dutiny. Dvě válcová jádra tvoří dutiny pro rozlišení varianty výrobku, a jedno tvarové jádro tvoří technologickou dutinu pro zajištění konstantní tloušťky stěny výrobku. Tyto tři jádra jsou zde řešena samostatně kvůli jednodušší vyrobitelnosti celého jádra a také kvůli vyměnitelnosti v případě poškození jádra.



Obr. 2: Tvarové jádro

Během vstřikovacího cyklu trvá chlazení výlisku 19 s a čas celého cyklu je 32,5 s. Při snaze zkrácení času chlazení dochází k propíchnutí výrobku vyhazovači. Je tedy zjevné, že plast v místě kontaktu s vyhazovači nestačí zchladnout na potřebnou teplotu. Originální jádro neobsahuje žádné vnitřní chlazení. Vzhledem k jeho umístění v sestavě formy, nemůže docházet k jeho ochlazování vlivem prostupu tepla do okolního prostředí.

Díky těmto okolnostem, bylo ve firmě rozhodnuto o pokusu optimalizovat chlazení právě tohoto tvarového jádra. Pro návrh temperačního systému jádra byly analyzovány prostorové možnosti vedení chladícího média jak v samotném jádře, tak i v sestavě formy. Návrh bylo nutné koncipovat tak, aby došlo k co nejmenšímu narušení původní koncepce formy. Popis omezujících faktorů a konstrukce nového řešení bude popsána v kapitole 3.

Tabulka níže uvádí vstupní údaje a hodnoty zadané před návrhem úprav.

Údaj	hodnota
Výrobní stroj	Engel e-victory 310/120
Temperační zařízení	Regloplas 90 Smart
Materiál výrobku	PA66 GF30
Hmotnost výrobku	90,2 g
Počet hnízd ve formě	4
Teplota taveniny	290 °C
Teplota temperačního média	80 °C
Čas chlazení	19,2 s
Celkový čas cyklu	32,5 s
Vstřikovací tlak	1050 bar

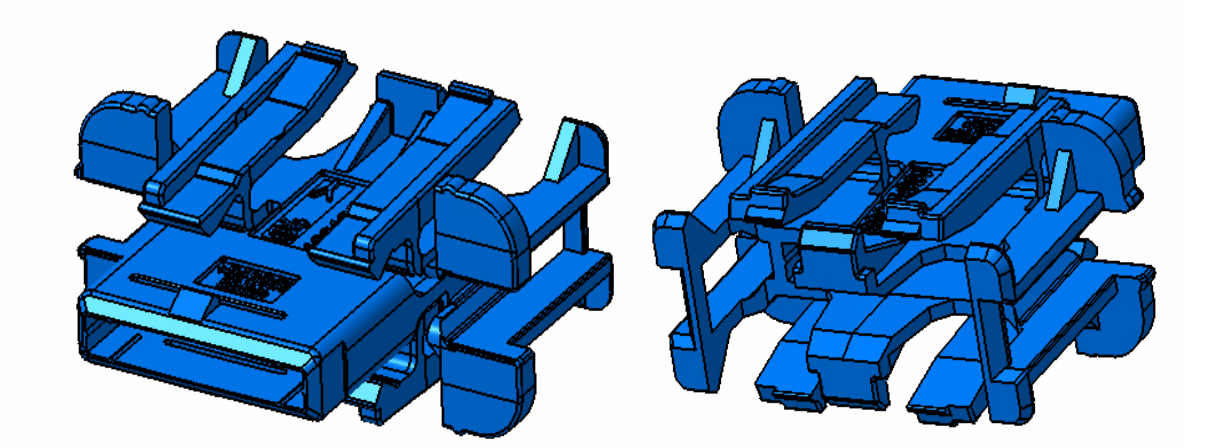
Tab. 1:Vstupní informace pro zadanou formu č. 1

Bohužel, v průběhu zpracovávání návrhu úprav a plánování výroby, byla na této formě ukončena výroba vstřikovaného dílu. Proto byl vybrán jiný typ formy vyrábějící velice odlišný typ výrobku.

2.2 Analýza vstupních informací zadanou formu č. 2

Výrobek vyráběný druhou zadanou formou je součástí sestavy vysokonapěťového konektoru pro hybridní automobily. Jedná se o pojistnou krytku vysokonapěťového kontaktu. Tato krytka brání možnosti dotknout se kontaktu během manipulace. Samotná krytka je na kontaktu nasazena pohyblivě. Při zapojení konektoru do protikusu se odsune z vodivé plochy a umožní propojení obou vodivých částí kontaktu. Při odpojování konektoru dojde k samovolnému nasunutí pojistné krytky na vodivou část. Tím je následně zajištěna ochrana proti zkratu nebo úrazu. Jde o bezpečnostní prvek na celé sestavě konektoru.

Pojistná krytka je pracovně nazývána „Beruška“ Jde o součást malých rozměrů a velice komplikovaného tvaru. Její maximální rozměry jsou přibližně 35x25x14 mm. Během jednoho vstřikovacího cyklu jsou vyráběny 4 kusy výrobku. Výrobek je z polyamidu s příměsí skelných vláken.



Obr. 3: Kryt konektoru („Beruška")

Tato forma byla vybrána kvůli problému, který bylo nutné řešit. Na výrobku byl popsán problém, se kterým se výroba potýká. V tomto případě není hlavním cílem snaha o zkrácení výrobního času, i když toto snížení by také bylo produktivní. Hlavním problémem je zde kroucení výrobku po vyjmutí z formy. Tímto kroucením vznikají rozměrové a tvarové odchylky od požadovaných hodnot. Výroba na této formě se potýká s velikým rozptylem poměru zmetků.

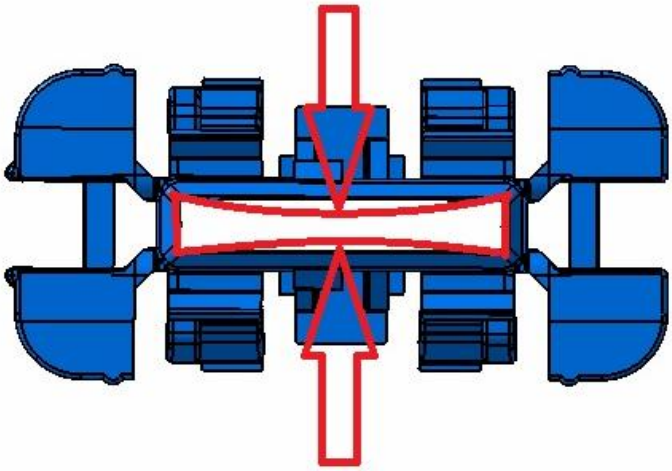
Výrobky jsou, pomocí automatického manipulačního zařízení, přemístěny na pásový dopravník. Zde jsou uspořádány do čtyř řad, z nichž každá řada obsahuje výrobky z jedné konkrétní tvarové dutiny. Výrobky z každé dutiny jsou následně shromažďovány v oddělených bednách. Díky tomu je možné identifikovat problémy v jednotlivých dutinách nezávisle na sobě.

O kontrolu tvarových a rozměrových nesrovnalostí se stará speciální kontrolní automat. Ten snímá každý díl čtyřmi kamerami a porovnává pořízený snímek se vzorovým snímkem. V případě nesrovnalostí je daný kus vyřazen.

K jedněm z největších deformací dochází na stěnách tvořících hlavní dutinu ve výrobku. Tato dutina má mít přibližně obdélníkový tvar, ale vlivem kroucení dochází k výraznému prohnutí dvou větších stěn dutiny. Na výrobek jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost kvůli bezpečnosti, kterou má výrobek zajistit na sestavě konektoru.

Dutina je při vstřikování vytvářena tvarovým jádrem. Jádro má stěny, tvořící problémové stěny na výrobku, řešené lehce konvexním tvarem. Tento tvar se snaží eliminovat prohnutí na výrobku tím, že dutinu vytvoří prohnutou v opačném směru. Po sejmutí výrobku z formy by se vlivem deformací měly stěny narovnat do optimálního tvaru. Následkem kroucení této hlavní části dochází k deformaci a nedodržení požadovaného tvaru zbytku součásti.

Kroucení výrobku je pravděpodobně způsobeno špatným odvodem tepla v místech dutiny oproti zbytku výrobku.



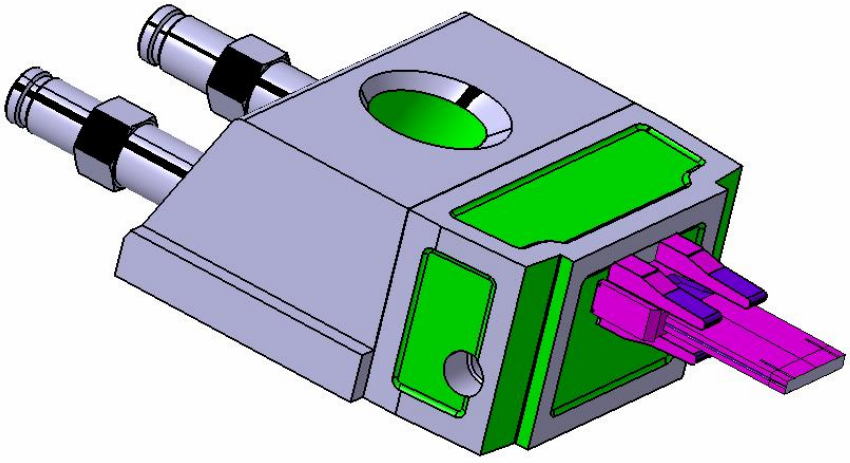
Obr. 4: Deformace „Berušky"

Z tohoto důvodu byla navrhnuta možnost vyrobit tvarové jádro pro dutinu vnitřně chlazené temperačním médiem. Původní jádro neobsahuje žádné vnitřní chlazení, protože má velice malé rozměry. Průřez části tvořící dutinu ve výrobku má rozměry přibližně 15x2,5 mm.

Zvýšený odvod tepla je řešen zvoleným materiálem, kterým je Duracon 45M. Jedná se o slitinu železa, niklu a kobaltu s vysokou tepelnou vodivostí a relativně vysokou pevností.

Jádro je v sestavě bočního šoupáku připevněno pomocí osazení. Pomocí opačného osazení v držáku jader je jádro přimáčknuto k bočnímu šoupáku. Držák a boční šoupák jsou spojeny šroubovými spoji.

Sestava bočního šoupáku je chlazena vlastním vnitřním kanálkem procházejícím skrze šoupák do držáku jader. V držáku je kanálek veden do tvaru „U“ a je vyveden zpět do šoupáku. Vstup a výstup na šoupáku je řešen pomocí hadicových přípojek. Chlazení celé této sestavy je řešeno přechodem tepla skrze plný materiál všech částí.



Obr. 5:Sestava bočního šíbru s jádrem

Tabulka níže ukazuje vstupní údaje pro tuto formu

Údaj	hodnota
Výrobní stroj	Engel e-victory 310/120
Temperační zařízení	Regloplas 90 Smart
Materiál výrobku	PA66 GF25
Hmotnost výrobku	90,2 g
Počet hnízd ve formě	4
Teplota taveniny	280 °C
Teplota temperačního média	70 °C
Čas chlazení	13,0 s
Celkový čas cyklu	22,1 s
Vstřikovací tlak	1800 bar
Objem výroby	190000 ks/měsíc

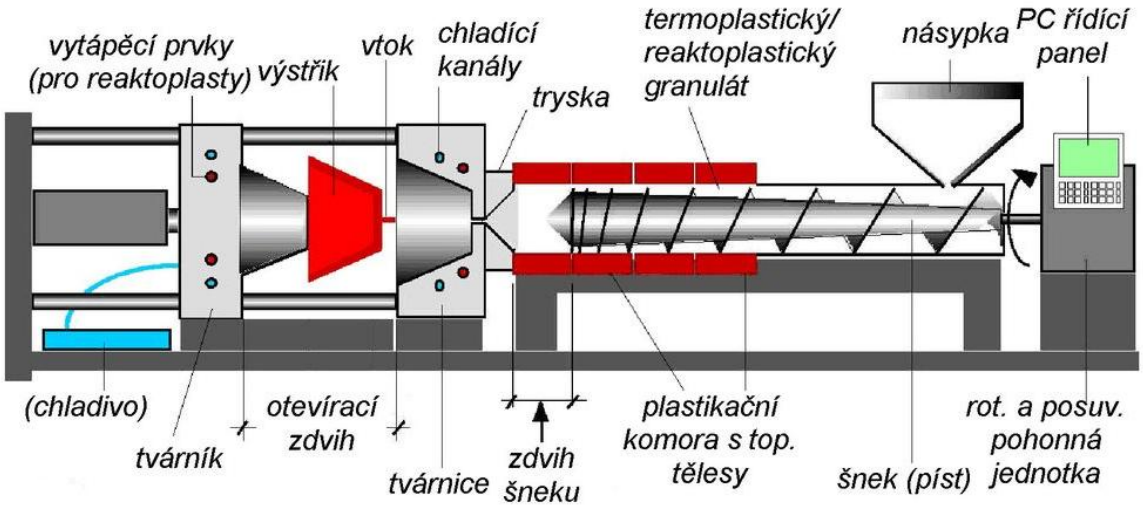
Tab. 2: Vstupní informace pro zadanou formu č. 2

2.3 Zpracování plastových materiálů [1]

Polymerové výrobky jsou vyráběny pomocí lisovacích strojů a podle daného typu plastu je následně zvolena metoda zpracování.

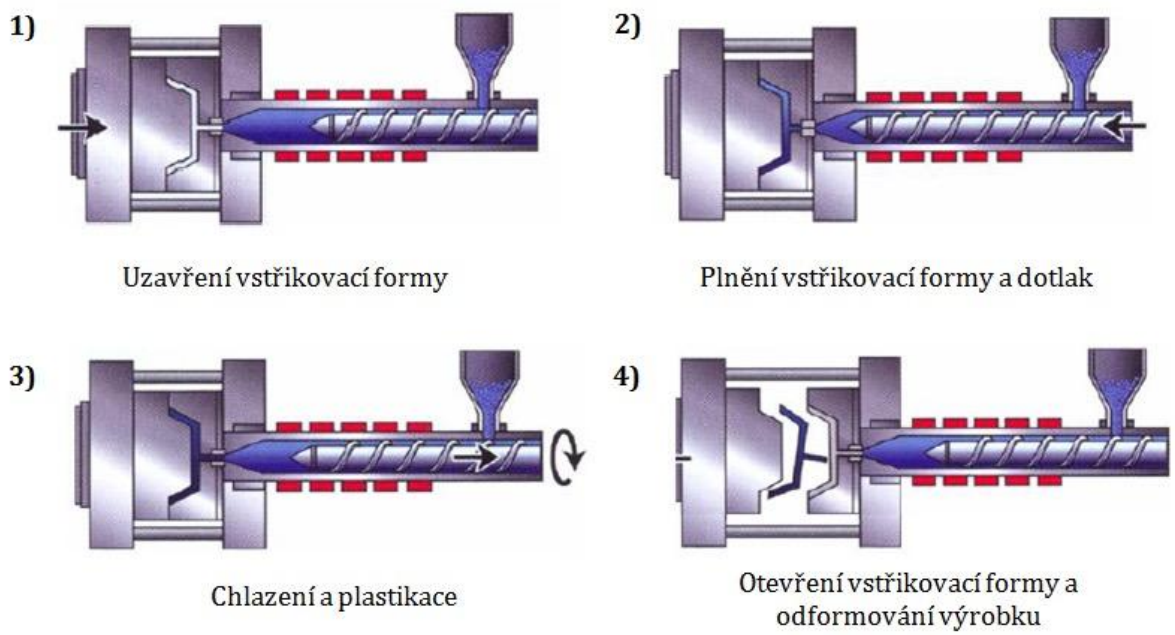
2.3.1 Metoda vstřikování plastů [1], [2]

Metoda vstřikování termoplastů funguje na principu vstříknutí roztaveného plastu v tekutém skupenství do tvarové dutiny ve formě. Plast je stroji dodáván ve formě granulátu. Ten je pomocí tepla roztaven a vstříknut do dutiny formy. Zde dojde ke zchladnutí plastu a přeměně jeho skupenství na pevné. Plast tak získá tvar dutiny, do které byl vstříknut. Po zchladnutí je výrobek z formy vyhozen a cyklus se opakuje. Principiálně se tento postup jeví jako relativně jednoduchý. Vzhledem k mnoha aspektům, které při tomto procesu vznikají, jde o proces velice složitý na přípravu a odladění. Vstřikování se provádí na vstřikovacích lisech. Jde o stroj, který umožňuje montáž formy pro daný výrobek a stará se o řízení celého procesu vstřikování.



Obr. 6: Schéma vstřikovacího lisu [1]

Proces vstřikování má následující fáze:



Obr. 7:části vstřikovacího cyklu [2]

2.3.2 Vstřikovací forma [1], [3]

Vstřikovací forma je nástroj procesu vstřikování, který definuje konečný tvar výlisku a je konstruován konkrétně pro daný typ výrobku. Forma se připevňuje na vstřikovací lis a její vtokový systém je napojen na vstřikovací jednotku lisu. Je sestavena z několika hlavních částí zajišťujících její správnou funkci. Musí odolávat veškerým vlivům působícím během vstřikování jako je například tlak a teplota. Má své konstrukční části a funkční části.

Obecně je sestavena z následujících částí:

a) rám formy

Rám formy je tvořen sestavou desek a konstrukčních částí, ve kterých jsou umístěny další systémy formy. Má svou pevnou a pohyblivou část. Jejich vzájemný pohyb umožňuje systém vodících pouzder a sloupků. Rám může být řešen univerzálně nebo skládáním stavebnicových katalogových řad různých výrobců komponent pro vstřikovací formy. Nebo může být konstruován a vyráběn speciálně pro danou formu.

b) Vtokový systém

Vtokový systém je systém kanálků sloužících pro přívod roztaveného plastu od trysky vstřikovacího stroje do dutiny formy. Jeho konstrukce má značný vliv na výslednou kvalitu výlisku. V případě vstřikování více součástí na jeden vstřik, se jeho konstrukce stará o správné rozdělení materiálu mez jednotlivé dutiny tak, aby tuhnutí plastu bylo ve všech dutinách přibližně stejně dlouhé. Rozlišují se dva základní typy vtokového systému.

Studený vtokový systém je tvořen pouze kanálkem a plast, který v tomto kanálku zůstává. Po vstřiku ztuhne společně s výliskem. Během vyhazování výlisku dochází k odstřižení takzvaného vtokového zbytku od výrobku. Vtokový zbytek musí být z formy vyhozen také a je určen k recyklaci či k likvidaci.

Teplý vtokový systém, kromě systému kanálků, obsahuje také systém vytápění a systém tepelných čidel. Celý systém je řízen tak, aby se plast ve vtokovém systému nestihl ochladit a v dalším cyklu mohl být znovu použit.

c) Vyhazovací systém

Vyhazovací systém slouží k vytlačení výrobku z tvarové dutiny po zchladnutí a otevření formy. Vytlačení může být provedeno mechanicky nebo například pneumaticky. Forma musí být vždy konstruována tak, aby výlisek zůstával na pojízdné straně a mohl tak být vyhozen.

Mechanické vyhození je prováděno pomocí vyhazovacího paketu. To je sestava desek, ve kterých jsou upevněny vyhazovače. Vyhazovače jsou vedeny skrz pohyblivou tvarovou desku formy a zasahují až do tvarové dutiny. Tvoří tak částečně její povrch. Mohou být ve formě válcových kolíků nebo plochých tyčí či tvarových tyčí. Vyhazovací desky mají své vlastní vedení a pohyb je možné řídit pohybem formy pomocí narážkového systému či pomocí hydrauliky a pneumatiky. Po otevření formy dochází k pohybu vyhazovačů dopředu a k vyhození výlisku. Následně dochází vlivem vratného systému, kterým je většinou sestava pružin, k pohybu zpět.

Dalším způsobem vyhazovacího systému může být stírací deska, lišta či pohyblivá vyhazovací část tvarové dutiny.

d) Odvzdušňovací systém

Nejedná se ani tak o samostatný systém jako o konstrukční prvek samotné formy. Ten má za úkol umožnit únik vzduchu uzavřeného v dutině formy. Během vstřikování dochází ke stlačení uzavřeného vzduchu pomocí vstřikovaného materiálu. Vzduch je postupně stlačen do takové míry, že vzniká takzvaný Diesel efekt. Vzduch se vlivem stlačení ohřeje na teplotu, která v místě, kde ke stlačení dochází, začne přehřívat vstřikovaný materiál. Na výrobku se

pak nachází spálená místa. Dalšími následky špatného odvzdušnění můžou být vzniklá nedoplněná místa, studené spoje nebo vysoké vnitřní pnutí výstřiku po zchladnutí.

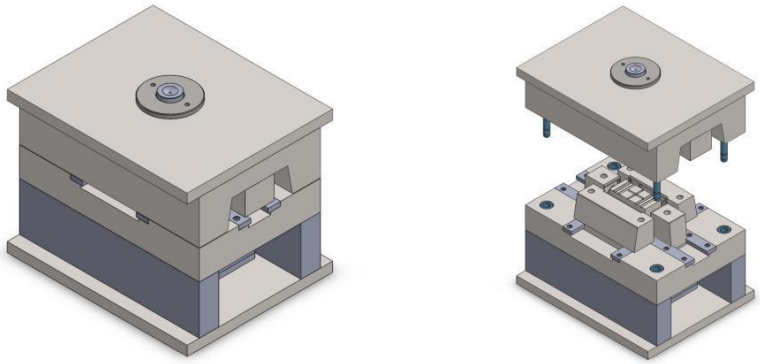
e) řídící a regulační systémy.

Ty slouží k řízení a kontrole tlaku, teploty, rychlosti pohybu pomocí čidel a řídících členů.

f) Temperační systém

Má za úkol udržovat formu a její části v potřebné teplotě v daný čas. Některé části jsou temperovány konstantě a jiné zase cyklicky v závislosti na části vstřikovacího cyklu.

Protože tento systém je jednou z hlavních částí podstaty této práce, bude v další kapitole popsán podrobněji



Obr. 8: Vstřikovací forma [3]

2.4 Temperační systém

Během vstřikování je forma vystavena vysoké teplotě roztaveného polymeru. Tato teplota závisí na druhu použitého plastu, ale obecně lze říci, že se pohybuje mezi 200 a 300°C, v některých případech je ale teplota pouze okolo 120°C. V závislosti na používané teplotě je třeba formu během vstřikovacího cyklu chladit nebo naopak ohřívat.

2.4.1 Charakteristika temperačního systému [1], [4], [5]

Jedná se o soustavu kanálků a otvorů pro vedení média do potřebných míst. Systém je možné rozdělit do několika okruhů, například pro temperaci desek, tvárnic, nebo tvárníků. Je používáno kanálků různého tvaru a průřezu.

Temperací forem se pomáhá udržovat optimální teplota různých částí formy tak, aby čas cyklu vstřikování výrobku byl co nejkratší. Tento čas je během hromadné výroby podstatný pro náklady na výrobu jednoho kusu výrobku a tedy i následný možný zisk.

Protože je každá část formy tepelně ovlivněna jinak, je třeba každou oblast temperovat jinou intenzitou. Na kvalitní temperaci nezáleží jen čas cyklu, ale také výsledná kvalita výrobku. Špatně navržený systém může způsobit následné kroucení výstřiku i po vyjmutí z formy, nebo vznikání staženin.

Temperační systém má za úkol:

a) Zajistit optimální teplotu povrchu dutiny formy.

