Vliv procesních parametrů na kvalitu vytlačené tiskové struny

Ondřej Maštalíř

Bakalářská práce
2022

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Ondřej Maštalíř**
Osobní číslo:	**T20260**
Studijní program:	**B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Technologická zařízení**
Forma studia:	**Prezenční**
Téma práce:	**Vliv procesních parametrů na kvalitu vytlačené tiskové struny**

Zásady pro vypracování

1) Vypracovat literární studii na dané téma
2) Vyrobit tiskové struny
3) Vyzkoušet struny při tisku
4) Vyhodnotit kvalitu strun

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

Seznam doporučené literatury:

RAUWENDAAL, Chris J. Understanding extrusion. 2nd ed. Munich: Hanser, c2010, xi, 231 s. ISBN 9783446416864.
RAUWENDAAL, Chris J., Paul J. GRAMANN, Bruce Allen DAVIS a Tim A. OSSWALD. Polymer extrusion. 5th edition. Munich: Hanser Publications, [2014], xvi, 934 s. ISBN 9781569905166.
DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 9788070807880.
KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem. Brno: Computer Press, 2017, 211 s. ISBN 9788025148761.

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

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

L.S.

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

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

Ve Zlíně dne 22. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby [1)];
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 [2)];
- podle § 60 [3)] odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 [3)] odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům.

Prohlašuji, že

- elektronická a tištěná verze bakalářské práce jsou totožné;
- na bakalářské práci jsem pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně ....

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

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

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

2) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:
(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

3) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:
(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.
(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.
(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je v teoretické části analýza technologie 3D tisku, tedy aditivní výroba, metody a materiály pro 3D tisk, popis a rozdělení 3D tiskáren, výroba tiskové struny včetně popisu vytlačovacího zařízení.

Praktickou částí práce je výroba tiskové struny ze zvolených materiálů při nastavení procesních parametrů, tisk konkrétních výrobků a následné vyhodnocení nejvhodnějšího materiálu s danými parametry vyrobené struny.

Klíčová slova: tisková struna, vytlačovací zařízení, 3D tiskárny, materiály, procesní parametry

ABSTRACT

The subject of this bachelor thesis is to analyse 3D printing technology, additive production, methods and materials for 3D printing, description and division of 3D printers, production of printing string, including a description of the extruder.

The practical part deals with the production of a printing string from selected materials with setting process parameters, printing of specific products and subsequent evaluation of the most suitable material with the given parameters of the produced string.

Keywords: printing string, printing equipment, 3D printers, materials, process parameters

Chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, Ph.D. za rady, konzultace a odborné vedení.

Děkuji také své rodině za podporu během mého studia.

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

OBSAH

ÚVOD **10**

I TEORETICKÁ ČÁST **11**

1 ADITIVNÍ VÝROBA **12**

2 ROZDĚLENÍ 3D TISKÁREN **13**

3 PROCES 3D TISKU **14**

3.1 VYTVOŘENÍ 3D SOUBORU 14

3.2 TVORBA STL SOUBORU 14

3.3 TISK 14

3.4 NÁSLEDNÉ ZPRACOVÁNÍ 14

4 METODY TISKU **15**

4.1 SLA - (STEREOLITHOGRAPHY APPARATUS), STEREOLITOGRAFIE 15

4.1.1 Tiskárny zdola nahoru (Bottom-Up) 15

4.1.2 Tiskárna shora dolů (Top-Down) 17

4.2 SLS (SELECTIVE LASER SINTERING) 18

4.3 FDM (FUSED DEPOSITION MODELING) 20

4.3.1 Kartézské tiskárny 21

4.3.2 Delta tiskárny 22

4.3.3 Popis vytlačovací hlavy 22

4.3.4 Studená část 23

4.3.5 Horká část 24

5 MATERIÁLY PRO 3D TISK METODOU FDM **25**

5.1 PLA – POLYLACTIC ACID (KYSELINA POLYMLÉČNÁ) 25

5.2 ABS – ACRYLONITRILE BUTADIENE STYREN 25

5.3 PET/PETG – POLYENTHYLENE TEREFTALATE 26

5.4 PA6 – POLYAMID (NYLON) 26

5.5 ASA – ACRYLONITRILE STYREN ACRYLATE 27

5.6 HIPS – HIGH IMPACT POLYSTARENE 27

5.7 PP – POLYPROPYLEN 28

5.8 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY 28

6 VÝROBA TISKOVÉ STRUNY **30**

6.1 VYTLAČOVACÍ ZAŘÍZENÍ 30

II PRAKTICKÁ ČÁST **32**

7 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI 33
8 VÝROBA TISKOVÉ STRUNY 34
8.1 STOLNÍ VÝROBNÍ STROJ 34
8.1.1 Ovládací panel 35
8.1.2 Násypka 35
8.1.3 Vytlačovací hlava 36
8.1.4 Chladící systém 36
8.1.5 Snímač průměru 37
8.1.6 Polohovač struny 37
8.1.7 Navíječ cívky 38
8.2 PROCES VÝROBY 38
8.3 POUŽITÉ MATERIÁLY A ZVOLENÉ PARAMETRY 40
8.3.1 ABS – Starex HF – 0660IW 40
8.3.2 ABS – Magnum – 3504 43
8.3.3 PLA 4043D 46
8.3.4 HIPS 662E 48
8.3.5 PC + ABS PULSE 920MG, PC Apec 2097,PA11 – P40 TL, PA6 Novamid B30P 49
9 TISK VÝROBKŮ 51
9.1 TISK MINI TESTU 51
9.2 TISK LOĎKY 54
9.3 TISK ŽABKY 55
10 VYHODNOCENÍ 56
10.1 VYHODNOCENÍ TISKU MINI TESTU 56
10.2 VYHODNOCENÍ TISKU LOĎKY 56
10.3 VYHODNOCENÍ TISKU ŽABKY 57
10.4 DISKUZE VÝSLEDKŮ 57
ZÁVĚR 60
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 63
SEZNAM OBRÁZKŮ 64
SEZNAM TABULEK 66
SEZNAM PŘÍLOH 67

ÚVOD

Technologie 3D tisku výrazně ovlivnila nedávnou historii, když v roce 1988 Scott Crump, spoluzakladatel firmy Stratys, požádal o patent 3D tisku. V roce 2004 projekt RepRap prosazoval výrobu levných 3D tiskáren, a to vedlo k většímu zviditelnění právě těchto strojů. K největšímu prosazení na trh došlo až v roce 2009 po vypršení patentů chránících technologii FDM. Zvýšila se konkurence a tiskárny se následně staly lehko dostupným zbožím.

V dnešní době už je na trhu mnoho výrobců FDM tiskáren, je tedy potřeba zvážit správný výběr v závislosti na funkci a využití. Tiskárny se neustále zdokonalují, vývoj s sebou přináší i nové materiály s lepšími vlastnostmi pro profesionální využití. Český trh nezaostává, a také nabízí širší sortiment dražších či levnějších 3D tiskáren.

Technologie 3D tisku vede ke zlepšení života v mnoha ohledech, otevírá nové cesty a možnosti. Potenciál 3D tisku lze využít k vytvoření například vlastního průlomového produktu, který by mohl ovlivnit i další světový vývoj. Tiskárny dovedou podnítit kreativitu a odemknou nápady, které se mohou stát realitou.

Bakalářská práce se zabývá aditivní výrobou, rozdělením 3D tiskáren, metodami a materiály pro 3D tisk. V teoretické části je také popsána výroba tiskové struny včetně popisu vytlačovacího zařízení a stolního vytlačovacího stroje Composer 450.

Praktická část se zabývá výrobou tiskové struny ze zvolených materiálů při nastavení procesních parametrů, tiskem konkrétních výrobků a následným vyhodnocením nejvhodnějšího materiálu s danými parametry vyrobené struny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ADITIVNÍ VÝROBA

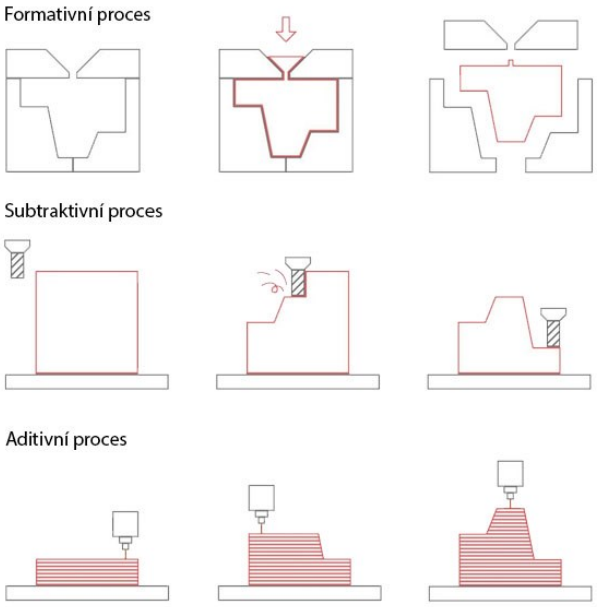
Aditivní výroba neboli 3D tisk je proces, který staví vrstvu po vrstvě a vytváří součást. Existuje řada aditivních technologií 3D tisku, z nichž každá má své vlastní výhody a omezení a každá může tisknout součásti z různých materiálů.

Takové součásti lze tisknout téměř v jakékoli geometrii, což je jedna z hlavních předností 3D tisku. Výhodou je rychlé ověření vlastností a vývoj prototypů a nízkoobjemových výrobních dílů.

Aditivní výroba má i své omezení, není schopna vytvářet součásti s materiálovými vlastnostmi rovnocennými těm, které jsou vyráběny subtraktivními nebo formativními procesy. 3D tisk má také omezení v opakovatelnosti, což znamená, že součásti nebudou (dokonale) totožné, ale budou mít mírné variace kvůli rozdílnému chlazení nebo deformaci během vytvrzování.

Do skupiny výrobních procesů kromě aditivní výroby patří subtraktivní a formativní procesy. Subtraktivní procesy se od aditivních liší tím, že je materiál odebírán z povrchu výrobku. Při průběhu aditivním je naopak materiál postupně přidáván po vrstvách. Tento proces je definován jako 3D tisk.

Formativní procesy jsou nejvhodnější pro velkoobjemovou výrobu stejné součásti, kde nejnáročnější je prvotní investice do nástroje (formy). Proto se prvně výrobek zkouší a vyrábí pomocí aditivní metody. (Obr. 1) [1]



Obr. 1 – Výrobní procesy [1]

2 ROZDĚLENÍ 3D TISKÁREN

Celkový 3D tisk se za posledních 30 let změnil, zlepšil, i když stále nedosáhl svých limitů. Tiskárny se staly důležitým nástrojem pro výrobu a díky jednoduchému vytvoření počítačového souboru umožňují vytvořit prakticky cokoliv.

Dnes je vidět, že 3D tisk přináší revoluci ve velkých odvětvích jako jsou automobilový průmysl, architektura nebo zdravotnictví. [2]

3D tiskárny lze rozdělit podle použitého materiálu před tiskem: (Obr. 2) [4,12]

- Kapalný materiál:
  - SLA (stereolithography apparatus)
- Práškový materiál:
  - SLS (Selective Laser Sintering)
- Tuhý materiál:
  - FDM (Fused Depositíon Modeling)

Obr. 2 – Tiskárny SLA, SLS, FDM [4,12]

3 PROCES 3D TISKU

I když existuje mnoho různých metod 3D tisku, tak v nadcházející část je zaměřena na obecný proces od návrhu po finální část. Ačkoli každá metoda 3D tisku vyrábí součásti jiným způsobem, tak tyto 4 základních kroky jsou u všech metod stejné. [1]

3.1 Vytvoření 3D souboru

Prvním krokem v procesu 3D tisku je vytvoření digitálního modelu, jenž je často tvořen v programech Computer Aided Design (CAD). [1]

3.2 Tvorba STL souboru

Aby bylo možné vytisknout 3D součást z digitálního modelu CAD, může být model převeden do formátu StereoLithography (STL) označovaného také jako soubor standardního trojúhelníkového jazyka. Jakmile je soubor ve formátu STL, tak je importován do slicer (průřezového) programu, jenž rozdělí návrh na vrstvy, které budou použity k sestavení součásti. Slicer programy jsou často vlastnictvím dané značky tiskáren. Existují také univerzální programy jako Netfabb, Simplify3D nebo Slic3r. [1]

3.3 Tisk

Tisk součásti je prováděn každou z uvedených metod (SLA, SLS, FDM) odlišně. Podrobné vysvětlení toho, jak tiskne každá z uvedených metod, nalezneme v kapitole 4 Metody tisku. [1]

3.4 Následné zpracování

Kroky pro následné zpracování (tzv. post-processing) se liší podle využité metody tisku. Některé metody vyžadují po 3D tisku vytvrzení UV zářením, jiné vyžadují odstranění podpůrných konstrukcí nebo odstranění přilnutého výrobku z tiskové plochy. [1]

4 METODY TISKU

4.1 SLA - (stereolithography apparatus), stereolitografie

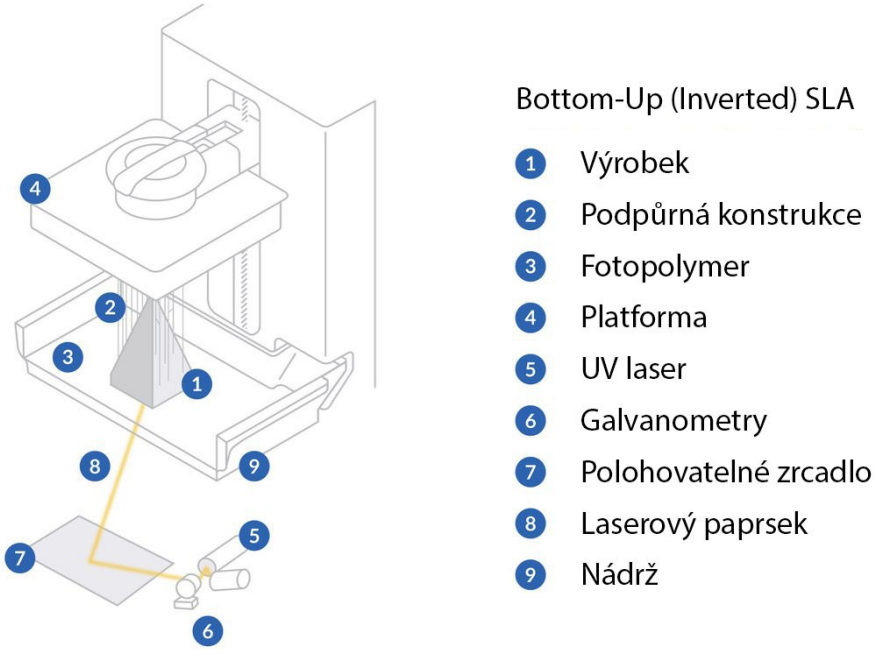
Stereolitografie patří do aditivních metod, které pro tisk využívají kapalný materiál. 3D tiskárny využívající tuto technologii netisknou vláknem/strunou, ale kapalnou pryskyřicí (fotopolymer). Pryskyřice tvrdne při vystavení světelného zdroje, laserového nebo ultrafialového paprsku, ten vysílá vlnové délky světla, jež spojí krátké molekulární řetězce, které polymerují do tuhých nebo pružných geometrií. Tato metoda je velice přesná, vytváří hladký povrch a díly tisknuté touto technologií jsou vodotěsné. Pokud požadujete tyto parametry, tak je pro vás tato technologie nejlepší volbou.

