



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ČÁSTÍ PROTOTYPOVÝCH FOREM S VYUŽITÍM METOD RAPID PROTOTYPING

PRODUCTION OF PROTOTYPE MOLD PARTS USING RAPID PROTOTYPING METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Kaloda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Vít Kaloda
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výroba automobilových světel a technických svítidel
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba částí prototypových forem s využitím metod rapid prototyping

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor v úvodu provede rešerši související problematiky. Hlavním cílem je navržení a realizace tvarových vložek, což v kombinaci s univerzálním rámem zajistí možnost snadné a rychlé výměny vložky. Což má zajistit snížení časové náročnosti přechodu na další výrobek především u malých sérií. Práce bude obsahovat jak konstrukční část, tak praktickou realizaci pro zvolený díl. Součástí práce bude volba materiálu a návrh výroby. Výsledkem práce bude doporučená metoda výroby využitelná pro praxi.

Cíle diplomové práce:

- rešerše zvolené problematiky
- návrh dílů formy pro univerzální rám
- výroba dílů formy pro univerzální rám
- testování funce
- vyhodnocení a doporučení do výroby

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-8-271-0614-1.

GRIMM, Todd. User's guide to rapid prototyping. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2004. ISBN 978-0872636972.

BRYCHTA, Josef. Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.

BUDMEN, Isaac a Anthony ROTOLO. The book on 3D printing. 1. Lexington, KY: CreateSpace, 2013. ISBN 9781489529442.

MOAVENI, Saeed. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008, xv, 861 s. Pearson education international. ISBN 978-0--3-241651-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V diplomové práci bylo poukázáno na možnost využití metod rapid prototyping v oblasti vstřikování plastů, konkrétně ke zhotovení tvarových vložek do vstřikovací formy. Byl využit univerzální rám vstřikovací formy a byly měněny tvarové vložky.

Stěžejní část práce byla konstrukce vstřikovací formy s následnou praktickou výrobou tvarových vložek pro určený díl. V úvodní části byla provedena teoretická rešerše, jaké výrobní metody v kombinaci s vhodnými materiály by bylo možné teoreticky využít. Dále byly zvoleny metody polyjet a DLP, kterými byly vyrobeny komponenty (tvárník a tvárnice).

Výsledkem diplomové práce byla sumarizace všech parametrů, porovnání materiálů a výrobních metod. Do vstřikovací formy byly vstřikovány materiály polypropylen a polyamid 6, ze kterých byly vyrobeny první prototypové výrobky. Ke zvolenému typu byl vytvořen návod na výrobu tvarových vložek s doporučenou technologií a materiálem, která by byla možná využít v praxi.

Klíčová slova

3D tisk, Rapid Prototyping, vstřikování, vstřikovací forma, 3D skenování

ABSTRACT

The diploma thesis pointed out the possibility of using rapid prototyping methods in the field of plastic injection, specifically to make shaped inserts into the injection mold. The universal frame of the injection mold was used and only the shaped inserts were changed.

The main part of the work was the construction of an injection mold with the subsequent practical production of shaped inserts for a specified part. In the introductory part, a theoretical search was performed, about which production methods in combination with suitable materials could be theoretically used. Furthermore, the polyjet and DLP methods were chosen, which were used to produce components (core and cavity).

The result of the diploma thesis was a summary of all parameters, comparison of materials and production methods. Polypropylene and polyamide 6 materials were injected into the injection mold, from which the first prototype products were made. Instructions for the production of shaped inserts with the recommended technology and material were created for the selected type, which could be used in practice.

Key words

3D printing, Rapid Prototyping, injection moulding, injection mould, 3D scanning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KALODA, Vít. *Výroba částí prototypových forem s využitím metod rapid prototyping* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124361>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Výroba částí prototypových forem s využitím metod rapid prototyping** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.6.2020

.....
Datum

.....
Bc. Vít Kaloda

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jaromíru Podzemnému, Václavu Valáškoví a svému vedoucímu Ing. Oskaru Zemčíkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Taktéž bych chtěl poděkovat firmě ABB, která byla ochotna pokrýt náklady na zhotovení výrobků, a firmě MA plast, kde bylo možné provést testování.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
1 SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU TECHNOLOGII RAPID PROTOTYPING A VYUŽITÍ 3D TISKU.....	10
1.1 Základní postup rapid prototypingu.....	10
1.2 Metody 3D tisku.....	11
1.3 Technologie na bázi fotopolymeru.....	11
1.3.1 Metoda stereolitografie	11
1.3.2 Metoda DLP.....	12
1.3.3 Metoda polyjet	12
1.4 Technologie na bázi práškových materiálů.....	13
1.4.1 Metoda SLS	13
1.4.2 Metoda SLM.....	14
1.4.3 Metoda DMLS	15
1.5 Technologie na bázi selektivního nanášení materiálu.....	15
1.5.1 Metoda FDM.....	15
1.5.2 Metoda ADAM.....	16
1.6 Speciální technologie	16
1.6.1 3D tisk za pomoci zařízení Arburg Freeformer	16
1.6.2 Princip vakuového lití.....	17
1.6.3 Galvanoplastika	18
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	19
2.1 Vstřikovací cyklus v diagramu Pi-t.....	20
2.2 Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku.....	22
2.3 Vstřikovací stroj.....	23
2.3.1 Vstřikovací jednotka	24
2.3.2 Uzavírací jednotka	24
2.3.3 Řízení a ovládání stroje.....	24
3 VSTŘIKOVACÍ FORMA	25
3.1 Konstrukce forem.....	25
3.2 Základní části vstřikovací formy.....	26
3.3 Násobnost forem	27

3.4	Vtokový systém.....	27
3.4.1	Studená vtoková soustava.....	27
3.4.2	Vyhřívané vtokové soustavy.....	29
3.5	Vyhazovací systém.....	30
3.5.1	Mechanické vyhazování	30
3.5.2	Vyhazování stírací deskou	31
	Temperace forem	31
3.6	Odvzdušnění formy	32
4	MATERIÁLY	33
4.1	Polymery pro vstřikování	33
4.1.1	Plasty.....	33
4.1.2	Termoplasty	33
4.1.3	Reaktoplasty.....	34
4.2	Materiály pro 3D tisk	35
4.2.1	Tiskové struny.....	35
4.2.2	Fotopolymery	36
4.2.3	Práškové.....	36
5	SKENOVÁNÍ	37
5.1	Triangulace.....	37
5.2	3D laserové skenování a jeho princip	38
5.3	Rozdělení skenovací techniky.....	38
5.4	Strukturované světlo.....	38
5.5	Základní princip strukturovaného světla	39
5.6	ATOS triple Scan	40
6	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	42
7	KONSTRUKCE PROTOTYPOVÉ VSTŘIKOVACÍ FORMY	43
7.1	Volba vzorového dílu	43
7.2	Násobnost formy	44
7.3	Zaformování výstřiku.....	44
7.4	Konstrukční řešení tvarových částí	45
7.4.1	Tvárník.....	45
7.4.2	Tvárnice	46
7.5	Vtokový systém.....	46
7.6	Levá strana vstřikovací formy.....	47

7.7	Pravá strana vstříkovací formy.....	48
7.8	Vyhazovací systém.....	49
7.9	Temperace formy	50
7.10	Vstříkovací forma	50
8	VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK	51
8.1	Volba vhodné metodiky	51
9	VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK METODOU POLYJET.....	53
9.1	Skenování tvarových vložek	59
9.2	Analýza rozměrů	61
9.2.1	Rozměrová analýza tvárníku	62
9.2.2	Rozměrová analýza tvárnice	67
10	VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK METODOU DLP.....	71
10.1	Tisk tvárnice metodou DLP.....	72
10.2	Tisk tvárníku metodou DLP	74
10.3	Lití polyuretanu do tvarových vložek.....	75
11	TESTOVÁNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	79
11.1	Vrtání děr pro vyhazovače.....	79
11.2	Parametrické nastavení vstříkovacího stroje	80
11.3	Testování tvarových vložek.....	81
11.3.1	Testování vstříkovací formy pro polyjet – varianta 1	81
11.3.2	Testování vstříkovací formy pro polyjet – varianta 2.....	84
11.3.3	Zhodnocení výsledků a doporučení pro budoucí návrh.....	86
11.3.4	Nové konstrukční řešení pro tvarové vložky	86
11.3.5	Testování vstříkovací formy pro polyjet – varianta 3.....	90
12	TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODOCENÍ	93
12.1	Technické zhodnocení	93
12.2	Ekonomické zhodnocení	95
	ZÁVĚR	101
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	102
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	105
	SEZNAM PŘÍLOH.....	106

ÚVOD

Předtím, než je nový výrobek uveden na trh, je čas vývoje a vzniku prvotního prototypu jedním z nejnáročnějších a nejdelších procesů. V dnešní době je jedním z nejdůležitějších aspektů rychlá reakce na požadavky zákazníka a zkrácení doby vývoje, které poskytuje výrazné snížení nákladů a konkurenční výhodu. Smyslem rapid prototyping je tvorba reálného modelu za co nejkratší čas v nejvyšší možné kvalitě. Obvykle jsou výrobky zhotovené metodou rapid prototyping používány jako díly sloužící především pro vizualizaci. V rámci diplomové práce bych chtěl ovšem ukázat, jak budou zmíněnou metodikou vyráběny nástroje do vstřikovací formy.

Budou vyráběny tvarové vložky neboli tvárník a tvárnice do univerzálního rámu vstřikovací formy. V takovém případě je finální výrobek nazýván výstřik, který je vyroben z polymerního materiálu. Metody 3D tisku nenabízejí ovšem dostatečně široké spektrum polymerních materiálů, což je problém v případě plnění požadavků podle zákazníka na finální výrobek. Dále polymerní materiály vyrobené 3D tiskem a vstřikováním nemají stejné vlastnosti, což je značný problém v případě, kdy je potřeba otestovat výrobky za pomoci mechanických, chemických či termálních zkoušek. Proto budou 3D tiskem vyráběny pouze tvarové vložky, protože je možno vytisknout jakkoliv konstrukčně složitý díl, přičemž cena nebude vzrůstat. Pro 3D tisk jsou hlavními kritérii maximální rozměry a objem daného výrobku. V daný moment vzniká výrazná úspora vůči složitějším tvarovým vložkám, kde nestačí pouze frézování, ale je nutno využít speciálních technologií za pomoci elektroerozivního obrábění. S tím je spojen i požadavek, aby speciální stroje a přípravky byly součástí firmy, jinak by bylo nutno udělat dodatečné úpravy v externí firmě.

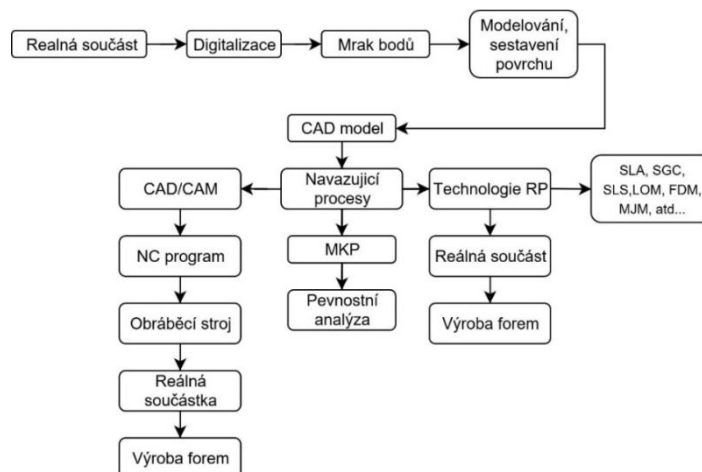
V rámci diplomové práce bude poukázáno na možnost výroby tvarových vložek do vstřikovací formy nekonvenčními metodami. Bude navržen díl, pro který bude navržena vstřikovací forma pro ukázkou využití dané metodiky. Hlavním cílem práce je poukázat na propojení využití metod rapid prototyping se vstřikováním plastů.

1 SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU TECHNOLOGIÍ RAPID PROTOTYPING A VYUŽITÍ 3D TISKU

Rapid prototyping je soubor technologií, pomocí kterých je možné vytvořit obtížné složité objekty. Počátky nacházíme v druhé polovině 20. století, první koncept od Davida E. H. vznikl v roce 1974 a byl publikován v časopise *New Scientist*. V roce 1984 byla patentována technologie stereolitografie od Charlese Hulla. Technologie využívá kombinaci tekutého fotopolymery a UV laseru. Na to navazovala technologie FDM (fused deposition modeling), kdy je materiál ve formě strunového drátu vytlačován přes tiskovou hlavu. Technologie od Scotta Crumpa byla patentována v roce 1988. Tiskárna od firmy Stratasys byla uvedena na trh v roce 1992. V rozmezí let 1990–1995 byly vyvíjeny technologie slinování kovů pro varianty SLS, SLM a DMLS. V roce 1993 byla institutem Massachusetts Institute of Technology (MIT) patentována technologie 3D printing, přičemž byl spojován práškový materiál s tekutým pojivem za pomoci tryskové hlavy. Pořizovací cena zmíněných strojů se pohybovala v řádech milionů korun a tisk byl taktéž velmi drahý. V roce 2009 vypršel patent na technologii FDM a byl započat intenzivní rozvoj a pronikání do společnosti, čímž došlo k výraznému snížení ceny tiskáren. V dnešní době je rapid prototyping nedílnou součástí vývoje jakéhokoliv odvětví. [1]

1.1 Základní postup rapid prototypingu

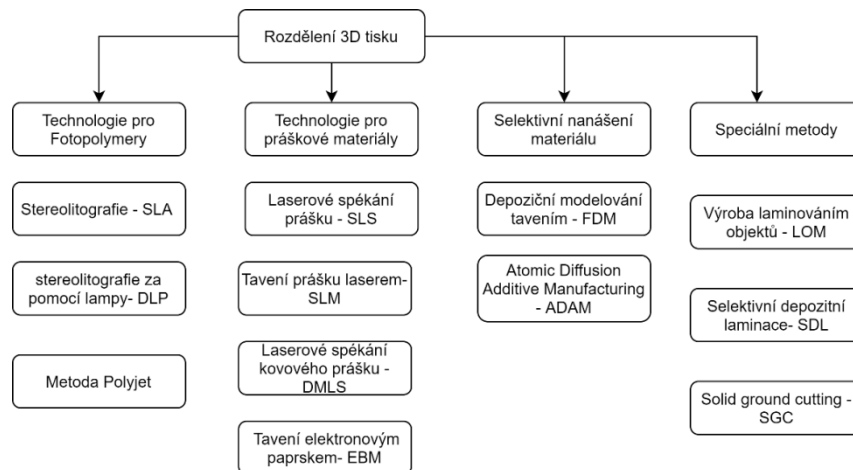
Technologická výroba fyzického modelu, komponentu či dílu pracuje na principu podle rozložení modelu v elektronické podobě do tenkých vrstev a postupném sestavení do reálného modelu. Model je v elektronické podobě nejčastěji vytvořen v CAD programu nebo pomocí reverzního inženýrství neboli naskenování výrobku. Model je stavěný na základní desce, která se po dokončení tisku posune vždy o tloušťku předchozí vrstvy. Operace je opakována stále dokola, dokud výrobek není zcela dokončen. Velikost modelu je vždy omezena podle velikosti komory dané 3D tiskárny. 3D tisk je rozčleněn podle dané technologie a vstupního materiálu. Jak je již z popisu jasné, hlavní rozdíl mezi obráběním a 3D tiskem je ten, že při 3D tisku je materiál nanášen podle parametrů a při obrábění dochází k odebrání materiálu. Postup 3D tisku je členěn do tří základních kategorií, které jsou obdobné jako při CNC obrábění (příprava dat, vlastní zpracování a zhodnocení výsledků). Obrázek č.1 schematicky popisuje postup. [1]



Obr. 1 Vývoj a proces vzniku nové součásti podle [7].

1.2 Metody 3D tisku

Metody 3D tisku se rozdělují podle tloušťky nanášení vrstev, teploty tisknutí či podle výrobního postupu, ovšem nejčastěji se rozdělují podle druhu vstupního materiálu, jak lze vidět na obrázku č.2. [1]



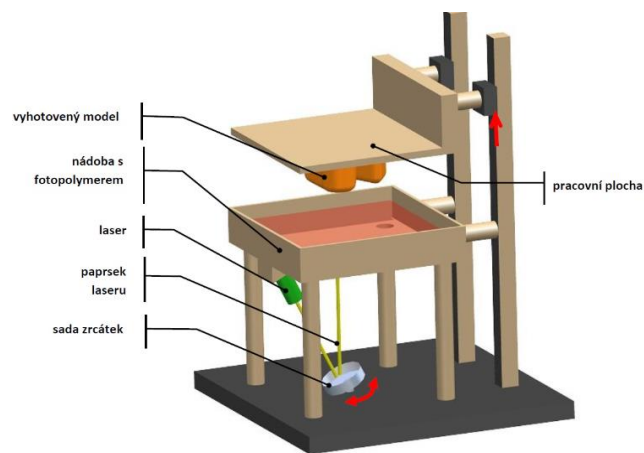
Obr. 2 Rozdělení metod 3D tisku podle [31].

1.3 Technologie na bázi fotopolymeru

V nádobě s tekutým fotopolymerem je umístěna tisková deska, pomocí které se stanoví výška požadované vrstvy. Světelný paprsek vykreslí požadovaný tvar, čímž dojde k požadovanému vytvrzení polymeru v potřebném tvaru. Poté je deska posunuta o další vrstvu a operace je opakována, dokud není výrobek zcela hotov. V rámci post processingu je výrobek opláchnut v isopropylalkoholu a následně se dotvrdí pomocí UV světla. [3]

1.3.1 Metoda stereolitografie

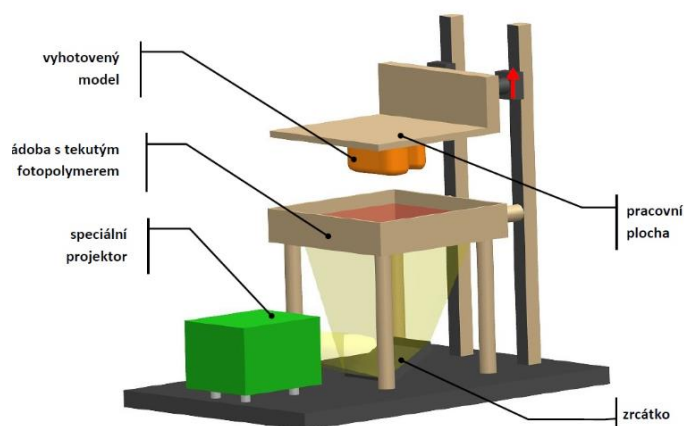
Tato metoda funguje na principu vytvrzování tekutého fotopolymeru za pomoci laserového záření. Tloušťka vytvrzované vrstvy je kolem 0,01–0,15 mm. Kapalná pryskyřice neboli fotopolymer je součástí těla tiskárny včetně stavební desky, která se pohybuje v axiálním směru nahoru či dolů, jak lze vidět na obrázku č.3. Pryskyřice je vytvrzována, je-li vystavena konkretizované vlnové délce světla. Obvykle se jedná o UV spektrum. Stavební deska obvykle začíná v horní pozici a postupuje směrem dolů, ovšem hlava laseru se pohybuje pouze v osách X a Y. Po osvětlení neboli vytvrzení jedné vrstvy se nosná deska ponoří o tloušťku hlouběji do lázně a začne se vytvářet další vrstva. Aby nedocházelo ke zbytečně velkým nepřesnostem, je nutné před osvětlením každé vrstvy zarovnat povrch tzn. stěračem. Celý děj se opakuje, dokud není finální výrobek hotov. Popsaná metoda vyniká především svou přesností, protože není třeba dokončovacích operací. Je ovšem nutno výrobek opláchnout v isopropylakoholu a dále je vhodné vložit pod UV lampu pro vytvrzení. Avšak mezi hlavní nevýhody patří nízká odolnost vůči mechanickému zatížení, poměrně zdlouhavý výrobní proces a omezené množství materiálů. Taktéž cena za výrobek je v porovnání s FDM metodou mnohem vyšší. [2]



Obr. 3 Metoda stereolitografie podle [33].

1.3.2 Metoda DLP

Digital light processing je podobná technologii, která se nazývá stereolitografie. Největším rozdílem mezi dvěma zmíněnými metodami je použitý zdroj světla, v tomto případě se jedná o výkonnou lampu, která je vidět na popsaném obrázku č.5. Část z tištěné plochy je rozdělena do rastrového obrazce, který má dané rozlišení. Popsaná matice je tištěna za pomoci LCD panelu. LCD panel světelný paprsek v tištěných bodech propouští nebo odráží přes čočku na potřebnou plochu fotopolymeru. Body, které nebudou tištěny, budou pomocí DMD (deromable mirror device) odkloněny nebo pohlceny pomocí LCD panelu. Hlavní výhodou vůči metodě SLA je použití malého množství fotopolymeru v nádrži a mnohem větší rychlost tisku, protože projektor osvětlí celou vrstvu najednou. Jelikož je fotopolymer poměrně drahá tekutina, cenová náročnost výrobního cyklu výrazně klesne. Vlastnosti má obdobné jako metoda stereolitografie. [4,5]

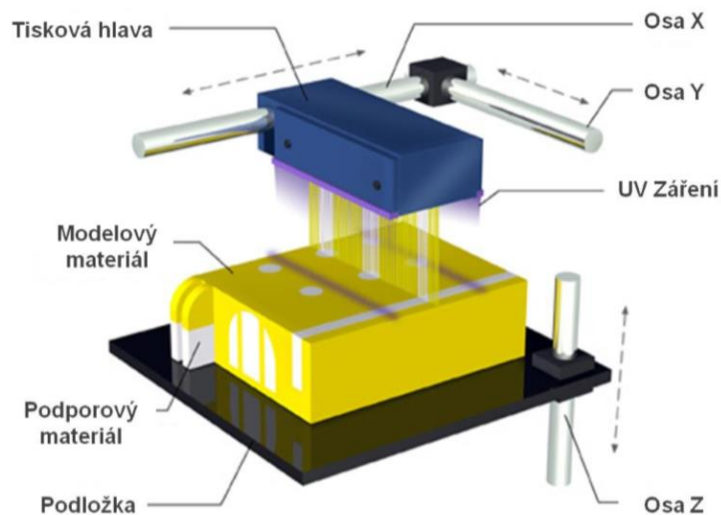


Obr. 5 Metoda DLP podle [31].

1.3.3 Metoda polyjet

Firma Objet Geometries Ltd s firmou 3D systems vyvinuly novou technologii polyjet, kterou odkoupila společnost Stratasys Inc. Technologie funguje na principu nanášení fotopolymerního materiálu pomocí injekt hlavy (v překladu inkoustová tryska). Fotopolymer

je buďto organický, nebo syntetický materiál, změna probíhá za působení světla. Principiálně je funkčnost stejná jako u inkoustové tiskárny. Hlavní diference je v použití materiálu, přičemž místo inkoustu je na platformu vstřikován polymer v tenkých vrstvičkách okolo 0,016 mm, které jsou vytvrzovány UV světlem. Obrázek č.6 vizualizuje danou metodiku. Zmíněné firmy vytvořily skoro totožné zařízení, rozdíl je pouze v aplikaci materiálu použitého na podpurné konstrukce. Materiál není vytvrzován stejně jako materiál výrobku, tudíž po skončení tisku jsou podpurné konstrukce odstraněny tlakem vody či manuálně. Voskový materiál využívala firma 3D systems. Po dokončení tisku celého výrobku je podpurný materiál roztaven v temperační komoře. Hlavními výhodami popsané technologie jsou především vysoká kvalita materiálu, hladkost povrchu a detailní zpracování dílu. Jelikož není třeba vysušovat, ale pouze se provádí úprava povrchu a odstranění podpor, jedná se o poměrně rychlý proces. Technologie je tichá, čistá, bezpečná a jednoduchá na obsluhování. [6]



Obr. 6 Metoda polyjet podle [32].

1.4 Technologie na bázi práškových materiálů

Na tiskové desce je rozprostřený stavební materiál ve formě prášku (kov, sádra, polymer). Model je spojován pomocí laseru nebo lepidla. Tisková deska se vždy posune o definovanou výšku a tím dojde k vytvrzení potřebného tvaru. Celý proces se opakuje, dokud není model vytištěn. [3]

1.4.1 Metoda SLS

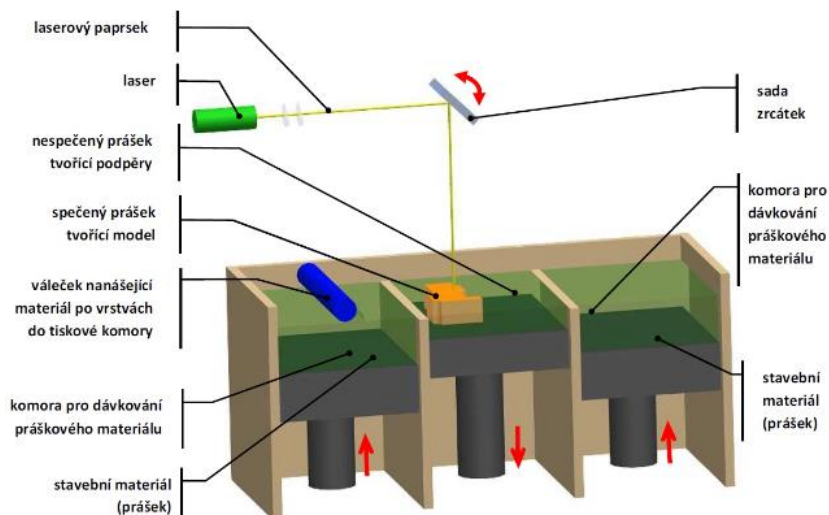
Metoda selective laser sintering neboli spékání prášků laserem je rozčleněna podle typu použitého materiálu.

Rozdělení podle použitého materiálu:

- spékání kovového prášku,
- spékání plastového prášku,
- spékání keramického prášku.

V první řadě je na desku nanášena prvotní vrstva práškového materiálu. Za pomoci působením oxidu uhličitého a laseru je prášek nataven. Dochází ke spékání v požadovaném místě. Okolní materiál není spečen, slouží pouze jako podpora. Jakmile je dokončena jedna vrstva, nosná deska je posunuta o danou tloušťku jedné vrstvy dolů a následující vrstva je nanášena válečkovým mechanismem. Proces spékání se opakuje, dokud není model zcela zhotoven, jak jde vidět na obrázku č.7. Jak již bylo zmíněno, materiál je ve formě prášku, jehož částice jsou velké 20 až 100 μm . Metoda SLS vyžaduje stavbu podpor, které jsou vytvořeny nespečeným práškem v okolí modelu. Po tvorbě modelu je třeba aplikovat dokončovací operace pro odstranění podpor a zlepšit drsnost povrchu, jelikož jeho kvalita je v porovnání s ostatními metodami horší. 3D tiskárna je rozměrově a energeticky náročné zařízení. Využívá se pro výrobu nástrojů a forem pro výrobu plastových či keramických výrobků. [7]

1.4.2 Metoda SLM



Obr. 7 Technologie SLS podle [31].

Technologie selective laser melting je principiálně velmi podobná metodě SLS – s tím rozdílem, že nedochází ke spékání prášků, ale k úplnému roztavení kovového materiálu. Výrobek není tvořen jednotlivými částicemi, které jsou spečené dohromady, ale vzniká homogenní výrobek s lepšími fyzikálními vlastnostmi. Při SLM je třeba, aby tisk probíhal v komoře se speciální ochranou atmosférou inertních plynů. Nejčastěji se využívá dusíku nebo argonu. Tato metoda taktéž využívá velmi silných laserů se speciálními zrcadly, které paprsek usměřují. Hlavní výhodou je ta, že vyrábí pevnější a silnější výrobky s minimálním odpadem vzhledem ke konvenčním metodám. Ovšem celý výrobek lze zhotovit pouze z jednoho typu materiálu. Mezi další nevýhody patří vysoké ceny tiskáren a tisku. Kovové výtisky mají jiné fyzikální vlastnosti než kovové odlitky a nejsou vhodné pro velkovýrobu. Taktéž je třeba výrobek žíhat pro odstranění vnitřního pnutí a zvolit vhodnou dokončovací operaci pro zlepšení povrchu. [8]

1.4.3 Metoda DMLS

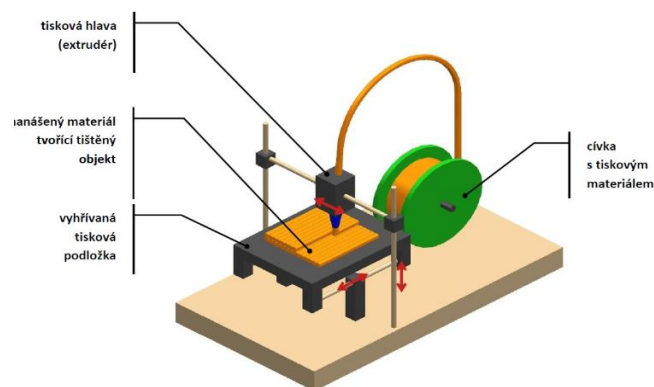
Technologie je založena na stejném principu jako metoda SLS, přičemž se využívá pouze kovového materiálového prášku na rozdíl od SLS. Jsou rozdílné podmínky spékání. Je nutno využívat silnějšího laserového paprsku a jemnějšího práškového materiálu. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 20–150 μm . Hlavní výhodou je poměrně přesná výroba plně funkčních kovových prototypů, jejich mechanické vlastnosti jsou téměř totožné s vlastnostmi výrobků zhotovených tradičními metodami. Po výtisku je třeba vhodnou metodikou odstranit podpory a aplikovat vhodnou dokončovací metodu pro zlepšení drsnosti výrobku. Nevýhodou metody je cena tiskárny a vysoká energetická náročnost. Nespoteřovaný prášek je z 98 % znovu používán k výrobě. Ovšem tento typ technologie vyniká vysokou pevností, odolností vůči tepelnému namáhání a širokým spektrem použitelných materiálů. [7]

1.5 Technologie na bázi selektivního nanášení materiálu

Jsou to technologie, kdy je materiál ve formě strunového drátu vytlačován přes tiskovou hlavu. Popisované metody mají velmi obdobný princip. Hlavními výhodami zmíněných technologií jsou nízké pořizovací náklady a široké spektrum použitelných materiálů. [3]

1.5.1 Metoda FDM

Hlavní princip spočívá v tavení termoplastického materiálu, který je navinutý na držáku ve formě drátu na cívce. Drát je vytlačován do trysky, která je vyhřívána podle nastavené teploty, a za pomoci kladek je následně po jednotlivých vrstvičkách nanášen na podložku. Popisovaná metoda vyžaduje stavební podpory, které jsou v rámci dokončovací operace odstraňovány chemicky či mechanicky. Tisková hlava se pohybuje pouze v rovinách X a Y do té doby, než je dokončena celá vrstva modelu (obrázek č.8) Následovně se tisková hlava posune o tloušťku osy Z směrem nahoru a následuje tištění další vrstvy. Výroba prototypů odpovídá vlastnostem konečného produktu. Během výroby modelu nevzniká odpad. Odpad navíc je pouze materiál použitý pro svatbu podpor. Přesnost je vždy omezená průměrem výstupní trysky a tvarem materiálu. Proces je poměrně zdoluhavý a není možno jej urychlit z důvodu principu technologie a kvůli vlastnostem materiálu. Materiál má po tisku poměrně špatný povrch, je třeba použít dokončovací operaci pro zlepšení jakosti výrobku. [9]



Obr. 8 Metoda FDM podle [31].

1.5.2 Metoda ADAM

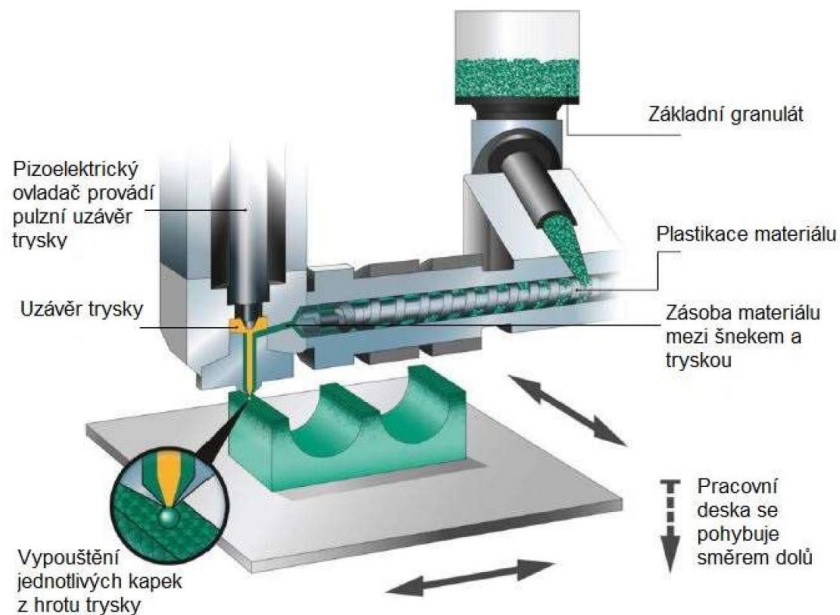
Metoda ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) je technologie 3D tisku od firmy Markforged, která využívá modernější způsob oproti spékání kovového dílu laserem. Materiál je dodáván na cívkách. Jedna tryska pokládá kovový prášek v plastovém nosiči a druhá tryska pokládá keramický materiál pro separační vrstvu na podpory. Principiálně je tisk podobný FDM metodě pro první fázi, kdy jsou materiály odvíjeny z cívek a je nanášen roztavený materiál skrze trysky. Materiály, které využívá, jsou stejné jak pro technologii SLM (měď, Inconel 625, nerezová ocel, nástrojová ocel). Výtisk je prvně očištěn ve speciálním roztoku, který vymývá primární spojovací materiál a nechá výrobek částečně porézní, aby mohl být zbytek plastového nosiče vypálen v následujícím kroku. V sinitrovací peci získá celokovový díl požadované rozměry. Při návrhu je nutno brát v potaz zvětšení dílu až o 20 % kvůli následnému zmenšení, ke kterému dojde během procesu sinitrace. Podpory je možné odstranit bez větších komplikací. Dále je třeba zvolit vhodnou dokončovací operaci pro lepší jakost povrchu. Tisk metodou ADAM je levnější oproti metodám SLM a DMLS. [10]

1.6 Speciální technologie

1.6.1 3D tisk za pomoci zařízení Arburg Freeformer

3D tiskárna s názvem Freeformer od firmy Arburg GmbH + Co KG byla v České republice představena v roce 2014. Je to jedinečná tiskárna, která je schopna tisknout ze standardních plastových materiálů ve formě granulí, jak jde vidět na obrázku č.9. Freeformer je vybarven plastikační jednotkou nazývanou APF (Arburg Plastic Freeforming). Technologie využívá podobné zpracování granulí jako vstřikovací stroj. Granule jsou nasypány přes násypku. Dále jsou granuláty roztaveny vlivem topných těles a plastikačního šneku. Následně je tavenina vysokofrekvenčním taktovaným uzávěrem trysky nanášena ve formě malinkých kapiček do přesné polohy. Přesná poloha je zajištěna díky polohovatelnému nosiči pracovní desky. Kapičky nanášené na desce se spojují automaticky během ochlazování. To umožňuje tisknout vrstvičku po vrstvě, až vznikne trojrozměrný výrobek. Průměr nanášených kapiček je od 0,18 do 0,30 mm. Čím menší je průměr kapiček, tím je povrch jemnější a taktéž dokáže tisknout lepší detaily. Freeformer je schopen tisknout z konvenčních plastových granulátů, jako například PC, ABS, PA, TPE, PTU, PMMA a mnoha dalších. Stroj obsahuje dvě trysky, díky čemuž je umožněn vícekomponentní tisk. Není problém tisknout pružné plasty v kombinaci například s PC. Avšak není příliš vhodné využívat materiály plněné skelnými vlákny, aby nedocházelo k ucpávání trysky. Během tisku nevznikají emise škodlivých látek či prach na rozdíl od klasického vstřikování a není třeba díly chladit jakýmkoliv způsobem. Využití nachází v automobilovém průmyslu, v medicíně či elektronice. Využívá se pro vyrábění nových

prototypových dílů. V porovnání se vstřikováním dosahují výtisky ze stroje 80–95 % pevnosti. [11]



Obr. 9 Arburg Freeformer 200 podle [33].

1.6.2 Princip vakuového lití

Vakuové lití do silikonových forem je vhodné pro malé série maximálně do 30 kusů. Lití je prováděno do forem, které vznikají zalitím „master modelu“ do silikonových či polyuretanových forem. Master model neboli finální výrobek se zhotovuje pomocí metod rapid prototyping, které jsou zmíněny v předchozích kapitolách. Než je master model zalitý, je třeba provést několik operací, aby výsledek byl v rámci možností co nejpříjemnější. Dělicí rovina musí být opatřena separačním přípravkem, master model musí být vybroušen v potřebné kvalitě. K master modelu je nutné přilepit vtokový kanál a za pomoci drátků je třeba vhodně umístit model. Než bude master model zalitý, je nutné silikon zavakuovat a tím se odstraní bublinky vzduchu, které obsahuje. Po zalití silikonem se opakuje vakuování. Jakmile je silikon ztuhlý, forma se vyjme z formovací nádoby. Protože byla forma ošetřena separátorem v dělicí rovině, forma je bezproblémově rozebrána. Po vyjmutí modelu je forma hotova a do formy mohou být odlévány voskové modely. [12]

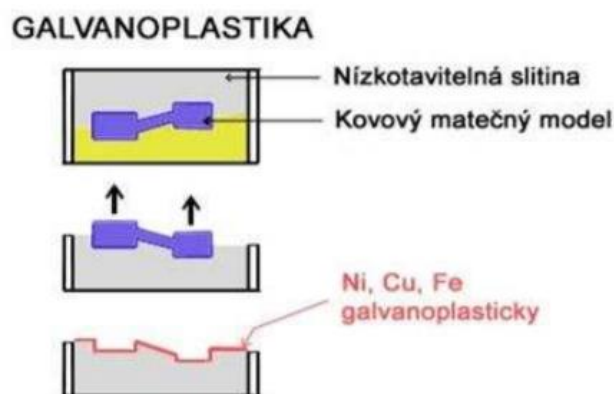
Postup výroby:

- 1) úprava master modelu,
- 2) vakuování silikonu,
- 3) zalití mastermodelu silikonem,
- 4) opakované vakuování formy s master modelem,
- 5) vytvrzení silikonové formy,
- 6) rozložení formy a následné vyjmutí master modelu,

- 7) odlítí modelu ve vakuu,
- 8) vyjmutí modelu.