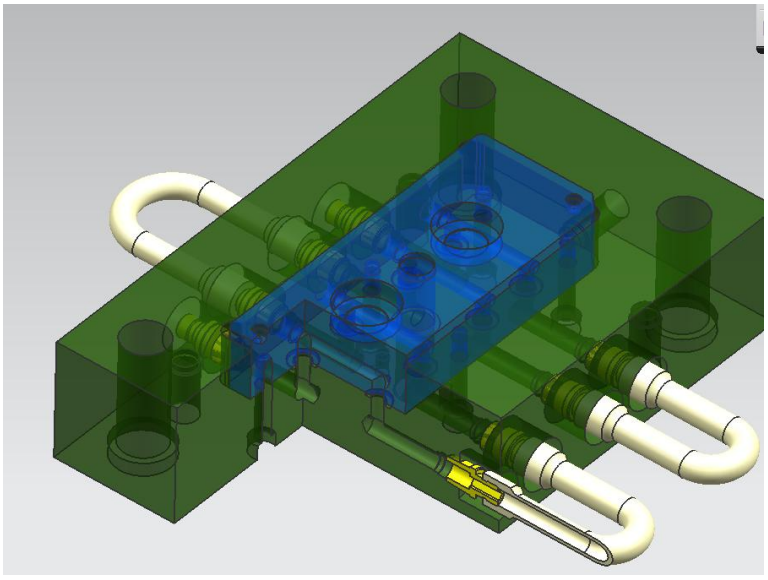
b) Zajistit odvod tepla dodaného do formy taveninou tak, aby byl cyklus co nejekonomičtější.

c) Zajistit rozměrovou stabilitu formy a jejích částí.

d) Zajistit optimální tuhnutí plastu v dutině.

Médium používané pro temperaci bývá voda nebo olej. Systém je pomocí přípojek a hadic připojen k zásobníku média s čerpadlem a popřípadě filtry k úpravě média před vstupem do úzkých kanálků.

Vlivem technologických možností výroby kanálků je často ovlivněna konstrukce temperačního systému. Ten musí být veden v ideálním případě do požadovaných míst a však s ohledem na možnosti napojení na vstupní a výstupní přípojky pro médium. Dále na možnosti propojení a utěsnění kanálků mezi jednotlivými částmi formy, na vedení vyhazovačů, sloupků, bočních posuvných částí a dalších částí. Tyto okolnosti v praxi často umožní vedení kanálků velice neoptimálně, což má za konečný následek prodlužování vstřikovacího cyklu.



Obr. 9: Temperační systém [4]

2.4.2 Zásady pro konstrukci temperačního systému [5]

Návrh temperačního systému je vázán na energetickou bilanci formy a okolí. Teplo je odebíráno přes upínací plochy do vstřikovacího stroje, zářením do okolního prostředí a prouděním vzduchu kolem formy. Odvod dodaného tepla těmito způsoby ale nestačí. Proto je třeba jej řídit správným množstvím média, správnou rychlostí průtoku média a jeho správnou teplotou v danou dobu během cyklu.

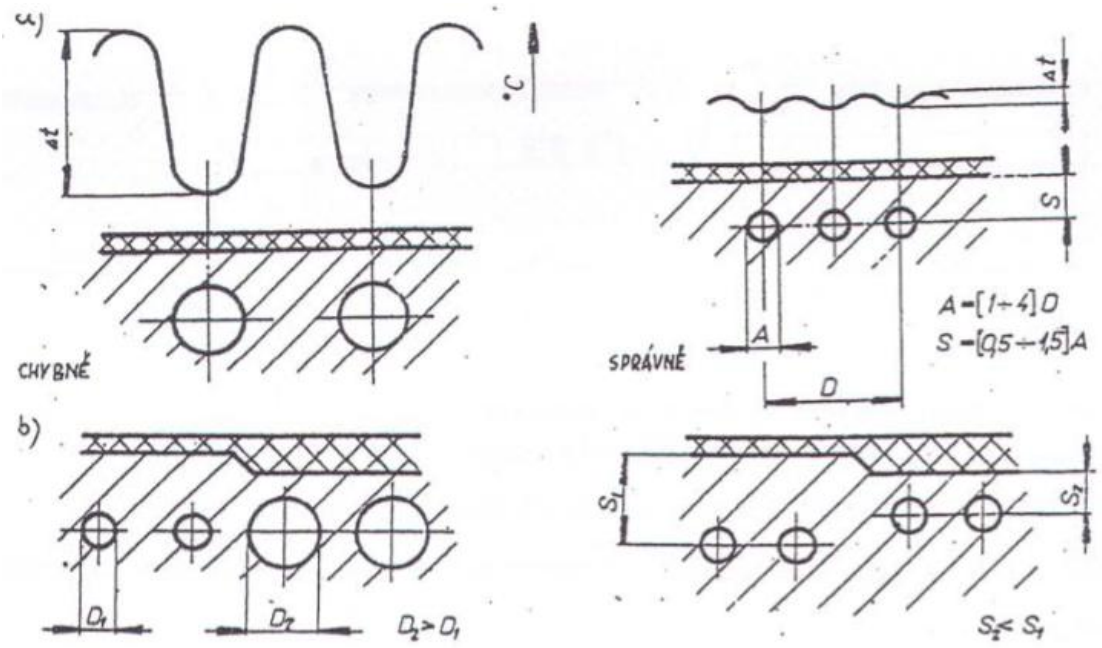
V případě návrhu chlazení konkrétního místa je důležité dbát na přívod, ale také na odvod média z daného místa. Musí se také pečlivě zvážit směr proudění temperační kapaliny, který

by měl vést od místa s největší potřebou úpravy teploty k místu s potřebou nejmenší. To ale v praxi není vždy zcela možné.

Pro odvod tepla v daném místě je možné použít, pro konstrukci dutiny formy, různé druhy materiálu. Oproti nástrojové oceli existuje mnoho použitelných materiálů, které mají větší tepelnou vodivost a podobné mechanické vlastnosti.

Při rozmisťování kanálků kolem dutiny je třeba dodržovat optimální vzdálenost od dutiny. A to s ohledem na tuhost a pevnost stěn tvořících dutinu. V praxi se používá optimálně minimální vzdálenost 3 mm, v některých případech i 2,5 mm. Tato hodnota zaručuje dostatečnou tuhost a pevnost částí formy vůči běžně používaným tlakům v dutině. Zároveň vytváří pojistný prostor pro korozi kanálku. Při nižší tloušťce by mohlo dojít k proreznutí kanálku do tvarové dutiny, a tím k úniku temperačního média do výstřiku.

Při návrhu je optimálnější variantou použití většího počtu kanálků s menším průřezem a menší roztečí. Toto řešení vytváří rovnoměrnější šíření tepla. Kanálky je třeba rozmístit co nejvíce rovnoměrně se snahou dodržet všude stejnou vzdálenost kanálku od dutiny. Menší vzdálenost od dutiny se volí v místě s větší tloušťkou stěny výstřiku.



Obr. 10: Ukázka správného a nesprávného umístění kanálků[5]

Volba tvaru průřezu temperačního kanálku je dána technologickými možnostmi výroby. Nejčastější je tvar kruhový (vrtaný) nebo obdélníkový (frézovaný). V případě tvarových jader a dutin je v praxi často použit i tvarový kanál, který lépe kopíruje povrch dutiny. Samozřejmě s ohledem na výrobní možnosti. Vstupní a výstupní otvor je v tomto případě nejčastěji zajištěn rozváděcí destičkou.

Velikost průřezu kanálku je ovlivněna velikostí výstřiku, použitého plastu a celkové velikosti formy. Není však vhodné průřez zbytečně zvětšovat. Dochází pak k snížení tuhosti formy a k růstu množství temperačního média v oběhu. Odvod tepla se však zvětší neúměrně k tomu.

Pravidla pro návrh TS

- Kanálky umístit v optimální vzdálenosti od dutiny.
- Kanálky umístit a dimenzovat tak, aby bylo teplo intenzivně odváděno z míst, kde je forma ve styku s proudem vstřikované taveniny.
- Průtok chladící kapaliny regulovat tak, aby při chlazení proudil od nejteplejšího místa k nejchladnějšímu místu formy a u ohřívání naopak.
- Kanálky vést celistvým materiálem formy. Pokud to není možné, spoje musí být utěsněny. V případě velkého počtu spojů je možné kanálek nahradit drážkou pro upevnění tenkostěnné měděné trubky.
- Po cestě TM nevytvářet mrtvé kouty, protože se v nich usazují nečistoty a vzniká koroze a následné zarůstání kanálku.
- Kanálky se obvykle neumisťují v blízkosti hran výlisku.
- Pokud je to možné, průměr kanálků by neměl být menší než 6 mm, jinak hrozí ucpání nečistotami, vodním kamenem a podobně. V případě menšího průměru je nutná úprava vody a zvýšení tlaku v TS.
- Konstruovat kanálky tak, aby byli propojitelné hadicemi a jinými způsoby.
- Směr proudící kapaliny se volí s ohledem k možné rozdílné rychlosti odvodu tepla z různých míst.
- Zvýšenou účinnost chlazení je třeba zajistit v místě horkých ústí vtoku a v oblasti trysky.
- Součinitel přestupu tepla závisí na kvalitě povrchu kanálku.

Pro zvětšení výkonu temperačního systému je možné:

- zvětšení rozdílu teploty formy a temperačního média. Je nutné brát ohled na vznik nerovnoměrnou teplotu formy.
- Vytvořením lepších podmínek zvětšení součinitele prostupu a přestupu tepla jako například volba materiálu s větší tepelnou vodivostí, pasivace povrchu kanálků, zaručení turbulentního proudění.
- Zapojením více chladících větví TS.

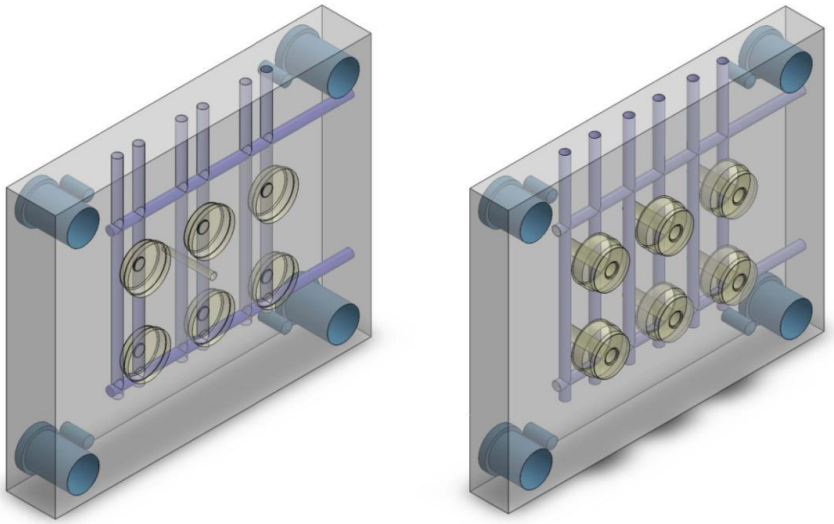
2.4.3 Metody výroby [3], [5], [6], [7], [8]

Pro temperaci vstřikovacích forem je používáno velké množství způsobů. Rozšířením použití vstřikovaných výrobků došlo také k intenzivnímu růstu nabídky normalizovaných a katalogových komponent pro formy od mnoha výrobců. Tyto komponenty usnadňují konstrukci, a také zlevňují výrobu systému a tím i celé formy.

a) Vrtané, frézované a hloubené kanálky

Díky technologické nenáročnosti je TS v největší míře tvořen vrtanými kanálky různého průměru. Výroba vrtáním je ekonomicky nejpřívětivější a technologicky nejdostupnější možností, jak médium rozvést po dané části formy. Tato technologie má však svá omezení dané principem vrtání. Lze vrtat pouze kanálky s kruhovým průřezem a v přímém směru. Kombinací vrtání děr různím směrem a vzájemného napojení je docíleno uzavření temperačního okruhu. Vstupy pro nástroj jsou následně zaslepeny různými typy záslepek. Tímto způsobem lze kanálky vést jednoduše ovšem za cenu neoptimálního vedení do

požadovaných míst. Frézování a hloubení je používáno spíše jako doplňková úprava pro vrtané kanálky. Například se používá pro různé napojení nebo vytvoření vhodného místa pro normálie.



Obr. 11: Vrtaný temperační systém [3]

V kombinaci s vrtanými kanálky se často používá různých katalogových přípravků pro dovedení a odvedení média do požadovaných míst. Tyto přípravky jsou koncipovány tak, aby byla nutná výroba pouze otvoru vyrobitelného konvenčními technologiemi obrábění. Otvor je většinou válcovitého tvaru určitých požadovaných rozměrů, který je napojen na vrtané kanálky v daných místech určených zvoleným typem normálie.

Mezi tyto normálie patří:

- ucpávky
- přípojky
- přepážky
- trubky
- O-kroužky
- fontánové trubičky
- rozváděcí destičky
- těsnící podložky
- Tepelné trubice

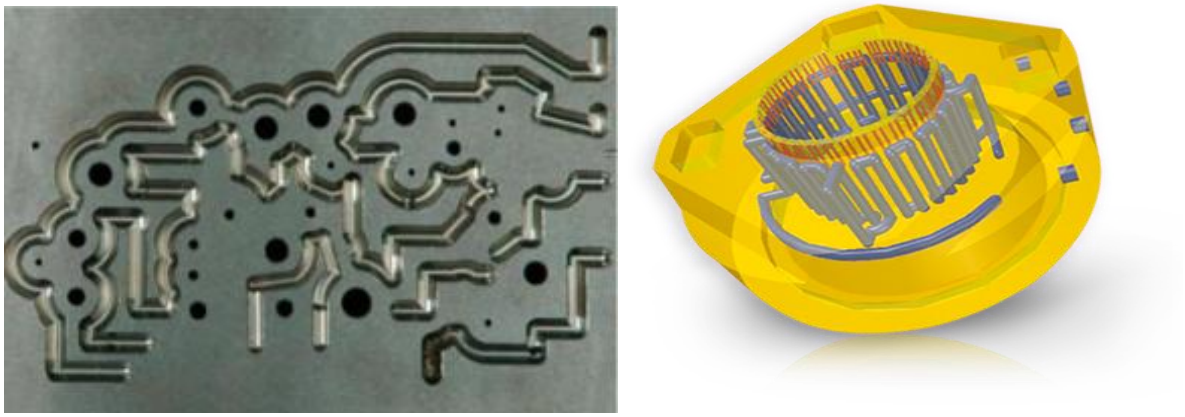
V případech kdy není možné do požadovaného místa dovést TM, je možné použít vložku z materiálu s vysokou tepelnou vodivostí do vrtaného otvoru a tuto vložku temperačním médiem oplachovat až na místě kde to možné je.

Obr. 12: Normálie pro TS [6]

b) Systém Integrat 4D firmy GWK

Fima GWK se zaměřila na problém optimálního vedení TS a vyvinula systém výroby temperačních kanálků rozmístěných optimálně kolem tvarové dutiny. To vše s použitím pouze vrtacích, frézovacích a elektroerozivních metod obrábění. Tato metoda umožnila velikou optimalizaci forem pro hromadnou a velkosériovou výrobu například v automobilovém průmyslu

Princip výroby spočívá v sestavení tvárnice či tvárníku z několika vrstev desek o různé tloušťce. V jednom směru (většinou kolmém na povrch desky) jsou kanálky vedeny vrtanými děrami, které se svým rozmístěním snaží co nejvíce kopírovat tvar dutiny v daném směru. Na povrchu každé desky, v rovnoběžném směru ks povrchem, je vyfrézována nebo vyhloubena drážka, která kopíruje tvar dutiny v dané výšce. Ta je napojena na systém vrtaných děr v kolmém směru nebo má takový tvar, aby po spojení dvou desek byla drážka napojena na vrtaný kanálek další desky. Slícováním a sestavením několika vrstev z těchto desek dochází k vytvoření systému kanálků pro průtok TM. Spojení dvou desek je docíleno pomocí vrstvy speciální kovové fólie, která se vloží mezi dvě spojované desky. Pevné spojení vznikne až po spečení této vrstvy určitou teplotou ve vakuové komoře. Tímto způsobem je předpřipraven TS dle požadavků zákazníka.

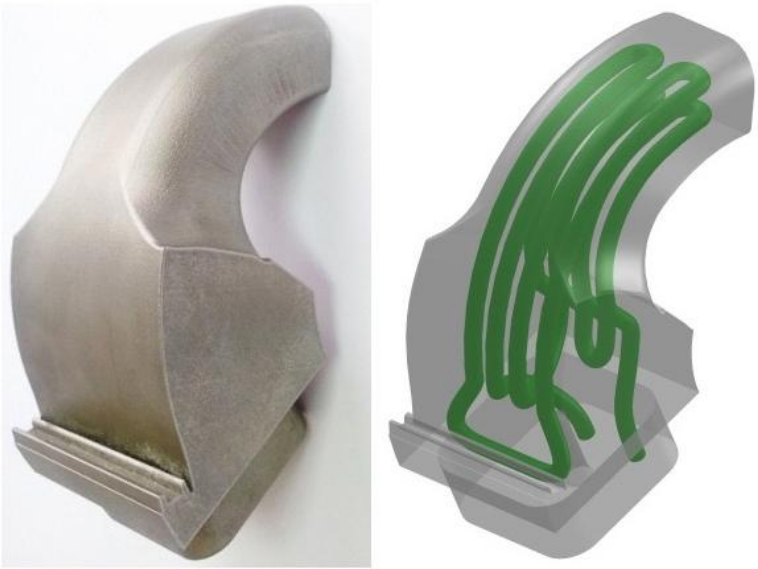


Obr. 13: GWK Integrat 4D [7]

c) Metoda aditivní technologie výroby

Tato moderní technologie výroby umožňuje vytvářet i takové vnitřní dutiny, které jsou běžnými technologiemi nevyrobitelné. Tato metoda se v poslední době rozšířila a je v praxi relativně často využívána právě pro výrobu částí vstřikovacích forem s potřebou vnitřního chlazení.

Na rozdíl od běžných metod používaných k výrobě částí forem, používá aditivní technologie princip přidávání materiálu. Materiál je přidáván do požadovaného tvaru, dokud nevytvoří celou součást. Samotný tento princip umožňuje zhotovení vnitřních tvarových kanálků téměř jakéhokoliv tvaru a v jakémkoliv směru. Samozřejmě i tato metoda má svá omezení, ale i přes to se jedná o významnou možnost výroby součástí.



Obr. 14: Část formy vyrobena aditivní technologií [8]

V oblasti temperačních systémů forem je proto touto metodou možné docílit vysoce optimální temperace. Snížení výrobního času výstřiku, které je díky této technologii docíleno, vynahradí i relativně velikou finanční náročnost této technologie. Systém kanálků vytvořených touto technologií je nazýván konformní chlazení. Kanálek lze vést velice přesně kolem tvarové dutiny a je tím docíleno maximálně rovnoměrné temperace.

2.5 Aditivní výroba

2.5.1 Popis metody [9], [10]

Název této technologie výroby vychází z principu výroby součástí přidáváním materiálu. Jedná se relativně novou metodu výroby součástek, jinak také nazývanou jako Rapid Prototyping (rychlé prototypování) či 3D tisk. Jak již bylo zmíněno výše, metoda namísto principu odebírání materiálu z polotovaru používá princip přidávání materiálu do požadovaného tvaru ve velmi malých vrstvách. Díky tomu umožňuje výrobu tvarově složitých součástek, které by běžnými metodami byly nevyrobitelné nebo vyrobitelné s mnohonásobně vyššími náklady.

V současnosti obliba této metody výroby velice roste a dochází k jejímu intenzivnímu vývoji. V praxi se 3D tisk často používá k výrobě prototypů nebo pro kusovou výrobu tvarově složitých součástí. Jeho výhody využívá velké množství oborů jako strojírenství, stavebnictví, zdravotnictví nebo i umělecké odvětví.

Touto metodou lze vyrábět součásti s tvarovými vnitřními dutinami, odlehčené duté výrobky nebo odlehčené struktury. Tyto struktury vynikají dodržením pevnosti při snížení hmotnosti oproti plné struktuře.

Technologie jako taková má své klady a zápory.

Klady

- Výroba tvarově složitých součástí
- Rychlá příprava výroby
- Vysoký stupeň automatizace procesu
- Nenáročnost obsluhy
- Nízká cena při určitém typu použití
- Možnost odlehčení a dutých struktur

Zápory

- Použitelnost pouze některých materiálů
- Omezená velikost výrobku
- Rychlost výroby
- Schodišťový efekt
- Různá mezení dle principu technologie

Existuje několik typů 3D tisku. Každý z nich má jiné použití a používá jiné materiály a princip přidávání materiálu.

Obecně lze metody rozdělit dle používaného materiálu, nebo jeho vstupní formy.

Materiál může být:

- Termoplast
- kov
- keramika
- kompozit
- fotopolymer

Vstupní materiál může mít formu:

- Prášek
- Kapalina
- Drát/struna

Aditivní výrobu v základu rozděluje norma ISO/ASTM 52900:2015, a to dle základního principu přidávání materiálu, který je v metodě použit. Norma určuje principy aditivní výroby do 7 tříd.

a) Material Extrusion (vytlačování materiálu)

Materiál je přiváděn vytlačovacím zařízením skrze trysku do požadovaných míst pracovního prostoru ve vrstvách. Příkladem je metoda FDM

b) Material Jetting (tryskání materiálu)

Materiál je tryskán ve formě kapiček do pracovního prostoru pouze do potřebných míst ve vrstvách. Tento princip využívají metody MJM a BPM.

c) Binder Jetting (tryskání pojiva)

Materiál ve formě prášku je předem nanesen na pracovní prostor a o tvarové vytvrzení se stará nanesení pojiva pouze do požadovaných míst. Příkladem je metoda DSPC

d) Sheet Lamination (laminace plátů)

Jednotlivé vrstvy jsou Vyřezány z plátů materiálu a vrstveny na sebe. Tento princip využívá metoda LOM

e) Photo-Polymerization (fotopolymerace)

Využívá se fotocitlivý tekutý materiál, který při působění UV záření tuhne. Příkladem je metoda SGC.

f) Powder Bed Fusion (spékání práškové vrstvy)

Dochází ke spékání Materiálu ve formě prášku. Materiál je nanesen na pracovní desku ve vrstvě rozprostřené přes celý pracovní prostor. Tento princip využívá metoda SLS

g) Direct Energy Deposition (přímé Energetické nanášení)

Materiál ve formě prášku je nanášen tryskou pouze do potřebných míst pracovního prostoru a během pohybu k povrchu je natavován usměrněnou energií. Příkladem je metoda LENS.

2.5.2 Základní metody aditivní technologie výroby [9], [10], [11], [12], [13], [14]

a) SLA (Stereolitografie)

Tato metoda používá princip vytvrzování tekuté polymerové pryskyřice laserem. Tato metoda byla vynalezena již roku 1987. Pryskyřice se nachází v nádobě a hladinu osvětluje laser. Ten je na hladinu zaměřován pomocí optického systému. V nádobě pro pryskyřici pod laserem se nachází podložka. Ta slouží jako základna pro modelování součásti. Při vytvrzování první vrstvy je tato podložka těsně pod hladinou pryskyřice. Vlivem osvětlení laserem dochází k vytvrzení pryskyřice. Po vytvrzení vrstvy sjede podložka o výšku vrstvy níže a proces se opakuje. Takto je po vrstvách postupně vytvrzen celý tvar součásti. Mezi jednotlivými vrstvami dochází k urovnání hladiny přejezdem stíracího pravítka. Tato technologie je vhodná pouze pro výrobu plastových součástí. Jednou z nevýhod je, že je zde nutná manipulace s chemikáliemi. Výrobky se vyznačují relativně velikou finální přesností, ale kvůli použitému materiálu jsou málo tepelně a mechanicky odolné. Proto jsou v praxi takto zhotovené součásti používány jako modely pro výrobu silikonových forem, pomocích kterých se pak vyrábějí zkušební vzorky z požadovaného polymerového materiálu pro mechanické zkoušky.