SLA je proslulá tím, že je první technologií 3D tisku. Tuto technologii si nechal patentovat v roce 1986 Charles W. Hull, který na základě svého patentu založil společnost 3D systems. [10;11;12]

Tiskárny SLA se dělí podle umístění světelného zdroje do dvou typů, a to Bottom-Up SLA printer (zdola nahoru), Top-Down SLA printer (shora dolů).

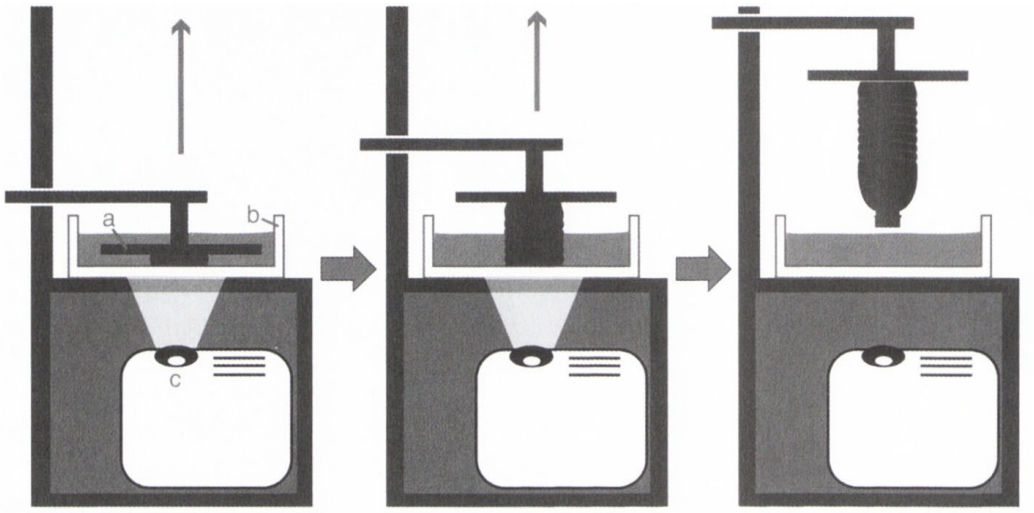
4.1.1 Tiskárny zdola nahoru (Bottom-Up)

Světelný zdroj se zde nachází pod nádrží s pryskyřicí, tudíž se jedná o typ zdola nahoru a tisk probíhá vzhůru nohama. Nádrž, ve které se nachází pryskyřice, jakož to fotopolymer, má průhledné dno, aby mohlo procházet v tomto případě ultrafialové světlo. (Obr. 3) [10;13]



Obr. 3 – Metoda Bottom-Up [12]

Po vytištění vrstvy platforma vyjíždí nahoru, aby došlo k oddělení vytvrzené pryskyřice ze dna nádoby. Způsob Bottom-Up se využívá převážně u stolních SLA tiskáren, které jsou vhodné pro komerční využití. Jejich výroba je jednodušší a levnější. (Obr. 4) [10;13]



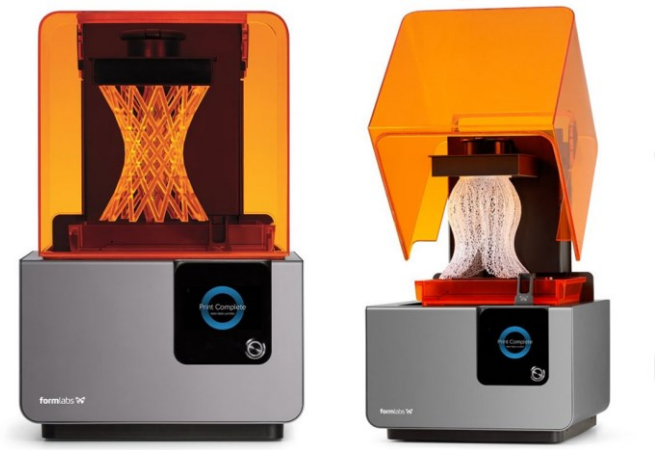
Obr. 4 – Proces tisku SLA [11]

Platforma (a) je na začátku ponořena do vany s kapalnou pryskyřicí (b). Skrz průhledné dno vany prochází laserový nebo UV paprsek (c), který pryskyřici vytvrdí do pevného skupenství

Po vytvrzení každé vrstvy pryskyřice se platforma pomalu zvedá nahoru a odloupne nově vytvrzenou vrstvu od dna vany s pryskyřicí. Platforma pak znovu poklesne do vany, kde dojde k vytvrzení další vrstvy.

Postupně se formuje celý 3D výtisk, který vystupuje z vany s kapalnou pryskyřicí. Po vyjmutí výtisku je nutné omýt přebytečnou pryskyřicí pomocí isopropylalkoholu a následně výtisk vystavit UV záření, aby byl proces vytvrzení dokončen. [11]

Na obrázku 5 je vidět stolní tiskárna od značky Formlabs typ Form 2 s cenou okolo 60 000 Kč a rozměrech 350 × 330 × 520 mm, která nabízí maximální velikost tisku 145 × 145 × 175 mm. [14]

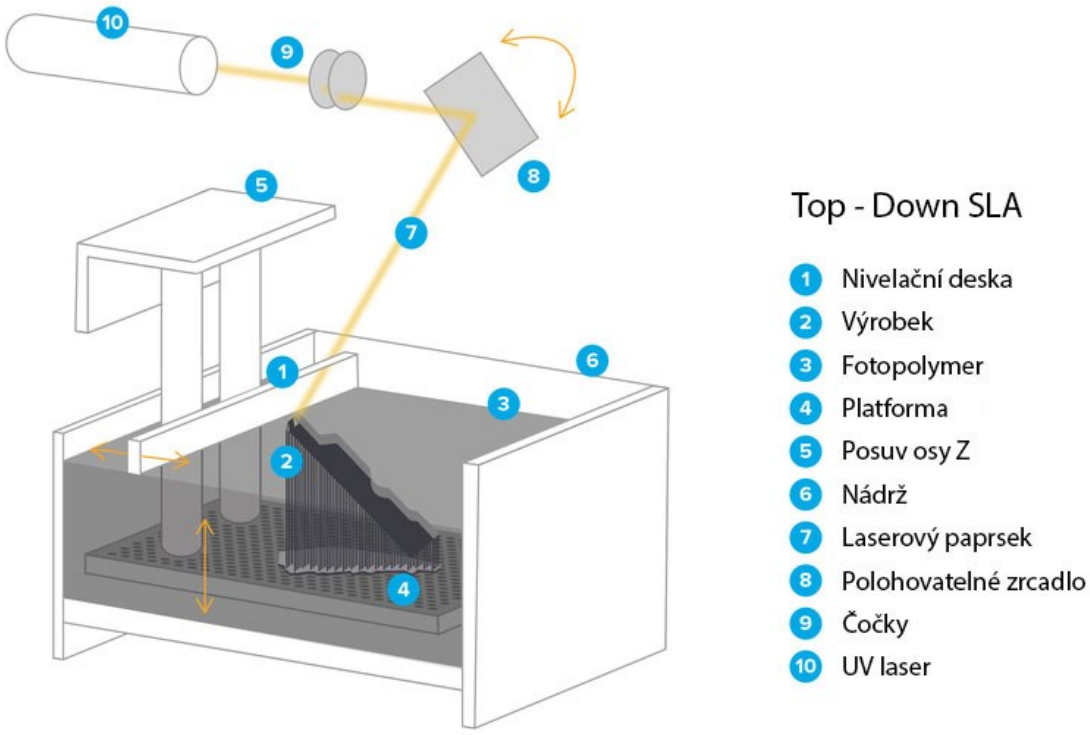


Obr. 5 – Tiskárna Formlabs Form 2 [14]

Mezi výhody tiskárny patří nižší náklady a široká dostupnost, nevýhodou je velikost tiskáren a menší rozsah používaného materiálu.

4.1.2 Tiskárna shora dolů (Top-Down)

U tohoto typu SLA se zdroj světla nachází nad nádrží s pryskyřicí. Platforma začíná těsně pod hladinou fotopolymeru a pohybuje se postupně dolů, jak tisk pokračuje. Tiskárny se používají pro velkoplošný a průmyslový tisk. Proces tisku probíhá stejně jak u metody Bottom-Up s tím rozdílem, že se tiskne shora dolů. Při prvotní investici se jedná o dražší stroj než u metody Bottom-Up



Obr. 6 – Metoda SLA Top – Down [14]

Zde je příklad tiskárny od značky Kings typu 800 PRO s cenou okolo 2 500 000 Kč, o rozměrech 1400 × 1490 × 2470 mm, která nabízí maximální velikost tisku 800 × 800 × 500 mm a hmotnost 1900 kg. Jedná se o střední model z nabízených produktů Kings. [15]

Obr. 7 – Tiskárna SLA Kings [15]

Mezi výhody tiskárny patří velká tisková plocha a rychlejší doba tisku, nevýhodou je pořizovací cena a vyšší náklady.

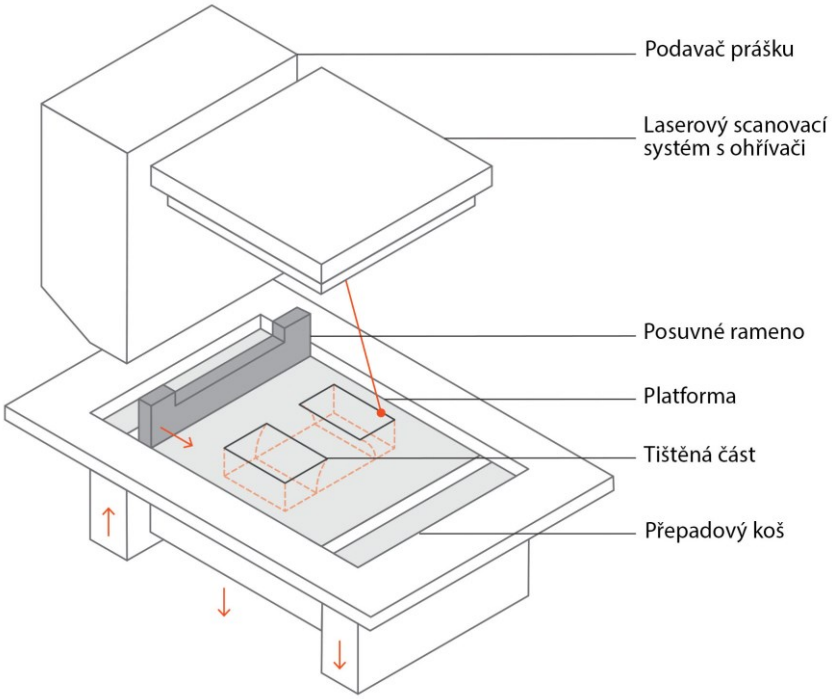
4.2 SLS (Selective Laser Sintering)

Technologie SLS, v překladu selektivní laserové slinování, patří do aditivních metod, které pro tisk využívají práškový materiál. Tato metoda uplatňuje tepelný zdroj laseru k vyvolání fúze mezi prachovými částicemi v konkrétním místě stavby. Proces SLS začíná zahřátím nádoby s polymerovým práškem na teplotu těsně pod bodem tání polymeru. Čepel (recoating blade) nasype tenkou vrstvu práškového materiálu (obvykle 0,1 mm) na platformu pro stavbu. Laserový paprsek poté začne skenovat plochu. Laser selektivně slinuje prášek a průřez dílu se stává tuhým. Po dokončení celého průřezu se plošina vysune o jednu tloušťku dolů. Tento proces se opakuje, dokud není díl vyroben.

Prášek, který nebyl slinován, zůstává na místě, aby tvořil podporu vrstvám, to eliminuje potřebu tvořit podpory pro nestabilní části výrobku. To je jedna z hlavních výhod SLS.

Výsledkem je nádoba naplněná práškem, ve které se nachází tisknutý produkt.

Po dokončení procesu a vychlazení nádoby je pevný výrobek oddělen od prášku stlačeným vzduchem a tryskajícím médiem. Prášek, který nebyl slinován, se znovu použije k tisku. (Obr. 8) [1]



Obr. 8 – Metoda SLS [1]

Zde je uvedena tiskárna od značky EOS typu Formiga P 110 Velocis s cenou okolo 3 900 000 Kč a rozměrech 1320 × 1067 × 2204 mm, která nabízí maximální velikost tisku 200 × 250 × 300 mm a různou tloušťkou vrstvy 0,06/0,1/0,12 mm v závislosti na použitých materiálech. (Obr. 9) [1]

Obr. 9 – SLS tiskárna [1]

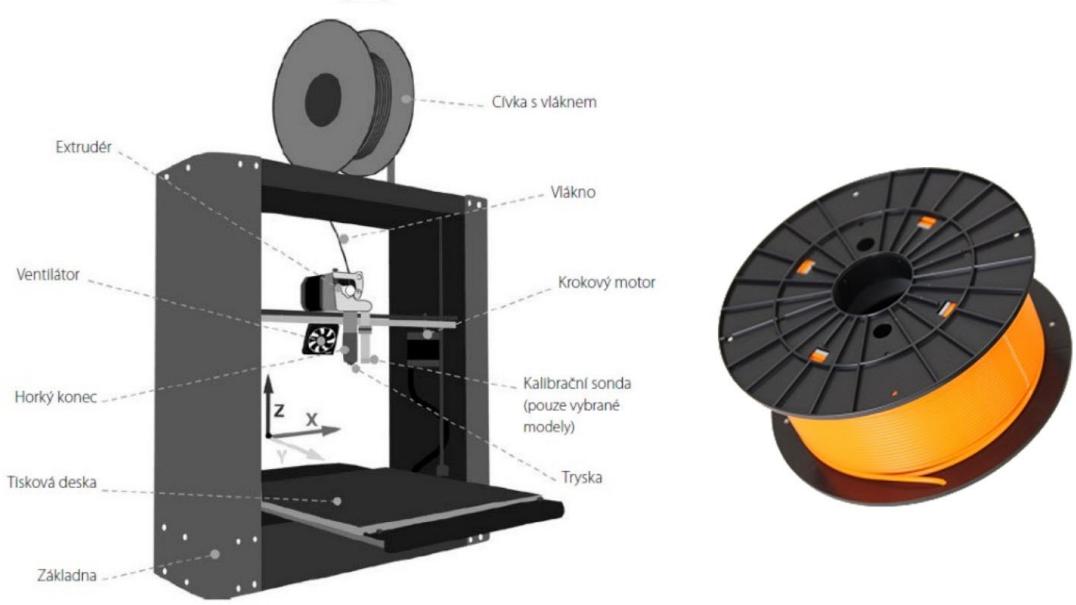
Další ukázkou je menší SLS tiskárna od firmy Formlabs, která tiskne z Polyamidu 12. Rozměry této SLS tiskárny jsou 685 × 645 × 1065 mm, tisková plocha činí 165 × 165 × 300 mm, hmotnost je 114 kg. Cena je vyčíslena na cca 408 000 Kč. Tiskárna umí docílit stejných výsledků jako jsou její dražší a mohutnější konkurenti. (Obr. 10) [14]