1.6.3 Galvanoplastika

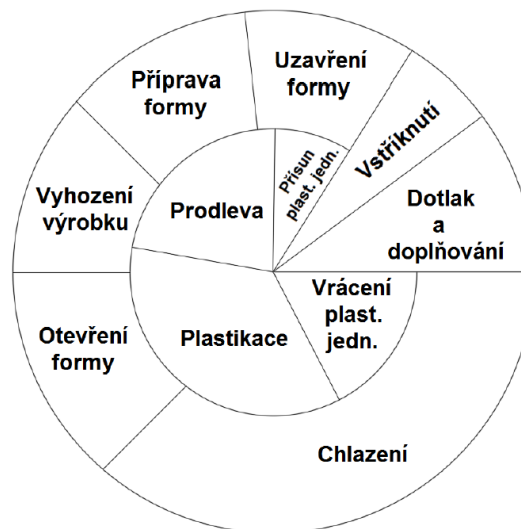
Je to technologie, která je využívána pro menší série, ovšem je to levnější způsob výroby oproti třískovému obrábění a zaručuje výbornou tuhost skořepiny při nízkých tloušťkách stěn. Skořepinu dále není nutno mechanicky zpevňovat či tepelně zpracovávat. Galvanoplastika je založena na principu kopírování předlohové součástky. Nejdříve je třeba vytvořit předlohovou součástku. Vhodnou technologií je využití metody SLA pomocí 3D tisku. Taktéž se může model vyrábět z vosku, dřeva či nízkotavitelného kovu. Model je nutno patřičně upravit na dané rozměry, podle toho bude vyrobena skořepina. Skořepina má obvykle tloušťku 0,8–4 mm. Na povrch modelu je kov nanášen žárovým nástřikem či galvanicky. V případě galvanického procesu se využívá elektrolýzy (obrázek č.10), kdy katoda je model a anoda je součást, z které při působení elektrického proudu dochází k uvolňování atomů z anody a dojde k chemické reakci u katody v elektricky vodivém médiu. Nejčastěji se pro kov využívá měď, nikl nebo slitiny niklu. Hlavní nevýhodou technologie je to, že výroba skořepiny trvá poměrně dlouhou dobu. V průměru 1 mm vrstvy trvá 48 hodin. Po zhotovení skořepiny se stěny modelu musejí odstranit. Dále je možné dutinu skořepiny vyplnit polyuretanem či kovem. [13]



Obr. 10 Galvanoplastika podle [34].

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je způsob tváření polymerních materiálů, při kterém je plastifikovaný materiál vstřikován do uzavřené dutiny formy. Materiál je plastifikován v plastikační jednotce, která je součástí vstřikovacího stroje. Vstřikování je popsáno diagramem na obrázku č. 11. [14]



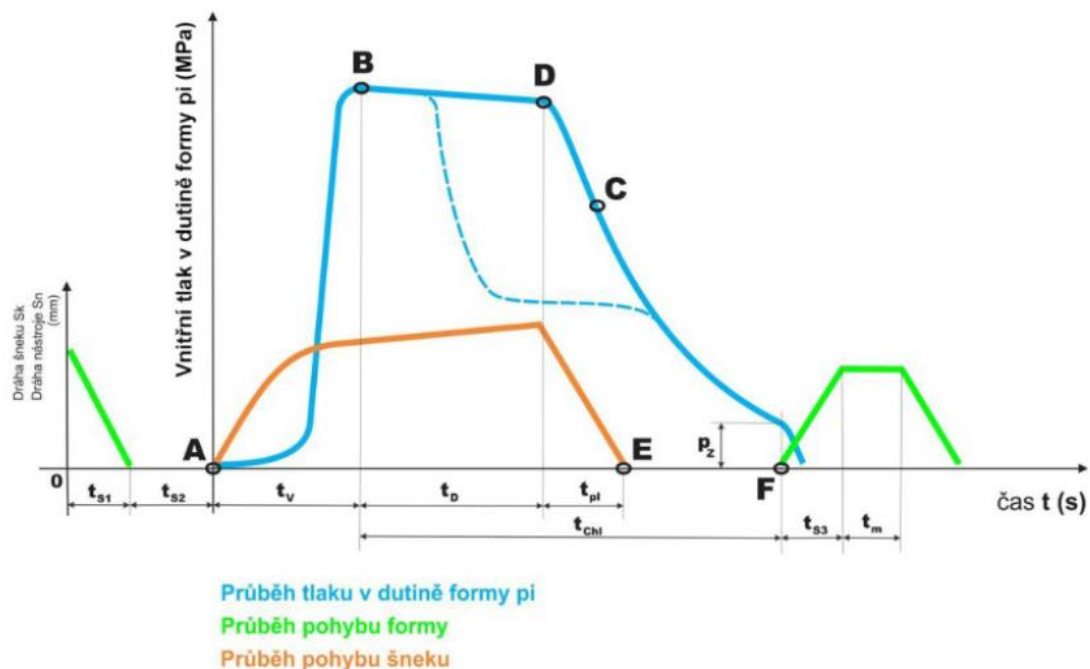
Obr. 11 Vstřikovací cyklus podle [14].

Plastifikace je proces, kdy je materiál převáděn do tekutého neboli plastického stavu za pomoci účinku tepelné energie. Síla působící na zplastizovaný materiál je nazývána vstřikovací síla. Za pomoci vstřikovacího tlaku teče tekutý materiál vstřikovací tryskou a vtokovými kanály do dutiny formy. Vstřikovací tryska má taktéž funkci těsnění spojení mezi formou a plastikační jednotkou. Forma je temperována a je uzavírána uzavírací silou. Přidržovací síla zajišťuje těsnost. Během vstřikování je teplota formy při vstřikování termoplastu vždy nižší než teplota vstřikování, ovšem u reaktoplastu je to obráceně. V dutině formy působí tlak, který je menší než vstřikovací tlak, který je nazýván tvářecím tlakem. Diference jsou způsobeny tlakovými ztrátami v dutině formy či plastifikační jednotce. [14]

Vstřikovací cyklus je tvořen z mnoha po sobě jdoucích operací. Vstřikovací cyklus je proces, během kterého je polymerní materiál namáhán tlakovým i teplotním cyklem. Plast ve formě granulí je nasypán do násypky, ze které je odebírán do pracovní části, ta se skládá ze šneku a pístu. Pracovní část dopravuje materiál za pomoci tření. Poté se z materiálu stává tavenina vlivem topných těles umístěných po celé délce pracovní části. Následně je tavenina vstříknuta do dutiny formy. Vstříknutý plast převádí teplo na formu a ochlazením tuhne ve výsledný výrobek neboli výstřík. Nastává vyhození výrobků za pomoci vyhazovacího systému a celý cyklus se opakuje. [14]

2.1 Vstřikovací cyklus v diagramu P_i-t

Vstřikovací proces je popsán diagramem P_i-t dle obrázku č.12. V počátku u vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém bodě je zahájena činnost vstřikovacího procesu. V časové oblasti t_{s1} se pohyblivá část formy uzavře a uzamkne formu. Přiblíží-li se vstřikovací jednotka, pak je další oblast popsána jako t_{s2} . Chlazení trvá takový časový interval, dokud není forma otevřena. Zmíněný časový úsek je popsáný t_{ch} . Během chlazení se chladnoucí polymer se smršťuje a mění svůj objem. [15]



Obr. 12 Průběh tlaku p_i v dutině formy během vstřikování podle [15].

Celý vstřikovací cyklus je rozdělen do částí:

- uzavření dutiny formy
- plnění dutiny formy
- chlazení
- dotlak
- plastifikace materiálu
- vyhození výrobku (výstřiku)

Uzavření dutiny formy

V první části vstřikovacího cyklu je forma otevřená a dutina formy je prázdná. V času nula je stroji zadán příkaz k začátku vstřikovacího cyklu. V časovém úseku t_{s1} je k pevné části vstřikovací formy přisunuta pohyblivá část a forma se uzamkne. Je třeba odlišit dva

druhy sil. Přisouvající síla F_p je poměrně malá, ovšem síla F_u je až trojnásobně větší oproti síle prisouvající. Tímto je zaručeno, aby se forma vlivem tlaku neotevřela. Čas t_{s2} je roven prisouvání vstřikovací jednotky ke vstřikovací formě. T_{s1} a t_{s2} jsou strojní časy. [15]

Plnění dutiny formy

V bodě A se začíná pohybovat šnek a je zahájeno vstřikování neboli plnění hmoty do dutiny formy. Šnek zastává funkci pístu, tudíž vykonává pouze axiální pohyb. Jakmile je forma zcela naplněna, je tavenina stlačena a tlak dosahuje maximální hodnoty. Popsaný děj je ukončen v bodě B. Objem taveniny plastu dosahuje okolo objemu 95 % dutiny vstřikovací formy. [15]

Chlazení

Jakmile tavenina vteče do dutiny formy, začne okamžitě předávat teplo vstřikovací formě, tím chladne a tuhne. Doba chlazení je závislá na tloušťce stěny výstřiku a teplotě formy. Doba chlazení je označena t_{chl} . [15]

Dotlak

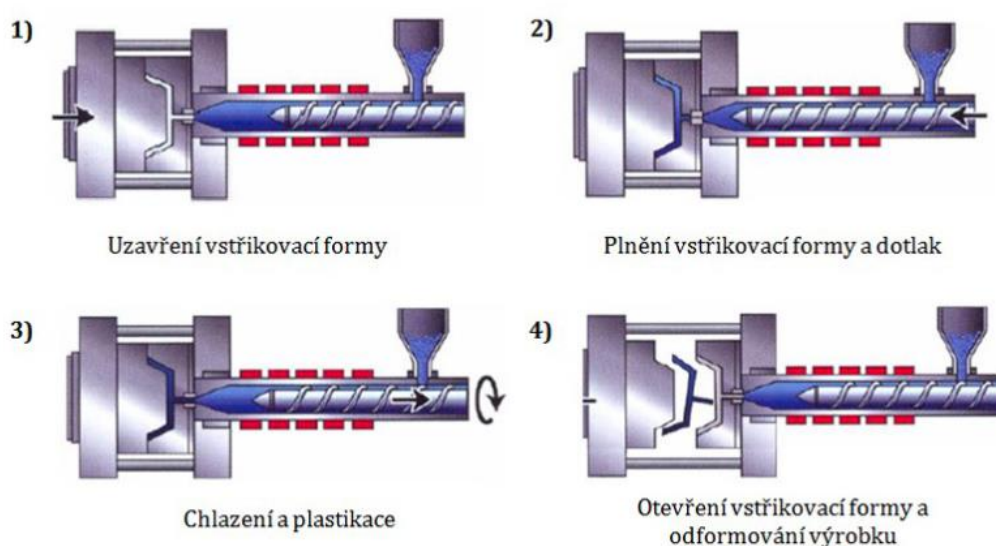
V průběhu chlazení se tavenina smršťuje a zmenšuje svůj objem. Aby nedocházelo k defektům, jako například tvorbě propadlin či staženin, je třeba vyrovnat zmenšování objemu dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy. Hlavním významem dotlaku je snížení smrštění i rozměrových změn. Dotlak je v obrázku značen t_d . Nesmírně důležité je dbát na bod přepnutí mezi fázemi plnění a dotlaku (B bod), protože v případě pozdního dotlaku je vyvolán příliš velký tlak a dochází u výrobku ke vzniku vnitřního pnutí. V opačném případě, kdy dotlak proběhne příliš brzo, bude tlak příliš malý a dochází ke staženinám či propadlinám. Při vysokém tlaku dochází k většímu opotřebení formy. Tlak může být celou dobu stejný jako maximální tlak nebo se může po pár sekundách snížit a k chlazení dochází za sníženého tlaku (podle obrázku č. 11). Dotlak je rozdělován na izobarický a izochorický. Izobarický znamená konstantní tlak a izochorický konstantní objem. Dotlačování probíhá působením čela šneku plastového polštáře. Je-li objem příliš velký, může docházet k degradaci hmoty. Doba dotlaku trvá do bodu D. Bod C značí, kdy hmota zatuhne ve studeném vtokovém kanálu. [15]

Plastikace materiálu

Po ukončení dotlaku nastává plastikace nové dávky vstřikovaného materiálu – značeno t_{pl} , končí v bodě E. Šnek koná rotační pohyb a taktéž se začíná posouvat směrem dozadu. Síla je označována jako zpětný tlak. Šnek pod násypkou nabírá materiál v granulovaném stavu. Materiál se plastifikuje a vtlačuje do prostoru před čelo šneku. Šnek rovněž ustupuje dozadu a musí překonat zpětný tlak. Na plastifikaci má největší vliv teplo, které vzniká mezi šnekem a komorou. Teplo vzniká rovněž přeměnou hnětací práce a vlivem topných těles. [15]

Vyhození výstříku

Během pokračující chladicí fáze tlak ve formě klesá do té doby, než se dostane na hodnotu zbytkového tlaku p_z . Zbytkový tlak je tlak, pod kterým se výstřík nachází ve formě krátce před jejím otevřením. V bodě F je forma otevřena a za pomoci vyhazovačů je výrobek vyhozen z formy. Popsaný proces je značen podle strojního času t_{s3} . V případě, kdy vstřikovací stroj obsahuje robota, T_m znamená manipulační dobu robota na odebrání výrobku. Proces vstřikování je zobrazen na obrázku č.13. [15]



Obr. 13 Proces vstřikování podle [18].

2.2 Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstříku

O fyzikálních i mechanických vlastnostech výrobku neboli výstříku a jeho výsledné kvalitě rozhodují druh plastu, konstrukce formy, technologické parametry a vhodná volba stroje. Všechny zmíněné parametry nepůsobí samostatně, ale ovlivňují se vzájemně. [16]

Volba plastu vůči ovlivnění vlastnosti výstříku

Tekutost plastu by ideálně měla být dostatečná a neměla by se s teplotou příliš rychle měnit. Plastikace polymeru by měla být co nejkratší. Taktéž je brán zřetel na tepelnou stabilitu v rozsahu zpracovatelských teplot, které by měly být co nejvyšší. Je třeba se snažit, aby vnitřního pnutí bylo co nejmenší. [16]

Technologické parametry

Vstřikovací tlak souvisí s rychlostí plnění, vnitřním pnutím, uzavírací silou i orientací (narovnání makromolekul do směru toku). Teplota taveniny vždy závisí na druhu plastu. Teplota taveniny dále ovlivňuje viskozitu plastu, dobu chlazení, vstřikovací tlak smrštění,

tlakové ztráty i dotlak. Teplota formy vždy závisí na tom, jaký materiál se bude do dutiny formy vstříkovat. Teplota formy ovlivňuje tekutost plastu, rychlost plnění, vnitřní pnutí i smrštění. Plnění dutiny formy by mělo být co nejrychlejší. Avšak je nutné kontrolovat teplotu taveniny, aby nedošlo ke zničení neboli degradaci hmoty. [16]

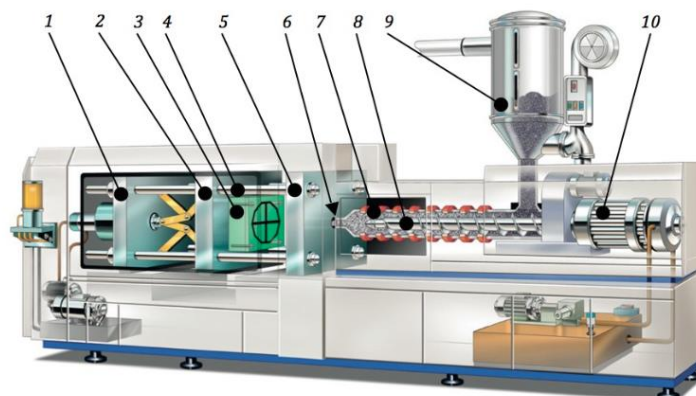
Vliv smrštění plastu na konstrukci vstříkovací formy

Smrštění je proces, který probíhá ve všech vstříkovaných dílech. Je to jev, který vzniká změnou objemu výstřiku od jeho vzniku neboli naplnění dutiny formy vstříkovacím tlakem taveniny až do konečného chlazení. Smrštění vzniká vlivem rozdílu teplot vstříkované taveniny a teploty formy. Pro montážní aplikace daných dílů jsou důležité také rozměrové vlastnosti. Hodnota smrštění se uvádí v procentech, o kolik je tvarová dutina ve vstříkovací formě rozměrově větší vůči výrobku. Smrštění je rozděleno na výrobní a dodatečné. Výrobní smrštění je měřeno 24 hodin po vyrobení dílu. Měření musí být prováděno za normalizovaných podmínek (teplota 23 °C a relativní vlhkost vzduchu 50 %). Výrobní smrštění představuje 90 % celkového smrštění. Po uplynutí 24 hodin není výrobek zcela stabilizován a vlivem vnitřního pnutí, které probíhá například při sekundární krystalizaci pro semikrystalické materiály, se nazývá dodatečné smrštění. Dodatečné smrštění představuje 10 % celkového smrštění. [16]

2.3 Vstříkovací stroj

Od vstříkovacího stroje je vyžadováno, aby kvalitou jeho parametrů a excelentním řízením byla zajištěna co nejlepší jakost výrobků. V dnešní době existuje mnoho různých konstrukčních variant strojů, které se od sebe liší provedením, stálostí, reprodukovatelností svých parametrů, stupněm řízení, obsluhou či cenou. Vstříkovací stroj je rozdělen na tři hlavní části: [17]

- vstříkovací jednotku,
- uzavírací jednotku,
- řízení a ovládaní stroje.



- 1 – uzavírací jednotka, 2 – pohyblivá upínací deska vstříkovacího stroje,
3 – pohyblivá část vstříkovací formy, 4 – vodící sloupky, 5 – pevná upínací deska,
6 – čelo špičky vstříkovací trysky, 7 – tavicí komora, 8 – šnek,
9 – násypka pro plastový polotovar, 10 – pohonná jednotka šneku

Obr. 14 Popis vstříkovacího stroje podle [18].

2.3.1 Vstřikovací jednotka

Hlavním úkolem vstřikovací jednotky je připravit a dopravit požadované množství roztaveného polymeru s předepsanými technologickými parametry do formy. Vždy je třeba dodržet podmínku, která říká, že množství dopracované taveniny musí být menší, než je kapacita vstřikovací jednotky během jednoho zdvihu. Jsou-li menší vstřikované dávky, může docházet k degradaci materiálu. Zmíněný problém je možné vyřešit například rychlejšími cykly výroby. [17]

Postup práce vstřikovací jednotky je následující: Do tavného válce je dopravován zpracovaný materiál od násypky za pomoci pohybu šneku. Šnek posouvá materiál změnou otáček přes vstupní, přechodové a výstupní pásmo. Během procesu se posouvající se materiál homogenizuje, plastikuje a je shromažďován před šnekem, přičemž šnek je posouván zpátky do výchozí polohy. Tavná komora je zakončena tryskou, která spojuje vstřikovací jednotku s navrženou vstřikovací formou. Jelikož zakončení trysky je kulové, je zajištěno perfektní dosednutí do sedla. Šnek je rozdělen na pásmo vstupní, přechodné a výstupní. [17]

2.3.2 Uzavírací jednotka

V dnešní době jsou stavěny hlavně hydraulické či hydraulicko-mechanické stroje, které mají zaimplementované uspořádání s různým stupněm elektronického řízení. Aby bylo docíleno přesných výstřiků, je třeba, aby stroj během vstřiku byl tuhý a pevný, měl konstantní rychlost, tlak teplotu a všechny ostatní parametry včetně jejich časování. Taktéž je důležité, aby měl přesnou reprodukovatelnost technologických parametrů. [17]

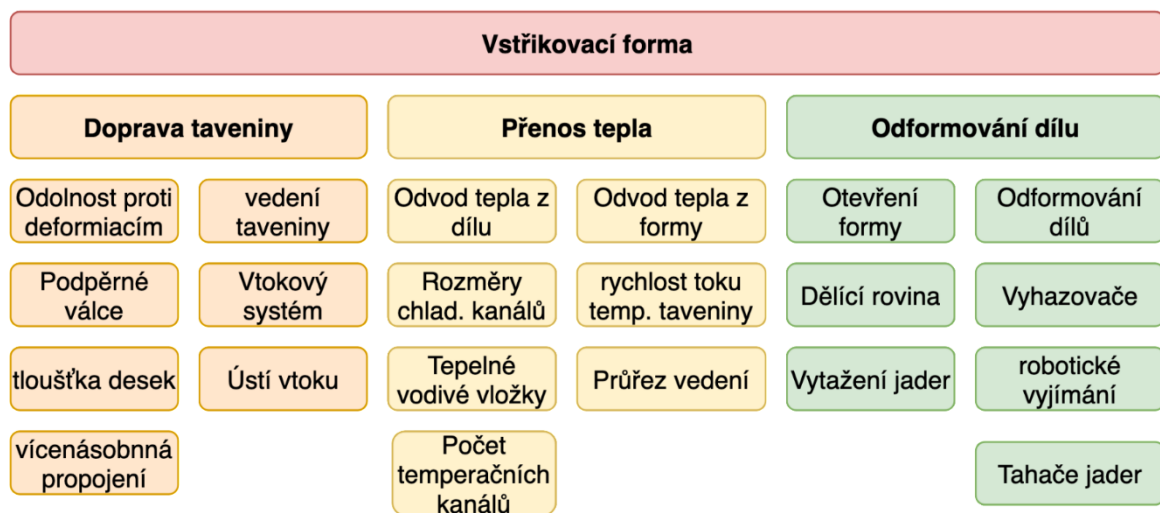
2.3.3 Řízení a ovládání stroje

Kvalitní vstřikovací stroj je takový, který je schopen stále reprodukovatelnosti, dodržení technologických parametrů a nutným faktorem kvality. Jestliže zmíněné parametry kolísají, projeví se nepřesnosti na kvalitě výrobku. Řízení stroje je zajištěno řídicími a regulačními prvky. Obvykle vstřikovací stroje jsou řízeny elektronickou jednotkou, který obsahuje procesor. Využívá se rozmanité grafické nastavy, které jsou nejčastěji zobrazovány pomocí LCD displeje, jak lze vidět na obrázku č.15. Nastavení stroje je zpětně kontrolováno řídicím systémem. [17]



3 VSTŘIKOVACÍ FORMA

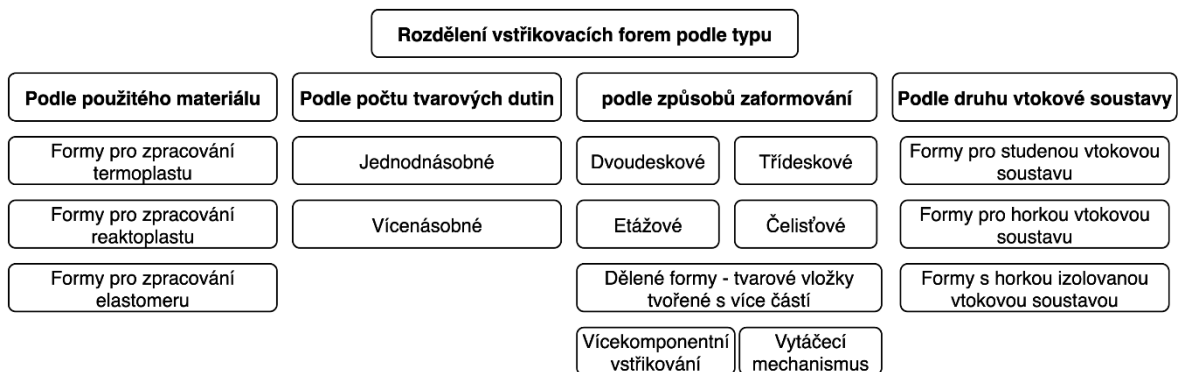
Vstřikovací forma je komplexní systém, který musí splnit mnoho požadavků vycházejících z procesu vstřikování plastů, který jsou popsány na obrázku č.16. Tvar dílu odpovídá dutině formy. Druhou funkcí vstřikovací formy je efektivně odvádět teplo, které je přiváděno taveninou polymeru. Forma dále musí zajistit rychlé a periodicky se opakující vyjmutí dílu bez komplikací. Aby byla zajištěna doprava taveniny polymeru, odvod tepla a odformování výrobku, je důležité využití vedlejších funkcí vstřikovací formy. Forma musí zaručit vysokou přesnost a potřebnou jakost funkčních ploch tvarových dutin, potřebnou tuhost a pevnost všech dílů podle stanovených tlaků, správný konstrukční koncept pro navržení vtokového systému, vyhazovacího systému, odvodu vzduchu i teploty. [18,19]



Obr. 16 Základní funkce a vlastnosti vstřikovací formy podle [18].

3.1 Konstrukce forem

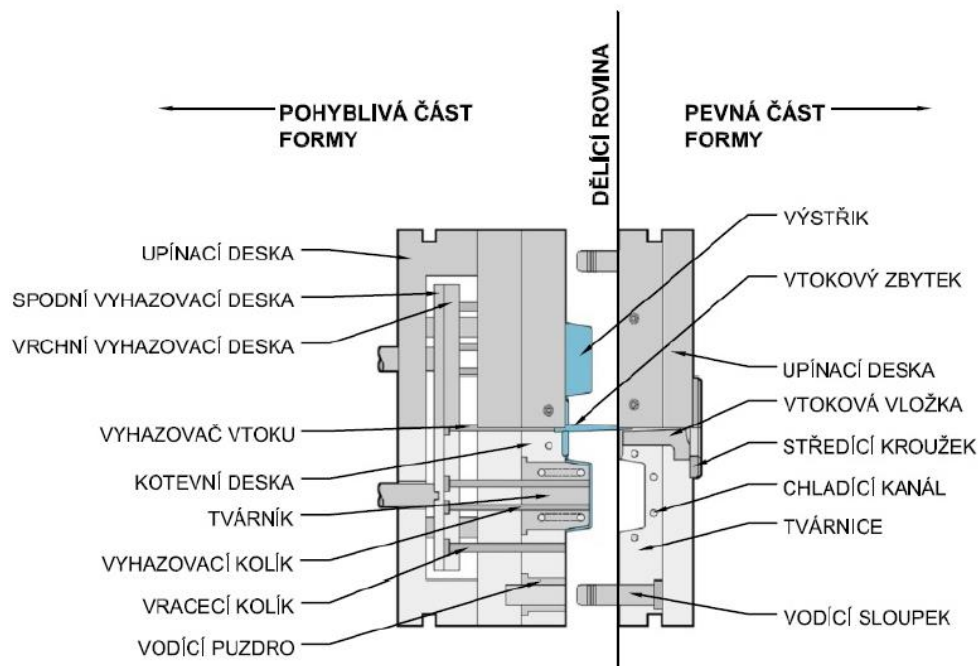
Výkres daného výrobku s konstrukčním návrhem a dalšími informacemi pro doplnění jsou hlavní podklady pro správnou konstrukci vstřikovací formy. Je třeba dodržet daný postup, aby se co nejvíce vyloučila chybovost během konstruování. V první řadě je třeba posoudit výkres, aby v budoucnu nedocházelo k problémům s odformováním. Je nutno zkontrolovat, zdali na výrobku nechybí nutné zaoblení ostrých hran, aby nedocházelo k velkému pnutí a náročnějšímu plnění dutiny formy. Dále je nutno brát zřetel na vhodnou volbu dělicí roviny a způsob zaformování vůči funkci a vzhledu výrobku. Zaformování odpovídá vhodnému umístění vtoků a vyhazování výrobku. Je třeba zvolit vhodný typ vtokového systému, velikost průřezu, délku tvaru a hlavního rozváděcího kanálu i ústí vtoku. Navržení rámu formy je volen podle typizace a počtu tvarových dutin vzhledem k vyhazovacímu systému a teplotě formy. V posledním bodě je provedena kontrola veškerých funkčních parametrů formy. Jedná se hlavně o tvarové dutiny, lícování dřev, hmotnost výrobku, vstřikovací a uzavírací tlak i další parametry. Vstřikovací forma se musí navrhnout tak, aby výroba byla co nejjednodušší. Rozdělení forem je popsáno na obrázku č.17. [18,19]



Obr. 17 Rozdělení vstřikovacích forem podle [18].

3.2 Základní části vstřikovací formy

Základní části vstřikovací formy jsou tvarové vložky neboli tvárník a tvárnice. Jsou to díly, které dávají tvar budoucímu výrobku. Každá forma je členěna na levou stranu, pravou stranu a vyhazovací systém, jak lze vidět na obrázku č.18. Levá strana je pohyblivou částí, která se po vstříknutí plastu a následném zatuhnutí otevře v dělicí rovině a je odsunuta do levé strany, přičemž výrobek je následně pomocí vyhazovačů vyhozen. Pravá neboli statická strana je napevno upnuta ve vstřikovací stroji. Z pravé strany je přiveden roztavený polymer. Pomocí vstřikovací trysky se roztavený polymer dostane do dutiny formy, kde začne chladnout a tuhnout. Vyhazovací systém je tvořen kotevní deskou vyhazovacího systému, opěrnou deskou vyhazovacího systému táhla a vyhazovačů. [20]



Obr. 18 Schéma dvou deskové vstřikovací formy podle [12].

3.3 Násobnost forem

Násobnost formy se počítá podle toho, kolik výrobků bude vyrobeno během jednoho cyklu. Násobnost formy se určuje podle složitosti daného výrobku, velikosti tvarové dutiny, výrobního množství a parametrů vstřikovacího stroje. Čím je menší násobnost vstřikovací formy, tím je větší přesnost výrobku, ovšem zvyšuje se čas výroby. Pro vícekomponentní formu je podmínka, aby dráha toku taveniny byla co nejkratší, a je nutné, aby tavenina zatekla do všech tvarových dutin ve stejném čase. [20]

3.4 Vtokový systém

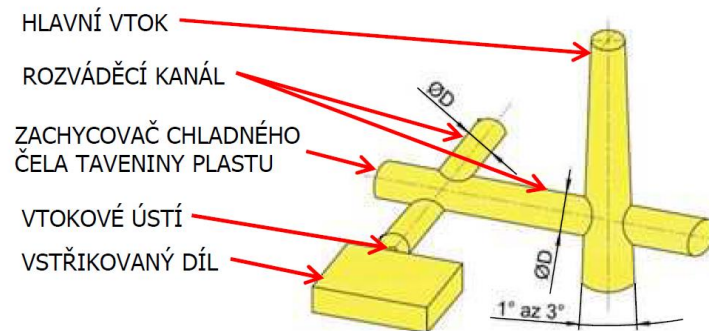
Vtokový systém je soustava kanálků, které slouží k dopravování roztaveného polymeru od vstřikovací trysky do tvarové dutiny formy. Parametry kanálků (tvar, velikost i rozmístění) mají hlavní vliv na proudění taveniny. Správná konstrukce zabrání vzniku studených spojů, staženin či snížení jakosti výstřiku. Vždy je třeba zvolit takové konstrukční řešení, aby se tavenina dostala do tvarové dutiny nejkratší možnou cestou bez zbytečně velkých teplotních a tlakových ztrát. Pro vícenásobné formy je podmínka, aby se roztavený polymer dostal do všech dutin ve stejném časovém intervalu při totožném tlaku. Není-li možné, aby kanálky byly stejně dlouhé, je třeba udělat korekce, aby byly splněny podmínky. [20]

Rozdělení vtokových systémů:

- studená vtoková soustava,
- vyhřívaná vtoková soustava.

3.4.1 Studená vtoková soustava

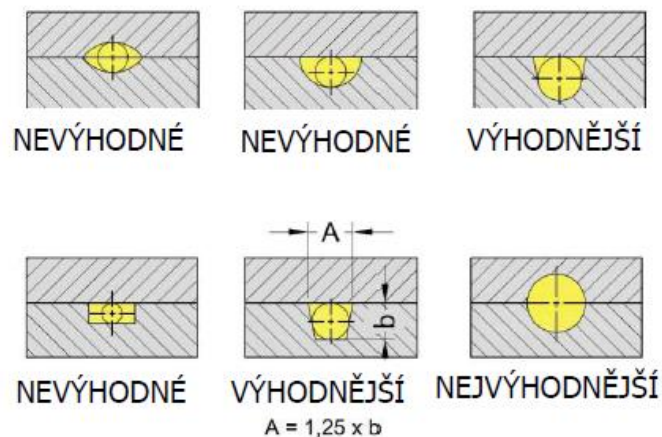
Studená vtoková soustava je složena z hlavního vtokového kanálu (vtoková vložka), rozváděcího kanálu a vtokového ústí. V momentu vstřiknutí taveniny plastu do studeného vtokového systému tavenina okamžitě tuhne. Vytvoří se izolační deska ze ztuhlého plastu a tavenina proudí středem. To je hlavní důvod odstupňování velikosti rozváděcích kanálů a je zajištěno rovnoměrné plnění všech tvarových dutin. Tavenina proudí do dutiny formy přes rozváděcí kanály. Po zaplnění dutin se tlak přepíná na dotlak. Při dotlaku je doplňována tavenina, která byla ztracena během smrštění chladnutím plastu. Díky dotlaku je zamezeno vzniku objemového smrštění, propadliny a staženiny. Studený vtokový systém je levnější než horké vtoky. Vtoková vložka i ostatní díly jsou dodávány jako normálie. Díky jednoduchému provedení vícenásobné formy se studenou vtokovou soustavou není třeba energetického připojení. Hlavní nevýhodou je větší spotřeba plastu, který zůstává ve vtokovém ústí. Na to navazuje způsob oddělování vtokového zbytku od výrobku a nutnost přidržování výrobku po otevření formy. [21]



Obr. 19 Studená vtoková soustava podle [21].

Vtokové kanály

Slouží k dopravování taveniny od trysky až ke tvarovým dutinám ve vstřikovací formě. Tvar průřezu vtokového kanálu se snaží zajišťovat co nejmenší tlakové i tepelné ztráty. Pomocí smáčivého čísla se určuje tvar kanálu. Vyjadřuje se poměrově průtočný průřez vůči smáčenému povrchu. Čím je vyšší číslo smáčivosti, tím je kanál vhodnější. Nejvhodnější je kruhový průřez (obrázek č.20), ten je ovšem nejnáročnější na výrobu. [21]



Obr. 20 Vtokové kanály podle [21].

Vtoková vložka

Do hlavního vtokového kanálu je tavenina vstřikována z trysky stroje. Tryska je centrována za pomoci středícího kroužku na vtokovou vložku formy. Nejužší místo vtokového kanálu je o 0,5–1 mm širší než průměr trysky. Aby vtoková vložka plnila svou funkci, je rovněž nutné, aby se kanál rozšiřoval o 0,5 °–1,5 ° směrem k rovině. Průměr na konci vtokového kanálu je závislý na velikosti vstřikovaného dílu a taktéž na průměru rozváděcích kanálů. [21]

Vtokové ústí

Vtokovým ústím se zakončují rozváděcí kanály. Ústí je spojováno s tvarovou částí formy s rozváděcími kanály. Vtokové ústí je umístěno do nejširšího místa výrobku.

Vtokové ústí je dále rozděleno na:

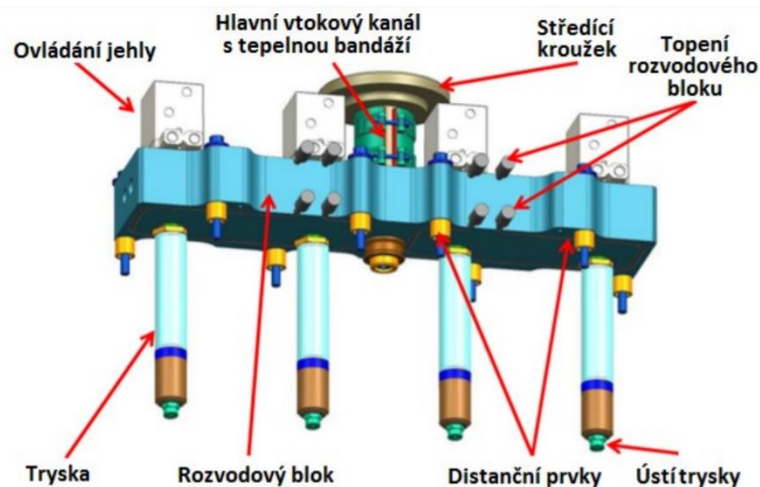
- plné,
- boční tunelové,
- srpkové,
- filmové.