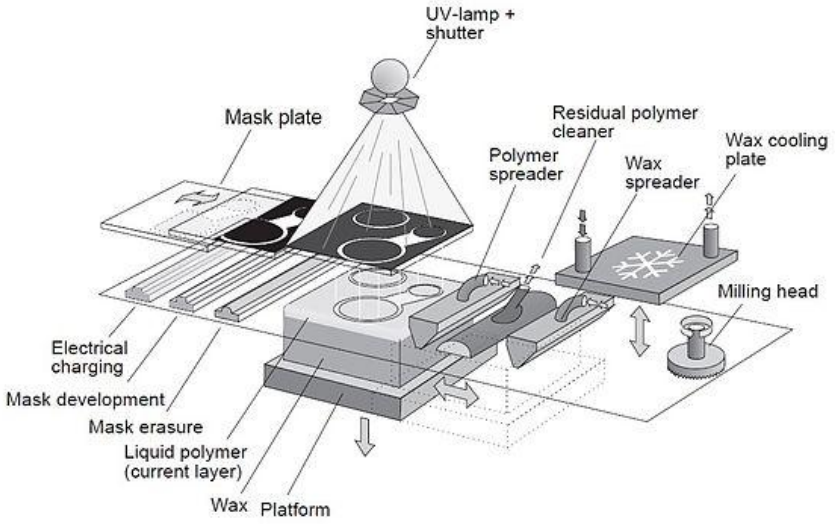
b) LOM (Laminated Object Manufacture -Výroba pomocí lepivých vrstev)

Princip této metody je založen na vrstvení vyříznutého nebo vypáleného tvaru z lepivé fólie či papíru se zpevňující látkou. Každá vrstva je vyříznuta do daného tvaru laserem. Po vyříznutí jedné vrstvy je podložka s touto vyříznutou vrstvou posunuta o tloušťku fólie níž a je na ní nanesena další vrstva fólie. Vrstvy jsou na sebe nalepovány, dokud nevznikne celá součást. Nevýhodou této technologie je vznik velkého množství odpadu z nepoužitého materiálu. Technologie je vhodná pro výrobu součástí o velkých rozměrech. Přesnost je omezena tloušťkou používaného materiálu.

c) SGC (Solid Ground Curing – Vytvrzování fotocitlivého tekutého polymeru)

Tato metoda funguje na podobném principu jako SLA, materiál je však citlivý na UV záření. Vrstva je tedy ozářena UV světlem a dojde k jejímu vytvrzení. Zatímco u metody SLA je

polymer vytvrzován bod po bodu, u SGC dochází k osvícení celé jedné vrstvy najednou. Pro každou vrstvu je nejdříve vytvořen negativ ve tvaru dané vrstvy. Přes něj je hladina polymeru osvícena a dojde k jejímu vytvrzení v celém tvaru plochy. Nevytvrzený materiál je odsát a volný prostor na pracovní ploše je vyplněn voskem, který zároveň slouží jako podpůrný materiál. Pomocí frézy je odstraněn přebytečný materiál a srovnána horní plocha. Během frézování jsou vznikající třísky odsávány. Po srovnání je nanesena nová vrstva fotopolymeru a proces se opakuje, dokud není součást hotova. Po dokončení je vosk odstraněn pomocí kyseliny. Výhodou této metody je poměrně vysoká produktivita.



Obr. 15: Popis metody SGC [10]

d) FDM (Fusion Deposition Modeling - depozice roztaveného materiálu)

Metoda používá princip tavení materiálu ve formě drátu (struny). Na podložku je nanášena tenká vrstva roztaveného termoplastu pomocí tepelné trysky tzv. extruderu. Materiál je nanášen v jednotlivých pruzích kopírujících tvar vrstvy. Po dokončení vrstvy se podložka nebo tisková hlava posune o výšku vrstvy a cyklus se opakuje. Profesionální tiskárny umožňují tisk z více materiálů zároveň. Pro tuto funkci má tiskárna dvě nebo více extruderů a každý z nich nanáší jeden typ materiálu. Může tak být kombinováno více barev, různých materiálů nebo je druhý materiál používán pro vytvoření podpor. Jeho vlastnosti jsou od hlavního materiálu pro součást odlišné, aby mohly být podpory jednoduše odstraněny. Materiály používané pro tuto technologii jsou z nevětší části termoplasty typu ABS, PET, POM nebo nylon. Výrobky mají dobré mechanické vlastnosti, které mohou být prototypově testovány a zkoušeny před zahájením sériové výroby. Výhodou technologie je poměrně vysoká přesnost (přibližně 0,05mm) a výsledný objekt ve většině případů není nutné dále dokončovat.

Obr. 16: FDM 3D tiskárna [11]

d) SLS (Selective Laser Sintering - Spékání prášku laserem)

Materiál ve formě prášku je v tenké vrstvě nanesen na podložku pomocí nanášecího pravítka. Pomocí laserového paprsku je prášek spékán a dochází tak ke spojení jednotlivých zrn. Laser je pomocí optického systému zaměřován bod po bodu do tvaru dané vrstvy. Po dokončení vrstvy se podložka posune níže a je nanesena nová vrstva prášku. Proces se opakuje do dokončení součásti. Nespečený prášek slouží zároveň jako podpora, ale u převislých konců výrobku je vhodné přimodelovat podpůrné struktury které objekt podepírají pevněji a slouží k jeho přidržení při přejezdu nanášecího pravítka. Výhodou technologie je vysoká přesnost (až 0,02 mm) a množství použitelných materiálů. SLS se dále dělí dle používaného materiálu, protože pro různé materiály je nutné použití jiných podmínek. SLS dovoluje použití kovů, termoplastů, slévárenského písku k přímému vytvoření formy, keramiky nebo kompozitů.

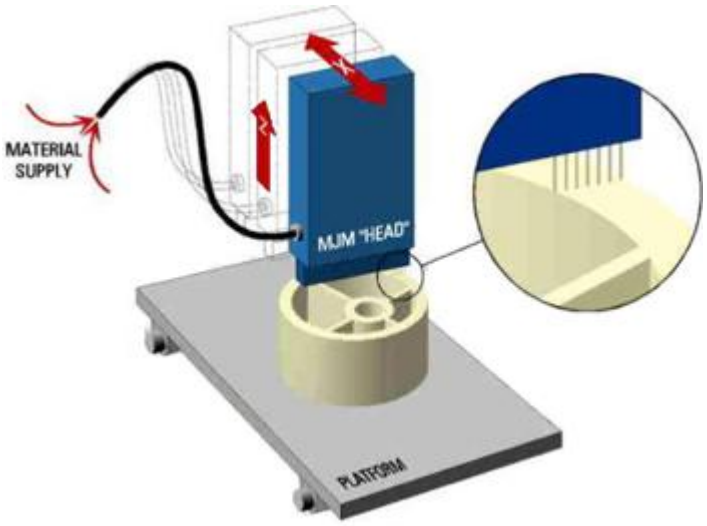
Obr. 17: Výrobek vyrobený metodou SLS [12]

f) BPM (Ballistic Particle Manufacturing – Nástřik kapek roztaveného termoplastu)

Metoda funguje tak, že je jednou tiskovou hlavou postupně nanášena vrstva roztaveného termoplastu ve formě malých kapiček. Kapičky jsou nanášeny do tvaru dané vrstvy. Výhodou metody je použití tiskové hlavy s 5 stupni volnosti. To umožňuje natočení tiskové hlavy vždy kolmo na nanášenou plochu. Díky tomu není nutné používat podpůrné struktury.

f) MJM (Multi JET Modeling – Modelování pomocí více trysek)

Metoda využívá speciální tiskovou hlavu s 96 tryskami uspořádanými v jedné řadě. Pro každou trysku je samostatně řízeno množství materiálu. Pomocí trysek je na tiskovou podložku nanášena vrstva roztaveného termoplastu. Pro možnost výroby součásti větší než je šířka tiskové hlavy, se může hlava posouvat do boku a tím nanést vrstvu v jedné výšce vedle vrstvy nanesené před ní.



Obr. 18: Metoda MJM [13]

h) DSPC (Direct shellt production casting – přímá výroba skořepin)

Metoda používající jako materiál keramický prášek a tekuté pojivo. Prášek je nanášen ve vrstvách podobně jako při metodě SLS. Tekuté pojivo je však následně přiváděno pomocí tryskové hlavy a pomocí laseru je pojivo s keramickým práškem spékáno.

Je mnoho dalších metod a v současné době je jich ještě mnoho vyvíjeno díky vysoké poptávce po výrobě aditivní technologií. Obecně lze říci, že výše jmenované technologie jsou základními pro dělení hlavních principů používaných pro 3D tisk. Další metody jsou jejich deriváty nebo fungují na stejných principech s jinými podmínkami, popřípadě na jejich názvy mají registrované ochranné známky různí výrobci.

2.5.3 Metody aditivní výroby kovů [14], [15], [16], [17]

Pro funkční využití v praxi je často požadováno vyrobit součást z kovových materiálů. Předchozí metody slouží většinou pouze pro prototypování z různých druhů plastů či

pryskyřic. Metody používané k tisku součástí z kovových materiálů jsou těm pro plasty principiálně podobné, ale přesto jsou svým způsobem jiné. Pro použití aditivní technologie v případě řešení této diplomové práce, je třeba právě využití metody schopné zhotovit součást z vhodného kovového materiálu.

Pro použití při výrobě částí vstřikovacích forem je nutné zvolit právě technologii schopnou vyrábět součásti z kovových materiálů s požadovanými vlastnostmi.

a) DLF - Direct Laser Forming- (Přímé formování laserem)

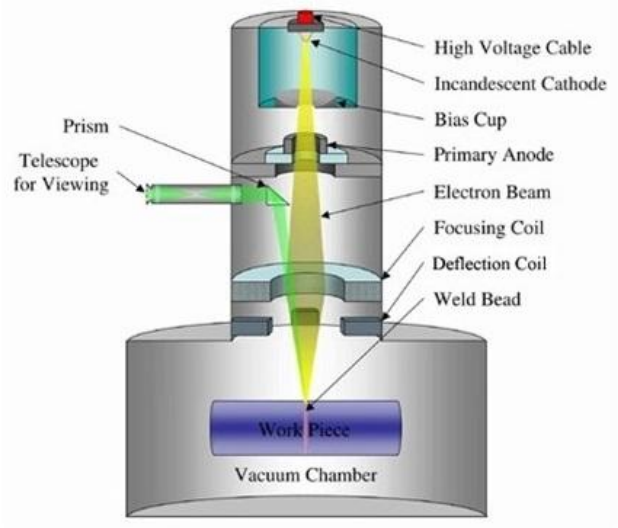
Tato metoda umožňuje výrobu součástí z kovových prášků. Prášek je tryskou přiváděn do laserového paprsku, kterým je nataven a spékán. Tímto se liší oproti metodě SLS. Laser opět spéká materiál v jedné vrstvě bod po bodu. Po dokončení celé vrstvy se tisková podložka posune o výšku vrstvy. Celý cyklus se opakuje, dokud není součást dokončena.

b) ProMetal 3D Printing (3D tisk kovů od firmy ProMetal)

Metoda aditivní technologie výroby používající kov, keramiku, cermety, slinuté karbidy nebo kompozity ve formě ultrajemného prášku. Prášek má velikost zrna maximálně 10 μm. Prášek je na tiskovou platformu nanášen pomocí Ink-Jet tiskových hlav s vysokým rozlišením. Proces má tři fáze. V první fázi je ve vrstvách nanesen prášek s pojivem do požadovaného tvaru pomocí tiskové hlavy. V druhé fázi dochází pomocí tepla k vytvrzení prášku s pojivem. Odtavením pojiva vzniká pevná, ale křehká porézní struktura v požadovaném tvaru. Zbytkový nevytvrzený prášek je odstraněn a výrobek je vložen do nádoby pro napouštění kovů. Ve třetí fázi je výrobek v nádobě spolu s materiálem, kterým má být napuštěn. Tento materiál je ve formě prášku. K výrobku je předem přitištěna soustava kanálů plnící funkci vtokové soustavy. Kovový prášek pro plnění je nasypán do místa ústí této vtokové soustavy. Celá sestava je pak v nádobě dosypána práškem oxidu hliníku. Nádoba tak vytvoří jakousi formu a je vložena do pece, kde je ohřívána na teplotu tavení kovu pro vyplnění struktury. Dojde k roztavení tohoto kovu a jeho natečení do porézní vytisknuté struktury. Po vyndání z pece je z výrobku odlámána vtoková soustava a výrobek je hotov. Výhodou této metody je vysoká produktivita tisku. První fáze této metody (nanášení vrstev) je oproti jiným metodám velice produktivní a lze vytvářet objemné výrobky. Tato metoda si získala velikou oblibu při výrobě částí vstřikovacích forem nebo kovacích zápustek pro kování hliníkových výrobků. K těmto aplikacím jsou používány prášky pro základní strukturu z austenitické nebo martenzitické nerezové oceli. K naplnění je nejčastěji používán bronz. Součásti vyráběné touto metodou dosahují přesnosti ±0,13 mm.

c) EBM (Electron Beam Melting- Tavení pomocí elektronového paprsku)

EBM je principem velice podobná metodě SLS. Místo laseru používá ke spékání prášku usměrněný elektronový paprsek. Celý proces probíhá ve vakuu, což velice komplikuje konstrukci pracovního stroje a zvyšuje jeho cenu. Pracovní teplota je okolo 1000°C a nejčastěji využívanými materiály pro tuto metodu jsou titan a Inconel. Oproti technologii využívající laser je EBM produktivnější a je schopna zaručit stejné vlastnosti výrobku jako při použití konvenčních metod výroby.



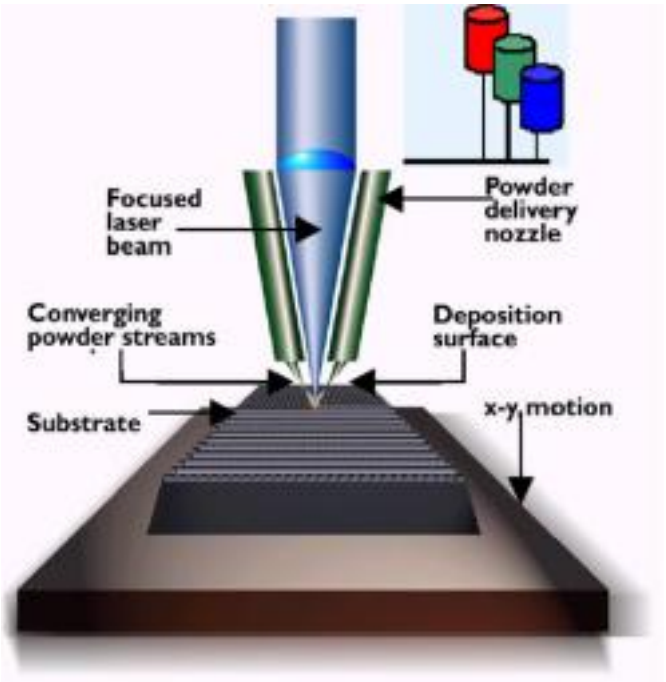
Obr. 19: Popis metody EBM [16]

d) MJS (Multiphase Jet Solidification – Multifázová trysková solidifikace)

Metoda používající jako vstupní materiál kovový nebo keramický prášek s vhodným pojivem. Na rozdíl od ostatních metod používající materiál v této formě, zde není prášek nanášen na pracovní desku a až následně zpracováván. U MJS je materiál roztaven do kapalného stavu ve speciální nádobě mimo pracovní prostor. Odtud je pomocí pístového mechanismu dopraven do nanášecí trysky. Principem výroby je MJS velice podobná metodě FDM. Roztavený materiál je tryskou nanášen v tenkých pruzích na pracovní desku, kde ihned tuhne. Nanášením materiálu vrstvu po vrstvě je zhotovena celá součást. Jako materiál je možné použít ušlechtilé oceli, slitiny hliníku, slitiny titanu a další materiály.

d) LENS (Laser Engeneered Net Shaping – Síťování pomocí laseru)

Metoda aditivní výroby používající materiál ve formě prášku a laser pro jeho spékání. Laserový paprsek je pomocí optického systému zaměřen do požadovaného bodu a prochází přitom skrze tiskovou hlavu s několika tryskami. Do těchto trysek je pomocí nosného plynu dopravován kovový prášek a je tryskami nanášen do bodu, kam je zaměřen i laserový paprsek. Prášek je laserem natavován a spékán. Celý děj probíhá v ochranném plynu, který je dodáván další tryskou. Nespornou výhodou metody je její možné použití k opravám a úpravám již zhotovených součástí například forem, nástrojů atd. LENS tisková hlava může být dodávána jako příslušenství moderních CNC obráběcích center. V praxi je toto příslušenství používáno pro přidání části obrobku, který je na obráběcím centru vyráběn. Pro některý typ obrobků se jedná o velice ekonomicky výhodnou variantu výroby.



Obr. 20: Popis metody LENS [17]

Díky obrovskému rozvoji metod aditivní technologie výroby je v současné době mnoho dalších metod, než které zde byly jmenované. Z větší části lze jejich koncepce považovat za téměř totožné. Jejich názvy spadají pod registrační značky a patenty různých výrobců výrobních zařízení. Příkladem může být metoda pod označením LaserCUSING vyvinutá společností Concept Laser GmbH. Její konkurencí je metoda DMLS (Direct Metal Laser Sintering) od společnosti EOS.

2.6 Direct Metal Laser Sintering [18]

DMLS je metoda aditivní technologie výroby vyvinutá spoluprací německé společnosti EOS (Electro Optical Systems) a společnosti RPI (Rapid Product Innovation). Byla vynalezena v roce 1995 a pracuje na principu laserového spékání kovového prášku. V době svého vzniku byla tato metoda jako jediná schopná vyrábět kovové díly bez dalších potřebných operací. Vlastnosti konečného výrobku jsou srovnatelné s výrobky vyrobenými obráběním či odléváním, což umožňuje širokou škálu použití této metody. Možnosti použití dále rozšiřují výrobcem nabízené druhy materiálů, které jsou zároveň optimalizovány pro použití na strojích od společnosti EOS. Metoda si získala velikou oblibu pro použití při výrobě kusových prototypů, kusových a malosériových součástí složitých tvarů a také v odvětví výroby vstřikovacích forem pro zpracování plastů.

Metoda DMLS je výrobcem neustále vylepšována a dochází k intenzivnímu rozvoji v nabízených službách a příslušenství či optimalizaci procesu. V současnosti je některými uživateli používána i pro sériovou výrobu.

Jednou z výhod této technologie je možnost výroby několika různých součástí během jedné operace. Tím, že je materiál spékán bod po bodu ve vrstvách, a dráhy laserového paprsku jsou řízeny počítačem, je možné v jednom pracovním prostoru vyrábět několik typově různých součástí zároveň. Podmínkou je pouze požadavek na stejný materiál u všech součástí.

Materiál ve formě prášku umožňuje ekonomické a prostorově nenáročné skladování. I když je pro tisk potřebné větší množství materiálu, než je ve výsledku na součást spotřebováno, je možné velkou část z nespečeného prášku použít pro další výrobu. Některé zdroje uvádějí hodnotu až 98% nespečeného materiálu. Tím je dána velice ekonomická využitelnost vstupních materiálů ve srovnání například s obráběním při kusové výrobě. Při té je často polotovar volen s velkými přídavky a velká část materiálu je přetvořena na odpad.

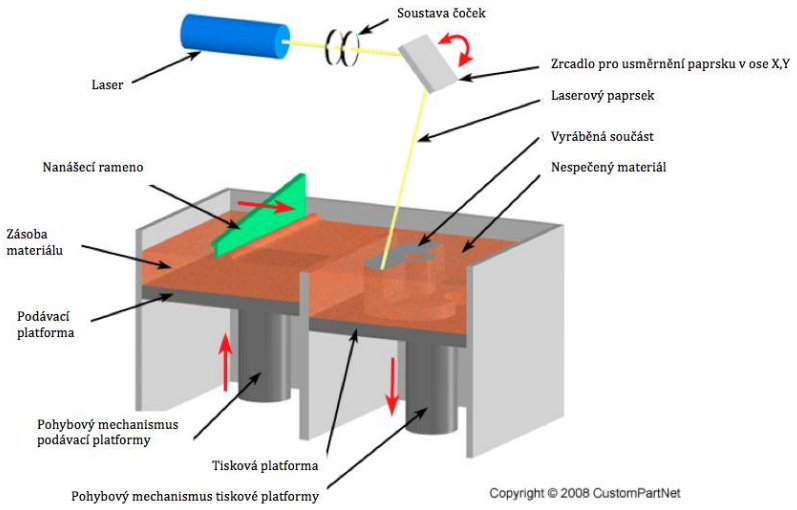
Metoda umožňuje vytvářet plné struktury, duté struktury ale i speciální odlehčené struktury, porézní struktury a struktury určené pro filtraci.

2.6.1 Popis metody DMLS [18], [19],

Princip DMLS je založen na selektivním spékání práškového materiálu usměrněným laserovým paprskem.

Před výrobním procesem je materiál nasypán do ohraničeného prostoru na podávací platformu. Musí být zajištěno, že je v zásobníku dostatek materiálu pro vytvoření celé součásti. Do tohoto materiálu je třeba započítat objem součásti ale i objem prášku, který zůstane v pracovním prostoru nespečen. Pracovní prostor je uzavřený a je naplněn ochranným plynem k zamezení vzniku oxidace během spékání. Tím je argon nebo dusík. Po spuštění je tisková platforma předehřáta na pracovní teplotu pro daný materiál. Například u nástrojové oceli MS1 je to teplota cca 40 °C. Tímto je dosaženo vhodných podmínek pro bezproblémové spékání a snížení vznikajícího pnutí.

Pro první vrstvu je tisková platforma vysunuta nahoru a pomocí nanášecího ramena je na ní nanesena první vrstva práškového materiálu. Laserový paprsek o vhodném výkonu je pomocí čoček usměrněn a pomocí naklápěcího zrcátka zaměřen do požadovaného místa na tiskové platformě. Pohyb a zaostření paprsku je řízeno počítačem. Po spečení celé vrstvy v požadovaném tvaru dochází k posunu tiskové platformy o výšku vrstvy níže. Podávací platforma se naopak posune výš a nanášecím pravítkem je nanesena nová vrstva materiálu. Tento cyklus se opakuje, dokud není zhotovena celá požadovaná součást.



Obr. 21: Popis metody DMLS [19]

2.6.2 Postup při výrobě pomocí DMLS [18]

V této kapitole bude postup konkretizován přímo pro využití DMLS výrobního zařízení od společnosti EOS.

a) Import dat

Pro vytvoření výrobních dat slouží software Magic RP. Jedná se o systémové prostředí pro úpravu a přípravu modelu součásti. Zde jsou k modelu součásti přigenerovány podpůrné struktury, nastaveno naorientování součásti během tisku a analyzována kritická místa pro tisk. Do softwarového prostředí je importován 3D CAD model vyráběné součásti. Program je schopen zpracovat různé druhy formátů a následně je převést na formát STL. Možností je i import modelu již přímo ve formátu STL. Je zvolena orientace součásti v pracovním prostoru a případně jsou generovány podpůrné struktury.

