

Využití pokročilých polymerních materiálů pro 3D tisk v průmyslové praxi

Bc. Radomír Zlámal

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radomír Zlámal**
Osobní číslo: **T15415**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Využití pokročilých polymerních materiálů pro 3D tisk
v průmyslové praxi**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte rešerši na dané téma**
- 2. Porovnejte vlastnosti standardních a pokročilých materiálů užívaných v průmyslové praxi s ohledem na použití 3D tisku**
- 3. Navrhněte praktické použití pokročilého materiálu pro průmyslovou praxi**
- 4. Zhodnoťte dosažené výsledky a uveďte doporučení pro praktické použití nového (nových) materiálů**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **Evans Brian: Practical 3D Printers [2012]**
2. **Horvath Joan: Mastering 3D Printing [2014]**
3. **Larson Joe: 3D Printing Blueprints [2013]**
4. **Bell Charles: Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer [2014]**
5. **Blueprint for FDM & PolyJet Material Selection [2012]RedEyeOnDemand.com**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jaroslav Maloch, CSc.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017

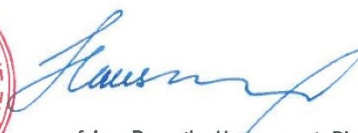
Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



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



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

Příjmení a jméno: ZLAMAL RADOMÍR

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že 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;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 12.5.2017

Zlamal

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, § 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.

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 díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní díla).

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 díla:

(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

Hlavním cílem diplomové práce bylo najít praktické využití pro nové pokročilé materiály, které byly vyvinuty pro 3D tisk metodou FFF. Navržené přípravky byly vtištěny na cenově dostupné RepRap FFF 3D tiskárně Rebel II.

Klíčová slova: 3D tisk, Rapid Prototyping, Fused Filament Fabrication, Fused Deposition Modeling, materiály pro 3D tisk

ABSTRACT

The main goal of the thesis was to find practical use for new advanced materials, which was developed for 3D FFF printing. Designed jigs were printed at RepRap FFF 3D printer Rebel II.

Keywords: 3D printing, Rapid Prototyping, Fused Filament Fabrication, Fused Deposition Modeling, materials for 3D printing

Rád bych poděkoval panu Ing. Jaroslavu Malochovi, CSc., za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Josefu Dolečkovi, řediteli firmy Parzlich s.r.o., za jeho cenné rady v oblasti 3D tisku a za poskytnuté materiály pro 3D tisk.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 VYUŽITÍ 3D TISKU	13
1.1 RAPID PROTOTYPING.....	14
1.2 VÝROBA FOREM A NÁSTROJŮ	15
1.3 DIRECT DIGITAL MANUFACTURING	16
1.4 UŽIVATELSKÝ 3D TISK.....	18
2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	19
2.1 MATERIAL EXTRUSION.....	19
2.1.1 Fused Deposition Modelling.....	19
2.1.2 Wire And Arc Additive Manufacturing	20
2.1.3 Material Extrusion of Concrete.....	21
2.2 VAT PHOTOPOLYMERIZATION	23
2.2.1 Stereolithography	23
2.2.2 DLP Projection.....	25
2.2.3 Two-Photon Polymerization	27
2.3 MATERIAL JETTING	27
2.4 BINDER JETTING.....	29
2.5 POWDER BED FUSION.....	31
2.5.1 Laser Sintering	31
2.5.2 Electron Beam Melting	33
2.6 DIRECTED ENERGY DEPOSITION	34
2.7 SHEET LAMINATION	36
3 REPRAP PROJECT	38
3.1 VÝZNAM OPEN-SOURCE	38
3.2 VÝVOJ REPRAP 3D TISKÁRNÝ.....	38
3.3 DOSTUPNOST 3D TISKÁREN.....	39
4 FUSED FILAMENT FABRICATION	41
4.1 TYPY FFF 3D TISKÁREN.....	42
4.1.1 3D tiskárny s kartézským souřadným systémem	42
4.1.2 3D tiskárny delta	43
4.1.3 3D tiskárny s polárním souřadným systémem	45
4.1.4 3D tiskárny SCARA.....	46
4.2 MATERIÁLY PRO 3D TISK METODOU FFF	46
4.2.1 PLA – polylaktid acid	47
4.2.2 ABS	47
4.2.3 ASA.....	48
4.2.4 Nylon.....	48
4.2.5 PES – Polyester	48
4.2.6 Flexfill – Flexible Filament.....	49
4.2.7 Timberfill – Wood Composite Filament.....	49
4.2.8 HIPS – High Impact Polystyren.....	50

4.2.9	PVA – Polyvinylakohol	50
4.3	POROVNÁNÍ STANDARDNÍCH A POKROČILÝCH MATERIÁLŮ PRO 3D TISK METODOU FFF.....	51
4.3.1	PLA	52
4.3.2	ABS	53
4.3.3	Nylon.....	54
4.3.4	PET.....	55
4.3.5	TPU	56
4.3.6	PC – polykarbonát.....	57
4.3.7	Porovnání materiálů	58
4.4	PROBLÉMY S 3D TISKEM METODOU FFF A JEJICH ŘEŠENÍ	59
4.4.1	3D tiskárna nezačne tisknout	59
4.4.2	První vrstva se nepřilepí k tiskové podložce.....	61
4.4.3	Chybějící nebo přebývající materiál na výtisku.....	62
4.4.4	Přehřátí výtisku	64
4.4.5	Oddělení jednotlivých vrstev od sebe	64
4.4.6	Ucpaná tryska na extruderu.....	65
4.4.7	Extruder přestane vytlačovat materiál uprostřed tisku.....	66
4.4.8	Špatná výplň.....	67
4.4.9	Chybějící detaily na výtisku.....	67
4.4.10	Deformace	68
4.4.11	Rozměrová přesnost	69
5	SHRNUTÍ.....	71
II	PRAKTICKÁ ČÁST	72
6	NÁVRH PŘÍPRAVKŮ PRO PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ	73
6.1	NÁVRH PRVNÍHO TLUMÍCÍHO PŘÍPRAVKU	75
6.2	NÁVRH DRUHÉHO TLUMÍCÍHO PŘÍPRAVKU	77
6.3	NÁVRH UPÍNKY	78
6.4	NÁVRH DALŠÍCH DÍLŮ TLUMÍCÍCH PŘÍPRAVKŮ	80
7	VÝROBA DÍLŮ NA REPRAP 3D TISKÁRNĚ REBEL II	81
7.1	TECHNICKÉ PARAMETRY TISKÁRNY REBEL II	82
7.2	VÝROBA TLUMÍCÍCH PŘÍPRAVKŮ A UPÍNKY	82
7.2.1	Nastavení procesních parametrů 3D tisku v softwaru Simplify3D.....	83
7.2.2	Příprava 3D tiskárny Rebel II	89
7.2.3	Tisk tlumících přípravků a upínky	89
7.2.4	Vytištěné přípravky	91
7.3	POUŽITÍ PŘÍPRAVKŮ VE VÝROBĚ.....	93
7.3.1	Měření a vyhodnocení hluku na pracovišti	95
8	DALŠÍ PRAKTICKÁ VYUŽITÍ POKROČILÝCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ PRO 3D TISK	97
8.1	HARMONICKÁ PŘEVODOVKA	97
8.1.1	Výroba dílu Kernel – součást harmonické převodovky	97
8.1.1.1	Tisk dílu Kernel – součást harmonické převodovky	98
8.1.1.2	Vytištěný díl Kernel – součást harmonické převodovky	99
8.1.2	Výroba dílu Case – součást harmonické převodovky	99
8.1.2.1	Tisk dílu Case – součást harmonické převodovky.....	100