Filmový vtok

Filmový vtok patří mezi nejpoužívanější vtoková ústí pro plnění především kruhové a trubkové dutiny s vyššími požadavky na kvalitu. Rozvedení taveniny do jednotlivých míst není rovnoměrné. S rostoucí vzdáleností rozváděcího kanálu klesá tlak. Je nutné použít proměnnou tloušťku ústí nebo rozváděcího kanálu. Nevýhodou je oddělování vtokového systému až po vyhození dílu z formy. Je vhodný pro plnění materiály se skelnými vlákny či tenkostěnné výrobky. [21]

3.4.2 Vyhřívání vtokové soustavy

Vyhřívání vtokové soustavy jsou využívány především pro formy pro sériovou výrobu. Protože je soustava rozvodu taveniny tepelně i mechanicky namáhána, je vyžadována větší přesnost i větší tuhost soustavy. Tím razantně stoupne cena formy. Nejsou vhodné pro krátkodobý přerušovaný provoz. Pro jednonásobnou vstřikovací formu je tryska napojena na ústí do dutiny. Pro formy vícenásobné je součástí vyhřívání vtokové soustavy i rozváděcí blok s tryskami, který je umístěn v dutině formy prostřednictvím pomocných kanálků. Teplota taveniny je regulována ovládanými snímači. Je-li forma složitá, využívá se větší množství topných okruhů. Vyhřívání vtokové soustavy jsou schématicky popsány na obrázku č.21. [21]



Obr. 21 Horká vtoková soustava podle [35].

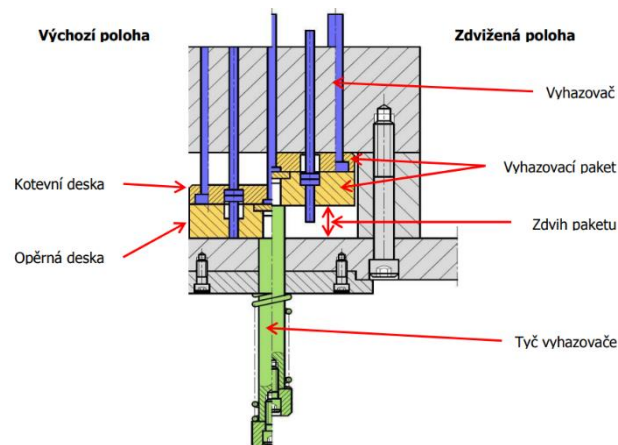
3.5 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém má za úkol vyhodit hotový výrobek z otevřené vstřikovací formy. Aby bylo vyhození bezproblémové, je třeba využít speciálních mechanismů, které se volí na základě konstrukční složitosti výrobku. Vyhazovací mechanismus je automatizovaný výrobní cyklus. Aby bylo vyhazování bezproblémové, je třeba provést úkopy na výrobku ve směru vyhazování. Vyhazování musí být rovnoměrné, aby nedocházelo k pnutí vůči nerovnoměrnému vyhození. Dále by mohlo docházet k plastickým deformacím či poškození výrobku. Stopy po vyhazování musejí být minimální. Vyhazování je rozděleno na dvě fáze. První fáze se nazývá dopředný pohyb, který má za úkol vlastní vyhazování. Zpětný pohyb slouží k návratu vyhazovacího zařízení do původní polohy. Vyhazovací systémy jsou rozděleny podle konstrukce vstřikovaných forem na: [19]

- systém s vyhazovacími kolíky,
- systém se stírací deskou,
- vyhazování za pomoci šikmých vyhazovačů,
- dvoustupňové vyhazování,
- speciální vyhazovací systémy (pneumatické vyhazování, vytáčení mechanismus),
- kombinace různých typů vyhazování.

3.5.1 Mechanické vyhazování

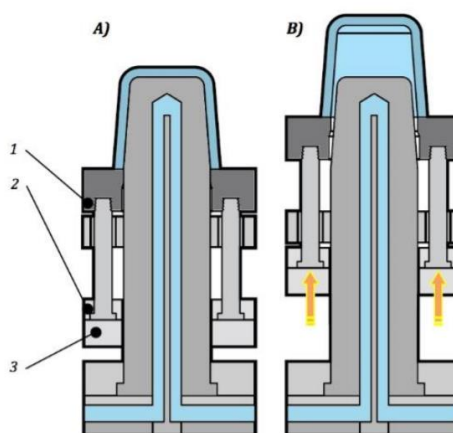
Je to nejlevnější a nejpoužívanější způsob pro konstrukčně jednodušší výrobky. Mechanické vyhazování je možné aplikovat tam, kde je možné vyhazovač umístit proti ploše výrobku ve směru vyhození (obrázek č.22). Správná volba tvaru i poloha vyhazovače zajišťuje bezproblémové vyhazování. Nevýhodou je zanechávání stop na výrobcích, a proto se vyhazovače umísťují na nevzhlednou část výrobku. Je-li vyhazovací systém tvořen velkým množstvím vyhazovačů, je komplikovanější navrhnout efektivní temperační systém v desce tvárníku. Vyhazovací kolíky je možné nakoupit jako normálie. Vyhazovače jsou uloženy v tolerančních polích H7/h6, H7/k6 a H7/g6. Vyhazovací kolíky se dále rozdělují na válcové, prizmatické, trubkové a speciální (pružné, šikmé). [19]



Obr. 22 Mechanické vyhazování podle [36].

3.5.2 Vyhazování stírací deskou

Vyhazování stírací deskou je založeno na principu stírání výrobku z tvárníku po celém jeho obvodu (obrázek č.23). Hlavní výhodou je nezanechávání stopy po vyhazovačích na rozdíl od mechanického vyhazování. Jelikož je vyhazování zajištěno po celém obvodu, vznikají minimální deformace výrobku. Nejčastěji se využívá u tenkostěnných výrobků, aby se zabránilo vzniku deformace od vyhazovačů. Podmínkou je, aby výstřik došel na stírací desku v rovině. Nejčastěji se popsaný princip využívá pro vícenásobné formy nebo se doplňuje systémem oddělování výstřiku od stírací desky. [19]

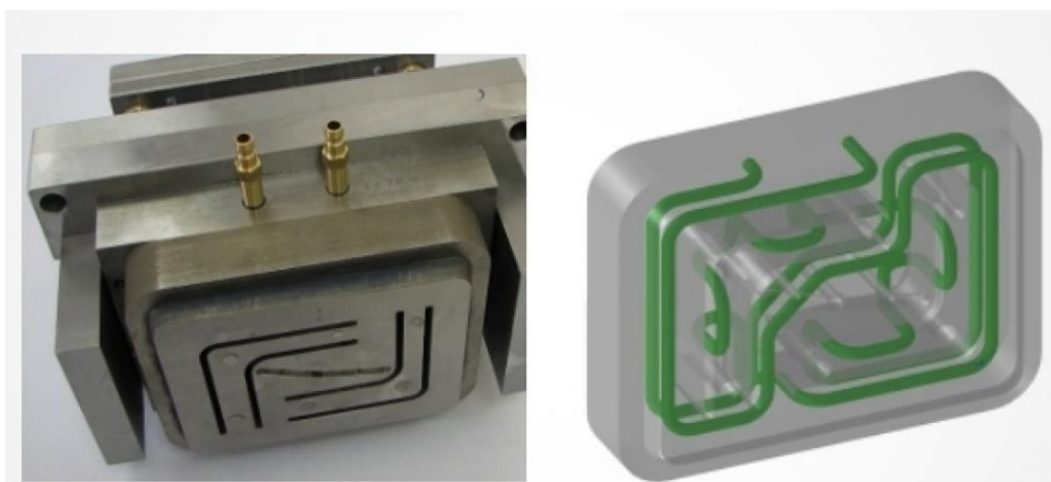


1 – stírací deska, 2 – přídržovací stírací desky, 3 – hlavní vyhazovací deska,
A – zadní pozice, B – přední pozice

Obr. 23 Metoda stírací desky podle [18].

Temperace forem

Temperační systém formy je soubor kanálů a dutin, který je schopen umožnit přestup a prostup tepla z taveniny do formy a taktéž do temperovací kapaliny. Aby byla temperace co nejúčinnější pro odvod tepla, je vhodné umístit temperační kanály co nejbližší k tvářecí dutině formy, jak je provedeno na obrázku č.24. Konstrukčně je to řešeno tak, aby chladicí médium přicházelo do nejteplejšího místa a vlivem tekutiny se teplotní rozdíl ve směru toku zmenšoval. Temperační systém se navrhuje rovnoměrně. Pro zvýšení účinnosti chlazení je možné kanály umístit blíže k tvarové dutině a zmenšit rozteče kanálu mezi sebou. Důležité je navrhnout temperační okruh tak, aby teplotní pole bylo co nejvíce homogenní. Negativním výsledkem nerovnoměrného chlazení může být například chladnutí taveniny v každém místě odlišně. Taktéž je důležité, aby obě části vstřikovací formy měly podobnou teplotu pro poměrně stejné smrštění na obou stranách. Nerovnoměrným chlazením vzniká vnitřní pnutí, jímž mohou na výrobku vznikat trhliny či odlišný stupeň orientace. [18]



Obr. 24 Temperace tvarové vložky podle [37].

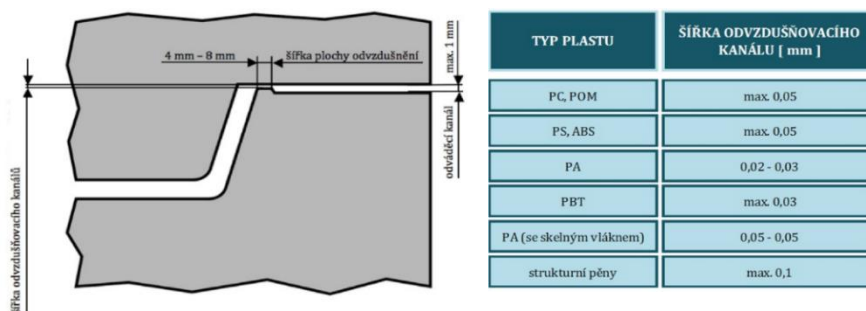
3.6 Odvzdušnění formy

Jakmile tavenina vstoupí do dutiny vstříkací formy, rychle před sebou vtláče vzduch, který po uzavření formy zůstal. Odvzdušnění formy slouží k úniku vzduchu, který je obsažen na začátku vstříku, a zplodin, které vznikají během ochlazování výrobku. Čím je rychlejší plnění dutiny formy, tím je odvzdušnění tvarové dutiny účinnější. Ovšem je třeba brát na zřetel, aby během plnění nedošlo ke spálení neboli vzniku dieselového efektu. Během pomalého plnění dochází k uvolňování a k vytváření ztuhlého polymeru ze stran stěny a následuje strhávání do proudící taveniny. Zmíněné částice jsou popsány jako heterogenní vměstky, které negativně ovlivňují vlastnosti výstříku. V takovém případě je vyšší pravděpodobnost vzniku studeného spoje. Na obrázku č. 25 je popsána hlavní konstrukční provedení. [16]

Konstrukční řešení:

- odvzdušnění v dělicí rovině,
- umístění odvzdušňovacích kanálů.

Šířka odvzdušňovacího kanálu se volí podle typu vstříkovaného materiálu.

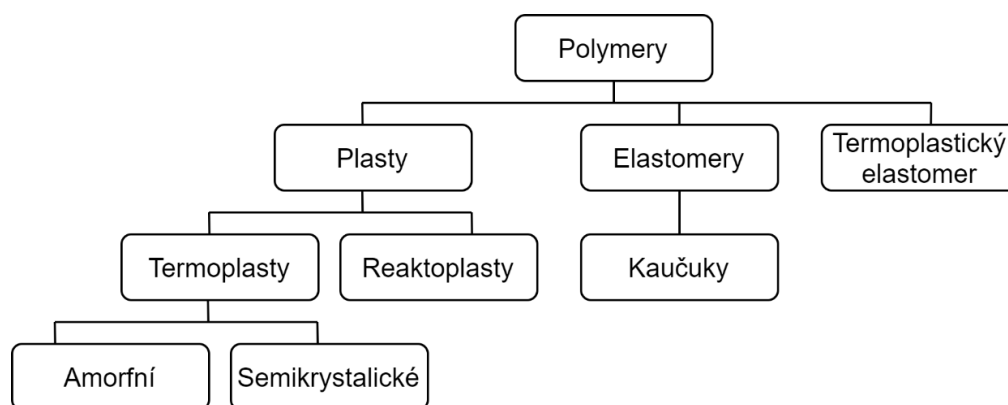


Obr. 25 Doporučená konstrukce odvzdušňovacího kanálu [18].

4 MATERIÁLY

4.1 Polymery pro vstřikování

Polymer je látka složená z jednoho či více atomů (obvykle atomu vodíku, kyslíku, uhlíku, dusíku) či skupiny spojené v hojném počtu. Polymery jsou separovány od sebe za pomoci řetězové struktury jejich molekul. Je to poměrně dlouhá lineární řada vzájemně spojených atomů nebo skupin atomů. Skupinu atomů je možné si představit jako strukturní motiv, který je často přerušen místním větvením. Během zpracování se polymer nachází v kapalném stavu, který je schopen dát tvar budoucímu výrobku za pomoci vyšší teploty a tlaku. Výsledný hotový výrobek je v tuhém stavu. Polymery jsou rozděleny do podskupin podle obrázku č. 26. [22]



Obr. 26 Rozdělení polymerů podle [38].

4.1.1 Plasty

Plasty jsou materiály, jichž základními prvky jsou makromolekulární látky. Polymery jsou rozděleny podle vzniku, tedy na přírodní (přírodní kaučuky, bílkoviny, přírodní pryskyřice) a syntetické (termoplasty, reaktoplasty, elastomery). Polymer je makromolekula, která je za pomoci chemických vazeb spojována s elementárními látkami, které se nazývají monomery. Jednotka vznikající z molekuly se nazývá monomerní jednotka. Polymery jsou členěny podle dělení makromolekul (lineární, síťované a rozvětvené). Rozměr makromolekul je určován pomocí molární hmotnosti a podle polymeračního stupně. Pro vyráběné polymery jsou látky polydisperzní. Polydisperze znamená, že obsahují polymerhomology o různých délkách řetězce. Pro charakterizaci je definován střední molární hmotností, přičemž šíření (distribuce) je vyjádřeno distribuční křivkou. Plasty jsou takový druh polymerů, u kterých vnější namáhání způsobí nevratnou deformaci trvalého charakteru. [23, 24]

4.1.2 Termoplasty

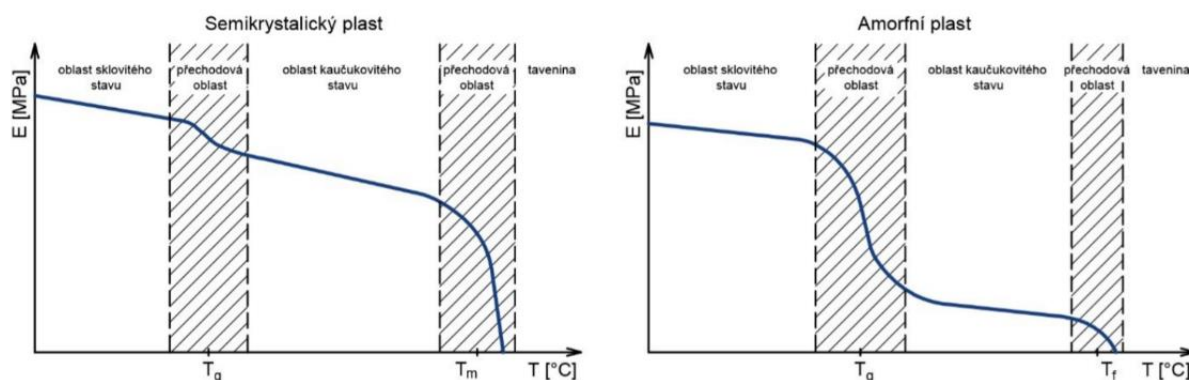
Termoplasty jsou makromolekulární látky s řetězci lineárními nebo rozvětvenými. Rozdělují se na amorfní a semikrystalické. Vlivem tepelného namáhání jsou schopny se přeměnit do taveniny. Ve formě taveniny lehce mění svůj tvar a zpracovávají se různými

technologemi. Proces měknutí a zpětného tuhnutí lze provádět opakovaně, jelikož nedochází ke změně chemické struktury na rozdíl od reaktoplastů. Je-li termoplast po vyrobení více než jedenkrát roztaven, výrobek se nazývá recyklát. Vlastnosti recyklátu se zhoršují s větším počtem opotřebení a z důvodu přetřhání řetězců. Nejčastěji využívané termoplasty jsou polyethylen, polypropylen, polyvinylchlorid, polyamid, polystyren, polykarbonát a další. [23]

Rozdělení podle nadmolekulární struktury:

- amorfní plasty,
- semikrystalické plasty.

Amorfní plasty mají náhodné uspořádání makromolekul. Vykazují se vysokou pevností, tvrdostí, křehkostí a modulem pružnosti. Vlastnosti plastů jsou závislé pouze na teplotě. Amorfní i semikrystalický plast má teplotní oblasti, kde se mění skokově jejich vlastnosti (obrázek č.27). V oblasti zesklenní (T_g) se skokově mění mez pevnosti v tahu a koeficient roztažnosti o přibližně 100 %. V oblasti viskózního toku (T_f) hmota přestává mít kaučukovité vlastnosti a mění se na vysoce viskózní kapalinu. Oblast viskózního toku je oblast zpracovatelských teplot. Při zvýšení teplot do oblasti T_z dochází k degradaci materiálu. [23]



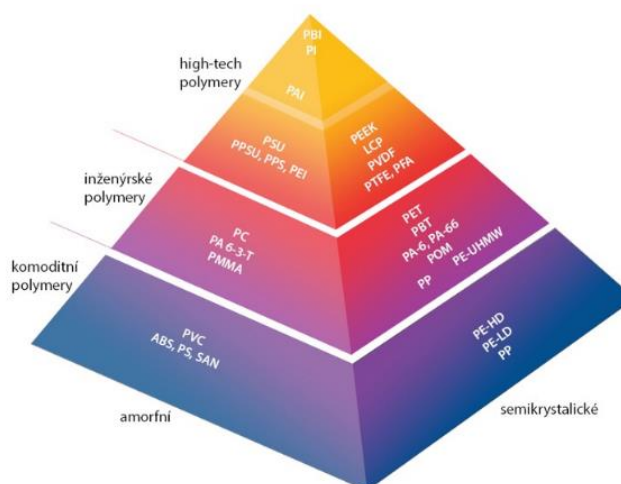
Obr. 27 Závislost modulu pružnosti na teplotě [38].

Semikrystalické plasty jsou určitým způsobem uspořádané, jejich uspořádanost se nazývá stupeň krystalinity. Jelikož nejsou schopny dosáhnout úplného uspořádaní, nazýváme je semikrystalické plasty. Semikrystalické polymery nejvíce mění své vlastnosti v oblasti teploty tání (T_m), ve které dochází k rozpadu krystalitů. Je to stav, kdy se mění ze stavu pevné do stavu tekutého. Přesná teplota je závislá na velikosti makromolekul a velikost mezimolekulárních sil. Vlivem podílu amorfni složky je možné dosáhnout pro semikrystalické polymery teploty zesklenní. S vyšším stupněm krystalinity polymeru při teplotě zesklenní materiál ztrácí své vlastnosti. Semikrystalické plasty se využívají pouze do teploty T_m . [24]

4.1.3 Reaktoplasty

Reaktoplasty se od termoplastů liší především zesíťovanou strukturou. V první řadě reaktoplasty nejdříve měknou, ale jen omezenou dobu, dokud nedochází k chemické reakci,

kdy nastává prostorové zesíťování polymerních řetězců. Zesíťovaná struktura vykazuje zvýšenou tuhost a pevnost materiálu. K vytvrzování dochází za vyšší teploty, tlaku a přidávání vytvrzovacích činidel. Jedná se o nevratný děj a vytvrzené plasty není možné rozpustit zahříváním. Dochází pouze k degradaci a zničení materiálu. Nejčastější zástupci pro reaktoplasty jsou polyesterové hmoty, fenoformaldehydy, epoxidy a pryskyřice. Mají nejčastější využití v odlévání, při vstřikování se více využívá termoplastů. [23]



Obr. 28 Rozdělení plastů podle využití podle [38].

Elastomery

Je to druh polymerů, které je možné menší silou deformovat. Jsou to polymerní materiály, které se v prvotní fázi zahřívají a měknou. Tento proces trvá ovšem pouze omezenou dobu, dále dochází k chemické reakci zesíťování struktury a k vulkanizaci. U elastomerů na bázi termoplastů probíhá pouze fyzikální děj, nikoliv chemický proces. [25]

Termoplastické elastomery

Jsou to materiály, které mají vlastnosti elastomerů a termoplastů. Termoplastický elastomer je složen z tvrdých, měkkých a elastických prvků. Tvrdé a měkké prvky se nesmějí smíchat dohromady, vždy musejí zahrnovat oddělené fáze. Tvrdé segmenty tvoří amorfní i semikrystalické polymery, které se málo deformují a mají vysokou teplotu skelného přechodu a teplotu tání. Druhá část tvořená elastomerem vykazuje obrácené vlastnosti, tedy má nízkou teplotu skelného přechodu a lehce se deformuje. [24]

4.2 Materiály pro 3D tisk

Materiály pro 3D tisk se rozdělují podle toho, jaká technologie 3D tisku je využívána. Nejpoužívanější typ tisku je FDM, která využívá tiskové struny. Patří mezi levnější metody tisku. Fotopolymery jsou materiály, které se využívají ve stereolitografii, kde je materiál vytvrzený pomocí světla. A poslední metoda je nanášení prášku, který je spojován pomocí výkonného laseru a lepidla. [3]

4.2.1 Tiskové struny

Jsou to technologie, při kterých je materiál ve formě strunového drátu vytlačován přes tiskovou hlavu. Hlavní výhodou zmíněných technologií jsou nízké pořizovací náklady.

Nejčastěji jsou využívány materiály PLA, PET, PETG, PC, nylon, HIPS a příležitostně PEI. [3]

4.2.2 Fotopolymery

V nádobě s tekutým fotopolymerem je umístěna tisková deska, pomocí které se stanoví výška požadované vrstvy. Světelný paprsek vykreslí požadovaný tvar, čímž dojde k požadovanému vytvrzení polymeru v potřebném tvaru. Jsou dále členěny podle typu tiskárny. UV DLP polymery jsou navrženy pro široké spektrum DLP tiskáren. Vlnová délka pro obě kombinace záření je 385 nm a 405 nm. Pro UV laser jsou určeny polymery, které se využívají pro SLA tiskárny, s vlnovou délkou 405 nm. Dále jsou fotopolymery rozdělovány podle využitelnosti (pevné, pružné, tvrdé, odlévané a vysokopevnostní). [3]

4.2.3 Práškové

Na tiskové desce je rozprostřený stavební materiál ve formě prášku (kov, sádra, polymer). Model je vytvrzován pomocí laseru. Tisková deska se vždy posune o definovanou výšku a tím dojde k vytvrzení potřebného tvaru. Kov ve formě prášku se nejčastěji využívá pro materiály nerezových ocelí, vysokopevnostních ocelí, inconel 625 a 718, hliník AlSi10Mg a Titan Ti6Al4V. [3]

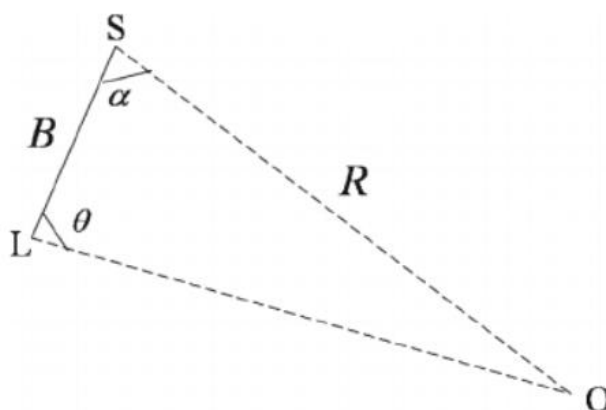
5 SKENOVÁNÍ

3D skenování se v dnešní době dostává do povědomí všech strojírenských odvětví, především konstruktérů či pracovníků kontroly. Je to technologie umožňující měření, kterého není možné dosáhnout konvenčními metodami. 3D skenování je stále aktuálnější, ať už z důvodu urychlení měřících procesů či zlepšení přesnosti. Skenování je možné provádět u výrobků různých velikostí a materiálů. Díky skenování vzniklo nové strojírenské odvětví, které je nazýváno reverzní inženýrství. [25]

5.1 Triangulace

Laserová triangulace je stereoskopická technika, při níž je vzdálenost předmětu vypočítána za pomoci rozkmitaného laserového paprsku nebo kamer. Daná rozkmitaná laserová matrice je promítána na povrch tělesa, který je posléze snímán za pomoci kamer. Kamery slouží k zaznamenání průmětů laseru na povrch a jsou digitalizovány všechny matrice nebo laserové čáry. Při popsané metodě jsou aplikovány úhly nastavení, délka základní čáry mezi vycházejícím zdrojem světla a kamerou k výpočtu vzdálenosti daného bodu, který leží na skenovaném objektu. Laser je soustředěn a promítán pod daným úhlem na povrch předmětu. Videokamera obvykle zachycuje odraz od snímaného povrchu a dále využívá geometrické triangulace. [26]

Na obrázku č. 29 je vizualizována triangulační geometrie s body L a S, které znázorňují projektor laserového paprsku a kamerový senzor. Je to určitý rozsah základní přímky B mezi body a orientačními známými úhly. Vzdálenost R k bodu na povrchu O se počítá za pomoci známých hodnot. [26]



Obr. 29 Triangulační geometrie podle [39].

Pomocí přímého paprsku světla je triangulační geometrie vedena k výpočtu vzdálenosti daného bodu na povrchu skenovaného objektu. Je-li paprskem hýbáno po předmětu, jsou získávány další body. Laser vždy promítá pod určitým úhlem a CCM kamera slouží k záznamu pixelové lokace průsečíku paprsku s objektem. Zmíněná pixelová lokace je pod určitým úhlem vůči základní přímce mezi CCD kamerou a laserem. Nastává triangulace k získávání prostorového měření. Hlavní nevýhodou je zachycení každého snímku CCD kamerou pro jednotlivý prostorový bod. Lepší způsob je snímání povrchu za pomoci laserových linií místo bodů. Při laserové linii zdroj světla promítá rovinu, přičemž

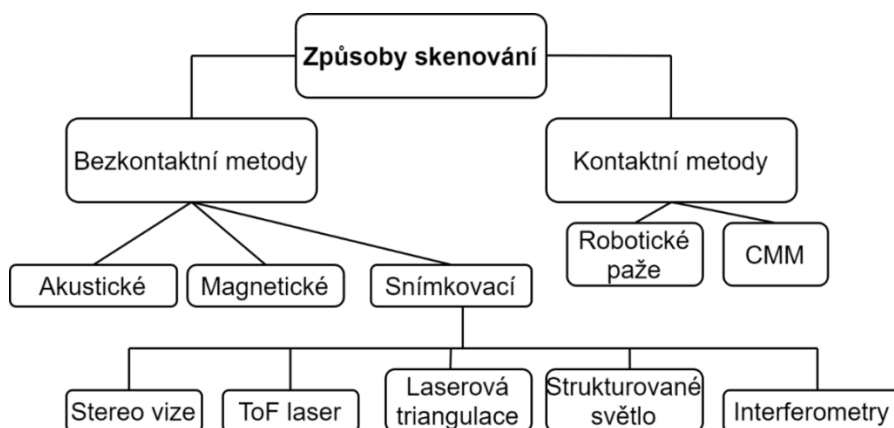
v jejím řezu v prostoru a v momentě setkání s objektem je linie na povrchu předmětu. Tato metoda je používanější a urychluje celý proces. [26]

5.2 3D laserové skenování a jeho princip

Laserové skenování je založeno na principu projektování laserového paprsku na požadovaný povrch skenovaného objektu. Paprsek se od objektu odráží zpět a nastává skenování za pomoci kamer nazývaných CCD/CMOS snímače. Fázový posun určí dobu odrazu a taktéž vzdálenost od skenovaného objektu. Podle uspořádání snímacího zařízení a podle jednotlivých typů se pro vyhodnocení využívá triangulace. Triangulační skenery na jedné straně základny emituje laserové záření, které vytváří na skenovaném objektu bodovou stopu. Na sekundární straně základny je umístěna speciální CCD kamera, která je schopna detektovat stopu laseru na objektu. Vzdálenost je vypočítána od základny, kterou není možné měnit, proto platí pravidlo, aby pro skenování malých objektů byla menší vzdálenost a v případě velkých předmětů větší vzdálenost. Základní konstrukční řešení je buď jedna kamera a laser, anebo dvě kamery a projektor, případně laser. [27]

5.3 Rozdělení skenovací techniky

V dnešní době existuje enormní množství metod, které jsou aplikovány v praxi. Jsou rozdělovány podle funkčního využití, dosažení přesnosti, velikost výrobku a mnoha dalších kritérií. Měřením rozměrů se ve strojírenství zabývá obor metrologie a průmyslové fotogrammetrie. Především se rozděluje podle dotykové či bezdotykové metody získávání dat (obrázek č. 30). Nejvíce je založeno na principu strukturovaného světla, přičemž se využívá snímkování, kódované světelné matrice a laserové triangulace. [27]



Obr. 30 Rozdělení skenování podle [39].

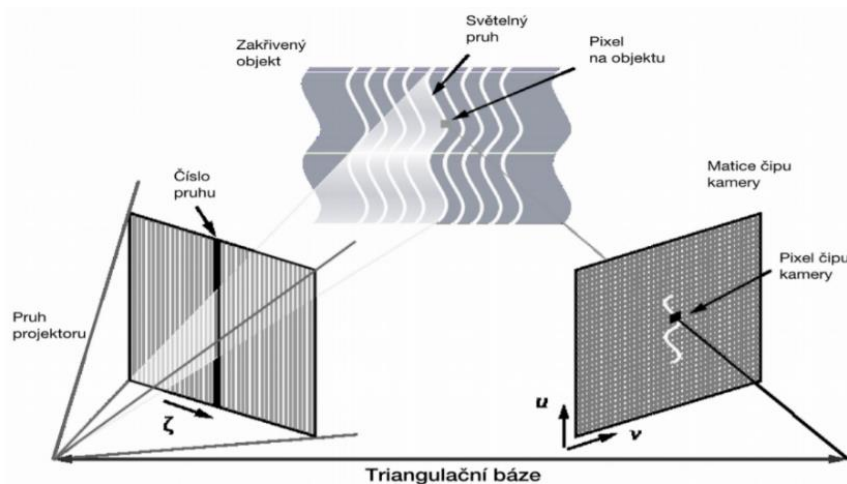
5.4 Strukturované světlo

Skenery využívající strukturované světlo jsou zařízení, která se používají pro měření trojrozměrného tvarového objektu za pomoci promítaného světla a kamer. Strukturované světlo je v dnešní době využíváno především kvůli nižší ceně a rychlému zápisu. To jsou hlavní důvody, kvůli čemu je tato metoda velmi často využívána v praxi. V praxi jsou

využívány jak ve strojírenském odvětví, tak v lékařství či v zábavním průmyslu. Mezi hlavní výhody taktéž patří kompatibilita skenerů, jelikož se využívá pouze profilometrických systémů, které se skládají z jednotky pro zpracování a analýzu (počítač), projekční jednotky (videoprojektor) a vizualizační jednotky (CMOS/CCD kamera). [27]

5.5 Základní princip strukturovaného světla

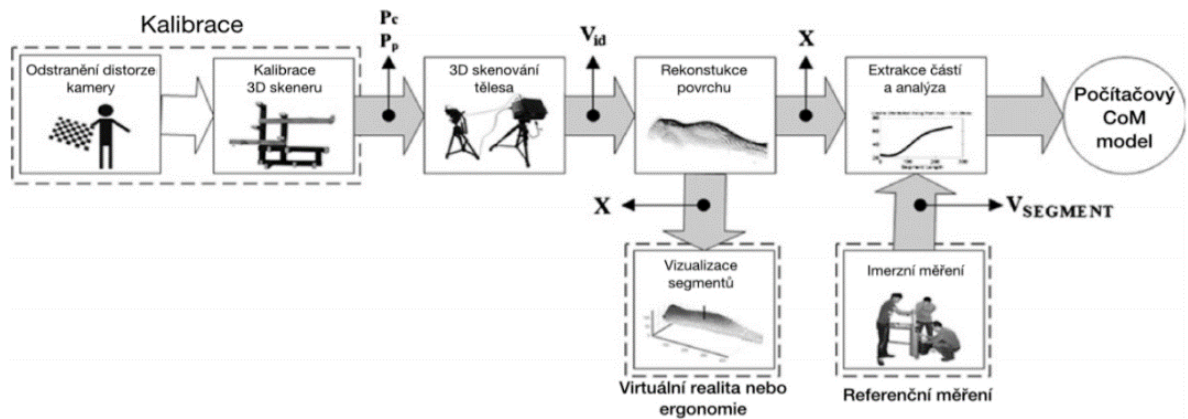
Na skenované těleso jsou promítány úzké pásy světla, které tvoří linii osvětlení. Pásy světla jsou použity pro přesnou geometrickou rekonstrukci tvaru povrchu. Měřicí metoda je taktéž nazývána aktivní triangulace. Nejčastěji se využívá princip vodorovných pruhů. Jakmile rovný pruh dopadne na povrch objektu, vlivem deformací se zakřivuje. Modulovaný vzor je porovnáván v počítači s promítaným vzorem, jak je zobrazeno na obrázku č.31. To znamená, že se porovnávají pixely projektoru a snímacího zařízení. Výsledkem porovnání a za pomoci aplikace vhodného algoritmu se vytvoří body orientované v prostoru neboli mračna bodů. Za pomoci zmíněných bodů se vytváří trojrozměrný obrazec. [28]



Obr. 31 Princip měření se strukturovaným světlem podle [40].

Postup procesu měření 3D skenerem (obrázek č.32) založeného na principu strukturovaného světla je rozděleno do bodů:

1. kalibrace,
2. skenování 3D,
3. rekonstrukce povrchu,
4. analýza,
- 5.COM model.



Obr. 32 Postup procesu měření 3D skenerem podle [41].

5.6 ATOS triple Scan

Advanced topometric sensor (ATOS) je bezdotykový optický 3D skener od firmy GOM, který je využíván pro různorodé aplikace při skenování za pomoci strukturovaného světla. Výstupní data mají vysoké rozlišení. Během měření vznikne velké množství dat za poměrně krátký časový interval. Z důvodu měnitelnosti optik je možné skenovat malé součástky až po velkorozměrné (několikametrové díly). ATOS se využívá v oblastech CAM, CAD a MKD (metoda konečných prvků). U zmíněných případů se posléze porovnává model teoretický vůči modelu vytvořenému pomocí 3D skenování. Součástí ATOS systému je rotační stůl. Taktéž je možné využít počítačem řízeného robota, který umožňuje proces plně automatizovat. Využívají se pruhy strukturovaného světla, za pomoci dvou kamer se vytváří prostorový model, jak je zobrazeno na obrázku č.33.



Obr. 33 ATOS III TRIPLE SCAN podle [42].

Skenovaný díl je snímán tak, že jsou nasnímány minimální tři body z předchozího měření, které slouží pro skládání jednotlivých skenů na sebe. Pro bezproblémové měření jsou na model nalepeny referenční terčíky a na povrch je nanášen samovypařovací sprej. Nalepené body jsou rozmístěny nahodile pro co nejvyšší přesnost měření. Přesnost měření se pohybuje se v rozmezí okolo $\pm 0,05$ mm. Skener měří ve vysokém rozlišení, přičemž na 1 mm vytvoří až 66 bodů. Další výhodou je flexibilita neboli možnost měřit malé i velké objekty, malá rozměrnost přístroje a jednoduchost ovládaní. V případě problémových odlesků se aplikují křídlové či titanové spreje pro zmatnění povrchu. Výstupním souborem je polygonální síť v STL souboru. Vzniknou-li na výrobku díry, je třeba pomocí programu GOM Inspect díry zalepit podle dané geometrie. Výstupy dále mohou být za pomoci mračen bodů, v řezech, v barevných mapách a odchylkách od CAD modelu nebo tvorba protokolu o měření. ATOS III má rozlišení rozlišením CCD čipů $2 \times 8\,000\,000$. Maximálně měřitelný objem má velikost 2000×2000 mm. Jedná se o velmi přesný přístroj, který je aplikován pro měření, kde je třeba zjistit malé detaily na daném dílu. [29,30]

6 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

○ Návrh vstříkovací prototypové formy

Kapitola je zaměřena na konstrukci prototypové vstříkovací formy pro daný díl. Nejedná se o velkosériovou výrobu, ale prototypovou, kdy je třeba vyrobit až 20 kusů výrobku. Konstrukce tvarových vložek byla patřičně upravena, protože tvarové vložky budou vyrobeny za pomoci metod 3D tisku.

○ Výroba tvarových vložek

Kapitola poukazuje, jakými nekonvenčními způsoby je teoreticky možné vyrobit tvarové vložky do vstříkovací formy. Budou zvoleny dvě metody, které budou realizovány. Kapitola obsahuje detailní výrobní postupy, které budou provedeny pro obě metody tisku. Poslední část je zaměřena na zjištění rozměrových odchylek pomocí skenovacího přístroje ATOS III triple scan.