Vygenerovaná data jsou nahrána do softwaru EOSPRINT. Zde je upravený model součásti umístěn na softwarovou pracovní plochu. V tomto prostředí jsou operátorem nastaveny parametry tisku. V první řadě je nastavena výška vrstvy ke spékání. Tato hodnota je doporučena výrobcem zařízení na hodnoty od 0,02 mm do 0,05 mm. Výška vrstvy ovlivňuje přesnost výrobku, ale také čas jeho výstavby. Menší vrstva znamená vyšší přesnost a vyšší čas výstavby. Dále jsou dle zvoleného materiálu generovány pracovní podmínky stroje, jako je výkon laserového paprsku, teplota předehřevu a rychlost skenování.

U novějších typů výrobního zařízení je součástí stroje ovládací panel s již zabudovaným uživatelským rozhraním pro přípravu tisku. Do stroje se tedy jen nahraje model součásti a veškeré ostatní úpravy modelu nutné pro tisk jsou provedeny přímo u stroje.

b) Příprava výrobního zařízení

Tato fáze spočívá v doplnění materiálů potřebných k tisku. Hlavní je doplnění prášku pro spékání a kontrola jeho množství. V praxi platí zásada o potřebě třínásobného množství materiálu, než li je objem prostoru daného pracovní plochou zařízení a výškou tisknuté součásti. Tento požadavek zvyšuje potřebné náklady nutné k výrobě. Ačkoli není tento materiál zpracován, musí být držena jeho zásoba. Při ceně cca 3000 Kč/kg materiálu se jedná relativně vysokou finanční položku.

Dále je třeba zajistit, aby během výroby nedošlo k zastavení přívodu ochranného plynu, kterého je při procesu spotřebováno veliké množství.

Dalším důležitým úkonem je příprava ocelové tiskové platformy a celkové vyčištění pracovního prostoru. Ač se může zdát, že se jedná o banální záležitost, špatná příprava může negativně ovlivnit kvalitu výsledného výrobku.

c) Výroba

Proces výroby po spuštění výrobního programu je plně automatizován. K zásahu obsluhy dochází až v případě, že dojde k nějakému selhání či problému. Systém stroje na to upozorní varovným hlášením. Bohužel v případě přerušení výstavby dochází ve většině případů k nenávratnému snížení kvality výrobku nebo k jeho poškození. Pokud je vše v pořádku, pak je výrobní proces schopen pracovat bez zásahu obsluhy až do dokončení výstavby součásti. Tento proces může u rozměrnějších výrobků trvat i několik dní.

d) Vyjmutí ze stroje

Po dokončení výstavbového procesu zařízení vyčká na zchladnutí pracovního prostoru a teprve potom umožní obsluze prostor otevřít. Obsluha musí pracovní prostor očistit od nespečeného materiálu jeho odsátím zpět do zásobníku skrz filtr. Následuje vyjmutí tiskové platformy. V praxi je celý tento celek často ihned podroben tepelnému zpracování. Tímto zpracováním je konkrétně žíhání. Ve výrobku je naakumulováno obrovské množství energie způsobující samovolné deformování výrobku. Výrobky jsou tak ještě na tiskové platformě vloženy do žíhací pece a tepelně zpracovány.

e) Postprocessing

Tento výraz znamená označení pro veškeré úkony, které je na součásti nutné provést po vyjmutí z tiskárny. Patří sem například již zmiňované teplené zpracování. Výrobky jsou po tepelném zpracování z platformy odřezány či odlámány.

Podpůrné struktury jsou také odstraněny a je odstraněn prášek z vnitřních dutin. Tímto je výrobek kompletně zhotoven, nebo je připraven na další opracování či tepelné zpracování, například kalení, omílání, leštění.

2.6.3 Omezující aspekty technologie DMLS [18], [20], [21],

Jako všechny ostatní metody výroby má i popisovaná metoda svá úskalí. Při rozhodování o výrobě danou technologií je na tyto omezení nutné brát zřetel. Ve výsledku by se mohlo stát, že výrobek nebude jednoduše a ekonomicky vyrobitelný touto metodou.

a) Maximální rozměry vyráběného dílu

Tyto rozměry jsou dány velikostí pracovního prostoru použitého stroje. V současné době nabízí firma EOS několik modelových řad výrobních zařízení DMLS. Jednotlivé modelové řady mají rozdílné velikosti pracovního prostoru. Tímto řešením lze pokrýt požadavky širokého spektra zákazníků přímo konkrétním řešením. Se zvětšováním pracovního prostoru roste i celková velikost výrobního zařízení a tím i jeho pořizovací cena.

b) Použitelné materiály

Protože technologie DMLS využívá vstupní materiál ve formě prášku, bylo třeba zajistit dostupnost takovéhoto materiálu. Proto firma nabízí několik různých druhů vhodných pro použití ve firmou dodávaných výrobních zařízení. Hlavními druhy jsou různé ekvivalenty ocelových, hliníkových, materiálů nebo niklových, titanových slitin. Každý materiál má své specifické možnosti využití a také svá omezení.

Firma EOS nabízí jednotlivé materiály v podobě licencí. Licence na každý materiál obsahuje dodávky prášku s deklarovanou strukturou a podporu v oblasti parametrů tisku.

Vývoj práškových materiálů neustále probíhá. Je zlepšována rovnoměrnost velikosti zrn, jsou optimalizovány přednastavené parametry tisku, a je řešena likvidace použitého výrobního prášku. Nabídka ve formě licence zajišťuje neustálé zlepšování technologie i pro stroje zakoupené před vylepšením procesu.

Od materiálů dodávaných v tvářeném stavu se spékané práškové materiály téměř vůbec neliší. Rozdílná je mikrostruktura obou materiálů, ale pevnostní vlastnosti zůstávají téměř totožné. U

spékaných materiálů dochází k nižší pevnosti v tahu ve směru osy Z oproti směrům v ose X a Y.

c) Přesnost výroby a kvalita povrchu

Technologie DMLS umožňuje vyrábět relativně přesné výrobky. Vzhledem k použití některých výrobků je však přesnost omezena. Konkrétním případem může být právě výroba v oblasti nástrojů pro vstřikování plastů. Zde jsou u vyráběných dílů vysoké požadavky na rozměrovou přesnost a také kvalitu povrchu.

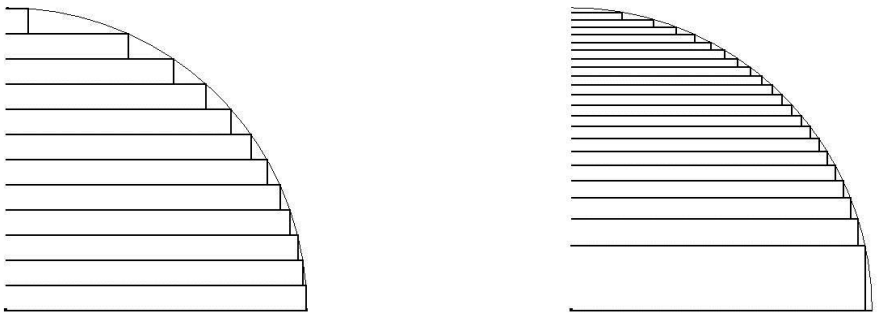
V případě technologie DMLS je přesnost omezena její základním principem. Určité omezení vzniká nastavenou výškou vrstvy čímž je omezena přesnost ve směru osy Z. Výška jedné vrstvy je v tomto případě minimálně 0,02 mm. Vlivem spékání vrstvy ale dochází k jejímu snížení a proto přesnost v tomto směru není přímo 0,02 mm Obecně lze říci, že je přesnost v ose Z totožná s přesností v osách X a Y.

Výrobce pro každý materiál udává maximální přesnost rozměru, které je možné dosáhnout. Kvůli umocňování nepřesností při výrobě větších dílů je udávaná hodnota většinou rozdělena na výrobky menších rozměrů a na výrobky větších rozměrů. Například pro nástrojovou ocel s označení MS1 je udávaná přesnost ±0,02 mm pro součásti o rozměrech menších než 80x80 mm v jedné vrstvě. U větších součástí je deklarována přesnost ±0,05 mm.

Při vyšší požadované přesnosti je nutné použít další dokončovací úpravy dílu. Může jít například o obrábění na přesné rozměry s využitím konvenčních či ostatních nekonvenčních metod, nebo dokončovací operace jako je leštění, tryskání či omílání.

V případě drsnosti povrchu je hodnota velice závislá na volbě výšky vrstvy. Nižší výška vrstvy zaručuje větší kvalitu povrchu. Zároveň ale dochází k navýšení výrobního času. Dále je důležitým parametrem orientace výrobku během výroby. Při výstavbě šikmých stěn nebo tvarových stěn ve směru osy Z dochází, díky samotnému principu metody, k tzv. schodišťovému efektu.

Tento jev je způsoben konstantní výškou nanášené vrstvy. V místech, kde je stěna oproti směru výstavby orientována šikmo nebo je plocha tvarová, dochází k přiblížení jmenovitého tvaru v dané výšce součásti vrchní plochou nanesené vrstvy. Princip schodišťového efektu je znázorněn na obrázku níže. Pro zmírnění tohoto nedostatku by bylo vhodné použití nestejnoměrné výšky vrstvy, ale díky určitým omezením v doporučené výšce vrstvy je v praxi toto nastavení této hodnoty konstantní. Tato problematika má i vliv na rozměrovou přesnost konečného výrobku.



Obr. 22: Schodišťový efekt [21]

Výrobce pro každý materiál udává také hodnoty drsnosti povrchu, kterých může být dosaženo při určitém nastavení výrobních parametrů.

V porovnání například s dokončeným obrobeným povrchem pomocí třískového obrábění a vhodného nastavení řezných podmínek je kvalita povrchu u tisknuté součásti horší. Díky tomu je často potřeba funkční části dokončovat pomocí obrábění či povrchových úprav.

d) Orientace součásti a převislé konce

Vhodnou orientací součásti může dojít k významnému snížení výrobního času a také ke zvýšení kvality zhotoveného výrobku.

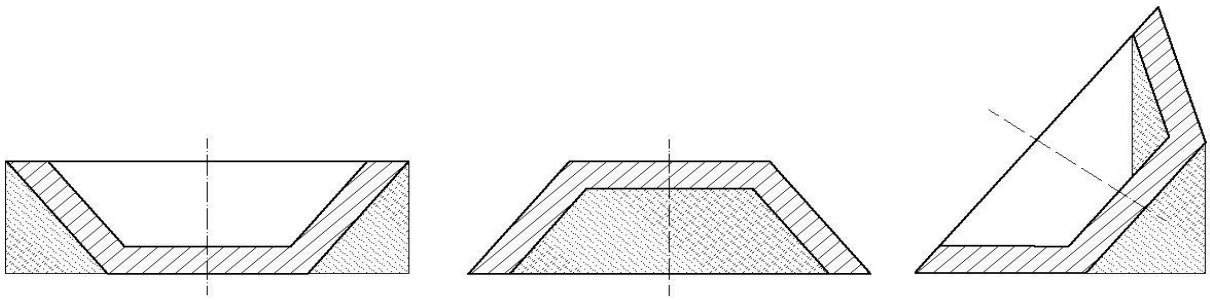
Při výstavbě a nanášení nové vrstvy je třeba, aby nová vrstva byla nanášena na vrstvu předchozí. Nesmí tedy dojít k situaci, kdy je materiál nanášen do prázdného prostoru. Nově nanesený materiál musí mít oporu, ke které se spékáním přichytí. V opačném případě dojde k jeho samovolnému pohybu mimo požadovaná místa. Tento problém platí obecně pro všechny druhy aditivní technologie výroby.

U technologií využívající princip nanášení práškové vrstvy a její spékání laserem by se mohlo zdát, že je tento problém vyřešen samotným principem výstavby. Podporu pro nově nanesenou a spékanou oblast by měl představovat nespečený prášek z předešle nanesených vrstev. V praxi se ale i tento princip potýká s problémy.

Základním problémem je vnitřní pnutí uvnitř spečené vrstvy a nanášení nové vrstvy pravítkem. Oddělená část spečeného materiálu je namáhána vnitřním pnutím a dochází k mírnému zkroucení. Tím může tato část vyčnívat do vyšší vrstvy. Při přejezdu pravítka může dojít ke kontaktu pravítka s touto částí a tím k posunutí volné části mimo její správnou polohu. Nespečený materiál sice část podepírá, ale není schopen zabránit jejímu pohybu. Tímto dojde k zničení výrobku. Tisk bude probíhat dál ale součást je v tu chvíli již nenávratně poškozena.

Dalším důvodem orientování součásti pro tisk je snaha o snížení příčin vnitřního pnutí. Jak již bylo psáno, pnutí je závislé na množství přivedeného tepla od laseru a na množství odvedeného tepla do podložky a okolí. Proto je vhodné spékat v jedné vrstvě co nejmenší souvislou plochu. Z tohoto důvodu je metoda DMLS vhodnější pro tenkostěnné a strukturované výrobky oproti plným výrobkům. Vhodnou orientací některých typů výrobku tak lze docílit, že je plocha v jedné spékané vrstvě menší, než při jiné orientaci.

Na obrázku níže je možné vidět různé návrhy orientace součásti při tisku. Každá z nich vyžaduje použití podpůrných materiálů v jiných místech a zároveň bude u každé z nich v jedné vrstvě spékána jinak veliká souvislá plocha.

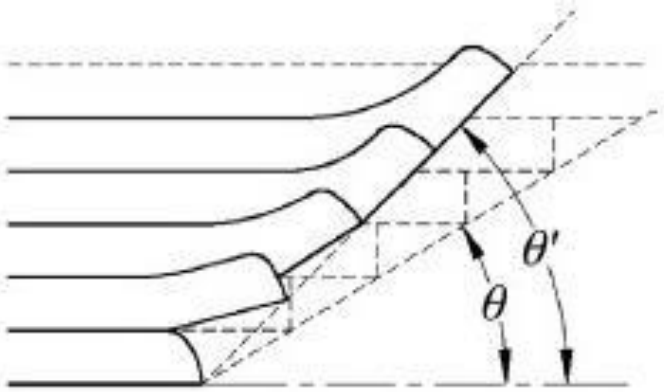


Obr. 23: Orientace součásti [21]

Další problémový aspekt této technologie, související s orientací, je výroba ploch šikmých vůči ose Z nebo s převislými částmi na výrobku. Problém těchto částí je opět způsoben vznikajícím pnutím ve vrstvách. Při stavbě součásti, která se rozšiřuje při zvětšující se výšce, dochází k podobnému jevu, jako je schodišťový efekt. V tomto případě je ale v nově nanesené vrstvě rozměr spékané plochy větší než u předchozí vrstvy. Vlivem toho je malá část nové vrstvy mírně převislá. Velikost převisu je závislá na úhlu, který šikmá stěna svírá s osou Z.

V této oblasti dochází vlivem vnitřního pnutí k deformaci převislé části a k jejímu mírnému přihýbání směrem do další nanášené vrstvy. Postupným nanášením a opakováním se tohoto jevu dochází k umocnění této deformace. Na výrobku se pak v této části nacházejí prasklinky a povrchové vady. Dalším následkem je opět kolize nanášecího pravítka s deformovanou vrstvou a rozkmitání pravítka. Tím dojde k nerovnoměrnému nanesení materiálu a dochází k vadě výrobku.

Kritickou hodnotou úhlu svíraného šikmou plochou s tiskovou platformou je velikost úhlu 35° až 40°. Při úhlu větším než 40° nedochází k výrazným vadám na výrobku. Při úhlu nižším než 35° dochází k výrazným vadám jakosti povrchu a kvality výrobku. Vhodnou orientací součásti lze docílit úhlu stěn při stavbě většího než je kritických 40 °.



Obr. 24: Deformace při výstavbě převyslých konců [23]

Dalším důvodem orientování součásti je nanášení nového materiálu nanášecím pravítkem. Pravítko by mělo najíždět do obrysu součásti v co nejmenší kontaktní ploše najednou. Proto se při tisku více součástí, rozestavují součásti postupně ve směru nanášení. Rovné plochy by neměly být kolmé na směr posuvu pravítka. Proto výrobce doporučuje natočení rovné plochy o úhel minimálně 5° vůči směru posuvu pravítka.

U součástí obdélníkového průřezu, kdy je jedna strana delší než druhá, by měla být součást orientována delší stranou podél směru pohybu pravítka. Je to kvůli možnému přihýbání součásti orientovaném opačným způsobem.

e) podpůrné struktury

Velkou část dříve jmenovaných problémů vznikajících při výrobě pomocí DMLS lze odstranit použitím podpůrných struktur. Tyto struktury jsou při přípravách výroby přimodelovány k modelu vyráběné součásti. Jejich hlavním úkolem je zajištění správné polohy kritických míst výrobku během procesu výroby.

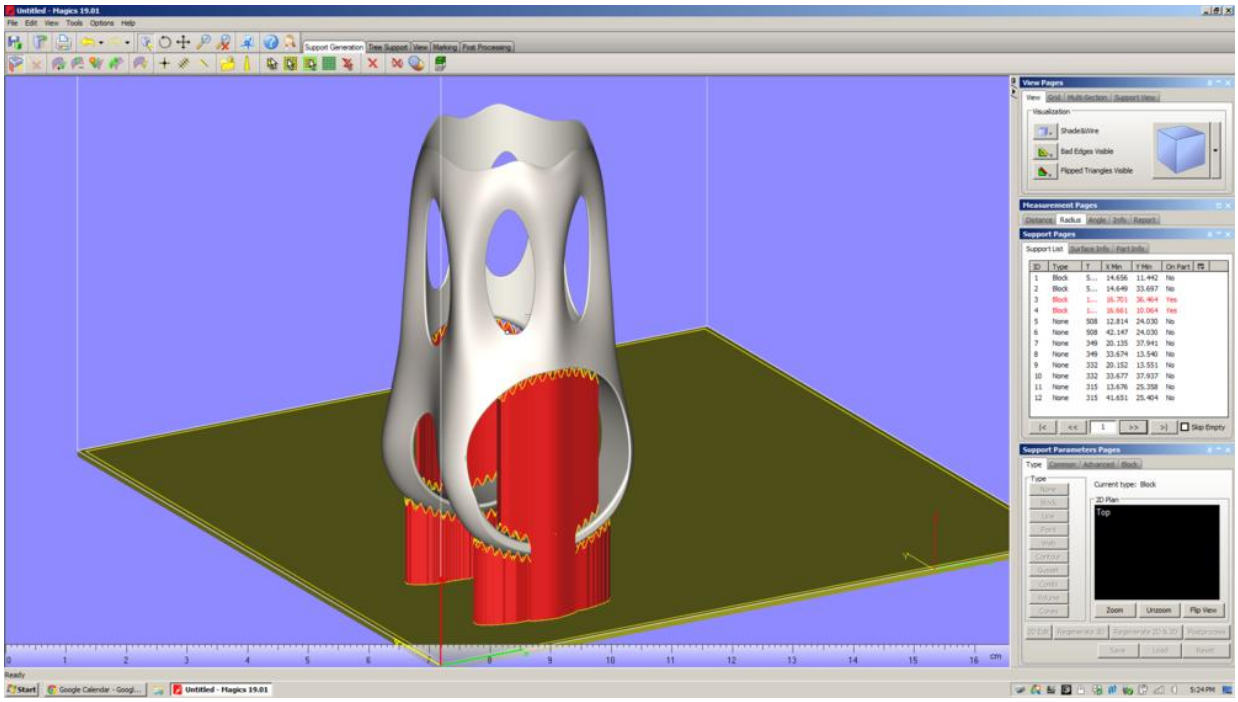
Podpůrné struktury jsou tvořeny spečeným materiálem do speciálních tvarů. Tyto tvary umožňují vysokou rychlost výstavby samotných struktur a jednoduchou oddělitelnost podpor od výrobku. Další výhodou jejich použití je, že je pomocí těchto struktur odváděno teplo ze spékané vrstvy do tiskové platformy.

Podpory je vhodné použít v případě převislých konců, mostů, nebo v případě šikmých ploch pod úhlem menším než 40°.

Podpůrné struktury jsou také často používány jako kontaktní plocha mezi tiskovou platformou a tisknutým výrobkem. To ulehčuje snadnější odstranění výrobku z platformy.

Existuje několik druhů podpůrných struktur. Ty se mohou lišit například velikostí kontaktní plochy s výrobkem nebo svou stavební strukturou.

Nevýhodou jejich použití je navýšení výrobního času, zvýšení množství použitého materiálu a nutnost zařazení další operace pro odstranění podpor a očištění jejich zbytků. Proto je výhodnější se jejich použití vyhnout.



Obr. 25: Generace podpůrných struktur [24]

e) Maximální velikost zaoblení vnitřního otvoru

Znalost této hodnoty je potřebná pro konstrukci vnitřních dutin, otvorů a kanálků, kdy je nutné, aby výroba proběhla bez nutnosti použití podpůrných struktur v těchto místech. Z vnitřních prostor by tyto struktury nebylo možné vyjmout. Pro metodu výroby DMLS je kritickou hodnotou poloměr zaoblení vnitřní dutiny 4 mm. Při použití většího poloměru bez využití podpor, dochází ve vrchní části k defektům a propadu materiálu. I v případě vodorovných obdélníkových otvorů lze překonstruováním rovné vrchní plochy na oblouk s poloměrem zaoblením maximálně udávané 4 mm vyrobit bez nutnosti podpor. Lze tedy vyrábět například vnitřní válcové kanálky o průměru až 8 mm.

Podmínkou je, aby uzavírací profil ve svislém směru vždy tvořil oblouk těchto nebo menších rozměrů.

2.7 Analýza výrobních možností

2.7.1 Výroba aditivní technologií [20], [25], [26], [27], [28]

Od počátku bylo plánováno s využitím aditivní technologie výroby a metody DMLS. Výrobním zařízením využívající tuto technologii disponuje Laboratoř experimentálního obrábění na Regionálním technologickém institutu v Plzni. Vzhledem k návaznosti na Západočeskou univerzitu v Plzni bylo počítáno s využitím přímo tohoto zařízení a zkušeností pracovníků laboratoře.

a) Výrobní zařízení

Jediný dostupný stroj je výrobní zařízení s označením EOS M290.

Tabulka níže udává základní parametry tohoto výrobního stroje

Parametr	Hodnota
Velikost pracovního prostoru XYZ	250 x 250 x 325 mm
Typ a výkon laseru	Vláknový laser, 400 W
Maximální rychlost skenování	7 m/s
Používané plyny	Argon, Dusík
Spotřeba energie	Maximálně 8,5 kW
Průměr zaostřeného paprsku	0,01 mm
Zástavbové požadavky	4,8 x 3,6 x 2,9 m
Hmotnost zařízení	1250 kg

Tab. 3: Parametry výrobního stroje EOS M290 [25]

Obr. 26: EOS M290[25]

b) Dostupné materiály pro tisk

Laboratoř experimentálního obrábění disponuje možností tisknout součásti ze tří různých materiálů. Jsou jimi Inconel 718, Nástrojová ocel MS1 a nerezová ocel 316 L.