8.1.2.2	Vytištěný díl Case – součást harmonické převodovky	101
8.1.3	Výroba dílu Flange Out.....	101
8.1.3.1	Tisk dílu Flange Out – součást harmonické převodovky	102
8.1.3.2	Vytištěný díl Case – součást harmonické převodovky	102
8.2	VÝROBA DÍLU SAVKA	103
8.2.1	Vytištěný díl Savka	103
9	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	104
9.1	NÁKLADY NA 3D TISK TLUMÍCÍCH PŘÍPRAVKŮ A UPÍNKY	106
9.2	NÁKLADY NA 3D TISK DÍLŮ HARMONICKÉ PŘEVODOVKY	108
9.3	NÁKLADY NA TISK NÁHRADNÍHO DÍLU SAVKA.....	110
	ZÁVĚR	111
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	112
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	117
	SEZNAM OBRÁZKŮ	120
	SEZNAM TABULEK.....	124
	SEZNAM PŘÍLOH.....	125

ÚVOD

3D tisk se stal fenoménem dnešní doby, který ale spousta lidí špatně pochopila. Většina z nich se řídila heslem „3D tisk do každé domácnosti“, bohužel ale realita je jiná. 3D tiskárny se staly cenově dostupnými pro běžné uživatele, problém ale nastává v momentě, když chce běžný uživatel něco vytisknout. 3D tisk není jako běžný tisk na kancelářský papír. Aby mohl uživatel 3D tiskárny tisknout své vlastní modely, musí mít 3D model výrobku, který chce tisknout, to znamená, že musí umět modelovat ve 3D v příslušném CAD softwaru, musí se naučit zvládnout technologii 3D tisku, protože ne všechny modely jdou vytisknout a ne každá tisková úloha na první pokus dopadne dobře. Existují sice databáze 3D modelů pro 3D tisk, ale ne vždy tam uživatel najde to, co zrovna potřebuje. Proto většina výrobců 3D tiskáren přestala cílit na běžné uživatele, ale zaměřila se na kutily, designéry, školy, firmy. Pomocí 3D tisku můžeme snadno vyrábět prototypy, náhradní díly, menší série výrobků atd. Díky vylepšování konstrukcí 3D tiskáren a s přibývajícím novými materiály pro 3D tisk, rapidně narůstá využití 3D tisku na cenově dostupných 3D tiskárnách v průmyslu.

Cílem diplomové práce je najít praktické využití pro nové materiály, které byly vyvinuty pro 3D tisk metodou FFF. Součásti budou vyrobeny z pokročilých polymerních materiálů pro FFF 3D tisk a následně zhotoveny na cenově dostupné FFF 3D tiskárně.

V teoretické části diplomové práce se dozvíme, jaké je využití 3D tisku, jaké jsou jednotlivé metody 3D tisku, jak vznikl uživatelský 3D tisk, jakou aditivní technologii využívá uživatelský 3D tisk, jaké polymerní materiály můžeme použít při 3D tisku metodou FFF, jaké chyby vznikají při 3D tisku metodou FFF a jak je odstranit.

Praktická část diplomové práce je věnována vlastní konstrukci přípravků, ale taky tisku součástí, které navrhl a zkonstruoval Ing. Jaroslav Maloch, CSc., dále přípravě dat pro 3D tisk přípravků, následnému tisku přípravků a zhodnocení nákladů na tvorbu přípravků pomocí 3D tisku.

Na závěr je vyhodnocen výsledný efekt a přínos přípravků.

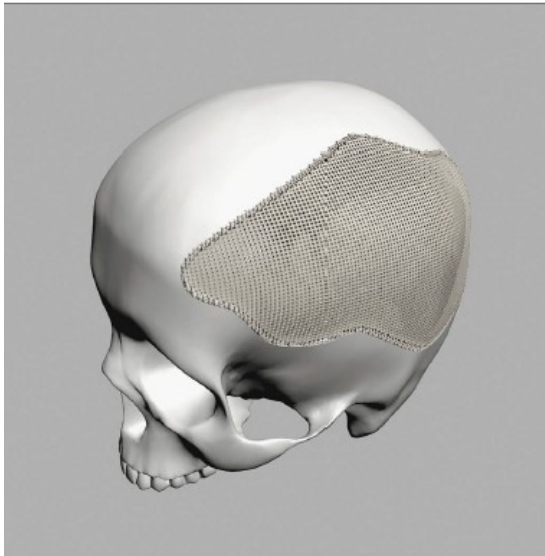
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYUŽITÍ 3D TISKU

3D tisk se v dnešní době používá v mnoha odvětvích např. strojírenství, designu, lékařství, stavitelství, atd. Nejčastější použití 3D tisku je k rapid prototypingu, výrobě forem a nástrojů, výrobě dílů a uživatelskému 3D tisku. V dnešní době se také začínají objevovat první vytištěné domy pomocí 3D tiskárny, lékařské implantáty, oblečení, atd. [1]



Obr. 2 3D tisk domu [6]



Obr. 1 Návrh lékařského implantátu [6]



Image courtesy the Francis Bitonti Studio (Designer: Michael Schmidt, Architect: Francis Bitonti)

Obr. 3 Šaty vytištěné na 3D tiskárně [6]

1.1 Rapid Prototyping

3D tisk se aktuálně nejvíce používá k Rapid Prototypingu (RP) – rychlému prototypování. RP slouží k vytvoření koncepčního návrhu výrobku a k výrobě funkčních prototypů. [1]

Koncepční modely jsou jednoduché, nefunkční výtisky, které řeší design výrobku (např. láhev na šampón s uzávěrem). 3D tisk tak pomáhá designérům „zhmotnit“ své myšlenky a nápady. [1]

Oproti tomu u funkčních prototypů se ověřuje tvar, rozměry, montáž a funkčnost před spuštěním sériové výroby. [1]

Tradiční výroba funkčních prototypů nebo koncepčních modelů pomocí tradičních technologií byla velmi časově, finančně, technicky náročná a stála několik tisíc nebo desítky tisíc dolarů, liber, euro nebo jenů. [1]

Na druhou stranu v dnešní době díky 3D tisku můžeme vyrábět koncepční modely nebo funkční prototypy v řádech dní nebo hodin a za zlomek ceny oproti tradičním technologiím. Například v automobilovém průmyslu General Motors vyrábí ve své laboratoři pomocí RP více než 20 000 prototypů za rok. [1]