○ Testování vstříkovací formy

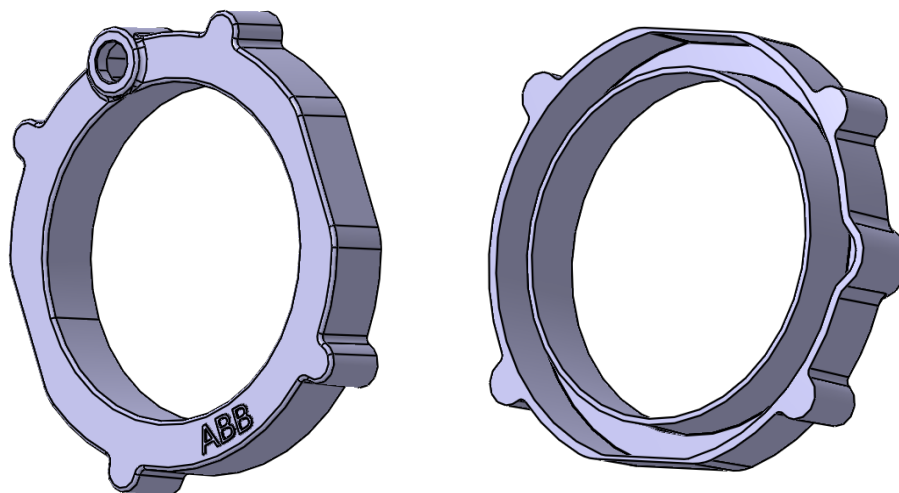
Tato část obsahuje veškerou problematiku týkající se vstříkování plastů. První část bude zaměřena na montáž vstříkovací formy. Dále bude vstříkovací forma testována na vstříkovacím stroji KM 50 CX. Bude vstříkován materiál polypropylen a polyamid 6. Budou testovány a porovnávány všechny tvarové vložky, které byly vyrobeny. V poslední části bude provedena sumarizace všech parametrů a popsán doporučený postup pro budoucí návrhy.

7 KONSTRUKCE PROTOTYPOVÉ VSTŘIKOVACÍ FORMY

Konstrukce vstřikovací formy se nebude lišit vůči klasickému návrhu vstřikovací formy kromě tvarových vložek. Jediný rozdíl bude ve tvarových vložkách, které nebudou vyrobeny frézováním, ale za pomoci 3D tisku. Forma je tvořena univerzálním rámem. Univerzální rám byl vyroben na zakázku, má rozměry $345 \times 295 \times 279$ mm. Do kotvicích desek pro tvárník a tvárnici jsou vyfrézovány díry pro tvarové vložky o velikosti 185×146 mm. Do budoucna je proto možné pouze vyměňovat tvarové vložky a vyhazovací systém při použití stejné vstřikovací formy pro různé díly. Vstřikovací forma musí zaručit velmi dobrou rozměrovou přesnost, přesnost všech dosedacích ploch, ale především jde o tvarové dutiny a bezproblémové vyhazování. Forma je vyrobena z nelegované nástrojové oceli (1.1730) pro práci za studena, která má vysokou houževnatost, dostatečnou tvrdost a dobrou obrobitelnost. Vstřikovací forma je rozdělena na tři základní části. Pravá nepohyblivá část je spojena s tryskou, kudy proudí roztavený materiál. Levá pohyblivá část má funkci otevření formy za pomoci otevíracího mechanismu a taktéž musí zaručit, aby výrobek zůstal po otevření formy na straně tvárníku. Třetí část je vyhazovací systém, který musí zaručit vyhození výrobku. První část praktické části se bude zabývat komplexním řešením konstrukce vstřikovací formy pro daný díl.

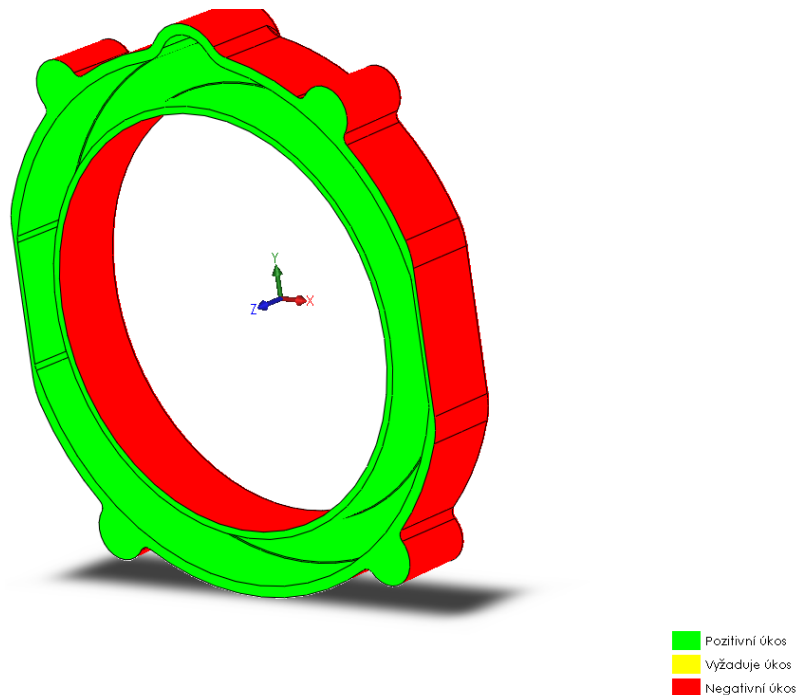
7.1 Volba vzorového dílu

Vstřikovaným dílem je krytka na senzor, která koncepčně vychází z typu Keca C85 navrženého od firmy ABB, který je vizualizován na obrázku č.34. Senzor je určen k měření proudu v rozvaděči vysokého napětí. Sensory proudů se používají k převodu velkých proudů v primárním obvodu sítě na odpovídající signál pro sekundární zařízení (například inteligentní elektronická zařízení LED). Krytka slouží k tomu, aby v něm byly uloženy elektronické prvky a dále má ochrannou funkci pro venkovní prostředí a teploty od -25 do 80 °C. V rámci mé diplomové práce není až tak důležitý popis daného produktu a jeho využití do budoucna, spíše bych chtěl poukázat na možnosti spojení konvenčního vstřikování a využitelnosti 3D tisku pro dané díly ve vstřikovací formě.



Obr. 34 Krytka na senzor – vstřikovaný díl.

Jelikož se jedná o díl vyrobený vstříkáním, musejí být dodrženy všechny konstrukční prvky. Protože bude vstříkováno více druhů materiálu, nebudou tvarové části zvětšené vůči danému smrštění, které je uvedené v materiálovém listě. Lisovací úkosy se běžně používají od $0^{\circ}30'$ do 2° . Úkos pro dutinu formy a vnější úkos byl volen $1^{\circ}30'$ a pro vnitřní průměr byl zvolen 1° . Programem Solidworks 2018 byla provedena analýza úkosů (obrázek č.35), aby nedošlo k opomenutí žádného potřebného úkosu.



Obr. 35 Analýza úkosů.

7.2 Násobnost formy

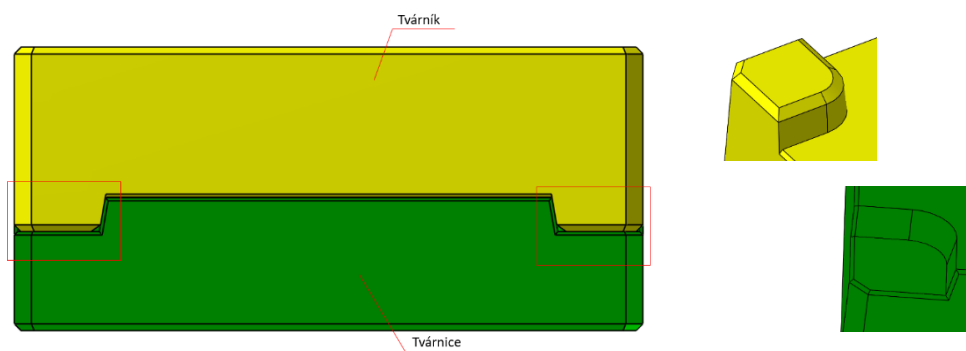
S vyšší násobností formy se zvyšuje její složitost, klesá přesnost výstřiku a snižují se ekonomické náklady. V daném případě se nejedná o velkosériovou výrobu, ale pouze o výrobu desítky kusů pro první prototypové díly, tudíž bude zvolena jednonásobná forma.

7.3 Zaformování výstřiku

Určení vhodné dělicí roviny je jeden z nejdůležitějších a nejsložitějších aspektů při konstrukci vstříkací formy. Návrh musí splnit kritérium, aby díl zůstal vždy na straně tvárníku neboli na pohyblivé straně vstříkací formy pro bezproblémové vyhození vyhazovacím systémem.

7.4 Konstrukční řešení tvarových částí

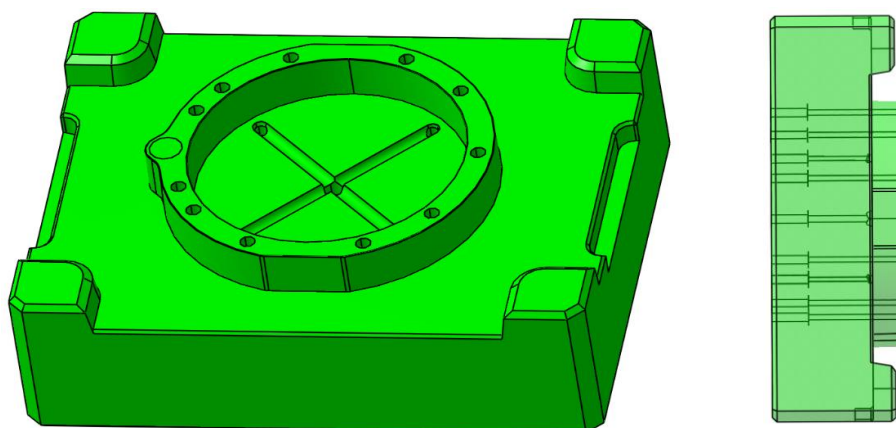
Tvarové vložky jsou uloženy v kotevních deskách tvárníku a tvárnice. Rozměry jsou dány 185×146 mm. Jelikož se jedná o tvarové desky, které budou vyrobeny pomocí metody 3D tisku, návrh byl lehce odlišný. Místo použití středících čepů byly v každém rohu vytvořeny tvarové části, které do sebe zajíždějí během uzavření a otevírání formy. Jsou vytvořeny větší úkosy pod úhlem 15° , jak je znázorněno na obrázku č.36. Protože se tvarové vložky budou vyrábět metodami 3D tisku, je mnohem vhodnější volit tento způsob středění vůči středícím kolíkům. V opačném případě by díry musely být předtíštěné, následně by muselo být prováděno vystružení děr, řezání závitů a montáž čepů. Tato metoda je mnohem náročnější na přesnost a čas. Proto byla volena odlišná metodika výroby, která bude splňovat stejnou funkčnost.



Obr. 36 Tvarové vložky.

7.4.1 Tvárník

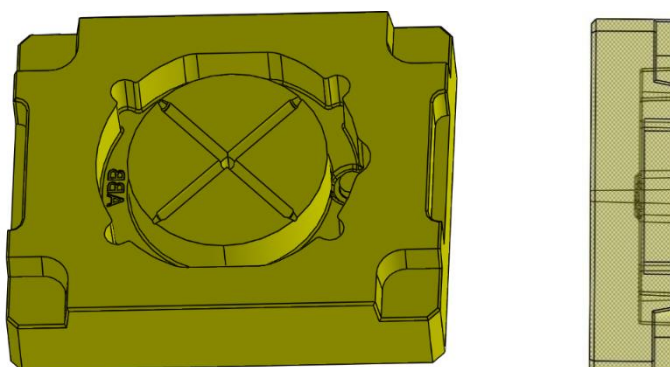
Tvárník je součástí levé pohyblivé části vstřikovací formy. Součástí tvárníku jsou díry pro vyhazovače, aby mohl být výrobek vyhozen. Je možné využít stírací desky, přičemž vyhazovací systém využívá stíracího kroužku a nepoužívají se vyhazovače. Pro danou vstřikovací formu je navrženo mechanické vyhazování tvořící válcové vyhazovače, jak je zobrazeno na obrázku č.37. Na obou stranách tvárníku jsou vytvořena pouzdra, která jsou uchycena upínkami. U děr pro vyhazovače a přidržovače vtoků jsou díry přesně lícovány s danou přesností $\varnothing 4H7$, $\varnothing 5H7$ a $\varnothing 6H7$ podle průměru vyhazovačů.



Obr. 37 Tvárník.

7.4.2 Tvárnice

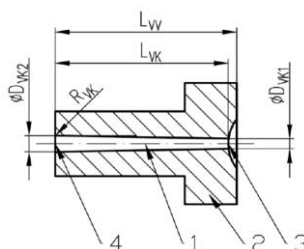
Tvárnice je uložena v pravé statické straně vstříkovací formy. Je upnuta v kotvící desce tvárnice obdobně jako pro tvárník speciálními upínkami. Tvárnice obsahuje rovněž kuželový vtok, kudy proudí tavenina polymeru z vtokové trysky. Průměr vtoku závisí na průměru konce vtokové vložky. Průměr vtokového ústí v tvárnici nesmí být větší než průměr vtokové vložky. Roztavený polymer by se mohl dostat mezi desky. Je zvolen podle výpočtu (2) ϕ 4,5 mm s úkosem 2° . Pro konstrukci vtokového ústí je doporučeno volit úkos větší než $1,5^\circ$. Úkos je vytvořen pro tok polymeru do rozvodných kanálů. Aby se zkrátila doba vstříkování, je tavenina vedena čtyřmi směry rozvodným kanálem a jsou zakončeny filmovými vtoky. Jelikož tvarové vložky budou vyráběny na 3D tiskárně, byl na základě výpočtu (3) zvolen kruhový rozvodný kanál o ϕ 5 mm. Je to nejvhodnější typ rozvodného kanálu, který by byl obtížně vyrobitelný frézováním. V takovém případě je vhodnější konstruovat rozvodný kanál s lichoběžníkovým tvarem. Filmový vtok je vhodný pro kruhové dutiny. Rozvedení taveniny do jednotlivých míst není rovnoměrné, proto má filmový vtok proměnnou tloušťku ústí podle obrázku č.38. Oddělování vtokového kanálu od výrobku bude provedeno až po vyhození z formy.



Obr. 38 Tvárnice.

7.5 Vtokový systém

Pro vstříkovací formu byl zvolen studený vtokový systém. Vtoková vložka byla použita od firmy Hasco jako normálie na základě daných výpočtů. Na obrázku č. 39 je popsána vtoková vložka.



1 – vtokový kanál, 2 – vtoková vložka, 3 – místo napojení vtokového kanálu na trysku plastikační jednotky, 4 – místo napojení vtokového kanálu na rozváděcí kanály

Obr. 39 Vtoková vložka [45].

Průměr vtokové vložky byl stanoven podle výpočtu. Vztahy jsou použity z knihy [46].

Navrhujeme se průměr $\varnothing D_{VK1}$ a $\varnothing D_{VK2}$

$$D_{VK1} = 1,45 \cdot s \quad (1)$$

$$D_{VK1} = 1,45 \cdot 2 = 2,9 \text{ mm}$$

$$D_{VK1} = 2,9 \text{ mm} \rightarrow \text{volím } \varnothing 3 \text{ mm}$$

$$D_{VK2} = s + 3 \quad (2)$$

$$D_{VK2} = 3 + 2$$

$$D_{VK2} = 5 \text{ mm} \rightarrow \text{volím } \varnothing 4,5 \text{ mm}$$

s – tloušťka stěny

Průměr rozvodného kanálu je stanoven podle vztahu:

$$D_v = s + 1,5 \quad (3)$$

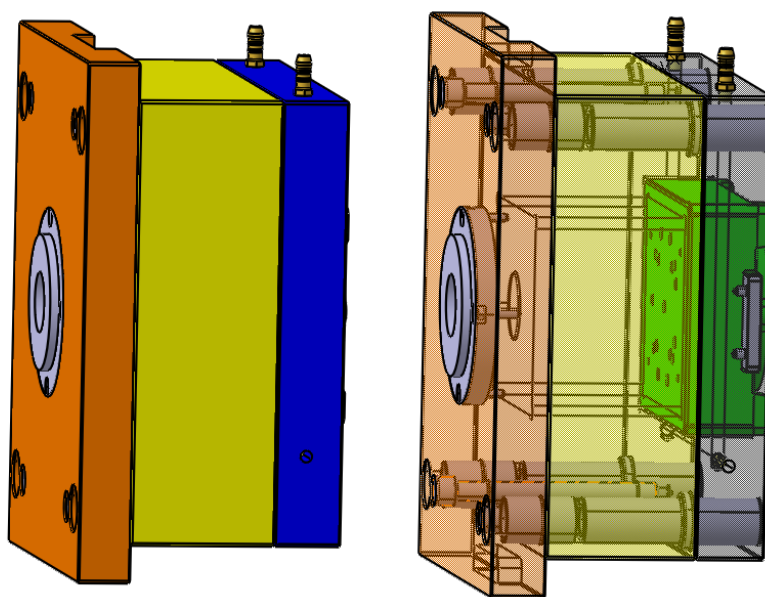
$$D_v = 2 + 1,5$$

$$D_v = 3,5 \text{ mm}$$

Volím průměr rozvodného kanálu $\varnothing 5 \text{ mm}$.

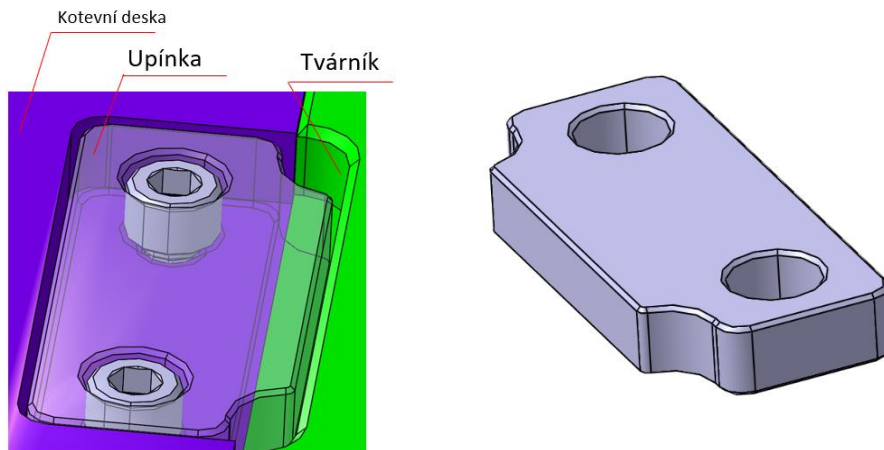
7.6 Levá strana vstříkovací formy

Vstříkovací forma je rozdělena do tří základních částí. Levá strana formy je nazývána pohyblivá část. Je-li vstříkovací forma uzavřena, je do formy vstříknuta tavenina. Jakmile je výrobek tuhý a levá část vstříkovací formy se odsune a výrobek je vyhozen pomocí vyhazovacího systému, jak lze vidět na obrázku č.40.



Obr. 40 Levá strana vstříkovací formy

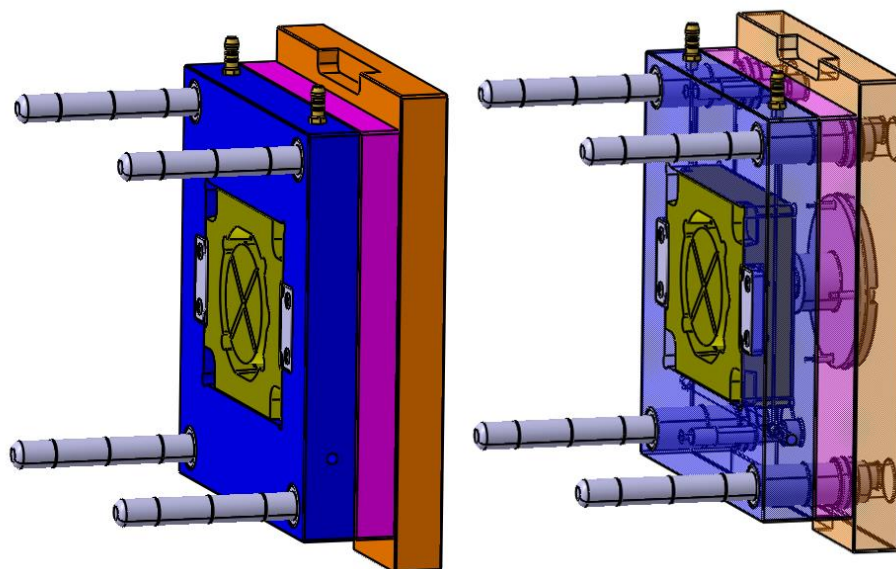
Tvárník je upnut pomocí speciálních upínek (obrázek č.41). Upínka slouží k tomu, aby se tvárník během procesu vstřikování či při otevření vstřikovací formy nemohl pohybovat jakýmkoliv způsobem. Upínky jsou přišroubovány šrouby s vnitřním šestihranem do kotvící desky. Dané konstrukční řešení bylo zvoleno, protože tvárník bude vyráběn pomocí 3D tisku a aby se výrobní proces nemusel prodlužovat dodatečným řezáním závitu, za předpokladu, že by tvárník měl být přišroubován k opěrné desce.



Obr. 41 Upnutí tvárníku.

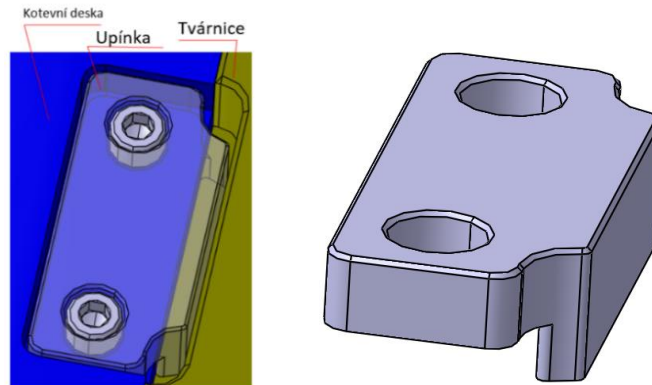
7.7 Pravá strana vstřikovací formy

Pravá strana vstřikovací formy (obrázek č.42) je nepohyblivá a je spojena se vstřikovací jednotkou, kudy proudí tavenina polymeru přes trysku a následně přes rozvodné kanály do dutiny formy.



Obr. 42 Pravá strana vstřikovací formy.

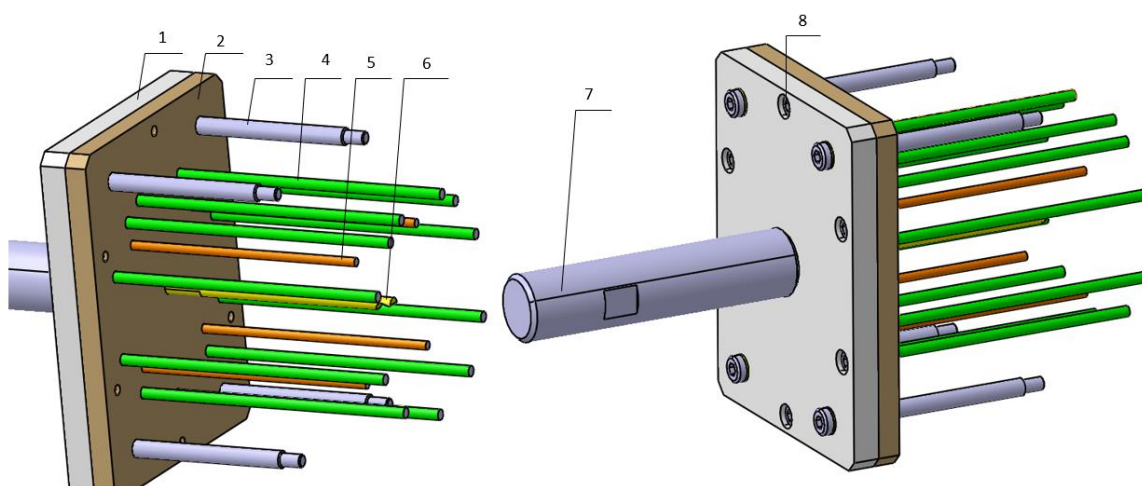
Tvárnice, která je upnuta v kotevní desce, je řešena obdobným způsobem jako u tvárníku. Jediný rozdíl je v hloubce drážky, za kterou je tvárnice upnuta, jak je vizualizováno na obrázku č.43.



Obr. 43 Upnutí tvárnice.

7.8 Vyhazovací systém

Pro danou vstříkovací formu bylo navrženo mechanické vyhazování za pomoci válcových vyhazovačů, jak jde vidět na obrázku č.44. Aby bylo provedeno rovnoměrné vyhození výrobku, bylo použito 11 válcových vyhazovačů o průměru 5 mm. Vyhazovací systém taktéž obsahuje 4 vyhazovače sloužící jako přídržovače vtoku o průměru 4 mm. Aby bylo zaručení přidržení výrobku na levé strany vstříkovací formy, je vyroben přídržovač vtoku tvaru Z o průměru 6 mm. Všechny vyhazovače byly použity od firmy Hasco. Všechny vyhazovače a přídržovače vtoku musely být zkráceny na požadovanou délku.

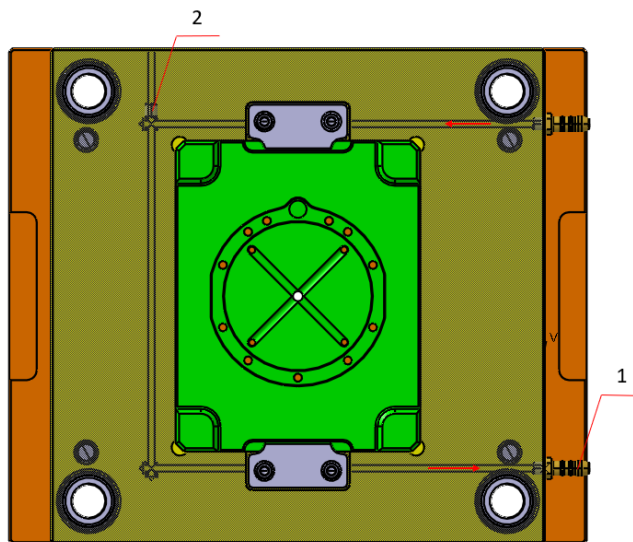


1 – opěrná deska, 2 – kotevní deska, 3 – vodící čep, 4 – vyhazovač,
5 – přídržovač vtoku, 6 – přídržovač vtoku Z, 7 – táhlo,
8 – šroub s vnitřním šestihranem,

Obr. 44 Vyhazovací systém.

7.9 Temperace formy

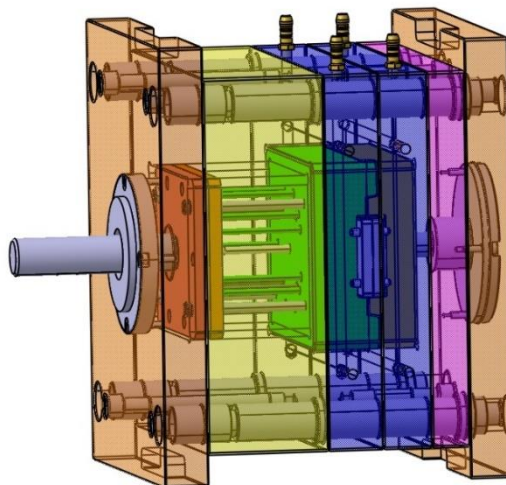
Temperační okruh je veden v kotvících deskách tvárníku a tvárnice. Jsou navrženy do tvaru U okolo vyfrézovaných kaps pro tvárník a tvárnice. Průměr kanálu je ϕ 8 mm. Součásti temperačního okruhu jsou ucpávky Z940 od firmy Hasco pro uzavření daného okruhu. Dále je temperační okruh vybavený čtyřmi přípojkami Z87, na které jsou připojeny rozvodné hadice, které jsou spojené s temperačním zařízením.



Obr. 45 Temperační okruh

7.10 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma je složena ze tří částí. Levá pohyblivá strana, pravá statická strana a vyhazovací systém. Normálně byly použity od firmy Hasco. Všechny desky jsou zajištěny pomocí středících a vodicích prvků. Tvárník a tvárnice jsou upnuty upínkami. Maximální rozměry formy jsou 279 mm × 345 mm × 295 mm. Na obrázku č.46 je vizualizace celé sestavy se všemi součástkami.



Obr. 46 Vstřikovací forma.

8 VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK

Jelikož se jedná o prototypovou vstřikovací formu, chtěl bych poukázat na možnosti výroby tvárníku a tvárnice jiným způsobem než za pomoci frézování. V dnešní době je frézování tvarových vložek stále nejpřesnější metodou. S tím se pojí i vyšší cenová náročnost a delší doba dodání tvarových vložek. Když se jedná o složitější formu, u níž je nutno vyrobit například negativní úkopy v díře, musí se použít elektroerozivní obrábění a celý proces se velmi prodražuje a prodlužuje, což v rámci výroby tvarových vložek na 3D tisku není žádný problém. Nejčastěji se tvarové vložky pro prototypovou vstřikovací formu vyrábějí ze slitiny hliníku. Tvarové vložky vyrobeny ze slitiny hliníku jsou schopny vyrobit stovky kusů. V případě prototypování je to zbytečně mnoho kusů, a proto je snaha najít alternativní metody výroby. V rámci vývoje a prototypování prvního návrhu tvarových vložek jsou v praxi často dodatečně upravovány či je třeba je vyrobit zcela znovu v jiném konstrukčním konceptu. V této fázi cena a především čas vývoje velmi rychle narůstá.

8.1 Volba vhodné metodiky

V teoretické části byly shrnuty metody 3D tisku. V této kapitole budou rozebrány metody, jakými by mohly být vyrobeny tvarové vložky. Týká se to metod FDM, SLM, DMLS, polyjet a DLP.

Metoda FDM je vhodná díky cenové dostupnosti a rozmanitosti materiálů. Nejvhodnější pro výrobu tvarových vložek metodou FDM je materiál PEEK (PolyEtherEtherKetone), který vyniká svou tvarovou stálostí, pevností a vyšší tepelnou odolností, která se pohybuje okolo 250 °C. Tisková struna má pevnost v tahu 98 MPa. Avšak komplikace nastává v dané technologii během procesu tisku. I když má materiál PEEK výborné vlastnosti, je velmi problémový na tisk. Není zaručeno, že se povede vytisknout výrobek na první pokus. Teplota tavení materiálu je okolo 343 °C a pracovní teplota je 400 °C, což není možné vytisknout na jakékoliv FDM tiskárně, a tím taktéž narůstá cena tisku. Rovněž je nutno uvažovat teplotu komory, kde musí být minimálně 120 °C. Obdobné materiálové vlastnosti má materiál Ultem (Polyetermide) 9085. Další nevýhodou je tloušťka nanášené vrstvy a není možné vytvořit přesné detaily. Jak již bylo zmíněno, materiál se nanáší po vrstvách a z toho důvodu je povrch poměrně hrubý a je třeba použít vhodnou dokončovací operaci. Tím vznikají značné nepřesnosti tisku, a to je důvod, proč FDM tisk není vhodný pro výrobu tvarových vložek. Taktéž je nutno uvažovat cenu materiálu, která je velmi vysoká. Metoda ADAM je mnohem vhodnější. Využívá částečně principu založeného na FDM, ale kovových strun. Dále je výrobek vložen do sintrovací pece a vzniká celokovový výrobek. Pro požadovanou jakost je třeba zvolit vhodnou dokončovací operaci. Metoda tisku je cenově dostupnější oproti metodě SLM a DMLS. [9,10]

Pro SLS metodu se jedná o spojování prášku laserem pod teplotou tavení, kdy je práškový materiál spojován pomocí vhodného pojiva. Hlavní nevýhodou SLS metody je vznik velkého vnitřního pnutí. Používá se především pro plasty (nylon, ABS, PET) či keramiku. Metoda SLS má i možnost spékání kovového prášku (DMLS), kdy je třeba použít vyšší výkon laseru. Vhodná metoda je SLM, přičemž práškový materiál je zcela roztaven a spojován do jednoho celku podle daného tvaru výrobku. Proces probíhá v inertní atmosféře dusíku, kdy je možné deklarovat čistotu zpracovaného materiálu. Hlavní rozdíl mezi SLM a DMLS je ten, že v případě SLM dochází k úplnému roztavení materiálu, čímž dosahuje hustoty až 99,9 %, pro metodu DMLS dochází pouze ke spékání kovového prášku.

Metoda SLM má povrchovou toleranci 0,05–0,2 mm. Podobnou povrchovou toleranci má i metoda SLS a DMLS. Metodikou SLM a DMLS je možné vyrobit tvarové vložky, ovšem je třeba brát v úvahu mnoho faktorů, kterých je třeba se vyvarovat. Pro metodu DMLS a SLM je třeba výrobek dál žíhat pro odstranění vnitřního pnutí. Při aplikování SLM metody je třeba brát v úvahu zbytkové pnutí, které zůstává ve výrobku. Pro metodu SLM je nutno výrobek žíhat. Obě metody vyžadují stavbu podpor, které je třeba po dokončení tisku odstranit vhodným způsobem. Obě metody mají hrubý povrch po vytištění, proto je třeba použít vhodnou dokončovací metodu (například broušení). Vzhledem k vysoké ceně tisku a složitosti dodatečných operací, které by byly nutno provést, jsem nepoužil ani jednu metodu. Metodou SLM a DMLS je možné vyrobit tvarové vložky do vstřikovací formy, které zaručí i mnohem vyšší sériovost. [7,8]

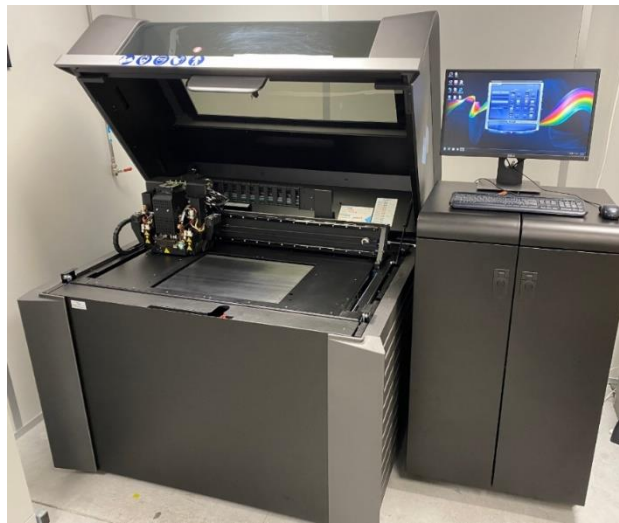
Metody SLA a DLP jsou velmi podobné. Tloušťka vytvrzované vrstvy je v rozmezí 0,02–0,15 mm. Povrch výrobků není třeba dostatečně upracovat. Hlavní výhodou DLP vůči metodě SLA je mnohem větší rychlost tisku, protože projektor osvětí celou vrstvu najednou oproti laseru. Čas tisku je tudíž mnohonásobně nižší. Pro metodu DLP existují vysokoteplotní polymery, které mají teplotní odolnost kolem 230 °C. [4,5]

Technologie polyjet využívá principu nanášení fotopolymerního materiálu pomocí inkoustové hlavy (inkjet hlavy). Změna probíhá za působení světla. Vrstvení materiálu probíhá v tenkých vrstvičkách z inkjet hlavy, výška vrstvy je 0,016 mm. Hlavními výhodami popsané technologie jsou především vysoká kvalita materiálu, hladkost povrchu a detailní zpracování dílu. Jelikož dochází k vytvrzení světlem, dochází k zesílení vazeb a výrobky mají poměrně velkou tvrdost, kdy dosahují 85–87D Shore a krátkodobou teplotní zátěž by měly zvládnout až do 300 °C. [6]

Dále je možné vyrobit tvarové vložky pomocí technologie galvanoplastika. V první řadě je třeba vytisknout pozitiv neboli finální výrobek na tiskárně schopné detailů (SLA, DLP). Následně pomocí galvanického pokovování vytvořit několikamilimetrovou vrstvu ze slitiny niklu či mědi. Dutiny tvarových částí jsou vyplněny polyuretanem či slitinou mědi. Jelikož vrstvení kapiček roztaveného kovu není rovnoměrné, vyžaduje vybroučení povrchu. Do všech děr pro vyhazovače je nutno vložit vložku. Dále je nutno vystružit díry pro vyhazovače na souřadnicové vrtačce. Aplikace galvanoplastiky je vhodná pro výrobu tvarových částí, ovšem má řadu nevýhod. Tvorba 1 mm vrstvy niklu trvá 48 hodin. Celý postup se skládá z mnoha technologických operací, tudíž rapidně narůstá čas výroby. Popsanou metodikou je reálné vyrobit tvarové vložky, ovšem nepoužiji tuto metodu v rámci diplomové práce, protože se jedná o hledání způsobů, které jsou co nejrychlejší a časově co nejméně náročné. Firma Arburg přišla s konceptem odlišným od všech zmíněných metod. Firma si nechala patentovat svou 3D tiskárnu Arburg freeformer (kapitola 1.6.1). Tiskárna kombinuje vstřikování s 3D tiskem. Hlavní výhodou je ta, že vstupní materiál je ve formě plastových granulí, které se používají pro vstřikování plastů. Je možné tisknout z obyčejných konvenčních plastových materiálů, které se používají pro vstřikování. Tudíž se neuvažuje výroba tvarových vložek pomocí 3D tisku, ale je možné zhotovit finální výrobek bez použití vstřikování. Technologie zaručuje z 80–95 % stejné vlastnosti jako při výrobě za využití technologie vstřikování. Technologie měla být původně použita, ovšem z důvodu pandemie nebylo možné tisk provést. Podle průzkumu bylo zjištěno, že jediná tiskárna v České republice se nachází na liberecké fakultě. V rámci praktické části budou vyráběny tvarové vložky metodami polyjet a DLP. [11,12]

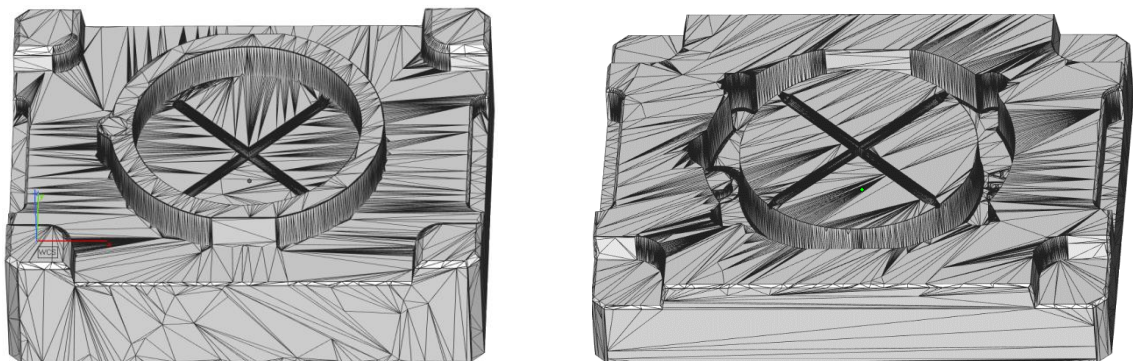
9 VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK METODOU POLYJET

Tvarové vložky byly tisknuty na tiskárně Stratasys Objet J750 (obrázek č.47). Je to tiskárna, která pracuje na principu polyjet technologie. Tiskárna umožňuje tisknout až 14 mikronové vrstvy s velmi hladkým povrchem modelů. Maximální velikost výrobku pro tisk je 490 mm × 390 mm × 200 mm. Jelikož se jedná o velkou plochu, byly obě tvarové vložky tisknuty zároveň. Byl zvolen materiál s obchodním názvem Digital ABS, což je kombinace materiálů RGD515 a RGD535.



