

# **Nalezení vhodných materiálů pro 3D tisk dílců určených do interiérů letounu**

Bc. Zbyněk Skovajsa

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zbyněk Skovajsa**  
Osobní číslo: **T16152**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Nalezení vhodných materiálů pro 3D tisk dílců určených do interiéru letounů**

Zásady pro vypracování:

- 1. vypracujte rešerše na dané téma**
- 2. materiály pro 3D tisk metodou FFF**
- 3. požadavky na zkoušky materiálů určených do interiéru letounu**
- 4. vytiskněte vzorky na FFF tiskárně a proveďte zkoušky dle předpisů**
- 5. zhodnoťte dosažené výsledky**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. EVANS, Brian. Practical 3D printers. New York: Apress, 2012. ISBN 9781430243939.
2. HORVATH, Joan C. Mastering 3D printing. Technology in action series. ISBN 978-1-4842-0025-4.
3. Blueprint for FDM & PolyJet Material Selection [online]. StratasysDirect.com, 2016 [cit. 2017-08-29]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/wp-content/uploads/2016/10/blueprint-for-fdm-polyjet-material-selection-small.pdf>
4. FAR Part 23 AIRWORTHINESS STANDARDS: NORMAL, UTILITY, ACROBATIC, AND COMMUTER CATEGORY AIRPLANES: Doc. No. FAA-2006-23657, 72 FR 44025. 6. srpen 2007. USA: Federal Aviation Administration, 2007.
5. CS-23: Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes [online]. European Aviation Safety Agency, 2015 [cit. 2017-08-28]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/CS-23%20Amendment%204.pdf>

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Milena Kubišová**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2018**

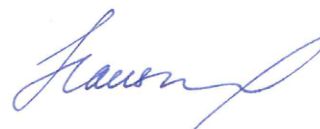
Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 2. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: Bc. Skovajsa Zbyněk

Obor: Řízení jakosti

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 16. 5. 2018

  
.....



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

(1) Vysoká škola nevdělečně 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.

<sup>2)</sup> 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).

<sup>3)</sup> 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**

Tato diplomová práce má za cíl nalézt v dostupných materiálech pro aditivní technologii Fused Filament Fabrication takový, který plní požadavky kladené na užití materiálu v interiéru letounu dle předpisu vydaného Evropskou agenturou pro bezpečnost letectví.

Klíčová slova: 3D tisk, Fused Filament Fabrication, Průša MK2,5, materiály pro 3D tisk

## **ABSTRACT**

This diploma thesis has its objective to find in available materials for additive technology Fused Filament Fabrication that will fulfill requirements laid for usage of material in airplane interior according to regulations issued by European Aviation Safety Agency.

Keywords: 3D printing, Fused Filament Fabrication, Prusa MK2,5, materials for 3D printing

Rád bych poděkoval vedoucí mé diplomové práce ing. Mileně Kubišové, za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Dále bych rád poděkoval rodičům a kamarádům za podporu po celou dobu mého studia. Díky také patří kolegům, kteří mi asistovali při provádění předepsaných zkoušek.

Tato diplomová práce byla spolufinancována z projektu Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně číslo IGA/FT/2018/004

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



# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 BEZPEČNOSTNÍ PŘEDPIS</b> .....	<b>13</b>
1.1 CS-23.....	14
1.1.1 Provedení vzorku .....	14
1.1.2 Kondicionování vzorků:.....	14
1.1.3 Zkušební přístrojové vybavení .....	14
1.1.4 Vodorovná zkouška.....	14
1.1.5 Sledované parametry .....	15
<b>2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE</b> .....	<b>16</b>
2.1 MATERIÁL EXTRUSION - VYTLAČOVÁNÍ MATERIÁLU .....	16
2.1.1 Fused Deposition Modelling (FDM).....	16
2.1.2 Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM) .....	17
2.2 MATERIAL JETTING (MJ) .....	19
2.3 VAT PHOTOPOLYMERIZATION .....	20
2.3.1 Stereolitografie (SLA).....	21
2.3.2 Digital Light Processing (DLP) .....	22
2.3.3 Two-Photon Polymerization (2PP) .....	23
2.4 BINDER JETTING (BJ) .....	23
2.5 POWDER BED FUSION.....	24
2.5.1 Laser Sintering (LS).....	24
2.5.2 Electron Beam Melting (EBM).....	25
2.6 DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED).....	26
2.7 LAMINATED OBJECT MANUFACTURE (LOM).....	26
<b>3 REPRAP TISKÁRA (REPLICATING RAPID PROTOTYPER)</b> .....	<b>28</b>
3.1 DŮLEŽITOST OPEN-SOURCE .....	28
3.2 REPRAP 3D TISKÁRNY .....	28
<b>4 FUSED FILAMENT FABRICATION</b> .....	<b>30</b>
4.1 PROBLÉMY PŘI TISKU METODOU FFF .....	31
4.1.1 Tiskárna nezačne tisknout .....	32
4.1.2 První vrstva nepřilne k tiskové podložce .....	33
4.1.3 Scházející nebo nadbytečný materiál ve výtisku .....	35
4.1.4 Deformace výtisku z přehřátí .....	36
4.1.5 separace a rozdělení vrstev.....	37
<b>5 MATERIÁLY PRO ADITIVNÍ TECHNOLOGII FFF</b> .....	<b>39</b>
5.1 PLA .....	39
5.1.1 HD PLA .....	39

5.2	ABS .....	39
5.3	NYLON .....	40
5.4	PMMA.....	40
5.5	PET-G.....	41
5.6	POLYKARBONÁT - PC.....	41
5.6.1	PC-PBT .....	41
5.6.2	PC-ABS.....	42
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ DLE CS23.853 .....</b>	<b>44</b>
6.1	REPRAP 3D TISKÁRNA PRŮŠA I3 MK2,5.....	44
6.2	TECHNICKÁ PARAMETRY 3D TISKÁRNY I3 MK2,5 .....	45
6.3	NÁVRH ZKUŠEBNÍHO TĚLESA .....	45
6.4	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	46
6.4.1	Nastavení parametrů tisku.....	46
6.4.2	Příprava tiskárny před tiskem.....	52
6.4.3	Tisk zkušebních těles .....	53
6.4.4	Vytištěné zkušební tělesa .....	53
<b>7</b>	<b>PROVEDENÍ ZKOUŠEK .....</b>	<b>54</b>
7.1	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ.....	54
7.2	PŘÍPRAVA ZKOUŠKY .....	54
7.3	PROVEDENÍ ZKOUŠKY .....	56
7.4	VÝSLEDKY ZKOUŠKY .....	57
7.5	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY DLE CS23.853 .....	59
7.5.1	Materiál č.1 .....	59
7.5.2	Materiál č.2 .....	60
7.5.3	Materiál č.3 .....	60
7.5.4	Materiál č.4 .....	60
7.5.5	Materiál č.5 .....	60
<b>8</b>	<b>OVĚŘENÍ ZPŮSOBILOSTI FFF 3D TISKÁRNY .....</b>	<b>61</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>74</b>

## ÚVOD

3D tisk zaznamenal v posledních letech velké rozšíření.

Cílem diplomové práce je mezi dostupnými materiály pro 3D tisk metodou FFF nalézt takový, který splňuje podmínky leteckých předpisů pro užití výsledného výrobku v kokpitu ultralehkého letounu, i když pro kategorii ULL nejsou specifikovány požadavky bezpečnosti, je pro posádku a provoz ULL lepší když materiál bude plnit požadavky, které jsou předepsány v předpisu letounů kategorie všeobecného letectví (GA - General Aviation).

Zkušební dílce byly vytištěny na RepRap FFF tiskárně originál Průša I3 MK2S, kterou jsem v průběhu práce upgreadoval na verzi MK2,5.

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí. V teoretické části se dozvíme, jaké zkoušky je nutné provést pro materiály, které mají být použity v interiéru letounu dle předpisu CS-23. Jaký byl vývoj 3D tisku metodou FFF. Vlastnosti polymerních materiálů pro tisk metodou FFF. Jaké chyby při tisku vznikají a jaké jsou možnosti jejich minimalizace.

V praktické části je popsán způsob přípravy programu pro 3D tisk, příprava 3D tiskárny před tiskem, samotný tisk zkušebních dílců, příprava, provedení a vyhodnocení předepsaných zkoušek. Dále byla ověřena způsobilost 3D tiskárny.

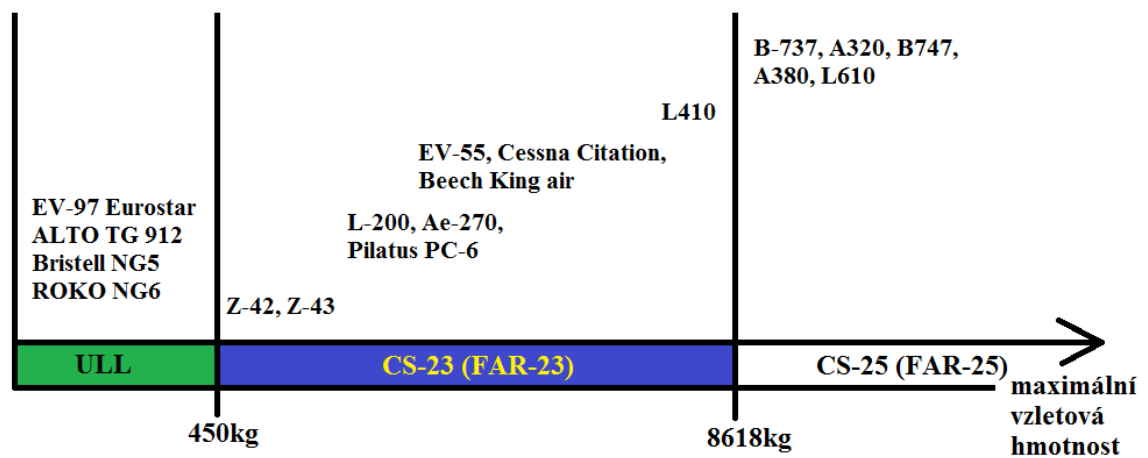
Na závěr jsou zhodnoceny výsledky a ukázána možnost využití 3D tisku technologií FFF na konkrétním dílu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 BEZPEČNOSTNÍ PŘEDPIS

Požadavky na bezpečnost se do předpisů pro stavbu a provoz civilních letadel dostávají v 60. letech 20. století. V USA jsou tyto požadavky zahrnuty do předpisů FAR, tyto předpisy udržuje a aktualizuje FAA. Jako první byly tyto požadavky zpracovány pro dopravní letouny do předpisu FAR-25. Později byl vytvořen předpis FAR-23 pro letouny kategorie GA. V bývalém Sovětském svazu byly tyto předpisy označovány jako NLGS. Předpisy NLGS byly obsahově blízké předpisům FAR. V Evropě byly vydávány předpisy JAR, za vydávání předpisů JAR byla zodpovědná agentura JAA, předpisy JAR byly kompatibilní s předpisem FAR a NLGS. Po vzniku Evropské agentury pro bezpečnost letectví - EASA vznikl i nový předpis označený CS, za který odpovídá EASA. Předpis CS je kompatibilní s předpisy FAR.

Letecké předpisy pro návrh a výrobu letounů a letadlových celků se liší pro každou kategorii letounů, viz obr. 1. Pro interiér letounu, pokud není interiér součástí hlavní konstrukce letounu, jsou ve všech kategoriích kladeny požadavky pouze na požární ochranu.



obr. 1 kategorizace bezpečnostních předpisů pro jednotlivé kategorie letounů

Pro kategorii letounů ULL nejsou předepsány certifikační požadavky pro použité materiály. Z hlediska bezpečnosti provozu ULL, je vhodnější, když použité materiály splňují certifikační požadavky kategorie GA, které jsou popsány v certifikačních specifikaci CS-23.

## 1.1 CS-23

Požadavky na požární bezpečnost jsou definovány v hlavě D - návrh a konstrukce, kapitola požární ochrana, odstavec CS23.853 Interiéry prostorů pro cestující a posádku. V dodatku F předpisu CS-23 jsou definovány zkušební postupy pro samozhášecí materiály. [38]

Pro každý prostor používaný posádkou platí, že materiály včetně povrchové úpravy musí být odolné vůči plameni. [38]

### 1.1.1 Provedení vzorku

Materiál se musí zkoušet buď jako výřez z vyrobené součásti, která má být použita k montáži nebo zástavbě do letounu, nebo jako vzorek odříznutý z materiálu používaného pro výrobu součásti nebo jako model této součásti. Vzorek může být oddělen z kteréhokoliv místa vyrobené součásti. Pro zkoušky se však nemají oddělovat výřezy nebo vzorky ze složených celků, jako například ze sendvičových panelů. Tloušťka vzorku nesmí být větší než nejmenší tloušťka, která má být použita v letounu, pokud je plánováno použití materiálu pro malé součásti, musí být šířka vzorku maximálně 3mm. [38]

### 1.1.2 Kondicionování vzorků:

Vzorky se musí kondicionovat na teplotu  $21^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$  a při relativní vlhkosti  $50\% \pm 5\%$  po dobu nezbytnou k vyrovnání vlhkosti, nebo po dobu 24 hodin. Bezprostředně před vlastní zkouškou vystavení plamenu se může z klimatizovaného prostředí vyjmout pouze jeden vzorek.[38]

### 1.1.3 Zkušební přístrojové vybavení

Zkouška musí být prováděna v odděleném prostoru za bezvětrí. Musí být použit Bunsenův nebo Tirrilův hořák s nominálním průměrem trubice 9,5mm, který je seřízen tak aby dával plamen vysoký 38mm. Minimální teplota plamene musí být  $843^{\circ}\text{C}$  a musí být před započítáním zkoušky ověřena kalibrovaným termočláňkovým pyrometrem. Ustavení vzorku při zkoušce je odlišené pro každou zkoušku. [38]

### 1.1.4 Vodorovná zkouška

Výsledkem zkoušky je průměr výsledků z minimálně třech kusů vzorků. Každý vzorek musí být ustaven ve vodorovné poloze. Exponovaný povrch vzorku tak jak je umístěn v letadle lící stranou dolů. Vzorek musí být umístěn tak, aby zkoušený okraj byl 19mm nad

vrcholem a v ose hořáku. Plamen musí působit po dobu 15 sekund, poté musí být oddálen. Přibližně 38mm vzorku musí nejdříve shořet. Poté bude zaznamenáván čas hoření

### 1.1.5 Sledované parametry

Aby bylo možné říci, zdali materiál vyhovuje požadavkům na odolnost vůči plamenu, sledujeme při zkoušce následující parametry [38]:

- **doba hoření plamene po odstranění zdroje tepla**  
po odstranění zdroje tepla musí nejpozději do 15sekund zhasnout plamen [38]
- **kapající hmota a její čas do samovolného zhasnutí**  
pokud dojde k odkapu roztaveného materiálu, musí odkápnutá hmota hořet maximálně 3 sekundy po odkápnutí.[38]
- **rychlost hoření**  
materiály nesmí mít rychlost hoření větší než 100 mm za minutu. Přibližně 38mm vzorku musí shořet, než hořící čelo dosáhne oblasti, ve které bude měřen čas. [38]

## 2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní technologie, které jsou dostupné na trhu, jsou patentovány nebo opatřeny ochrannou známkou. To vedlo k tomu, že výrobci 3D tiskáren užívají různé názvy pro stejné aditivní technologie. Proto organizace American Society for Testing and Material (ASTM) a International Organization for Standardization (ISO) vydali standard ISO/ASTM 52900, který definuje 7 aditivních technologií. [1]

- 1) Materiál extrusion
- 2) Material jetting
- 3) Vat photopolymerization
- 4) Binder jetting
- 5) Powder bed fusion
- 6) Directed energy deposition
- 7) Sheet lamination

### 2.1 Materiál Extrusion - vytlačování materiálu

Jedná se o nejrozšířenější aditivní technologii. Z extruderu je vytlačována tavenina, která je vrstvena do vrstev do tvaru výsledného výrobku. Nejpoužívanějšími materiálem jsou termoplastické polymery, ale lze použít i keramiku, čokoládu, beton, v některých případech i kov. [1]

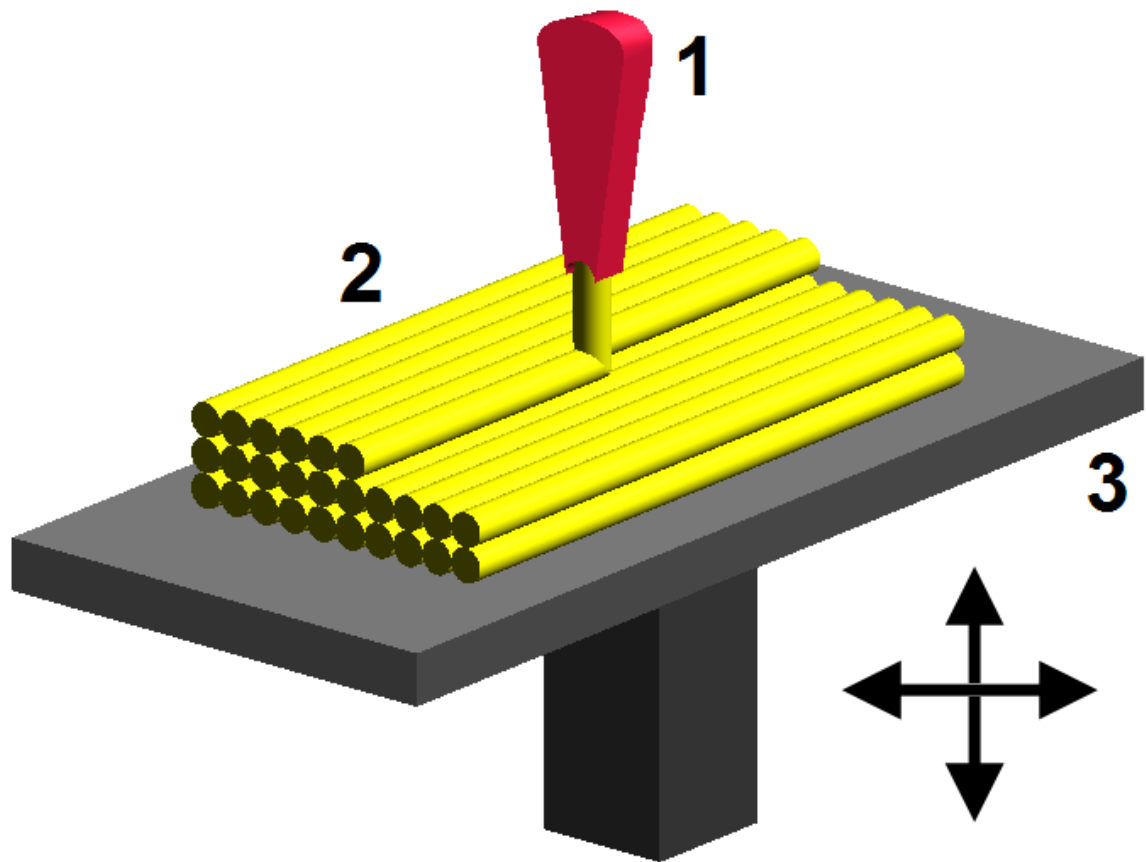
#### 2.1.1 Fused Deposition Modelling (FDM)

Aditivní technologie vytlačování termoplastických polymerů, která byla vynalezená a patentovaná v roce 1989 společností Stratasys. Konkurenční společnost 3D Systems nazvala technologii vytlačování termoplastických polymerů Plastic Jet Printing (PJP). Na trhu se dále můžeme setkat s označením Melted and Extruded Modelling (MEM), Fused Deposition Method nebo Fused Filament Fabrication (FFF). [1],[2]

Principem FDM je roztavení tenké struny z termoplastu v extruderu (tiskové hlavě), který je zahřátý na teplotu mezi 180 °C až 350°C dle použitého polymeru. Pohyb extruderu je řízen ve dvou osách. Extruder vytlačuje taveninu na podložku a svým pohybem ve dvou osách postupně nanáší velmi tenkou vrstvu materiálu v rovině horizontálního průřezu budoucího výrobku. Po nanesení celé vrstvy se podložka sníží o tloušťku nanesené vrstvy ve