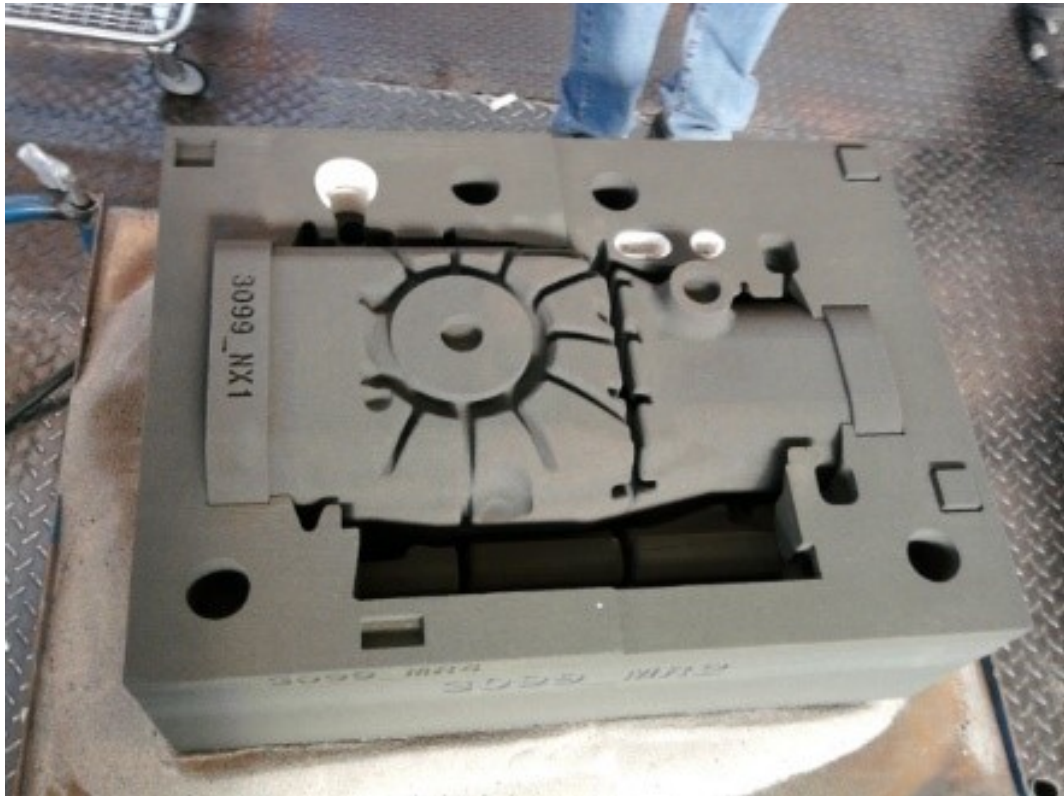


Obr. 4 Návrh interiéru Chevroletu Malibu [7]

1.2 Výroba forem a nástrojů

3D tisk je dále také využíván k výrobě forem, modelů, přípravků nebo jiných nástrojů. Nejčastěji se používá k výrobě modelů, které mají vzhled finálního produktu ze vstřikovací formy. V tomhle případě se používá 3D tisk pouze k vytvoření modelu. Finální vzhled je dokončen pomocí ručních operací, ale i přesto 3D tisk v této aplikaci šetří čas a peníze. [1]

Obzvláště zajímavou aplikací 3D tisku je výroba pískových forem, do kterých se nalije roztavený kov a vytvoří se tak finální produkt. Pískové formy vytvořené pomocí 3D tisku jsou mnohem přesnější, složitější a časově méně náročné na výrobu než výroba pískových forem tradičními metodami. [1]



Obr. 5 Písková forma vytvořená pomocí 3D tisku [8]

V dnešní době se začínají na trhu čím dál více objevovat 3D tiskárny pro tisk voskových modelů. Vytisknutý voskový model je zaformován. Následně se forma zahřeje, což způsobí vypaření voskového modelu z formy. Poté se do formy nalije roztavený kov nebo jiná tavenina. Použití 3D tisku ke tvorbě vytavitelných modelů se nejvíce používá v zubním lékařství, šperkařství atd. [1]



Obr. 6 Vytištěný voskový model [9]

1.3 Direct Digital Manufacturing

3D tisk se začíná využívat čím dál častěji k výrobě konečných dílů nebo k výrobě náhradních dílů, tzv. Direct Digital Manufacturing (DDM). Pomocí DDM můžeme vytvářet díly, které by nebylo možné vyrobit tradičními technologiemi – funkční mechanismy o více dílech bez nutnosti montáže, tvarově velmi složité díly, malosériově vyráběné díly bez nutnosti vyrábět složité formy. [1]

Například společnost Stratasys vyrábí pro letadlo Airbus A350 XWB více než 1000 dílů vytvořených na 3D tiskárně. Dále producenti filmu James Bond – Skyfall použili 3D tisk pro výrobu tří modelů auta Aston Martin DB5 v měřítku 1/3. Auto bylo vytištěno na tiskárně voxeljet VX4000 z 18 dílů, následně bylo smontováno a nabarveno (Obr. 7). [1]

DDM otevírá dveře do mnoha zajímavých a nových aplikací, které byly dříve považovány za nemožné, neproveditelné nebo neekonomické. [1]



Obr. 7 Vytištěný Aston Martin DB5 v měřítku 1/3 [11]



Obr. 8 Malosériově vyráběné díly [10]

1.4 Uživatelský 3D tisk

Paralelně s rostoucím průmyslovým 3D tiskem jsme svědky růstu uživatelského 3D tisku. V dnešní době na trhu existuje více než sto různých 3D tiskáren od různých výrobců. Ceny 3D tiskáren se pohybují od 230 USD nahoru. [1]

Kromě rostoucího počtu osobních 3D tiskáren je zde také rostoucí počet služeb, které poskytují 3D modely k 3D tisku ke stažení zdarma nebo za poplatek. Největším poskytovatelem 3D modelů zdarma je portál Thingiverse, který nabízí uživatelům více než milión 3D modelů zdarma, z nichž si můžou uživatelé některé 3D modely upravit zdarma sami podle sebe. Poskytování 3D modelů zdarma nebo za poplatek bude klíčové v rozvoji osobního 3D tisku, protože odstraňuje podmínku, že osobní uživatel musí umět kreslit v CAD softwaru a být technicky vzdělaný. [1]

Aktuálně je osobní 3D tisk omezen na tisk objektů z termoplastů, termoplastických elastomerů, termoplastických kompozitů a vytvrditelných pryskyřic. [1]

V budoucnu může mít uživatelský 3D tisk dopad na několik odvětví. Hlavně na výrobu a prodej náhradních dílů, dále také na logistiku a dopravu, které můžou zaznamenat sníženou poptávku po službách. [1]



Obr. 9 Uživatelský 3D tisk [12]

2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Na trhu existuje spousta aditivních technologií, které jsou patentovány nebo mají ochrannou známku. Bohužel se tak stává, že výrobci 3D tiskáren používají různé názvy pro stejné aditivní technologie. Proto International Organization for Standardization (ISO) a American Society for Testing and Materials (ASTM) vydali normu ISO / ASTM 52900, která definuje 7 aditivních technologií: [1]

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

2.1 Material Extrusion

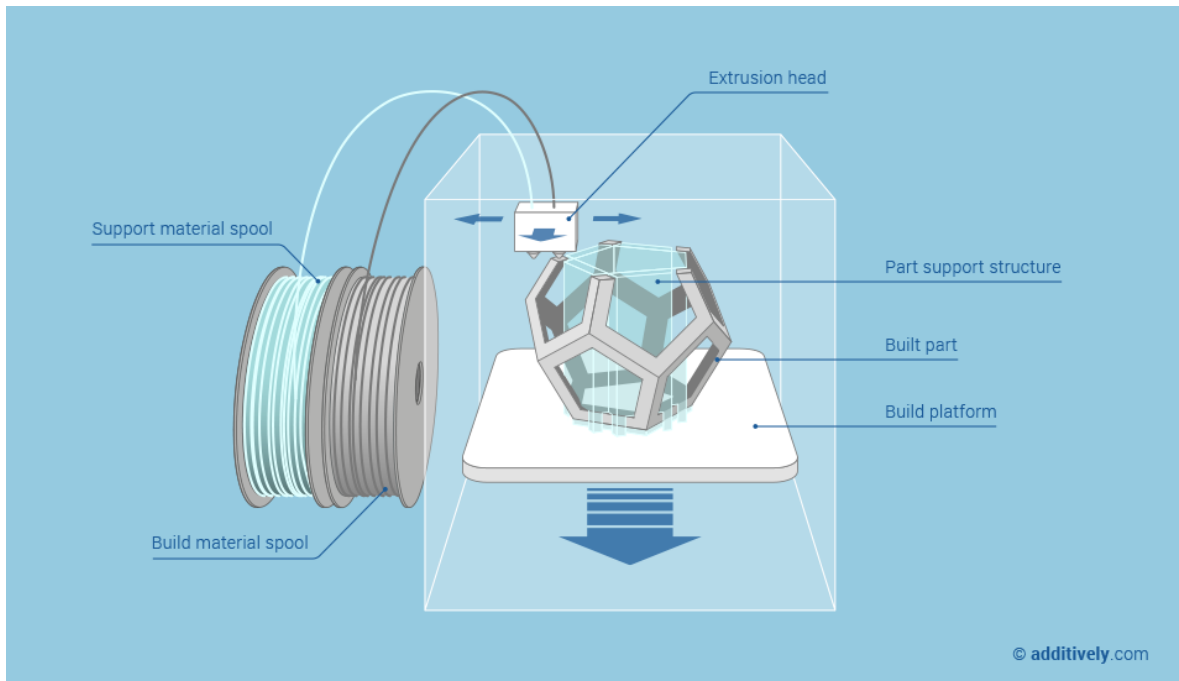
Nejprodávanejší aditivní technologií je technologie, pomocí které je materiál vytlačován z extruderu, který je řízen počítačem. Vytlačený materiál je po vrstvách vrstven do výsledného objektu. Pro vytlačování se používá mnoho různých materiálů. Nejčastěji to jsou termoplastické polymery, dále např. beton, keramika, čokoláda nebo dokonce i kov. [1]