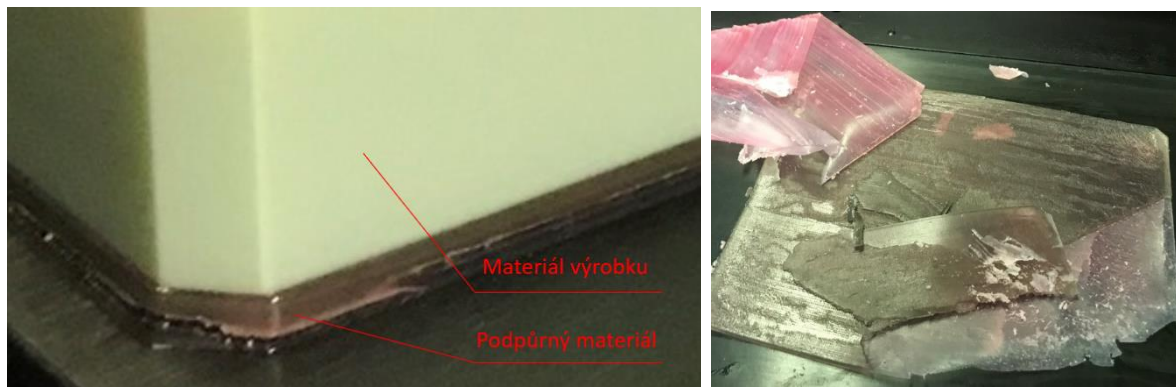
Obr. 47 Tiskárna Objet J750 [43].

Nejdříve byly pro tvárník a tvárnici vytvořeny STL soubory. Byly převedeny v programu Solidworks. Následovala úprava polygonizované sítě v programu Magics od firmy Materialise. Síť skládající se z velkého množství trojúhelníků byla nadále upravena. Na rovných plochách bylo obsaženo menší množství trojúhelníků a na různých přechodech bylo velké množství nahuštěných trojúhelníků proto, aby tiskárna byla schopna vytisknout modely v excelentních detailech, jak je vizualizováno na obrázku č.48.



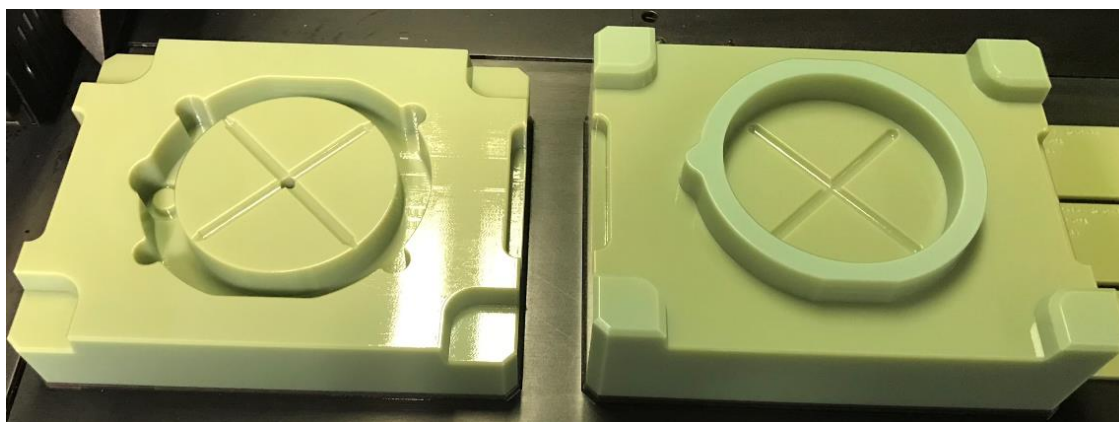
Obr. 48 STL modely.

V první fázi byl tisknut podpůrný materiál s vlastnostmi podobnými elastomeru (obrázek č.48). Obchodní název od firmy Objet je SUP706. Pro oba výrobky bylo spotřebováno 330 ml podpůrného materiálu. Podpůrný materiál byl tištěn do výšky 4 mm.



Obr. 49 Podpůrný materiál pro 3D tisk.

Na výrobu obou částí bylo spotřebováno 3756 ml fotopolymeru. Tvárník byl vytvořen z 2302 vrstev. Tisk trval 18 hodin a 15 minut. Na obrázcích č. 49 a 50 jsou hotové výtisky. Tvarové vložky mají maximální rozměr na délku a šířku 185 x 146 mm



Obr. 51 Tvarové vložky – metoda polyjet.



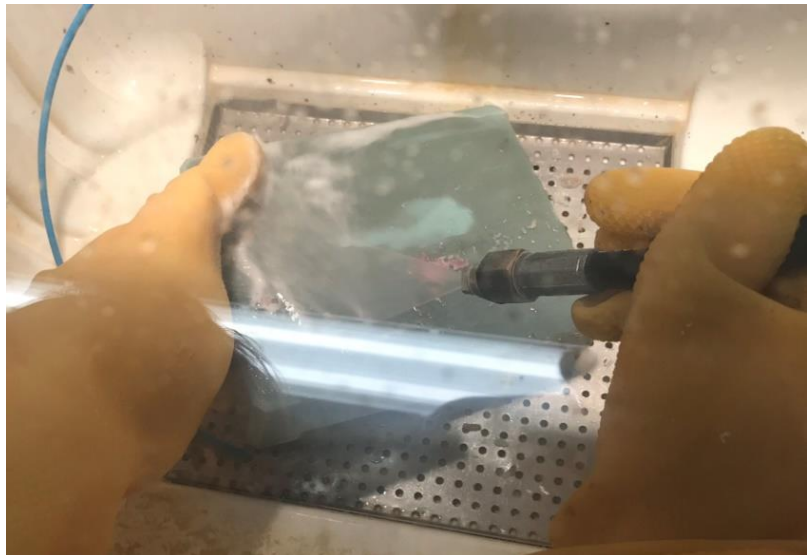
Obr. 50 Zадní strana výrobku.

V další fázi je třeba oddělit podpůrný materiál od modelů. Na rozdíl od metody DLP je v tomto případě oddělení velmi jednoduché – za použití škrabky na silikon (obrázek č.52). V první řadě je třeba oddělit výrobky od podložné desky a následuje oddělení podpůrného materiálu od výrobku. Aby během oddělování nedošlo k poškození zadní strany, je nutné ponechat tenkou vrstvu podpůrného materiálu, který bude odstraněn tlakem vody.



Obr. 52 Oddělení výrobku od desky.

Jak již bylo zmíněno, je třeba oba výrobky otryskat tlakem vody (obrázek č.53), aby byly odstraněny všechny zbytky podpůrného materiálu a veškeré prachové částice. Byl použit přístroj Water jet Injet 220.



Obr. 53 Otryskávání výrobku.

Po otryskání vodou bylo provedeno tryskání stlačeným vzduchem, díky kterému byl odstraněn veškerý prach a nečistoty. Dále byly výrobky zcela vysušeny a na hodinu odloženy, aby byla odstraněna veškerá vlhkost, která vznikla během dokončovacích operací. Dále je výrobek obvykle naložen do isopropylalkoholové lázně pro zvýšení hladkosti výrobku. Jelikož dochází ke zvýšení křehkosti výrobku, daný technologický krok nebyl proveden. Firma Objet doporučuje pro zvýšení teplotní odolnosti o 20 °C devítihodinový hodinový temperační proces, který je nastaven podle tabulky č.1. Byla použita programovatelná temperační komora od firmy Memmert (obrázek č.54). Firma Memmert vyvinula vlastní software nazývaný Celsius, který umožňuje stanovení dané teploty pro různé časové intervaly. Pro obě tvarové desky byl nastaven stejný temperační proces, který trval 9 hodin při měnících se teplotách od 20 do 100 °C.

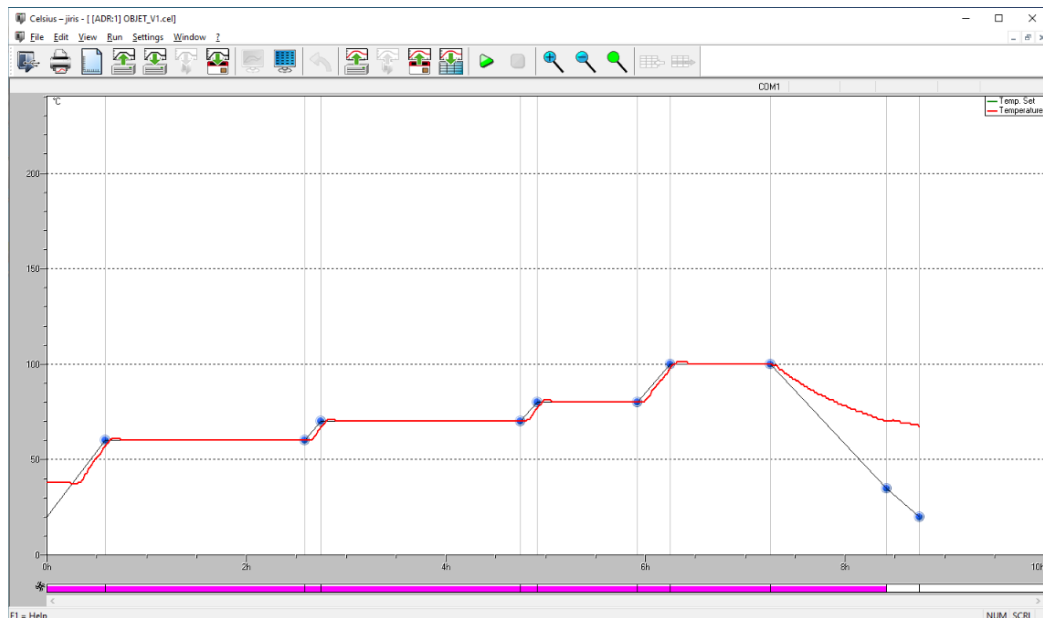


Obr. 54 Temperační komora.

Tab. 1 Temperační proces

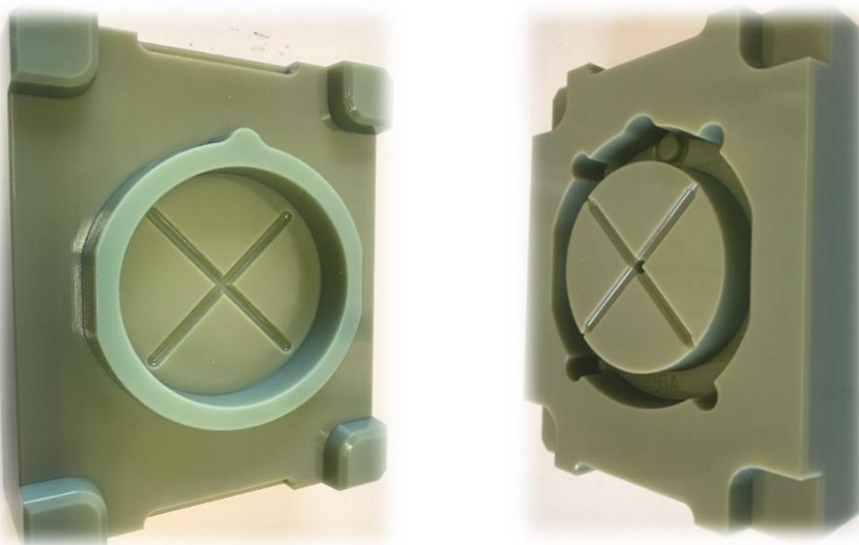
n	doba trvání [hod]	časový interval [hod]	teplota [°C]	ventilace [%]
1	0:35	0:35	60	80
2	2:35	2:00	60	80
3	2:45	0:10	70	80
4	4:45	2:00	70	80
5	4:55	0:10	80	80
6	5:55	1:00	80	80
7	6:15	0:20	100	80
8	7:15	1:00	100	80
9	8:25	1:10	35	80
10	8:45	0:20	20	80

Programem byl vygenerován graf, kde lze vidět, jak temperační komora dodržela teploty vůči nastaveným parametrům. Černá křivka je vytvořena na základě vstupních hodnot a červená křivka je vizualizovaná teplota v reálném čase vůči dané křivce.



Obr. 55 Graf temperačního procesu.

Na obrázku č. 55 lze vidět odchylky při vstupu, kdy se místo 20 °C začíná na 37 °C. Taktéž lze vidět, že u výstupu nebylo možné se dostat na hodnotu 20 °C. Je to především z důvodu, že v místnosti bylo průměrně kolem 25 °C, tudíž nebylo možné se dostat na tak nízkou teplotu. Je to ovšem malá odchylka, kterou lze zanedbat. Na obrázku č.56 a 57 jsou dokončené tvarové vložky pro variantu 1.

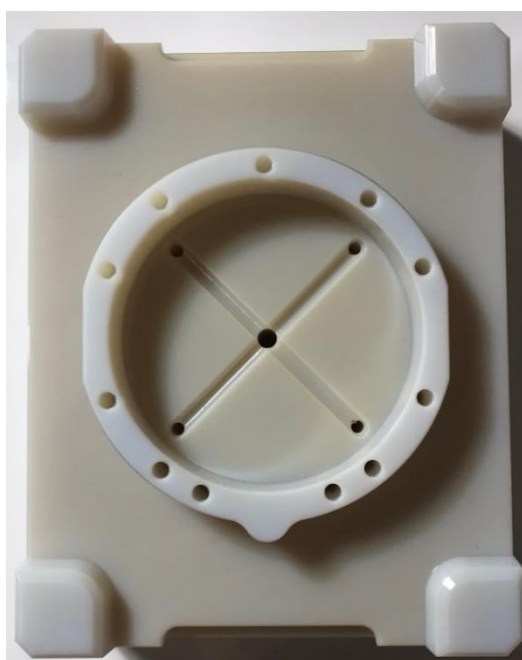


Obr. 56 Tvarové vložky – varianta 1.

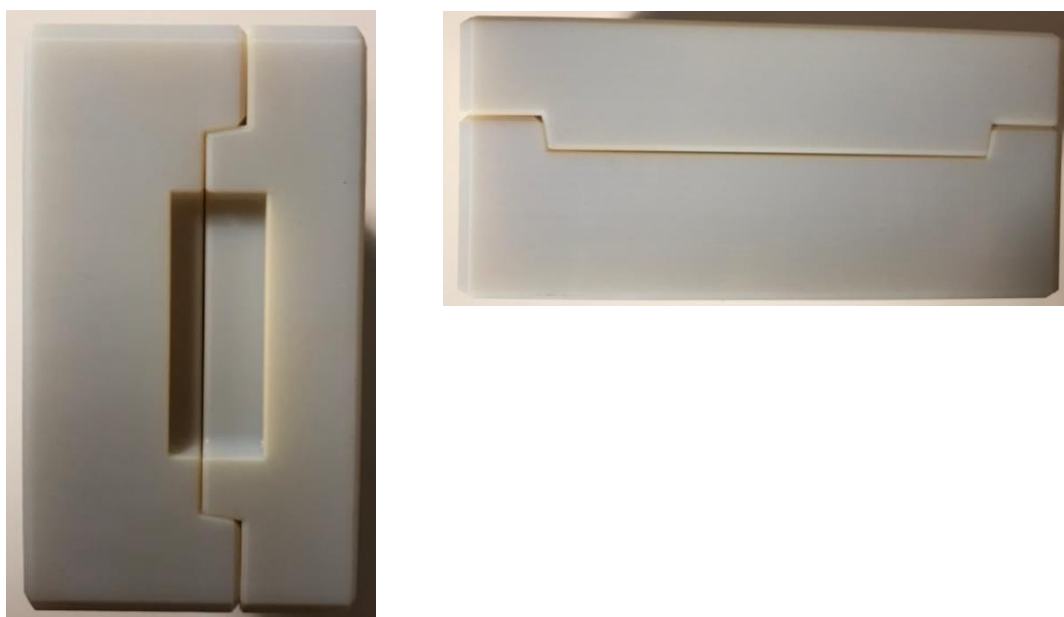


Obr. 57 Tvarové vložky v celku – varianta 1.

Deska tvárníku podle obrázku č. 37 obsahuje díry pro vyhazovače. V rámci mé diplomové práce byly vyrobeny dvě dvojice tvarových vložek. U tvárníku pro variantu 1 nejsou vyrobeny díry pro vyhazovače. Budou vrtány dodatečně na sloupové vrtače. V případě varianty 2 (obrázek 58 a 59) je tvárník vyroben i s dírami pro vyhazovače. Všechny díry jsou zmenšeny o 0,2 mm, tudíž bude třeba jej pouze vystružit. Tvarové vložky u varianty 2 jsou vyrobeny ze stejného materiálu s rozdílem jiného pigmentu. Vlastnosti materiálu jsou zachovány. Celý výrobní proces včetně všech dodatečných operací probíhal totožně jako pro variantu 1.



Obr. 58 Tvarové vložky – varianta 2.



Obr. 59 Tvarové vložky složené – varianta 2.

9.1 Skenování tvarových vložek

Aby byla zajištěna přesnost tisku, tvarové vložky byly skenovány. Byl využit přístroj ATOS III triple scan, který je vyobrazen na obrázku č.60. V teoretické části v kapitole 5.7 byl detailně popsán princip skenování na skenovacím zařízení. Součástí skenovacího přístroje je otočný stůl a stojan pro přístroj.



Obr. 60 Skener ATOS III.

ATOS III triple scan je schopen skenovat objemná tělesa až do velikosti 2000×2000 mm. V první řadě je třeba zvolit vhodnou optiku do kamer. Skener má rozlišení kamer 2×8 MPx, což je vůči ATOS II lepší o 3 Mpx na jednu kameru. Maximální velikost výrobku byla $185 \times 146 \times 44$ mm, a proto bylo použita optika 320. Aby bylo měření, co nejpřesnější, byla provedena kalibrace. Pro kalibraci se využívá kalibrační deska. Kalibrace přístroje byla provedena ve dvaceti následujících krocích, kdy byly měněny rozteče a úhly natočení mezi kalibrační deskou a skenerem. Z kalibračního měření byl zhotoven záznamový protokol o přesnosti měření přístroje. Přístroj skenuje s přesností 0,02 mm pro oba případy měření, což v daném případě je zcela dostačující. V první řadě byly na tvarové vložky nalepeny skenovací body. Body byly nalepeny co nejvíce náhodně, aby nedošlo ke špatnému čtení bodů a špatnému měření. Tvarové vložky byly skenovány v celku a pak každá součást zvlášť. Tvarové vložky byly skenovány ze všech stran. Vždy bude uvedeno pro variantu 1 a variantu 2 podle obrázku č.61 a 62).



Obr. 62 Tvarové vložky – varianta 1



Obr. 61 Tvarové vložky – varianta 2

Protože tvarové vložky jsou poměrně lesklé, skener měl problém naskenovat výrobek jako celek. Z tohoto důvodu byl použit samovypařovací sprej pro zmatnění obou výrobků, jak jde vidět na obrázku č.63). Byl aplikován především na místa, která šla nejhůře zobrazit v programu během skenování.



Obr. 63 Tvárnice s body + samovypařovací sprej.

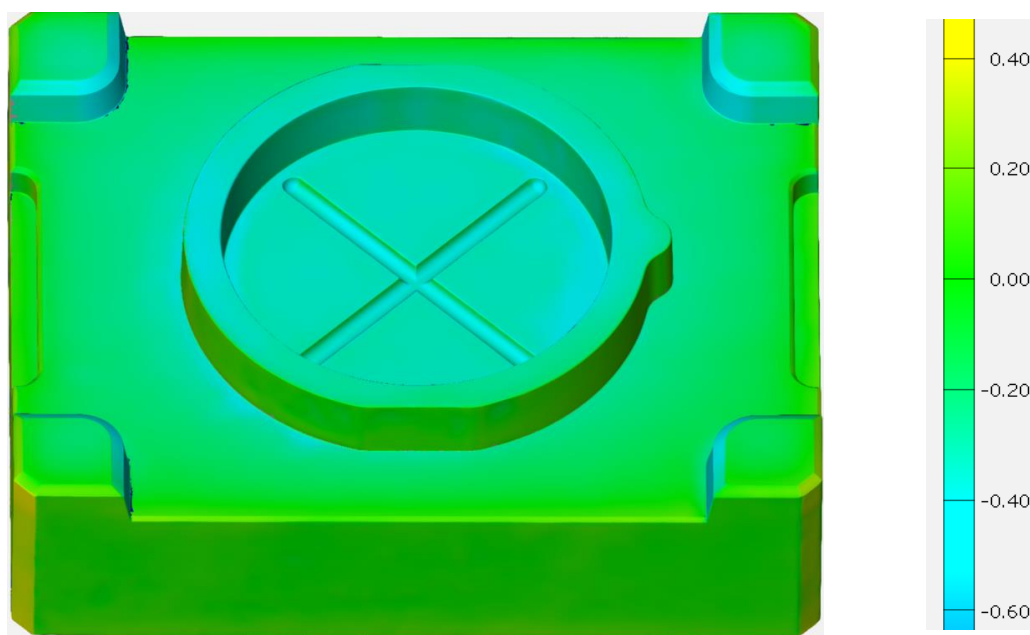
Byl aplikován samovypařovací sprej Reflecon tarnish – 11 – HC. Výrobky byly nastříkány po celé ploše. Když byl stále problém s viditelností a skenováním, zvětšila se vrstvička nastříkána sprejem. Jednalo se o vtokový kanál v tvárnici a díry pro vyhazovače v tvárníku pro variantu 2.

9.2 Analýza rozměrů

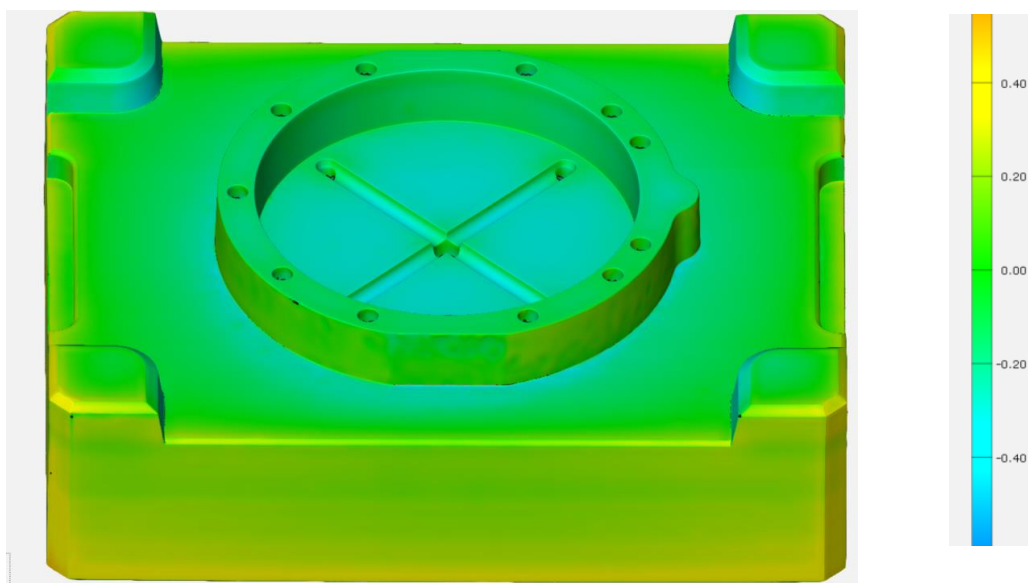
Kapitola je zaměřena na zjištění rozměrových odchylek, které vznikly během tisku. Bude používán program GOM Inspect. Nejdříve je třeba upravit naskenovaný soubor, který vznikl během skenování. Jelikož každý naskenovaný výrobek má v sobě zakomponované chyby, je nutno je odstranit. Nejčastějším jevem je výskyt děr, které je třeba zalepit, aniž by se změnila geometrie daného výrobku. Dále je zjemněna a vyhlazena polygonizovaná síť. Jakmile jsou modely vhodně připravené, jsou vloženy step modely pro tvárník a tvárnici, ze kterých byly vytvořeny STL soubory pro tisk. Byly porovnány rozměrové odchylky vůči virtuálním modelům, které byly vytvořeny v programu Catia V5R20. V rámci tvorby prototypových částí je přijatelná rozměrová odchylka do $\pm 0,4$ mm. Jedná se pouze o ověření funkčnosti daného výrobku a ověření, zda je celá vstřikovací forma dobře zkonstruována. Kdyby došlo ke změně konstrukčních požadavků, je možné tvarové vložky vytisknout znovu do 24 hodin a otestovat novou verzi tvárníku a tvárnice. Je nutno zmínit, že rozměrové odchylky mohly vzniknout nepřesností tisku, kdy tiskárna garantuje přesnost tisku v rozmezí $\pm 0,1$ mm, vlivem chyby skenovacího přístroje ATOS, aplikováním samovypařovacího spreje, vlivem temperančního procesu či úpravou modelu v programu GOM inspect při lepení děr a vyhlazování sítě.

9.2.1 Rozměrová analýza tvárníku

Vlivem porovnání modelu naskenovaného vůči step modelu byly zjištěny odchylky tvárníku. Budou přiloženy vždy dva obrázky pro variantu 1 a variantu 2. Průměrná odchylka byla programem GOM inspect stanovena pro variantu 1 na 0,1856 mm a pro variantu 2 na 0,1345 mm. Podle obrázků č. 64 a 65 lze vidět rozměrové odchylky pro obě varianty. Podle analýzy rozměrů vyobrazených pomocí barevných map lze vidět, že pro variantu 2 je tisk na tvarové části přesnější za stejných podmínek.



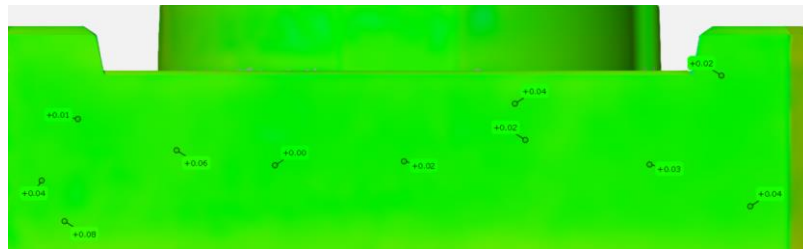
Obr. 64 Analýza tvárníku – varianta 1.



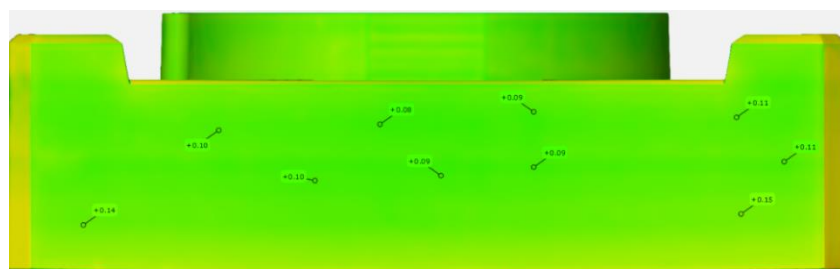
Obr. 65 Analýza tvárníku – varianta 2.

Kontrola délky a tvárniku

Nejdříve byly porovnány hlavní rozměry (délka, šířka, výška a hloubka pouzdra) a následovně byly zjištěny rozměrové odchylky tvarové části. Kontrolují se právě zmíněné rozměry, protože tvarová vložka musí lícovat tvarově v kotvicí desce pro tvárník. Při kontrole odchylek délky pro obě strany pro jednu nebo druhou variantu jsou téměř totožné.



Obr. 66 Kontrola délky – varianta 1.

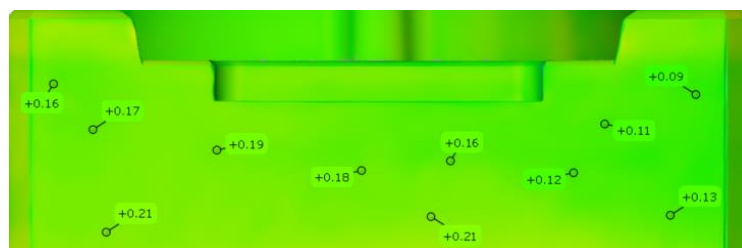


Obr. 67 Kontrola délky – varianta 2.

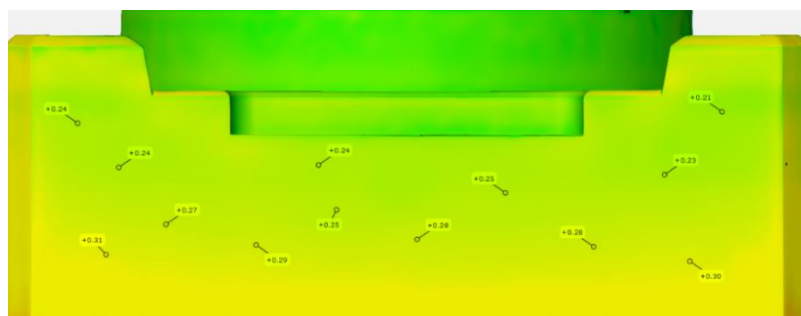
Podle obrázku č. 66 je vidět, že varianta 1 má lepší rozměrové odchylky, které jsou v průměru kolem + 0,03 mm. Pro variantu 2 (obrázek č.67) byly zjištěny větší rozměrové odchylky kolem + 0,1 mm. Tvarové vložky budou lícovány do kotvicích desek, v kterých je rozměrová tolerance $\pm 0,2$ mm.

Kontrola šířky tvárníku

Při kontrole šířky tvárníku pro variantu 1 podle obrázku č.68 jsou odchylky v průměru + 0,15 mm a pro variantu 2 podle obrázku č.68 v průměru + 0,20 mm. Oproti délce byly zjištěny větší rozměrové odchylky. Jelikož vyfrézované tvarové kapsy ve vstřikovací formě jsou navrženy s rozměrovou tolerancí $\pm 0,2$, je to v rámci dovolené tolerance.



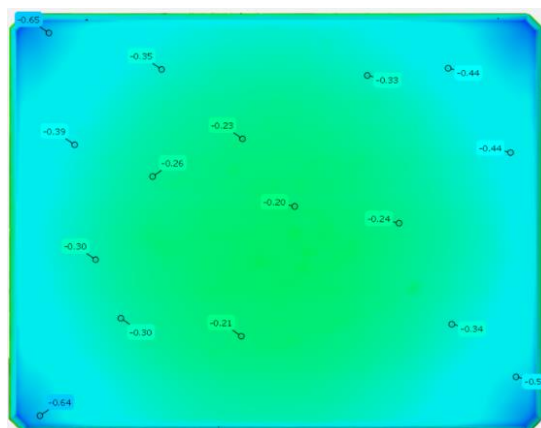
Obr. 68 Kontrola šířky tvárníku – varianta 1.



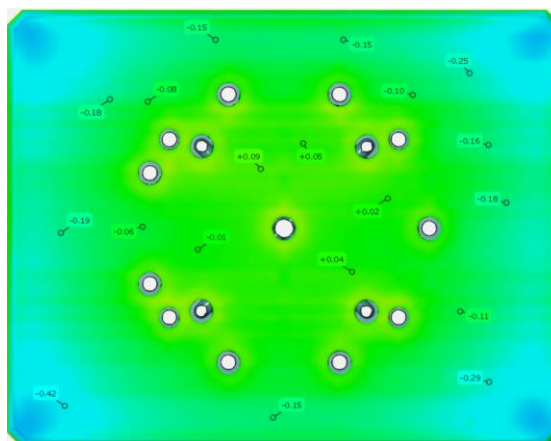
Obr. 69 Kontrola šířky tvárníku – varianta 2.

Zadní strana a drážky tvárníku

Pro variantu 1 (obrázek č.70) došlo k nejvýraznějším rozměrovým odchylkám na zadní straně tvárníku, průměrně $-0,25$ mm. U varianty 2 (obrázek č.71) byly rozměrové odchylky výrazně menší, přičemž ve středu výrobku byly skoro nulové a po krajích vzrůstaly. Zadní stranu je doporučeno frézovat na stejnou tloušťku, aby byla zaručena rovinnost plochy.

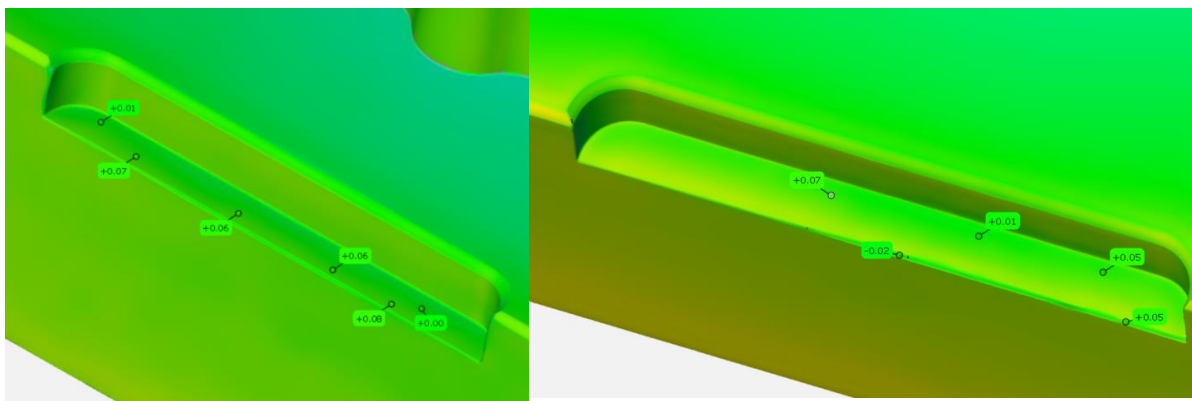


Obr. 70 Zadní strana tvárníku – varianta 1.



Obr. 71 Zadní strana tvárníku – varianta 2.

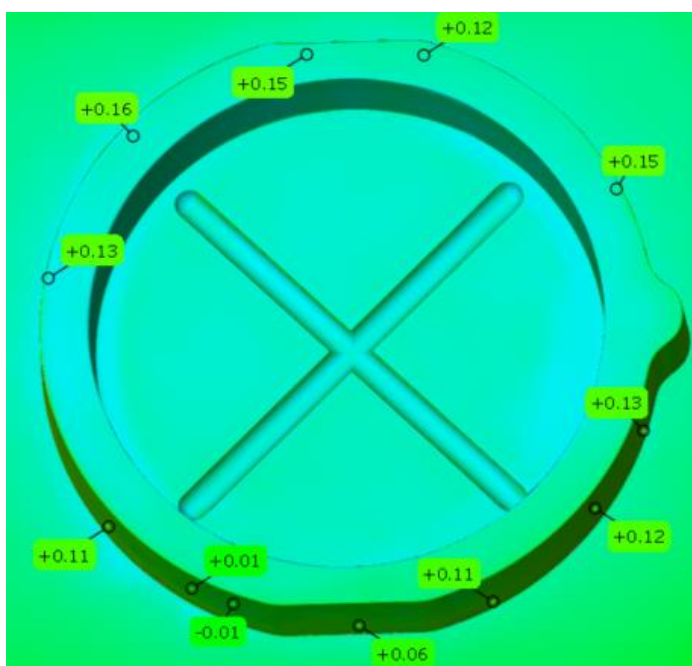
Jelikož je tvárník uchycen pomocí drážek upínkami, větší rozměrové nepřesnosti nejsou tak striktní, jelikož rozměrové odchylky v drážkách byly téměř nulové (obrázek č. 72). Odchylky mohly být způsobeny při odstraňování podpůrného materiálu ze zadní strany tvárnice, chybou tisku či temperačním procesem.



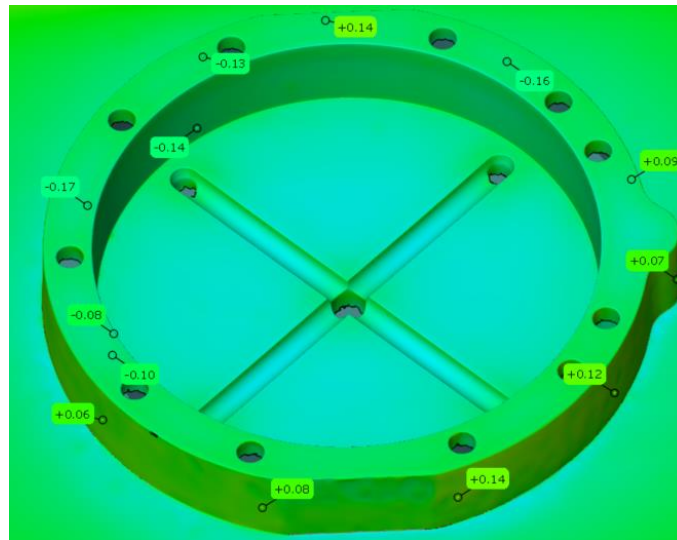
Obr. 72 Kontrola drážek – pro variantu 1 a 2.