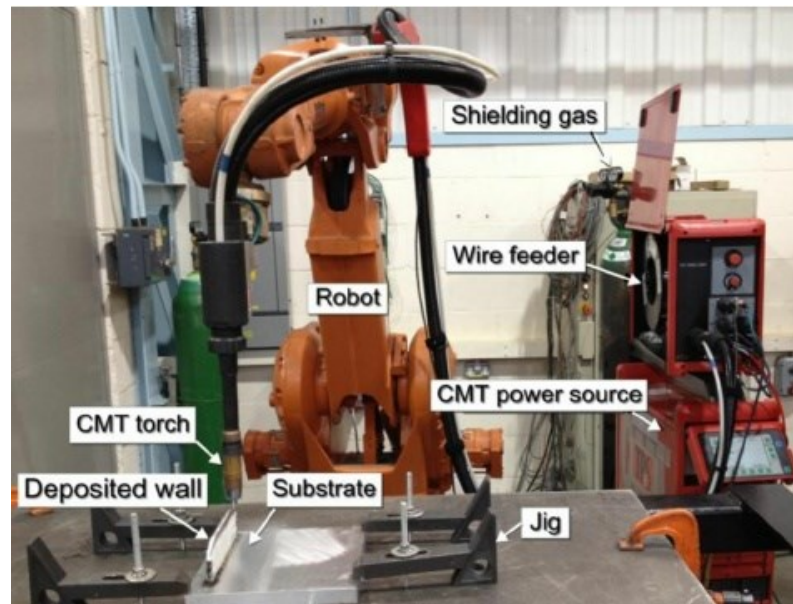
vertikální ose a postupné nanášení další vrstvy pokračuje nanovo až do vytvoření celého výrobku (obr. 2) [1],[2]



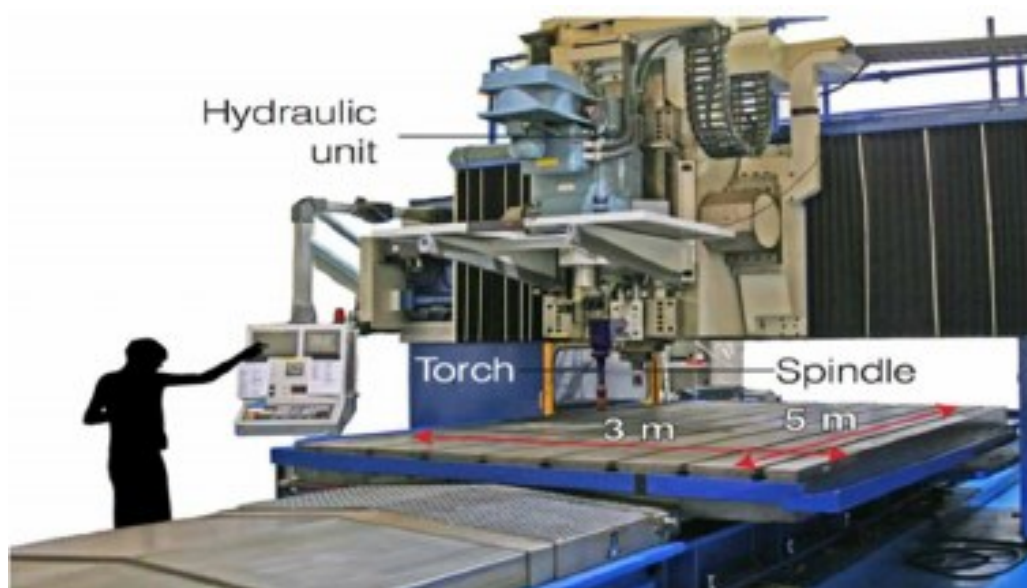
obr. 2 schéma FDM [32]

### 2.1.2 Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Kombinace elektrického oblouku jako zdroje tepla a drátu jako suroviny je označována jako aditivní technologie Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM). Tento druh technologie byl patentován již v roce 1925. V současné době technologie WAAM využívá k nanášení housenky metodu svařování MIG nebo CMT, pohyb zajišťuje buď robotický systém (obr. 3) nebo počítačem řízený CNC stroj (obr. 4). [1], [4]



obr. 3 WAAM technologie se svařovacím robotem [5]



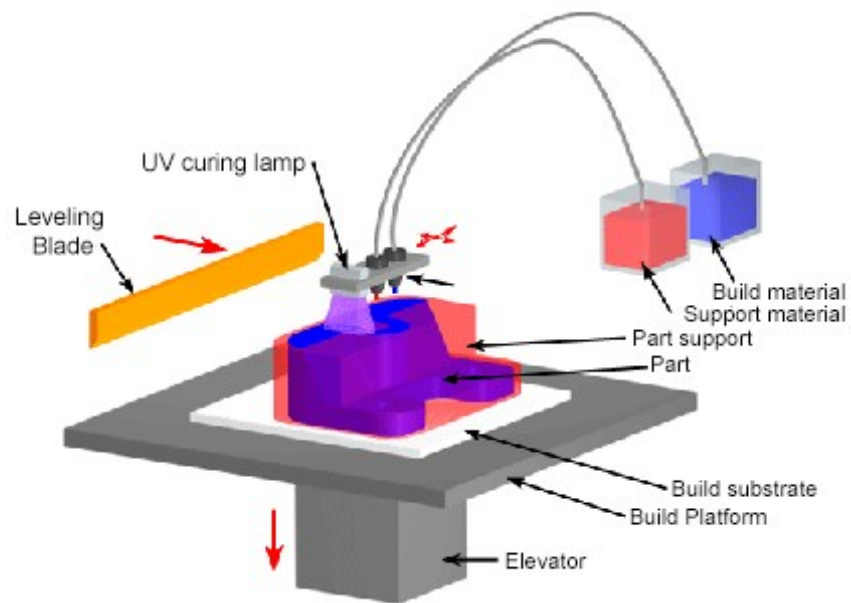
obr. 4 WAAM technologie s portálovou svářečkou [6]



obr. 5 polotovar lopatky turbíny vytvořený technologií WAAM [7]

## 2.2 Material Jetting (MJ)

Principem aditivní technologie Material Jetting je vytvrzení kapalného polymeru, který je nanášen tiskovou hlavou ve vrstvách a po nanesení celé vrstvy vytvrzen pomocí UV světla obr. 6. Aditivní technologie MJ umožňuje tisknout najednou více materiálů, které lze mezi sebou vzájemně míchat. Technologie MJ umožňuje přimíchání inkoustů a díky tomu můžeme tisknout plnobarevné výtisky obr. 7. [1]



obr. 6 schéma MJ [12]



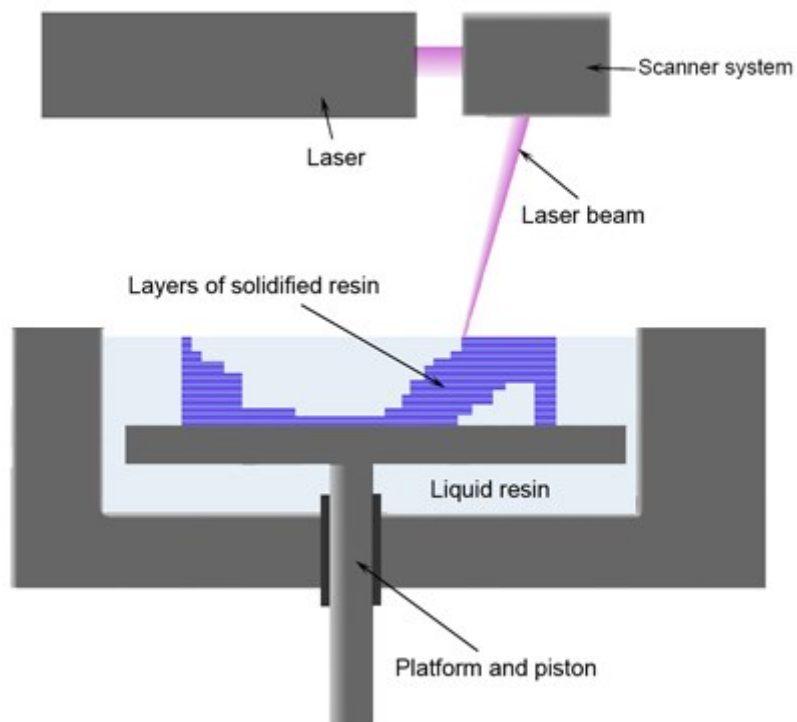
obr. 7 model molekuly vytištěný technologií MJ [13]

### 2.3 Vat Photopolymerization

Fotopolymerací nazýváme additivní technologii, při které pomocí ultrafialového záření (UV) vytvrzujeme kapalné pryskyřice. Fotopolymerace je proces, při kterém vlivem záření dojde v pryskyřici k chemickým reakcím, které způsobí vytvrzení pryskyřice. [1], [2]

### 2.3.1 Stereolitografie (SLA)

Dílec při tomto postupu vzniká působením ultrafialového laserového paprsku na tekutou fotopolymerickou pryskyřici, která je působením laseru ztvrdována ve vrstvách, jejichž tvar vždy odpovídá dané vrstvě řezu. Po vytvrzení vrstvy se platforma posune ve vertikálním směru o tloušťku další vrstvy, nanese se další vrstva pryskyřice a laser v ní opět vytvrdí vzor dle řezu. Tento postup se opakuje až do vytvoření celého dílce viz obr. č. 8 [1], [2]



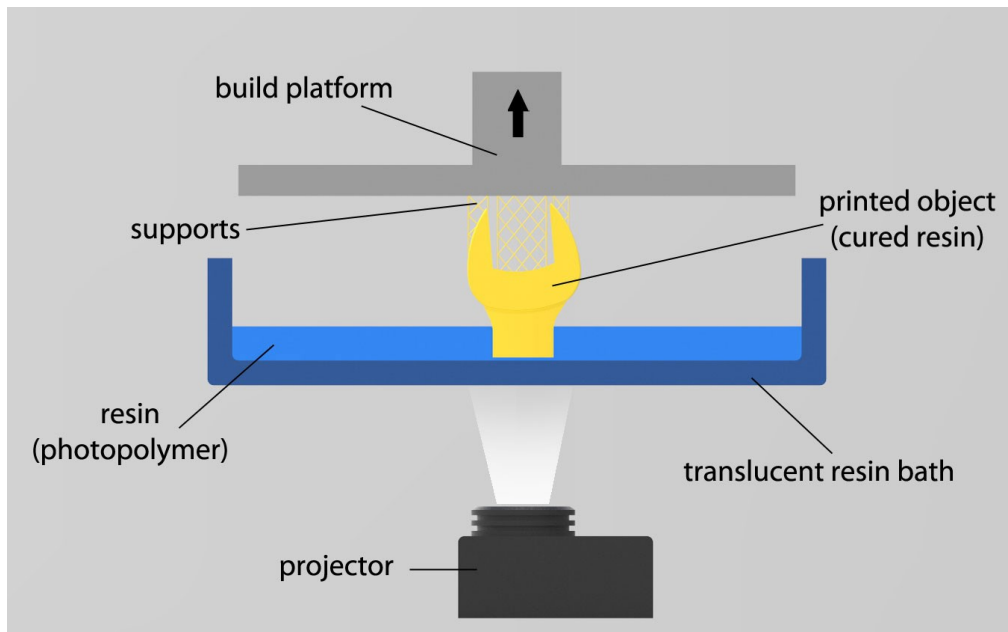
obr. 8 schéma Stereolitografie [32]



obr. 9 dílec vyrobený technologií SLA [8]

### 2.3.2 Digital Light Processing (DLP)

Fotopolymeraci využívá i aditivní technologie DLP Projection. Tuto technologii vyvinula v roce 1987 Texaská společnost Texas Instruments. Aditivní technologie DLP využívá jako zdroj světla DLP projektor. Projektor promítá na povrch pryskyřice průřez tištěného výrobku v dané vrstvě. Celá vrstva je vytvrzena najednou čímž dojde ke zkrácení doby tisku. Při tisku metodou DLP, po vytvrzení vrstvy, je tisková podložka posunuta vzhůru. Tištěný objekt vzniká vzhůru nohama obr. 10. Technologie DLP projection vytváří velmi přesné výrobky a velmi kvalitním povrchem obr. 11 [1], [2]



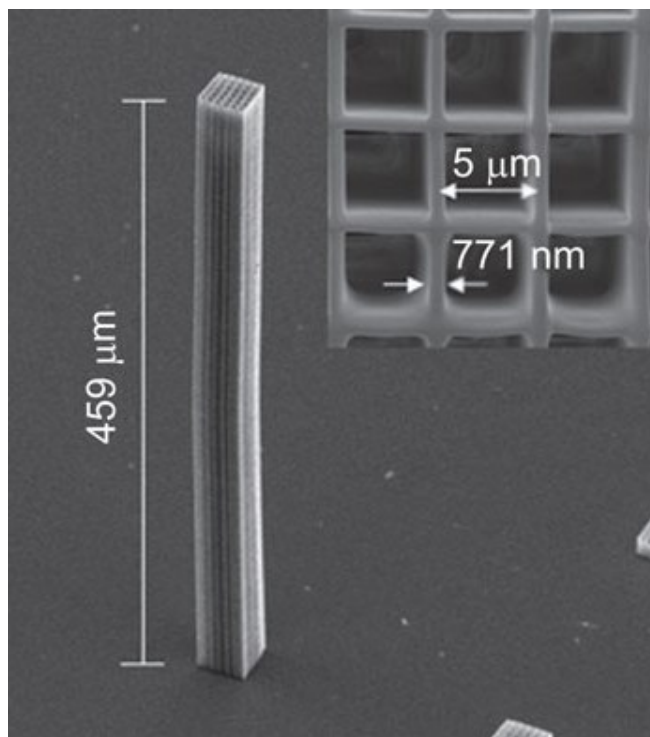
obr. 10 schéma DLP projection [33]



obr. 11 výrobky vytištěné DLP projection [10]

### 2.3.3 Two-Photon Polymerization (2PP)

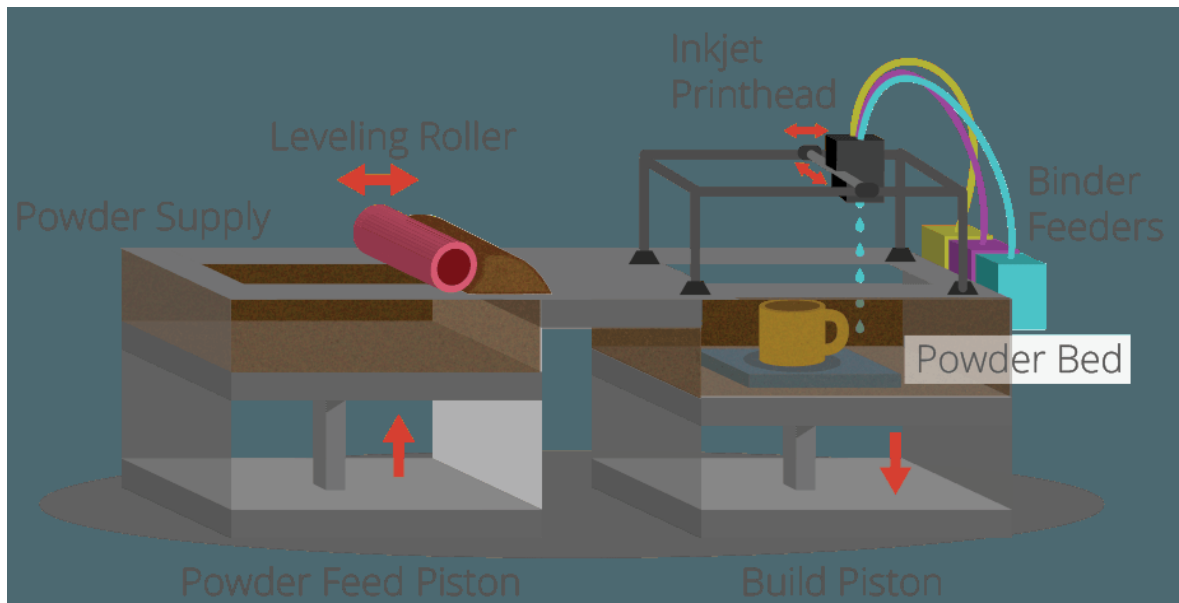
Aditivní technologii 2PP je obdobná jako SLA. K vytvrzení pryskyřice slouží laser. Rozdílem je tloušťka tištěné vrstvy. Technologie 2PP tiskne vrstvu tlustou 100 až 200 nanometrů, proto má technologie 2PP 250x vyšší rozlišení tisku než stereolitografie. Pomocí technologie 2PP tiskneme velmi přesné miniaturní objekty obr. 13 [1]



obr. 12 síťová struktura vytištěná pomocí 2PP [11]

## 2.4 Binder Jetting (BJ)

Aditivní technologie Binder Jetting tiskne z materiálu ve formě prášku spojeného pomocí pojiva. Vrstvy prášku jsou nanášeny válečkem, po nanesení vrstvy je z tiskové hlavy naneseno pojivo do míst, které mají být vytvrzeny. Po nanesení pojiva v dané vrstvě dojde ke snížení tiskové desky o výšku vrstvy a je proces opakován, dokud není vytvrzen kompletní dílec. Nevytvrzený prášek supluje podpory, po dokončení tisku je nevytvrzený prášek odsán a použit při dalším tisku. [1]



obr. 13 princip aditivní technologie Binder Jetting [34]

## 2.5 Powder Bed Fusion

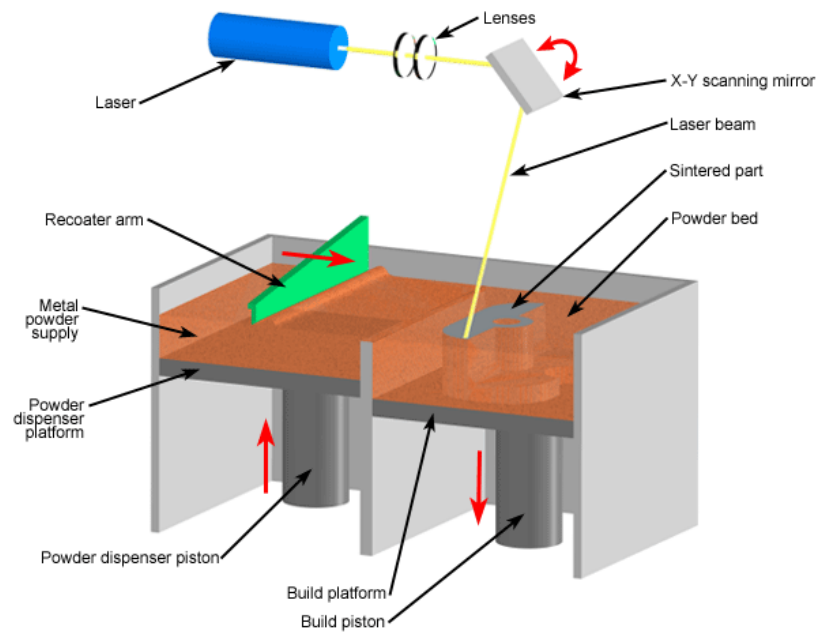
Aditivní technologie zařazené pod Powder Bed Fusion jsou velmi podobné BJ. Rozdíl je ve způsobu vytvoření výtisku. Prášek je spékán pomocí tepla. [1]

### 2.5.1 Laser Sintering (LS)

Aditivní technologie Laser Sintering tiskne objekt principem nanášení prášku v jednotlivých vrstvách, po nanesení vrstvy prášku je v průřezu tisknuté součásti prášek spékán laserovým paprskem obr. 14. Výtisky mají velmi dobrou kvalitu povrchu a mají vysokou rozměrovou přesnost. [1]

Při tisku pomocí technologie LS lze využít různé materiály, např. termoplastické polymery, vosky, keramiku, kovy. Důležité je použití jemného práškového granulátu. Velikost granulí  $0,04 \div 0,09\text{mm}$ . [1] [2]



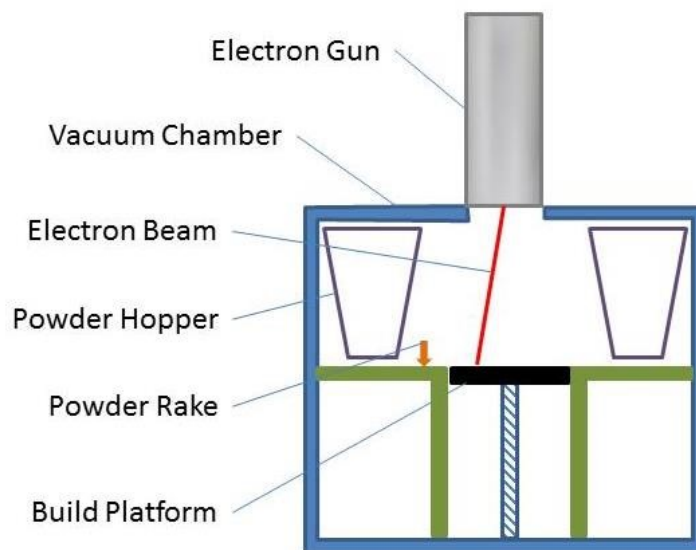


obr. 14 princip aditivní technologie Laser Sintering [35]