Obr. 10 – Tiskárna Formlabs Fuse 1 [14]

4.3 FDM (Fused deposition modeling)

Tiskárny typu FDM nebo také FFF (jedná se o stejný typ) patří do aditivních metod využívajících tuhý materiál. Tento typ používá strunu k modelování depozicí taveniny. Jedná se o nejběžnější technologii vytlačování materiálu. (Obr. 11)

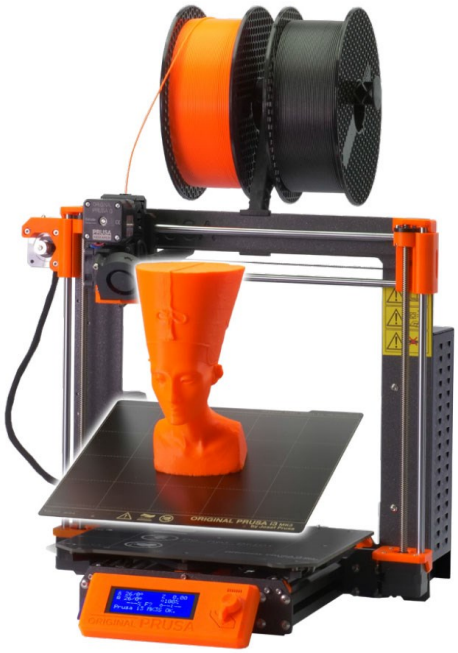
Cívka filamentu je uložena většinou nad tiskárnou a filament je odmotáván do vytlačovací hlavy neboli extrudéru. Jakmile tryska tiskárny dosáhne požadované teploty, tak krokový motor začne pohánět vlákno přes vyhřívanou trysku, která vlákno taví. Vytlačovací hlava se přesune na konkrétní místo a nanese vrstvu daného materiálu na tiskovou desku, kde se materiál ochladí a ztuhne. Existují dva typy tiskáren, a to jsou kartézské a delta tiskárny. [11]



Obr. 11 – FDM tiskárna, struna namotaná na cívku [11]

4.3.1 Kartézské tiskárny

Kartézské tiskárny pracují ve třech osách, a to X, Y, Z. Osa X zajišťuje pohyb doleva a doprava, osa Y umožňuje pohyb dopředu a dozadu a osa Z směřuje nahoru a dolů. V rovině XY se vytvoří první vrstva polymeru, která přilne k tiskové desce. Poté se vytlačovací hlava posune v ose Z o malou část (v řádu mikrometrů) a nanese další vrstvu. (Obr. 12) [11]



Obr. 12 – Kartézská tiskárna [11]

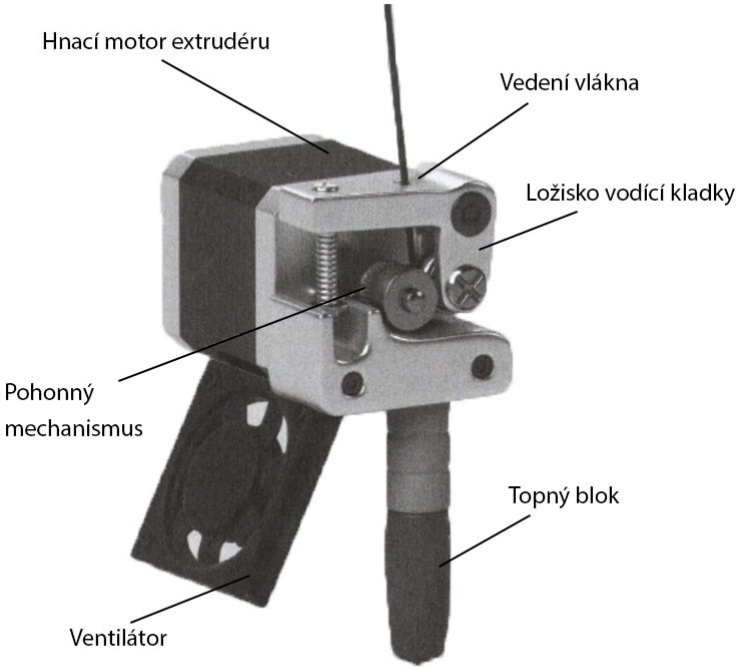
4.3.2 Delta tiskárny

Delta tiskárny pohybují zavěšeným extrudérem pomocí tří ramen připojených k lineárním kolejnicím. Trojice ramen tzv. zvednou a umístí (pick and place) vytlačovací hlavu na požadované místo. Výhodou delta tiskáren je to, že nemají vodící šroub, tudíž je umožněn vyšší a přesnější tisk. Delta tiskárny tisknou na kruhovou tiskovou desku, a tak mají menší vzdálenost v osách XY oproti kartézským tiskárnám. (Obr. 13) [11, 16]

Obr. 13 – Delta tiskárna [11]

4.3.3 Popis vytlačovací hlavy

Vytlačovací hlava neboli extrudér (Obr. 14) je název pro zařízení v FDM/FFF tiskárně, které slouží k vedení struny/vlákna, zahřátí vlákna na teplotu tání a nanesení materiálu na tiskovou plochu pomocí trysky. [11]



Obr. 14 – Extrudér tiskárny FDM/FFF [11]

Vytlačovací hlava může být rozdělena na studenou a horkou část. Studená část extrudéru se nachází v jeho horní polovině, kde není žádné vytápění. Nachází se zde část s motorem, převodem a trakčními koly, které táhnou tiskovou strunu do horké části. Vzhled obecného rozvržení a poloha studeného konce na 3D tiskárně udává to, zda se jedná o přímou vytlačovací hlavu 3D tiskárny nebo vytlačovací hlavu s pohonem Bowden. Vnitřkem sestavy, známé jako horká část, prochází struna do vyhřívané komory, kde přechází z pevného stádia na taveninu. V systému se nachází topná kazeta, která se zahřívá a přenáší teplo do trysky přes topný blok ohřívače. [16]

4.3.4 Studená část

Ve studené části se nachází pohonný mechanismus, jenž se skládá z krokového motoru, který pohání jedno nebo více trakčních (hnacích) kol. Tato kola přilnou ke strunně a točivý moment kol je převeden na sílu, která posouvá strunu směrem k horké části. Pohonný mechanismus je rozdělen podle počtu trakčních kol, a to na jednokolý, dvoukolý nebo v poslední řadě na čtyřkolý pohon. Smyslem více trakčních kol je zvýšit kontakt se strunou, čímž se zlepší uchopení a sníží se prokluz mezi trakčními koly a taženou strunou. [16]

4.3.5 Horká část

V horké části dochází ke změně skupenství, a to z tuhé struny na taveninu. V horní části je aktivní chladič s ventilátorem. Tato část zabraňuje únikům tepla do studeného konce dříve, než je struna vystavena v horké části teplotě tání. Ve spodní tzv. heat break se nachází topná komora s topnou kazetou, teploměrem a tryskou. Pod elektrickým proudem se topná kazeta zahřeje na danou teplotu pro konkrétní materiál a přenese teplo do trysky přes topný blok ohřívače, ve kterém jsou zmíněné části uzavřeny. V topném bloku se také nachází teploměr, který převádí teplotu bloku na desku s displejem 3D tiskárny, což umožnuje správné nastavení teploty pro daný materiál. [16]

5 MATERIÁLY PRO 3D TISK METODOU FDM

Materiály neboli struny na namotaných cívkách se pro 3D tisk vyrábí z polymerů. Jsou to chemické látky různých vlastností a rozměrů. Dělí se na elastomery a plasty, mezi plasty spadají termoplasty a reaktoplasty. Polymery obsahují ve svých molekulách často atomy uhlíku, kyslíku, vodíku, ale i chlóru a dalších prvků. Polymery jsou ve výrobku v tuhém stavu, ale při zpracování jsou ve stádiu kapalném, je možné je nadále tvarovat teplotou nebo tlakem, kde budoucí výrobek dostane požadovaný tvar a rozměr. [3]

5.1 PLA – Polylactic acid (kyselina polymléčná)

PLA je jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk. PLA je materiál vyrobený z kukuřičného škrobu nebo také z cukrové třtiny, proto se občas nazývá „zelený plast“. PLA materiál je tvrdší než následující ABS, je však ale křehčí. Materiál měkne už při 60 °C, a tak by při vyšší teplotě (například v létě v autě) mohlo dojít k deformaci. Teplota trysky při tisku se doporučuje nastavit na 210–215 °C a teplota podložky na 50–60 °C. PLA se nejvíce využívá pro tisk konceptů, prototypů, hraček apod. [4] (Obr. 15)

Obr. 15 – Lev z PLA [5]

5.2 ABS – Acrylonitrile butadiene styren

ABS je termoplast obsahující syntetickou příměs kaučuku, což zlepšuje jeho vlastnosti při nárazech a opotřebení. Má dobrou tepelnou odolnost díky vyšší teplotě tání než materiál PLA, tudíž výtisky by do 98 °C neměly vykazovat známky deformace. Teplota trysky při tisku se doporučuje nastavit na 240–255 °C a teplota podložky na 100–110 °C.

Nevýhodou tohoto materiálu je tepelná roztažnost při tisku, proto by s tímto jevem mělo být dopředu počítáno. Výrobky z ABS se dají dokonale vyhladit pomocí acetonových výparů (Obr. 16). [4;5]

Obr. 16 – Mnich z ABS [5]

5.3 PET/PETG – Polyenthylene tereftalate

Materiál PET kombinuje dobré vlastnosti PLA a ABS. Je pevný, stálý a má nízkou tepelnou roztažnost. Výrobky z tohoto materiálu odolají hravě teplotě vyšší než 100 °C. PETG je upravenou verzí PET. Písmeno G znamená glykol, který materiál modifikuje při výrobě, tím se stává méně křehkým a lépe uzpůsobeným pro 3D tisk. Teplota trysky při tisku se doporučuje nastavit na 230–240 °C a teplota podložky na 80–100 °C. [4;5]

5.4 PA6 – Polyamid (Nylon)

Nylon je velice houževnatý, flexibilní materiál, který je všestranný pro jakékoli použití. (Obr. 16) Výrobky odolávají vyšším teplotám (nad 100 °C), proto se materiál nejčastěji používá pro tisk mechanických součástek. (Obr. 17) Nylon je hygroskopickým materiálem, to znamená, že absorbuje vodu ze vzduchu. Pokud by se před tiskem neskladoval ve vysušených a odvlhčených prostorách, tak by docházelo k nerovnoměrnému tisku a chybám. Teplota trysky při tisku se doporučuje nastavit na 250–270 °C a teplota podložky na 80-90 °C. [4;5]

Obr. 17 – Ozubené kolo z PA6 [6]

5.5 ASA – Acrylonitrile styren acrylate

ASA je svými vlastnostmi podobná ABS. Oproti ABS má ASA zvýšenou odolnost proti vyšším teplotám a UV záření. Stejně tak jako již zmíněný materiál ABS lze ASA vyhladit, použít lze příměsi obsahující aceton. Teplota trysky při tisku se doporučuje nastavit na 260–265 °C a teplota podložky na 100–110 °C. [5] Materiál se nejčastěji používá pro venkovní účely. (Obr. 18)

Obr. 18 – Držák na kolo z ASA [5]

5.6 HIPS – High impact polystarene

HIPS je velmi tvrdým a houževnatým materiálem s dobrou tepelnou stálostí. Používá se u tiskáren FDM, které mají dvě tiskové hlavy. Jedna hlava tiskne podpůrné konstrukce z HIPS a druhá hlava tiskne výrobek např. z ABS nebo naopak. HIPS lze následně rozpustit lemonesolem. Podpůrná konstrukce z HIPS za použití lemonesolu změkne a lze ji snadno odstranit. (Obr. 19) Teplota trysky při tisku se doporučuje nastavit na 210–220 °C a teplota podložky na 100–110 °C. [7]

Obr. 19 – Podpůrná konstrukce z HIPS [8]

5.7 PP – Polypropylen

PP je flexibilním a odolným materiálem. Má dobrou pružnost, houževnatost a je rezistentní vůči řadě chemikálií. PP se především používá jako obalový materiál pro potravinářský a textilní průmysl. (Obr. 20) Teplota trysky při tisku se doporučuje nastavit na 220–240 °C a teplota podložky na 95–100 °C.

Obr. 20 – Lahvička s víčkem z PP [9]

5.8 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály se skládají ze dvou nebo více substancí. Obsahují z velké části hlavní plastovou složku a sekundární složku ve formě přidaného prachu a vláken, což mohou být příměsi dřeva-woodfill, mědi-copperfill, bronzu-bronzefill, ale také karbonu a dalších. Jsou to materiály s velkou abrazí, a proto je doporučeno při FDM tisku použít tvrzené trysky. Teplota trysky při tisku se doporučuje nastavit na 200–265 °C a teplota podložky na 75–100 °C.

Obr. 21 – Mnich z materiálu s příměsí bronzu [5]

6 VÝROBA TISKOVÉ STRUNY

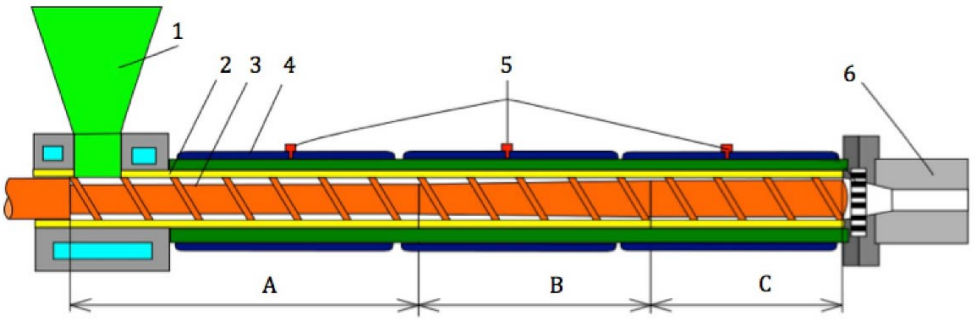
Tisková struna se vyrábí technologií vytlačování. Je to proces, při kterém stroj přeměňuje plastové pelety (granule) na tiskovou strunu. Tento sériový proces vytlačování tiskové struny používají velkoplošné vytlačovací stroje. V tomto desetiletí se zvýšila poptávka po menších tzv. stolních vytlačovacích zařízení, a tak vznikly i stolní stroje. (Obr. 22) [17]

Obr. 22 – Vytlačovací linka (vlevo) a vytlačovací stroj (vpravo) [17, 18]

6.1 Vytlačovací zařízení

Vytlačovací zařízení je součástí vytlačovacích strojů, je složeno z pevného rámu nazývaného fréma, ve kterém je uložen pohonný elektromotor s nastavitelným počtem otáček a převodovka na pracovní šnek, pomocí kterého je granulát taven a posouván do vytlačovací hlavy. Otáčející šnek se nachází v ocelovém válci, který je nazýván plastikační komorou (Obr. 23).