2.1.1 Fused Deposition Modelling

Firma Stratasys vynalezla a nechala si patentovat aditivní technologii Fused Deposition Modeling (FDM). Pomocí technologie FDM vytlačujeme termoplastické polymery z trysky na tiskovou podložku. Konkurenční firma 3D Systems pojmenovala technologii vytlačování termoplastických polymerů jako Plastic Jet Printing (PJP). Dále se můžeme setkat s názvy jako Fused Filament Modelling (FFM), Melted and Extruded Modelling (MEM), Fused Filament Fabrication (FFF) nebo Fused Deposition Method. [1], [4]

Principem FDM technologie je tavení tenkého drátu z termoplastického polymeru v tiskové hlavě (extruderu), která je zahřátá na teplotu mezi 180 °C až 250 °C, teplota extruderu závisí na typu použitého polymeru. Roztavený termoplastický polymer se potom vytlačuje z trysky na tiskovou podložku, kde vytlačený termoplastický polymer ihned tuh-

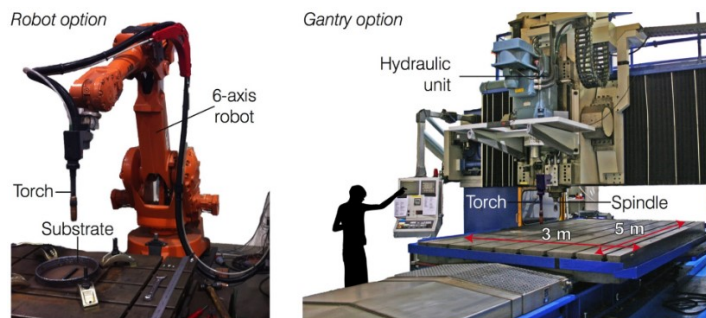
ne. Po nanesení první vrstvy se tisková podložka sníží o výšku vrstvy a následuje nanášení další vrstvy. Tento postup se opakuje, dokud není objekt vytištěn (Obr. 10). [1], [4]



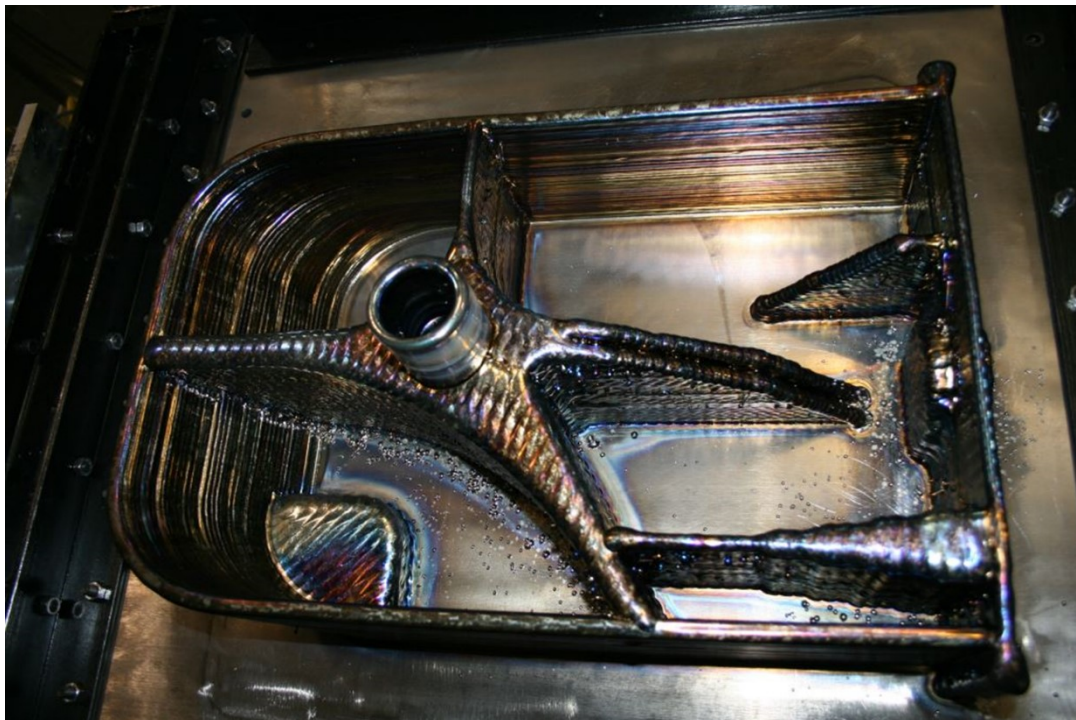
Obr. 10 Schéma FDM technologie [13]

2.1.2 Wire And Arc Additive Manufacturing

Principem aditivní technologie Wire And Arc Additive Manufacturing (WAAM) je kombinace elektrického oblouku jako zdroje tepla a drátu jako vstupní suroviny. V aditivní technologii WAAM se používá metoda svařování MIG (metal inert gas) nebo metoda CMT (cold metal transfer) od firmy Fronius. K nanášení housenky se nejčastěji používá svařovací robot (Obr. 11), nebo portálová svářečka, která je řízená počítačem (Obr. 11). Objekt tak vzniká navařováním jednotlivých vrstev na sebe. WAAM můžeme tedy využít pro výrobu součástí z hliníku, oceli nebo titanu. [1], [14]



Obr. 11 Svařovací robot a portálová svářečka pro technologii WAAM [14]



Obr. 12 Součást vytvořená pomocí aditivní technologie WAAM [14]

2.1.3 Material Extrusion of Concrete

V dnešní době se začínají ve stavebnictví čím dál více využívat 3D tiskárny na beton. První pokusy provedl v roce 2004 profesor Behrokh Khoshnevis na University of Southern California. Principem 3D tisku betonu je vytlačování betonu z hubice na podložku po jednotlivých vrstvách. V roce 2014 dokázala čínská firma WinSun vytisknout 10 domů za 24 hodin (Obr. 13). Dále v roce 2015 WinSun představil vytištěnou vilu o rozloze 1100 m² spolu s pětipatrovým domem (Obr. 14) a v květnu roku 2016 WinSun odhalil v Dubaji kancelářský komplex o rozloze 250 m², který byl vytištěn za 17 dní (Obr. 15). V budoucnu se tak budeme moci setkat s 3D tiskárnami, které tisknou domy včetně servisních potrubí za velmi krátkou dobu s minimální obsluhou. [1]



Obr. 13 Vytištěný dům z betonu [15]



Obr. 14 Vila a pětipatrový dům vytištěný na 3D tiskárně [16]



Obr. 15 Kancelářský komplex v Dubaji vytištěný na 3D tiskárně [17]