### 2.5.2 Electron Beam Melting (EBM)

Princip aditivní technologie Electron Beam Melting je velmi podobný aditivní technologii LS, obr. 15. Rozdíl je ve způsobu spékání prášku, EBM využívá ke spékání elektronový paprsek, dalším rozdílem je, že tisk probíhá ve vakuu. [1] [2]

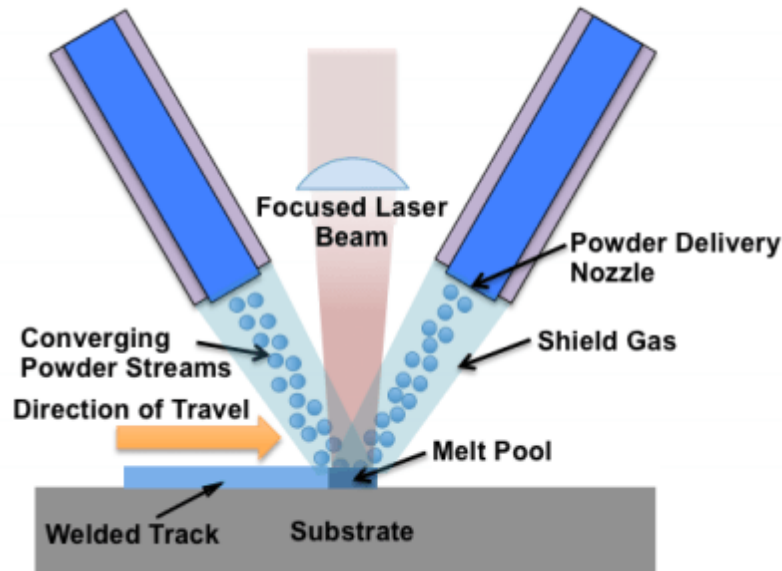
Aditivní technologie EBM tiskne pouze z kovových prášků (titan, chrom, cobalt,...), polymery není možné tisknout aditivní technologií EBM. [1] [2]



obr. 15 princip aditivní technologie EBM [32]

## 2.6 Directed Energy Deposition (DED)

Principem aditivní technologie DED je tavení kovového drátu nebo prášku pomocí laserového nebo elektronového nebo plasmového paprsku v ochranné atmosféře argonu. Paprsek je usměrněn do úzkého místa, do kterého je přidáván materiál, obr. 16. [1] [2]

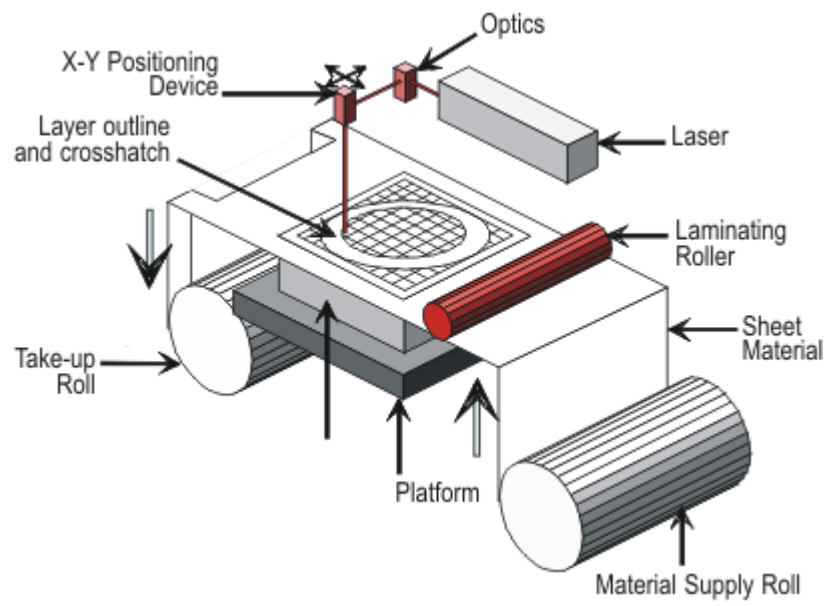


obr. 16 princip aditivní technologie DED [36]

Aditivní technologie DED umožňuje opravovat součásti nebo vytisknout novou část již stávajícího výrobku.[1] [2]

## 2.7 Laminated Object Manufacture (LOM)

Principem aditivní technologie LOM patří mezi aditivní technologie Sheet Lamination. Principem LOM je vrstvení papírové fólie, na kterou je nanášena vrstva pojiva. Po nanese- ní první vrstvy je fólie vytvrzena přejetím vyhřívacího válce, což způsobí slepení vrstvy. Poté je CO<sub>2</sub> laserem vyřezán průřez výtisku v dané vrstvě. Zbytek fólie je rozřezán na čtverce, aby se lépe odstranila z výsledného výtisku. Dojde ke snížení základní desky o tloušťku fólie a celý proces se opakuje. [1] [2]



obr. 17 princip aditivní technologie LOM [37]

### 3 REPRAP TISKÁRA (REPLICATING RAPID PROTOTYPER)

Dr. Bowyer z Univerzity of Bath v Británii v roce 2005 založil projekt nesoucí název RepRap. Cílem tohoto projektu byla levná open-source 3D tiskárna, která se sama dokáže replikovat - vytisknout svoji kopii. Díky tomu jsou uživatelé schopni si vytisknout svoji tiskárnu a tím ji šířit dále. Díky tomu se 3D tisk rozšířil do celého světa. [14]

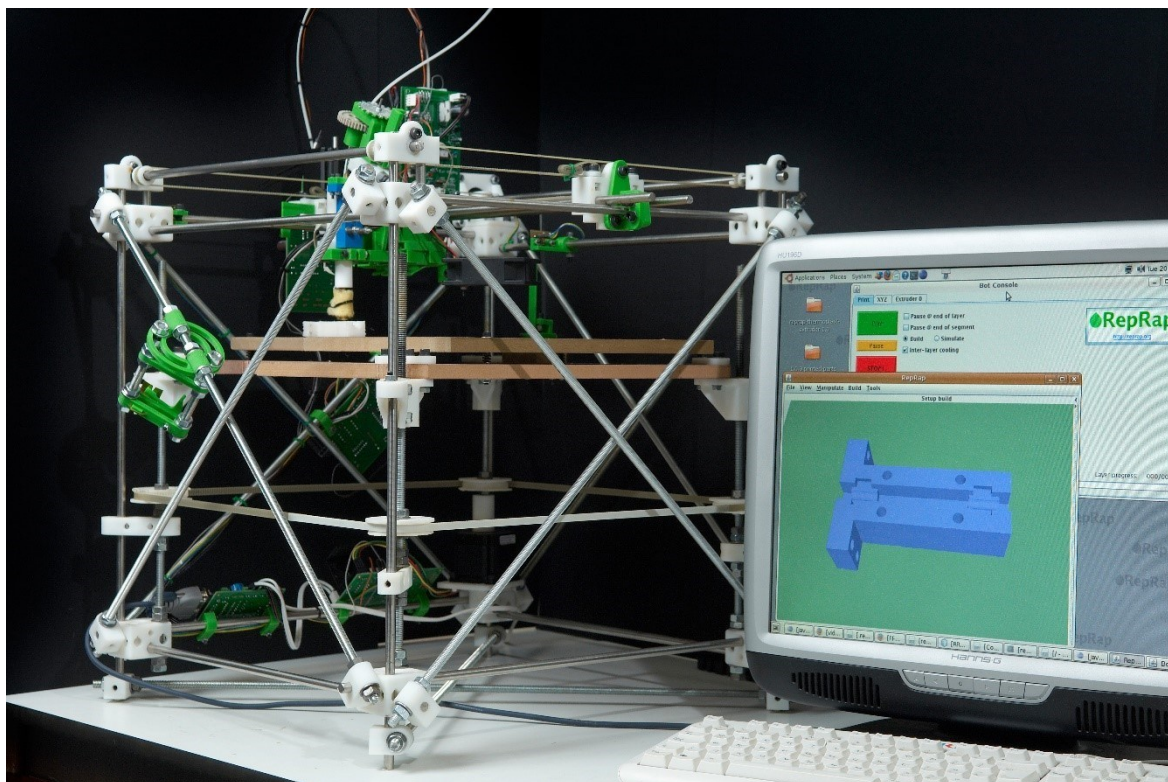
#### 3.1 Důležitost open-source

Nejdůležitějším na RepRap projektu bylo, že návrh a vývoj byl zcela veřejný, mohl do něj přispět kdokoliv a kdokoli jej mohl využívat.

Jelikož je vše open-source, nejsou zde žádné patenty, což přináší rychlejší zavádění nových poznatků do nových 3D tiskáren.[14]

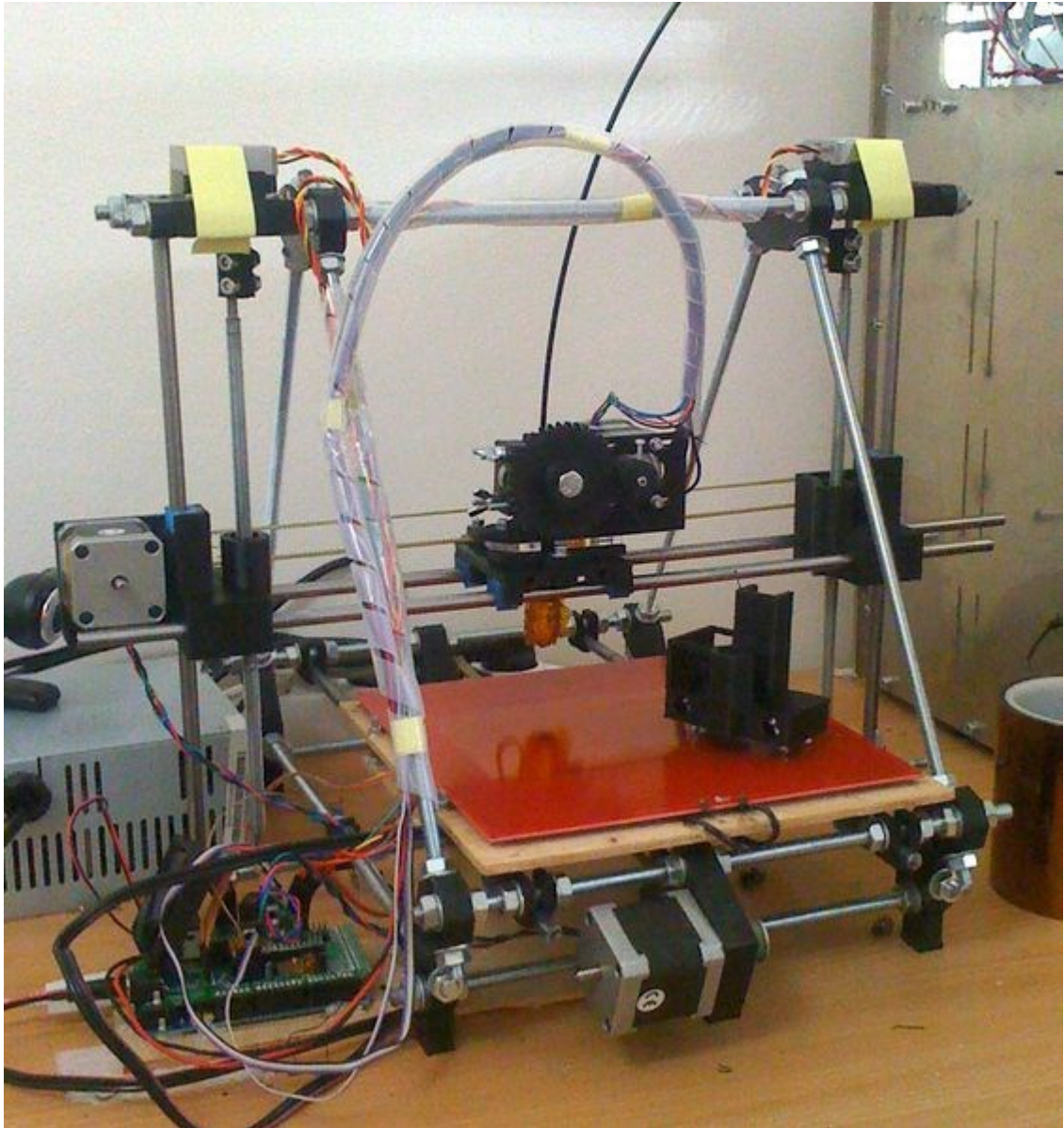
#### 3.2 RepRap 3D tiskárny

Protože byl RepRap projekt open-source nebrzdila jeho vývoj byrokracie. V roce 2007 byla světu představena první kompletní 3D tiskárna pojmenovaná "Darwin", obr. 18. Darwin využíval FFF metodu tisku. [14]



obr. 18 RepRap 3D tiskárna Darwin [14]

Po dvou letech, v roce 2009, byl světu představen nový návrh RepRap 3D tiskárny pojmenovaný "Mendel". Oproti Darwinovi měl Mendel řadu vylepšení: větší spolehlivost, snadnější sestavení tiskárny, lepší kvalitu tisku. [14]

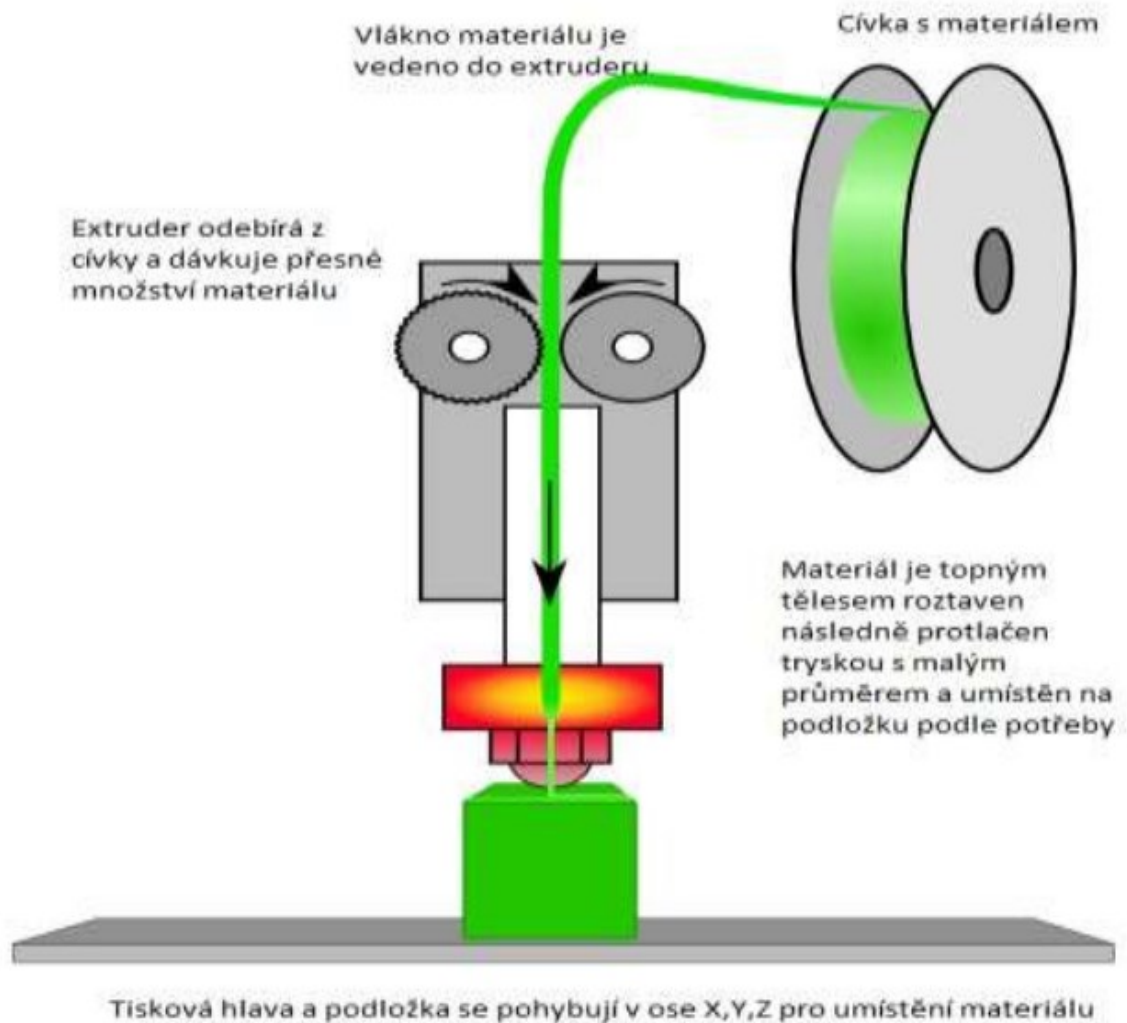


obr. 19 RepRap 3D tiskárna Mendel [15]

Díky RepRap projektu zaznamenal 3D tisk velký skok kupředu během pár let. Tiskárny jsou dostupné pro kohokoliv a kdokoliv se může podílet na úpravách nebo dalším vývoji nového návrhu, proto nyní existuje více než 30 návrhů RepRap 3D tiskáren v různých úpravách. Tyto úpravy zlepšily kvalitu tisku a zvýšily spolehlivost RepRap tiskáren a je možné je využít nejen pro uživatelský tisk ale i pro profesionální tisk prototypů či tisk v kusové výrobě. [14]

#### 4 FUSED FILAMENT FABRICATION

Fused Filament Fabrication (FFF) je aditivní technologie odvozená od metody FDM, která je používána v RepRap 3D tiskárnách. Princip je tavení filamentu (struny) z termoplastického polymeru v extrudéru. Z extrudéru je vytlačováno tenké vlákno, které je nanášeno a nataveno na podložku ve formě housenky do jednotlivých vrstev.



obr. 20 princip technologie FFF [16]

3D tisk technologií FFF používá stejnou technologii tisku jako profesionální FDM 3D tiskárny. Rozdíl je v tom, že FDM 3D tiskárny jsou přesnější, zvládají tisk materiálů s vyšší teplotou zpracování (nad 350 °C). [14]

FFF 3D tiskárny jsou velmi oblíbené kvůli své nízké ceně a velmi jednoduchému ovládní, ale 3D tisk technologií FFF i přes snahu výrobců, má stále více nevýhod, při tisku vznikají

deformace z důvodu rozpínání termoplastů při zahřívání a smršťování při chladnutí. Pokud dojde k ochlazení některé vrstvy dříve, než ostatních vrstev vznikne nežádoucí delaminace vrstev a tím k prasknutí výtisku.[14]



obr. 21 delaminace vrstev vlivem deformace [14]

Velikost deformace je závislá na použitém materiálu. Termoplast akrylonitributadienstyrenu (ABS) je velmi náchylný na deformace a praskání. Při 3D tisku z termoplastu kyseliny polymléčné (PLA) jsou vzniklé deformace minimální. Výrobci 3D tiskáren se stále snaží vymyslet způsob jak vznikající deformace eliminovat - vyhřívání podložka, vyhřívání pracovní prostor tiskárny. [14]

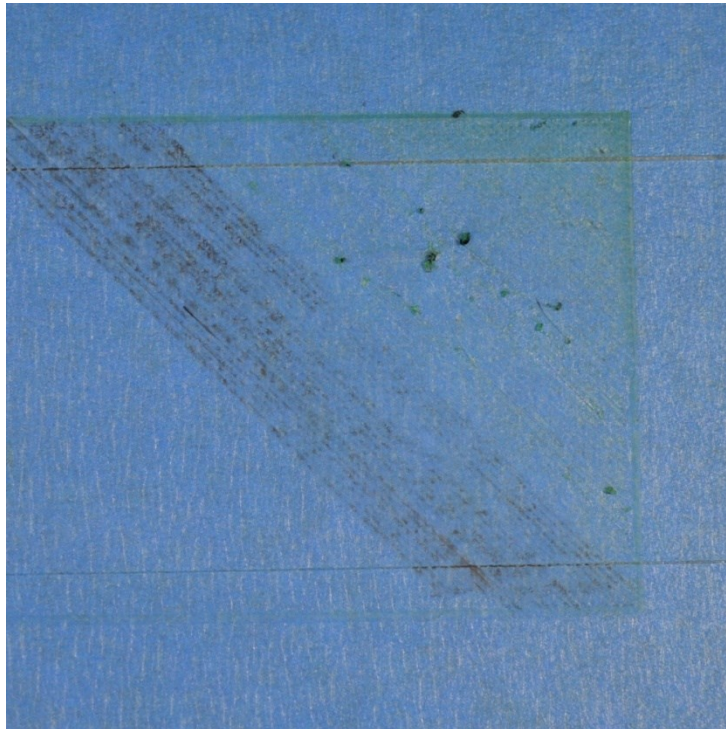
I když má 3D tisk technologií FFF nevýhody ve formě deformace, praskání a nižší kvality tisku má stále nejnižší náklady na 3D tisk ze všech additivních technologií.[14]

#### 4.1 Problémy při tisku metodou FFF

Při 3D tisku technologií FFF se setkáme s řadou problémů, proto bývá obtížné zjistit, co způsobuje problém a co je potřeba udělat, aby byl problém odstraněn. Některé problémy se

projeví během tisku, některé nemají vliv na výsledný výtisk, jiné vedou k selhání celého tisku. Je velmi deprimující, když se nedaří dosáhnout alespoň uspokojivého výsledku.[14]

#### 4.1.1 Tiskárna nezačne tisknout



obr. 22 zobrazení tiskové podložky, když tiskárna nezačne tisknout [30]

pokud extruder nevytlačuje polymer na začátku tisku, může to být z těchto důvodů[30]:

1. malá vzdálenost mezi tryskou a podložkou:

Když je tryska velmi blízko k podložce nemůže být materiál vytlačený z trysky, tryska se ucpává roztaveným polymerem.