Plastikační komora se dělí do tří pásem, a to vstupní, přechodové a výstupní. Na vstupním pásmu se nachází násypka, pomocí které je přiváděn materiál do komory. Každé pásmo obsahuje samostatné topení s teplotní regulací. K výstupnímu pásmu zpracovávaný granulát posouvá pracovní šnek. Materiál je taven za pomoci disipace a topných pásů. Tavený materiál se v komoře promíchává, homogenizuje a převádí do plastického stavu. Z výstupního pásma je tavenina dopravována do vytlačovací hlavy, jež udává tvar vytlačované taveniny. [19,20]



Obr. 23 – Vytlačovací stroj [21]

A – vstupní zóna, B – přechodová zóna, C – výstupní zóna, 1 – násypka, 2 – válec, 3 – šnek, 4 – elektrické topení, 5 – termočlánky měřící teplotu, 6 – tvarovací hlava

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cíle k vypracování BP práce na téma Vliv procesních parametrů na kvalitu vytlačené tiskové struny byly stanoveny takto:

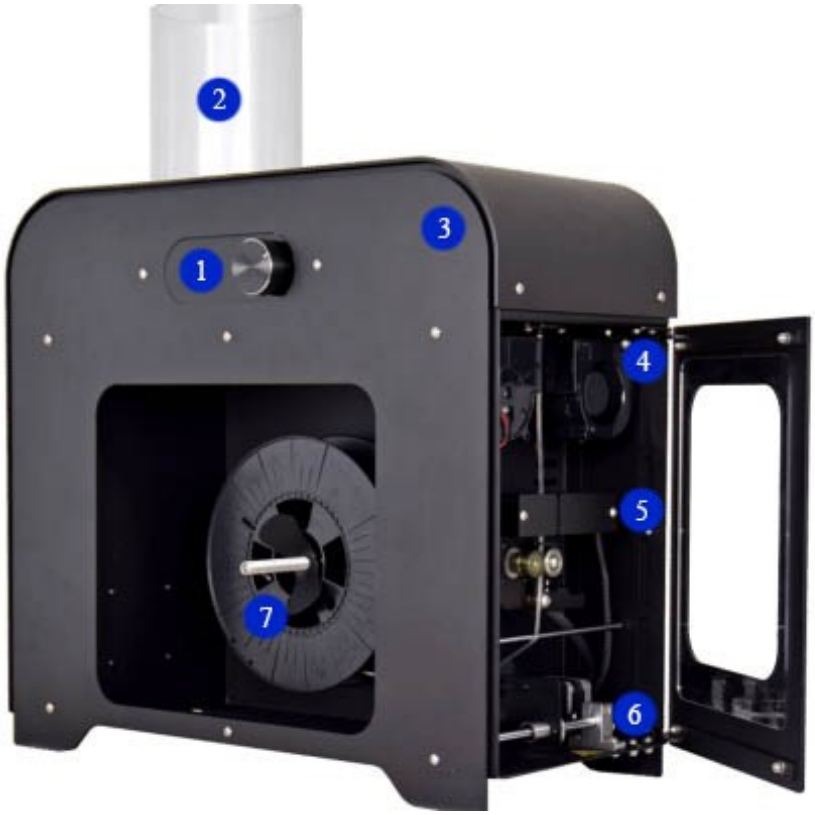
- Vyrobit tiskové struny
- Vyzkoušet struny při tisku
- Vyhodnotit kvalitu strun

Účelem praktické části je vyrobit tiskovou strunu s různými parametry a tu následně vyzkoušet při tisku a vyhodnotit kvalitu strun. V praktické části jsou využity znalosti a poznatky uvedené v teoretické části.

8 VÝROBA TISKOVÉ STRUNY

8.1 Stolní výrobní stroj

Pro výrobu tiskové struny byl zvolen stroj od značky 3devo, což je kompletní malá výrobní linka tiskové struny (Obr. 24). Stroj je prodáván ve více variantách, které se pohybují od 120 000–160 000 Kč. Zde je uvedena nejdražší varianta Composer 450, kde se nachází pracovní šroub na míchání materiálů, jenž zaručí lepší výsledky míchání zpracovávaných materiálů a přidaných přísad. Stroj je díky svým rozměrům 650 x 370 x 650 mm velmi skladný. [17]



Obr. 24 – Vytlačovací stroj [17]

1 – Ovládací panel, 2 – násypka, 3 – extrudér, 4 – chlazení, 5 – snímač průměru, 6 – polohovač struny, 7 – navíječ cívky

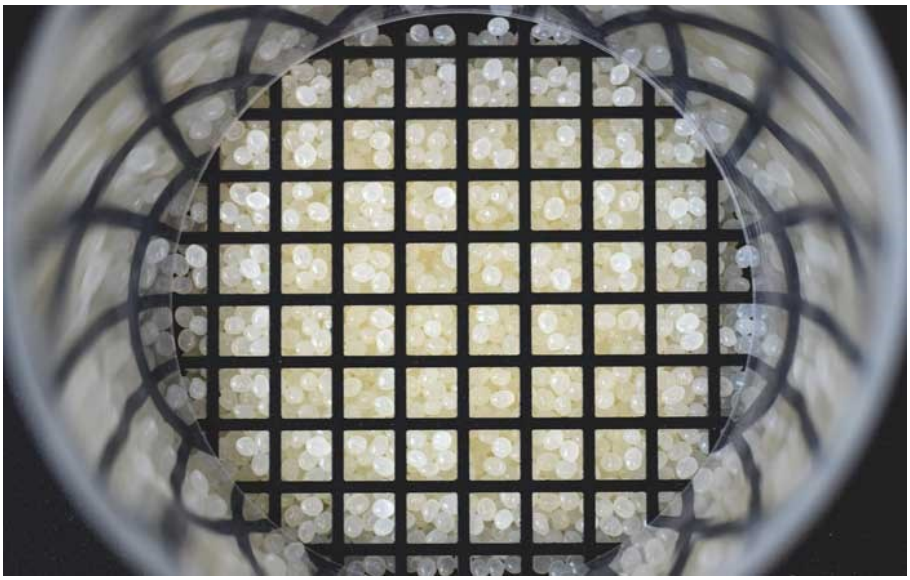
8.1.1 Ovládací panel

Ovládací panel obsahuje snadno přístupné nastavení a standardní přednastavení materiálu. Stroj obsahuje jednoduché připojení přes USB k počítači/notebooku. (Obr. 25) [17]

Obr. 25 – Ovládací panel [17]

8.1.2 Násypka

Násypka je složena z odnímatelné průhledné trubky a optického senzoru pro kontrolu hladiny materiálu. (Obr. 26) [17]



Obr. 26 – Násypka [17]

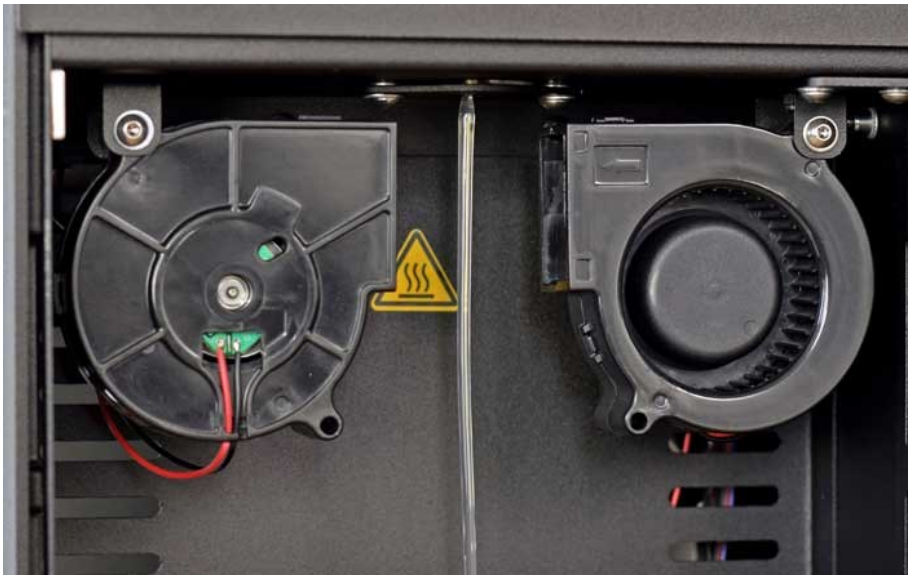
8.1.3 Vytlačovací hlava

Vytlačovací hlava obsahuje 4 topné zóny, které se směrem od násypky označují H4, H3, H2, H1, tyto zóny dosahující teplot až 450 °C. K vytlačování je používán kalený ocelový šnek (šroub), který je nitridově vytvrzený pro průmyslové vytlačování struny. (Obr. 27) [17]

Obr. 27 – Ocelový šnek [17]

8.1.4 Chladící systém

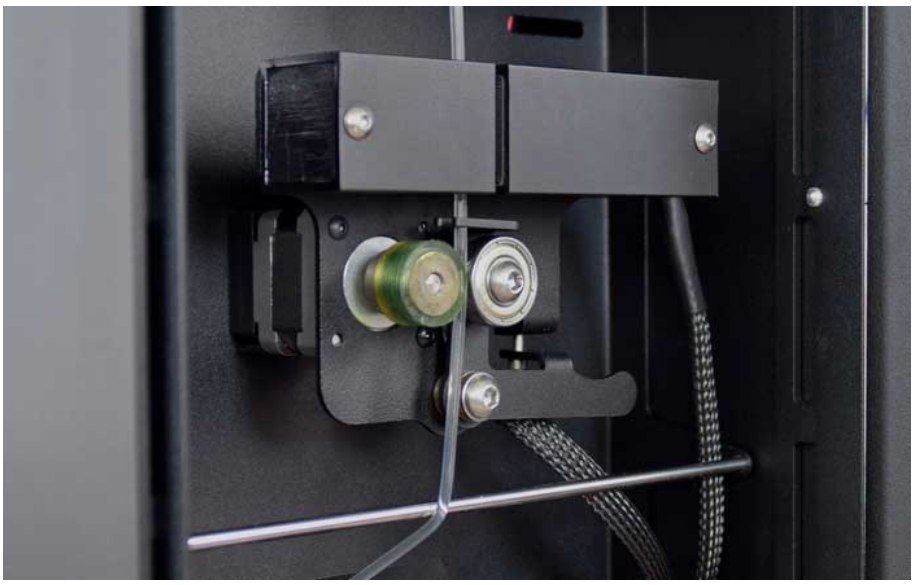
Chladící systém obsahuje dva ventilátory pro rovnoměrné rozložení vzduchu, které se dají polohovat. Rychlost ventilátoru lze regulovat. (Obr. 28)



Obr. 28 – Chladící systém [17]

8.1.5 Snímač průměru

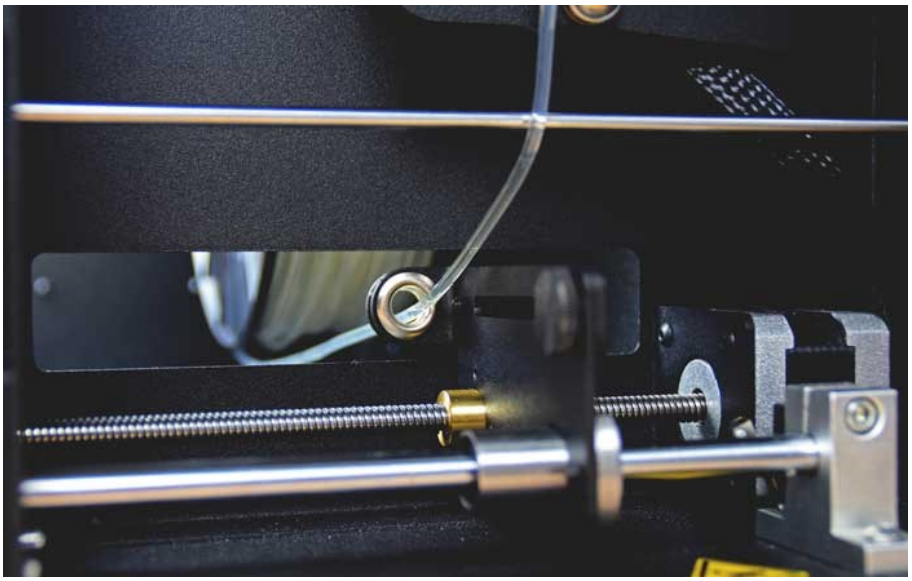
Snímač průměru obsahuje optický senzor, jenž je určen pro měření průměru 0,5 mm až 3,0 mm. Jeho přesnost je 43 mikronů. Pod ním se nachází odtahový systém, který se automaticky nastavuje pro přesné řízení průměru. (Obr. 29) [17]



Obr. 29 – Snímač průměru [17]

8.1.6 Polohovač struny

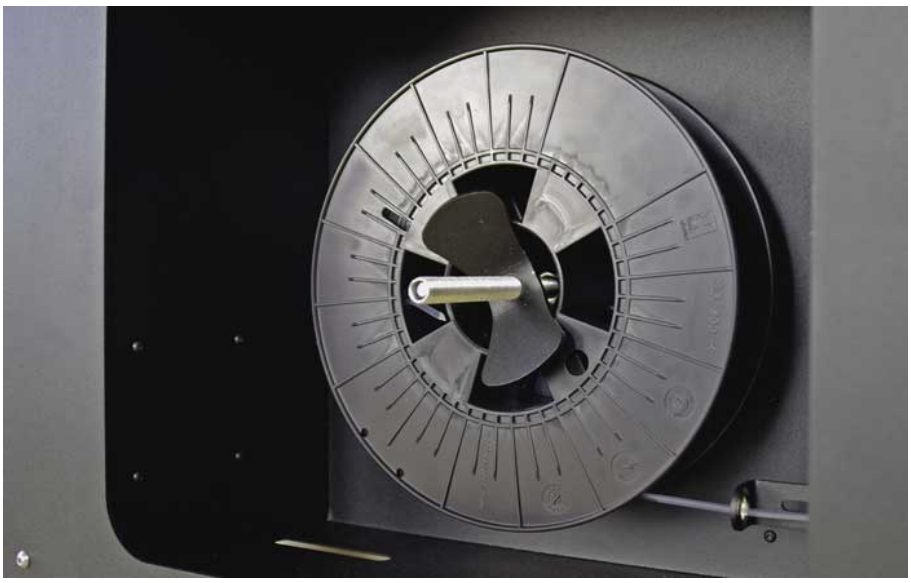
Polohovač struny automaticky zařazuje strunu na cívku, jejíž rozměr byl předem nastaven na vytlačovacím stroji podle parametrů používané cívky tak, aby docházelo k úhlednému rovnoměrnému vinutí. Maximální šířka cívky je 120 mm. (Obr. 30) [17]



Obr. 30 – Polohovač struny [17]

8.1.7 Navíječ cívky

Navíječ cívky nastavuje napětí, při kterém se bude vytlačená struna navíjet. Maximální průměr cívky je 240 mm. Pomocí vyměnitelného držáku lze rychle provést výměnu cívek. (Obr. 31) [17]



Obr. 31 – Navíječ cívky [17]

8.2 Proces výroby

Jako první byly stanoveny materiály pro vytlačování, a to ve formě granulí. V Tab. 1 jsou uváděny názvy použitých materiálů a také výsledky výroby. Jako úspěšná výroba byla označena ta, při které se podařilo vytlačit alespoň jednu strunu z daného materiálu a zvolených parametrů.