Tabulka níže uvádí soupis některých charakteristických hodnot pro tyto materiály

	Nástrojová ocel MS1	**Inconel 718**	**Nerezová ocel 316 L**
Mez pevnosti	1100 (1900) MPa	1060 MPa	640 MPa
Mez kluzu	930 MPa	780 MPa	530 Mpa
Tvrdost povrchu	36 (54) HRC	47 HRC	89 HRB
Modul pružnosti	150 GPa	160 GPa	180 GPa
Rychlost výstavby pro výšku vrstvy 0,04 mm	4,2 mm^3/s	4 mm^3/s	2 mm^3/s
Minimální tloušťka stěny	0,3-0,4 mm	0,3-0,4 mm	0,3-0,4 mm
Použití	formy, nástroje, namáhané strojní součásti	letecký průmysl, komponenty turbín, díly namáhané při zvýšených teplotách	Medicína, potravinářství, automobilový průmysl

Tab. 4: Dostupné materiály pro výrobu [20], [26], [27], [28]

2.7.2 Obrábění

Protože firma KOSTAL Kontakt Systeme Čenkov nedisponuje vlastní nástrojárnou a obráběcími stroji s CNC řízením, bude pro zadané součásti nutné výrobu kooperovat do externích nástrojáren. Jemné úpravy a dokončení povrchů bude možné provést v oddělení údržby forem.

3 Návrh vlastního řešení [25]

Pro praktickou část diplomové práce byla navrhnuta a vyrobena upravená verze vybrané části formy. Tato kapitola popisuje analýzu vstupních informací pro konkrétní případ, vlastní konstrukční návrh a realizaci výroby. Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, jedná se o úpravu části formy vyrábějící plastový díl. Během vypracovávání práce bylo rozhodnuto o změně výrobku a formy vybrané k optimalizaci. Proto tato kapitola popisuje jak konstrukční návrh upravené části formy vybrané původně (Forma č. 1), tak i návrh a realizaci úpravy formy vybrané později (Forma č. 2).

Z dostupných materiálů, popisovaných v předchozí kapitole, byla vybrána nástrojová ocel s označením MS1. Důvodem bylo použití vyráběné součásti a vhodnost materiálu pro toto použití. Jedná se o nástrojovou ocel, která je svým chemickým složením srovnatelná s ocelí 1.2709 dle značení ISO.

Tabulky níže udávají podrobnější informace o materiálu.

Složení	obsah
Ni	17 - 19 %
Co	8,5 - 9,5 %
Mo	4,5 – 5,2 %
Ti	0,6 - 0,8 %
Al	0,05 – 0,15 %
Cr,Cu	Max 0,5 %
C	Max 0,03 %
Mn, Si	Max 0,1 %
P, S	Max 0,01 %

Tab. 5: Chemické složení materiálu MS1 [26]

Charakteristika	Hodnota
Hustota	8,0 – 8,1 g/cm^3
Mez pevnosti v tahu v horizontálním směru (Po zušlechtění)	1200 ± 100 MPa (1950 ± 100 MPa)
Mez pevnosti v tahu ve vertikálním směru (Po zušlechtění)	1100 ± 100 MPa (1900 ± 100 MPa)
Mez kluzu (Rp 0,2) v horizontálním směru (Po zušlechtění)	1100 ± 100 MPa (1900 ± 100 MPa)
Mez kluzu (Rp 0,2) ve vertikálním směru (Po zušlechtění)	930 ± 150 MPa (1825 ± 100 MPa)
Prodloužení v horizontálním směru	12 ± 4 %
Modul pružnosti v horizontálním směru	150 ± 25 GPa
Modul pružnosti ve vertikálním směru	140 ± 25 GPa
Tvrdost	33 - 37 HRC
Tvrdost po zušlechtění	50 - 55 HRC

Tepelná vodivost	15 W/(m×K)
Tepelná vodivost po zušlechtění	20 W/(m×K)
Maximální pracovní teplota	400 °C
Dosažitelná přesnost pro velikost do 80 x 80 mm	± 20 µm
Dosažitelná přesnost pro velikost pro velké výrobky	± 50 µm
Drsnost povrchu při výšce vrstvy 0,04 mm	Ra 5 µm, Rz 28 µm
Drsnost povrchu při výšce vrstvy 0,05 mm	Ra 9 µm, Rz 50 µm

Tab. 6: Vlastnosti materiálu MS1 [26]

3.1 Forma č. 1

Jedná se o vstřikovací formu pro výrobu těla automobilového konektoru. Popis vyráběné součásti je uveden v kapitole 2.1. Vstřikovací forma se skládá ze základních částí jako jsou desky, vodící sloupky, vtoková soustava, vyhazovací soustava, šíbry a normálie. Nejdůležitějšími částmi jsou však části vytvářející tvarovou dutinu, která udává tvar a podobu finálního výstřiku. V tomto případě je tato dutina tvořena vložkami s tvarovou dutinou, hlavním tvarovým jádrem a množstvím malých tvarových jader. Tvar konektoru je ve formě umístěn tak, že hlavní dutina je rovnoběžná se směrem otevírání formy. Po otevření formy zůstává vystříknutý díl nasazen na jádře a pomocí vyhazovačů je následně vyhozen z formy. K dispozici byli modely části vstřikovací formy. Ačkoliv nebyla CAD data kompletní, hlavní části formy pro optimalizaci, vypracované v CAD, k dispozici byly.

3.1.1 Omezující podmínky

Samotné konstrukční řešení úpravy formy musí brát zřetel na původní stav. Musí být koncipováno tak, aby byla nutná úprava co nejmenšího počtu částí. Celá optimalizace musí být provedena s co nejmenšími náklady na změny a musí umožňovat návrat sestavy formy do původního stavu.

Je třeba počítat s určitou ekonomickou náročností v případě realizace. Výběr zvoleného tvarového jádra sebou nese několik omezujících faktorů pro samotnou konstrukci nového jádra. Jedním z těchto omezení je to, že v originální koncepci formy není myšleno na chlazení tohoto jádra. Proto se v místech, kde se jádro nachází, nevyskytuje žádný tepmerační kanál, na který by bylo možné nové vedení temperačního média napojit. Proto je již z počátečních podmínek jasné, že bude nutná úprava i některých dalších částí formy.

Dalším omezujícím faktorem jsou prostorové možnosti pro vedení kanálku uvnitř jádra. Je nutné brát zřetel na nezbytně nutné části formy, které jsou tímto jádrem vedeny. Vnitřkem jsou vedeny další malá tvarová jádra vytvářející některé malé detaily na výrobku. Dále jsou jím vedeny vyhazovače pro vyjmutí výrobku z formy. Všechny tyto části značně snižují počet možností kudy vést nový temperační kanálek a také určují maximální možnou velikost kanálku. Je také třeba najít vhodné místo pro napojení kanálku k ostatním částem formy a zajistit utěsnění spojů.

Samotná konstrukce TS má svá úskalí, která byla popisována v kapitole 2.3. Jedním z hlavních omezení v této oblasti je minimální tloušťka stěny mezi kanálkem a tvarovou dutinou, velikost temperačního kanálku, požadovaný směr proudění chladícího média,

Pro konstrukci je také nutné brát ohled na výrobní možnosti. Od začátku je počítáno s využitím technologie DMLS. Ta samotná má omezující faktory, které již byly popsány v kapitole 2.5.

3.1.2 Vlastní návrh konstrukce tvarového jádra pro formu č. 1

Původní jádro je sestaveno s těla hlavního jádra, dvou kusu válcových tvarových vložek a jednoho kusu hranolové tvarové vložky. Všechny tyto vložky procházejí celou délkou hlavního jádra a zajištění jejich polohy je řešeno pomocí osazení na spodní straně a přimáčknutí k další části formy spolu s jádrem.

Válcové vložky vytvářejí na výstřiku dvě válcové dutiny sloužící k rozeznání varianty vyráběného dílu. Použitím různě dlouhých válcových vložek vzniká na výrobku válcový výstupek zaslepený nebo průchozí. Toto slouží k rozeznání variant konektoru, které mohou být nepatrně rozdílné například ve tvaru zajišťovacího zámku na konektoru. Kvůli variabilnosti je nutné dodržet koncepci zaměnitelných těchto částí.

Hranolová vložka má konec vyčnívající z tvarového jádra ve tvaru postupně se zužujícím do špičky. Tento tvar vytváří ve výlisku dutinu sloužící k udržení konstantní tloušťky stěny výlisku. To se při konstrukci dílů vystřikovaných z plastu využívá k zamezení vzniku staženin a vad vznikajících smršťováním materiálu při chladnutí.

Tuto vložku není mezi jednotlivými variantami nutné měnit. Teoreticky by bylo možné vyrobit tento výstupek jako součást hlavního tvarového jádra. Během vstřikování je tento výstupek namáhán silami od proudící taveniny a může časem dojít k jeho poškození nebo k jeho zlomení. Je proto vhodné dodržet rychlou vyměnitelnost této části v případě poškození.

U všech třech vložek však může být pozměněn způsob spojení s hlavním tvarovým jádrem a tím i tvar vložek a jádra. To vedlo ke zvětšení prostorových možností pro vedení kanálku v jádře.

V tomto případě byl systém vedení a upnutí vložek překonstruován tak, že jsou vložky vkládány do jádra pouze do otvorů ve vrchní části jádra a ve správné pozici jsou aretovány pomocí kolíků.

Další část formy procházející jádrem je sestava vyhazovačů. Většina vyhazovačů je rozmístěna po obvodě jádra. Dva z vyhazovačů jsou umístěny blíže ke středu jádra. Toto umístění otvorů pro vedení vyhazovačů opět snižuje možnosti pro vedení kanálku.

Proto bylo rozhodnuto o odstranění jednoho z těchto vyhazovačů. Tímto minimálním snížením jejich počtu by nemělo dojít k problémům během vjímání výstřiku z formy.

Tyto úpravy vedli k vzniku koncepce jádra, která svým tvarem a vnitřním prostorem umožňovala navrhnutí temperačního kanálku. Původní řešení to reálně neumožňovalo.

V tomto konkrétním případě bylo možné provést jádrem kanálek maximálně o velikosti průměru 3 mm a při dodržení tloušťky stěny mezi kanálkem a vnějším povrchem jádra 2,5 mm. Tloušťka stěny a průměr kanálku byla po konzultaci s lidmi z praxe uznána za dostačující. Tyto hodnoty se v praxi, pro dané plnící tlaky, používají.

V případě zvoleného průměru kanálku je počítáno s úpravou velikosti tlaku v temperačním okruhu na hodnotu přibližně 6 bar, oproti původně používaným 3 bar. Takový tlak by měl

zvýšit rychlost proudění média, velikost hmotnostního průtoku, a zamezit vzniku usazenin uvnitř kanálku. Tyto usazeniny by nebylo možné odstranit kvůli složitému tvaru kanálku. Dále by v případě tak malých hodnot průměru bylo vhodné jako médium používat upravenou demineralizovanou vodu, oproti neupravené vodě z vodovodního okruhu.

Pro přívod a odvod chladícího média byl zvolen prostor na spodní ploše jádra. Ta je po sestavení formy v kontaktu s jednou z hlavních desek formy. Při návrhu umístění vstupního a výstupního otvoru je nutné brát ohled i na původní řešení vedení vyhazovačů. Výroba nové, nebo nákladná úprava původní desky, je v tomto případě nepřijatelná. Desku je možné upravit pouze výrobou kanálků pro přivedení a odvedení chladící ho média a to za použití co nejjednodušší cesty. Je proto nutné umístit otvory tak, aby kanálek v desce neprocházel žádnou z děr pro vedení vyhazovačů, které jsou deskou vedeny. V případě jádra bylo odstraněním vyhazovače docíleno prostoru pro vedení kanálku, ale pouze při výrobě nového jádra. Oproti tomu v desce otvor pro vedení vyhazovače stále zůstává a kanálek tímto otvorem nesmí být veden.

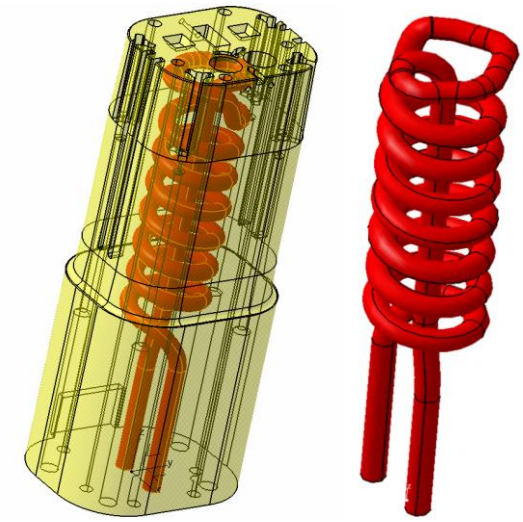
Jak bylo popsáno výše, kvůli přívodu média do nového chladícího sytému je nutná úprava základní desky formy. Samotná deska obsahuje vlastní temperační sytém a bylo by tedy napojit chlazení jádra právě na tento systém kanálků. Pro testování a zkoušení změny různých parametrů během vstřikování je lepším řešením připojit chladící systém jádra na separátní temperační okruh. Tento okruh bude možné řídit nezávisle na zbytku formy. Bude tak moci být upravována jak teplota média, tak i tlak a rychlost proudění TM.

Po zhodnocení všech omezujících podmínek bylo navrhnuto několik možných vedení kanálku, ze kterých byla následně vybrána dvě řešení jako nejlepší s ohledem na výrobu, proudění média, možnost tvorby usazenin a jejich odstraňování, tloušťky stěny, velikosti průřezu kanálku a také k celkovému objemu kanálku v jádře.

a) Varianta A

První varianta je připravena pro výrobu celého jádra pomocí technologie DMLS s následným obrobením na požadovanou přesnost funkčních rozměrů, danou výrobním výkresem originálního jádra.

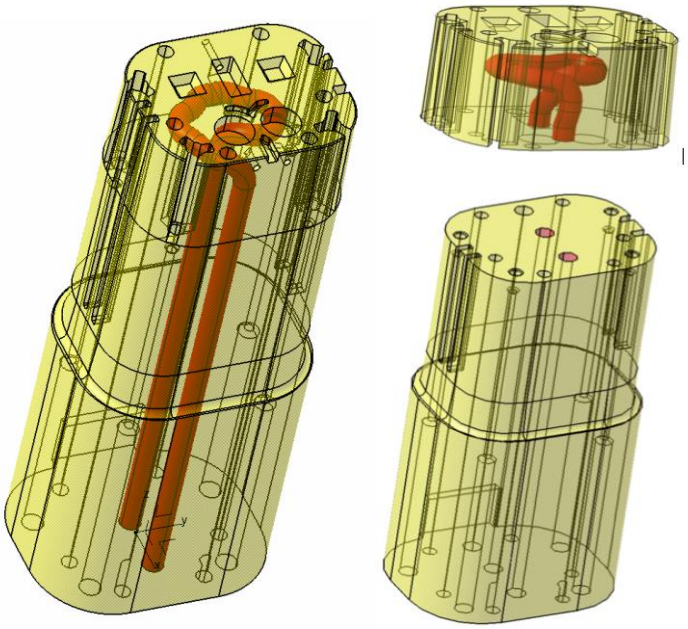
Návrh obsahuje kanálek kruhovitého průřezu o průměru 3 mm. Kanálek by byl veden od polohy pro vstup středem jádra směrem k povrchu, na kterém dochází k popisovanému problému s chlazením. Tímto je, při správném zapojení temperačního systému, zaručeno proudění kapaliny nejdříve do požadovaného problémového místa. Po vyvedení k problémové části jádra, by byl kanálek veden rovnoběžně s vrchní plochou ve snaze kopírovat profil průřezu jádra. Kanálek v této vrstvě co nejvíce kopíruje vnější tvar součásti s ohledem na otvory pro vyhazovače a minimální nutnou tloušťku stěny jádra. Dále je veden do spirály a tou pokračuje zpět směrem k základně jádra. Spirála končí mírně pod výškou jádra, která začíná tvořit tvarovou dutinu ve formě. V upínací části přechází spirála zpět do přímého směru až k základní ploše.



Obr. 27: Forma č.1- Varianta A

b) Varianta B

Druhá varianta je zamýšlena tak, že by část jádra byla vyráběna pomocí běžných metod výroby (Třískové obrábění, elektroerozivní obrábění). Tato část by obsahovala vedení kanálku pouze v přímém směru. Kanálek má také průměr 3 mm. Vrchní část jádra, na které dochází k popisovanému problému s chlazením, by byla dotisknuta pomocí technologie DMLS. Tato část obsahuje tvarovou část kanálku. Kanálek by byl na předvyrobenou část napojen a pokračoval by v přímém směru prostředkem jádra až k vrchní ploše. Zde by byl veden v horizontální rovině souběžně s problémovou plochou a kopíroval by profil řezu jádra a otvorů pro vyhazovače. V porovnání s prvním návrhem je celkový objem kanálku menší.



Obr. 28: Forma č. 1- Varianta B

3.1.3 Návrh technologie výroby varianty kanálku A

U první varianty by byl proveden tisk celé součásti. Kvůli omezené přesnosti 3d tisku by bylo třeba součást obrobit na požadované rozměry třískovým obráběním nebo elektroerozivním obráběním. V první řadě bude třeba vytisknout součást s technologickými přídavky pro dokončení. Po tisku by byla zařazena operace kalení pro dosažení požadované tvrdosti. Teprve následně by byla součást obráběna na přesné rozměry. Pro zarovnání spodní a vrchní plochy by byla použita elektroerozivní drátová řezačka. Následně by byl stejnou technologií zhotoven půdorysný tvar spodní upínací základny. Tím by vznikla přesná upínací základna pro následující obrábění. Zároveň by touto technologií byly zhotoveny otvory pro vyhazovače. Výhodou by byly předpřipravené otvory pro vyhazovače již během tisku. Díky tomu by odpadla operace pro zhotovení vstupních otvorů pro řezací drát. Vnější povrchy funkční části by byly obrobeny na elektroerozivní hloubičce. Kvůli různému úhlu sklonu stěn v různých výškách, by bylo třeba vyrobit minimálně dvě tvarové elektrody dutého oválného tvaru pro obrobení bočních stěn. Pro tvarové dutiny na vrchní ploše by muselo být zhotoveno sedm tvarových elektrod. Každá pro jiný tvar dutiny. Nebo by byla, pro zahloubení na vrchní ploše, zhotovena jedna tvarová elektroda obsahující všechny nutné tvary. Pro čtyři tvarové otvory by muselo být vyrobeno stejný počet elektrod. Pomocí nich by byly dutiny dokončeny. Pro boční svislé drážky by museli také být zhotoveny tvarové elektrody pro dokončení. Vnější povrch funkční části by byl následně přeleštěn.

3.1.4 Návrh technologie výroby varianty kanálku B

V tomto případě by byl obroben polotovar o vhodných půdorysných rozměrech a výšce 70 mm. Do něj by byly předem předvrtány otvory pro vyhazovače a dva otvory vedení kanálku. Otvory pro kanálek by museli být obrobeny na čisto. Polotovar by byl obroben na přesné vnější rozměry a přesnou polohu děr pro kanálek vůči bočním stěnám. Díky tomu by bylo možné nastavit správnou polohu polotovaru pro tisk vršku součásti.

Zbytek jádra by byl dotisknut pomocí technologie DMLS na již předvyrobený polotovar.

Po tisku by byl další výrobní postup totožný s postupem pro variantu A.

Hlavním důvodem pro použití tohoto postupu je snaha o snížení strojního času 3D Tiskárny a také snaha o zamezení vzniku velkého vnitřního pnutí při tisku. Spodní část jádra je poměrně rozměrná a v této oblasti by docházelo ke spékání velké plochy najednou. Díky tomu by bylo, v takto vyráběném kuse, akumulováno vysoké vnitřní pnutí a docházelo by k velkým samovolným deformacím nejspíš již během tisku.

Výhodou použití tohoto postupu by dále byla možnost tisku více kusů horní části jádra na jeden velký předpřipravený polotovar.

Vzhledem k problematice zvolené technologie 3D tisku, by bylo nutné naplnit veškerý prostor okolo polotovaru práškovým materiálem. Složité by bylo také přesné napolohování tisku vůči upnutému polotovaru.

V porovnání rychlosti výstavby při výrobě aditivní technologií a rychlosti úběru materiálu při obrábění by bylo toto řešení výhodnější při vyšším počtu vyráběných kusů najednou.

U menšího počtu by bylo nutné zvážit velikost vedlejších časů výroby. Tím jsou myšleny časy nutné k přípravě tisku, časy k přípravě výroby přesného polotovaru a podobně.

Po navržení a konzultaci výroby těchto dvou variant bylo již téměř rozhodnuto o výrobě. Z firmy však byla dodána informace o zrušení výroby na zadané formě. Tím by byla výroba

dílu pro tuto formu naprosto zbytečná. Z tohoto důvodu byla k optimalizaci vybrána jiná forma vyrábějící odlišný typ výrobku.

3.2 Forma č. 2

Druhá zadaná forma se typem výrobku naprosto liší od první formy. Tato forma je určena k výrobě pojistného krytu kontaktu na vysokonapěťovém konektoru. Jedná se o tvarově složitý díl velice malých rozměrů. Tvarová složitost má za následek velký počet malých dílu, které tvoří tvar dutiny ve formě. Sestava formy je tvořena z desek, normálií, vtokové vyhazovací soustavy a bočních šoupáků. Tvar dutiny vytváří soustava tvarových jader a tvarové vložky. Výrobek je ustaven svou vnitřní dutinou kolmo na směr otvírání formy. Při otvírání formy dochází posuvem šíbrů k vysunutí jádra z dutiny ve výrobku. Tím je výrobek uvolněn pro vyhození a zůstává přichycen k pevné straně formy. Následně je pomocí vyhazovačů vyhozen z formy.

K dispozici byla kompletní 3D modelová sestava formy a výkresová dokumentace. To značně rychlost nového návrhu.

3.2.1 Omezující podmínky pro formu č. 2

Zde je jednoznačně největším omezením rozměr součásti vybrané k úpravě. Délka celého jádra je 55 mm. Z toho délka funkční části je přibližně 25 mm. Zbylá část slouží k ustavení a upnutí jádra k sestavě šíbru, na kterém se nachází. Jak již bylo zmíněno výše, část vytvářející dutinu na výrobku má rozměry přibližně pouze 15 mm na šířku a 2,5 mm na výšku. U takto malých rozměrů bylo třeba zvážit, zda je výroba vůbec reálná vzhledem k následné funkci dílu.

Kanálek musí být v tomto případě velice malých rozměrů. I při zvolení malých rozměrů kanálku dojde k výraznému zeslabení tloušťky stěny součásti oproti běžně používané minimální tloušťce stěny.

Je třeba brát ohled na pevnostní a tepelné namáhání funkční části během vstřikování. Tlak působící na jádro od taveniny v dutině nabývá vysokých hodnot a zároveň k němu dochází při zvýšených teplotách. V první řadě bude nutné zkontrolovat, zda lze vůbec použít jakkoliv dutou funkční část jádra s ohledem na jeho možnou deformaci při vstřikovacím procesu.

Jako v případě první zadané formy, je i zde nutné najít vhodné místo pro přívod a odvod chladícího média. Svým tvarem a způsobem upevnění v sestavě bočního šoupáku je počet možností velice omezen.

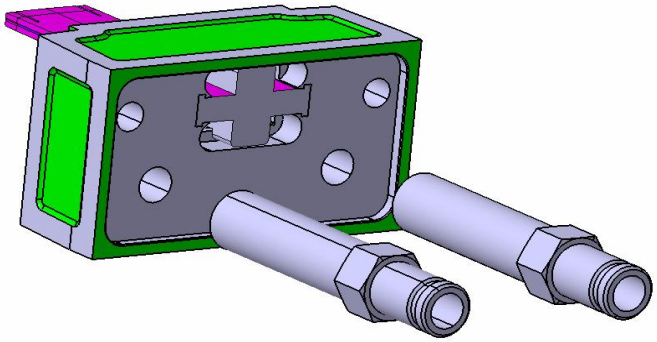
S tím souvisí i možná volba rozměrů těsnících prvků pro dosažení těsnosti spojů. Tyto prvky mají své rozměrové řady, ve kterých se vyrábějí, a mají určité požadavky na tvar, velikost a úpravu dosedacích ploch. Je třeba zvážit možnou velikost průměru chladícího kanálku s ohledem na rozměr těsnícího prvku, který může být použit.