Tento problém lze velmi jednoduše odhalit, první vrstvy nejsou vytištěny, materiál zůstává v trysce, při tisku dalších vrstev se zvětší vzdálenost trysky a podložky a tiskárna začne tisknout.

odstranění problému je možné buď zvětšit vzdálenost trysky a podložky mechanicky, posunutí dorazu osy Z, nebo v programu při generování řídicího g-codu nastavím offset osy Z.[30]

2. nedostatek materiálu v extrudéru

Po zahřátí extruderu na teplotu zpracování, začne materiál vytékat z trysky samovolně, tím vzniká v extrudéru bublina. Po spuštění tisku tiskárně chvíli trvá než se stabilizuje průtok materiálu tryskou a začne tisknout.



odstranění problému pomůže tisknout před začátkem tisku součásti tzv. skirt, který kopíruje tvar součásti v nastavené vzdálenosti. Při tisku skirtu se stabilizuje průtok materiálu extruderem a v první vrstvě neschází materiál. [30]

3. do extruderu není dodávána struna:

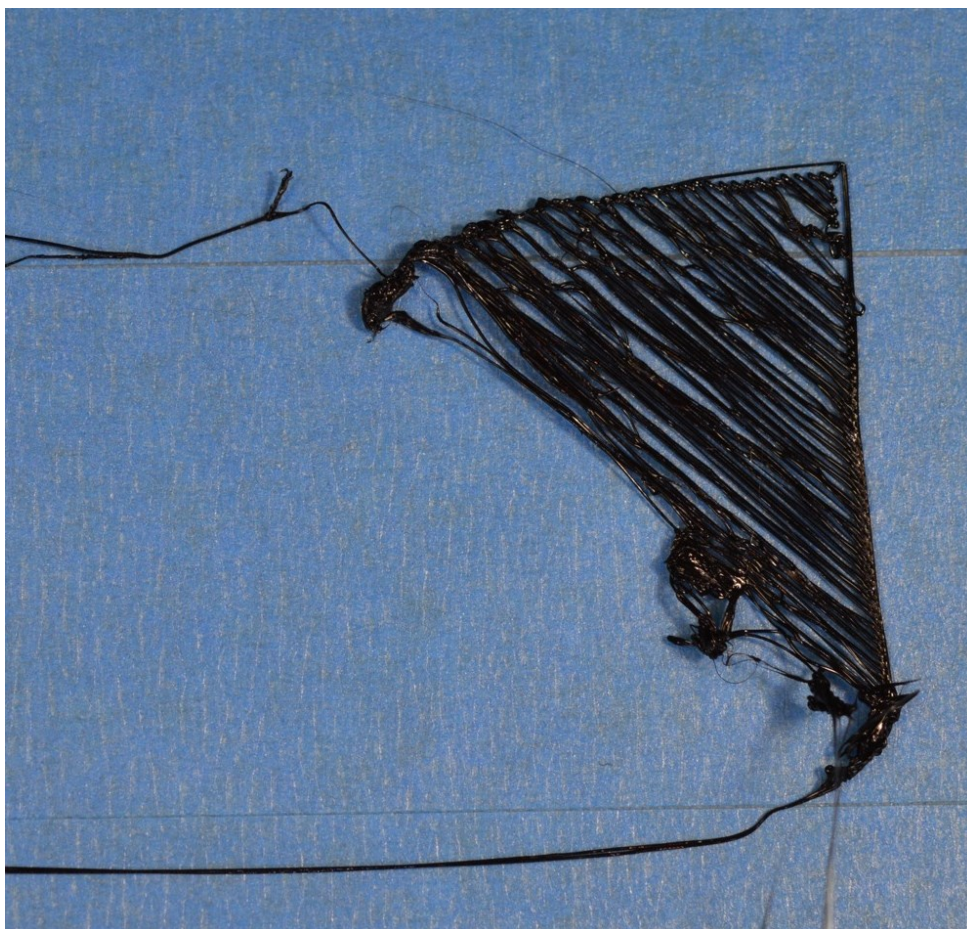
u většiny FFF tiskáren dodává strunu do extruderu malé zubaté kolečko na které dotlačí strunu přítlačné ložisko nebo druhé zubaté kolečko. Zuby na kolečku se zakusují do struny a posunují ji do extruderu. Pokud je kolem extruderu spousta malých hoblin, zubaté kolečko ohoblovalo filament a již není schopno dodávat filament do extruderu. [30]

4. ucpaná tryska:

Jestli tiskárna pořád netiskne, je zanesená tryska nečistotou nebo byl špatně zvolen průměr trysky.

Musí se tryska vyšroubovat z extruderu a mechanicky vyčistit.[30]

#### 4.1.2 První vrstva nepřilne k tiskové podložce



obr. 23 nepřilepená první vrstva na podložku[30]

Je velice důležité aby se první vrstva pořádně přilepila na podložku, protože je to základ výtisku a pokud první vrstva nedrží na podložce, tisk se nepodaří. Je řada možností jak zvýšit přilnavost první vrstvy k podložce [30]:

1. Křivá tisková podložka:

Většina tiskáren je vybavena polohovatelnou podložkou. Pokud se v některé z části podložky nepřilne vrstva k podložce, je nutné srovnat podložku. Je nutné, aby tisková podložka byla vyrovnaná co nejlépe.[30]

2. vzdálenost trysky a podložky je příliš velká:

stejný postup jako v 3.1.1 odstavec 1. , jen musí být zmenšena vzdálenost mezi tryskou a podložkou

3. nevhodně zvolené parametry tisku první vrstvy:

pokud je zvolena vysoká rychlost tisku první vrstvy, z trysky vytlačený polymer nemá potřebný čas aby se pořádně přilepil k podložce.

Pro odstranění problému musí být snížena rychlost tisku první vrstvy. [30]

4. vyhřívání podložky, chlazení výtisku:

Pokud se první vrstva dokonale nalepí na vyhřívanou podložku, ale při tisku dalších vrstev se výtisk z podložky výtisk uvolní je to kvůli nízké teplotě podložky a zapnutému ventilátoru pro chlazení výtisku. [30]

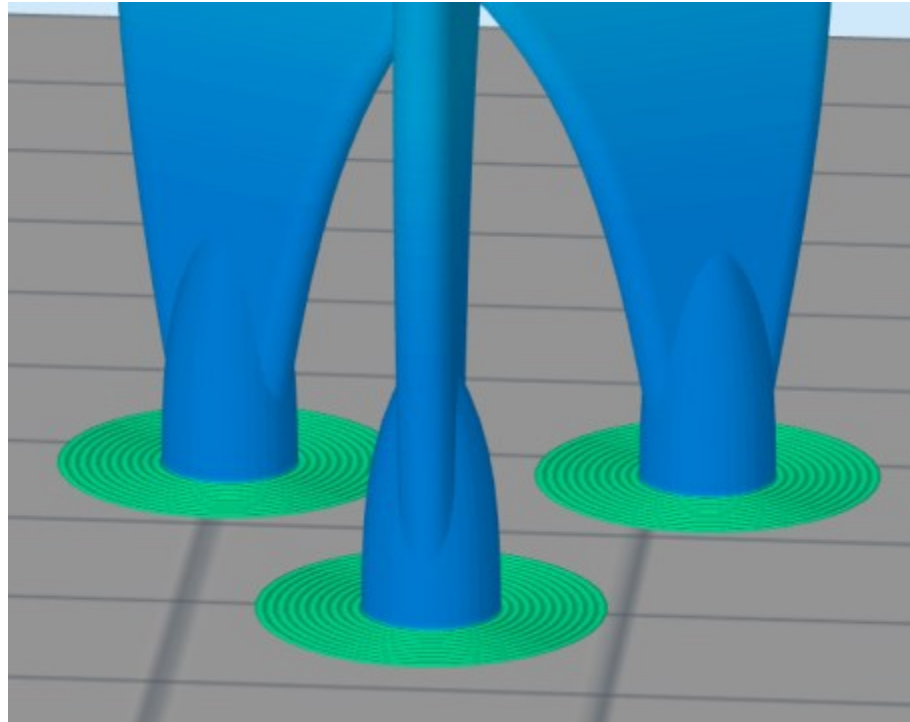
Odstranění postačí nastavit vyšší teplotu podložky a ventilátor chlazení výtisku vypnou na prvních pár vrstev poté jej zapnout, nebo jej vůbec nezapínat.[30]

5. úprava povrchu podložky:

materiály pro 3D tisk metodou FFF se lépe "přilepí" k vyhřívané podložce pokud povrch podložky před započítím tisku důkladně očistíme od nečistot, prach, mastnota nebo oleje, pomocí isopropyl alkoholu a poté na podložku nanese přípravek zlepšující "přilepení" polymeru na podložku. [30]

6. použití "brimu"

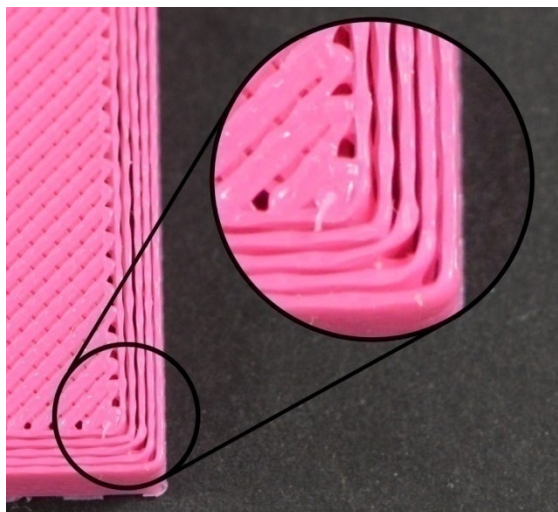
při tisku drobných dílů, které nemají dostatečnou plochu, která by držela na podložce je vhodné při tvorbě programu nastavit kolem této malé plochy tzv. brim viz obr.24 , do první vrstvy je automaticky přidáno pár prstenů okolo modelu a tím dojde ke zvětšení plochy, která se má přichytnout k podložce. [30]



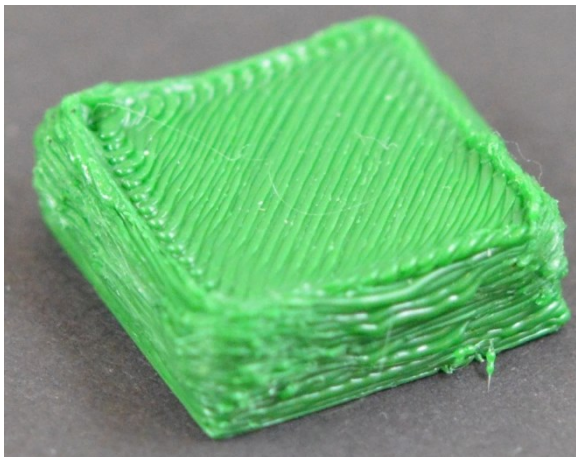
obr. 24 zobrazení brimu při simulaci tisku [31]

#### 4.1.3 Scházející nebo nadbytečný materiál ve výtisku

Tiskárna by měla vytlačovat nastavené množství materiálu z extruderu. FFF tiskárny nenabízí možnost informovat uživatele o tom kolik materiálu je vytlačováno z extruderu. Pokud vytlačí méně tak mezi vytlačenými housenkami jsou viditelné mezery viz obr. 25 , pokud extruder vytlačí více materiálu jsou na výtisku viditelné "přetoky" jednotlivých vrstev viz obr. 26. [30]



obr. 25 chybějící materiál ve výtisku [30]



obr. 26 přebývající materiál ve výtisku [30]

odstranit problém lze:

1. zohlednit průměr struny

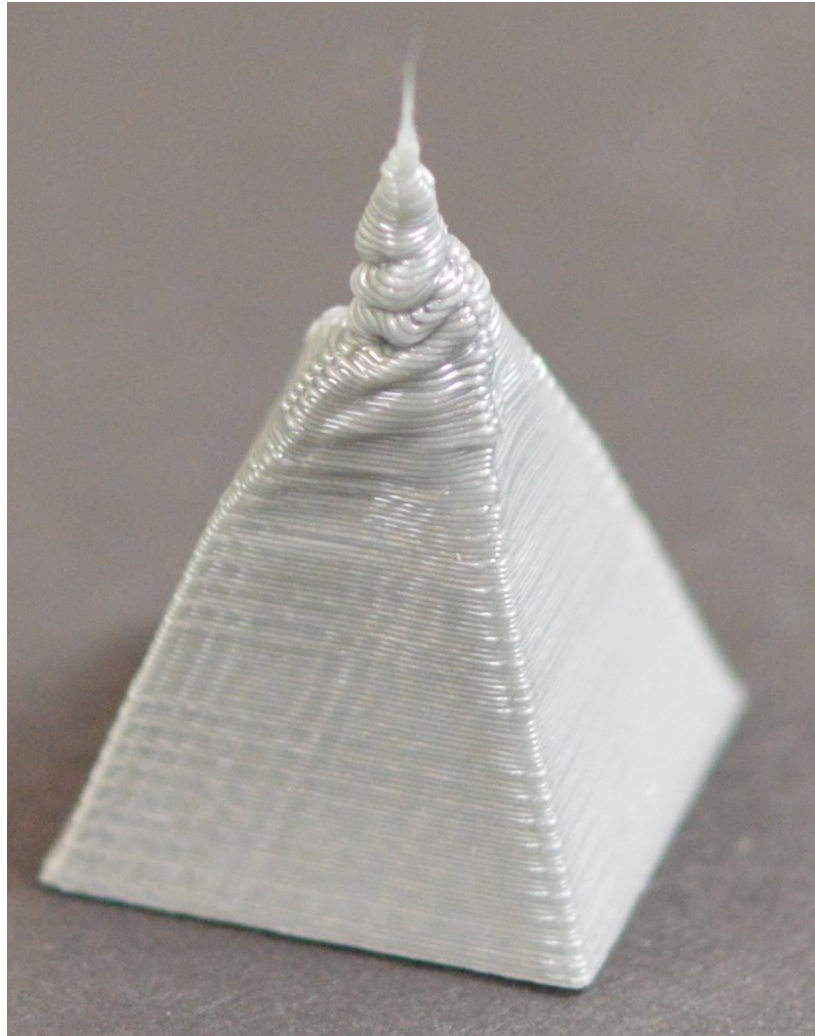
Pokud má struna jiný průměr než udává výrobce způsobí to, že ve výtisku schází nebo přebývá materiál. Je vhodné přeměřit průměr struny před tiskem mikrometrem a nastavit skutečný průměr do programu. [30]

2. snížit nebo zvýšit množství vytlačovaného polymeru.[30]
3. kontrola kalibrace FFF tiskárny podle pokynů od výrobce[30]

#### 4.1.4 Deformace výtisku z přehřátí

Teplota zpracování je závislá na použitém materiálu, většinou 190° - 250°C. Po vytlačení je materiál tvárný, po ochlazení se stane pevným. Při 3D tisku je nutné nastavit správně teplotu zpracování aby byl polymer vytlačen z extruderu a zároveň musí být ochlazen aby si uchoval požadovaný tvar a rozměry výtisku. Pokud nejsou parametry vhodně nastaveny vznikají problémy s kvalitou tisku. [30]

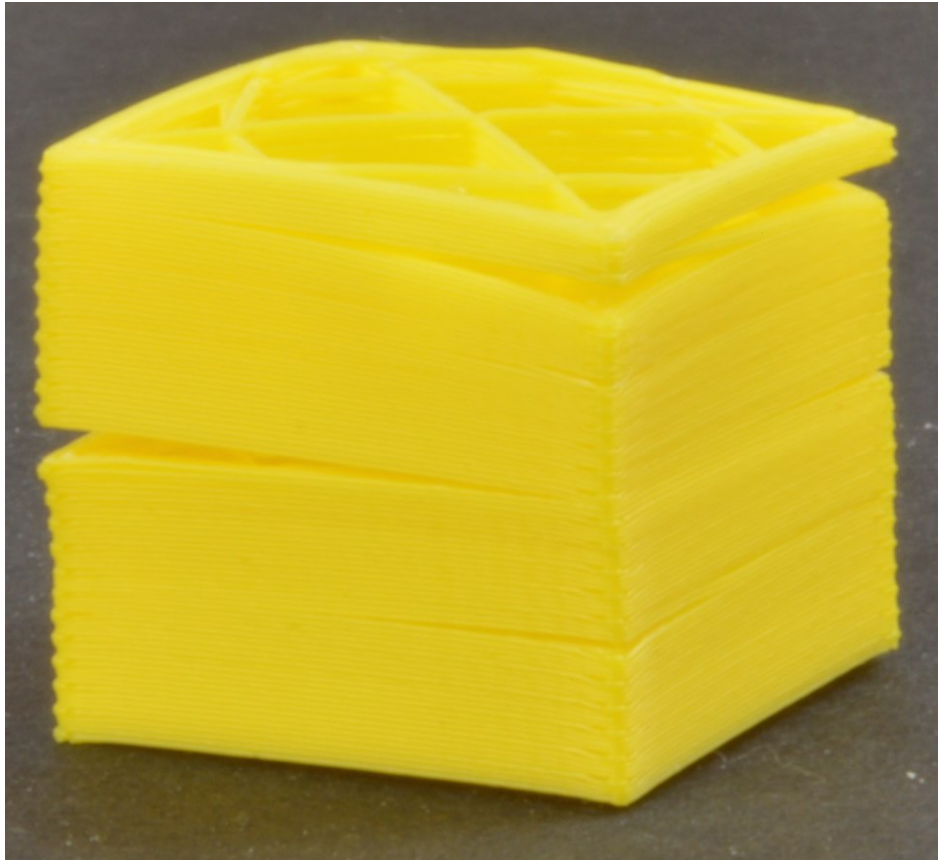
Zlepšit kvalitu tisku lze zvýšením intenzity chlazením, snížením teploty zpracování, snížením rychlosti tisku.[30]



obr. 27 deformace výtisku přehřátím [30]

#### 4.1.5 separace a rozdělení vrstev

FFF tiskárna vytváří výsledný objekt tiskem jednotlivých vrstev na sebe dokud nevytvoří požadovaný tvar. Aby výsledná součást homogenní je nutné aby jednotlivé vrstvy byly spojeny (slepeny), jinak dochází k oddělení vrstev viz obr.28. [30]



obr. 28 oddělení jednotlivých vrstev výtisku [30]

Zlepšit spojení vrstev lze zvýšením teploty zpracování nebo úpravou tloušťky vrstvy. Výška vrstvy by měla být minimálně o 20% menší než průměr použité trysky. [30]

## 5 MATERIÁLY PRO ADDITIVNÍ TECHNOLOGII FFF

Aditivní technologie 3D tisku FFF využívá téměř všechny druhy termoplastů. Jediné omezení je teplota zpracování a toxicita termoplastu. [17]

Polotovar pro 3D tiskárny je ve formě struny vytlačené na vytlačovacím stroji. Standardními průměry strun jsou 1,75mm a 3mm. Velmi důležité je aby průměr struny byl co nejpřesnější, skutečný průměr vlákna velmi ovlivňuje výslednou kvalitu výtisku. Tohoto jsou si vědomi i výrobci strun a dodržují toleranci průměru struny  $\pm 0,05\text{mm}$  [17]

### 5.1 PLA

Biopolymer kyseliny mléčné. Velmi dobře se zpracovává. Nevýhodou je nízká teplota skelného přechodu, od  $50^{\circ}\text{C}$  vznikají tvarové deformace, a velmi špatná obrobiteľnosť. [18]

Tabulka 1 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PLA [20]

Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro PLA:	
Teplota zpracování [ $^{\circ}\text{C}$ ]:	190 ÷ 210
Teplota vyhřívání podložky [ $^{\circ}\text{C}$ ]:	40 ÷ 60
Rychlosti tisku [mm/s]:	30 ÷ 40

#### 5.1.1 HD PLA

HD PLA je varianta PLA, tiskne se stejně jako PLA, která odolává vysokému teplotnímu namáhání a má lepší odolnost proti nárazu. Tyto vlastnosti získá po žihání v komorové peci při teplotě  $80 \div 100^{\circ}\text{C}$  po dobu 15minut. Pro objemnější výtisky se délka výdrže na teplotě prodlužuje. Do komorové pece musí být výtisk umístěn až po úplném zhládnutí na podložce a se všemi podporami s kterými byl vytisknut. [19]

### 5.2 ABS

Kopolymer složený ze tří skupin: akrylonitril, butadien a styren. Poměr těchto skupin určuje výsledné vlastnosti ABS.