Tab. 1 – Materiály s úspěšností výroby

Testy	Materiály	Úspěšnost výroby
1	ABS Starex HF – 0660IW	✓
2	ABS Magnum – 3504	✓
3	PLA 4043D	✓
4	HIPS 662E	✓
5	PC + ABS PULSE 920MG	✓
6	PA11 P40 TL	✓
7	PC Apec 2097	×
8	PA6 Novamid B30P	×

Používaný materiál byl předem vysušen a měl požadovanou gramáž. (Obr. 32)

U stroje byla nastavena požadovaná teplota pro vytlačování daného materiálu, otáčky šneku, chlazení ventilátorů a průměr vytlačení. Byla zvolena tryska o průměru 3,6 mm.

Do násypky byla nasypána stanovená navážka. (Obr. 26) V daný moment, kdy se 4 teplotní zóny vyhřály na požadovanou teplotu, se spustil pracovní šnek s nastavenou rychlostí. (Obr. 27)

Vytlačovaný materiál byl protažen přes optický senzor a uchycen do odtahového systému. Následovala prodleva, kdy se odtah automaticky reguloval, aby dosáhl stanoveného průměru vytlačeného materiálu. (Obr. 29)

Po kalibraci odtahu byl protažen vytlačený materiál přes polohovač a struna byla uchycena na přichystanou cívku uloženou v navíjecím systému. (Obr. 30) Byl spuštěn navíječ, jenž kvůli vypnutí struny zprvu zrychlil a po následném dostatečném vypnutí struny se zpomalil a běžel rovnoměrně s odtahem. (Obr. 31)

Obr. 32 – Sušárna

8.3 Použité materiály a zvolené parametry

8.3.1 ABS – Starex HF – 0660IW

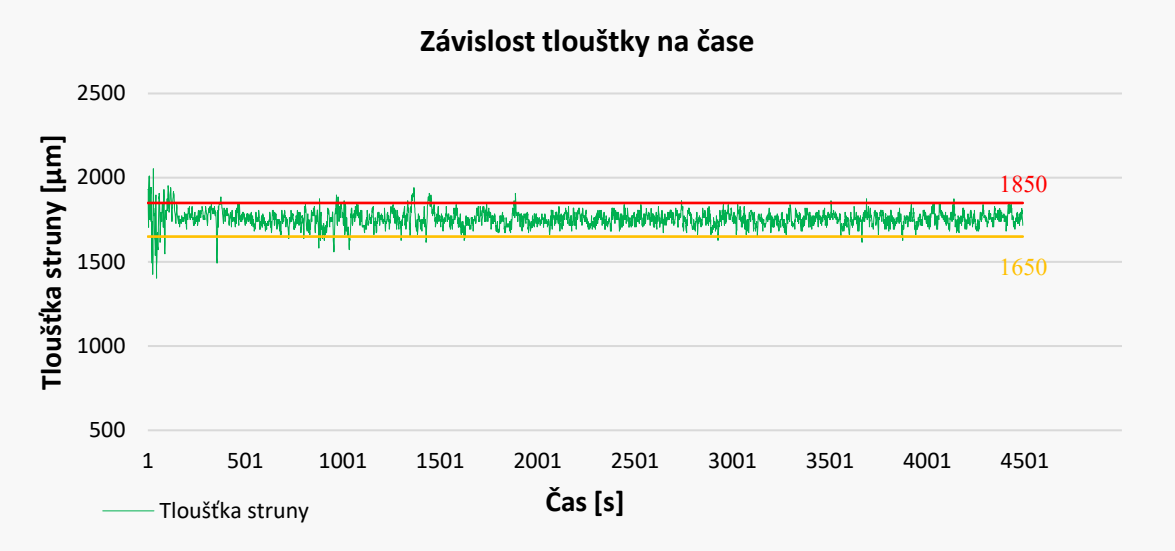
První vytlačená struna byla zvolena z granulátu ABS – Starex, který byl sušen 4 hodiny při teplotě 80 °C v sušičce od firmy Binder. Navážka tvořila 300 g materiálu. Průměr byl nastaven na 1,75 mm, rychlost otáčejícího šneku na 4 rpm. Tavenina byla vytlačována přes trysku o průměru 3,6 mm. Po nastudování teplot vstřikování došlo v TESTU 1 k nastavení následující teploty čtyř vyhřívaných zón. (Tab. 2)

Tab. 2 – TEST 1, parametry A

TEST 1 - materiál ABS Starex			
A			
H4	230 °C	H2	220 °C
H3	220 °C	H1	210 °C

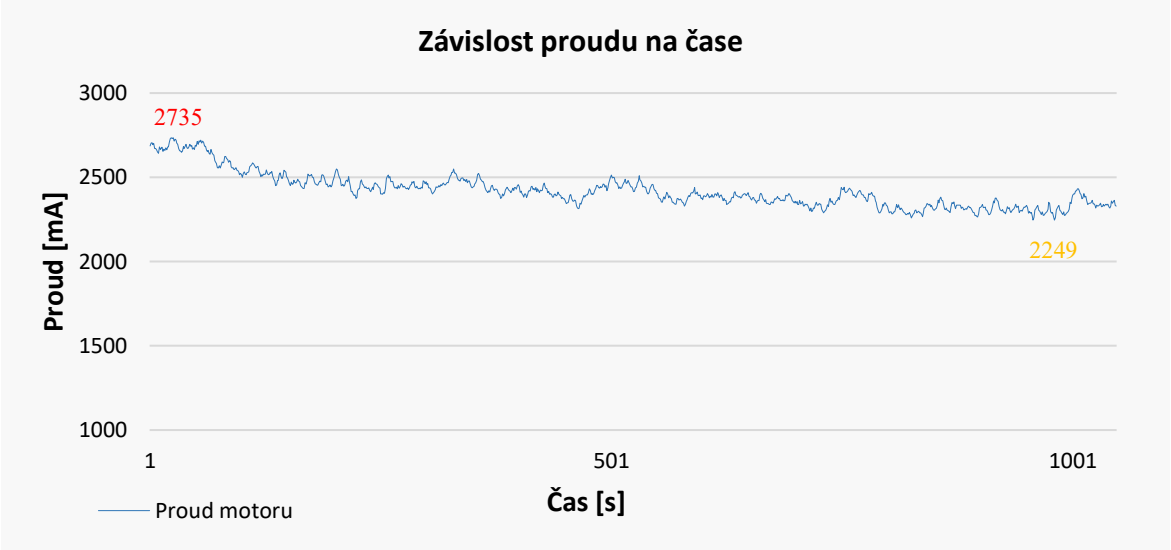
U použitého materiálu bylo potřeba zjistit správnou rychlost chlazení, poněvadž se vytlačovaná struna začala kroutit a rozptyl nastaveného průměru byl vysoký. Při snížení rychlosti chlazení na 45 % se průměr zvětšoval a při rychlosti chlazení 75 % se průměr snižoval. Závěrem bylo zjištěno, že nastavený průměr vytlačené struny 1,75 mm je nejvíce stabilní při 50% rychlosti chlazení.

V grafu Závislost tloušťky na čase (Obr. 33) se na počátku (cca 500 s) zobrazuje stabilizování průměru, kdy byla zchlazená tavenina vložena do odtahového systému, který se automaticky začal regulovat a začal spolupracovat s navíječem. Tato část nebyla k tisku využita, protože došlo k velkému rozptylu hodnot. Zbývající část grafu zobrazuje již stabilizovaný nastavený průměr vytlačené struny.



Obr. 33 – Závislost tloušťky na čase

Stroj musel zprvu vynaložit více práce na stabilizování průměru a odtahu, a tak potřeboval více proudu. Tato změna je zobrazena na začátku grafu Závislost proudu na čase (Obr. 34), kde prvotní hodnoty byly okolo 2 700 mA, kdežto po regulaci došlo ke snížení proudu přibližně na 2 300 mA.



Obr. 34 – Závislost proudu na čase

Druhá struna byla zvolena ze stejného materiálu, tudíž z granulátu ABS – Starex, který byl opět sušen při teplotě 80 °C po dobu 4 hodin a navážka tvořila 300 g materiálu. Průměr vytlačování byl nastaven na 1,75 mm, rychlost otáčejícího šneku na 4 rpm, tavenina byla opět vytlačována přes trysku 3,6 mm. Chlazení bylo po zkoušení opět nastaveno na 55 % rychlosti chlazení a teploty 4 vyhřívaných zón byly zvoleny o 10 °C větší než u předchozí struny. (Tab. 3)

Tab. 3 – TEST 1, parametry B

TEST 1 - materiál ABS Starex			
B			
H4	240 °C	H2	230 °C
H3	230 °C	H1	220 °C

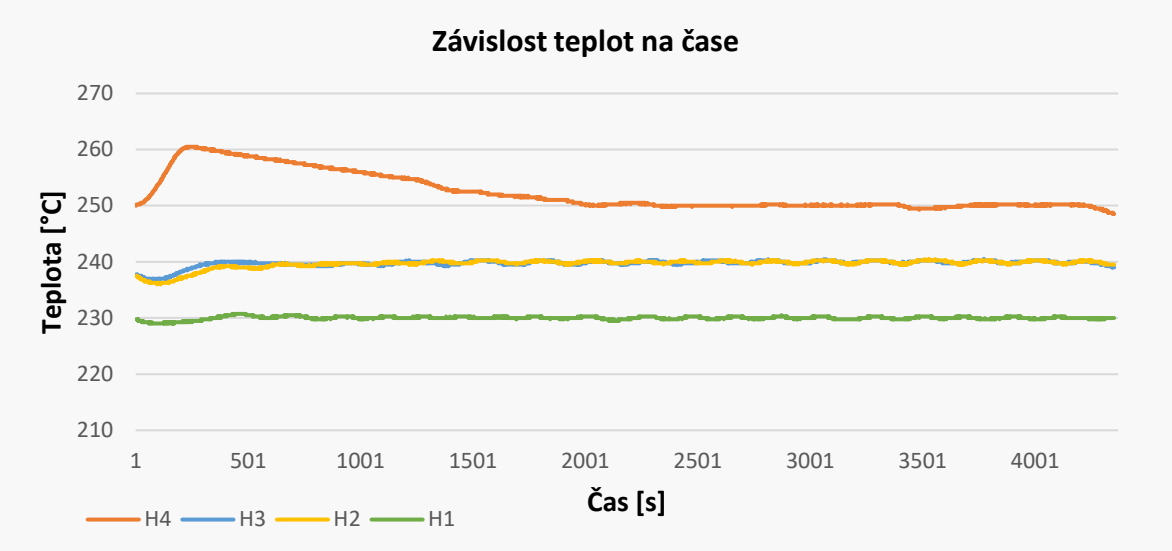
Vytlačování probíhalo pravidelně bez komplikací. Z granulátu byla vytlačena struna o délce 105 m.

Třetí vytlačená struna byla opět z granulátu ABS – Starex, který byl sušen při teplotě 80 °C po dobu 4 hodin a navážka činila 300 g materiálu. Na stroji byl nastaven průměr vytlačování 1,75 mm, rychlost otáčejícího šneku 4 rpm. Tavenina byla tlačena přes trysku s průměrem 3,6 mm, rychlost chlazení přizpůsobena na 55 % a teploty 4 vyhřívaných zón nastaveny o 10 °C vyšší než u druhé struny. (Tab. 4)

Tab. 4 – TEST 1, parametry C

TEST 1 - materiál ABS Starex			
C			
H4	250 °C	H2	240 °C
H3	240 °C	H1	230 °C

Při navýšení teplotních zón stroj prvně navýšil teplotu H4 a postupně ji snižoval, aby se dostal na zadanou teplotu 250 °C, což lze pozorovat v grafu Závislost teplot na čase. (Obr. 35) V ten moment, kdy se stroj ustálil na 250 °C (cca 2000 s), bylo spuštěno otáčení šneku a stroj opět začal vytlačovat tiskovou strunu.



Obr. 35 – Závislost teplot na čase

Po dokončení vytlačování ABS struny došlo k pročištění plastikační komory u stroje pomocí materiálu HDPE. Zkratka označuje polyethylen s vysokou hustotou (high-density polyethylene), známý také jako „mikroten“.

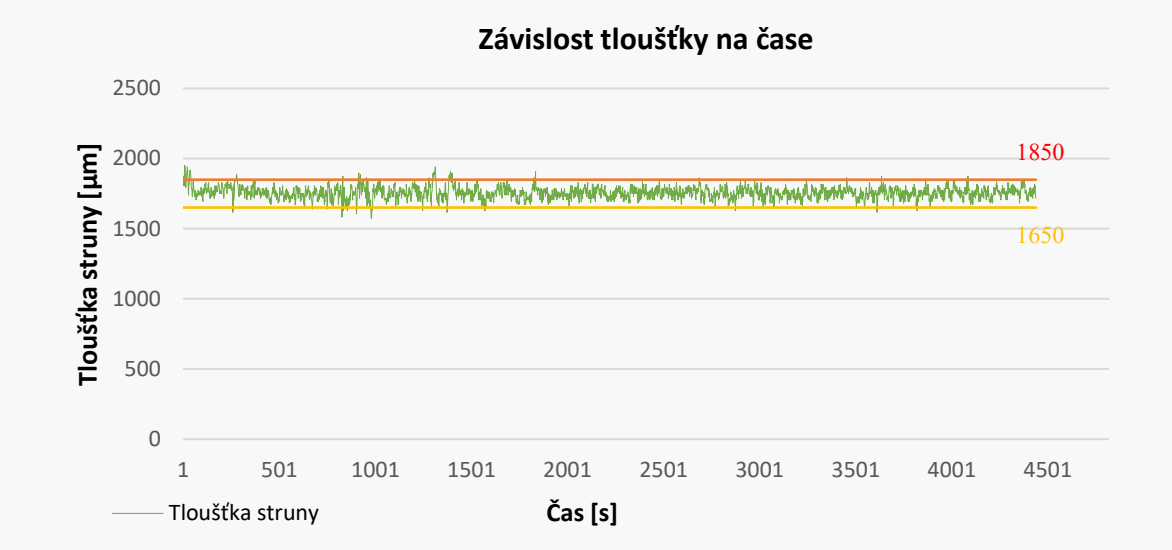
8.3.2 ABS – Magnum – 3504

První vytlačovaná struna z granulátu ABS – Magnum byla sušena 4 hodiny při teplotě 80 °C. Navážka tvořila 300 g materiálu, průměr vytlačování byl nastaven na 1,75 mm, rychlost otáčejícího šneku na 4 rpm, tavenina byla vytlačována přes trysku o průměru 3,6 mm. Průměr se ustálil při zvolení rychlosti chlazení 55 %. Teploty 4 vyhřívaných zón po nastudování teplot vstřikování byly nastaveny následovně. (Tab. 5)