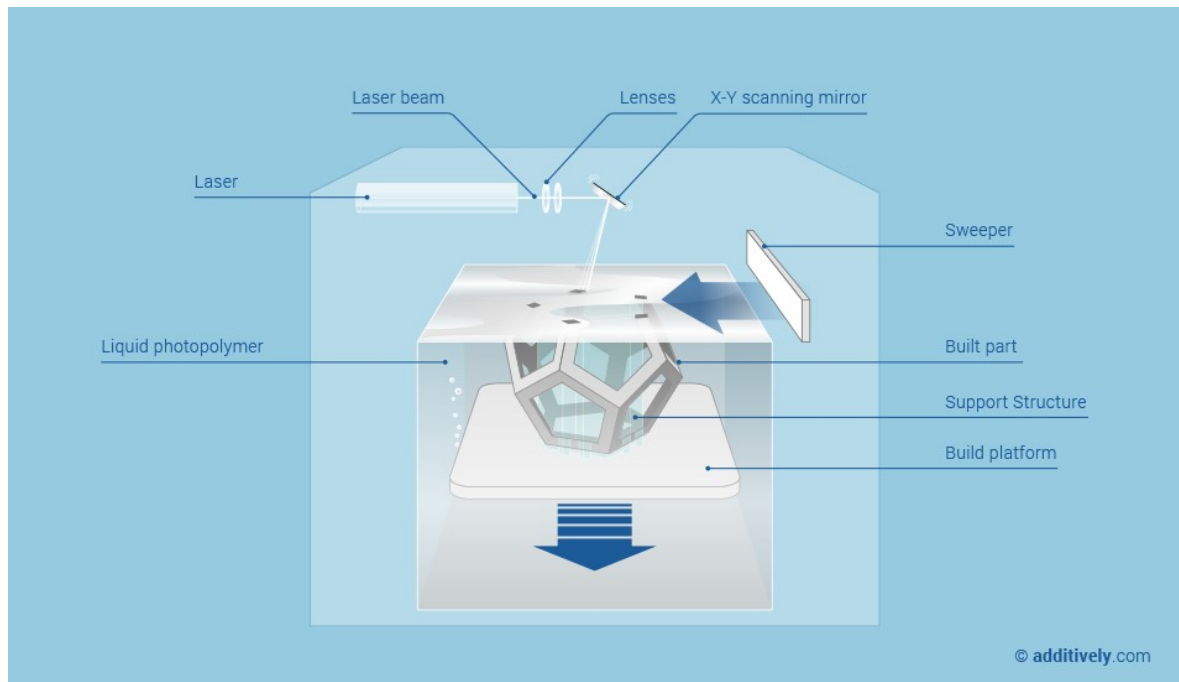
2.2 Vat Photopolymerization

Fotopolymerace využívá kapalných pryskyřic, které jsou vytvrditelné pomocí ultrafialového (UV) záření. Po ozáření pryskyřice dojde k chemické reakci, která způsobí ztuhnutí pryskyřice. Tato reakce se nazývá fotopolymerace. Fotopolymery byly vyvinuty v roce 1960

a brzy se začaly využívat v mnoha odvětvích. [1], [4]

2.2.1 Stereolithography

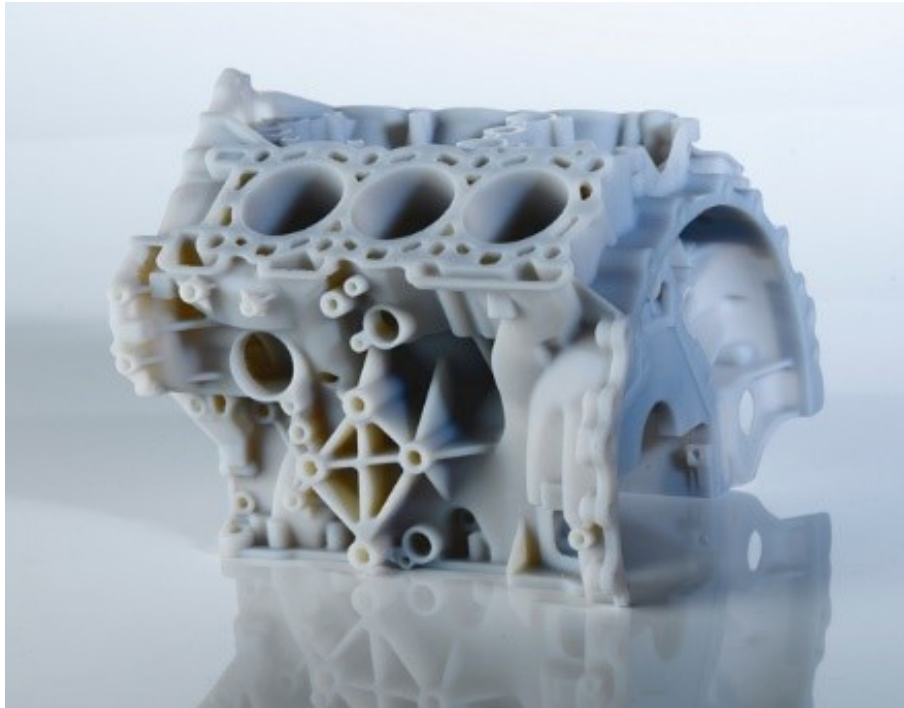
Stereolitografie je první patentovanou technologií aditivní výroby. Vynalezl ji pan Charles Hull v roce 1980, který následně založil společnost 3D Systems. Principem stereolitografie (SLA) je vytvrzování pryskyřice, která je citlivá na světlo. Vytvrzování pryskyřice probíhá pomocí UV laseru na děrované tiskové podložce, která se po vytvrzení první vrstvy sníží o tloušťku další vrstvy. Následuje rovnoměrné rozetření pryskyřice pomocí mechanického stěrače. Poté opět následuje vytvrzení pryskyřice pomocí UV laseru. Tento postup se opakuje, dokud není objekt vytištěn (Obr. 16). [1], [4]



Obr. 16 Schéma aditivní technologie SLA [18]

Stejně jako u FDM je nutné při tisku převisů používat podpory, které je nutné po vytištění objektu odstranit (ručně nebo chemicky). Dále je někdy nutné vytištěný objekt vytvrdit v UV peci, aby výtisk měl požadovanou pevnost. [1], [4]

Pomocí SLA můžeme vytvářet velmi přesné objekty s vysokou kvalitou vytištěného povrchu. SLA se používá např. ve šperkařství nebo při konstrukci forem – vytvoření detailního modelu výstřiku. [1], [4]

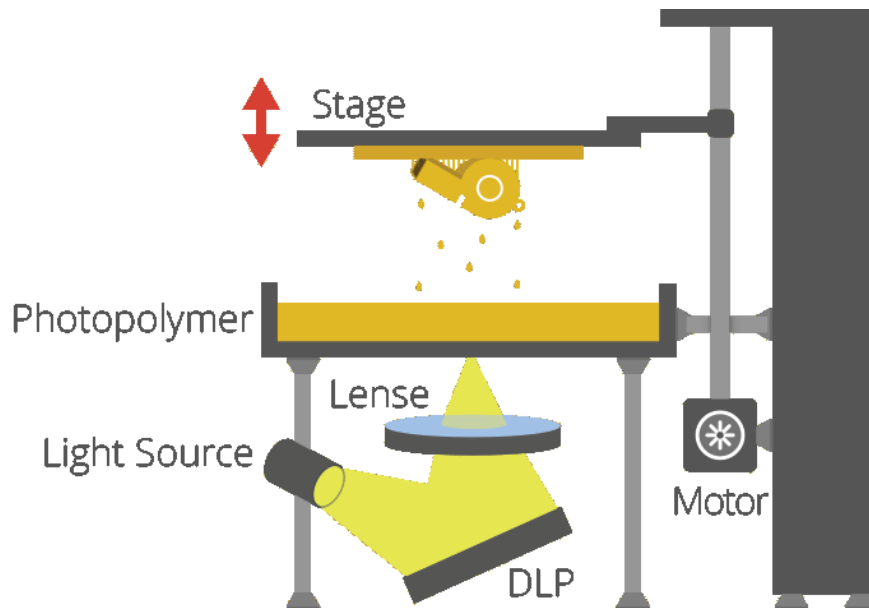


Obr. 17 Součást vytvořená aditivní technologií SLA [19]