Dále je opět je nutné najít vhodnou cestu přívodu a odvodu média i v ostatních částech formy, které budou muset být upraveny.

3.2.2 Vlastní návrh konstrukce tvarového jádra pro formu č. 2 [26]

O proti původně zadanému typu formy je zde vybrané tvarové jádro jednolitým kusem. Neprochází jím žádné tvarové vložky a ani vyhazovače. Ostatní tvarové vložky se nacházejí po vnějších stranách vybrané součásti. Toto umožňuje použití původní konstrukce vybraného dílu s vložením návrhu chladícího kanálku.

Z umístění jádra ve formě a jeho upnutí k sestavě šoupáku připadala v úvahu pouze jedna plocha k umístění vstupního a výstupního otvoru kanálku. Tato plocha je v kontaktu s dosedací plochou na šíbru. Vzhledem k vyráběným rozměrům těsnících prvků, je možné použít pouze souvislou obdélníkovou plochu o rozměrech 7x13,6 mm.



Obr. 29: Umístění jádra v držáku jader

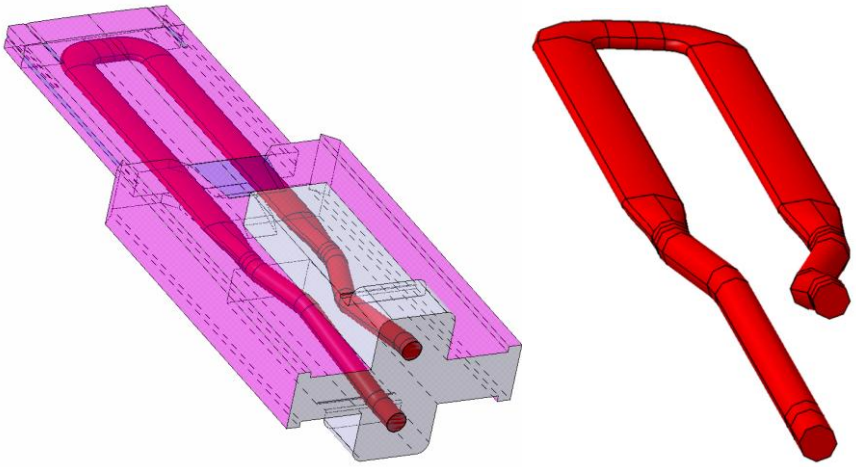
Po zvolení místa pro vstup a výstup bylo nutné kanálek vést směrem k funkční části. Místo pro vstupní a výstupní otvor je zvoleno v příčném uspořádání vůči funkční části. Z tohoto uspořádání bylo nutné kanálek převést do bočních stran funkční části a zároveň dodržet určitou vzdálenost od stěn upínací části. Výsledné řešení vede vstupní kanálek na levou stranu funkční části a vstupní na pravou. Tato vstupní a výstupní část má kruhový průřez.

a) Varianta 2A

V případě návrhu chladícího kanálku ve funkční části jádra došlo návrhu dvou variant.

U obou bylo navrhnuto použít výšku průřezu kanálku maximálně 1 mm. Tím vznikne v nejužším místě stěna o síle minimálně 0,5 mm. Tento návrh byl brán s ohledem na minimální používané velikosti kanálků u vyráběných normálií, které používají přibližně tento průměr. Vzorem byla fontánková trubička..

Jelikož se jedná o tenký, ale oproti tomu široký průřez, je třeba zajistit co nejrovnoměrnější chlazení v celé šíři. Při snaze o dodržení co největšího průřezu kanálku a co nejjednoduššího vedení, byla navrhnuta varianta s elipsovitým průřezem. Tento tvar průřezu byl zamýšlen tak, že bude tvořit uvnitř funkční tvarové části „nosný oblouk“. V délce této části budou vedeny dva kanálky vedle sebe a na konci části budou propojeny příčným směrem, čímž dojde k uzavření oběhu média. Tento návrh bral ohled na silové namáhání jádra během plnění dutiny taveninou. Takový průřez by měl zabránit deformaci od tlakového zatížení v místě kanálku. Byl navrhnut průřez s výškou 1 mm a šířkou 3,2 mm. Tato velikost vycházela právě z výšky 1 mm a zaoblení v rohu minimálně 0,3 mm. Mezi kanálkem a boční stěnou funkční části byla ponechána stěna o tloušťce 2,5 mm. Na jednu z těchto bočních ploch během vstřikování míří vtok do dutiny, a je tedy v určitém místě namáhána přímým proudem taveniny.



Obr. 30: Varianta kanálku 2A

Pro kontrolu byl model součásti podroben orientační pevnostní analýze MKP.

K modelu byly přiřazeny vazby simulující upnutí jádra a kontakt s ostatními částmi formy.

Následně bylo nasimulováno namáhání tlakovým zatížení na funkčních plochách jádra.

Do simulace byly zadány hodnoty použitého materiálu dle materiálového listu pro nástrojovou ocel od firmy EOS s názvem MS1.

Pro zjištění tlaku přímo v dutině byl použit záznam z výroby. Forma je v dutině vybavena tlakovým snímačem, a proto byly dostupné informace z předchozí výroby. Dle hodnot naměřených snímačem dochází při plnění dutiny k nárůstu tlaku na hodnotu přibližně 800 bar. Tato hodnota byla zadána do počátečních podmínek analýzy.

Charakteristika	Hodnota	Jednotky
Mez pevnosti Rm	1100	MPa
Mez kluzu $Rp_{0,2}$	920	MPa
Modul pružnosti v tahu E	150	Gpa
Poissonova konstanta	0,3	

Tab. 7: Hodnoty pro MKP analýzu [26]

Výsledek analýzy ukázal, že na funkční části dochází v místech kanálku k maximální deformaci 0,012 mm. Při těchto podmínkách zobrazovala grafická analýza v místech kanálku velikost součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu přibližně velikosti 1. V tomto případě by došlo k nevratnému poškození součásti.

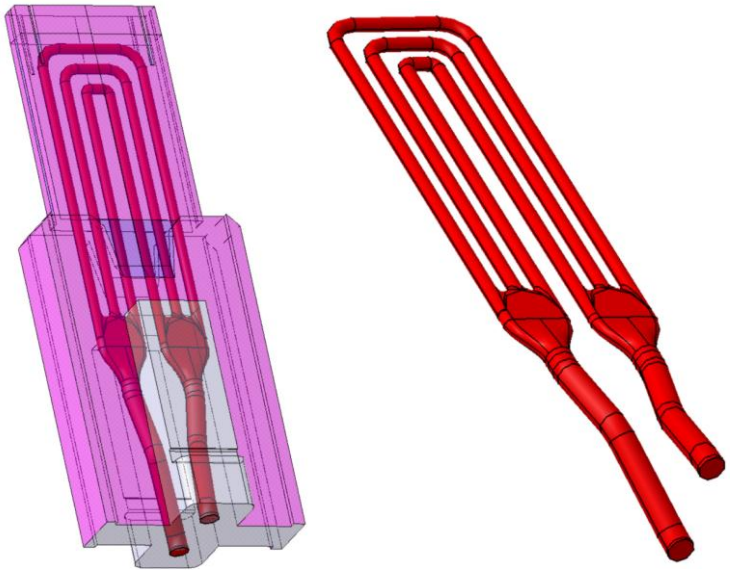
Proto byla provedena optimalizace tvaru průřezu kanálku. Kdy byla elipsa přepracována na soustavu tečně navazujících oblouků s maximální šířkou 2,9 mm, a zaoblením v zúžení 0,3 mm.

Po úpravě byla znovu provedena analýza a hodnota deformace v místech kanálku se změnila na maximální hodnotu 0,007 mm. Při těchto podmínkách zobrazovala grafická analýza v místech kanálku velikost součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu přibližně velikosti 1,3.

V případě použití výrobku v praxi, by byl zušlechtěn na pevnost výrobcem udávaných 1900 MPa, což by součinitel bezpečnosti zvětšilo.

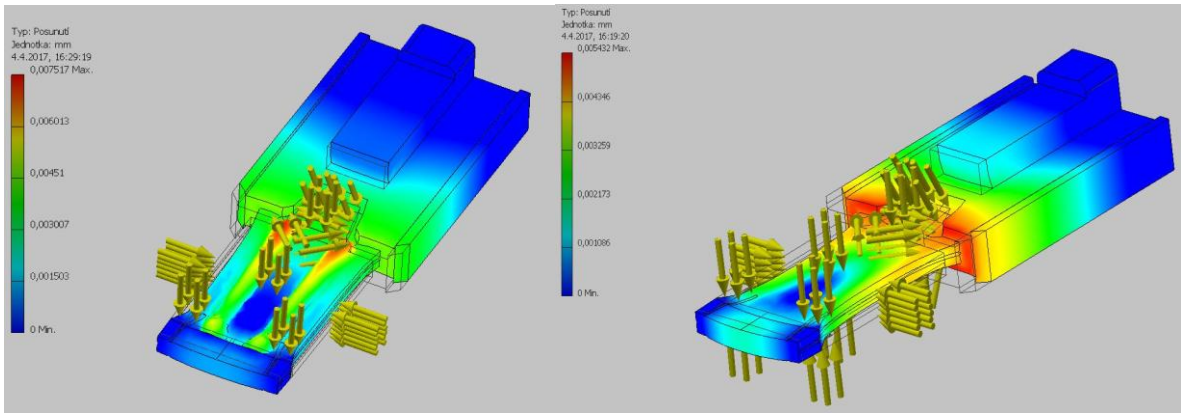
b) Varianta 2B

Návrh druhé varianty kanálku ve funkční části obsahoval kanálek o kruhovém průřezu a průměru 1 mm, rozmístěný několikanásobně v celé šíři funkční části. Aby došlo ke snížení možnosti ucpání kanálku usazeninami v rozích jeho vedení, byly navrženy 3 paralelně uspořádané kanálky s jedním společným vstupem. Výše popisovaný vstupní kanálek procházející upínací částí, byl rozvětven pomocí přechodové komůrky do těchto malých kanálků. Takto malé kanálky jsou vedeny po celé délce ke konci funkční části jádra a zde je vedení otočeno směrem zpět k upínací části. Mezi malými kanálky byla zvolena taková rozteč, aby byla využita rovnoměrně celá šíře funkční plochy. Mezi krajními kanálky a boční stěnou funkční části byla ponechána stěna o tloušťce 2,5mm.



Obr. 31: Varianta 2B

Pro kontrolu byla opět provedena orientační pevnostní analýza. Ta, za stejných parametru jako u předchozí varianty, ukázala maximální deformaci 0,004 mm. Součinitel bezpečnosti zde vykazoval hodnotu 1,9.



Obr. 32: Výsledky deformace pro obě jádra

3.2.3 Optimalizace návrhů z hlediska výroby pomocí DMLS

Po dokončení návrhů byla předběžně domlouvána výroba obou variant jádra. Bylo nutné zkontrolovat, zda jsou oba návrhy vyrobitelné bez omezení, nebo zda je třeba návrhy upravit k zjednodušení výroby. Po konzultaci výroby bylo identifikováno několik míst vhodných k úpravám.

Jedním z míst je část kruhového kanálku procházejícím upínací částí. Jak bylo uvedeno v popisu konstrukce, zde bylo nutné vést kanálek tak, aby se dostal k jedné boční stěně funkční části. Přitom bylo třeba držet správnou vzdálenost od stěn upínací části a zároveň od kanálku vedoucího k druhé boční stěně. V tomto případě je u obou variant navržený kanálek špatně orientován vzhledem k problematice zvolené výrobní technologie. Ve snaze pravidelně se vyhnout bočním stěnám upínací části, došlo k vedení kanálku šikmo vzhůru pod úhlem nižším, než je doporučených 40°. Při identifikaci tohoto problému bylo počítáno s výrobou ve svislé orientaci.

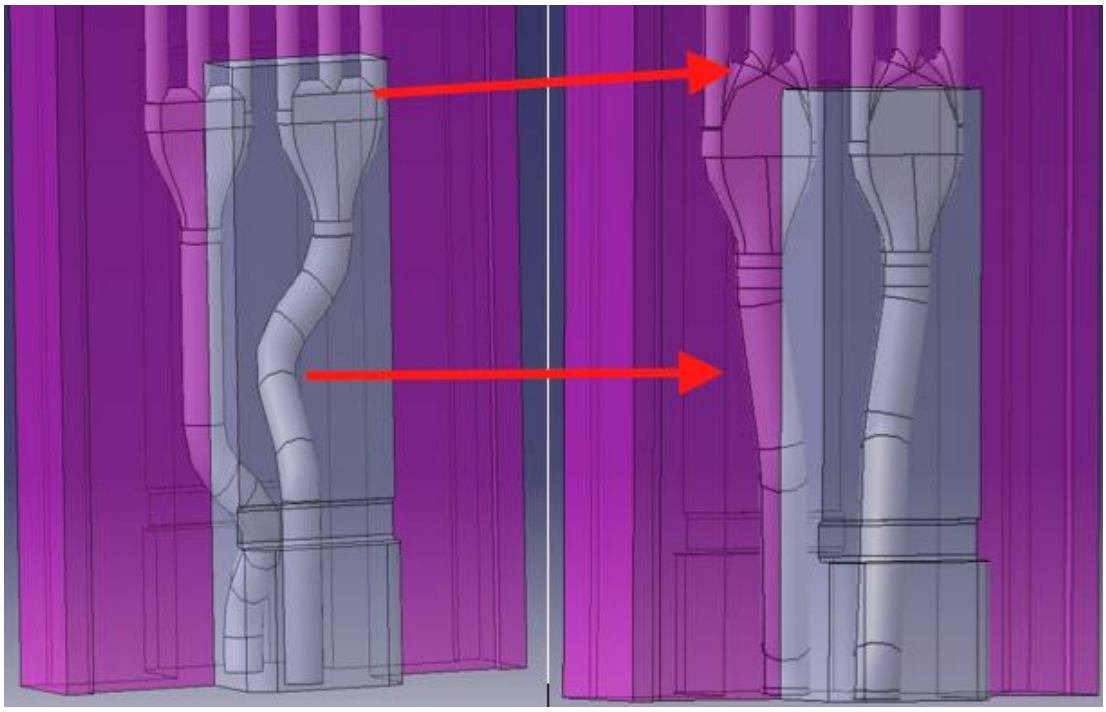
Důsledkem použití takového úhlu sklonu by bylo značné snížení kvality a rozměrové přesnosti v této oblasti uvnitř kanálku. To by v případě takto malého průměru bylo nežádoucí.

Obecně lze tento problém řešit vygenerováním podpůrných struktur v žádoucích místech. V tomto případě je ale použití podpor nemožné. Místo výskytu problému je uvnitř součásti na nedostupném místě, vylámání a vyjmutí podpůrných struktur by nebylo možné.

Proto byl návrh v těchto místech u obou variant přepracován tak, aby byl úhel stoupání co nejvyšší a směr vedení co nejpřímější.

Druhým problémovým místem byla přechodová komůrka u návrhu varianty 2B. V té byla, při svislé orientaci součásti, komůrka navržena tak, aby vrchní část, na kterou jsou dále napojeny malé kanálky, měla zaoblení. To bylo již předem zamýšleno pro odstranění nutnosti použití podpor v této oblasti. Návrh uvažoval s vodorovným zaoblením této části. Napojení kanálků, které mají kolmý směr na toto zaoblení, vytváří v místě napojení ostré hrany. Při výrobě by tyto ostré hrany způsobovali kroucení spékané vrstvy a mohlo by dojít k deformaci materiálu v těchto místech. Následně by mohlo dojít k přicpání vstupního otvoru do malých kanálků.

Po konzultaci s odborníky z laboratoře experimentálního obrábění, bylo rozhodnuto o úpravě napojení malých kanálků na komoru. Toto napojení bylo původně zaobleno malým rádiusem tak, že zde následně nevznikali žádné ostré hrany. Tato změna by také měla napomoci plynulejšímu proudění chladící kapaliny.



Obr. 33: Optimalizace kanálku pro DMLS

Další úprava byla provedena na dvou pravoúhlých vybrání nacházejících se na upínací části jádra. Zde se v místech osazení pro upnutí nachází malé zahloubení. Je zde z důvodu odbourání problému s výrobou ostrého vnitřního rohu při upnutí v sestavě. Toto zahloubení by v případě tisku vyžadovalo použití podpor. Bude-li součást tisknuta ve svislé orientaci nejdelším rozměrem, v této oblasti by se vyskytly převislé konce.

Kvůli omezené přesnosti 3D tisku bylo nutné navrhnout technologické přídavky pro následující obrábění. Po konzultaci s technologem z externí nástrojárny, kde měla být součást obráběna, bylo rozhodnuto o přidání různých přídavků. V celé upínací části byl přimodelován přídavek 0,5 mm na stěnu. Taková velikost je vhodná pro obrábění drátovou řezačkou kvůli dostatečnému záběru řezacího drátu. Na funkční část byl přimodelován přídavek 0,3 mm na stěnu. V této části je počítáno s obráběním pomocí tvarových elektrod. Pro ty se v praxi využívá přídavek pouze 0,1 mm. S ohledem na problematiku 3D tisku a také na deformace způsobené tepelným zpracováním, byla předem odhadnuta deformace funkční části. Dle zkušeností pracovníků Laboratoře experimentálního obrábění, by mohlo dojít ke zkroucení funkční části oproti části upínací zhruba o 0,2 mm k jedné straně.

Aby i v případě takové deformace zůstal na stěně přídavek pro obrobení na čisto, byl zde navrhnut přídavek na stěnu o velikosti 0,3 mm.

Oproti vnějšímu tvaru původního jádra se na nově navržené součásti nacházejí dvě zahloubení na spodní upínací ploše, které slouží pro usazení těsnících O-kroužků. Tato zahloubení byla pro výrobu 3D tiskem také odstraněna.

3.3 Návrh výrobní technologie jader pro formu č. 2

U této součásti bude třeba vytisknout kompletně celý kus. Po tisku bude, pro reálné použití, třeba součást zakalit na vyšší tvrdost. Následně by bylo vhodné na elektroerozivní drátové řezačce obrobit bokorysný tvar upínací části spolu se zarovnáním spodní základny a vrchní plochy na funkční části. Po přeupnutí by dále byl obroben i půdorysný tvar této části spolu se zahloubením na osazení pro upnutí. Funkční část bude vhodné obrobit na elektroerozivní hloubičce pomocí čtyř tvarových elektrod. Jedna elektroda bude nutná pro tvarové vybrání ve funkční části a zároveň pro dokončení části meziprostoru mezi tímto vybráním a upínacím osazením. Plochá funkční část vyžaduje použití jedné elektrody pro delší část s mírnějším zúžením a druhé pro krátkou koncovou část s větším zúžením. Pro malé drážky, vyskytujících se na funkční části jádra, bude muset být zhotovena další tvarová elektroda. Na konec by byla obrobena zahloubení pro těsnící prvky. Pro dosažení vysoké kvality povrchu bude třeba funkční části přeleštit.

3.4 Výroba

K výrobě součásti 3d tiskem bylo požito výrobní zařízení EOS 290 M v Laboratoři experimentálního obrábění na regionálním technologickém institutu v Plzni.

Po optimalizaci vyráběné součásti vzhledem k 3D tisku, byl model nahrán do programu Magics RP. V tomto prostředí byla součást naorientována do pozice vhodné pro tisk a byli k ní přimodelovány podpory. Protože se jedná o podlouhlou součást s kolmými stěnami a postupným zúžením profilu, bylo již předem počítáno s orientací nejdelší strany výrobku ve směru osy Z. Pro tuto polohu byl optimalizován návrh vnitřního kanálku. Následně bylo do virtuální pracovního prostoru v softwaru EOSPRINT umístěno osm kusů jádra. Čtyři kusy každé varianty.

3.4.1 Orientace součásti

a) orientace součásti vůči směru výstavby

Byl zvolen přímý směr bez jakéhokoliv odklonění vůči základně. Díky tvaru součásti je tato poloha nejoptimálnější z hlediska vnitřního pnutí a přesnosti. Po rozřezání modelu na vrstvy vznikají plochy obdélníkového tvaru, které mají maximální rozměry součásti v této vrstvě.

V případě naklopení výrobku vůči základní rovině, by vlivem úhlopříčného řezu, vznikali menší nebo naopak větší rozměry spékané plochy oproti nenaklopenému výrobku.

V nižších vrstvách upínací části, by spékaná plocha byla menší a tím by vznikala menší plocha pro následující převod tepla do tiskové platformy. Ve vyšších vrstvách upínací části by naopak docházelo k zvětšení plochy, ve které by bylo akumulováno více tepla.

Z hlediska přesnosti a drsnosti výrobku je ustavení bez náklonu také výhodnější. Většina z celého počtu ploch, nacházejících se na součásti, jsou rovinné plochy s pravoúhlou orientací vůči sobě. Díky tomu je, při zvolené orientaci, eliminován schodišťový efekt ve většině oblastí na součásti. V upínací části se nenachází žádná plocha, která by byla vůči základní rovině ve sklonu. Pod drobným sklonem jsou pouze vnější plochy funkční části a některé oblasti vnitřního kanálku.

b) Orientace vůči směru nanášení materiálu.

V tomto případě byla součást orientována dle doporučení popsaných v předchozí kapitole. Součást má půdorysný tvar nesouměrný. Jedna strana je znatelně větší, než strana na ni kolmá. Z tohoto důvodu byla součást na platformě ustavena delší stranou, na funkční části, podél směru posuvu nanášecího pravítka. Zároveň byla lehce pootočena, aby směr nanášení nebyl přímo kolmý na žádnou z bočních ploch součásti.

Protože bylo vyráběno najednou 8 kusů jádra, byly seskládány postupně po směru nanášení materiálu.

Obr. 34: Orientace součástí při výrobě

3.4.2 Nastavení parametrů tisku

Pro výrobní proces byly zvoleny parametry tisku pro zvolený materiál MS1. Tyto parametry jsou přednastaveny od výrobce dle jeho výzkumu a optimalizace podmínek.

Před skutečnou výrobou byl porovnán výrobní čas pro tři různá nastavení výšky vrstvy.

Bylo porovnáno nastavení pro výšky 20, 40 a 50 µm. Propočet byl proveden pro tisk všech osmi kusů výrobku najednou.

Výška vrstvy	Vypočítaný čas výroby
20 µm	7h 40 min
40 µm	3h 15 min
50 µm	2h 30 min

Tab. 8: Porovnání délky výroby dle nastavené výšky vrstvy

Tyto časy by platily v případě výroby pouze těchto součástí. Vzhledem k malým rozměrům výrobků, by byla velká část pracovního prostoru nevyužita. Z tohoto důvodu bylo během výroby využito jedné z výhod aditivní technologie výroby. Tím je výroba naprosto odlišných typů výrobku během jedné operace. Proto výroba proběhla společně s dalšími výrobky, které bylo nutné v dané době vyrobit.

Výška vrstvy byla v tomto případě zvolena 40 μm. Nastavení pro tuto výšku vrstvy je výrobcem nazýváno jako MS1 Performance. Důvodem volby tohoto nastavení byl optimální poměr mezi rychlostí výstavby a dosažitelné kvality povrchu. Kvalita povrchu je důležitá hlavně na stěnách vnitřního kanálku, kde není možné kvalitu povrchu zlepšit běžně dostupnými technologiemi.