Tab. 5 – TEST 2, parametry D

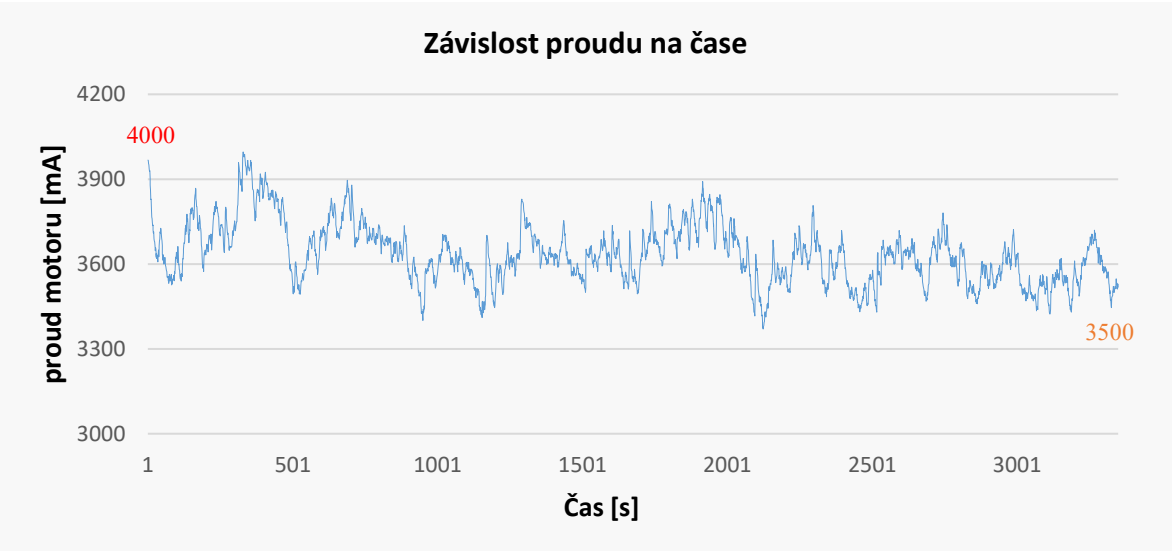
TEST 2 - materiál ABS Magnum			
D			
H4	220 °C	H2	230 °C
H3	230 °C	H1	240 °C

V grafu Závislost tloušťky na čase je vidět, že ke stabilizování průměru dochází přibližně po 300 s, kdy odtahový systém začne spolupracovat s navíječem. (Obr. 36)



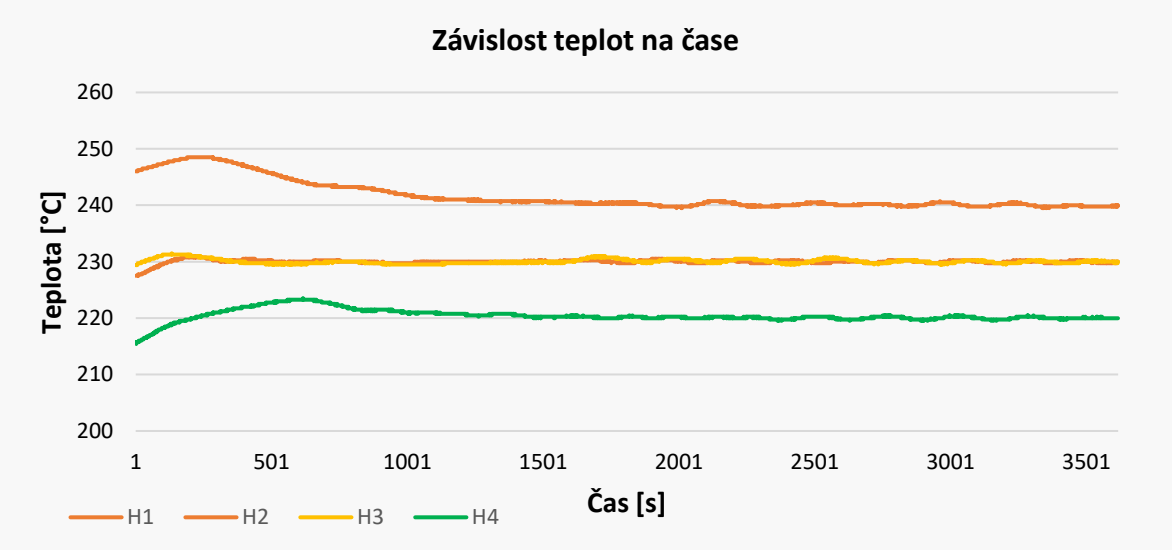
Obr. 36 – Závislost tloušťky na čase

Stroj musel zprvu vynaložit více práce na výhřev a stabilizování odtahu, a proto vyžadoval více proudu. Postupem času stroj potřeboval čím dál méně proudu, a to lze vidět v grafu Závislost proudu na čase. Prvotní hodnoty byly okolo 4000 mA a postupem klesaly až na 3500 mA. (Obr. 37)



Obr. 37 – Závislost proudu na čase

Při navýšení teplotních zón stroj prvně navýšil teploty a postupně je snižoval, aby se dostal na zadané hodnoty, což lze pozorovat v grafu Závislost teplot na čase. (Obr. 38) V ten moment, kdy se stroj ustálil na daných teplotách (cca 1000 s), bylo spuštěno otáčení šneku a stroj opět začal vytlačovat tiskovou strunu. (Obr. 38)



Obr. 38 – Závislost teplot na čase

Druhá struna byla zvolena ze stejného materiálu, tudíž z granulátu ABS – Magnum, který byl opět sušen při teplotě 80 °C po dobu 4 hodin, navážka tvořila 300 g materiálu, průměr vytlačování byl nastaven na 1,75 mm, rychlost otáčejícího šneku na 4 rpm, tavenina byla opět vytlačována přes trysku 3,6 mm. Rychlost chlazení byla po zkoušení zvolena na 55 %, teploty 4 vyhřívaných zón o 10 °C vyšší než u předchozí struny. (Tab. 6)

Tab. 6 – TEST 2, parametry E

TEST 2 - materiál ABS Magnum			
E			
H4	230 °C	H2	240 °C
H3	240 °C	H1	250 °C

Z granulátu byla vytlačena struna o délce 110 m.

Třetí struna z granulátu ABS – Magnum byla vytlačena za stejných podmínek jako struna druhá, pouze teploty 4 vyhřívaných zón byly nastaveny o 20 °C nižší než u předchozí struny. (Tab. 7)

Tab. 7 – TEST 2, parametry F

TEST 2 - materiál ABS Magnum			
F			
H4	210 °C	H2	220 °C
H3	220 °C	H1	230 °C

Vytlačení probíhalo pravidelně a bez viditelných problému. Materiál se nekroutil a povrch byl hladký bez známek hrudek. Po dokončení byla pročištěna plastikační komora u stroje pomocí již zmíněného materiálu HDPE.

8.3.3 PLA 4043D

První struna byla zvolena z granulátu PLA, který byl sušen 6 hodin při teplotě 50 °C v sušičce. Navážka tvořila 300 g materiálu, skládala se z 291 g průhledného PLA a 9 g červeného PLA pro obarvení struny barvou. Průměr vytlačování byl nastaven na 1,75 mm, rychlost otáčejícího šneku na 4 rpm. Tavenina byla vytlačována přes trysku o průměru 3,6 mm.

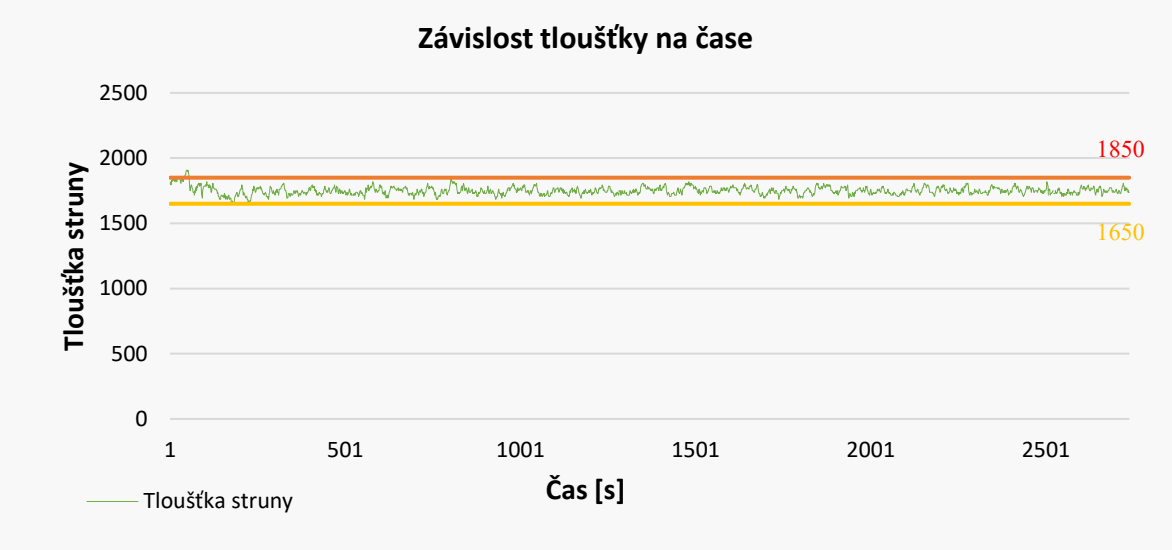
Po nastudování teplot vstřikování byly nastaveny v TESTU 3 následující teploty 4 vyhřívaných zón. (Tab. 8)

Tab. 8 – TEST 3, parametry G

TEST 3 - materiál PLA			
G			
H4	180 °C	H2	200 °C
H3	195 °C	H1	180 °C

Závěrem bylo zjištěno, že nastavený průměr vytlačené struny 1,75 mm je nejvíce stabilní při 80% rychlosti chlazení.

V grafu Závislost tloušťky na čase (Obr. 39) je zobrazeno stabilizování průměru (cca 250 s) a pozorován nejmenší rozptyl hodnot od nastaveného průměru 1,75 mm.



Obr. 39 – Závislost tloušťky na čase

Druhá struna z granulátu PLA byla vytlačena za stejných podmínek jako první struna, pouze teploty 4 vyhřívaných zón byly nastaveny o 5 °C nižší. (Tab. 9)

Tab. 9 – TEST 3, parametry H

TEST 3 - materiál PLA			
H			
H4	175 °C	H2	195 °C
H3	190 °C	H1	175 °C

Vytlačovaná struna se nekroutila a rozptyl průměrů byl stabilní. Vytlačování probíhalo pravidelně bez komplikací. Z granulátu byla vytlačena struna o délce 105 m.

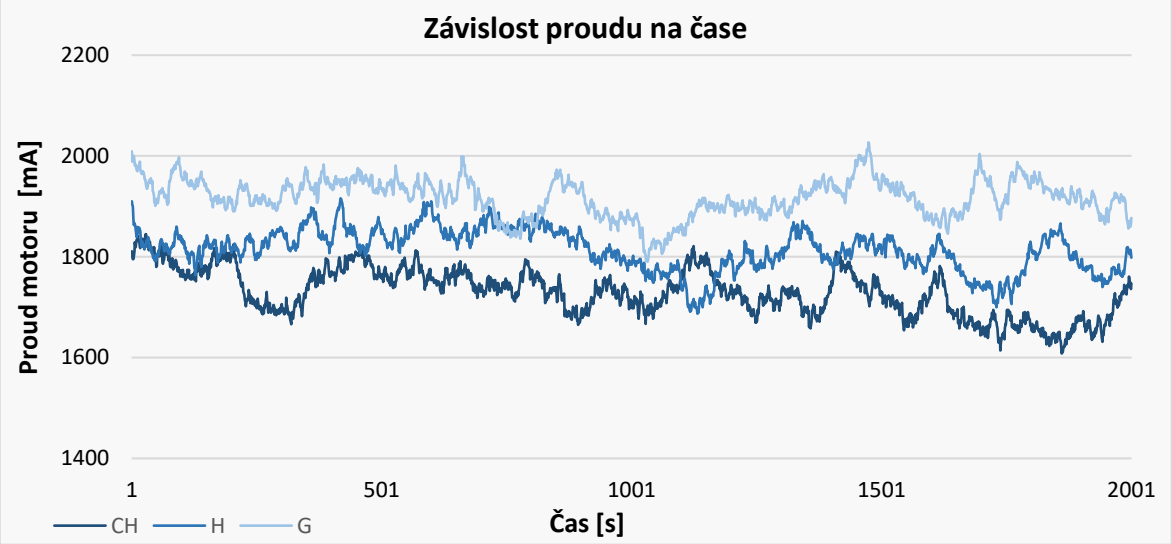
Třetí struna z granulátu PLA byla vytlačena za stejných podmínek jako první a druhá struna, pouze teploty 4 vyhřívaných zón byly nastaveny o 5 °C nižší než u druhé struny. (Tab. 10)

Tab. 10 – TEST 3, parametry CH

TEST 3 - materiál PLA			
CH			
H4	170 °C	H2	190 °C
H3	185 °C	H1	170 °C

Následně došlo k opětovnému pročištění plastikační komory u stroje pomocí materiálu HDPE.

V závislosti proudu na čase pro celý TEST 3 s parametry G, H, CH je zřejmé, že stroj musel zprvu vynaložit více práce na stabilizování průměru a odtahu, a tak potřeboval více proudu. Tyto změny jsou viditelné na začátku grafu Závislost proudu na čase, kde prvotní hodnoty byly větší, kdežto po regulaci došlo ke snížení o cca 100 mA. (Obr. 40)



Obr. 40 – Závislost proudu na čase

8.3.4 HIPS 662E

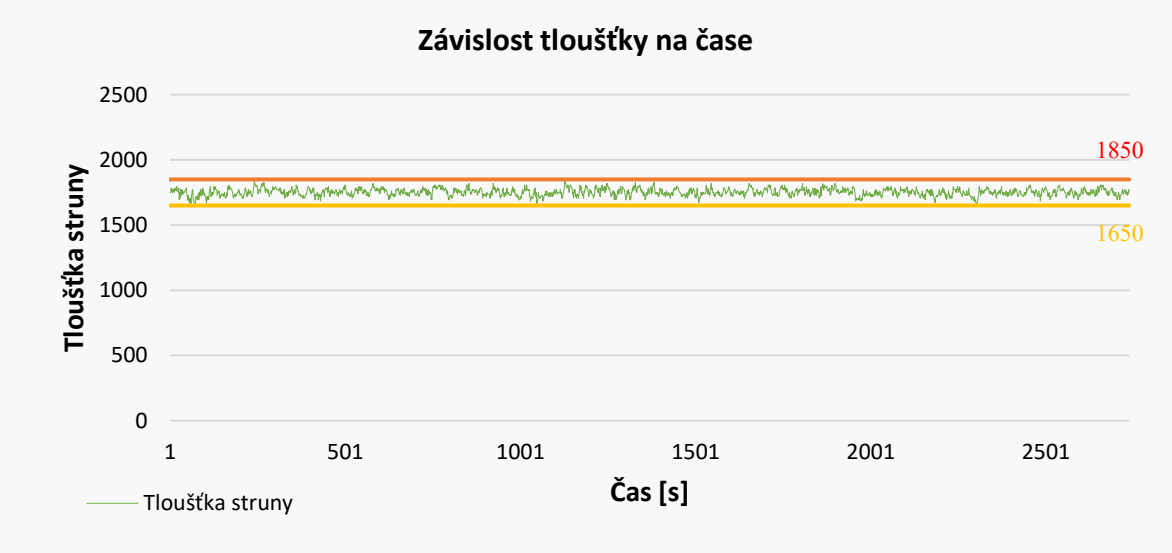
Struna byla vyrobena z granulátu HIPS, který byl sušen 3 hodiny při teplotě 70 °C v sušičce. Navážka tvořila 300 g materiálu. Průměr vytlačování byl nastaven na 1,75 mm, rychlost otáčejícího šneku na 4 rpm. Tavenina byla vytlačována přes trysku o průměru 3,6 mm. Po nastudování teplot vstřikování byly v TESTU 4 nastaveny následující teploty pro vzorky I4, J4, K4. (Tab. 11)

Tab. 11 – TEST 4, parametry I, J, K

TEST 4 - materiál HIPS				TEST 4 - materiál HIPS				TEST 4 - materiál HIPS			
I				J				K			
H4	190 °C	H2	220 °C	H4	190 °C	H2	210 °C	H4	200 °C	H2	230 °C
H3	215 °C	H1	215 °C	H3	205 °C	H1	205 °C	H3	225 °C	H1	225 °C

Závěrem bylo zjištěno, že nastavený průměr vytlačené struny 1,75 mm je nejvíce stabilní při 70% rychlosti chlazení.