ABS je zdravotně nezávadné, velmi dobře se zpracovává a opracovává, má dobré mechanické vlastnosti a je to velmi dobrý elektrický izolant. Nevýhodou je že není UV resistantní a při působení UV záření žloutne. [18]

Tabulka 2 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál ABS [21]

Doporučené nastavení tiskárny pro ABS:	
Teplota zpracování [°C]:	220 ÷ 240
Teplota vyhřívané podložky [°C]:	90 ÷ 100
Rychlosti tisku [mm/s]:	30 ÷ 40

### 5.3 Nylon

Polyamid vyznačující se funkční amidovou skupinou -NH-CO. Jedná se o semikrystalický polymer s vysokou smrštitivostí, vysokou nasákavostí (až 10%). 3D tisk používá PA6 nebo PA66, který je pevný s vysokou rázovou houževnatostí a s vysokou odolností vůči otěru. [18]

Tabulka 3 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál nylon [22]

Doporučené nastavení tiskárny pro Nylon:	
Teplota zpracování [°C]:	235 ÷ 250
Teplota vyhřívané podložky [°C]:	80 ÷ 100
Rychlosti tisku [mm/s]:	30 ÷ 40

### 5.4 PMMA

Polymethylmetakrylát, spíše známý jako "plexisklo". Materiál odolný vůči povětrnostním vlivům, propouští UV záření, má dobré elektroizolační vlastnosti, odolává vyšším teplotám. [19]

Tabulka 4 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PMMA [23]

Doporučené nastavení tiskárny pro PMMA:	
Teplota zpracování [°C]:	220 ÷ 250
Teplota vyhřívané podložky [°C]:	110
Rychlosti tisku [mm/s]:	20 ÷ 40



## 5.5 PET-G

Polyethyltereftalát-glykol - termoplastický polyester odolný vůči kyselinám a rozpouštědům, vysokým a nízkým teplotám. [19]

Tabulka 5 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PET-G [24]

Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro PET-G:	
Teplota zpracování [°C]:	220 ÷ 250
Teplota vyhřívané podložky [°C]:	70 ÷ 80
Rychlosti tisku [mm/s]:	30 ÷ 40

## 5.6 Polykarbonát - PC

3D tisk polykarbonátu je velmi obtížný pomocí FFF technologie. Výtisk velmi špatně drží na podložce a díky vysoké teplotní roztažnosti se při chladnutí deformuje a praská. [25]

Tabulka 6 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PC [26]

Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro PC:	
Teplota zpracování [°C]:	250 ÷ 300
Teplota vyhřívané podložky [°C]:	100 ÷ 130
Rychlosti tisku [mm/s]:	15 ÷ 50

### 5.6.1 PC-PBT

Polykarbonát ve spojení s polybutylenem tereftalátem lze tisknout technologií FFF, má vysokou rozměrovou stabilitu protože PBT má nízký koeficient tepelné roztažnosti a nízkou nasákavost vody.

Tabulka 7 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PC-PBT [27]

Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro PC-PBT:	
Teplota zpracování [°C]:	220 ÷ 250
Teplota vyhřívané podložky [°C]:	80 ÷ 100
Rychlosti tisku [mm/s]:	15 ÷ 30

### 5.6.2 PC-ABS

Polykarbonát s akrylonitributadienstyrenem spojuje vlastnosti obou dvou termoplastů. Má vyšší odolnost proti rázům při nízkých teplotách. Je dobře obrobitelný. Má vyšší tepelnou odolnost. [28]

Tabulka 8 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PC-ABS [29]

Doporučené nastavení tiskárny pro PC-ABS:	
Teplota zpracování [°C]:	220 ÷ 240
Teplota vyhřívané podložky [°C]:	90 ÷ 100
Rychlosti tisku [mm/s]:	30 ÷ 40

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

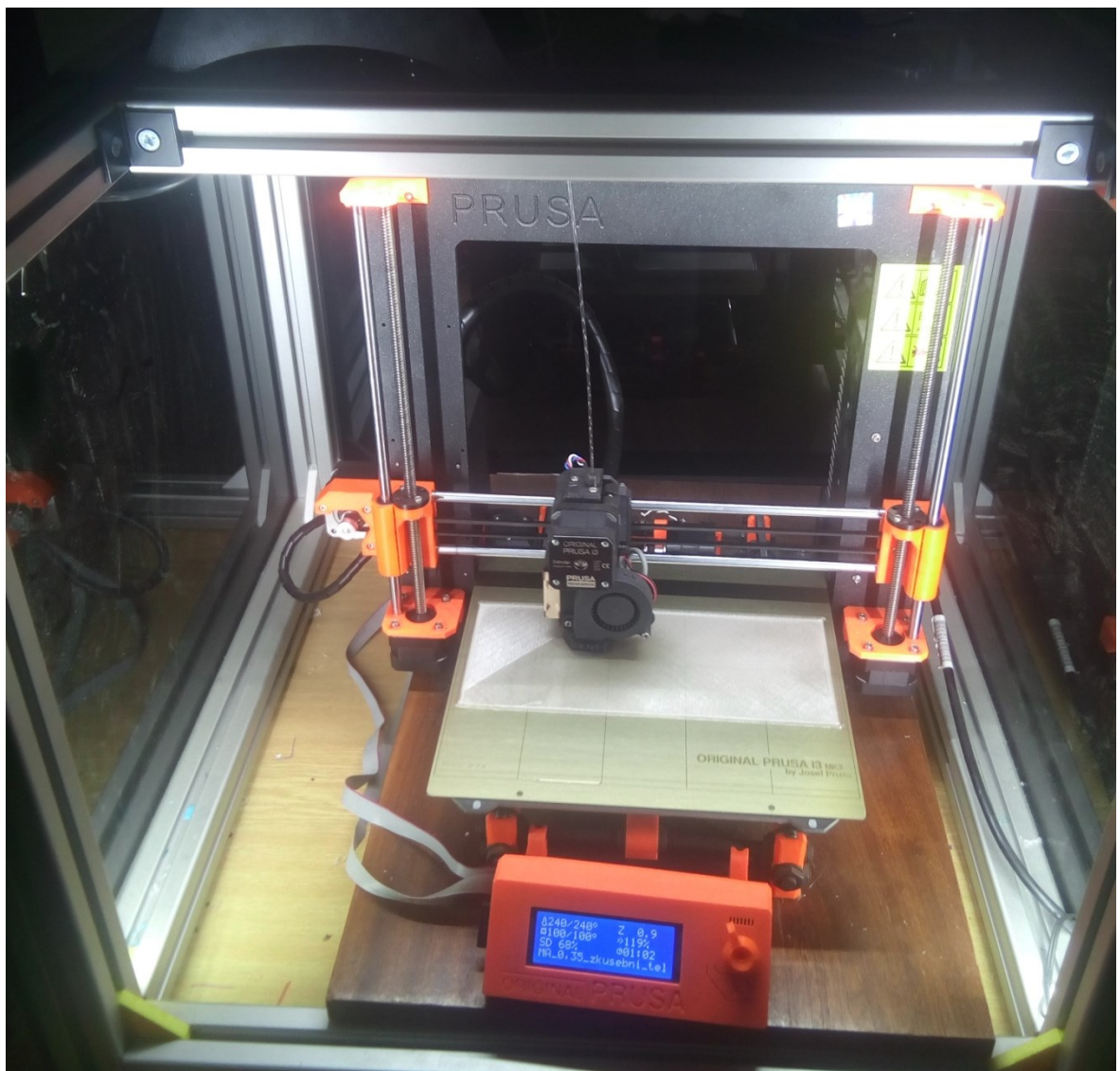
## 6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ DLE CS23.853

Využití aditivní technologie FFF pro tisk dílců užitých do interiérů letounu je zamýšleno pro tisk drobných dílců jako jsou rukojeti, knoflíky, držáky, spony, průchodky.

Vzhledem k tomu že v letounu jsou tyto drobné dílce zastoupeny po kusu a vyrábět lisovací nástroj při výrobě by bylo velmi nákladné je ekonomicky výhodnější tyto dílce tisknout na 3D tiskárně.

### 6.1 RepRap 3D tiskárna Průša i3 MK2,5

Zkušební vzorky byly tištěny na RepRap FFF 3D tiskárně Průša MK2,5. Verze MK2,5 vychází z verze MK2S, je přidán snímač filamentu a výměnná tisková podložka.



obr. 29 RepRAP FFF 3D tiskárna Průša i3 MK2,5

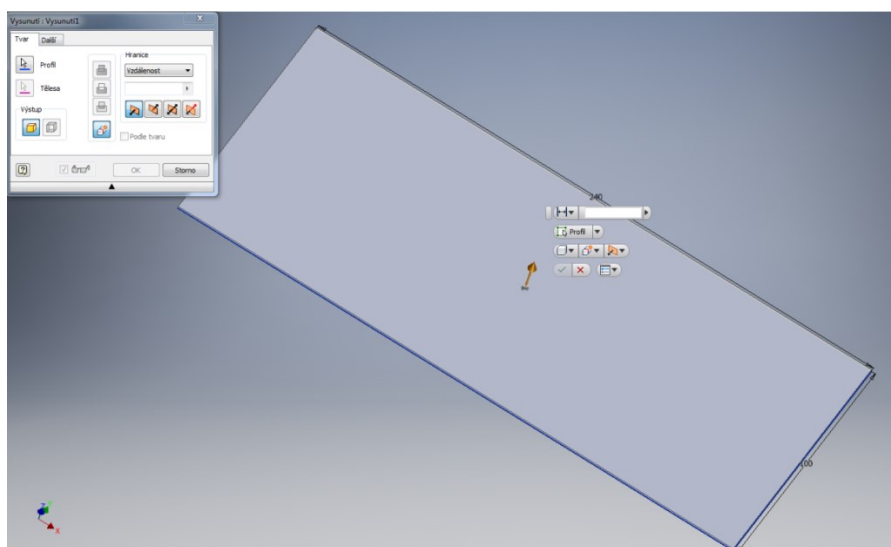
## 6.2 Technická parametry 3D tiskárny i3 MK2,5

Velikost pracovního prostoru:	250x210x200 mm
Počet extruderů:	1ks
Přesnost:	±0,1 mm
Minimální tloušťka vrstvy:	0,05
Minimální velikost trysky:	0,25
Maximální rychlost tisku:	150 mm/s
Průměr používaného materiálu:	1,75mm
Vyhřívaná podložka:	MK52 s pružným ocelovým tiskovým platem
Elektronika:	Mini-Rambo v1.3a

## 6.3 Návrh zkušebního tělesa

Dle předpisu CS23 má být materiál určený pro tyto dílce zkoušen vodorovně viz kap. 1.1. Tloušťka vzorku maximálně 3mm. Předpis udává, že minimální délka vzorku by měla být 300mm a minimální šířka by měla být 50mm. Takto veliký vzorek nelze v kuse vytisknout na zvolené tiskárně. Jelikož skutečná součást bude menší než uvedená velikost vzorku, zmenšil jsme rozměry vzorku na 240 x 100 mm.

K vytvoření modelů byl použit software Autodesk Inventor 2017. Zkušební vzorky byly vytištěny na rerap 3D tiskárně Průša MK2,5



obr. 30 vytvoření modelu zkušebního tělesa

## 6.4 Výroba zkušebních těles

Nejprve bylo nutné z dostupných materiálů vybrat ty, u kterých výrobce udává, že daný materiál má vyšší odolnost vůči působením teploty. Na základě tohoto požadavku byly vybrány materiály:

- ABS extrafill výrobce Filamentum
- HD PLA výrobce Fiberlogy
- PC-PBT výrobce HERZ
- Nylon FX256 výrobce Filamentum
- PMMA výrobce Plasty Mladeč

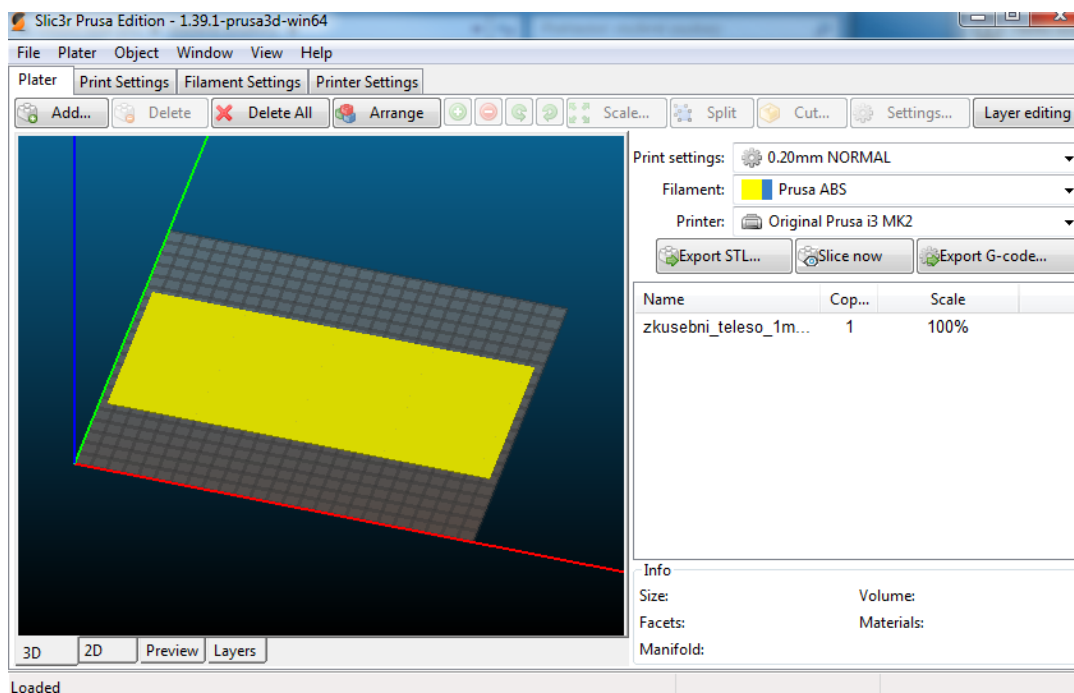
### 6.4.1 Nastavení parametrů tisku

Prusa3D Slic3r MK2 je software, který rozřeže 3D model na vrstvy a podle nastavených parametrů vygeneruje řídicí G-kód pro tisk daného modelu, zkušebního tělesa.

Jako první byl do SW importován model do ve formátu \*.stl (obr. 31).

V úvodní záložce Plater byly nastaveny základní parametry:

- Print setting - základní výběr způsobu vrstvení při tisku
- Filament - výběr z přednastavených materiálů
- Printer - volba tiskárny



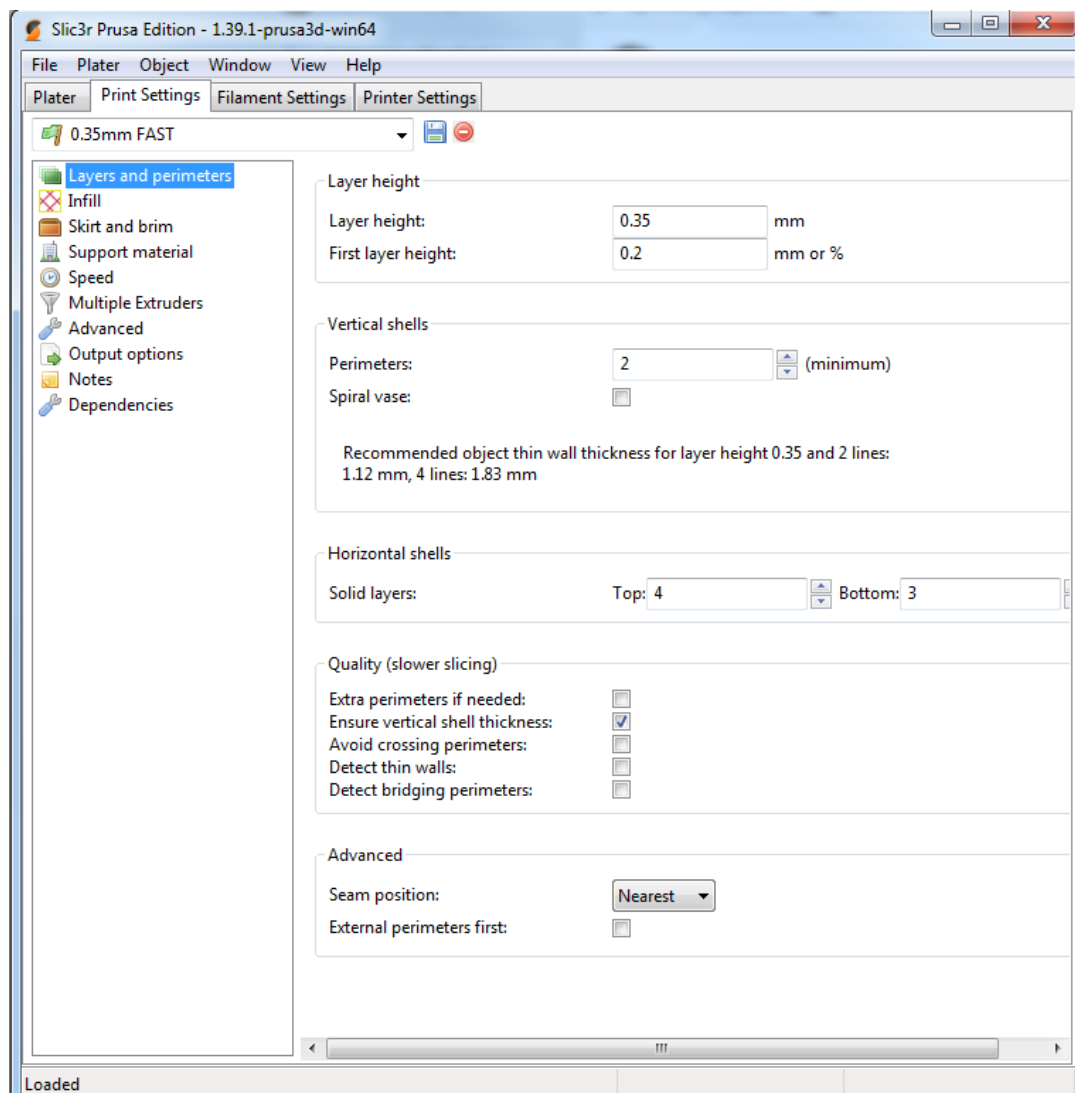
obr. 31 Prusa3D Slic3r MK2

Dále byly upraveny parametry pro tisk jednotlivých materiálů v záložce Filament Settings a Print Setting.