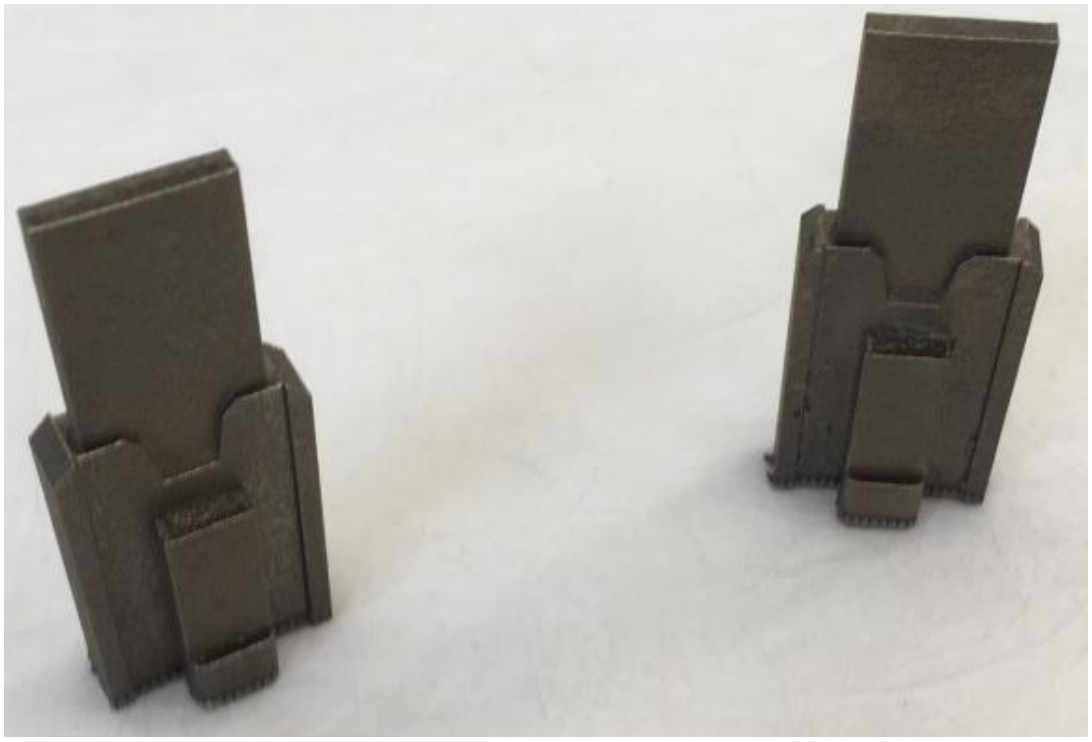
3.4.3 Výrobní proces

Jak již bylo uvedeno výše, samotná výroba je plně automatizována a může probíhat bez dohledu jakéhokoliv pracovníka.

3.4.4 Postprocesing

Po dokončení tisku byla platforma s výrobky podrobena rozpouštěcímu žíhání. Díky tomu došlo ke snížení vnitřního pnutí a zjemnění struktury materiálu. Následně byly jádra odstraněny z tiskové platformy a byly z nich odbroušeny podpůrné struktury na základní ploše.

Důležitou částí v tomto kroku bylo vyjmutí nespečeného prášku z vnitřních kanálků. Vysypání prášku bylo docíleno vibracemi a různým natáčením součásti.



Obr. 35: Vytištěná jádra

3.4.5 Kontrolní měření [28]

Po předání vytištěných výrobků do firmy Kostal Kontakt Systeme, bylo naplánováno kontrolní přeměření součástí.

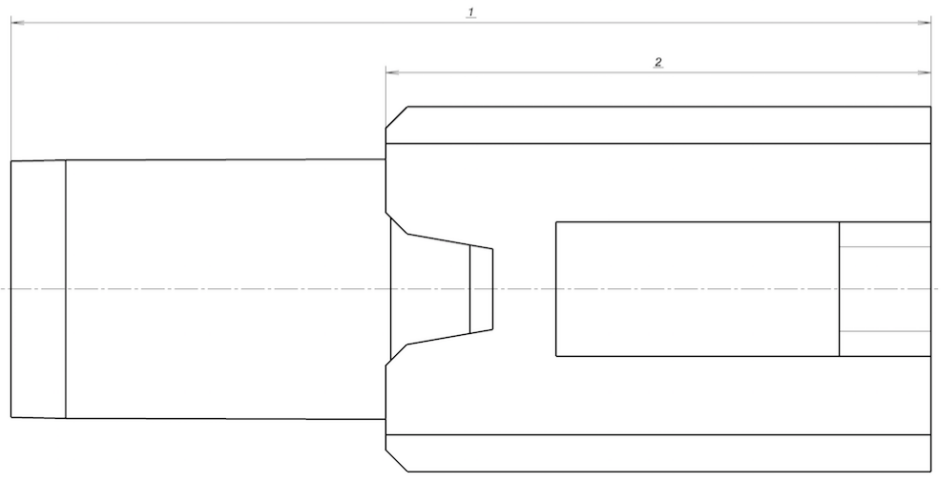
Firma disponuje kontrolní laboratoří vybavenou souřadnicovým měřícím přístrojem od firmy Zeiss Contura G2 HTG. Stroj má dotykové i optické snímání a je schopen měřit s chybou 1,5 μm

Kvůli vytíženosti této laboratoře pro potřeby výrobního provozu byly na vytištěných kusech vybrány hlavní rozměry, které měly být změřeny. Od každé varianty byly, pro porovnání jednotlivých kusů, vybrány dvě vyrobená jádra.

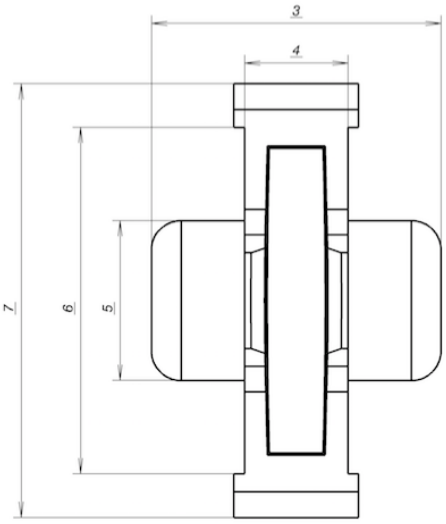
Pro měření bylo vybráno několik základních vnějších rozměrů a cílem bylo také změření rovnoběžnosti osy funkční části oproti ose upínací části.

Právě zjištění rovnoběžnosti os těchto dvou částí je důležité pro případnou další výrobu součástí podobného tvaru a jejich optimalizaci pro 3D tisk.

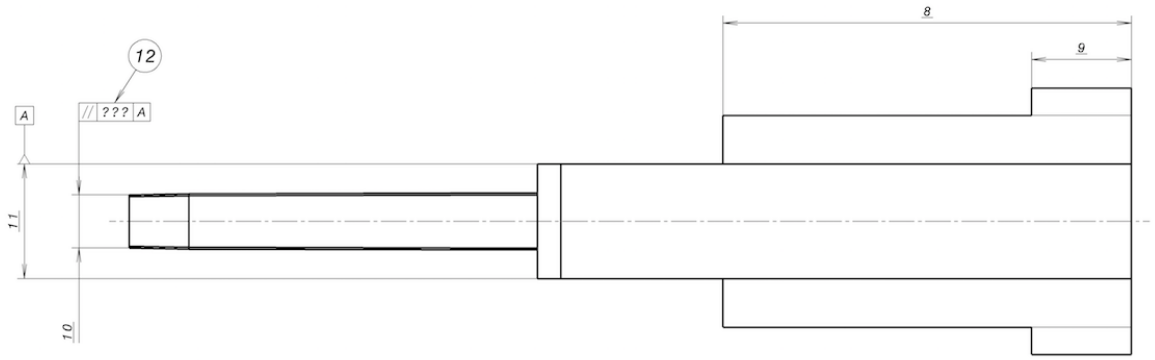
Obrázky níže popisují vybrané rozměry pro měření a jejich pozice.



Obr. 36: Nárys



Obr. 37: Půdorys



Obr. 38: Bokorys

Varianta kanálku A					
Pozice	**Jmenovitý rozměr [mm]**	**Naměřený rozměr na kuse č. 1 [mm]**	**Odchylka [mm]**	**Naměřený rozměr na kuse č. 2 [mm]**	**Odchylka [mm]**
1	55,23	55,239	+0,009	55,285	+0,055
2	32,73	32,818	+0,088	32,855	+0,125
3	14,63	14,582	-0,048	14,566	-0,064
4	5,22	5,203	-0,017	5,201	-0,019
5	8,08	8,041	-0,039	8,057	-0,023
6	17,49	17,536	+0,046	17,525	+0,035
7	21,90	21,857	-0,043	21,813	-0,087
8	22,50	22,555	+0,055	22,529	+0,029
9	5,50	5,522	+0,022	5,587	+0,087
10	2,92	2,923	+0,003	2,944	+0,024
11	6,30	6,251	-0,049	6,248	-0,052
12	-	0,006	-	0,027	-

Tab. 9: Naměřené hodnoty pro variantu 2A

Varianta kanálku B					
Pozice	**Jmenovitý rozměr[mm]**	**Naměřený rozměr na kuse č. 1[mm]**	**Odchylka [mm]**	**Naměřený rozměr na kuse č. 2[mm]**	**Odchylka [mm]**
1	55,23	55,295	+0,065	55,283	+0,053
2	32,73	32,804	+0,074	32,810	+0,083
3	14,63	14,592	-0,038	14,571	-0,059
4	5,22	5,214	-0,006	5,223	+0,003
5	8,08	8,033	-0,047	8,040	-0,040
6	17,49	17,519	+0,029	17,545	+0,055
7	21,90	21,831	-0,069	21,813	-0,087
8	22,50	22,530	+0,030	22,509	+0,009
9	5,50	5,555	+0,055	5,538	+0,038
10	2,92	2,948	+0,028	2,943	+0,023
11	6,30	6,265	-0,035	6,273	-0,027
12	-	0,006	-	0,007	-

Tab. 10: Naměřené hodnoty pro variantu 2B

3.4.6 Obrobení na přesné rozměry

Pro ověření funkčnosti chlazení a otestování jeho vlivu na vstřikovaný výrobek bylo rozhodnuto o odzkoušení nově navržených jader pouze na jedné kavitě ve formě.

Kvůli nedostatku času, prototypové povaze a také kvůli snížení nákladů na obrábění, bylo rozhodnuto o otestování jádra bez zušlechtění na vyšší tvrdost. Dále bylo rozhodnuto o třískovém obrábění funkční části. Tím byla pracnost obrábění snížena o nutnou výrobu elektrod v případě elektroerozivního vyjiskřování této části. U třískového obrábění bylo počítáno se zaoblením vnitřních rohů v tvarovém zahloubení na funkční části. Pro zkušební provoz však toto zaoblení nemá význam.

Obrobení proběhlo v externí nástrojárně. Dle dostupných informací byla upínací část obrobena pomocí elektroerozivní drátové řezačky. Vnější tvar funkční části byl hotoven pomocí strategie řádkování na 3-osé CNC frézce. Na stejném stroji pak byla dohotovena tvarová zahloubení funkční plochy a také malé drážky na konci funkční plochy.

Obrobeny takto byly celkem dva kusy jádra. Každý pro jednu navrhnutou variantu kanálku.

Po obrobení opět proběhlo přeměření rozměrů.

Před vložením jádra do formy za účelem testování bylo nutné oba kusy ručně upravit, aby bylo docíleno bezproblémového upevnění do sestavy bočního šoupáku.

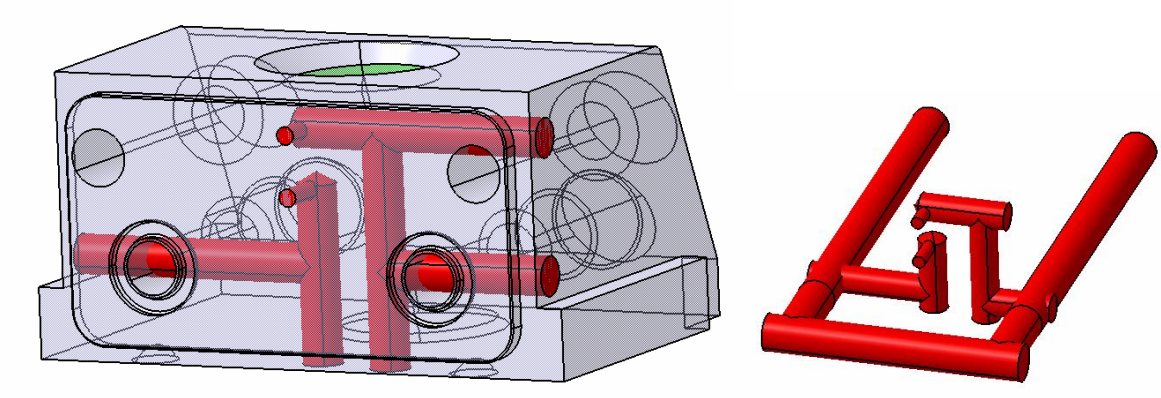
3.4.7 Úprava souvisejících částí formy

Pro přívod chladícího média do nově navrženého tvarového jádra, bylo v tomto případě nutné upravit pouze boční šoupák (šíbr), a chladící kanálek v držáku jader.

Do šoupáku byl navrhnut systém vrtaných kanálků se závity pro montáž ucpávek. Bylo nutné napojit kanálky na již stávající vedení chladícího média. Zároveň bylo třeba dbát na možnost ucpání nového kanálku v případě negativních výsledků nově navrženého chlazení. Pro dovedení kapaliny k jádru bylo zvoleno paralelní připojení na stávající okruh v sestavě bočního šoupáku.

Z obou bočních stran byl veden nový kanálek skrze stávající díry pro vedení média směrem ke středu součásti. Zde byl pomocí dalších vrtaných děr doveden na požadovaná místa pro vstup a výstup chladícího média do tvarového jádra. Vstupní a výstupní otvor na šíbru pro připojení jádra má velikost 2 mm. Průměr kanálku vedených ke vstupu a výstupu je 4,9 mm. Tato velikost odpovídá vnitřnímu průměru závitu M5 x 0,5 mm. Volba tohoto rozměru byla ovlivněna prostorovými možnostmi v šíbru a také volbou šroubovaných ucpávek ze sortimentu firmy Meusburger. Na místech pro vložení ucpávek byl zhotoven závit požadovaných rozměrů. Veškeré vstupní otvory na povrchu součásti je nutné zaslepit těmito zvolenými ucpávkami. Celkem jich je v jednom šíbru použito 5 kusů.

Pro snížení průtoku v původním kanálku bylo třeba přicpání vstupního otvoru do kanálku v držáku jader. Proto byla vyrobena ucpávka s průchozím otvorem 2 mm. K zajištění polohy byla vyrobena speciální opěrka.



Tab. 11: Upravené chlazení šíbru

3.4.8 Zkoušení nově navržených jader

Pro reálné testování obou variant nově navrženého jádra byl naplánován zkušební provoz formy. Cílem bylo zjistit, jaký vliv na kvalitu vstřikovaného výrobku bude mít nově navržený chladící systém sestavy bočního šoupáku. Zároveň bylo cílem zjistit, jaký rozdíl v objemu neshodných výrobků nastane při snížení času chlazení. Objem neshodných výrobku byl sledován i na ostatních tvarových dutinách.

Pro zkoušení byl upraven jeden boční šoupák a byl napojen na separátní temperační okruh. Dutina používající tento šíbr má označení č. 6. Ostatní šíbry, s označením 3, 4 a 5, byli zapojeny na standardně. V upraveném okruhu byl zvýšen tlak na 6 bar, pro dosažení dostatečného průtoku kapaliny malým kanálkem.

Po konzultaci s vedoucím výroby, bylo naplánováno několik kroků testování. Pro porovnání nového návrhu se stávajícím řešením byla vyrobena výrobní dávka s totožným nastavením veškerých parametrů, jako u stávajícího řešení. Pro ověření snížené doby chlazení byl postupně nastavován kratší čas chlazení při shodných ostatních parametrech procesu.

Pro ověření vlivu odlišného chlazení byla při poslední testované dávce snížena teplota na okruzích šíbrů. Každá výrobní dávka o různých parametrech byla sledována samostatně.

Pro vyhodnocení změn bylo použito měření výrobků pomocí kontrolního automatu.

Nevýhodou je v tomto případě nutnost stabilizace rozměrů výlisku. Vyrobený díl musí být ponechán k samovolné stabilizaci minimálně 24 hodin. Teprve pak je možné výrobní dávku zkontrolovat v kontrolním stroji. Tato doba znemožňuje okamžitou úpravu parametrů zkušebního provozu na základě výsledků. Proto byl proveden testovací provoz na základě navrhnutých parametrů. Případná úprava parametrů bude moci být uskutečněna až při budoucím testování po vyhodnocení výsledku.

Jako ukazatel byl zvolen poměr neshodných výrobků ve výrobní dávce. Byl zvolen, protože kontrolní automat při neshodě kteréhokoliv z kontrolovaných rozměrů součást vyřazuje. Rozbor jednotlivých deformací by byl v tomto případě velice zdlouhavý.

Díky hodnocení objemu neshodných výrobků ve výrobní dávce není třeba dbát na stejnou velikost výrobní dávky u všech jednotlivých nastavení. Díky plnění všech dutin najednou, je počet výrobků, vyrobených v jednotlivých dutinách během výrobní dávky, naprosto stejný.

Pořadí	Teplota temperačních okruhů pro sestavy šíbrů	Čas chlazení
1	70 °C	13 s
2	70 °C	9 s
3	70 °C	7 s
4	70 °C	5 s
5	55°C	9 s

Tab. 12: Plánované parametry pro testování

3.4.9 Průběh testování

Po osazení formy upravenou sestavou bočního šoupáku byla forma upnuta na vstřikovací lis. Následovalo zapojení jednotlivých temperačních okruhů. Po dokončení příprav bylo spuštěno nahřívání formy na pracovní teplotu. Toto nahřívání mělo za úkol stabilizovat formu pro výrobu.

Během prohřívání byla dotykovým teploměrem orientačně sledována teplota na upraveném jádře a na neupravených jádrech. Na nově navrženém jádře došlo k rychlejšímu prohřátí oproti ostatním. To potvrdilo rozdílný průběh temperace, vůči původnímu stavu.

Po důkladném prohřátí byla spuštěna výroba s nastavením první sady parametrů. Tento provoz byl udržován přibližně půl hodiny, kvůli získání dostatečného počtu vzorků. Následně byly upraveny parametry a proběhlo testování rozdílného nastavení. Jednotlivé výrobní dávky

byly odděleny a označeny, aby nedošlo k jejich smíchání. Po výrobě při všech naplánovaných nastaveních, došlo k pozastavení výroby a výměny jádra za druhý typ.

Díky demontovatelnému bočnímu šoupáku byla výměna provedena bez nutnosti sundání formy ze stroje. Následně byl celý proces zopakován pro druhou variantu nově navrženého jádra.

Druhý den byly postupně všechny výrobní dávky pro jednotlivé dutiny ověřeny pomocí kontrolního automatu.

4 Analýza konečného stavu

Kapitola je rozdělena na vyhodnocení rozměrové přesnosti vytisknutého tvarového jádra a dále na vyhodnocení průběhu testovacího provozu.

4.1 Analýza vytisknuté součásti.

Cílem bylo zjistit dosažené přesnosti výrobku při výrobě 3D tiskem.

Pro analýzu získaných dat, jsou v tabulkách níže rozděleny měřené rozměry dle orientace součásti při tisku. Orientace dle dané osy znamená, že je měřený rozměr téměř rovnoběžný s udávanou osou pracovního prostoru. Rovnoběžnost není úplná kvůli mírnému natočení součásti vůči směru posuvu pravítka.

Pro zvýraznění jsou nejnižší naměřené odchylky v daném směru vždy označeny zeleně a nevyšší odchylky červeně.

Orientace podél osy X				
	Varianta 2A		**Varianta 2B**	
Pozice dle naměřených hodnot	**Odchylka u kusu 1 [mm]**	**Odchylka u kusu 2 [mm]**	**Odchylka u kusu 1 [mm]**	**Odchylka u kusu 2 [mm]**
5	-0,039	-0,023	-0,047	-0,040
6	+0,046	+0,035	+0,029	+0,055
7	-0,043	-0,087	-0,069	-0,087

Tab. 13: Odchylky ve směru osy X

Při porovnání jednotlivých odchylek u všech měřených součástí na stejném rozměru, je zřetelné, že se odchylky vždy orientují na stejnou stranu od jmenovitého rozměru. Pozice 5 a 7 jsou vnější rozměry. U nich je na všech kusech součásti záporná odchylka a rozměr je menší než rozměr jmenovitý.

U pozice 6 jde o vnitřní rozměr a odchylka je kladná. Rozměr je tedy větší než jmenovitý. Z těchto hodnot plyne, že je v tomto směru skutečný obrys posunut o určitou hodnotu směrem dovnitř součásti v daném místě. Nejde tedy o objemové zmenšení součásti ale o ekvidistantu tvaru součásti. Veškeré naměřené odchylky v tomto směru jsou větší, než je udávaná přesnost výroby daná výrobcem zařízení pro daný materiál. U třech měřených kusů vykazuje rozměr

číslo 7 nejvyšší hodnoty odchylek. Jde o největší rozměr v tomto směru a je tedy znatelný vliv velikosti daného rozměru na dosahovanou přesnost.

Orientace podél osy Y				
	Varianta 2A		Varianta 2B	
Pozice dle naměřených hodnot	Odchylka u kusu 1 [mm]	Odchylka u kusu 2 [mm]	Odchylka u kusu 1 [mm]	Odchylka u kusu 2 [mm]
3	-0,048	-0,064	-0,038	-0,059
4	-0,017	-0,019	-0,006	+0,003
10	+0,003	+0,024	+0,028	+0,023
11	-0,049	-0,052	-0,035	-0,027

Tab. 14: Odchylky ve směru osy Y

Všechny měřené rozměry vy směru s osou Y jsou vnější. U všech součástí a rozměrů, nacházejících se na upínací části, jsou odchylky záporné. Toto opět značí, že jsou skutečné rozměry posunuty o určitou hodnotu ve stejném směru vůči jmenovitým rozměrů.

V případě rozměrů číslo 10, jde o vrchní hranu na funkční části. V tomto případě může být naměřená hodnota ovlivněna mírnou deformací poslední spékané vrstvy.

Při porovnání odchylek u jednotlivých rozměrů se opět u tří kusu nevětší odchylky nacházejí na nevětším měřeném rozměru daném směru.

Udávané přesnosti u všech kusů bylo dosaženo pouze na rozměru číslo 4. Nejedná se přitom ani o jeden extrém z měřených rozměrů v tomto směru.