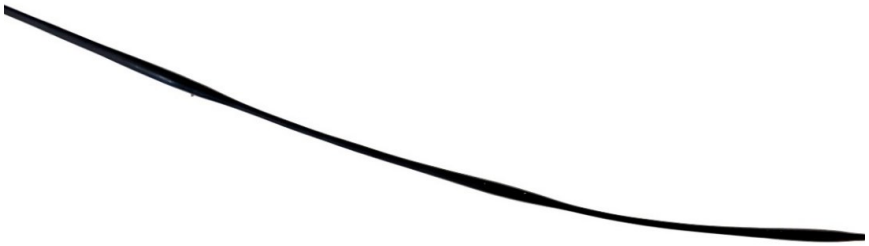
V grafu Závislost tloušťky na čase (Obr. 41) se zobrazuje rozptyl hodnot od nastaveného průměru 1,75 mm, kde měření započalo od stabilního průměru. Rozptyl hodnot u vzorku I, J, K byl téměř totožný, proto je zde uváděn pouze vzorek I. Hodnoty byly ve stanovené toleranci a struna měla dostatečnou kvalitu povrchu.



Obr. 41 - Závislost tloušťky na čase

8.3.5 PC + ABS PULSE 920MG, PC Apec 2097, PA11 – P40 TL, PA6 Novamid B30P

U PC + ABS po nastudování teplot vstřikování byly v TESTU 5 nastaveny následující teploty 4 vyhřívaných zón. (Tab. 12) Při výrobě struny se nepodařilo docílit daného průměru 1,75 mm a docházelo k jeho velkému rozptylu. Na struně došlo ke tvoření tzv. kapiček, které 3D tisk výrazně ovlivnily. (Obr. 42) I při takových rozptylech v průměru struny došlo na tiskárně k vytištění stanovených modelů, nelze je však hodnotit a porovnávat s dalšími výtisky, jelikož tiskárna při výtisku přidávala materiál nepravidelně. Další nepodařená struna byla z materiálu PC Apec 2097 bez příměsi ABS. Z PC Apec 2097 se nepodařilo vytvořit strunu s pravidelnějším průměrem, což zapříčinilo nepravidelné vytlačování a nedostatečné chlazení.



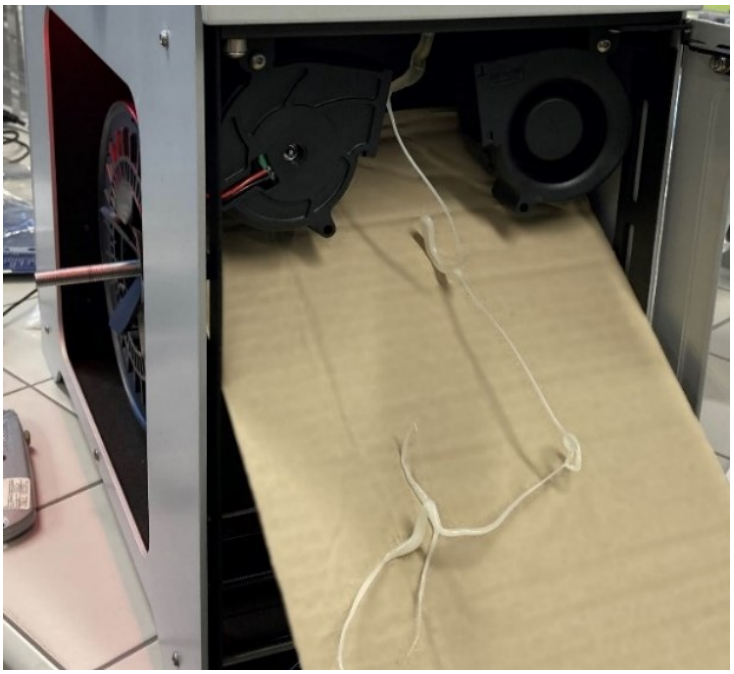
Obr. 42 – Struna z PC + ABS

Z materiálu PA11 – P40 TL se podařilo vytvořit pouze jednu strunu při zadaných parametrech (Tab. 12), po změně parametrů se struna začala přehřívat a stroj ji nedokázal více ochlazovat, a tak docházelo k přetrhávání struny během chlazení a odtahu.

Tab. 12 – PC + ABS, PA11

TEST 5 - materiál PC + ABS				TEST 6 - materiál PA 11			
L				M			
H4	225 °C	H2	240 °C	H4	285 °C	H2	290 °C
H3	235 °C	H1	235 °C	H3	290 °C	H1	290 °C

Z materiálu PA6 Novamid B30P se nepodařilo vyrobit tiskovou strunu, protože tavenina vycházející z vytlačovací hlavy se příliš kroutila a průměru 1,75 mm nešlo docílit. (Obr. 43)



Obr. 43 – Vytlačování PA

9 TISK VÝROBKŮ

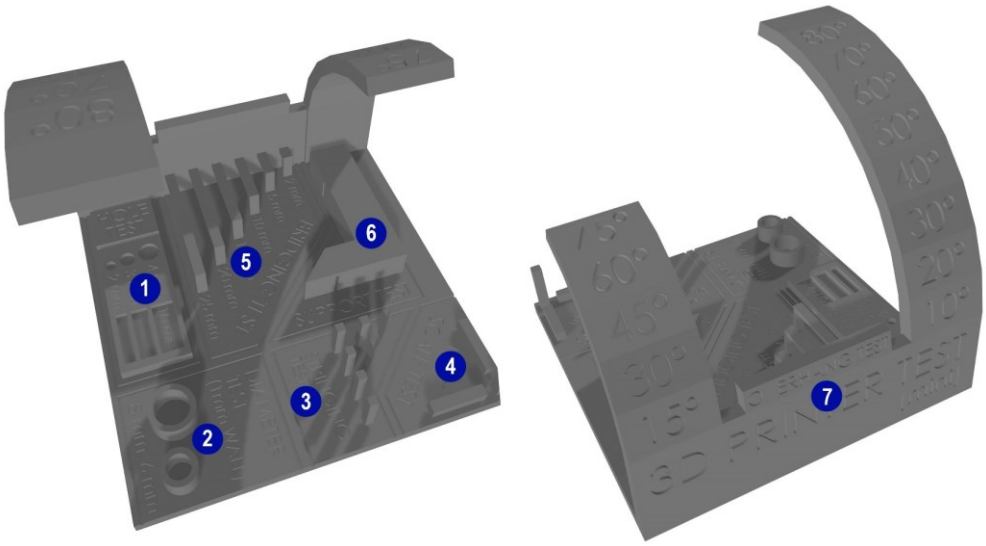
Další část práce byla věnována tisku konkrétních tří základních modelů z vyrobených tiskových strun. Pro tisk byl tedy zvolen mini test, loďka a žabka, výrobky byly tištěny na FDM tiskárně Zortrax M200 Plus. (Obr. 44) Při tisku byla zvolena výška vrstvy 0,19 mm.

Tiskárna má uzavřenou tiskovou plochu s vyhřívanou podložkou, která může být ohřáta až na 110 °C, a tak dochází ve vnitřním prostoru k tzv. nepřímému vyhřívání od podložky, což udržuje pravidelnou teplotu, tudíž lepší a pravidelnější tisk. Tiskárna má dobrý stavební prostor, který činí 200 x 200 x 180 mm, cena se pohybuje kolem 75 000 Kč.

Obr. 44 – Tiskárna Zortrax M200 Plus

9.1 Tisk mini testu

Vytvořený model mini testu byl převeden do souboru STL a následně stanovena kritéria hodnocení. (Obr. 45)



Obr. 45 – STL model mini testu

Kritéria:

1) Hole test

Zde byl pozorován tisk tří kruhových děr o průměru 4, 3, 2 mm a tisk tří obdélníkových děr o délce 10 mm a šířce 4, 3, 2 mm. Pozornost byla zaměřena na sledování hladkých kruhových děr stěn a ostrých rohů obdélníkových děr (Obr. 45)

2) Diametr test

Při téhle zkoušce byla hodnocena kruhovitost dvou válců o průměru 8 a 6 mm a zjišťováno, zda nejsou deformované a tvoří dokonalý válec. (Obr. 45)

3) Stringing test

U zkoušky byl pozorován prostor mezi hranoly umístěnými na výšku a sledována přítomnost zbytkového materiálu ve formě vlásků. (Obr. 45)

4) Scale test

Test byl zaměřen na tvar a rozměry hranolů a bylo sledováno, zda tyto parametry jsou při odlišném natočení stejné. (Obr. 45)

5) Bridging test

Bylo sledováno přemostění materiálu na 2, 5, 10, 15, 20, 25 mm. Pozornost byla zaměřena na deformace a nedokonale ztuhlý materiál, který je možné vidět ve formě volných vláken. (Obr. 45)

6) Support test

U zkoušky byla pozorována funkčnost a stabilita podpor, které se po vytištění odstraňují. (Obr. 45)

7) Overhang test

Při testu je kontrolována správná geometrie (úhel), kvalita vtištěného popisu a kvalita vnějšího i vnitřního povrchu. (Obr. 45)

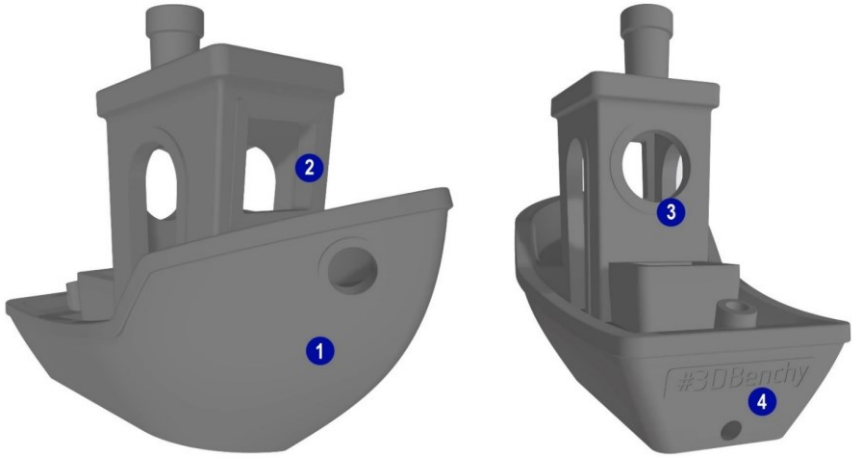
Model STL byl nahrán do tiskárny Zortrax a za použití vytvořených strun ze zvolených materiálů byl zahájen tisk.

Zde je uváděna konkrétní ukázka vytištěného mini testu z materiálu PLA. (Obr. 46)

Obr. 46 – Vytištěný model z PLA

9.2 Tisk loďky

Model byl opět převeden do souboru STL a následně stanovena kritéria hodnocení. (Obr. 47)



Obr. 47 – STL model loďky

Kritéria:

1) hladkost přídě
2) tvar čelního okna
3) tvar zadního okna
4) popis zádě

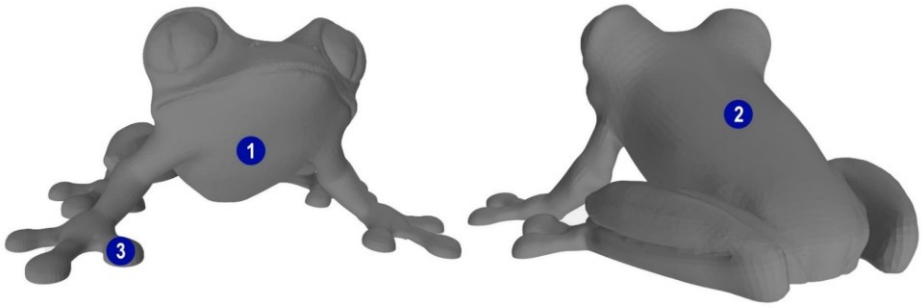
Po stanovení kritérií byly vytištěny konkrétní výrobky ze zvolených materiálů.

Zde je uváděna ukázka vytištěné loďky z materiálu ABS – Starex. (Obr. 48)

Obr. 48 – Vytištěný model z ABS – Starex

9.3 Tisk žabky

Model byl opět převeden do souboru STL a následně stanovena sledovaná kritéria hodnocení. (Obr. 49)



Obr. 49 – STL model žabky

Kritéria:

1) hladkost břicha
2) hladkost zad
3) tvar prstů

Ze zvolených materiálů byly opět vytištěny konkrétní výrobky.

Zde je uváděna ukázka vytištěné žabky z materiálu ABS – Magnum. (Obr. 50)

Obr. 50 – Vytištěný model z ABS – Magnum

10 VYHODNOCENÍ

Pro vyhodnocení vzorků byly stanoveny body 1–5 (5 – nejlepší, 1 – nejhorší).