2.2.2 DLP Projection

Další aditivní technologií, která využívá princip fotopolymerace je DLP projection. Technologii Digital Light Processing (DLP) vyvinul v roce 1987 Larry Hornbeck z firmy Texas Instruments. Technologie DLP se využívá při výrobě projektorů, mobilních telefonů a 3D tiskáren. DLP projektory využívají ke tvorbě obrazu mikroskopická zrcadla, která jsou umístěna na polovodičovém čipu. Každé zrcadlo reprezentuje jeden nebo více pixelů ve výsledné projekci. [1], [4]

Aditivní technologie DLP Projection používá jiný zdroj světla oproti SLA. Jako zdroj světla se používá DLP projektor, který promítá na povrch pryskyřice průřez tištěného objektu v dané vrstvě. Celá vrstva se tak vytvrzuje najednou, výsledný tisk je díky tomu daleko rychlejší. Při 3D tisku metodou DLP Projection vzniká tištěný objekt vzhůru nohama, z toho plyne, že se tisková podložka po vytvrzení vrstvy posune vzhůru (Obr. 18). [1], [4]



Obr. 18 Schéma aditivní technologie DLP projection [22]

Pomocí aditivní technologie DLP Projection můžeme vytvářet velmi přesné objekty

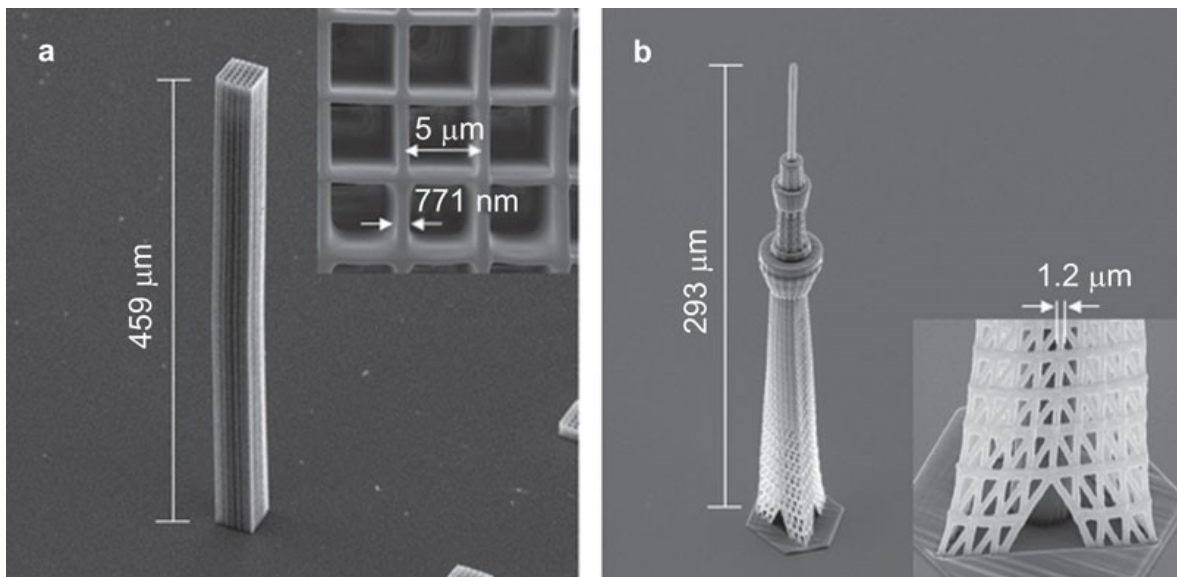


Obr. 19 Objekty vytištěné technologií DLP Projection [20]

s vysokou kvalitou vytištěného povrchu. [1], [4]

2.2.3 Two-Photon Polymerization

Další aditivní technologií, která využívá princip fotopolymerace, je technologie two-photon polymerization (2PP). Metoda 2PP je velmi podobná stereolitografii. K vytvrzování pryskyřice používá femtosekundový laser. Hlavním rozdílem oproti stereolitografii je tloušťka tištěné vrstvy. Pomocí aditivní technologie 2PP můžeme tisknout vrstvy o tloušťce mezi 100 až 200 nanometry. V praxi to znamená, že 2PP má 250x větší rozlišení tisku než stereolitografie. V budoucnu může 2PP umožnit tisk velmi přesných malých objektů jako jsou například mikroelektronické a optoelektronické součásti. [1]

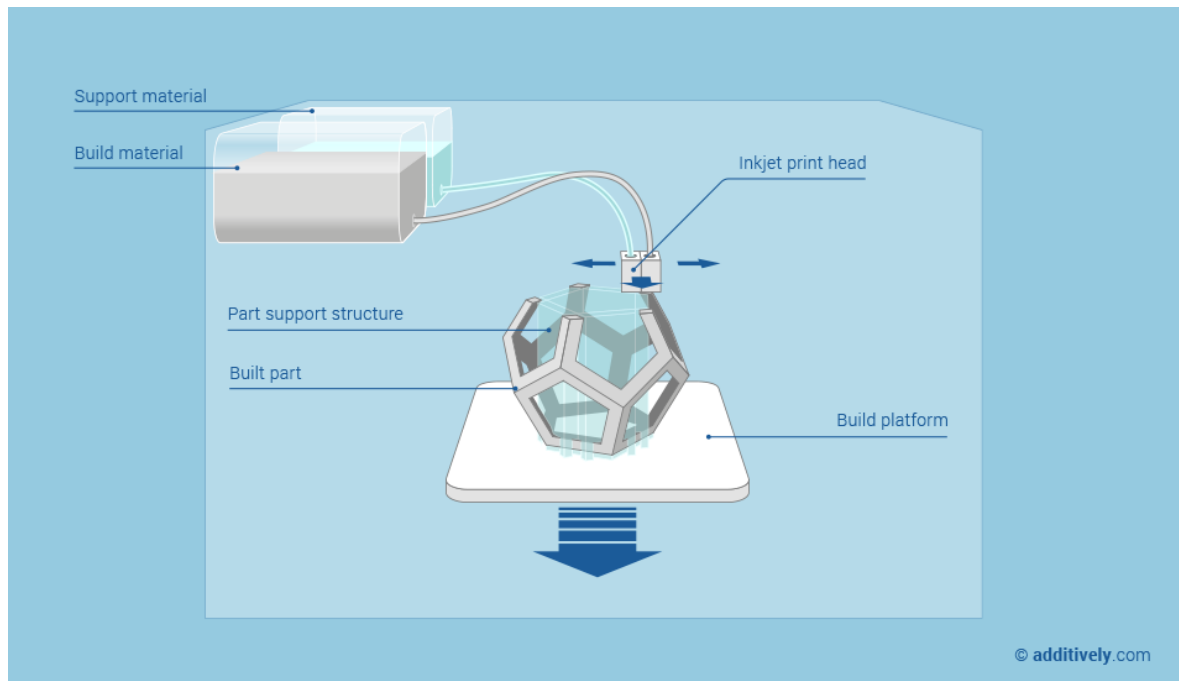


Obr. 20 a) vytištěná síťová struktura technologií 2PP b) vytištěná telekomunikační věž v Tokiu technologií 2PP [21]

2.3 Material Jetting

Aditivní technologie Material Jetting (MJ) je založena na principu vytvrzování kapalného fotopolymeru. Fotopolymer je po jednotlivých vrstvách nanášen pomocí tiskové hlavy a následně je vytvrzen pomocí UV světla (Obr. 21). [1]