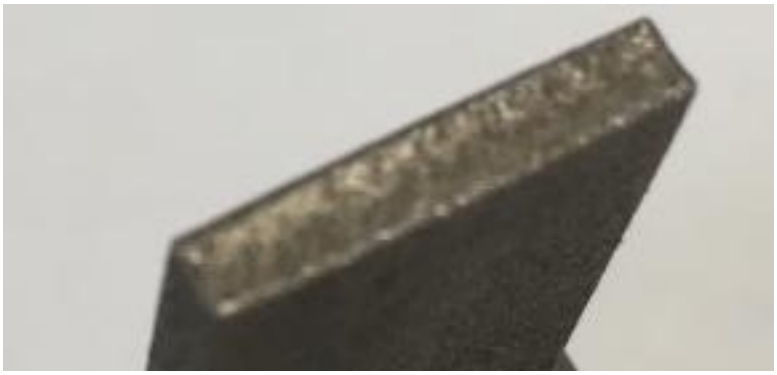
Orientace podél osy Z				
	Varianta 2A		Varianta 2B	
Pozice dle naměřených hodnot	Odchylka u kusu 1 [mm]	Odchylka u kusu 2 [mm]	Odchylka u kusu 1 [mm]	Odchylka u kusu 2 [mm]
1	+0,009	+0,055	+0,065	+0,053
2	+0,088	+0,125	+0,074	+0,083
8	+0,055	+0,029	+0,030	+0,009
9	+0,022	+0,087	+0,055	+0,038

Tab. 15: Odchylky ve směru osy Z

U hodnot ve směru osy Z je třeba brát v úvahu vliv odstraňování podpůrných struktur. Všechny kusy byly na základní spodní ploše opatřeny podpůrnou strukturou. Po jejich odstranění byla tato plocha ručně přebroušena, aby byly odstraněny zbytky odlámaných podpor. Na spodní ploše však i přes to byla viditelná textura povrchu po podpůrných strukturách. Je tedy pravděpodobné, že zde zůstal malý přebytek materiálu oproti jmenovitým rozměrům. V tomto případě by ale měly být naměřené odchylky u všech rozměrů přibližně stejné.

Při porovnání jednotlivých odchylek je však zřejmé, že je vliv zbytků podpůrných struktur minimální. Velikost odchylek je na jednotlivých rozměrech různá a to i při porovnání mezi jednotlivými kusy.

Oproti rozměrům ve směru X a Y zde není viditelný žádný vliv velikosti jednotlivých rozměrů. V případě rozměru číslo 1 je i při pohledu na vyrobenou součást, znatelná horší kvalita povrchu a také je viditelné propadání vzniklé plochy. Okraje jsou oproti středu plochy mírně vystouplé. Směrem ke středu součásti se plocha posouvá níže.



Obr. 39: vrchní plocha jádra

V případě zjištění pravidelného směru odchylek u rozměrů rovnoběžných s osami X a Y, by přesnějších rozměrů mohlo být dosaženo při použití vhodných přídavků na stěnu u modelu součásti.

U odchylek vznikajících ve směru osy Z je pravděpodobně jedinou možností nápravy snížení výšky vrstvy spékaného materiálu.

V tomto konkrétním případě by mohlo dojít ke zlepšení kvality ploch rovnoběžných se základnou, při změně orientace součásti při tisku. Ovšem na úkor kvality na jiných plochách.

Varianta 2A		**Varianta 2B**	
Odchylka rovnoběžnosti os u kusu 1 [mm]	**Odchylka rovnoběžnosti os u kusu 2 [mm]**	**Odchylka rovnoběžnosti os u kusu 1 [mm]**	**Odchylka rovnoběžnosti os u kusu 2 [mm]**
0,006	0,027	0,006	0,007

Tab. 16: Odchylka rovnoběžnosti os

V případě rovnoběžnosti os upínací a funkční části, došlo k mírné odchylce pouze u jednoho kusu. I tak se ale jedná o velice malou hodnotu.

Otázkou je, k jakému kroucení by došlo při zušlechťování součásti na vyšší tvrdost povrchu.

4.2 Vyhodnocení zkušebního provozu

Vyhodnocení průběhu testovacího provozu bylo provedeno na základě dat o počtu neshodných výrobků z jednotlivých výrobních dávek a jednotlivých vstřikovacích dutin. Data byla získána díky kontrole výrobků pomocí automatického kontrolního stroje, používaným pouze pro tento typ výrobku.

Kvůli zjednodušení byla získaná data porovnávána separátně pro dutinu s upraveným systémem chlazení vůči souhrnným datům z ostatních třech dutin. Byla získána data níže.

Upravené jádro – Varianta 2A		
Nastavení parametrů č.	**Podíl zmetků z dutiny s úpravou chlazení**	**Podíl zmetků z dutin bez úpravy chlazení**
1	3,7%	4,9 %
2	1,7%	13,9 %
3	82,9 %	37,6 %
4	100 %	100 %
5	4,7 %	15,7 %

Tab. 17:Získané hodnoty pro variantu 2A

Upravené jádro – Varianta 2B		
Nastavení č.	**Podíl zmetků z dutiny s úpravou chlazení**	**Podíl zmetků z dutin bez úpravy chlazení**
1	3,7%	5 %
2	5,8 %	16,2 %
3	64,2 %	33,5%
4	100 %	100 %
5	7,1 %	18,1 %

Tab. 18: Získané hodnoty pro variantu 2B

Ze získaných dat je patrné, že došlo k mírnému snížení podílu zmetků na dutině s upraveným chlazením oproti ostatním dutinám, při zachování stávajících parametrů vstřikování.
V případě obou navrhnutých variant, docházelo při výrobě naprosto ke stejnému výskytu neshodných výrobků ve výrobní dávce.

V případě snížení času pro chlazení došlo u neupravených dutin k navýšení podílu zmetků.

U varianty 2A, nově navrženého jádra, bylo detekováno naopak počtu zmetků. To při porovnání s ostatními dutinami ukazovalo znatelný rozdíl.

U varianty 2B došlo k mírnému navýšení podílu neshodných výrobků u dutiny s upraveným systémem chlazení a k výraznému navýšení podílu zmetků u ostatních dutin.

Při dalším snížení času chlazení došlo u obou variant k extrémnímu nárůstu podílu neshodných výrobků. V tomto případě je zajímavý větší nárůst u dutin s upraveným chlazením, oproti ostatním dutinám

Při ještě razantnějším snížení času chlazení již byli veškeré výrobky neshodné.

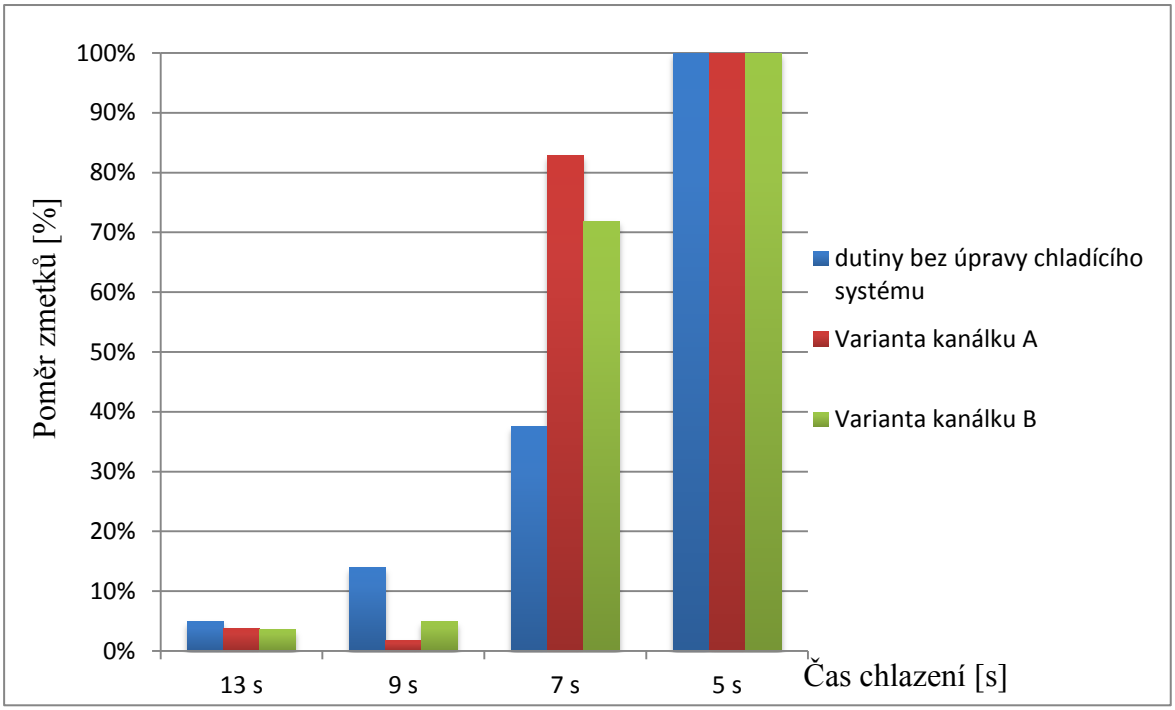
Při poslední výrobní dávce byla za sníženého času chlazení na 9 s, snížena také teplota temperačního média na 55 °C. Zde je znatelný mírný nárůst podílu neshodných výrobků u všech dutin. Z toho vyplývá, že snížení teploty chladícího média oproti teplotě používané při současném stavu, vede ke zhoršení rozměrové a tvarové přesnosti vyráběného dílu.

Mezi testováním jednotlivých variant jader, je vidět mírný nárůst poměru zmetků u druhé varianty jádra při parametrech, které vykazovali relativně použitelný poměr zmetků. Proto byl pro porovnání obou variant jader mezi sebou, proveden přepočet na shodný podíl zmetků z dutin bez úpravy chlazení. Jako vzorové hodnoty slouží výsledky pro testování varianty kanálku 2A.

Hodnoty ukazují, jaký podíl neshodných výrobků by byl produkován dutinou s upraveným chlazením a použití varianty kanálku 2B, při produkci stejného podílu neshodných výrobků z dutin bez úpravy chlazení u obou variant.

Čas chlazení pro nastavenou teplotu 70 °C	**Objem zmetků z dutin bez úpravy chlazení při použití kanálku varianty 2A**	**Objem zmetků z dutiny č.6 pro variantu kanálku 2A**	**Přepočítaný objem zmetků z dutiny č.6 pro variantu kanálku 2B**
13 s	4,9 %	3,7 %	3,6 %
9 s	13,9 %	1,7 %	4,9 %
7 s	37,6 %	82,9 %	71,9
5 s	100 %	100 %	100%

Tab. 19: Hodnoty pro porovnání obou variant



Obr. 40: Graf porovnání získaných výsledků

Z výsledků je zřetelný vliv úpravy chlazení a to v obou navržených variantách. Při vzájemném porovnání obou variant je viditelný rozdíl u sníženého času chlazení na 9 s. U varianty A došlo k snížení podílu zmetků a u varianty B k navýšení. To vše při výrazném zvýšení podílu zmetků vyrobených dutinami bez úprav.

V případě dalšího snížení času chlazení, na dobu 7 s, je výrazné mnohem větší navýšení podílu neshodných výrobků u dutin s upraveným chlazením oproti ostatním. V tomto případě by mohlo docházet k výraznému rozdílu ochlazení na různých částech výrobku. Pravděpodobně jsou části v kontaktu s jádrem ochlazeny mnohem více, než vzdálenější části výrobku

K zjištění optimálního nastavení délky chlazení bude muset být provedeno další testování. Zvolené hodnoty provedeného testování zmenšili rozsah použitelných hodnot. Při něm by byla soustředěna oblast délky doby chlazení okolo hodnoty 9 s. Postupným zkoušením s nastavením okolo této hodnoty by mohlo být docíleno optimálního času.

Dále by bylo vhodné vyzkoušet vliv mírně zvýšené teploty chladícího média.

U získaných výsledků je třeba zvážit vliv ostatních parametrů vstřikování na podíl zmetků z dutin s neupraveným chlazením. U dutiny číslo 4 byl po testování zjištěn problém s ústím vtoku do dutiny. Tento problém mohl ovlivnit podíl zmetků, ke kterým je pozorovaná dutina srovnávána. Je třeba také brát relativnost výsledků. Testovaná forma se dlouhodobě potýká s velkými výkyvy poměru zmetků vlivem jejího používání. Data získaná z měření jsou konkrétní pouze pro aktuální stav formy, který byl po proběhlé údržbě.

Dále je třeba brát v úvahu dlouhodobější používání nově navržených jader. Vlivem zanesení a vzniku koroze uvnitř kanálku, by mohla být životnost tohoto jádra nižší v porovnání s původním provedením. Vlivem zanášení by mohlo dojít ke snížení tepelné vodivosti v relativně krátké době. Veškeré tyto vlivy by ukázalo dlouhodobější testování.

4.2.1 Získaná úspora

V případě zanedbání veškerých vlivů, které mohou při dlouhodobějším provozu nastat, lze pro získané hodnoty vypočítat úsporu strojního času pro sledované období.

$úTs = q/n*ú_{Tchl}$

kde :

úTs = úspora strojního času

q = objem výroby za sledované období

n = počet výlisku vyrobených během jednoho vstřikovacího cyklu

$ú_{Tchl}$= úspora času chlazení vzniklá optimalizací na jeden vstřikovací cyklus

Pro tento případ platí:

q = 190 000 [ks/měsíc]

n = 4 [ks]

$ú_{Tchl}$= 4 [s/cyklus]

Po dosazení

úTs = 190 000/4*4 =190 000 s/měsíc = 52,8 h/měsíc

Pokud by byla známa strojní hodinová sazba používaného stroje, vynásobením bychom získali úsporu v kč/ měsíc.

V této úspoře ještě nejsou započítány úspory vzniklé snížením poměru zmetků ve výrobní dávce, protože není známá cena jednoho kusu výrobku.

Pro úplné ekonomické zhodnocení investice by museli být známé skutečné úplné náklady na výrobu nového řešení formy a také cena výrobku.

5 Závěr

V této práci byla provedena úprava chladícího systému vybrané části formy, pro zadaný ty typ vstřikovaného výrobku.

V první části byl proveden rozbor současného stavu, při kterém dochází k určitým rezervám ve výrobě. Byly analyzovány vstupní informace a na základě jejich použití byla vybrána konkrétní součást pro navrhnutí úprav.

Dále byla provedena analýza problematiky, které se zadaný úkol týkal. Předběžně bylo rozhodnuto o využití aditivní technologie výroby pro výrobu nově navržené součásti. Proto byla provedena analýza problematiky aditivní technologie a problematiky konkrétně vybrané metody výroby.

Po analýze problematiky vstřikování plastů a aditivní technologie výroby, bylo navrhnuto vlastní konstrukční řešení s ohledem na získané informace z předchozích částí. Byl také navrhnut postup pro kompletní výrobu vybrané součásti. Navrhnutá součást byla vyrobena technologií DMLS a dále byla obrobena do požadované kvality. Kvůli nedostatku času byla provedena část výroby prototypu odlišným způsobem, než který by vyžadovala výroba finální součásti.

Vyrobený kus byl podroben testování při výrobě vstřikovaného výrobku a byly sledovány a vyhodnoceny dosažené výsledky. Kvůli nedostatku času byly, do doby odevzdání této práce, provedeny pouze hrubé testy. Podrobnější testování by mohlo být naplánováno dle získaných výsledků z proběhlého testování.

Pro plné nasazení nově navrženého dílu do výroby je třeba zvážit ekonomickou výhodnost nového řešení. V současné době není k dispozici dostatečné množství informací o finálních potřebných nákladech pro uvedení navrhnuté změny do praxe. Ekonomické zhodnocení bude možné provést až po dlouhodobějším sledování všech vlivů, kterými je nový návrh zatížen. Těmito vlivy jsou například životnost kanálku nově navrženého jádra a náklady opravu tohoto jevu. Dále náklady na teplené zpracování, náklady na obrobení tepelně zpracovaných součástí a hlavně konečná úspora vzniklá optimalizací procesu.

Vzniklá časová úspora z naměřených hodnot, je ale vysoká a tak by měla být návratnost investice zajištěna v poměrně krátkém čase.

Seznam použité literatury

[1] KUBEC KRÓNEROVÁ, E. *Prezentace KNM* [citováno dne 14.1. 2017]

[2] *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [Online]. [citováno dne 14.1. 2017]
<https://publi.cz/books/181/02.html>

[3] 14220. *Tváření plastů a výroba forem II* [Online]. [citováno dne 16.1. 2017]
<http://www.14220.cz/technologie/tvareni-plastu-a-vyroba-forem-ii/>

[4] *mould-technology.blogspot.cz* [Online]. [citováno dne 21.1. 2017]
<http://mould-technology.blogspot.cz/2012/03/cooling-layout-and-cooling-method.html>

[5] BOBČÍK, L. a kol.: *Formy pro zpracování plastů II. díl* – Vstřikování termoplastů, Brno, UNIPLAST 1999 [citováno dne 5.2. 2017]

[6] Meusburger. *E-Katalog* [Online]. [citováno dne 5.2. 2017]
<https://ecom.meusburger.com/e_menu/index.asp?set_gruppe=9>

[7] GWK. *Integrat 4D* [Online]. [citováno dne 16.2. 2017]
<http://www.gwk.com/en/downloads.html?file=files/redakteur/downloads/prospekte/segmenterte_werkzeugtemperierung/system_integrat_cz.pdf >

[8] Innomia. *Konformní chlazení* [Online] [citováno dne 19.2. 2017]
<*http://www.innomia.cz/sluzby/konformni-chlazeni*>

[9] Konstrukter.cz. *3D tisk kovů* [Online] [Ccitováno 19.2. 2017]
http://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/

[10] Wikipedia. *Solid Ground Curing*.[Online] [citováno dne 27.2. 2017]
<*https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_Diagram_of_Solid_Ground_Curing_Process.jpg*>

[11] Prusa3d. [Online]. [citováno dne 27.2. 2017]
<http://www.prusa3d.com/wp-content/uploads/2016/05/frontpage.jpg#_ga=2.261507787.792819113.1496256241-1145260501.1474542807>

[12] Pinterest. *SLS* [Online]. [citováno dne 27.2. 2017]
Dostupné z:
<https://cz.pinterest.com/pin/305892999666016595>

[13] 3d-labs [Online]. [citováno dne 27.2. 2017]
<http://3d-labs.de/mjm/?lang=en>

[14] MM průmyslové spektrum. *Nekonvenční metody obrábění*[online].
[citováno dne 27.2. 2017]
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>

[15] MM průmyslové spektrum. *Rapid manufacturing technologií ProMetal* [online].
[citováno dne 27.2. 2017]
<http://www.mmspektrum.com/clanek/rapid-manufacturing-technologii-prometal.html>

[16] 3d printing from scratch [online]. [citováno dne 12.3. 2017]
<http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>

[17] RPM Inovations. *Laser Engineered Net Shaping* [online]. [citováno dne 12.3. 2017]
<http://www.rpm-innovations.com/laser_deposition_technology_advances_additive_manufacturing_and_repair>

[18] Konstrukter.cz. *Jak funguje 3d tisk metodou DMLS* [online]. [citováno dne 12.3. 2017]
<http://www.konstrukter.cz/2015/03/09/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>

[19] Customparnet.com. *Direct metal laser sintering* [online]. [citováno dne 22.3. 2017]
<http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>

[20] EOS [online]. [citováno dne 12.3. 2017]
<https://www.eos.info/material-m>

[21] 14220.cz. *3d tisk*[online]. [citováno dne 12.3. 2017]
<http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-uvod/>

[22] ČAPKOVÁ, V. *Omezující parametry 3D tisku,*
Plzeň: Diplomová práce, ZČU – KTO, 2015. [online]. [citováno dne 2.4. 2017]
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/20385/1/Diplomova_prace_capkova_veronika_.pdf>

[23] YAN, Chunze. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. 2014.

[24] pencerw.com [online]. [citováno dne 12.4. 2017]
<http://pencerw.com/feed/2015/8/18/notes-on-magics>

[25] EOS. *EOS M290*[online]. [citováno dne 12.4. 2017]
<https://www.eos.info/eos_m_290_metal_additive_manufacturing_system>

[26] EOS. *EOS MS1* [online]. [citováno dne 3.5. 2017]
<http://gpiprototype.com/images/PDF/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf>

[27] EOS *EOS IN718* [online]. [citováno dne 3.5. 2017]
<http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/4528b4a1bf688496/ff974161c2057e6df56db5b67f0f5595/EOS_NickelAlloy_IN718_en.pdf>

[27] EOS. *EOS SteinlessSteel 316 L* [online]. [citováno dne 22.5. 2017]
<https://cdn1.scrvt.com/eos/77d285f20ed6ae89/dd6850c010d3/EOSStainlessSteel316L.pdf>

[28] Zeiss. *Zeiss Contura* [online]. [citováno dne 29.5. 2017]
https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/contura.html

[29] STANĚK, J., NĚMEJC, J.: *Metodika zpracování a úprava diplomových prací.* Plzeň : ZČU, 2005

Seznam obrázků

Obr. 1: Dvouhlavňový konektor 5
Obr. 2: Tvarové jádro 6
Obr. 3: Kryt konektoru („Beruška") 8
Obr. 4: Deformace „Berušky" 9
Obr. 5:Sestava bočního šíbru s jádrem 9
Obr. 6: Schéma vstřikovacího lisu [1] 11
Obr. 7:části vstřikovacího cyklu [2] 11
Obr. 8: Vstřikovací forma [3] 13
Obr. 9: Temperační systém [4] 14
Obr. 10: Ukázka správného a nesprávného umístění kanálků[5] 15
Obr. 11: Vrtaný temperační systém [3] 17
Obr. 12: Normálie pro TS [6] 18
Obr. 13: GWK Integrat 4D [7] 19
Obr. 14: Část formy vyrobena aditivní technologií [8] 19
Obr. 15: Popis metody SGC [10] 23
Obr. 16: FDM 3D tiskárna [11] 24
Obr. 17: Výrobek vyrobený metodou SLS [12] 24
Obr. 18: Metoda MJM [13] 25
Obr. 19: Popis metody EBM [16] 27
Obr. 20: Popis metody LENS [17] 28
Obr. 21: Popis metody DMLS [19] 29
Obr. 22: Schodišťový efekt [21] 32
Obr. 23: Orientace součásti [21] 33
Obr. 24: Deformace při výstavbě převyslých konců [23] 34
Obr. 25: Generace podpůrných struktur [24] 35
Obr. 26: EOS M290[25] 36
Obr. 27: Forma č.1- Varianta A 42
Obr. 28: Forma č. 1- Varianta B 42
Obr. 29: Umístění jádra v držáku jader 45
Obr. 30: Varianta kanálku 2A 46
Obr. 31: Varianta 2B 47
Obr. 32: Výsledky deformace pro obě jádra 48
Obr. 33: Optimalizace kanálku pro DMLS 49

Obr. 34: Orientace součástí při výrobě 51
Obr. 35: Vytištěná jádra 52
Obr. 36: Nárysný pohled 53
Obr. 37: Půdorysný pohled 53
Obr. 38: Bokorysný pohled 54
Obr. 39: vrchní plocha jádra 60
Obr. 40: Graf porovnání získaných výsledků 63

Seznam tabulek

Tab. 1:Vstupní informace pro zadanou formu č.1 7
Tab. 2: Vstupní informace pro zadanou formu č. 2 10
Tab. 3: Parametry výrobního stroje EOS M290 [25] 36
Tab. 4: Dostupné materiály pro výrobu [20], [26], [27], [28] 37
Tab. 5: Chemické složení materiálu MS1 [26] 38
Tab. 6: Vlastnosti materiálu MS1 [26] 39
Tab. 7: Hodnoty pro MKP analýzu [26] 46
Tab. 8: Porovnání délky výroby dle nastavené výšky vrstvy 51
Tab. 9: Naměřené hodnoty pro variantu 2A 54
Tab. 10: Naměřené hodnoty pro variantu 2B 55
Tab. 11: Upravené chlazení šíbru 56
Tab. 12: Plánované parametry pro testování 57
Tab. 13: Odchylky ve směru osy X 58
Tab. 14: Odchylky ve směru osy Y 59
Tab. 15: Odchylky ve směru osy Z 59
Tab. 16: Odchylka rovnoběžnosti os 60
Tab. 17:Získané hodnoty pro variantu 2A 61
Tab. 18: Získané hodnoty pro variantu 2B 61
Tab. 19: Hodnoty pro porovnání obou variant 62