10.1 Vyhodnocení tisku mini testu

Po vyhodnocení všech čtyř zvolených materiálů pro tisk modelu mini testu bylo zjištěno, že nejvhodnějším materiálem je PLA s parametry struny H. (Tab. 13)

Tab. 13 – Vyhodnocení modelu mini test podle kritérii

Model/Kritérium	Test1 – materiál ABS bílý Starex			Test2 – materiál ABS bílý Magnum			Test3 – materiál PLA červený			Test4 – materiál HIPS		
Mini test	Vzorky(body)			Vzorky(body)			Vzorky(body)			Vzorky(body)		
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH	I	J	K
Hole test	1	2	3	3	4	3	4	5	4	3	4	4
Diameter test	2	3	1	2	4	3	4	5	4	3	3	3
Stringing test	2	3	2	2	1	2	3	5	4	2	2	2
Scale test	4	3	1	1	2	3	4	4	5	2	2	2
Bridging test	1	2	2	3	3	2	4	5	5	3	2	2
Support test	4	3	3	4	4	4	2	2	3	3	4	4
Overhang test	4	5	4	1	1	1	1	2	1	1	2	1
Hodnocení	18	21	16	16	19	18	22	28	26	17	19	18

10.2 Vyhodnocení tisku loďky

Po vyhodnocení všech čtyř zvolených materiálů pro tisk modelu loďky bylo zjištěno, že nejvhodnějším materiálem je ABS – Starex s parametry struny C. (Tab. 14)

Tab. 14 – Vyhodnocení modelu loďky podle kritérii

Model/Kritérium	Test1 – materiál ABS bílý Starex			Test2 – materiál ABS bílý Magnum			Test3 – materiál PLA červený			Test4 – materiál HIPS		
Loďka	Vzorky(body)			Vzorky(body)			Vzorky(body)			Vzorky(body)		
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH	I	J	K
Hladkost přídě	4	5	5	4	3	4	1	2	1	4	3	4
Tvar čelní okna	1	2	3	2	4	3	5	4	5	3	4	3
Tvar zadního okna	4	4	5	3	4	3	3	4	3	3	4	3
Popis zádě	1	2	3	1	3	2	4	4	3	2	3	3
Hodnocení	10	13	16	10	14	12	13	14	12	12	14	13

10.3 Vyhodnocení tisku žabky

Po vyhodnocení všech čtyř zvolených materiálů pro tisk modelu žabky bylo zjištěno, že nejvhodnějším materiálem je ABS – Starex s parametry struny C. (Tab. 15)

Tab. 15 – Vyhodnocení modelů podle kritérii

Model/Kritérium	Test1 – materiál ABS bílý Starex			Test2 – materiál ABS bílý Magnum			Test3 – materiál PLA červený			Test4 – materiál HIPS		
žabka	Vzorky(body)			Vzorky(body)			Vzorky(body)			Vzorky(body)		
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH	I	J	K
Hladkost břicha	2	3	4	1	1	2	2	2	2	2	2	3
Hladkost zad	5	4	3	4	3	3	1	1	2	2	3	2
Tvar prstů	2	3	4	3	2	3	2	2	2	3	3	3
Hodnocení	9	10	11	8	6	8	5	5	6	7	8	8

10.4 Diskuze výsledků

Po celkovém vyhodnocení a zvážení všech procesních parametrů bylo závěrem stanoveno, že struna vyrobená z PLA s parametry struny H se nejvíce hodí pro tisk detailů, kdežto struna ABS – Starex s parametry struny B se hodí pro tisk hladkých věcí. (Tab.17) Pokud by měl být stanoven univerzální materiál pro všechny tři modely, byl by na základě zjištěných výsledků zvolen materiál PLA s výrobními parametry struny H, s celkovým hodnocením 47 bodů. (Tab.17)

Dále bylo výzkumem zjištěno, že pro vytlačování a následný tisk z materiálu ABS Starex byly nejvhodnější parametry B, tedy nastavení 4 topných zón na teploty H4 = 240 °C, H3 = 230 °C, H2 = 230 °C, H1 = 220 °C. Při vytlačování byla struna s nejhladším povrchem a následný tisk všech tří modelů byl pomocí zvolených kritérii nejlépe hodnocen. (Tab.16)

Pro vytlačování a následný tisk všech tří modelů z materiálu ABS Magnum byly nejvhodnější parametry E, tedy nastavení 4 topných zón na teploty H4 = 230 °C, H3 = 240 °C, H2 = 240 °C, H1 = 250 °C. Vytlačená struna dosáhla celkově nejlepších výsledků pro tento materiál. (Tab.16)

Pro materiál PLA byly nejvhodnější parametry H, při nastavení 4 topných zón na teploty H4 = 175 °C, H3 = 190 °C, H2 = 195 °C, H1 = 175 °C. Vytlačená struna dosáhla celkově nejlepších výsledků pro tento materiál. (Tab.16)

Pro materiál HIPS byly nejvhodnější parametry J, při nastavení 4 topných zón na teploty H4 = 190 °C, H3 = 205 °C, H2 = 210 °C, H1 = 205 °C. Vytlačená struna dosáhla celkově nejlepších výsledků pro tento materiál. (Tab.16)

Tab. 16 – Vyhodnocení materiálů podle kritérii

Model/Kritérium	Test1 – materiál ABS bílý Starex	Test2 – materiál ABS bílý Magnum	Test3 – materiál PLA červený	Test4 – materiál HIPS
Mini test	Vzorek(body)	Vzorek (body)	Vzorky(body)	Vzorek (body)
	B	E	H	J
Hole test	2	4	5	4
Diameter test	3	4	5	3
Stringing test	3	1	5	2
Scale test	3	2	4	2
Bridging test	2	3	5	2
Support test	3	4	2	4
Overhang test	5	1	2	2
Loďka				
Hladkost přídě	5	3	2	3
Tvar čelní okna	2	4	4	4
Tvar zadního okna	4	4	4	4
Popis zádě	2	3	4	3
žabka				
Hladkost břicha	4	1	2	2
Hladkost zad	4	3	1	3
Tvar prstů	3	2	2	3
Hodnocení	45	39	47	41

Tab. 17 – Celkové hodnocení modelů podle materiálu a výrobních kritérií struny

Model/Kritérium	Test1 – materiál ABS bílý Starex			Test2 – materiál ABS bílý Magnum			Test3 – materiál PLA červený			Test4 – materiál HIPS		
Mini test	Vzorky(body)			Vzorky(body)			Vzorky(body)			Vzorky(body)		
	A	B	C	D	E	F	G	H	CH	I	J	K
Hole test	1	2	3	3	4	3	4	5	4	3	4	4
Diameter test	2	3	1	2	4	3	4	5	4	3	3	3
Stringing test	2	3	2	2	1	2	3	5	4	2	2	2
Scale test	4	3	1	1	2	3	4	4	5	2	2	2
Bridging test	1	2	2	3	3	2	4	5	5	3	2	2
Support test	4	3	3	4	4	4	2	2	3	3	4	4
Overhang test	4	5	4	1	1	1	1	2	1	1	2	1
Loďka												
Hladkost přídě	4	5	5	4	3	4	1	2	1	4	3	4
Tvar čelní okna	1	2	3	2	4	3	5	4	5	3	4	3
Tvar zadního okna	4	4	5	3	4	3	3	4	3	3	4	3
Popis zádě	1	2	3	1	3	2	4	4	3	2	3	3
žabka												
Hladkost břicha	2	4	4	1	1	2	2	2	2	2	2	3
Hladkost zad	5	4	3	4	3	3	1	1	2	2	3	2
Tvar prstů	2	3	4	3	2	3	2	2	2	3	3	3
Hodnocení	37	45	43	34	39	38	40	47	44	36	41	39

Tab. 18 shrnuje materiály s výrobními parametry jednotlivých strun, otáčky šneku, rychlost chlazení, průměr struny a jednotlivé teploty.

Tab. 18 – Shrnutí materiálů s výrobními parametry jednotlivých strun

	TEST 1 - materiál ABS bílý Starex			TEST 2 - materiál ABS bílý Magnum			TEST 3 - materiál PLA červený			Test4 – materiál HIPS		
Parametry/ vzorky	A	B	C	D	E	F	G	H	CH	I	J	K
Otáčky šneku [rpm]	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Rychlost chlazení [%]	50	55	55	55	55	55	80	80	80	70	70	70
Průměr struny [mm]	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Teplota H4 [°C]	230	240	250	220	230	210	180	175	170	190	190	200
Teplota H3 [°C]	220	230	240	230	240	220	195	190	185	215	205	225
Teplota H2 [°C]	220	230	240	230	240	220	200	195	190	220	210	230
Teplota H1 [°C]	210	220	230	240	250	230	180	175	170	215	205	225

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla vypracována za účelem výroby tiskové struny s různými parametry a výběru nejvhodnějšího materiálu pro tisk konkrétního výrobku.

První část práce seznamuje s aditivní výrobou a rozdělením 3D tiskáren podle druhu použitého materiálu před tiskem, různými metodami tisku a také materiály pro 3D tisk.

Je zde vidět, jak se 3D tisk za posledních 30 let změnil, zlepšil, i když stále nedosáhl svých limitů. Tiskárny se staly důležitým nástrojem pro výrobu a díky jednoduchému vytvoření počítačového souboru umožňují vytvořit prakticky cokoliv.

Druhá část práce se zabývá výrobou tiskové struny ze zvolených materiálů při nastavení procesních parametrů, tiskem konkrétních výrobků a následným vyhodnocením nejvhodnějšího materiálu s danými parametry vyrobené struny. V této druhé praktické části je možné posoudit, jak velký vliv má zvolený materiál s nastavenými parametry na výrobu struny a následnou kvalitu 3D tisku u zvolených modelů.

Vytlačování struny probíhalo na stroji Composer 450, který pro tyto studijní účely poskytla Fakulta technologická Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

Všech stanovených cílů bakalářské práce bylo dosaženo, po závěrečném vyhodnocení a zvážení všech procesních parametrů bylo vytvořeno doporučení vhodnosti konkrétního materiálu pro daný tisk.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.

[2] BROOKE, Hahn. History of 3D Printing. Me3D [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://me3d.com.au/2018/history-of-3d-printing/

[3] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.

[4] STŘÍTESKÝ, Ondřej. Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2020/TI9008/105931621/zaklady-3d-tisku.pdf

[5] PRŮVODCE MATERIÁLY. Prusa Research [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.prusa3d.cz/materialy/

[6] Ultimaker Nylon. Ultimaker [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://ultimaker.com/materials/nylon/

[7] HIPS. Materialpro3d [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/hips/

[8] All you need to know about HIPS as a support material in 3D printing. 3D natives: your source for 3D printing [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.3dnatives.com/en/hips-support-240820205/#!

[9] Polypropylene. SIMPLIFY3D [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polypropylene/

[10] VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to SLA 3D printing. HUBS: A PROTOLABS COMPANY [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/

[11] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem: Praktická příručka k hardwaru i softwaru k ovládnutí 3D tisku [online]. Albatros Media, 2017 [cit. 2021-5-18].

[12] Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Formlabs [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/

[13] FLYNT, Joseph. What is SLA 3D Printing? 3D Insider [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://3dinsider.com/what-is-sla/

[14] The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Pinterest [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://cz.pinterest.com/pin/499618152402914553/

[15] KINGS 800Pro Industrial SLA 3D Printer. Kings: 3D Printing [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.kings3dprinter.com/sla-3d-printer/kings-800-pro.html

[16] MENSLEY, Matthew. 3D Printer Extruder – The Ultimate Guide. All3DP [online]. 2019 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://all3dp.com/1/3d-printer-extruder-nozzle-guide/

[17] 3devo: Make 3D Print Materials - Desktop Filament Maker and Shredder [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://3devo.com

[18] Extrusion line for production of filament. BOCO PARDUBICE machines [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.boco-extruders.eu/extrusion-line-for-production-of-filament

[19] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN-technická literatura, 2009. ISBN 9788073002503.

[20] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4.

[21] AUSPERGER, Aleš. Technologie zpracování plastů [online]. 2016 [cit. 2021-5-18]. ISBN 978-80-88058-77-9.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Trojrozměrný prostor
ABS	Acrylonitrile butadiene styren
ASA	Crylonitrile styren acrylate
BP	Bakalářská práce
CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused Depositíon Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
H	Heater
HIPS	High impact polystarene
PA	Polyamid
PC	Polycarbonates
PET	Polyenthylene tereftalate
PLA	Polylactic acid
PP	Polypropylen
SLA	stereolithography apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
STL	StereoLithography
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolet

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Výrobní procesy [1] 12
Obr. 2 – Tiskárny SLA, SLS, FDM [4,12] 13
Obr. 3 – Metoda Bottom-Up [12] 15
Obr. 4 – Proces tisku SLA [11] 16
Obr. 5 – Tiskárna Formlabs Form 2 [14] 17
Obr. 6 – Metoda SLA Top – Down [14] 17
Obr. 7 – Tiskárna SLA Kings [15] 18
Obr. 8 – Metoda SLS [1] 19
Obr. 9 – SLS tiskárna [1] 19
Obr. 10 – Tiskárna Formlabs Fuse 1 [14] 20
Obr. 11 – FDM tiskárna, struna namotaná na cívku [11] 21
Obr. 12 – Kartézská tiskárna [11] 21
Obr. 13 – Delta tiskárna [11] 22
Obr. 14 – Extrudér tiskárny FDM/FFF [11] 23
Obr. 15 – Lev z PLA [5] 25
Obr. 16 – Mnich z ABS [5] 26
Obr. 17 – Ozubené kolo z PA6 [6] 27
Obr. 18 – Držák na kolo z ASA [5] 27
Obr. 19 – Podpůrná konstrukce z HIPS [8] 28
Obr. 20 – Lahvička s víčkem z PP [9] 28
Obr. 21 – Mnich z materiálu s příměsí bronzu [5] 29
Obr. 22 – Vytlačovací linka (vlevo) a vytlačovací stroj (vpravo) [17, 18] 30
Obr. 23 – Vytlačovací stroj [21] 31
Obr. 24 – Vytlačovací stroj [17] 34
Obr. 25 – Ovládací panel [17] 35

Obr. 26 – Násypka [17]....35
Obr. 27 – Ocelový šnek [17]....36
Obr. 28 – Chladící systém [17]....36
Obr. 29 – Snímač průměru [17]....37
Obr. 30 – Polohovač struny [17]....37
Obr. 31 – Navíječ cívky [17]....38
Obr. 32 – Sušárna....39
Obr. 33 – Závislost tloušťky na čase....41
Obr. 34 – Závislost proudu na čase....41
Obr. 35 – Závislost teplot na čase....43
Obr. 36 – Závislost tloušťky na čase....44
Obr. 37 – Závislost proudu na čase....44
Obr. 38 – Závislost teplot na čase....45
Obr. 39 – Závislost tloušťky na čase....47
Obr. 40 – Závislost proudu na čase....48
Obr. 41 - Závislost tloušťky na čase....49
Obr. 42 – Struna z PC + ABS....50
Obr. 43 – Vytlačování PA....50
Obr. 44 – Tiskárna Zortrax M200 Plus....51
Obr. 45 – STL model mini testu....52
Obr. 46 – Vytištěný model z PLA....53
Obr. 47 – STL model loďky....54
Obr. 48 – Vytištěný model z ABS – Starex....54
Obr. 49 – STL model žabky....55
Obr. 50 – Vytištěný model z ABS – Magnum....55

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Materiály s úspěšností výroby 38

Tab. 2 – TEST 1, parametry A 40

Tab. 3 – TEST 1, parametry B 42

Tab. 4 – TEST 1, parametry C 42

Tab. 5 – TEST 2, parametry D 43

Tab. 6 – TEST 2, parametry E 45

Tab. 7 – TEST 2, parametry F 46

Tab. 8 – TEST 3, parametry G 46

Tab. 9 – TEST 3, parametry H 47

Tab. 10 – TEST 3, parametry CH 47

Tab. 11 – TEST 4, parametry I, J, K 48

Tab. 12 – PC + ABS, PA11 50

Tab. 13 – Vyhodnocení modelu mini test podle kritérii 56

Tab. 14 – Vyhodnocení modelu loďky podle kritérii 56

Tab. 15 – Vyhodnocení modelů podle kritérii 57

Tab. 16 – Vyhodnocení materiálů podle kritérii 58

Tab. 17 – Celkové hodnocení modelů podle materiálu a výrobních kritérií struny 59

Tab. 18 – Shrnutí materiálů s výrobními parametry jednotlivých strun 59

SEZNAM PŘÍLOH

K práci je přiloženo CD, které obsahuje následující přílohy:

Příloha 1 Bakalářská práce ve formátu PDF/A.

Příloha 2 Soubory modelů – použité modely ve formátu STL.