Kontrola tvarové části

Na tvarové části tvárníku pro variantu 1 jsou odchylky v průměru $+0,1$ mm, což je v rámci tolerance a prototypování přijatelné. Pro variantu 2 jsou rozměrové odchylky velmi podobné. Porovnání lze vidět na obrázcích č. 73 a č. 74.



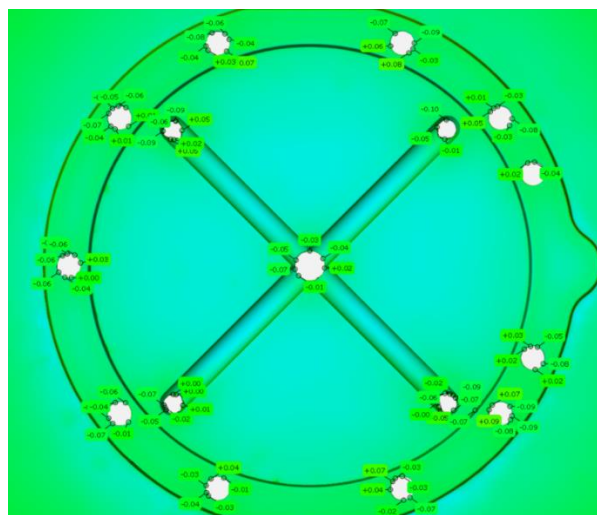
Obr. 73 Kontrola tvarové části – varianta 1.



Obr. 74 Kontrola tvarové části – varianta 2.

Kontrola přesnosti děr

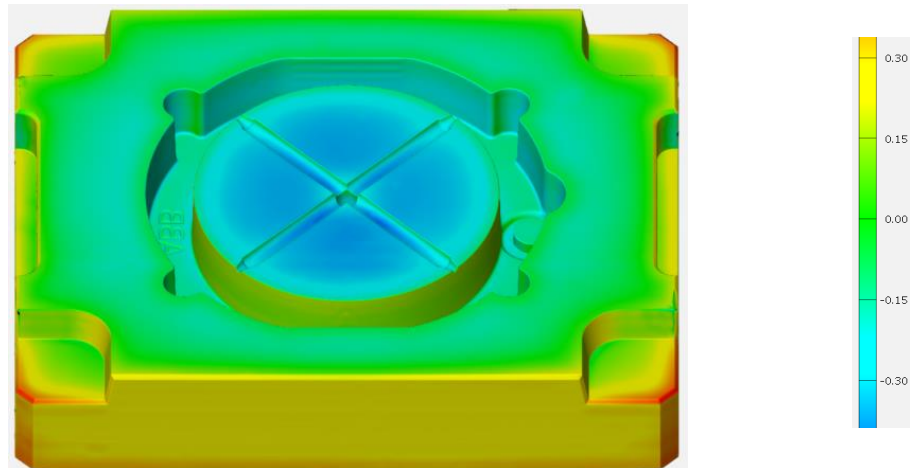
Pro variantu 2 byly vytištěny i díry pro vyhazovače na rozdíl od varianty 1. Všechny díry byly zmenšeny o 0,2 mm, tudíž bude nutno je vystružit. V rámci zjišťování rozměrových odchylek bude kontrolováno, zda jsou odchylky pro průměry a pozice děr zanedbatelné. V rámci skenování nebyly proskenovány díry v celé hloubce výrobku. Skenování by bylo velmi obtížné a časově náročné. Podle obrázku č. 75 je vidět, že rozměrové odchylky ani pro jednu díru nepřesáhly rozměrovou odchylku $\pm 0,1$ mm, tudíž přesnost tisku pro děr je velmi dobrá.



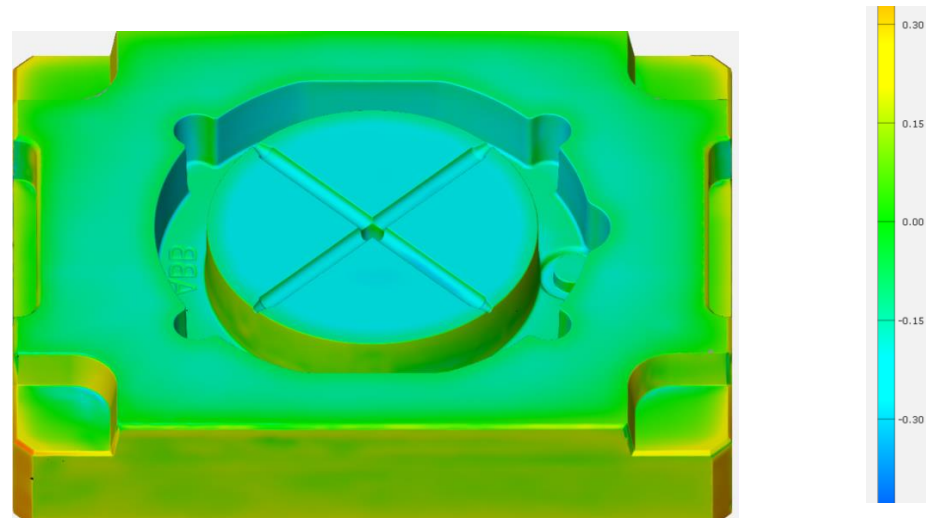
Obr. 75 Kontrola rozměrů děr.

9.2.2 Rozměrová analýza tvárnice

Postup kontroly rozměrů bude totožný jako v případě tvárníku. Vlivem porovnání modelu naskenovaného vůči step modelu byly zjištěny odchylky tvárníku (obrázek č.76 a 77). Průměrná odchylka byla stanovena pro variantu 1 0,151 mm a pro variantu 2 0,1215 mm.



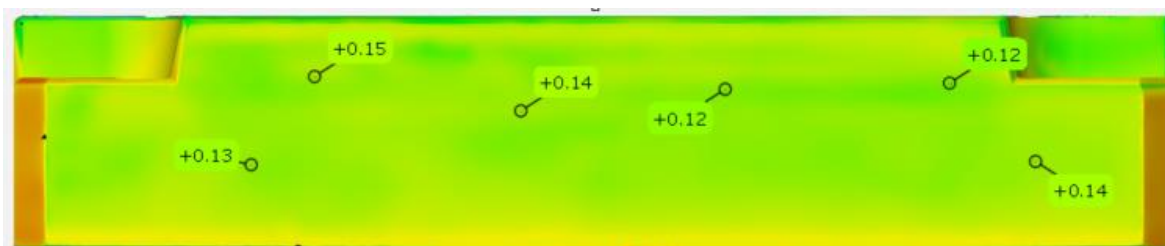
Obr. 76 Analýza rozměrů pro tvárnici – varianta 1.



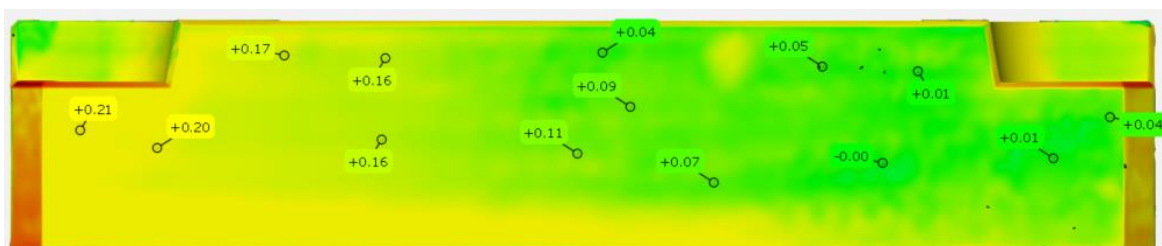
Obr. 77 Analýza rozměrů pro tvárnici – varianta 2.

Kontrola délky tvárnice

Nejdříve byly porovnány hlavní rozměry (délka, šířka, výška a hloubka pouzdra) a následovně byly zjištěny rozměrové odchylky tvarové vložky. Postup byl totožný jako u tvárníku. Vizualizace rozměrových odchylek na délkách tvárnice podle obrázku č.78 a 79.



Obr. 78 Kontrola délky tvárnice – varianta 1



Obr. 79 Kontrola délky tvárnice – varianta 2

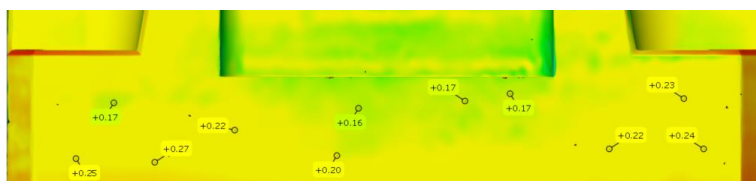
Kontrolují se zmíněné rozměry, protože tvarová vložka musí lícovat tvarově v kotvici desce pro tvárnici. Při kontrole odchylek délky pro obě strany jsou téměř totožné. Pro obě varianty jsou rozměrové odchylky podobné, přičemž je stanovena průměrná odchylka pro obě varianty na + 0,15 mm.

Kontrola šířky tvárnice

Při kontrole šířky byly stanoveny průměrné odchylky na + 0,21 mm podle obrázku č.80 a 81. Obě strany jsou téměř totožné. Bude nutno frézovat boky tvárnice.



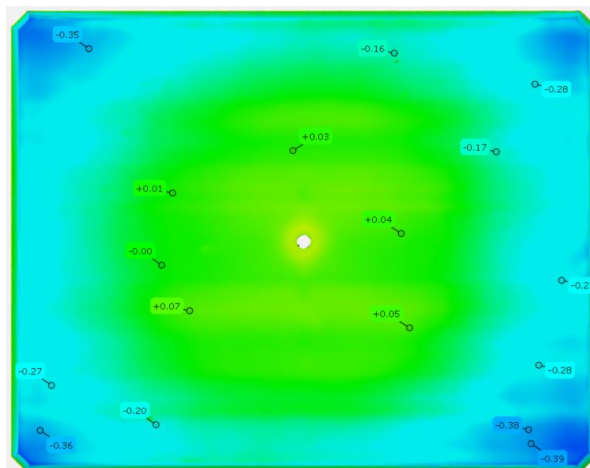
Obr. 80 Kontrola šířky tvárnice – varianta 2.



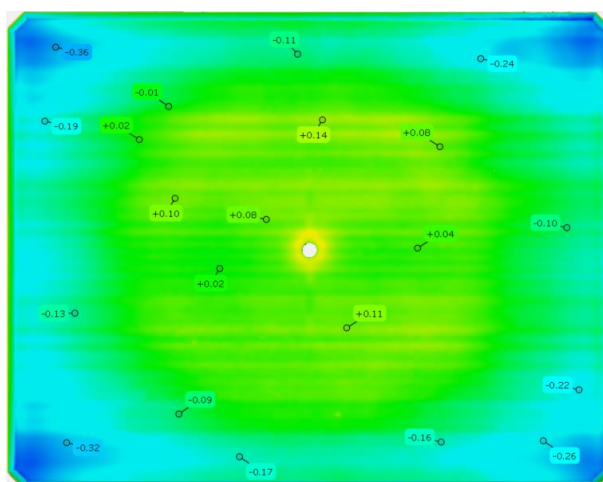
Obr. 81 Kontrola šířky tvárnice – varianta 1.

Zadní strana tvárnice a hloubka drážky

K největší chybě tisku došlo na zadní straně tvárníku (obrázek č.82 a 83). Odchyly jsou v záporných hodnotách v průměru 0,15 mm a v rozích se hodnoty odchyly zvyšují.

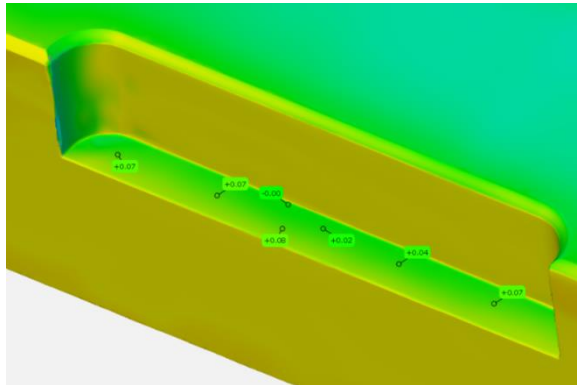


Obr. 82 Zadní strana tvárnice – varianta 1



Obr. 83 Zadní strana tvárnice – varianta 2.

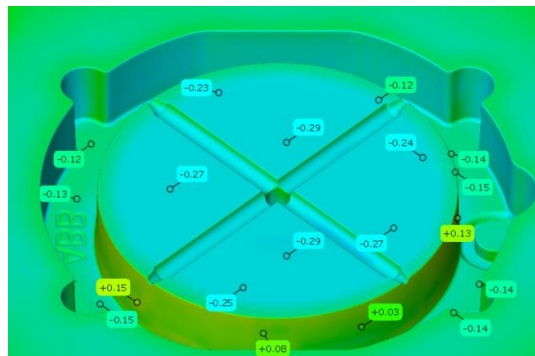
V obou drážkách jsou ovšem skoro nulové odchyly (obrázek č.84), tudíž větší odchyly u zadní strany výrobku není považována za problém. Je vhodné uvažovat frézování zadní plochy výrobku.



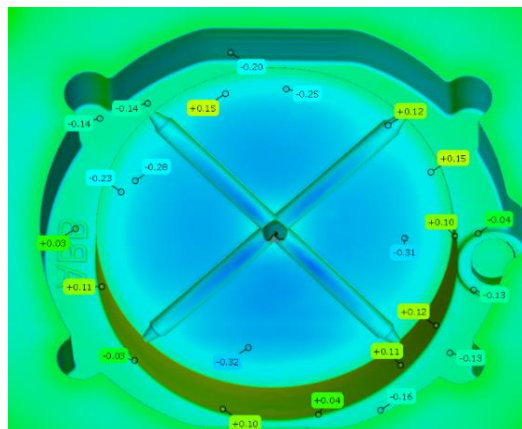
Obr. 84 Kontrola drážky pro tvárnici.

Kontrola tvarové části

Na tvarové části tvárníku jsou odchylky v průměru 0,1–0,2 mm, což je v rámci prototypování přijatelné. Na obrázku jsou vizualizovány odchylky v různých bodech. Pro obě varianty byly rozměrové odchylky velmi podobné podle obrázku č. 85 a 86.



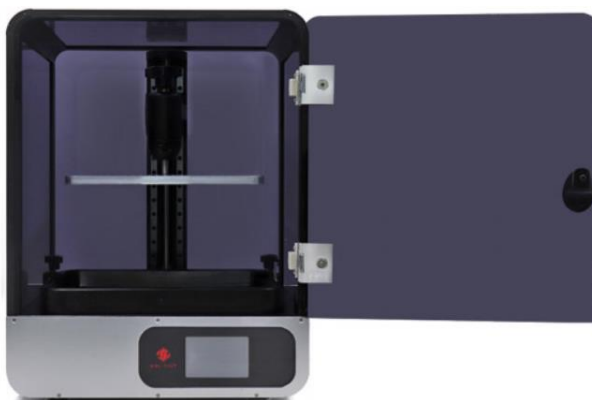
Obr. 85 Kontrola tvarové části – varianta 1.



Obr. 86 Kontrola tvarové části – varianta 2.

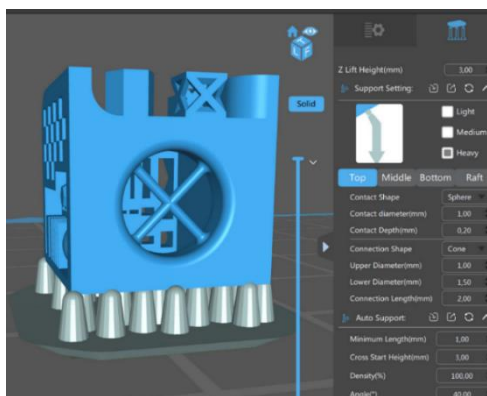
10 VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK METODOU DLP

Tvarové vložky byly tisknuty na tiskárně Kelant S400 (obrázek č.87). Je to tiskárna, která pracuje na principu DLP technologie. Na tiskárně je možno vytisknout výrobky o maximální velikosti $192 \times 120 \times 200$ mm. V případě polyjetu byly výrobky vytištěny zaráz, jelikož tato tiskárna má mnohem menší plochu, na kterou je možné tisknout, výrobky byly tisknuty samostatně. Byl zvolen materiál označený obchodním názvem FTD Industrial Blend. Materiál vyniká vysokou tepelnou odolností až do 225 °C. Materiál nebyl k dodání v České republice, tudíž musel být nakoupen z Itálie.



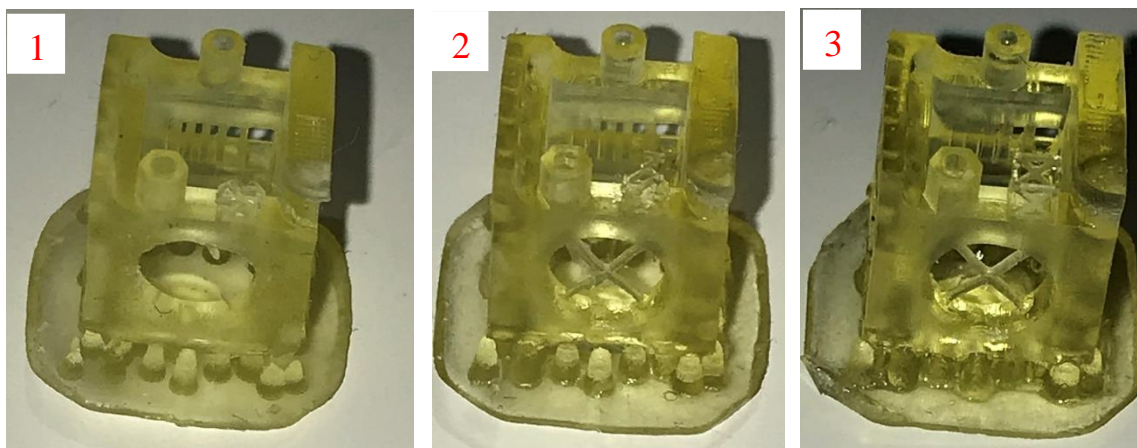
Obr. 87 DLP tiskárna Kelant S400 podle [44].

Soubory STL, ze kterých bylo tištěno, byly použity z předchozí metody tisku. Jelikož se výrobky nevešly do tiskárny, bylo nutné je tisknout pod úhlem. Protože se nejedná o profesionální tiskárnu, bylo nutno uvažovat celkovou váhu dílu, a proto byla tisknuta pouze skořepina o dané tloušťce, která byla následně vylita epoxidem. V programu Chitubox byly přidány podpory, aby nedošlo k přetrhnutí výrobku či nedotisknutí částí výrobku. V materiálovém listu byla uváděna rychlost vytvrzení vrstvy $0,05$ mm 2 sekundy při výkonu lampy 180 W. Protože tiskárna má uváděný výkon lampy 79 W, bylo nutno odladit proces předem. Bylo využito zkušební těleso pro SLA/DLP tisk, které bylo volně dostupné na internetové stránce www.thingiverse.com. Zkušebním tělesem byla malá kostka tvořená mnoha přechody, žebry, se změnou tloušťky stěn a dírami skrz (obrázek č. 88). Pro výrobek musely být vytvořeny nosné podpory. Výrobek byl velký $10 \times 10 \times 10$ mm.



Obr. 88 Zkušební těleso.

Zkušební tělesa byla tištěna ve čtyřech různých časech, za které byly jednotlivé vrstvy vytvrzeny. Byl předpoklad, že výkon lampy je trojnásobně menší, tudíž doba na vytvrzení jedné vrstvy o tloušťce 0,05 mm byla stanovena na 6, 8, 10 a 12 sekund.

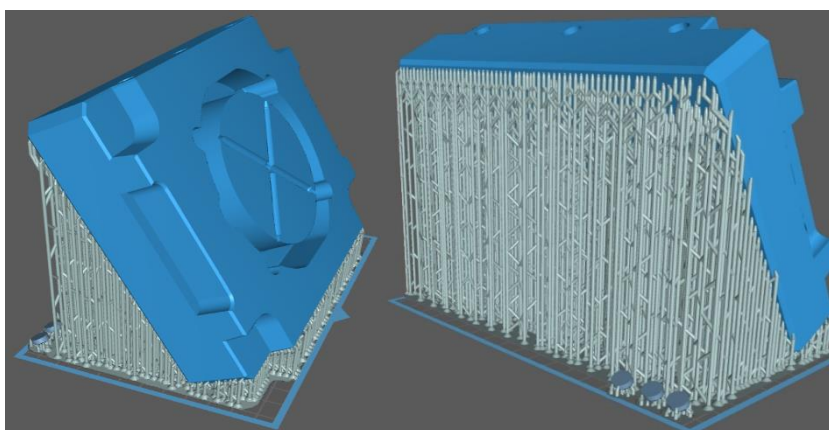


Obr. 89 Tisk zkušebních těles.

Na obrázku č. 89 lze vidět vytištěná zkušební tělesa s rozdílnou dobou vytvrzení pro jednu vrstvu. Pro těleso 1 byla doba vytvrzení 6 sekund. Jak lze vidět na obrázku, doba vytvrzení je příliš krátká, protože pro danou dobu vytvrzení nebyla vytištěna žebra v kruhovém okruhu a horní krychlička. Pro těleso 2 byla aplikována doba vytvrzení 8 sekund. Byly vytištěna všechna žebra, ovšem v nedostačující tloušťce a krychlička byla nedotištěná. Pro těleso 3 byla použita doba vytvrzení jedné vrstvy 10 sekund. Všechny prvky již byly vytištěny se všemi detaily, které zkušební těleso obsahuje. Dále bylo zkušební těleso vytisknuto při době vytvrzení jedné vrstvy na 12 sekund, kde nebyl rozdíl vůči tělesu č. 3.

10.1 Tisk tvárnice metodou DLP

Na základě testu tisknutí zkušebního tělesa byla stanovena doba vytvrzení jedné vrstvy na 10 sekund. Protože byl díl poměrně velký, musel být díl pod daným úhlem a obsahoval velké množství podpor, aby nedošlo k defektům během tisku podle obrázku č.90.



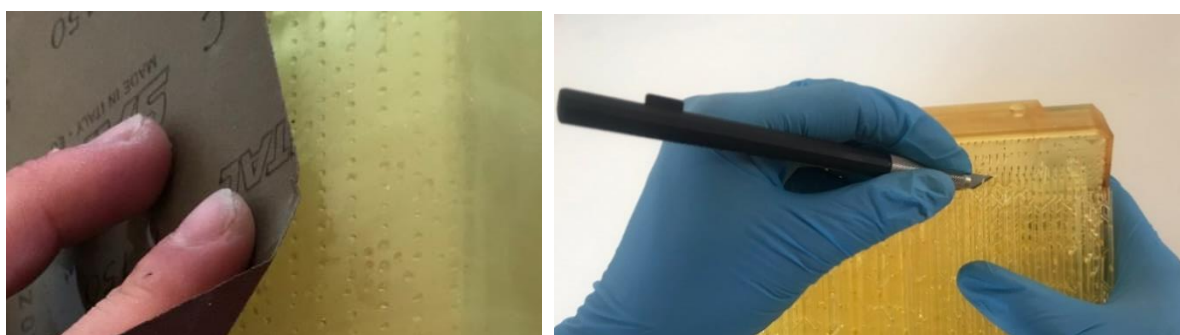
Obr. 90 Návrh tisku tvárníku metodou DLP.

Díry, které byly vytvořeny na výrobku, byly vytvořeny pro lití epoxidu na vyplnění skořepiny. Byla zvolena tloušťka stěny 3 mm. Díl nebyl tištěn v celku z důvodu, aby nedošlo k přetržení výrobku vlivem velké hmotnosti a taktéž z důvodu ekonomické náročnosti (obrázek č.91). Bylo použito 640 ml fotopolymeru a tisk trval 18 hodin. Po tisku byl výrobek opláchnut v tekutině od výrobce TEK 1969 a dvě hodiny byl vytvrzován v ultrazvukové vaně.



Obr. 91 Tisk tvárníku metodou DLP.

Následně musely být odstraněny všechny podpory. Byl použit modelářský skalpel (obrázek č.92), který je nejvhodnější pro odstraňování podpor. Protože průměr podpor u konce výrobku byl pouze 0,2 mm, odstraňování podpor bylo možné provést bez větších komplikací. Následně byly zadní a boční strana výrobku zbrušeny smirkovým papírem.



Obr. 92 Odstranění podpor.

Během smirkování musela být použita vrstva vody, aby nedošlo k poškrábání dílu. Byly využity tři druhy smirkového papíru, které jsou označeny 150, 240 a 800. Na nejhrubší smirkování byl použit smirkový papír s označením 150. Pro dokonalou hladkost byl použit smirkový papír označený 800. Po dokončovacích operacích byla tvárnice zalita epoxidem, který je nazýván Dukarit. Zalití epoxidem bylo ve spolupráci s firmou

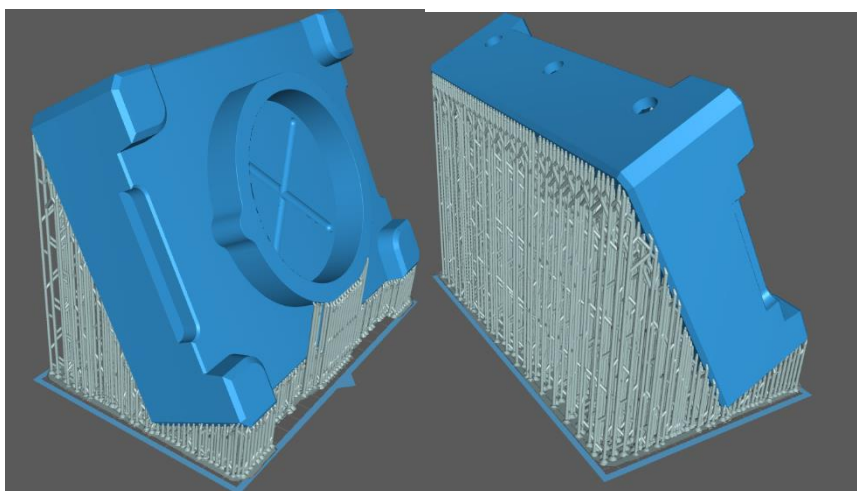
ABB. Pryskyřice byla smíchána s tvrdidlem. Skořepina byla vylita a následně umístěna do temperační pece k urychlení chemické reakce a vytvrzení.



Obr. 93 Tvárnice vyrobenou metodou DLP.

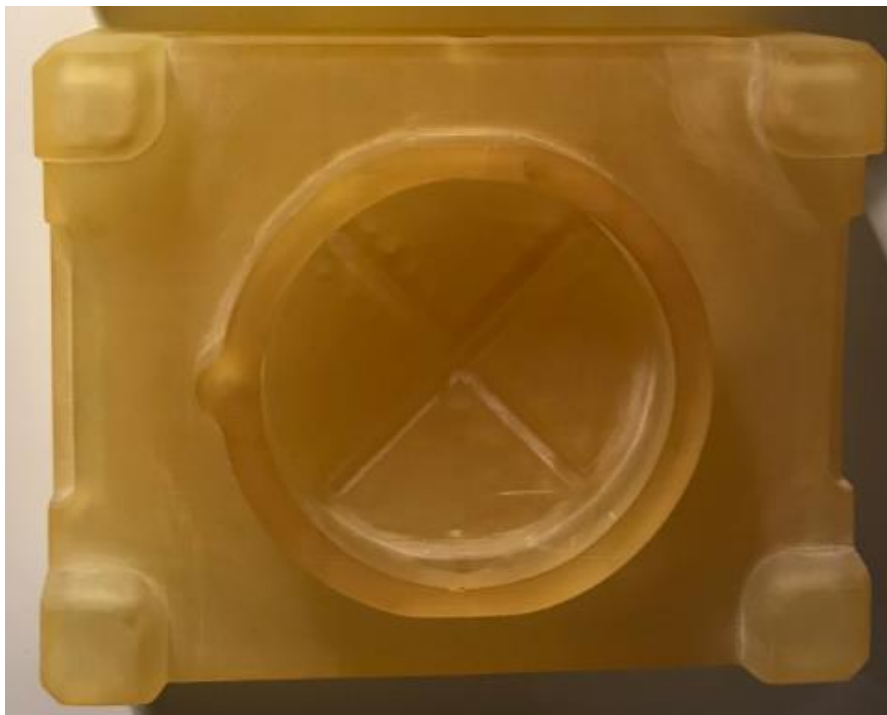
10.2 Tisk tvárníku metodou DLP

Technologický postup pro výrobu tvárníku je velmi obdobný jak pro tvárnici. Doba vytvrzení jedné vrstvy je 10 sekund. Výrobek byl stejně jako v předchozím případě pod úhlem s velkým množstvím podpor, aby nedošlo k žádné kolizi (obrázek č.94). Tvárník byl vyráběn bez děr. Díl obsahuje díry pro lití epoxidu Dukarit.



Obr. 94 Návrh tisku tvárníku metodou DLP.

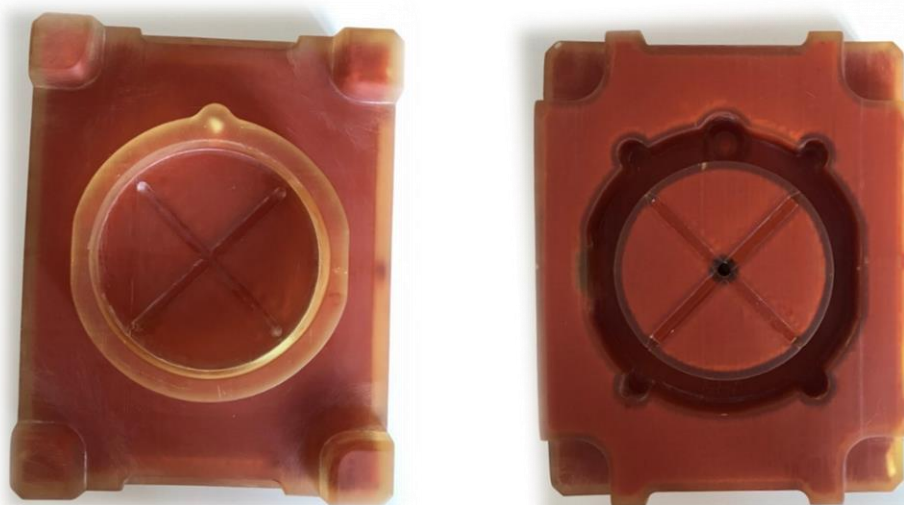
Tisk byl stanoven na 19 hodin 45 minut se spotřebou 720 ml fotopolymeru. Po tisku byl výrobek opláchnut v isopropylalkoholu a dvě hodiny byl vytvrzován v ultrazvukové vaně. Podpory byly odstraněny stejně jako u tvárnice. Podpory byly odřezány skalpelem a povrch na straně podpor byl dokončen za pomoci smirkového papíru.



Obr. 95 Výroba tvárníku metodou DLP.

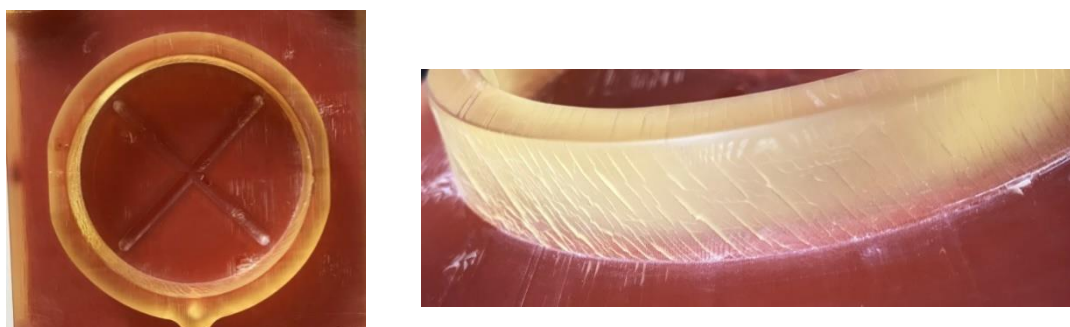
10.3 Lití polyuretanu do tvarových vložek

Obě tvarové vložky (tvárník a tvárnice) obsahují tři díry, které slouží jako vtokové kanály pro odlévání epoxidové pryskyřice. Celý proces odlévání pryskyřice proběhl při pokojové teplotě. Byla použita odlévatelná pryskyřice Wevo – Casting Resin PU 552 FL/10 s kombinací Wevo hardener 300. Nejprve byly pryskyřice přelity zvlášť do čisté nádoby, kde byly rozmíchány tak, aby neobsahovaly žádné bubliny. Poté byly oba materiály smíchány dohromady, přičemž musela vzniknout celistvá tekutina vhodná pro lití. Jakmile byla pryskyřice připravena, následovalo lití do skořepiny tvárníku a tvárnice (obrázek č.96). Po dokonalém odlití byly oba výrobky odloženy na stůl po dobu 24 hodin, aby epoxidová pryskyřice zatuhla podle potřeb. V materiálovém listu je uvedeno, že hmota zcela zatuhne minimálně po sedmi dnech při pokojové teplotě. Aby byl proces urychlen, byly oba výrobky vloženy do temperační komory na 5 hodin při teplotě 75 °C, aby došlo k dokonalému vytvrzení materiálu. Následující postup byl obdobný jako při výrobě tvarových vložek metodou polyjet.



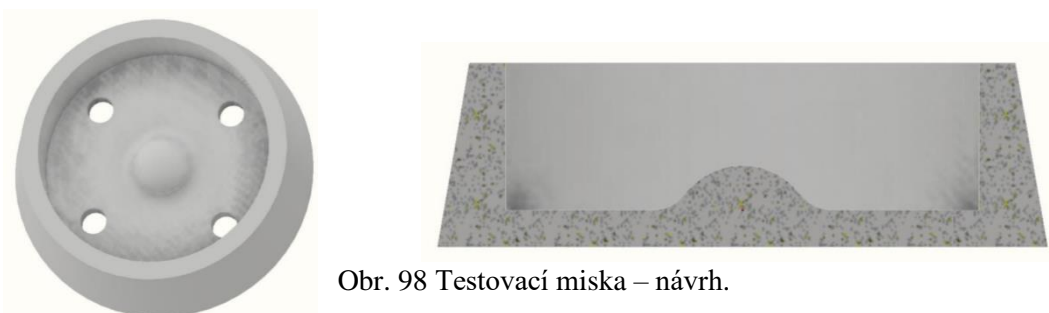
Obr. 96 Tvarové vložky – po zalití epoxidem.

Během temperování v temperační komoře došlo k problému, že po dvou hodinách značně popraskal tvárník. Struktura popraskala po celém povrchu podle obrázku č.97.



Obr. 97 Popraskané části tvárníku.

Výrobek byl popraskaný především z vnitřní struktury. Jelikož tento negativní jev vznikl již při 75 °C, byl proveden pokus, který měl odhalit, proč jedna tvarová vložka popraskala a druhá nikoliv. Pro zmíněný pokus byla tištěna testovací miska, která obsahovala úkosy, ostré přechody i zaoblení. Miska byla o průměru 30 mm a výšce 10 mm (obrázek č.98).



Obr. 98 Testovací miska – návrh.

Byly tištěny tři testovací misky (obrázek č.99). Každá miska byla po vytištění nořena po dobu 12 minut v oplachovací kapalině. Testovací miska T v TEK 1969 materiálu, který byl použit pro tvárnici, testovací miska D v lihu a testovací miska I v isopropylalkoholu. Následně byly výrobky umístěny do ultrazvukové vany po dobu 30 minut.



Obr. 99 Výtisk – testovací misky.

Aby byly zjištěny příčiny zkřehnutí tvárníku, všechny tři výrobky byly vloženy do temperační komory. Výrobky, které byly nořeny v lihu a isopropylalkoholu zkřehly po 2 hodinách v peci při teplotě 75 °C a jejich struktura popraskala stejným způsobem jako v předchozím případě. Oplachový materiál vlivem chemické reakce poškodil strukturu materiálu a výrobek ztratil požadované vlastnosti. (obrázek č.100).



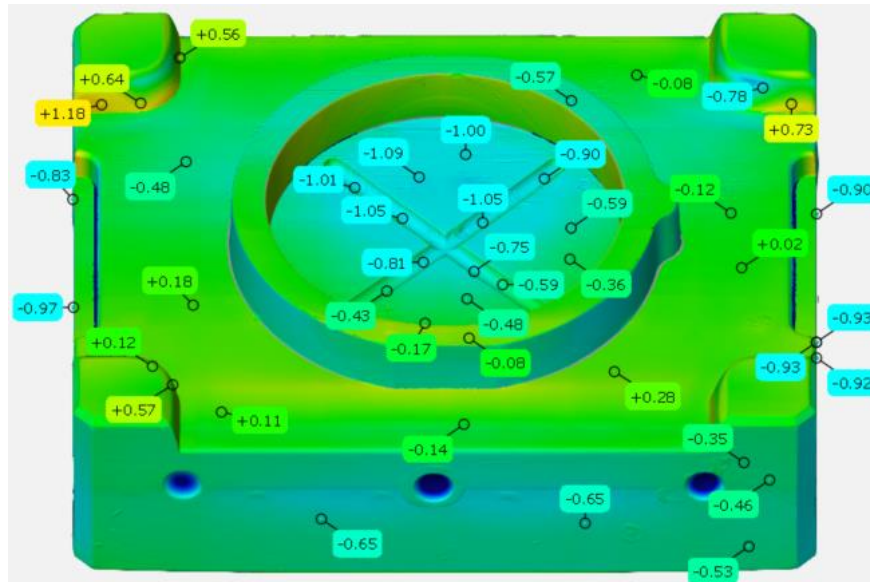
Obr. 100 Testovací misky – po teplotní zkoušce.