Záložka Print Settings je členěna na jednotlivé sekce nastavení:

**Layers and perimeters** obr. 32- Vrstvy a obvod , nastavované parametry:

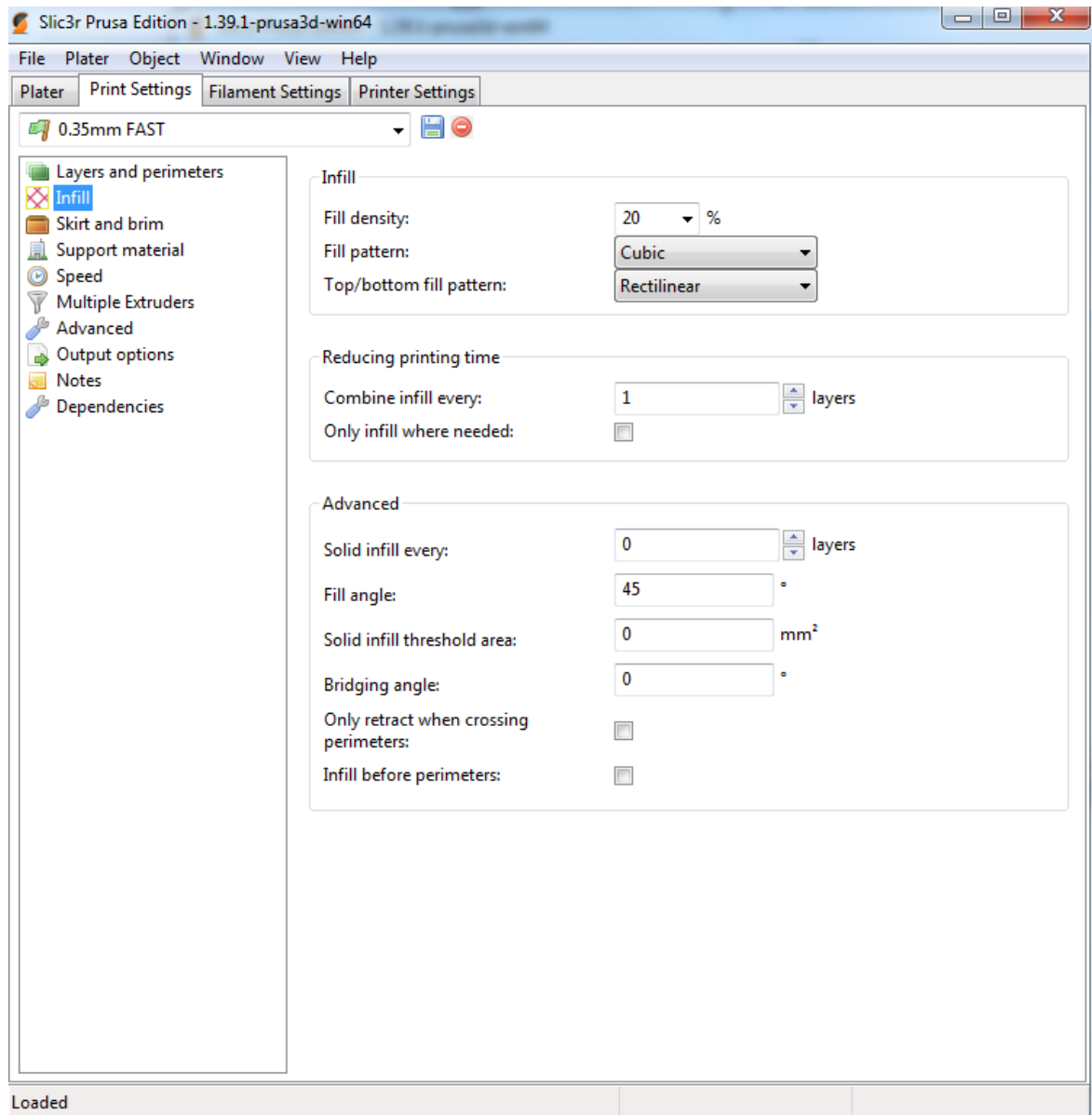
- Layer Height - výška vrstvy [mm]
- first layer height - výška první vrstvy [mm]
- Perimeters - počet vnějších linek
- Solid layers top - počet horních vrstev
- Solid layers bottom - počet dolních vrstev



obr. 32 nastavení vrstvy v Prusa3D Slic3r MK2

**Infill** obr. 33 - výplň, nastavované parametry výplně výtisku:

- Fill density - hustota vnitřní výplně [%]
- Fill pattern - způsob výplně
- Top/bottom fill pattern - způsob výplně spodní a horní vrstvy
- Fill angle - úhel výplně [°]

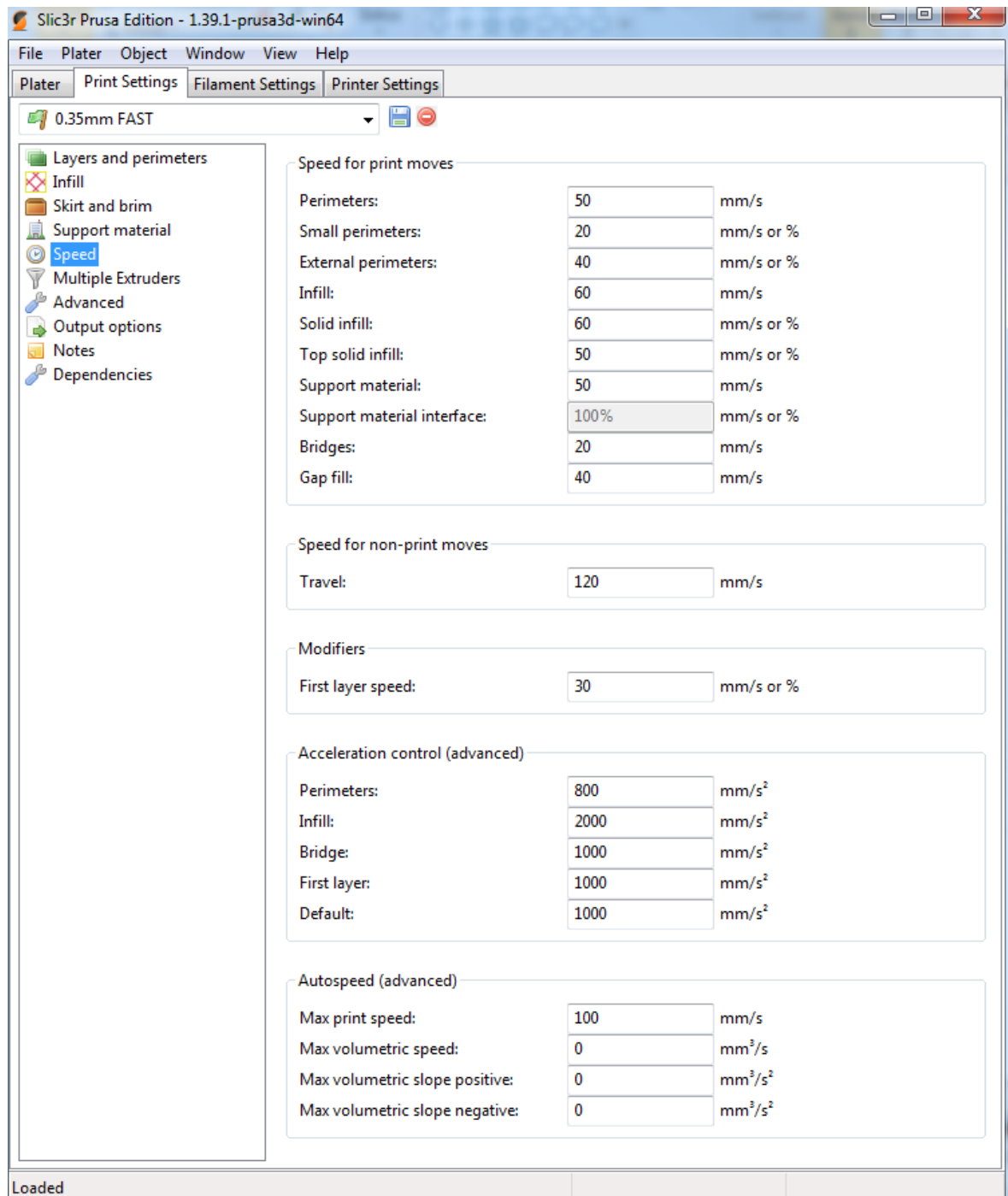


obr. 33 nastavení výplně v Prusa3D Slic3r MK2



**Speed** obr. 34 - rychlost, nastavované parametry rychlosti tisku jednotlivých částí:

- External perimeters - rychlost tisku vnějšího obvodu [mm/s]
- Infill - rychlost tisku výplně [mm/s]
- First layer speed - rychlost tisku první vrstvy [mm/s]

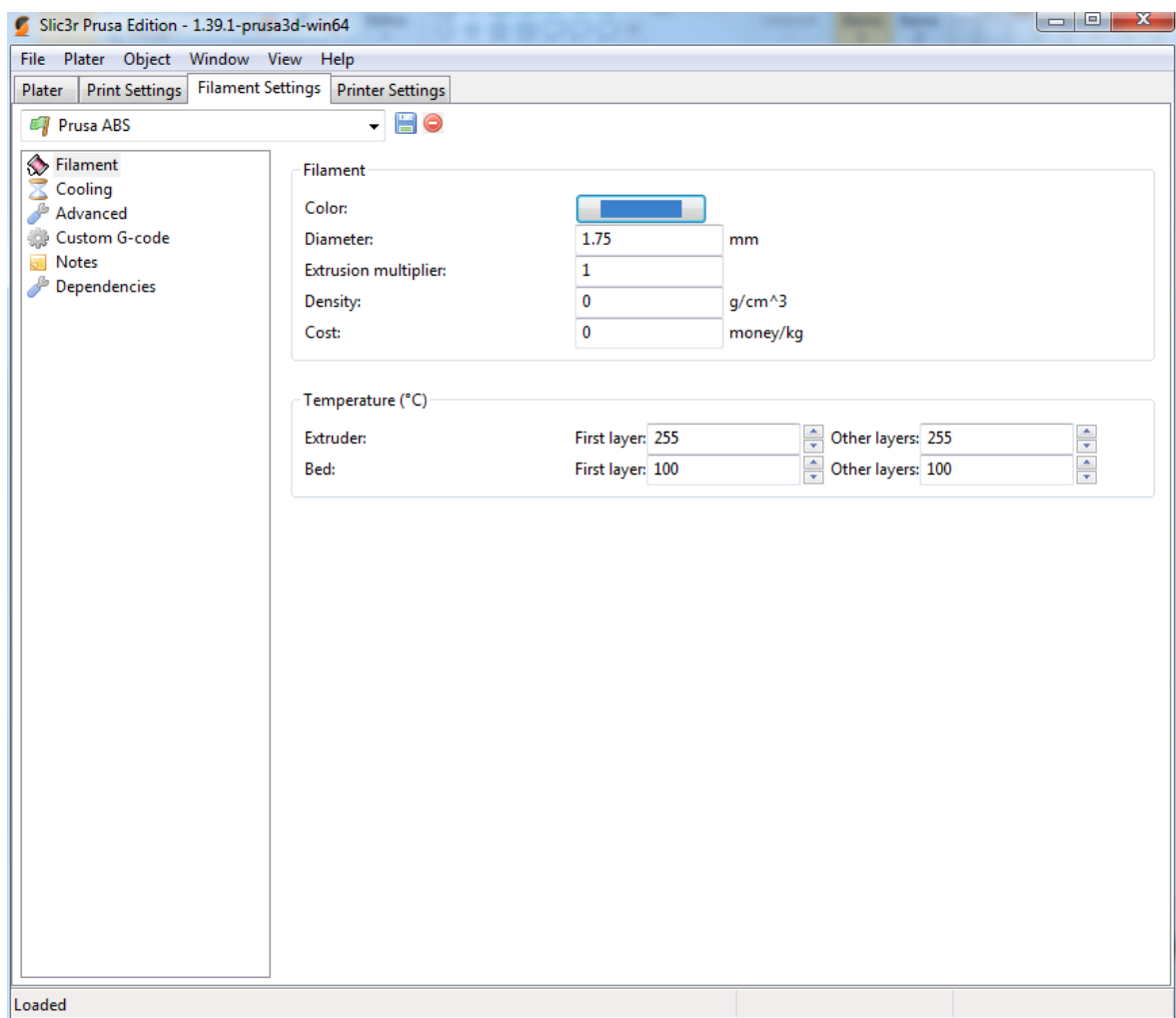


obr. 34 nastavení rychlosti tisku v Prusa3D Slic3r MK2

Záložka Filament Settings je členěna na jednotlivé sekce nastavení:

**Filament** obr. 35 - tisková struna, upravovány parametry:

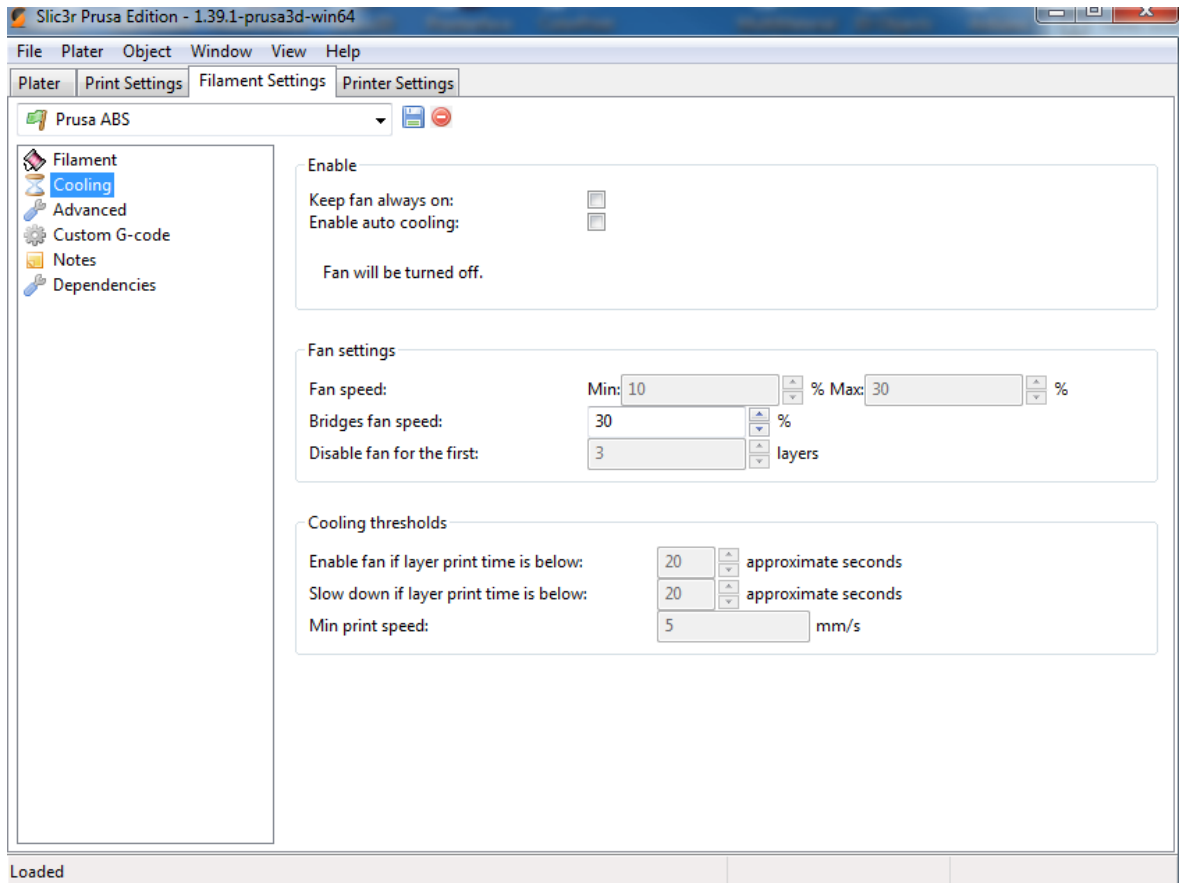
- Diametr - průměr tiskové struny [mm]
- Temperature - teplota:
  - extruder first layer, other layers - teplota extruderu při tisku první vrstvy a při tisku dalších vrstev
  - bed first layer, other layers - teplota tiskové podložky při tisku první vrstvy a při tisku dalších vrstev



obr. 35 nastavení parametrů filamentu v Prusa3D Slic3r MK2

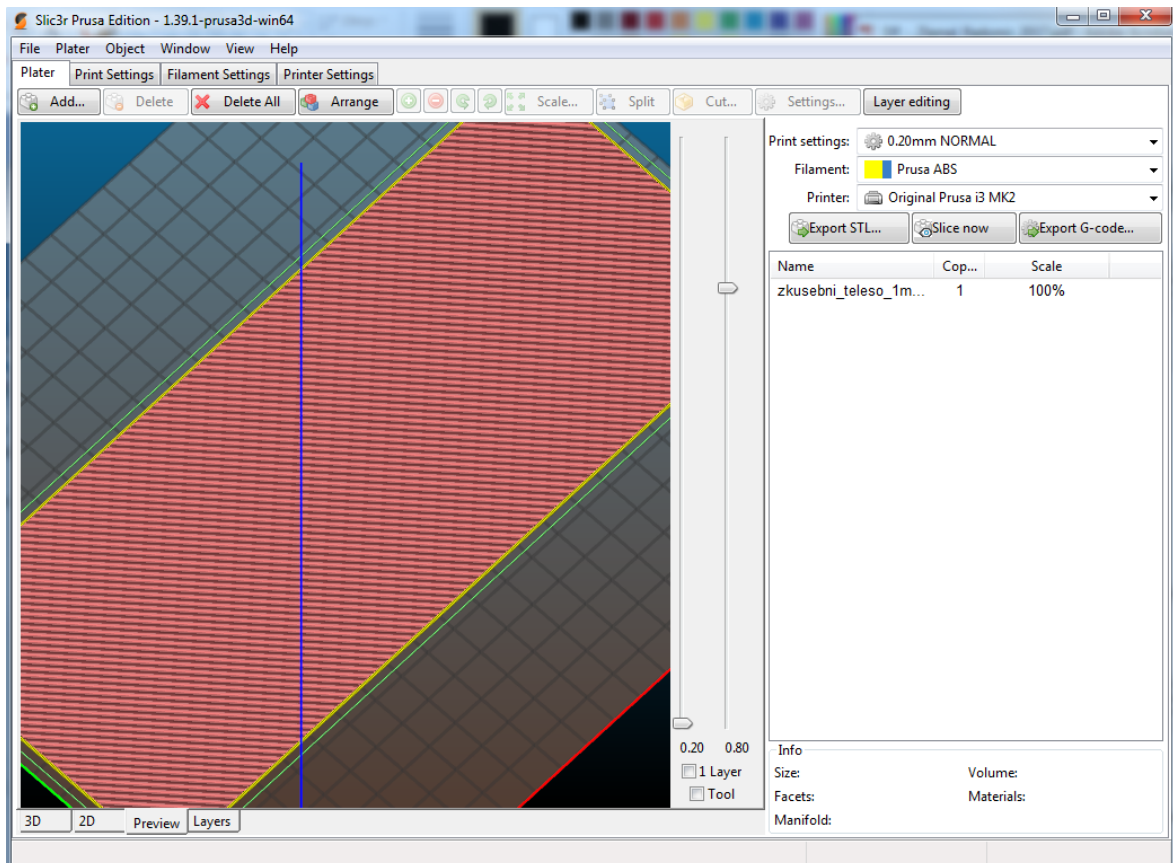
**Cooling** obr. 36 - chlazení, upravovány parametry pro chlazení výtisku v průběhu tisku:

- Keep fan always on - ventilátor chlazení výtisku vždy zapnutý
- Fan speed - rychlost ventilátoru chlazení výtisku [%]



obr. 36 nastavení chlazení výtisku v Prusa3D Slic3r MK2

Po nastavení všech potřebných parametrů je na úvodní záložce zvolena volba "Slice now", SW vygeneruje G-kód a je možné se podívat, jak jsou jednotlivé vrstvy naprogramovány ve spodní kartě "Preview" obr. 37. Po kontrole programu, byl G-kód exportován do uložště pomocí tlačítka "export G-code" umístěném na záložce Plater. Z úložiště byl nahrán na SD kartu.



obr. 37 simulace 3D tisku v Prusa3D Slic3r MK2

#### 6.4.2 Příprava tiskárny před tiskem

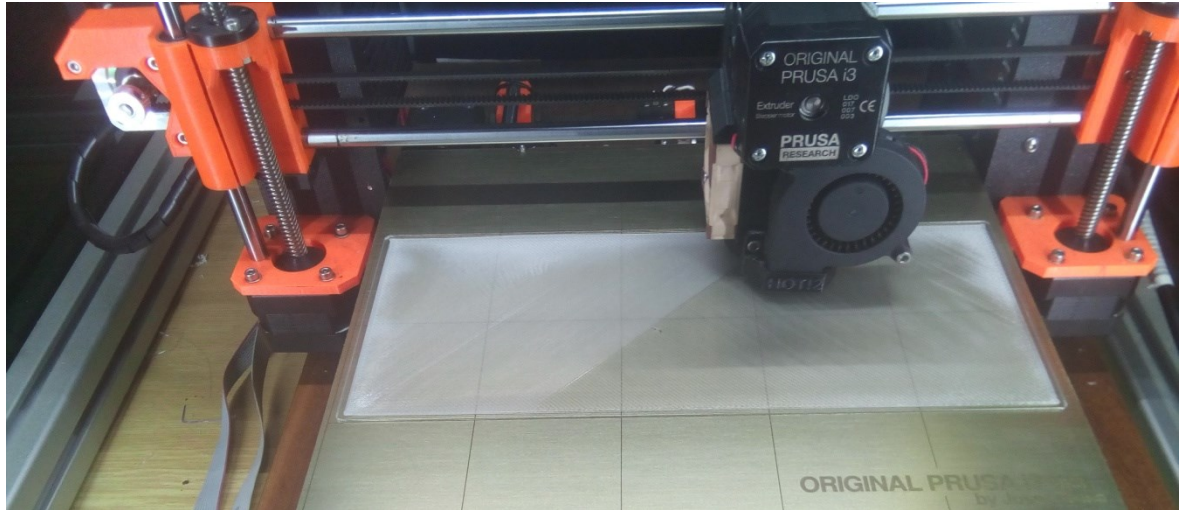
Před započítím tisku, byla tisková podložka důkladně očištěna isopropylalkoholem. Poté byl na podložku nanesen přípravek 3DLAC zvyšující adhezi vytlačeného materiálu k položce. Tento přípravek byl zvolen na základě předchozích zkušeností, výtisky drží na tiskové podložce, neodlepují se. Použitím přípravku 3DLAC eliminujeme možné selhání tisku vlivem odlepení výtisku od podložky.