Stejně jako u ostatních aditivních technologií je nutné při tisku převisů používat podpory, které je nutné po vytištění objektu odstranit. Pro tisk podpor se u technologie MJ používá gelový materiál, který lze snadno odstranit ručně, vodou nebo chemicky. Jakmile jsou všechny podpory odstraněny, tak už není nutné výtisky nijak dále upravovat, mají velmi vysokou kvalitu povrchu. [1]



Obr. 21 Schéma aditivní technologie Material Jetting [25]

Pro MJ byla vyvinuta spousta fotopolymerních materiálů, které jsou tuhé, pružné, neprůhledné, průhledné a mají vlastnosti např. ABS, PP, vosku nebo kaučuku. [1]

Pomocí technologie MJ můžeme tisknout více materiálů najednou, které ale lze ještě míchat mezi sebou dohromady, a vytvořit tak spousty materiálů s různými vlastnostmi. Dále pomocí různých inkoustů můžeme tisknout plnobarevné výtisky. Například s tiskárnou J750

od firmy Stratasys lze tisknout 6 základních materiálů, které mají 360 000 barevných odstínů. [1]

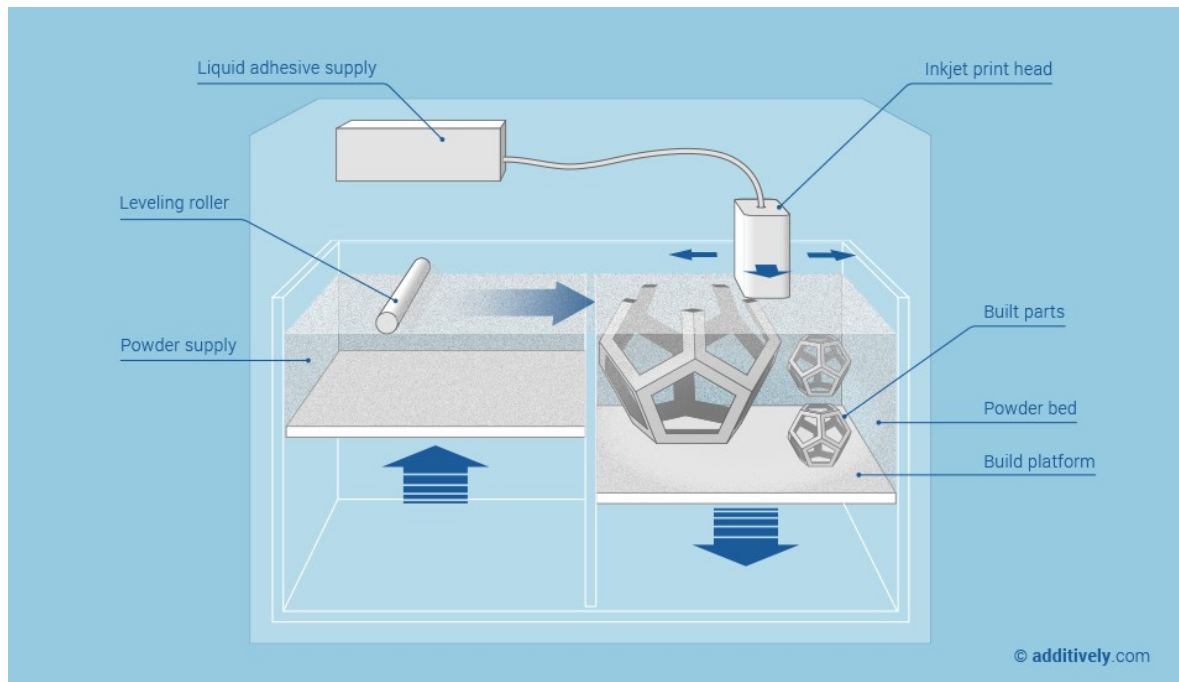


Obr. 22 Model vytištěný na tiskárně Stratasys J750 [23]

2.4 Binder Jetting

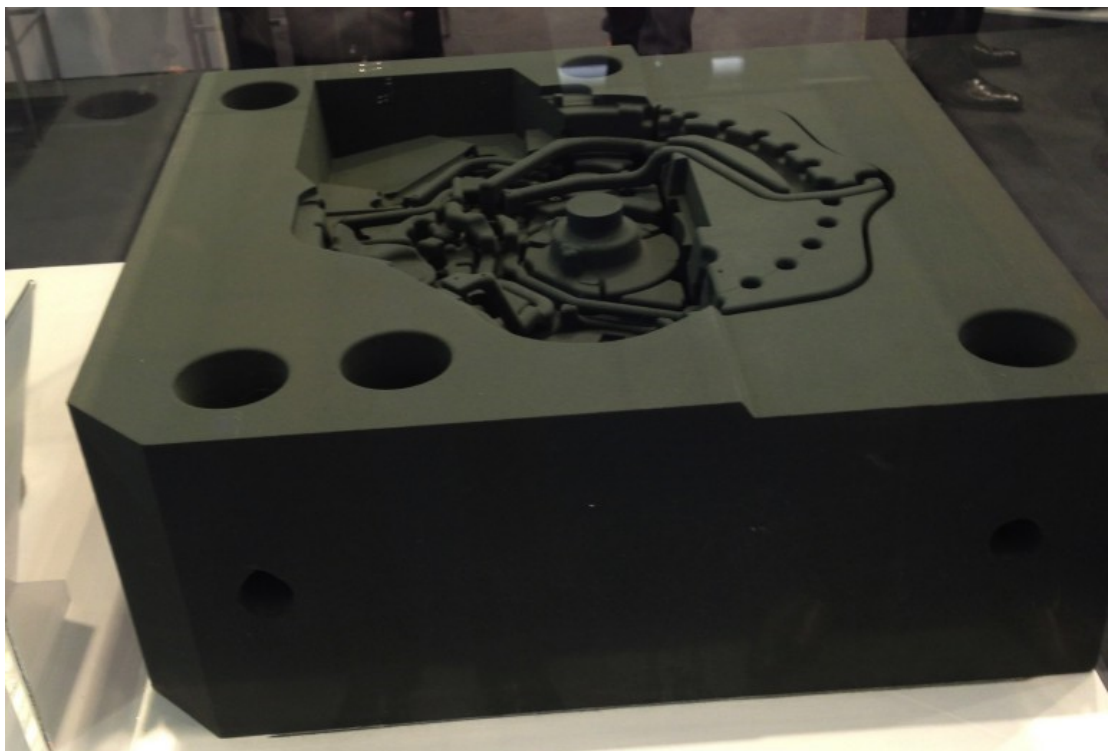
Aditivní technologie Binder Jetting (BJ) využívá k 3D tisku materiály ve formě prášků, které se spojí pomocí naneseného pojiva. Prášek je po jednotlivých vrstvách nanášen pomocí válečku. Po nanesení prášku je z tiskové hlavy nanášeno pojivo na daná místa, následně se tisková podložka sníží o výšku vrstvy a zásobník s práškem se zvýší o výšku vrstvy a celý proces se znovu zopakuje (Obr. 23). [1]

Při tisku technologií BJ není nutné tisknout podpory. Jako podpora slouží prášek, který nebyl spojený pomocí pojiva. Jakmile je součást vytištěna, je nutné ji dát do komory, kde se součást vyfouká stlačeným vzduchem a veškerý přebytečný prášek je dále recyklován a použit při dalším tisku. [1]



Obr. 23 Schéma aditivní technologie Binder Jetting [24]

Aditivní technologie BJ se nejčastěji používá k tisku pískových forem, jader, odlitků, které se následně zaformují, nebo k tisku plně barevných objektů. Tisk pomocí technologie BJ je velmi rychlý a levný oproti jiným aditivním technologiím. [1]



Obr. 24 Vytisknutá písková forma pomocí aditivní technologie Binder Jetting [26]