Ovšem výrobek, který byl opláchnut v tekutině TEK 1969, nebyl nijak deformován při teplotní zkoušce na 230 °C po dobu 3 hodin. Stejně byl testován i výrobek opláchnutý v isopropylalkoholu a popraskaná struktura se zvětšovala. Křehkost výrobku byla ještě větší a bylo možné testovací výrobek zlomit menší silou pomocí dvou prstů. Z tohoto důvodu tvarové vložky nebyly testovány.

Je nutné taktéž zmínit, že výrobek, který neztratil své vlastnosti, je velmi křehký. Byla vytisknuta zkušební tělesa, která byla opláchnuta v materiálu TEK 1969 a byla dále testována na tahové zkoušce. Byla vyrobena dvě zkušební tělesa, která se používají pro tahovou zkoušku. První těleso bylo přetrženo při 7,4 MPa a druhé při 11,4 MPa. Výrobky jsou tedy velmi křehké.

Tvarové vložky byly dále oskenovány, aby byly zjištěny rozměrové odchylky. Rozměrové odchylky budou popsány pouze na tvárníku. Podle rozměrové analýzy odchylek jde na obrázku č. 101 značně vidět, že tisk DLP byl vůči metodě polyjet mnohem nepřesnější. Rozměrové odchylky po stranách výrobku (délka a šířka) jsou v záporných

hodnotách od 0,5 mm až 1 mm, což je poměrně velká odchylka. Při upnutí tvarových vložek může docházet k poměrně velkým vřlím.



Obr. 101 Rozměrové odchylky – DLP tisk.

Dále je nutno zmínit, že v oblasti okolo tvarové části jsou rozměrové odchylky podobné v rozmezí 0,5–1 mm, což jsou velké rozměrové odchylky, které nespĺňují dovolenou toleranci. Taktěz nebyla dodržena rovinnost ploch a bylo by nutné je zarovnat pomocí frézování či broušení. Tvarové vložky tištěné metodou DLP nejsou vhodné pro testování a metoda nebude použita.

Ovšem metoda není do budoucna zavržena. Daná problematika není dostatečně prozkoumána a bylo by vhodné provést odpovídající výzkum. Do budoucna je doporučeno použít širší spektrum materiálů a postupně je otestovat pomocí vhodných zátěžových zkoušek a až poté vyrobit tvarové vložky a otestovat je na vstřikovací stroji. Taktěz je doporučeno použít tiskárnu s dostatečně velkou tištěnou plochou, ať není nutno tisknout výrobky pod daným úhlem. Tím je zabráněno výrazné vlnitosti ploch, zajištěna menší pracnost při odstraňování podpor a lepší přesnost tisku.

11 TESTOVÁNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY

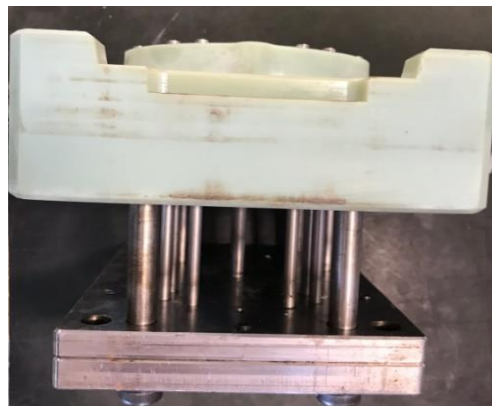
Testování vstřikovací formy proběhlo ve spolupráci s firmou MA plast. Pro diplomovou práci musely být vyrobeny desky vyhazovacího systému a tvarové vložky pomocí metod 3D tisku. Vstřikování bylo provedeno pouze pro tvarové vložky vyrobené metodou polyjet. V první řadě musela být ověřena smontovatelnost. Pro variantu 1 (zelené tvarové vložky) nebyl žádný problém při lícování tvarových vložek a montáž pomocí upínek (obrázek č.102). V druhém případě pro variantu 2 (bílé tvarové vložky) musely být obvodově frézovány a leštěny plochy, protože podle obrázku č. 68 a č.69 (strana 64) lze vidět, že po stranách vznikly rozměrové odchylky +0,2 mm na stranách délky a šířky.



Obr. 102 Rám vstřikovací formy

11.1 Vrtání děr pro vyhazovače

Jelikož tvarové vložky nejsou zcela kompletně hotové, je třeba v první fázi udělat dodatečné úpravy. Pro variantu 1 budou do tvárníku vrtány a následně vystruženy díry pro vyhazovače. Taktéž vtokové ústí v tvárnici bylo přeštěněno, aby byly odstraněny malé nerovnosti, které vznikly během tisku, což by mohlo vést ke komplikacím během tečení polymerního materiálu do dutiny. Pro variantu 2 budou díry pouze vystruženy. Byla použita souřadnicová vrtačka. Byly zvoleny nižší otáčky, aby nedošlo ke zbytečně velkému ohřevu součástí. Jelikož se jedná o plast, vrtáky musely být velmi ostré, aby nedošlo k odlamování plastu během procesu vrtání. Všechny díry byly následně vystruženy na požadovanou přesnost H7. Bylo ověřeno bezproblémové lícování vyhazovačů ve smontované sestavě vyhazovacího systému s tvárníkem podle obrázku č.103.



Obr. 103 Vyhazovací systém s tvárníkem.

11.2 Parametrické nastavení vstřikovacího stroje

Byl použit vstřikovací stroj KM 50 CX s parametry podle tabulky č.2. Forma měla hlavní parametry podle tabulky č.3 Stroj byl zvolen kvůli dostatečnému vstřikovacímu objemu, uzavírací síle a maximálním rozměrům pro formu. Byly zvoleny dva vstřikovací materiály. První vstřikovaný materiál je nazýván polypropylen Mosten MA 230, jeho teplota tavení je v rozmezí od 200 do 280 °C. Jako druhý materiál byl zvolen polyamid 6 s obchodním názvem SLOVAMID 6 HV FRC 3. Teplota tavení pro daný materiál je v rozmezí od 240 do 270 °C, jak je uvedeno v tabulce č.4.

Tab. 2 Základní parametry vstřikovacího stroje

Uzavírací síla	[kN]	500
Otevírací síla nástroje	[kN]	40
Maximální vzdálenost mezi sloupy (h × v)	[mm]	370 × 370
Upínací deska nástroje	[mm]	600 × 600
Rozevření nástroje	[mm]	400
Maximální rozestup desek	[mm]	600
Zdvih vyhazovače	[mm]	100

Tab. 3: Základní parametry vstřikovací formy

Základní parametry vstřikovací formy		
Maximální rozměry formy	[mm]	345 × 295 × 279
Vstřikovaný objem výstřiku	[cm ³]	30

Tab. 4 Parametry pro vstřikování podle materiálu

Parametry	Jednotky		
Vstřikovaný materiál	[-]	PP Mosten MA 230	PA 6 Slovamid 6 HV FRC 3
Teplota taveniny	[°C]	200/195/190/185/180	260/255/250/245/240
Uzavírací síla	[kN]	200	200
Tlak vstřiku	[bar]	700	1000
Rychlost vstřiku	[mm/s]	40	40
Dráha vstřiku	[mm]	10	10
Čas vstřiku	[s]	2,44	1,54
Tlak dotlaku	[bar]	0	0
Čas dotlaku	[s]	0	0
Zpětný tlak	[bar]	80	70
Materiálový polštář	[mm]	9,7	9,5
Max. tlak vstřiku	[bar]	390	580
Tlak při přepnutí	[bar]	380	570
Čas plastifikace	[s]	7,2	6,5
Čas chlazení	[s]	150	120
Velikost dávky	[mm]	60	60

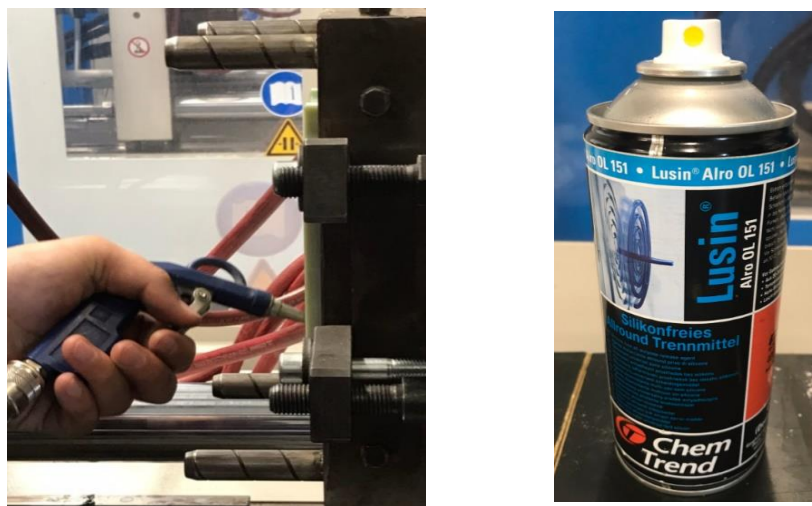
Parametry	Jednotky	PP Mosten MA 230	PA 6 Slovamid 6 HV FRC 3
Přísun válce	[mm]	10	10
Sušení materiálu	[°C]	×	80 st. 4h

Pro oba materiály jsou odlišné vstřikovací parametry, protože materiály mají jinou hustotu a teplotu tání. Pro každý materiál byly nastaveny parametry podle tabulky č. 4. Aby nedošlo k náhlému zničení tvarových vložek, byla postupně zvyšována pouze velikost vstřikovací dávky roztaveného polymeru a doba chlazení výstřiku v uzavřené vstřikovací formě. Jelikož se nejedná o slitinu hliníku, ale o 3D výtisk, je předpokládána delší doba chlazení, protože odvod tepla plast vůči plastu je mnohem horší.

11.3 Testování tvarových vložek

Pro obě tvarové vložky bylo nutno splnit daná specifika. Bylo důležité, aby vyhazovače perfektně lícovaly a nezadrhávaly se v žádné části. Pro plynulost procesu byl aplikován olej. Jelikož jsou tvarové vložky vyrobeny z plastu, bylo nutno uvažovat vhodný separátor, který byl nastříkaný na obě části tvarových vložek, aby nedošlo k přilnutí plastů a poškození formy. Separátor byl použit vždy po otevření formy. Separátor je nazýván Lusín Alro Ol 151. Jedná se o bezsilikonový separátor, který je určen pro materiály polypropylen, polyamid 6 a mnoho dalších. Taktéž bylo nutno zavést mezicyklní chlazení pomocí stlačeného vzduchu, jak je vidět na obrázku č. 104. Přístroj byl součástí vstřikovacího stroje. Bylo třeba tvarové vložky vždy zchladit tak, aby měly maximální teplotu 50 °C v jakémkoliv bodě. Bylo použito bezdotykového laserového teploměru.

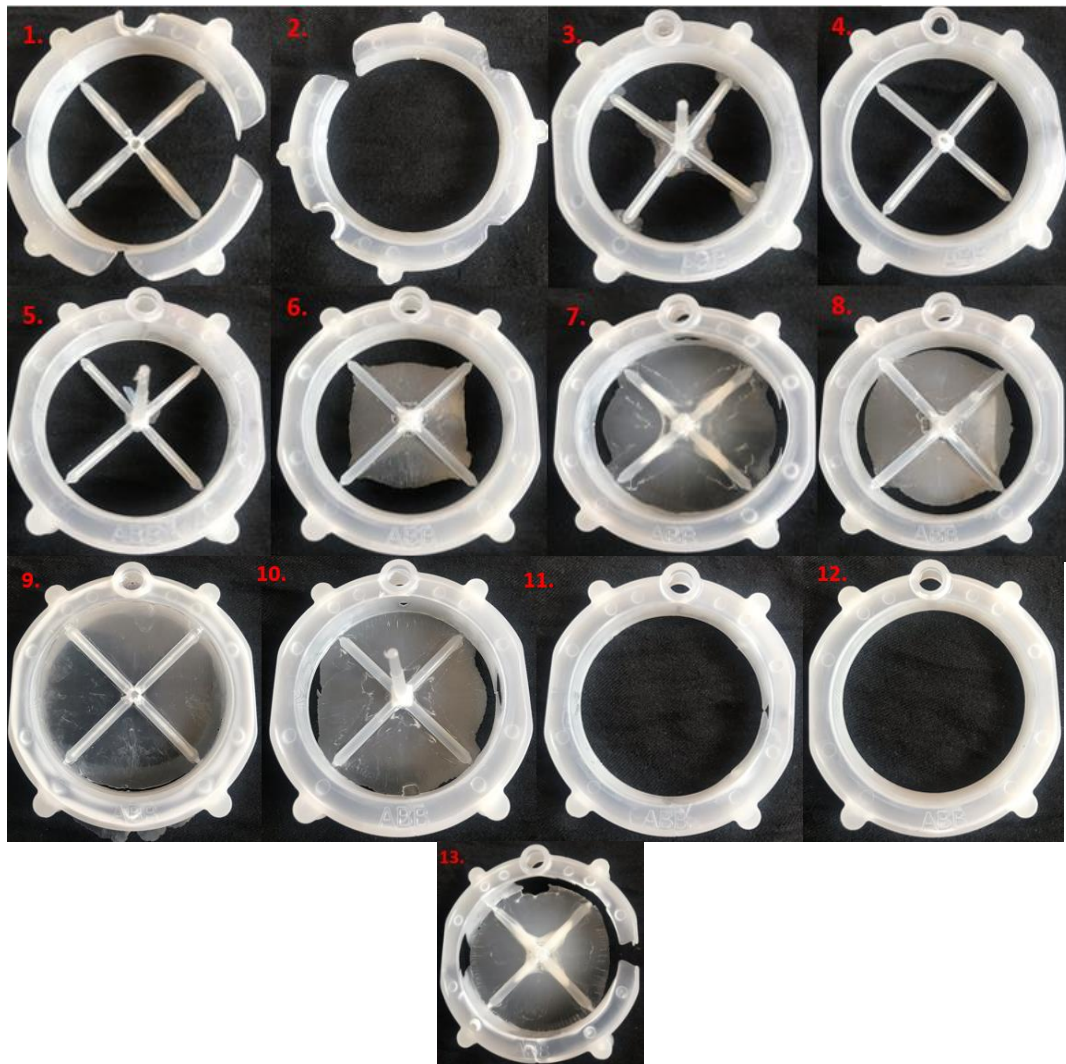
11.3.1 Testování vstřikovací formy pro polyjet – varianta 1



Obr. 104 Separáční sprej Lusín + chlazení tvárnice vzduchem.

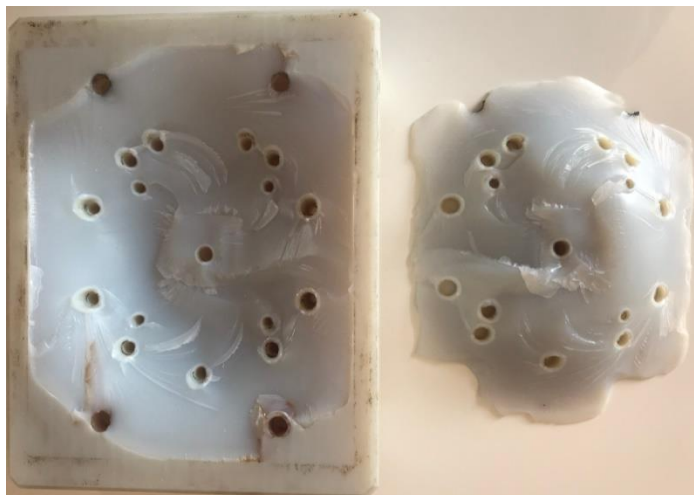
Prvně byly tvarové vložky upnuty do vstřikovací formy a vstřikovací forma byla upnuta do vstřikovacího stroje. Taktéž byl nasypán granulát do plastikační jednotky. Pro danou variantu byl použit vstřikovaný materiál pouze polypropylen Mosten MA 230. Daná tvarová vložka je použita jako zkušební, pomocí které byla snaha odladit proces a stanovit ideální podmínky pro druhé tvarové vložky. Vstřikovací parametry byly stejné podle tabulky č. 4 až na pár parametrů. Velikost vstřikované dávky byla prvně nastavena na

třetinu celkového objemu a postupně byla dávka zvyšována, až byla vstříkována plná velikost dávky. Vstříkovací stroj stanovil předpokládanou dobu chlazení pro výrobek o daném objemu. Ovšem v rámci návrhu vstříkovacího stroje se pracovalo pouze s předpokladem, že by tvarové vložky byly vyrobeny ze slitiny hliníku či z nástrojové oceli. Doba chlazení byla nastavena prvně na 50 sekund a postupně byla zvyšována, jelikož na výrobcích vznikala řada defektů (nedokonalé zatečení materiálu, vznik bublin). Nejlepší výsledky se jevily, když byla doba chlazení nastavena na 150 sekund. V porovnání, kdyby tvarové vložky byly vyrobeny například ze slitiny hliníku, je doba chlazení stanovena o třetinu delší. Jelikož se jedná o výrobu prvních prototypů, prodloužená doba chlazení není problém, nejedná se o velkoobjemovou výrobu. Aby tvarové vložky vydržely co nejvíce kusů, dotlak byl nulový. Jelikož výrobek po otevření formy zůstával na tvárníku, musel být zvětšen průměr vtokového ústí pro rozvodné kanály. Zvětšení bylo provedeno na frézce. Po zvětšení vtokového ústí výrobek zůstával na správné straně neboli na straně tvárníku.



Obr. 105 Hotové výrobky pro variantu 1.

Na výrobku č. 6 (obrázek č.105) je vidět, že prostřední blána byla stále zvětšována. Byla vytvářena, protože vstřikovací tlak ohýbal tvárník a lehce posouval směrem dozadu. Při 13. zdvihu tvárník nevydržel a zadní strana tvárníku byla odtržena na dvě části (obrázek č.107).



Obr. 106 Zničený tvárník.

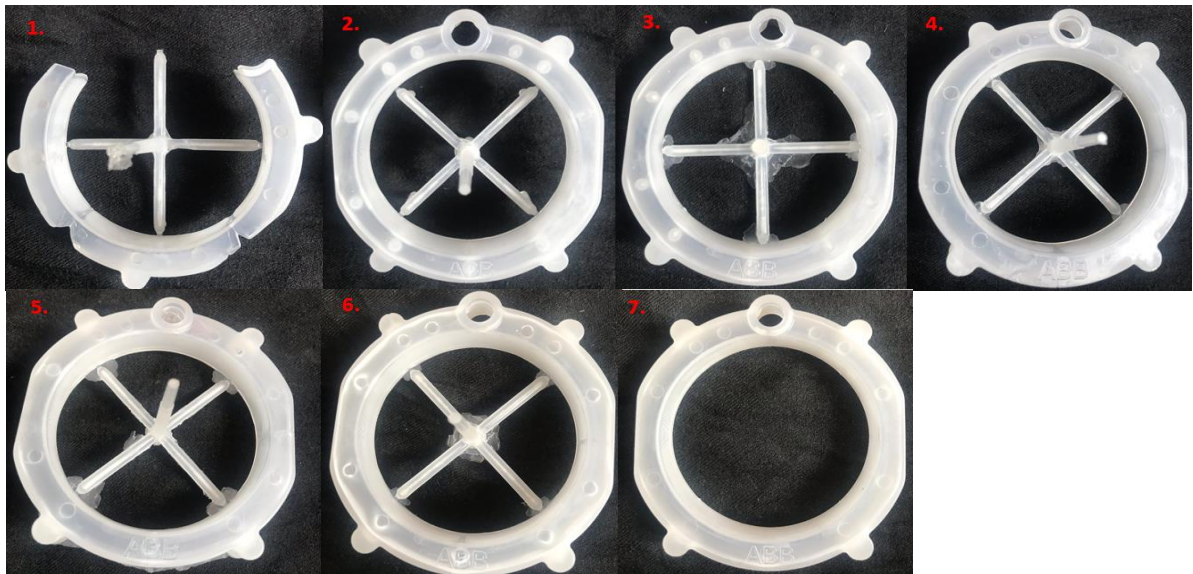
Výrobek č.12 (obrázek č.105) je brán za výsledek, který splnil požadovanou jakost výrobku. Podle zpětné analýzy je zřejmé, že vzniklá prasklina byla důsledkem toho, že tvarová vložka byla upnuta pouze za rám, nikoliv za celou plochu (obrázek č. 106). Aby bylo v budoucnu zabráněno zničení tvárníku po pár výrobcích, je vhodné tvárník podložit kovovou deskou. Dále je nutno zmínit, že od děr, které byly vrtány pro vyhazovače, vznikaly praskliny. Praskliny mohly vzniknout vlivem poměrně tenkých stěn. Dále ve tvárnici od vtokového ústí byly viditelné praskliny do kříže, kudy byla vedena polymerní tavenina, jak lze vidět na obrázku č.107. Prasklina mohla vzniknout vlivem frézování, které bylo provedeno, aby výrobek zůstal na stráně tvárníku. Nejsou zcela známé parametry daného fotopolymery, když bude vrtáno či frézováno do daného výrobku, do jaké míry je okolní část zeslabena vlivem vnějšího zásahu.



Obr. 107 Tvarové vložky – praskliny vlivem vstřikovacího cyklu.

11.3.2 Testování vstřikovací formy pro polyjet – varianta 2

Prvně byly tvarové vložky upnuty do vstřikovací formy a vstřikovací forma byla upnuta do vstřikovacího stroje. Taktéž byl nasypán granulát do plastikační jednotky. Pro danou variantu byl použit vstřikovaný materiál polypropylen Mosten MA 230 a následně polyamid 6 slovamid 6 HV FRC 3. Aby nedošlo k prasknutí tvárníku, byla vytvořena speciální podložná deska, která obsahovala díry pro vyhazovače. Tím bylo zabráněno prasknutí tvárníku jako v předchozím případě (obrázek č. 106). Dále muselo být stejně jako v předchozím případě leštěno vtokové ústí. Nejdříve byl vstřikován polypropylen s třetinovou dávkou, ovšem doba chlazení byla od začátku 150 sekund. Bylo provedeno sedm zdvihů, kdy poslední 3 výrobky splnily požadovanou jakost výrobku podle obrázku č.108. Tato část byla označena za úspěšnou, přičemž pro daný materiál byl dostatečně odladěný proces, aby bylo možné zhotovit výrobky v požadované jakosti (obrázek č.109). Forma by byla schopna vyrobít minimálně až 20 kusů pro daný .materiál.



Obr. 108 Hotové výrobky – varianta 2.

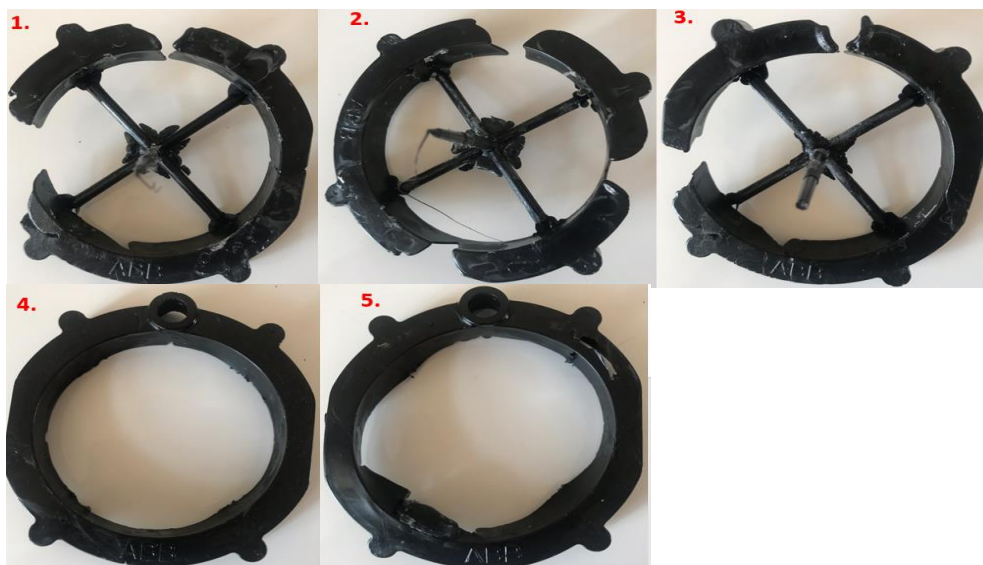


Obr. 109 Výstřik požadované jakosti.

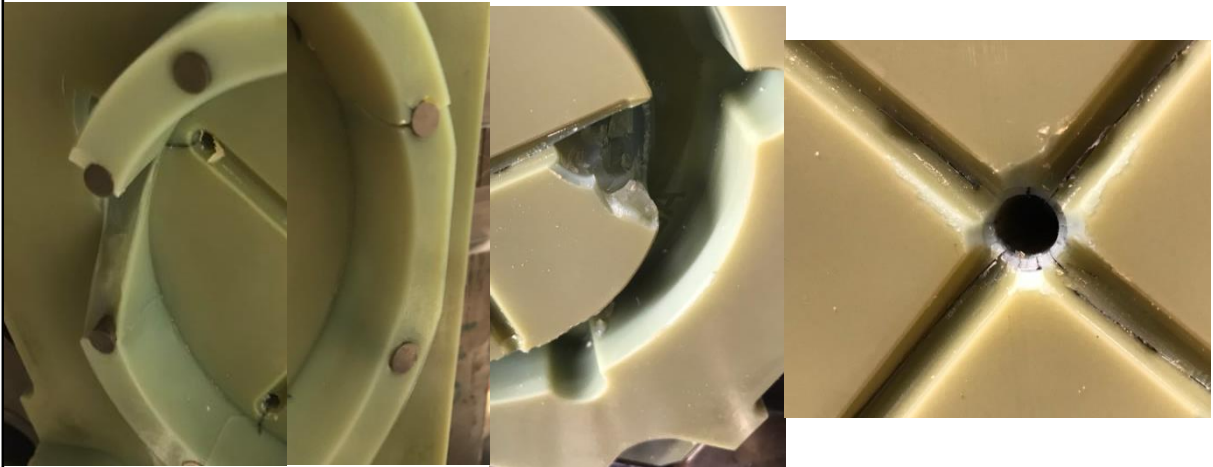


Obr. 110 Zničený tvárník – varianta 2.

Protože je snahou vyzkoušet vstřikování pro teplotně odolné termoplasty, dále byl vstřikován polyamid 6. V tabulce č. 4 jsou hodnoty, které byly nastaveny pro daný materiál. Postup byl velmi podobný jako v případě odladování procesu pro polypropylen. Taktéž byla vstřikována třetinová dávka a postupně byla zvyšována. Doba chlazení začínala na 70 sekundách a postupně byla zvýšena na 120 sekund. Tavenina měla při vstřikování 260 °C při vstřikovaném tlaku 580 baru. Materiál v ani jednom zdvihu nezatekl do celé dutiny formy (obrázek č.110), protože tvárník byl zničen po prvním zdvihu. Při pátém zdvihu byly odlomeny další části z tvárníku a část z tvárnice a dále už nebylo možné pokračovat (obrázek č. 112). Taktéž výrazně popraskaly rozvodné kanály, které vycházely z vtokového ústí, kudy byl přiváděn roztavený polymer. Dále vznikaly praskliny okolo děr pro vyhazovače vlivem tenkostěnné tvarové části. Protože byla popraskaná místa v okolí vyhazovačů, byla značně porušena i celková tuhost tvárníku a odlomení části mohlo vzniknout právě daným problémem. I zčásti zničeným tvárníkem bylo provedeno pět dalších zdvihů (obrázek č.111)



Obr. 111 Výrobky zhotovené z polyamidu 6.



Obr. 112 Tvarové vložky – defekty.

11.3.3 Zhodnocení výsledků a doporučení pro budoucí návrh

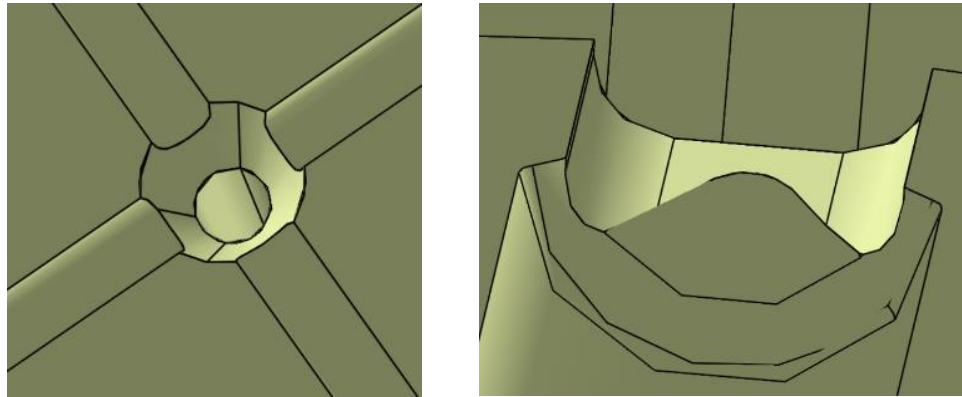
Byly otestovány pouze tvarové vložky, které byly vyrobeny pomocí metody polyjet. Bylo zhotoveno celkem 25 výrobků. Během testování byly odhaleny komplikace, kterým je lepší se v budoucnu vyhnout.

1. Tvarové vložky neupínat pouze za rám, ale vždy za celou plochu, je možno využít podložné desky
2. Provádět co nejméně zásahů do tvarových vložek v rámci dokončovacích operací (tvarové vložky popraskaly v místech, kde byly díry vrtány, vystruženy, či bylo frézováno vtokového ústí).
3. Leštit vtokové ústí na drsnost Ra 0,4. Po 3D tisku bylo možné vidět ve vtokovém ústí jednotlivé vrstvy, které vznikly nanášením fotopolymeru. Bylo nutno jej odstranit pro bezproblémové vstřikování polymerního materiálu.
4. Vyvarovat se vrtání děr pro vyhazovače do tenkostěnných prvků. Dochází k prasklinám. Je vhodné uvažovat vyhazování vzduchem, vyhazování stírací deskou nebo použití mechanického vyhazování, ale volit pozice vyhazovačů, aby nedocházelo k zeslabení stěn.
5. Volit větší průměry vtokového ústí, aby došlo ke zkrácení doby vstřikování a následně doby chlazení.
6. Zvětšit průměr v nejužším místě u filmového vtoku, aby byl snížen potřebný vstřikovaný tlak.

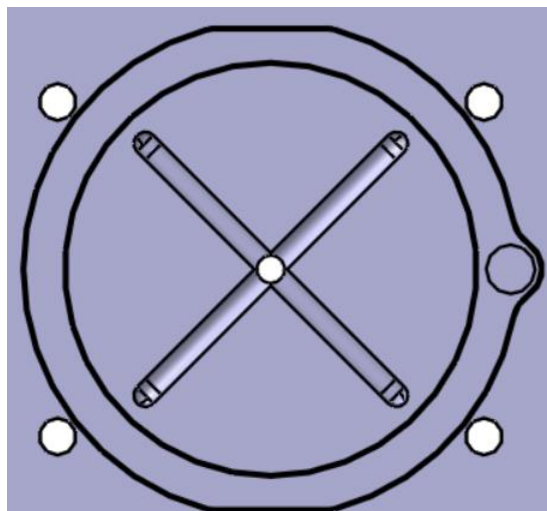
11.3.4 Nové konstrukční řešení pro tvarové vložky

Na základě zjištěných poznatků, které byly objeveny během testování tvarových vložek, byly vyrobeny nové tvarové vložky, které obsahovaly nové konstrukční náležitosti. Jak jde vidět na obrázku č. 113, je zvětšený konec vtokového ústí a rozšířeny tunelové vtoky. Dále byla vyrobena podložná deska, která obsahovala pouze díry pro vyhazovače a pro

středový přídržovač vtoku, jak jde vidět na obrázku č.114. Podložná deska plnila funkci podpěry tvárníku.



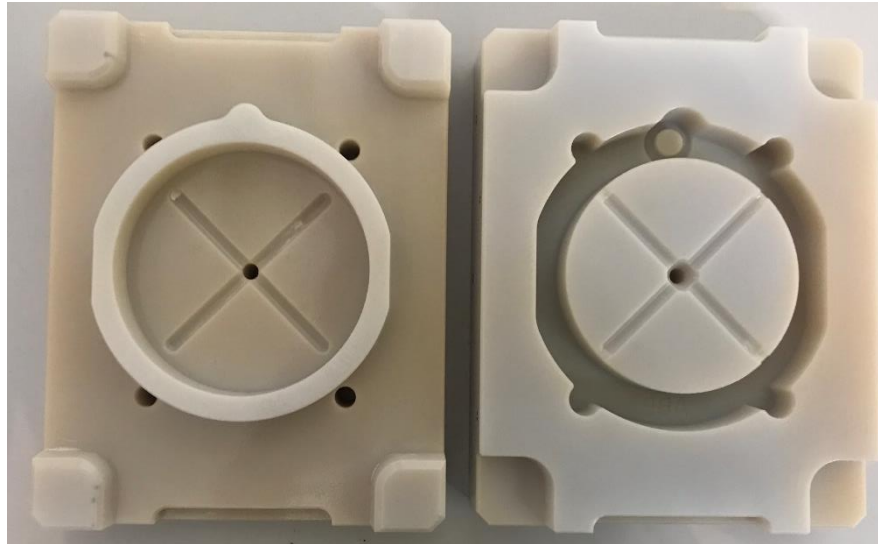
Obr. 113 Upravený tvárník.



Obr. 114 Upravené vtokové ústí.

Bylo použito taktéž mechanické vyhazování, avšak s novým uspořádáním vyhazovačů o průměru 8 mm a byla zmenšena výška desky vůči podložné desce o výšce 16 mm. Vyhazovače byly rozmístěny tak, aby nebyly vrtány díry do zeslabené tvarové části a nedocházelo k popraskání tvárníku v okolí děr jak pro předchozí dva návrhy.

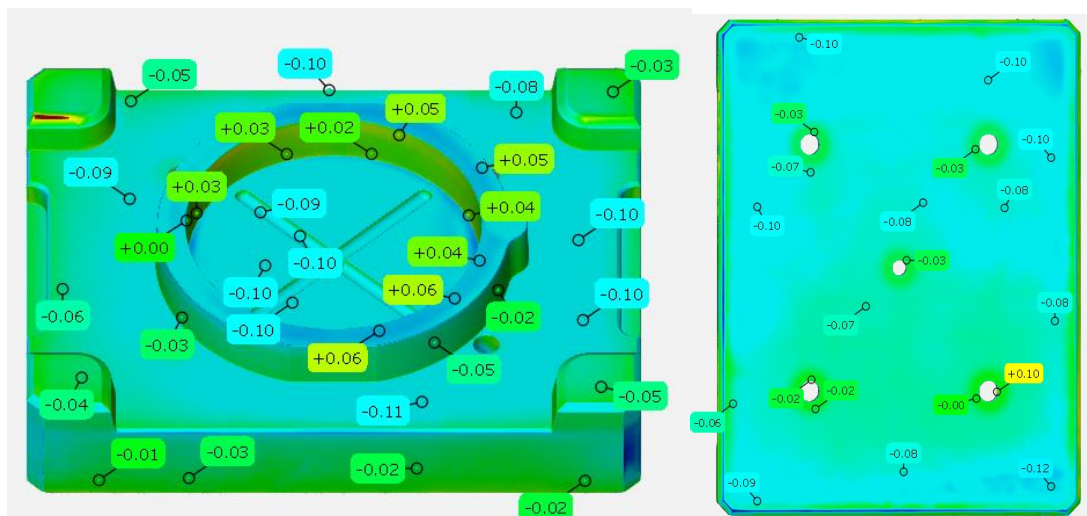
Technologický postup byl obdobný jako pro tisk předchozích dvou variant. Díry pro vyhazovače byly zmenšeny o 0,2 mm, aby byly pouze vystruženy. Tloušťka jednotlivých vrstev byla stanovena na 14 mikronů, což je nejmenší možné vrstvení pro co nejlepší přesnost tisku (obrázek č.115). Pro zvýšení teplotní odolnosti tvarových vložek byl aplikován temperační proces. Temperační proces byl taktéž stejný jako pro variantu 1 a 2. Aby byla zjištěna teplotní roztažnost, která mohla teoreticky vzniknout během temperačního procesu.