obr. 38 sprej pro zvýšení adheze

### 6.4.3 Tisk zkušebních těles

Do slotu v ovládacím panelu tiskárny byla vložena SD karta s vygenerovaným G-kódem a byl spuštěn tisk. Zkušební tělesa byla tisknuta každá samostatně obr. 39.



obr. 39 tisk zkušebního tělesa

### 6.4.4 Vytisknuté zkušební tělesa

Zkušební tělesa obr. 40 nebyla po tisku nijak mechanicky upravena. Na zkušební tělesa nebyla nanášena žádná chemická látka, která by ovlivnila výsledek zkoušek.



obr. 40 vytisknutá zkušební tělesa

## 7 PROVEDENÍ ZKOUŠEK

### 7.1 Použité zařízení

při zkouškách byly použity následující přístroje, přípravky, kontrolní zařízení:

- klimatizační komora VUK 08/1000 vybavená externím dataloggerem snímající teplotu a vlhkost v komoře. Platnost kalibrace dataloggeru do září 2018
- polystyrenová krabice pro přenos vzorků
- zkušební komora s nevynuceným odtahem 1150\*850\*1500mm s digestoří DG1 vybavená držákem vzorků a Bunsenovým kahanem
- termočlánekový pyrometr: Testoterm 4510, termočlánek NiCr-Ni typ T99F539, platnost kalibrace červenec 2018
- stopky heuer, platnosti kalibrace listopad 2018
- posuvné měřidlo, platnost kalibrace leden 2019

### 7.2 příprava zkoušky

24 hodin předem plánovaným provedením zkoušky byly nutné provést:

1. do klimatizační komory VUK byly umístěny zkušební vzorky.
2. byl upozorněn podnikový hasičský sbor na nutnost přítomnosti hasiče při provádění zkoušky, při zkoušce je používán otevřený plamen

v den zkoušky byly provedeny před zkouškou následující úkony:

1. školení požární bezpečnosti a BOZP pracovníků provádějících zkoušku
2. umístění vzorku do držáku
3. nastavení vzdálenosti 19mm od spodní hrany kahanu ke vzorku



obr. 41 příprava zkušebního prostoru

4. nastavení výšky plamene na Bunsenově kahanu na předepsaných 38mm pomocí regulace množství plynu.
5. ověření teploty plamene pomocí pyrometru, předepsána minimální teplota 843°C. teplota plamene viz obr. 42



obr. 42 zobrazení teploty plamene

### 7.3 provedení zkoušky

Jednotlivé vzorky byly postupně vystavovány plamenu. Na držáku vzorku je vyznačena vzdálenost 38mm, aby bylo zřejmé kdy mají být zapnuty stopky pro měření rychlosti hoření.

Postup zkoušky:

1. vyjmutí vzorku z klimatizační komory a uchycení do držáku ve zkušební komoře
2. umístění plamene na hranu vzorku a sepnutí stopek - měření působení plamenu 15sekund, obr. 43.
3. po 15 sekundách oddálení plamene, sledování kdy dojde k prohoření ke značce 38mm, sepnutí stopek pro měření délky hoření, max. 60 sekund. Sledování zdali odkapává materiál a jestli odkápnutý materiál hoří a jak dlouho hoří, obr. 44.
4. po 60ti sekundách případné vynucené zahašení
5. měření spálené plochy
6. vyjmutí spáleného vzorku, upnutí nového, odstranění odkapaného materiálu



obr. 43 krok zkoušky č.2





obr. 44 krok zkoušky č.3

#### 7.4 výsledky zkoušky

Na obr. 45 je vyobrazeno jak vypadají vzorky jednotlivých materiálů po zkoušce. Výsledky zkoušky pro každý materiál jsou uvedeny v tabulkách 9 až 13.



obr. 45 vzorky po zkoušce

Tabulka 9 výsledky zkoušky pro materiál č.1

materiál č.1	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5
doba působení plamene [s]	15	15	15	15	15
doba hoření po oddálení plamene [s]	60	60	60	60	60
způsob zahašení	vynuceně	vynuceně	vynuceně	vynuceně	vynuceně
odkapává roztavený materiál?	ano	ano	ano	ano	ano
doba hoření kapky [s]	5	8	6	6	7
délka spálené plochy [mm]	155	161	154	150	164

Tabulka 10 výsledky zkoušky pro materiál č.2

materiál č.2	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5
doba působení plamene [s]	15	15	15	15	15
doba hoření po oddálení plamene [s]	60	60	60	60	60
způsob zahašení	vynuceně	vynuceně	vynuceně	vynuceně	vynuceně
odkapává roztavený materiál?	ano	ano	ano	ano	ano
doba hoření kapky [s]	2	3	1	2	2
délka spálené plochy [mm]	83	84	81	80	84

Tabulka 11 výsledky zkoušky pro materiál č.3

materiál č.3	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5
doba působení plamene [s]	15	15	15	15	15
doba hoření po oddálení plamene [s]	0	0	0	0	0
způsob zahašení	samovolně	samovolně	samovolně	samovolně	samovolně
odkapává roztavený materiál?	ne	ano	ano	ne	ne
doba hoření kapky [s]	-	0	0	-	-
délka spálené plochy [mm]	0	0	0	0	0

Tabulka 12 výsledky zkoušky pro materiál č.4

materiál č.4	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5
doba působení plamene [s]	15	15	15	15	15
doba hoření po oddálení plamene [s]	60	60	60	60	60
způsob zahašení	vynuceně	vynuceně	vynuceně	vynuceně	vynuceně
odkapává roztavený materiál?	ano	ano	ano	ano	ano
doba hoření kapky [s]	0	0	0	0	0
délka spálené plochy [mm]	50	48	55	54	55

Tabulka 13 výsledky zkoušky pro materiál č.5

materiál č.5	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.3	vzorek č.4	vzorek č.5
doba působení plamene [s]	15	15	15	15	15
doba hoření po oddálení plamene [s]	60	60	60	60	60
způsob zahašení	vynuceně	vynuceně	vynuceně	vynuceně	vynuceně
odkapává roztavený materiál?	ano	ano	ano	ano	ano
doba hoření kapky [s]	3	5	5	4	5
délka spálené plochy [mm]	40	43	42	45	42

## 7.5 Vyhodnocení výsledků zkoušky dle CS23.853

### 7.5.1 Materiál č.1

Všech 5 kusů vzorků z materiálu č.1 muselo být po 60sekundách nuceně zahašeno, odkapávající kapky hořeli po odkápnutí v průměru 6,4sekundy. Průměrná délka spálené plochy 157mm.

Materiál je nevyhovující dle CS23.853

### 7.5.2 Materiál č.2

Všech 5 kusů vzorků z materiálu č.2 muselo být po 60sekundách nuceně zahašeno, odkápnuté kapky hořeli po odkápnutí v průměru 2 sekundy. Průměrná délka spálené plochy 82,4mm.

Materiál je nevyhovující dle CS23.853

### 7.5.3 Materiál č.3

U všech 5ti kusů vzorků z materiálu č.3 došlo ihned k samovolnému zahašení plamene ještě v krajní oblasti vzorku před započítáním měření času rychlosti hoření. Odkápnuté kapky ihned samovolně zhasnuly.

Materiál je vyhovující dle CS23.853

### 7.5.4 Materiál č.4

Všech 5 kusů vzorků z materiálu č.4 muselo být po 60sekundách nuceně zahašeno. Odkápnuté kapky ihned samovolně zhasnuly. Průměrná délka spálené plochy 52,4mm.

Materiál je nevyhovující dle CS23.853

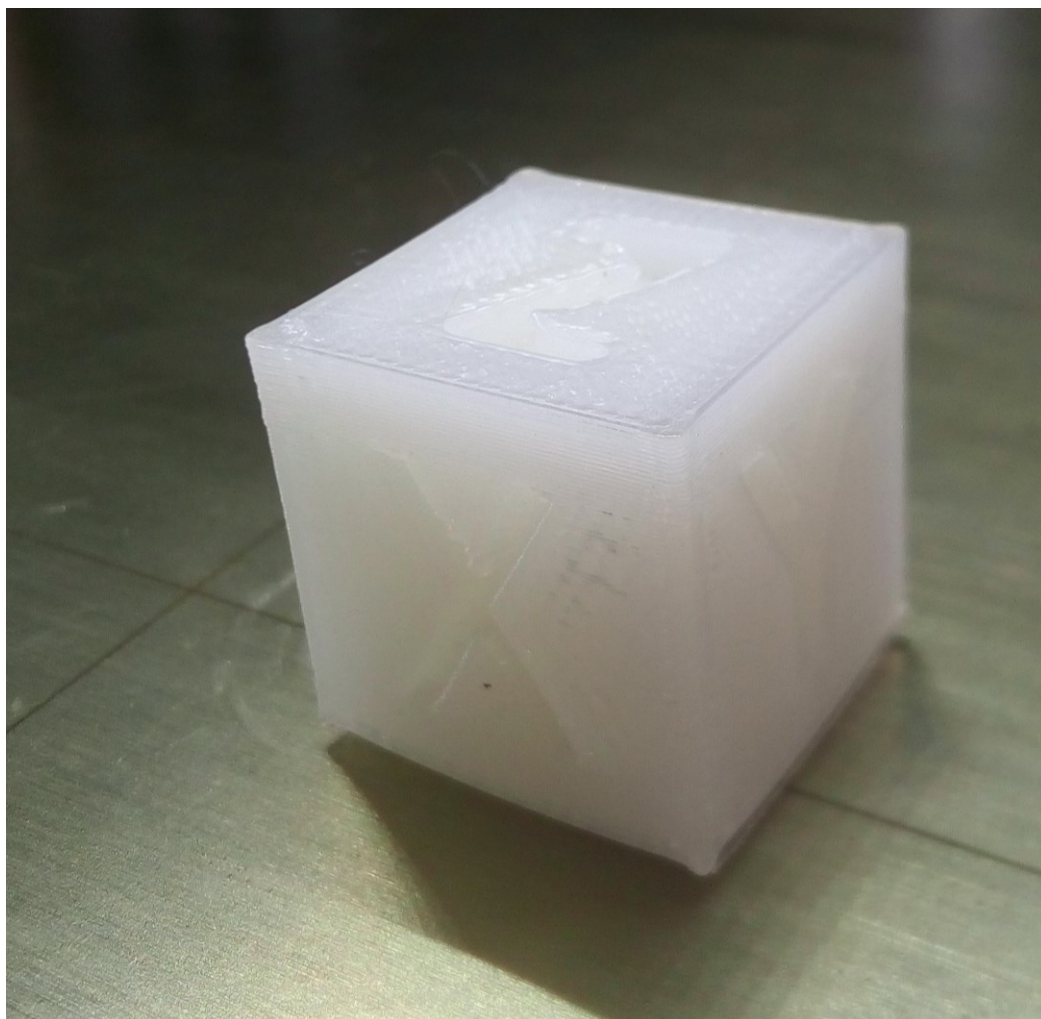
### 7.5.5 Materiál č.5

Všech 5 kusů vzorků z materiálu č.5 muselo být po 60sekundách nuceně zahašeno. Odkápnuté kapky hořeli po odkápnutí v průměru 4,4 sekundy. Průměrná délka spálené plochy 42,4mm.

Materiál je nevyhovující dle CS23.853

## 8 OVĚŘENÍ ZPŮSOBILOSTI FFF 3D TISKÁRNY

Aby bylo možné prakticky využívat 3D tisk aditivní technologií Fused Filament Fabrikation, je nutné ověřit způsobilost procesu 3D tisku zvolenou aditivní technologií na 3D tiskárně Průša i3 MK2,5. Pro tento účel bylo vytištěno 25ks zkušebních kostek 20x20x20 viz obr. 46 z materiálu č.3.



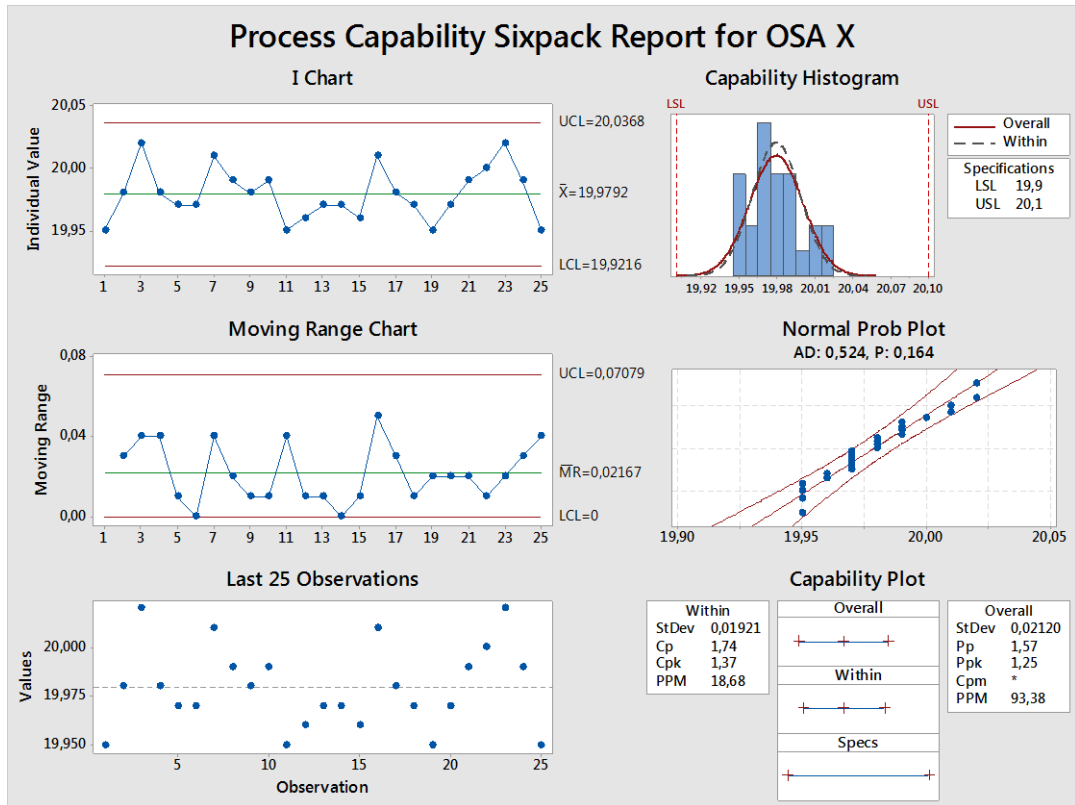
obr. 46 zkušební kostka

Zkušební kostka byla vymodelována s označením jednotlivých os na stěnách. Označení os na stěnách je zvoleno kvůli snazší identifikaci, kterou osu měříme a také odstraní možnou chybu, která by vznikla otočením kostky při měření

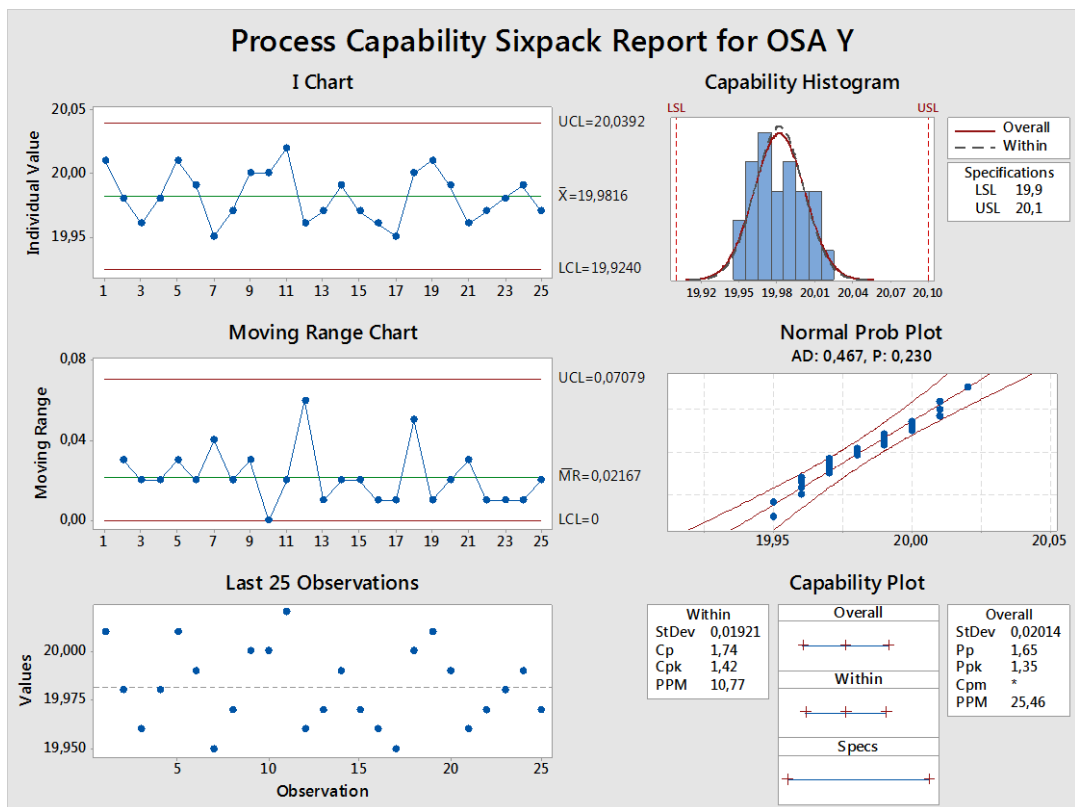
Po vytištění bylo všech 25ks změřeno ve všech osách posuvným měřidlem. Výsledky měření uvedeny v tabulce 14. K vyhodnocení indexů způsobilosti  $C_p$  a  $C_{pk}$  byl použit SW minitab 18.

Tabulka 14 výsledky měření zkušebních kostek

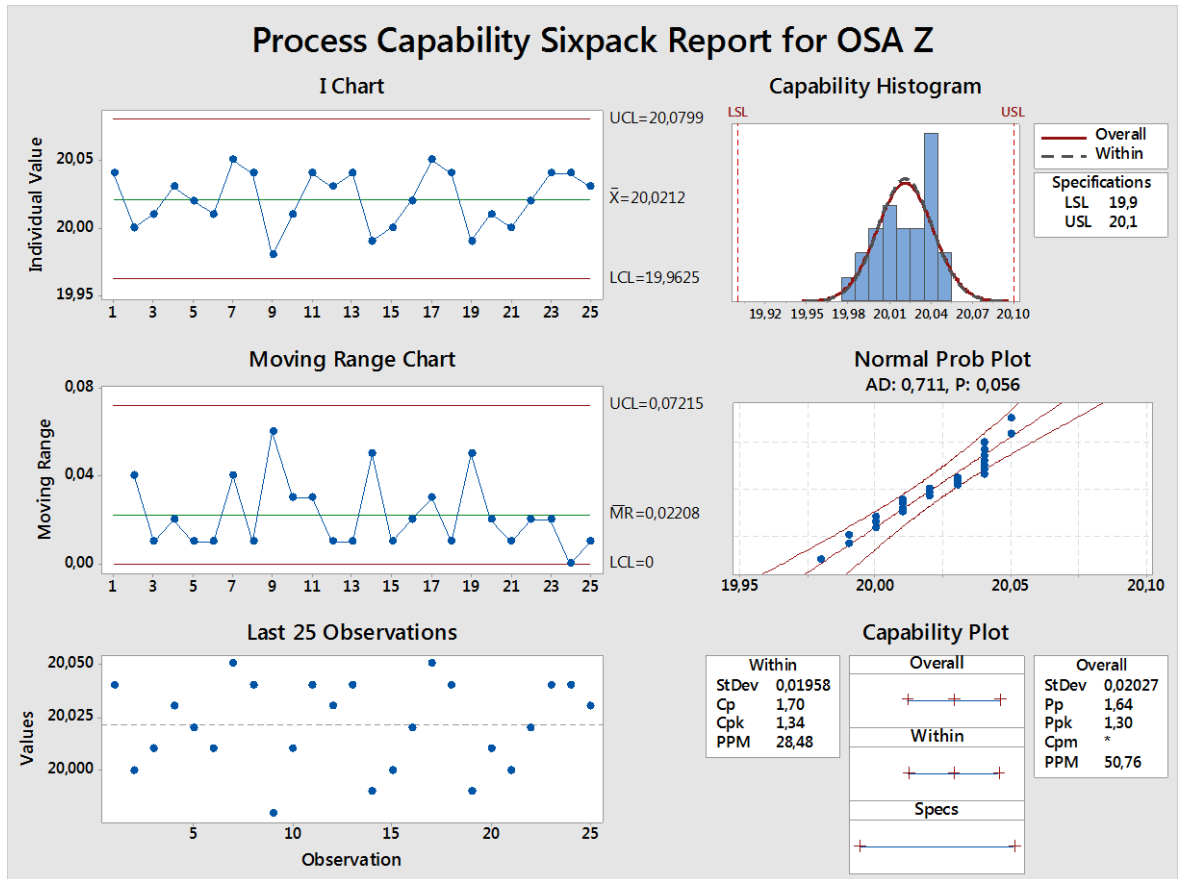
kostka	OSA X	OSA Y	OSA Z
č.1	19,95	20,01	20,04
č.2	19,98	19,98	20,00
č.3	20,02	19,96	20,01
č.4	19,98	19,98	20,03
č.5	19,97	20,01	20,02
č.6	19,97	19,99	20,01
č.7	20,01	19,95	20,05
č.8	19,99	19,97	20,04
č.9	19,98	20,00	19,98
č.10	19,99	20,00	20,01
č.11	19,95	20,02	20,04
č.12	19,96	19,96	20,03
č.13	19,97	19,97	20,04
č.14	19,97	19,99	19,99
č.15	19,96	19,97	20,00
č.16	20,01	19,96	20,02
č.17	19,98	19,95	20,05
č.18	19,97	20,00	20,04
č.19	19,95	20,01	19,99
č.20	19,97	19,99	20,01
č.21	19,99	19,96	20,00
č.22	20,00	19,97	20,02
č.23	20,02	19,98	20,04
č.24	19,99	19,99	20,04
č.25	19,95	19,97	20,03



obr. 47 vyhodnocení indexů Cp a Cpk pro osu X



obr. 48 vyhodnocení indexů Cp a Cpk pro osu Y



obr. 49 vyhodnocení indexů Cp a Cpk pro osu Z

Z výsledků na obr. 47, obr. 48 a obr. 49 lze vyčíst, že hodnoty indexů Cp a Cpk jsou vyšší než 1,33 ve všech třech osách. Je možné tedy říci, že proces 3D tisku materiálu, který vyhověl požadavkům CS23.853 na RepRap Fused Filament Fabrikation 3D tiskárně Průša i3 MK2,5 je způsobilý k výrobě.



## ZÁVĚR

Teoretická část diplomové práce se zabývá částí předpisu CS23, která se řeší problematiku požární odolnost materiálů určených do interiéru letounu a jejich zkoušení. Dále jsou popsány jednotlivé technologie 3D tisku, jaké problémy vznikají při tisku aditivní technologií FFF a které materiály tato technologie 3D tisku využívá.

V praktické části je popsána výroba zkušebních těles pro zkoušku dle CS23.853 od nastavení jednotlivých parametrů 3D tisku, způsobu přípravy tiskárny na tisk a samotné vytištění zkušebních těles. Na vyrobených zkušebních tělesech byla provedena zkouška požární odolnosti dle CS23.853. Z vybraných materiálů splnil požadavky předpisu na požární odolnost pouze jeden, označený jako materiál č.3. U zbylých materiálů byl největší problém, že plamen sám nezhasnul bylo nutné vynucené zahašení.

V kapitole ověření způsobilosti 3D tisku byly vytištěny zkušební kostky a vyhodnoceny indexy způsobilost procesu  $C_p$  a  $C_{pk}$  pro aditivní technologií 3D tisku FFF. RepRap FFF 3D tiskárna Průša i3 MK2,5S je způsobilá k výrobě, indexy způsobilosti  $C_p$  a  $C_{pk}$  pro osy X, Y a Z jsou vyšší než 1,33. Proto bylo možné vytisknout ovládací přepínač pro ovládání vztlakové mechanizace a zamontovat jej do letounu obr. 50 a jít se proletět. Letoun, na kterém je instalované ovládání vztlakové mechanizace s vytištěným přepínačem absolvoval již dvacet vzletů a na vytištěném přepínači nevznikla žádná abnormalita, plní svoji funkci bez problémů.



obr. 50 zobrazení vytištěného dílu v kokpitu ULL

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] BARNATT, Christopher. *3D printing: Third Edition*. 3. dopl. vyd. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN 978-1539655466.
- [2] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [3] Fused Deposition Modeling (FDM). [online]. [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/fused-deposition-modeling>
- [4] Wire + arc additive manufacturing. [online]. [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: <https://waammat.com/about/waam>
- [5] WAAM systems. [online]. 2015 [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/273481901\\_fig1\\_Fig-1-CMT-WAAM-experimental-system](https://www.researchgate.net/figure/273481901_fig1_Fig-1-CMT-WAAM-experimental-system)
- [6] Ready to use additive manufacturing for large components [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/ready-to-use-additive-manufacturing-for-large-components>
- [7] Demo parts WAAM. [online]. [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: <https://waammat.com/about/demo-parts>
- [8] 3D printing. [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.padtinc.com/services/rapid-prototyping/index.html>
- [9] 3DPrinting.com [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.3dprinting.lighting/3d-printing-technologies/stereolithography/>
- [10] 3dprint.com [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://3dprint.com/149897/lightning-3d-printer/>
- [11] WOW-2PP. [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/260174531\\_fig2\\_Figure-3-Photograph-showing-various-shapes-of-tube-structure-fabricated-by-WOW-2PP-with](https://www.researchgate.net/figure/260174531_fig2_Figure-3-Photograph-showing-various-shapes-of-tube-structure-fabricated-by-WOW-2PP-with)
- [12] Material Jetting [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>
- [13] Molecule - Material Jetting [online]. [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://www.molecule.ink/markets/3d-printing/material-jetting.html>
- [14] COWARD, Cameron. *Idiot's Guides: 3D Printing*. USA: Alpha, 2015 ISBN 978-1615647446
- [15] GrabCad [online]. STRATASYS solution [cit. 2018-01-21]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/reprap-prusa-mendel-3d-printer>
- [16] FFF [online]. STRATASYS solution [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/File:FFF.png>
- [17] HAUSMAN, Kalani Kirk a Richard HORNE. *3D printing for dummies*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-66077-5.

- [18] DOLEČEK, Josef. FILLAMENTUM S.R.O. Materiály pro 3D tisk. [cit. 2018-02-24].
- [19] Seznam materiálů pro 3D tisk [online]. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [20] Technical data sheet for PLA. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: [https://www.dropbox.com/s/xhzxtbtarhqax5z/datasheet\\_pla\\_extrafill.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/xhzxtbtarhqax5z/datasheet_pla_extrafill.pdf?dl=0)
- [21] Technical data sheet for ABS. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: [https://www.dropbox.com/s/pb9kxtuj8ei2t8y/datasheet\\_abs\\_extrafill.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/pb9kxtuj8ei2t8y/datasheet_abs_extrafill.pdf?dl=0)
- [22] Technical data sheet for Nylon FX256. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: [https://www.dropbox.com/s/jyervf5aa5x7n5q/datasheet\\_nylon\\_fx256.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/jyervf5aa5x7n5q/datasheet_nylon_fx256.pdf?dl=0)
- [23] 130-1\_6-TDS-PMMA. <https://www.filament-pm.cz> [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/filament-1-75-pmma-transparentni-0-5-kg/p86?fileId=130&do=downloadFile>
- [24] PET-G. <https://www.devildesign.pl> [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://sklep.devildesign.pl/glowna/125-pet-g-175-blekitny-1kg.html>
- [25] Plast PC. <https://www.clexpert.cz> [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://www.clexpert.cz/3dtisk/plast/pc>
- [26] datov\_\_\_list\_pc\_2017\_herz\_cz. <https://www.materialpro3d.cz> [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: [http://www.materialpro3d.cz/user/related\\_files/datov\\_\\_\\_list\\_pc\\_2017\\_herz\\_cz.pdf](http://www.materialpro3d.cz/user/related_files/datov___list_pc_2017_herz_cz.pdf)
- [27] datov\_\_\_list\_pc\_pbt\_2017\_herz\_cz. <https://www.materialpro3d.cz> [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: [https://www.materialpro3d.cz/user/related\\_files/datov\\_\\_\\_list\\_pc\\_pbt\\_2017\\_herz\\_cz.pdf](https://www.materialpro3d.cz/user/related_files/datov___list_pc_pbt_2017_herz_cz.pdf)
- [28] PC-ABS. <http://www.jrc.cz> [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://www.jrc.cz/pc-abs-1-75mm-cerna-tiskova-struna-filament-1kg/p122542>
- [29] 110-1\_6-TDS-PCABS. [www.filament-pm.cz](http://www.filament-pm.cz) [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/filament-1-75-pc-abs-seda-1-kg/p47?fileId=110&do=downloadFile>
- [30] Print Quality Troubleshooting Guide. <https://www.simplify3d.com> [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#not-extruding-at-start-of-print>
- [31] Simplify 3D. <https://www.simplify3d.com> [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/articles/>
- [32] Types of 3D Printers.. <http://3dinsider.com> [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <http://3dinsider.com/3d-printer-types/>
- [33] DLP\_3D-Printer. <https://www.additive.blog> [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/sla-stereolithography-dlp-cdlp-clip/dlp-3d-printer-scheme-how-works/>

- [34] Injekt based system. <https://www.researchgate.net> [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Inkjet-based-system-3D-printing-3DP\\_fig2\\_309358689](https://www.researchgate.net/figure/Inkjet-based-system-3D-printing-3DP_fig2_309358689)
- [35] 3D Printing. [www.3dnatives.com](http://www.3dnatives.com) [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/direct-metal-laser-sintering100420174-2/>
- [36] High Level Processes: Directed Energy Deposition. [www.bintoa.com](http://www.bintoa.com) [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://www.bintoa.com/directed-energy-deposition/>
- [37] Laminated Object Modelling. [www.azom.com](http://www.azom.com) [online]. [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1650>
- [38] CS-23 Amendment 4 [www.easa.europa.eu](http://www.easa.europa.eu) [online]. [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-23%20Amendment%204.pdf>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ULL	Ultralehký letoun
GA	General Aviation
FFF	Fused Filament Fabrikation
CS	Certifikation Standard
°C	Stupeň Celsia
mm	milimetr
ASTM	American Society for Testing
ISO	International Organization for Standardization
FDM	Fused Deposition Modelling
PJP	Plastic Jet Printing
MEM	Melted and Extruded Modelling
WAAM	Wire + Arc Additive Manufacturing
MIG	Technologie svařování v ochranné atmosféře inertního plynu
CMT	Technologie svařování Cold Metal Transfer
MJ	Material Jetting
UV	Ultrafialové záření
SLA	Stereolitografie
DLP	Digital Light Processing
2PP	Two-Photon Polymerization
BJ	Binder Jetting
LS	Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
DED	Direcdted Energy Deposition
LOM	Laminated Object Manufacture

---

ABS	Akrylonitril-butadien-styren
PLA	Polylaktid Acid
PMMA	Polymethylmetakrylát
PET-G	Polyetyléntereftalát-glykol
PC	Polykarbonát
PC-PBT	Polykarbonát polybutylen-terephthalate
mm/s	Milimetr za sekundu
SW	software
BOZP	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci
s	sekunda
Cp;Cpk	Indexy způsobilosti procesu

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

obr. 1 kategorizace bezpečnostních předpisů pro jednotlivé kategorie letounů .....	13
obr. 2 schéma FDM [32].....	17
obr. 3 WAAM technologie se svařovacím robotem [5].....	18
obr. 4 WAAM technologie s portálovou svářečkou [6].....	18
obr. 5 polotovár lopatky turbíny vytvořený technologií WAAM [7] .....	19
obr. 6 schéma MJ [12] .....	20
obr. 7 model molekuly vytištěný technologií MJ [13].....	20
obr. 8 schéma Stereolitografie [32].....	21
obr. 9 dílec vyrobený technologií SLA [8] .....	21
obr. 10 schéma DLP projection [33].....	22
obr. 11 výrobky vytištěné DLP projection [10].....	22
obr. 12 síťová struktura vytištěná pomocí 2PP [11] .....	23
obr. 13 princip aditivní technologie Binder Jetting [34].....	24
obr. 14 princip aditivní technologie Laser Sintering [35].....	25
obr. 15 princip aditivní technologie EBM [32].....	25
obr. 16 princip aditivní technologie DED [36] .....	26
obr. 17 princip aditivní technologie LOM [37] .....	27
obr. 18 RepRap 3D tiskárna Darwin [14] .....	28
obr. 19 RepRap 3D tiskárna Mendel [15].....	29
obr. 20 princip technologie FFF [16].....	30
obr. 21 delaminace vrstev vlivem deformace [14] .....	31
obr. 22 zobrazení tiskové podložky, když tiskárna nezačne tisknout [30] .....	32
obr. 23 nepřilepená první vrstva na podložku[30].....	33
obr. 24 zobrazení brimu při simulaci tisku [31].....	35
obr. 25 chybějící materiál ve výtisku [30] .....	35
obr. 26 přebývající materiál ve výtisku [30].....	36
obr. 27 deformace výtisku přehřátím [30] .....	37
obr. 28 oddělení jednotlivých vrstev výtisku [30] .....	38
obr. 29 RepRAP FFF 3D tiskárna Průša i3 MK2,5 .....	44
obr. 30 vytvoření modelu zkušebního tělesa .....	45
obr. 31 Prusa3D Slic3r MK2 .....	46
obr. 32 nastavení vrstvy v Prusa3D Slic3r MK2 .....	47

obr. 33 nastavení výplně v Prusa3D Slic3r MK2 .....	48
obr. 34 nastavení rychlosti tisku v Prusa3D Slic3r MK2 .....	49
obr. 35 nastavení parametrů filamentu v Prusa3D Slic3r MK2.....	50
obr. 36 nastavení chlazení výtisku v Prusa3D Slic3r MK2 .....	51
obr. 37 simulace 3D tisku v Prusa3D Slic3r MK2 .....	52
obr. 38 sprej pro zvýšení adhese .....	52
obr. 39 tisk zkušební tělesa .....	53
obr. 40 vytisknutá zkušební tělesa .....	53
obr. 41 příprava zkušebního prostoru .....	55
obr. 42 zobrazení teploty plamene .....	55
obr. 43 krok zkoušky č.2.....	56
obr. 44 krok zkoušky č.3.....	57
obr. 45 vzorky po zkoušce .....	57
obr. 46 zkušební kostka .....	61
obr. 47 vyhodnocení indexů Cp a Cpk pro osu X.....	63
obr. 48 vyhodnocení indexů Cp a Cpk pro osu Y.....	63
obr. 49 vyhodnocení indexů Cp a Cpk pro osu Z.....	64
obr. 50 zobrazení vytištěného dílu v kokpitu ULL.....	65



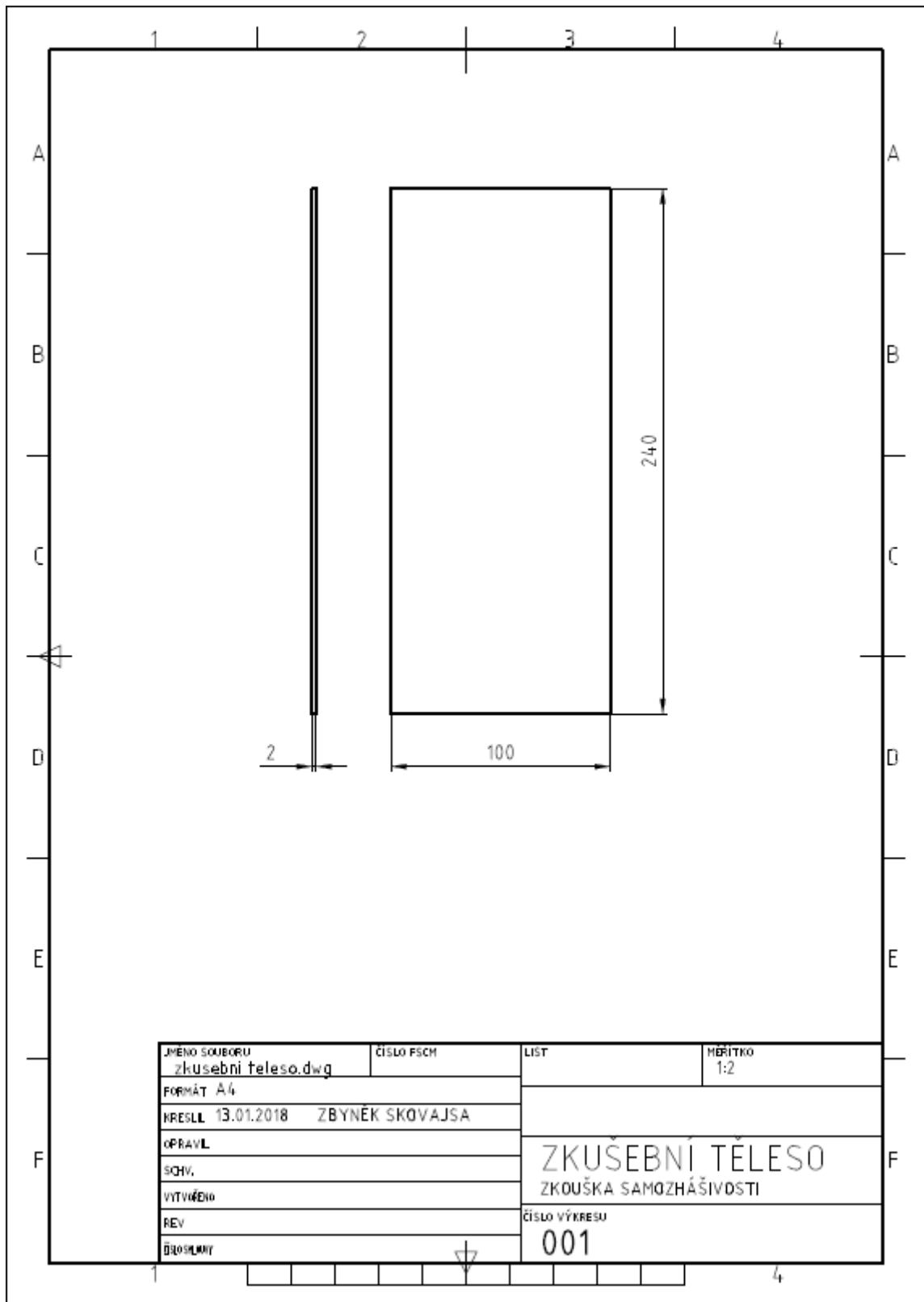
**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PLA [20] .....	39
Tabulka 2 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál ABS [21] .....	40
Tabulka 3 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál nylon [22] .....	40
Tabulka 4 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PMMA [23] .....	40
Tabulka 5 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PET-G [24] .....	41
Tabulka 6 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PC [26] .....	41
Tabulka 7 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PC-PBT [27] .....	41
Tabulka 8 Doporučené nastavení parametrů tiskárny pro materiál PC-ABS [29] .....	42
Tabulka 9 výsledky zkoušky pro materiál č.1 .....	58
Tabulka 10 výsledky zkoušky pro materiál č.2 .....	58
Tabulka 11 výsledky zkoušky pro materiál č.3 .....	58
Tabulka 12 výsledky zkoušky pro materiál č.4 .....	59
Tabulka 13 výsledky zkoušky pro materiál č.5 .....	59
Tabulka 14 výsledky měření zkušebních kostek .....	62

## SEZNAM PŘÍLOH

- P1 Výkres 001 - zkušební těleso
- P2 Výkres 002 - zkušební kostka

# PŘÍLOHA P I: VÝKRES 001 -ZKUŠEBNÍ TĚLESO



# PŘÍLOHA P I: VÝKRES 002 -ZKUŠEBNÍ KOSTKA