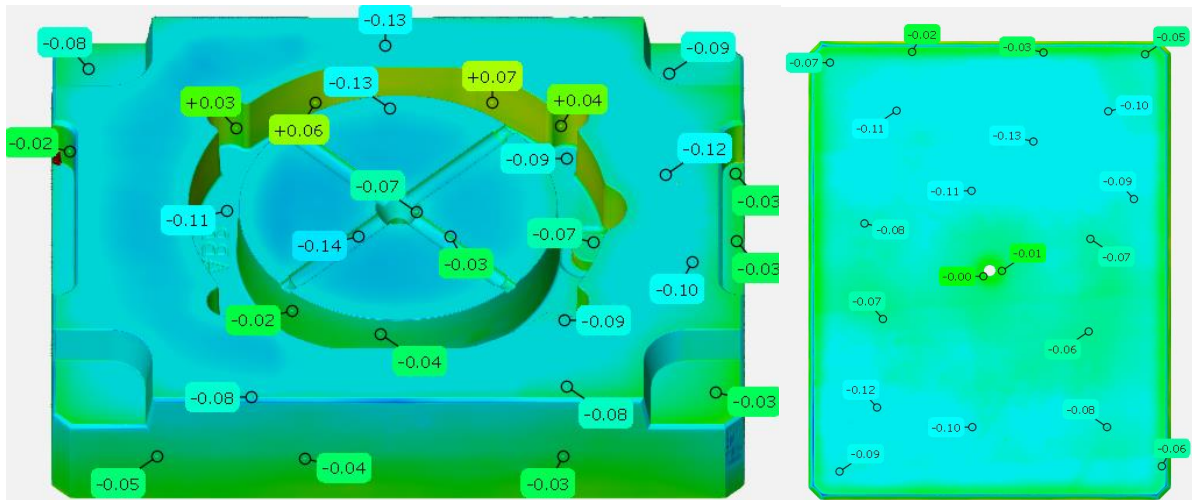
Obr. 115 Tvarové vložky – varianta 3.

Skenování tvarových vložek před temperačním procesem

Skenování výrobku bylo provedeno pomocí strukturovaného světla poloautomatickým skenerem ATOS Q, který je nově uveden na trh. Rozlišení jedné kamery je 12 MPx, což znamená, že skener je schopen provádět velmi detailní skenování. Skener byl vždy manuálně nastaven na danou výšku a pod daným úhlem. Kruhový stůl se automaticky natáčel po 40 °, než se vrátil do původní polohy, tudíž se otočil v devíti krocích o 360 °. Když bylo měření úspěšně, byla změněna poloha skeneru a bylo prováděno skenování, dokud nebyl celý výrobek naskenován. Je nutno uvažovat, že rozměrové odchylky mohly vzniknout nepřesností tisku, přičemž tiskárna garantuje přesnost tisku v rozmezí $\pm 0,1$ mm, vlivem chyby skenovacího přístroje ATOS, aplikování samovypařovacího spreje či úpravu model v programu GOM inspect při lepení děr a vyhlazování sítě (obrázek č.116 a 117).



Obr. 116 Tvárník před temperací.

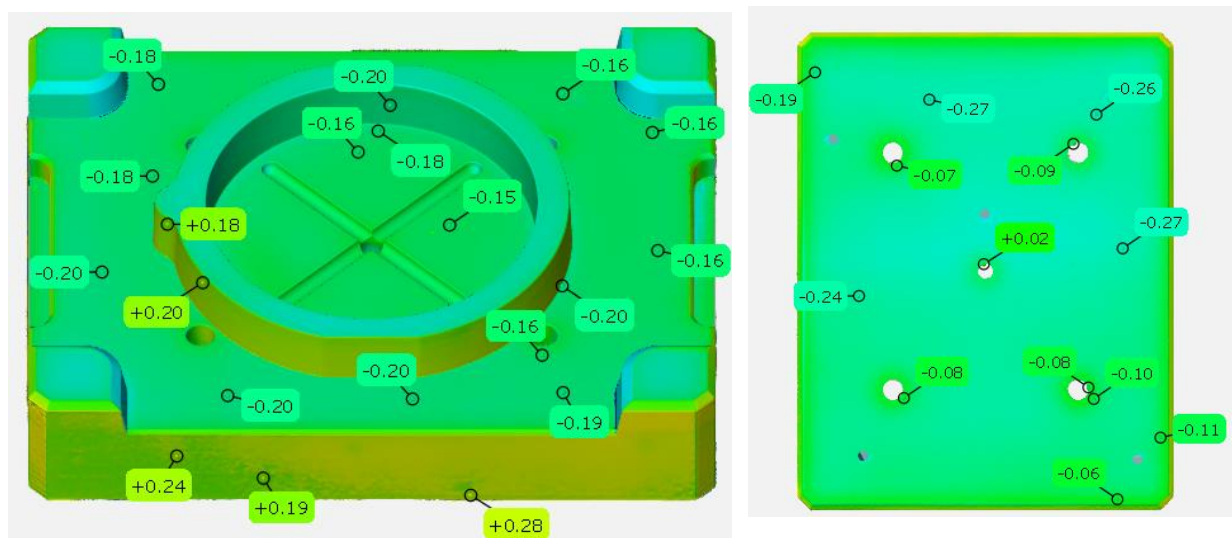


Obr. 117 Tvárnice před temperací.

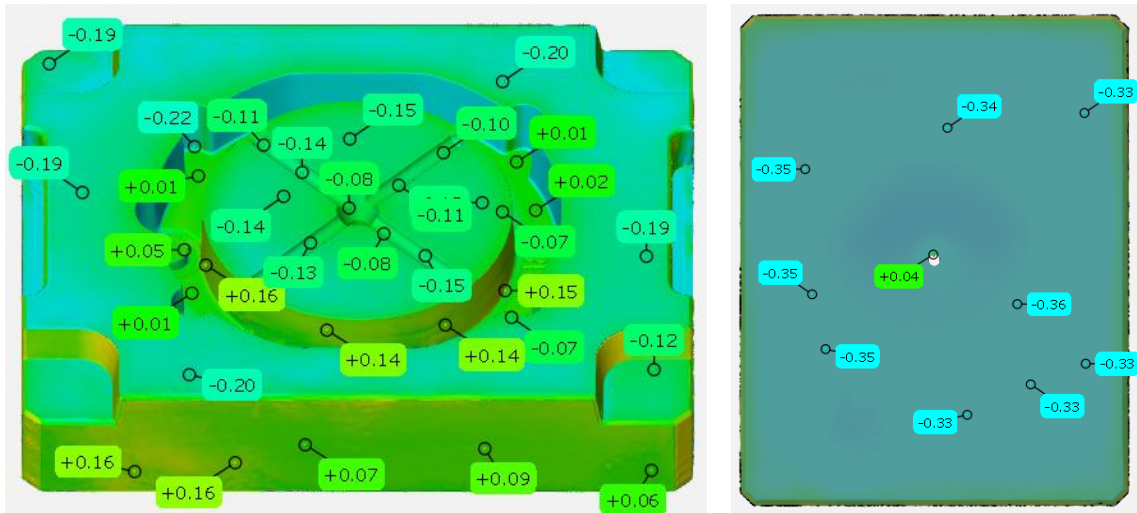
Bylo zjištěno, že pro tvárník jsou rozměrové odchylky maximálně $\pm 0,1$ mm. Pro tvárnici jsou maximální rozměrové odchylky $\pm 0,15$ mm.

Skenování tvarových vložek po temperačním procesu

V porovnání rozměrových odchylek před temperací a po temperaci bylo zjištěno, že pro tvárník vzrostla maximální odchylka $\pm 0,2$ mm v horní a části výrobku, přičemž v okolí tvarové části se jednalo o zmenšení neboli smrštění a v šířce a délce výrobku došlo k teplotní roztahnosti v rozmezí $+0,2$ – $0,3$ mm podle obrázku č.116 a 118).



Obr. 118 Tvárník po temperaci.

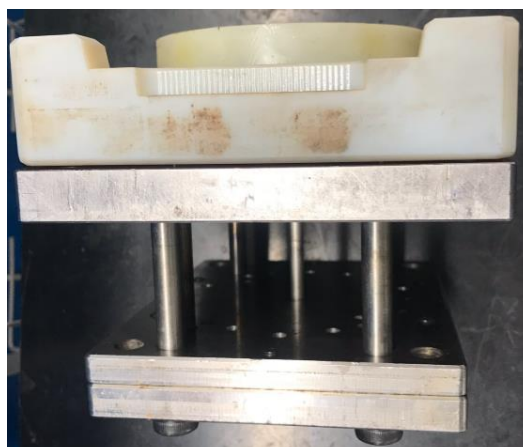


Obr. 119 Tvárnice po temperaci.

V porovnání rozměrových odchylek před temperací a po temperaci lze vidět, že rozměrové odchylky pro šířku, délku a pro tvarovou část výrobku jsou do $\pm 0,2$ mm. Zadní strana výrobku vykazuje největší rozměrové nepřesnosti v průměru $- 0,35$ mm. Jelikož se jedná pouze o zadní stranu, nejedná se o výrazný problém podle obrázku č.119.

11.3.5 Testování vstřikovací formy pro polyjet – varianta 3

Jelikož vlivem tisku došlo ke zvětšení délky a šířky v průměru o $+ 0,2$ mm, jak lze vidět na obrázcích č. 118 a 119, bylo nutno frézovat boční stěny, aby se tvarové vložky vešly do dané kapsy v upínacích deskách. Dále byly vystruženy díry pro vyhazovače na předepsanou přesnost $\varnothing 8H7$ a středový přídržovač vtoku na rozměr $\varnothing 6H7$. Po těchto úpravách následovala montáž. Tvárnice byla upnuta do kotvicí desky tvárnice a tvárník s vyhazovacím systémem byl smontován pro správnou funkčnost (obrázek č.120). Tvárník obsahoval podložnou desku. Dále byl upnut do kotvicí desky tvárníku a vyhazovací systém byl přimontován k pohyblivé části vstřikovací formy.



Obr. 120 Vyhazovací systém s tvárníkem.

Vstřikovací parametry byly použity totožně jako v předchozím případě, když byl vstřikován polyamid 6 podle tabulky č. 4. Před každým zdvihem byl nastříkán separační sprej a tvarové vložky byly zchlazeny na 50 °C. Pro první zdvih byla nastavena vstřikovaná dávka na 70 % se vstřikovacím tlakem 580 barů. Při daných podmínkách byla poškozena tvarová vložka pro variantu 2. Dané tvarové vložky vydržely dané podmínky, forma nebyla nikterak poškozena a byla zvyšována pouze vstřikovaná dávka na 80 %, 90 % a následně na 100 %, jak lze vidět na výrobcích 2, 3 a 4 na obrázku č.121.



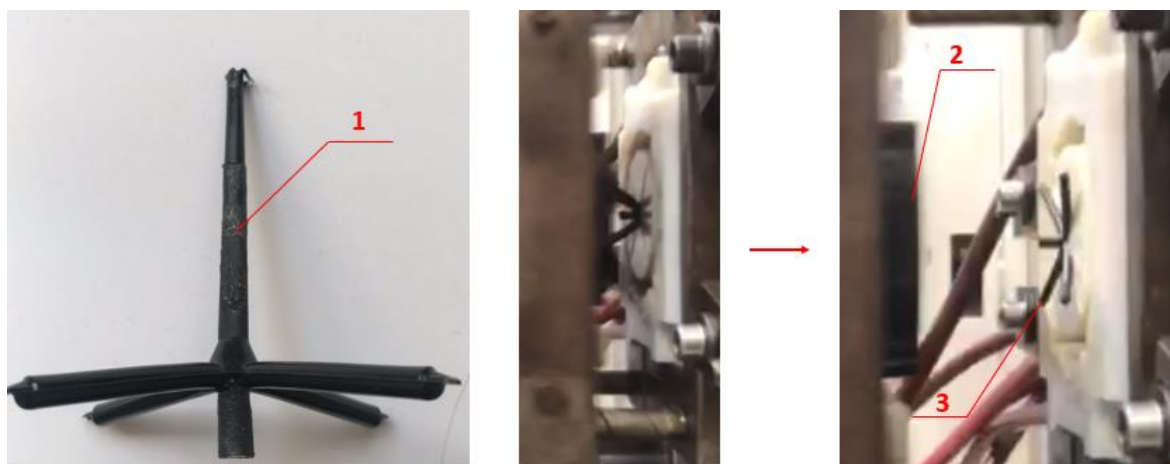
Obr. 121 Výrobky vyrobené z polyamidu 6



Obrázek 122 Výrobek požadované jakosti vyrobené z polyamidu 6.

Výrobky 4, 5 a 6 byly označeny za výrobky v dostačující kvalitě pro výrobu prvních prototypů ze vstřikovaného materiálu polyamid 6 (obrázek č.121 a 122), což bylo cílem této kapitoly. Během vstřikování nastal hlavní problém, že výrobek zůstal na straně tvárnice pro první tři výrobky a bylo nutno jej odseparovat ze zadní strany. Výrobek č. 4 zůstal při vstříknutí plné dávky po otevření formy na straně tvárníku. Ovšem pro výrobky 5, 6 a 7

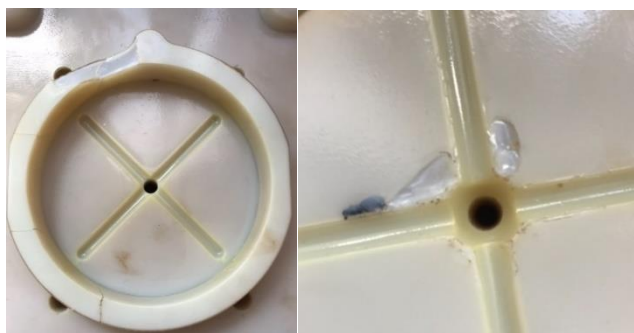
nastala komplikace, kdy výstřík zůstal na straně tvárníku, ale vlivem otevírací síly byl vtokový zbytek odtržen od výrobku. Daný problém byl způsoben tím, že roztavený polymer proudil vtokovým ústím v tvárnici, přičemž teplota vstříkovaného materiálu (260 °C) byla příliš vysoká, roztavený materiál lehce natavil vtokové ústí tvárnice a během doby chlazení chladlo vtokové ústí se vstříknutým polymerem. Následně byla otevřena vstříkovací forma, a protože ve vtokovém ústí došlo ke spojení daného materiálu a následnému lehkému promíslení, vlivem otevírací síly byl vtokový zbytek odtržen od výrobku, který zůstal na straně tvárníku, a vtokový zbytek byl na straně tvárnice, jak lze vidět na obrázku č. 123.



1 – vtokové ústí – spojení dvou materiálů, 2 – výrobek, 3 – odtržený vtokový zbytek

Obr. 123 Otevření vstříkovací formy – odtržení.

Tento způsob odtržení výrobku od vtokového zbytku způsobuje velkou zátěž pro tvarové vložky, jelikož vzniká poměrně velké pnutí při přetržení. Při sedmém zdvihu tvárník a tvárnice nevydržely dané napětí a rázy. Došlo k odlomení tvarové části na straně tvárníku a na tvárnici byly odlomeny části, kde vznikalo největší pnutí při odtržení, přičemž tvárnice nevydržela danou zátěž (obrázek č.124). Bylo zjištěno, že díky konstrukčním úpravám oproti předchozí variantě je možno vstříkovat polyamid 6. Pro budoucí návrh je doporučeno dodržet všechny konstrukční požadavky, které byly zahrnuty v daném návrhu. Jelikož docházelo ke komplikaci v místě vtokového ústí, bylo by vhodnější udělat pouzdro pro kovovou vtokovou vložku (například od firmy Meusbeurger E 1600) a roztavený polymer by byl přiváděn skrze ni.



Obr. 124 Zničená forma – varianta 3.

12 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

12.1 Technické zhodnocení

V rámci technického zhodnocení budou zhotovené výrobky vyhodnoceny podle daného materiálu. Do vstřikovací formy byl vstřikován polypropylen a polyamid 6. Pro materiál polypropylen byly testovány tvarové vložky varianty 1 a varianty 2.

Tvarové vložky – varianta 1

Pro variantu 1 byl vstřikován pouze polypropylen podle tabulky č.1. Tvarové vložky sloužily především k tomu, aby byly zjištěny závady, které mohou vzniknout při vstřikování, a bylo možné se poučit pro další budoucí návrhy.

Tab. 5 Parametry pro variantu 1

Vstřikovaný materiál	polypropylen
Teplota vstřikovaného materiálu	200 °C
Vstřikovaný tlak	380 bar
Počet zdvihů	13 ks
Počet výrobku požadované jakosti	3 ks

Při třináctém zdvihu praskl tvárník v zadní části. Bylo to způsobeno upnutím tvarové vložky pouze po obvodu, nikoliv za celou plochu. Pro budoucí návrh je nutno uvažovat použití podložné desky.

Tvarové vložky – varianta 2

Do tvarových vložek pro variantu 2 (tabulka č.2) bylo snahou odladit proces vstřikování pro materiál polypropylen pro zaručenou sériovost 10–20 kusů. Dále je možno uvažovat, že materiály, které mají obdobné vlastnosti, by bylo možné taktéž vstřikovat podle požadavku (HDPE, LDPE, ABS a PS). Nebylo nutno provést celou sérii pro výrobu 20 kusů, ale je nutno uvažovat, že tvarová vložka byla testována taktéž pro materiál polyamid 6. Jelikož tvarové vložky byly lehce popraskány v okolí vyhazovačů, tvarová vložka nebyla schopna vydržet daný vstřikovací tlak a teplotu a nebyl vyroben žádný výrobek v požadované jakosti. Z daných důvodů byla vyrobena varianta 3 s odlišným konstrukčním řešením.

Tab. 6 Parametry pro variantu 2

Vstřikovaný materiál	polypropylen
Teplota vstřikovaného materiálu	200 °C
Vstřikovaný tlak	380 bar
Počet zdvihů	7 ks
Počet výrobků požadované jakosti	4 ks
Počet teoreticky možných výrobku	až 30 ks
Vstřikovaný materiál	polyamid 6
Teplota vstřikovaného materiálu	280 °C
Vstřikovaný tlak	580 bar
Počet zdvihů	7 ks
Počet výrobku požadované jakosti	3 ks

Tvarové vložky – varianta 3

Během testování tvarových vložek byly zjištěny konstrukční nedostatky, které byly zjištěny během procesu vstřikování. Na základě toho byla zvolena odlišná konstrukce pro variantu 3.

Změna konstrukčního návrhu:

- Využít podložnou desku, aby byl tvárník upnutý za celou plochu.
- Leštit vtokové ústí na drsnost Ra 0,4.
- Jinak volit pozice vyhazovačů, aby nebylo vrtáno do tenké části tvárníku.
- Zvětšit průměry rozvodného kanálu.
- Rozšířit filmový vtok pro snížení vstřikovaných tlaků.

Protože v rámci tvarové vložky varianty 2 byl odladěn proces pro vstřikování polypropylenu, pro variantu 3 (tabulka č.6) byl vstřikován pouze teplotně odolný termoplast polyamid 6 a bylo zjištěno, že lze vstřikovat polyamid 6. Když by do budoucna bylo uvažováno kovové vtokové vložky, jak již bylo zmíněno v kapitole 11.3.5, byla by zaručena vyšší sériovost.

- frézování na CNC
- výroba metodikou polyjet
- výroba metodikou SLM
- výroba metodikou DMLS
- výroba metodikou ADAM
- výroba metodikou galvanoplastika
- alternativní výroba hotového výrobku

Je nutno uvažovat nepřesnost tisku pro daný stroj podle tabulky č. 5.

Tab. 8: Technická specifika pro stroje

Technologie	CNC frézování	Polyjet	DLP
Stroj	CV5-500	Objet j750	Kelant S400
Přesnost výroby/ tisku	±0,05 mm	±0,1 mm	±0,2 mm
Technologie	DMLS	ADAM	Galvanoplastika
Stroj	EOS M400	Markforged Metal X	X
Přesnost výroby/ tisku	±0,1 mm	±0,1 mm	±0,05 mm
	Tisk hotového výrobku		
Stroj	Arburg Freeformer 200-X		
Přesnost výroby/ tisku	±0,1 mm		

Ekonomické zhodnocení je vytvořeno pouze na základě cenových nabídek od firem, které nabízejí dané služby. V cenách výroby jsou zahrnuty i marže. Informaci o výši marží od různých firem nebylo možné zjistit. Ekonomické zhodnocení je zkráceno z důvodu velkého rozsahu diplomové práce, aby nebylo překročen stanovený rozsah. Cena je uvedena vždy pro pár tvarových vložek (tvárník a tvárnice).

Je nutno taktéž uvažovat, že v rámci diplomové práce byly tvarové vložky poměrně jednoduché. Výroba za pomoci frézování pro daný díl je stejně drahá jako metoda polyjet, ovšem doba dodání je nejdéle ze všech zmíněných metod. Cena roste exponenciálně vůči konstrukční složitosti tvárníku a tvárnice, když by muselo být využito elektroerozivního obrábění. Vůči 3D tisku při stejném objemu, pouze s větší složitostí tvarových vložek bude cena přibližně stejná. Například výhodou u 3D tisku je ta, že umožňuje vyrobít komfortní chlazení, které je mnohem účinnější vůči chlazení pomocí klasických vrtaných okruhů.

Tab. 9: Ekonomické zhodnocení 1

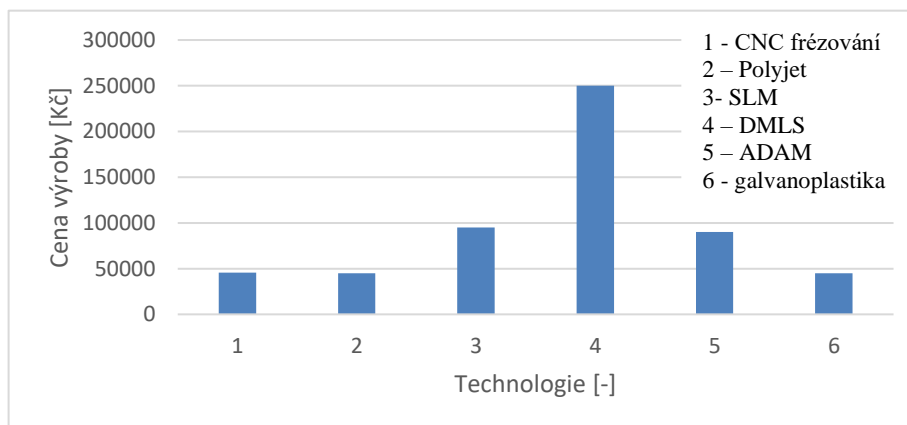
Technologie	CNC frézování	Polyjet
Firma	MAplast	MCAE
Stroj	CV5-500	Objet j750
Materiál	slitina hliníku/oceli	RGD 515+RGD 535
Metoda výroby	frézování na 3osé CNC frézce	nanášení fotopolymerního materiál za pomocí inkoustové hlavy a vytvrzení světlem
Dokončovací operace	kompletní zauhlování, šlichtování tvarových vložek, vystružení otvorů pro vyhazovače, leštění	odstranění podpůrného materiálu, otryskat výrobek vodou
Doba výroby/tisku	-	18 hodin 15 minut
Doba dokončovacích operací	-	3 hodiny
Doba dodání	4,5 týdne	do 3 dnů
Cena výroby/tisku	neuvedeno	45 000 Kč
Cena dokončovacích operací	neuvedeno	zahrnuto v ceně tisku
celková cena	45 680 Kč	45 000 Kč

Tab. 10: Ekonomické zhodnocení 2

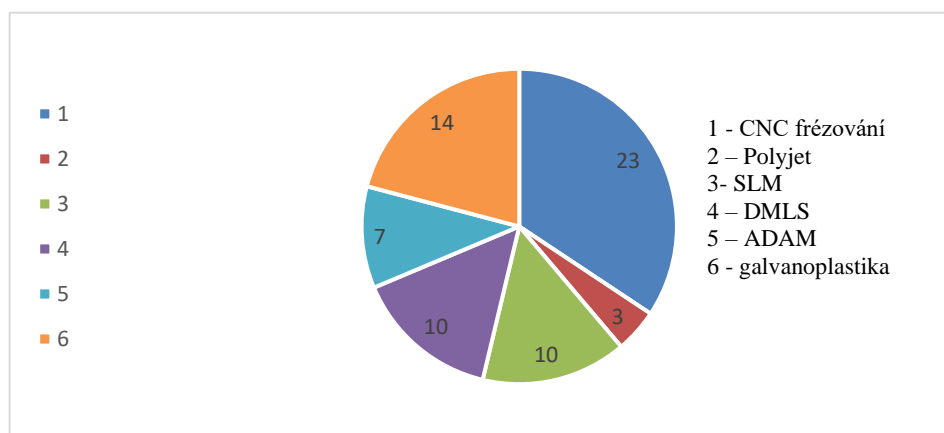
Technologie	SLM	DMLS	ADAM
Firma	3Dlaboratory	Materialise	3Dwiser
Stroj	SLM 280 HL	EOS M400	Markforged Metal X
Materiál	AlSI10Mg	AlSI10Mg	nerezová ocel 17-4 PH
Metoda výroby	roztavení kovového prášku pomocí laseru	spékání kovového prášku pomocí laseru	metoda založená na principu FDM tisku pro kovový materiál
Dokončovací operace	1. žíhat na odstranění vnitřního pnutí 2. odstranění podpor (řezání kovového materiálu), 3. vhodná dokončovací operace	1. žíhat na odstranění vnitřního pnutí 2. odstranění podpor (řezání kovového materiálu), 3. vhodná dokončovací operace	1. vložit výrobek do speciální roztoku, 2. sinitrování, 3. odstranění podpor, 4. vhodná dokončovací operace
Doba výroby/tisku	40 hodin	40 hodin	30 hodin
Doba dokončovacích operací	12 hodin	12–14 hodin	10 hodin
Doba dodání	do 10 dnů	do 10 dnů	do 7 dnů
Cena výroby/tisku	95 000 Kč	250 000 Kč	90 000 Kč
Cena dokončovacích operací	zahrnuto v ceně tisku	zahrnuto v ceně tisku	zahrnuto v ceně tisku
celková cena	95 000 Kč	250 000 Kč	90 000 Kč

Tab. 11: Ekonomické zhodnocení 3

Technologie	Galvanoplastika	Tisk hotového výrobku
Firma	Electroforming	Arburg
Stroj	X	Arburg Freeformer 200 - X
Materiál	slitina niklu	polykarbonát
Metoda výroby	galvanické nanášení materiálu	3D tisk spojený se vstřikováním, 85–95% stejné vlastnosti jak u výrobku pro vstřikování
Dokončovací operace	1. tisk pozitivu (SLA tisk), 2. galvanoplastika, 3. výplň skořepiny, 4. broušení rovinných ploch, 5. spojení s podpurným materiálem, 6. vrtání děr pro vyhazovače	
Doba výroby/tisku	72 hodin	10 hodin
Doba dokončovacích operací	24 hodin	0 hodin
Doba dodání	do 14 dnů	do 3 dnů
Cena výroby/tisku	20 000 Kč	10 000 Kč
Cena dokončovacích operací	25 000 Kč	0 Kč
celková cena	45 000 Kč	10 000 Kč



Obrázek 126 Cena výroby.



Obr. 127 Čas výroby (počet dní)

Zhodnocení ekonomické části

V rámci ekonomického zhodnocení jsou uvedeny metody výroby tvarových vložek, kterými by je teoreticky byly možné vyrobit tabulek č.9,10 a 11. Pro technologii DLP by bylo nutné provést výzkum různých fotonopolymerů a na základě typových testů otestovat. To je důvod, proč není technologie uvedena v rámci ekonomického zhodnocení.

Bylo v plánu vyrobit hotový výrobek od firmy Arburg na 3D tiskárně Arburg Freeformer 200. Bohužel kvůli pandemii nebylo možné tisk a následný test provést. Jednalo by se o zhotovení výrobku, který by splňoval 80–95 % vlastností jako u vstříkovaného dílu a nebylo nutno vyrobit vstříkovací formu. Komplikace ovšem nastává, když je nutno tisknout větší díly. Maximální rozměry tištěného výrobku na tiskárně Arburg freeformer 200 jsou 230 mm × 130 mm × 250 mm.

Výroba pomocí CNC frézováním pro dané díly je nejlevnější a nejpřesnější, ovšem doba dodání je nejdelší ze všech zmíněných metod. Cena roste exponenciálně vzhledem ke konstrukční složitosti tvárníku a tvárnice. Vůči 3D tisku – při stejném objemu, pouze s větší složitostí tvarových vložek bude cena přibližně stejná. Výhodou 3D tisku je například to, že umožňuje vyrobit komfortní chlazení, které je mnohem účinnější než chlazení pomocí klasických vrtaných okruhů a je možno vytisknout jakkoliv složitý výrobek.

V obrázku č.126 a 127 je znázorněno, že při požadavku, aby bylo vyrobeno 10–30 kusů prvních prototypových výrobků z PP, HDPE, LDPE, PS a ABS, je nejlevnější a nejrychlejší metodou polyjet, přičemž cena je nejnižší a doba dodání je pouze do tří dnů. Když budou provedeny konstrukční změny, které byly doporučeny, je možné vyrobit až 10 kusů z polyamidu 6. Je-li potřeba vyrobit více kusů, je nutno uvažovat jiný způsob výroby. Cenově je podle grafu obrázku č.127 nejvýhodnější metoda frézování. Uvažujeme-li ovšem i časové hledisko, jsou cenově nejvíce vhodné metody SLM a ADAM vůči metodě frézování je čas doručení zhotoveného výrobku mnohem kratší a také umožňuje vytisknout i konstrukční požadavky, které nelze provést pomocí frézování.

ZÁVĚR

V diplomové práci bylo poukázáno na možnost využití metod rapid prototyping v oblasti vstřikování plastů, konkrétně ke zhotovení tvarových vložek (tvárník a tvárnice) do vstřikovací formy. V současné době se prototypové tvarové vložky do vstřikovací formy vyrábí ze slitiny hliníku metodou frézování.

V rámci diplomové práce byl využit univerzální rám vstřikovací formy, u kterého došlo pouze k výměně tvarových vložek, zhotovených pomocí 3D tisku, a to metodou polyjet a DLP. Při výrobě metodou DLP došlo po oplachu v isopropylalkoholu ke ztrátě vlastností výrobků a k jejich popraskání v temperační peci při výrazně nižší teplotě, než bylo uvedeno v materiálovém listu. Kontrola rozměrů navíc poukázala na výrazné rozměrové odchylky. Z těchto důvodů nebyly tvarové vložky vyrobené metodou DLP testovány.

Do vstřikovací formy byl vstřikován materiál zastávající skupinu komoditních polymerů (polypropylen) a druhý materiál, který zastává skupinu inženýrských polymerů (polyamid 6). Byly vyrobeny dvě varianty tvarových vložek, přičemž druhá varianta byla navržena na základě nedostatků, které byly zjištěny během procesu vstřikování pro první metodu. Bylo zjištěno, že tvarové vložky zhotovené metodou polyjet umožňují vyrobít vstřikováním plastů až 30 výrobků z polypropylenu. Předpokladem je, že podobná sériovost bude zaručena i pro materiály HDPE, LDPE, PS a ABS.

Dále byl vstřikován polyamid 6 při teplotě 260 °C a vstřikovaném tlaku 580 barů. Bude-li uvažováno druhé konstrukční řešení tvarových vložek, které by navíc obsahovalo kovovou vtokovou vložku, bude možné vyrobít až 10 kusů. Jsou to ovšem maximální podmínky, za kterých je možné vstřikovat vysokoteplotní polymer.

V rámci ekonomického zhodnocení byly porovnány metody, kterými bylo teoreticky možné vyrobít tvarové vložky. Další nejvhodnější nekonvenční metody jsou SLM a ADAM, ovšem cena je dvojnásobná oproti tisku metodou polyjet. Avšak metody ADAM a SLM zaručí mnohem vyšší sériovost.

Z diplomové práce vyplývá, že výroba tvarových vložek do vstřikovací formy je možná pomocí metod 3D tisku, ať už se jedná o tisk z fotopolymeru či z kovového prášku. Během tisku dochází k rozměrovým nepřesnostem v rozmezí $\pm 0,1-0,3$ mm v závislosti na typu technologie. Je nutno uvažovat, zda je to v rámci výroby prototypu problém či nikoliv. Taktéž je nutno stanovit si předem, jaký počet kusů je třeba vyrobít a jaké jsou požadavky na jakost prototypového výrobku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [2] 3DSYSTEM; *Stereolithography (SLA®)* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla>
- [3] ABC3D [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
- [4] ALL3DP [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-a-dlp-3d-printer-3d-printing-simply-explained/>
- [5] CHUA, C.K., LEONG, K.F., LIM, C.S. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 2. vyd. London: World Scientific Publishing, 2003. 448 s. ISBN 981-238-117-1
- [6] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. New Jersey: World Scientific, [2017]. ISBN 978-981-3146-76-1
- [7] SEDLÁK, Josef. *Přednášky ze Speciální technologie obrábění*. FSI VUT v Brně. 2019.
- [8] SLM. *Cotu* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/slm-selective-laser-melting>
- [9] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [10] 3Dwiser, *Markforged Metal X* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/slm-shttps://3dwiser.com/3d-tiskarny/3d-tisk-kovu/markforged-metal-x/#specifikace-elective-laser-melting>
- [11] ZLOCH, Marek. *Arburg plastic freeformer* [online] [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.strojirenskeforum.cz/prezentace/documents/pdf/freeformer-strojirenskeforum-liberec-2019.pdf?t=1587891130> [12] <https://docplayer.cz/32277637-Zarizeni-pro-vakuove-liti-do-silikonovych-forem.html>
- [13] MMspektrum. *Galvanoplastika* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/galvanoplasticka-vyroba-forem>
- [14] TOMIS, František. *Gumárenská a plastikářská technologie: zpracovatelské procesy*. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987.
- [15] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. [cit. 2020-04-26]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [16] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [17] *Vstřikování plastů* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [18] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. [cit. 2020-04-26]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>

- [19] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů, II díl – Vstřikování termoplastů*. 1. vydání. Brno: UNIPLAST, 1999.
- [20] KANDUS, Bohumil. *Přednášky z Technologie zpracování plastů*. FSI VUT v Brně. 2018.
- [21] *Studené a živé vtokové systémy* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Studene_a_zive_vtokove_systemy.pdf
- [22] *Polymerní materiály* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Polymery_2010.pdf
- [23] SOVA, Miloš. KREBS, Josef. a kol. *Termoplasty v praxi I, II*. Praha: Dashöfer, 1999–2004. CD
- [24] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování*. 2. vydání. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [25] *3D skenování* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz>
- [26] *ESEARCHGATE, 3D CAD model generation of mechanical parts using codedpattern projection and laser triangulation systems* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235263126_3D_CAD_model_generation_of_mechanical_parts_using_codedpattern_projection_and_laser_triangulation_systems
- [27] *Automatizace* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/profilove-snimace-opticky-detektor-rozmeru-a-ploch>
- [28] MOROVIČ, Ladislav. *Non-contact measurement of free-form surfaces*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2016. ISBN 978-80-7380-628-6
- [29] *MCAE SYSTEMS*. [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/>
- [30] *CAPTURE 3D: ATOS TRIPLE SCAN. BLUE LIGHT 3D SCANNER*. [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.capture3d.com/3d-metrology-solutions/3d-scanners/atos-triplescan>
- [31] [online]. In: [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D>
- [32] [online]. In: [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/PolyJet-3D-printer-machine_fig2_253238720
- [33] [online]. In: [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://tool-maker.net/english-formnext-2015-two-freeformers-will-be-on-show-at-the-premiere-of-the-new-trade-fair-in-frankfurt/?lang=en>
- [34] HORÁČEK, Milan *Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu*. Brno: Odbor slévárství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2020-04-26].
- [35] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Horke_vtoky.pdf

- [36] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Vyhazovaci_sestava_a_vyhazovace.pdf
- [37] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/temperace-vstrikovacich-forem-dulezita-podminka-vyroby-vystriku-z-termoplastu-3-cast/c/3087/#gallery>
- [38] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. [cit. 2020-04-26]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [39] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235263126_3D_CAD_model_generation_of_mechanical_parts_using_coded-pattern_projection_and_laser_triangulation_systems
- [40] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.misure.unisa.it/research/scanners3d>
- [41] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112003594>
- [42] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.irevitalise.eu/en/capacity-detail/structured-light-scanning/gom-atos-structured-light-scanner>
- [43] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.multistation.com/second-life/product/stratasys-objet-j750/>
- [44] [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://drobnyobchod.cz/3d-tiskarny-a-doplnky/9730-kelant-s400-lcd-sla-uv-resin-3d-printer.html>
- [45] TOMIS, František, Jiří KAŇOVSKÝ a Josef HELŠTÝN. *Formy a přípravky*. Brno: VUT, 1979. Učební texty vysokých škol.
- [46] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-833-5.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
ADAM	Atomic Diffusion Additive Manufacturing
CNC	Computer numeric control
Cu	měď
DLP	Digital Light Processing
DMLS	spékání kovového prášku laserem
EBM	tavení elektronovým paprskem
Fe	železo
Lw	délka vtokové trysky
Ni	nikl
PA	polyamid
PC	polykarbonát
PEI	polyeterimid
PET	polyethylentereftalát
PETG	polyethylentereftalát – glykol
PLA	polylaktid
PP	polypropylen
SGC	Solid Ground Cutting
SLA	stereolitografie
SLS	spékání prášku laserem
T_f	oblast viskózního toku
T_g	oblast zesklnění
T_m	teplota tání
T_z	oblast degradace materiálu

Zkratka	Jednotka	Popis
F_p	[N]	přisouvací síla
D_{Vk1}	[mm]	průměr vtokové vložky
D_{Vk1}	[mm]	průměr vtokové vložky
p_i	[Mpa]	vstřikovací tlak v dutině formy
p_z	[N]	zbytkový tlak
s	[mm]	tloušťka výrobku
S_k	[mm]	dráha nástroje
S_n	[mm]	dráha šneku
t_d	[s]	doba dotlaku
t_{chl}	[s]	doba chlazení
t_m	[s]	manipulační doba
t_{s1}	[s]	doba na uzavření a uzamčení formy
t_{s2}	[s]	přisun plastikační jednotky

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Výkresová dokumentace sestavy vstřikovací formy
Příloha č. 2	Technický list tiskárny objet J750
Příloha č. 3	Technický list vstřikovacího stroje KM 50 CX
Příloha č. 4	Materiálové listy pro vstřikované a tištěné materiály
Příloha č. 5	CAD model sestavy vstřikovací formy