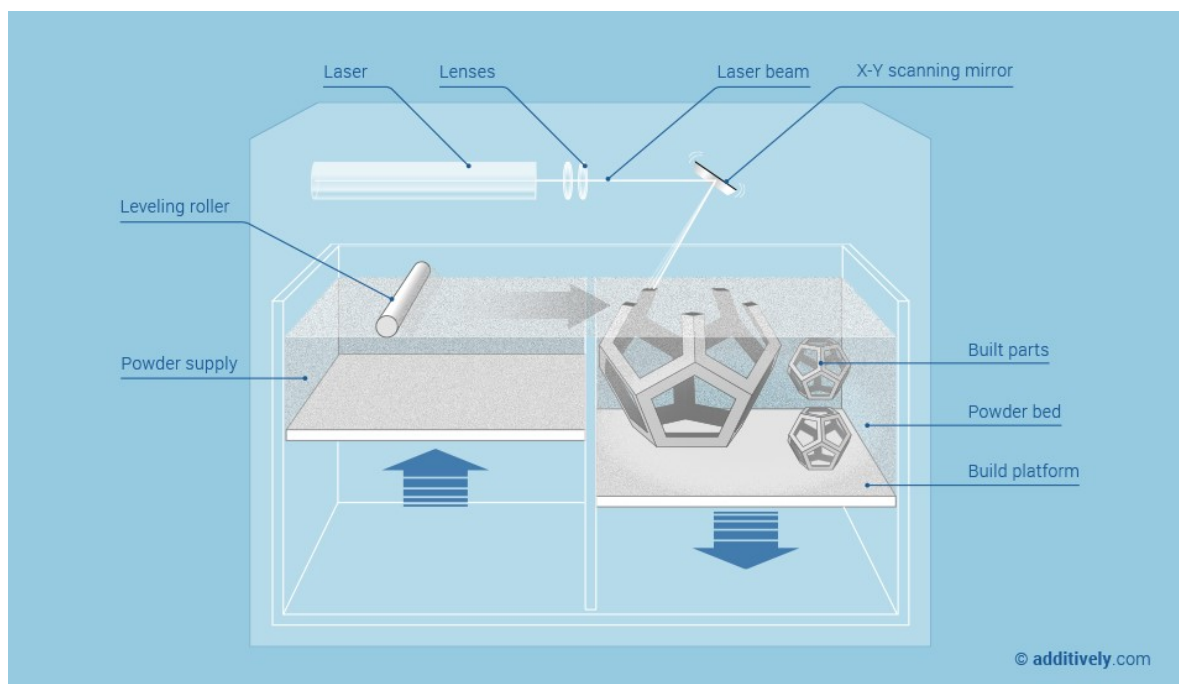
2.5 Powder Bed Fusion

Mezi další aditivní technologie založených na použití prášků patří Laser Sintering (LS), Electron Beam Melting (EBM) a Selective Heat Sintering (SHS). Největším rozdílem oproti aditivní technologii BJ je spékání prášků pomocí tepla. [1]

2.5.1 Laser Sintering

Laser Sintering byla první vyvinutá aditivní technologie, která využívá spékání prášků k vytvoření požadované součásti. Aditivní technologie LS byla vyvinuta na University of Texas v Austinu v USA. [1], [4]

Principem aditivní technologie LS je nanášení prášku po jednotlivých vrstvách pomocí válečku. Po nanesení prášku je průřez tištěné součásti spékán pomocí laseru, následně se tisková podložka sníží o výšku vrstvy a zásobník s práškem se zvýší o výšku vrstvy a celý proces se znovu zopakuje (Obr. 25). [1], [4]



Obr. 25 Schéma aditivní technologie Laser Sintering [27]

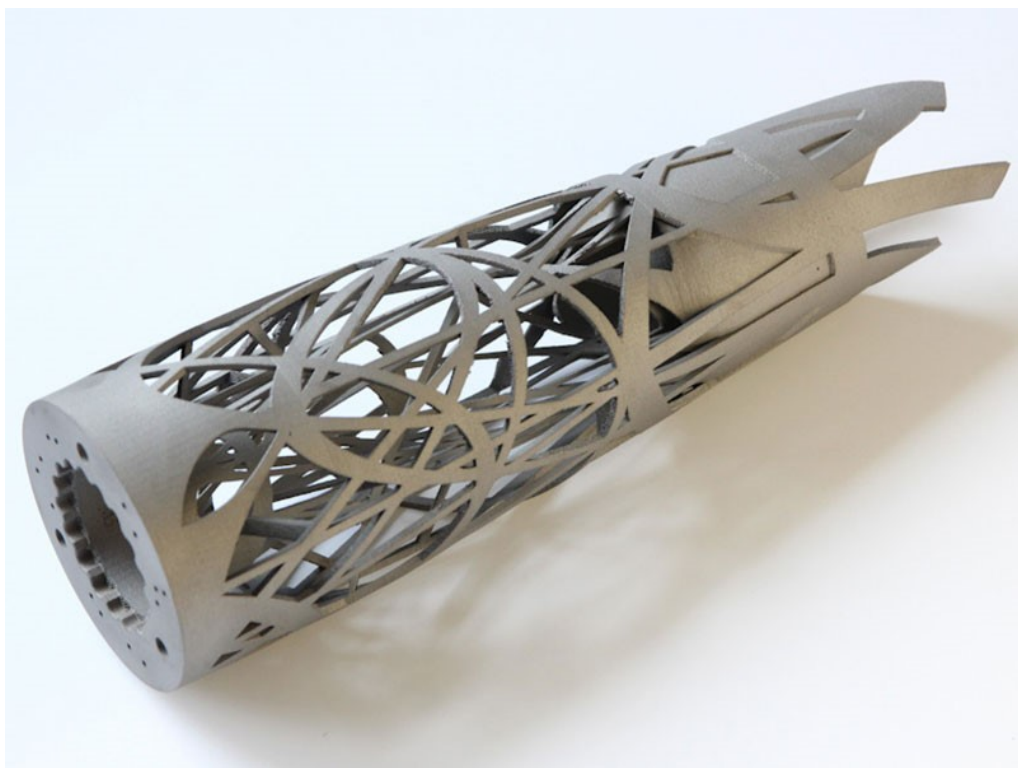
Aditivní technologie LS využívá různé práškové materiály, např. termoplastické polymery, kovy, keramiku, vosk atd. Aby byla zajištěna konzistentní výška nanesené práškové vrstvy, je nutné používat práškové granuláty, které mají průměr pohybující se v rozmezí 40 až 90 mikrometrů (0,04 až 0,09 mm). [1], [4]

Dále je možné využít při LS dvousložkové práškové materiály. Tzn. že jedna prášková složka má vysoký bod tání, např. kov, sklo, a druhá prášková složka má nízký bod tání, např. nylon. Lze tak vyrábět součásti s kovovým leskem za relativně nízkých teplot. [1], [4]

Při tisku součástí z nekovových materiálů aditivní technologií LS není nutné tisknout podpory. Jako podpora slouží prášek, který nebyl spečen pomocí laseru. Naopak při tisku součástí z kovových materiálů je nutné tisknout podpory pro různé převisy, přesahy atd. nebo z důvodu rozptýlení tepla, které vzniká při spékání. [1], [4]

Objekty vytištěné aditivní technologií LS mají velmi vysokou přesnost a dobrou kvalitu povrchu. [1], [4]

Na trhu existuje spousta aditivních technologií, které využívají spékání prášků pomocí laseru. Všechny tyto aditivní technologie mají malé rozdíly, které závisí na daném procesu a konkrétním výrobcí 3D tiskárny. Jsou to např. Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM), Laser Beam Melting (LBM), Direct Metal Printing (DMP), Laser Metal Fusion (LMF) a laserCUSING. [1], [4]



Obr. 26 Kovová součást vytvořená pomocí aditivní technologie DMLS [28]

2.5.2 Electron Beam Melting

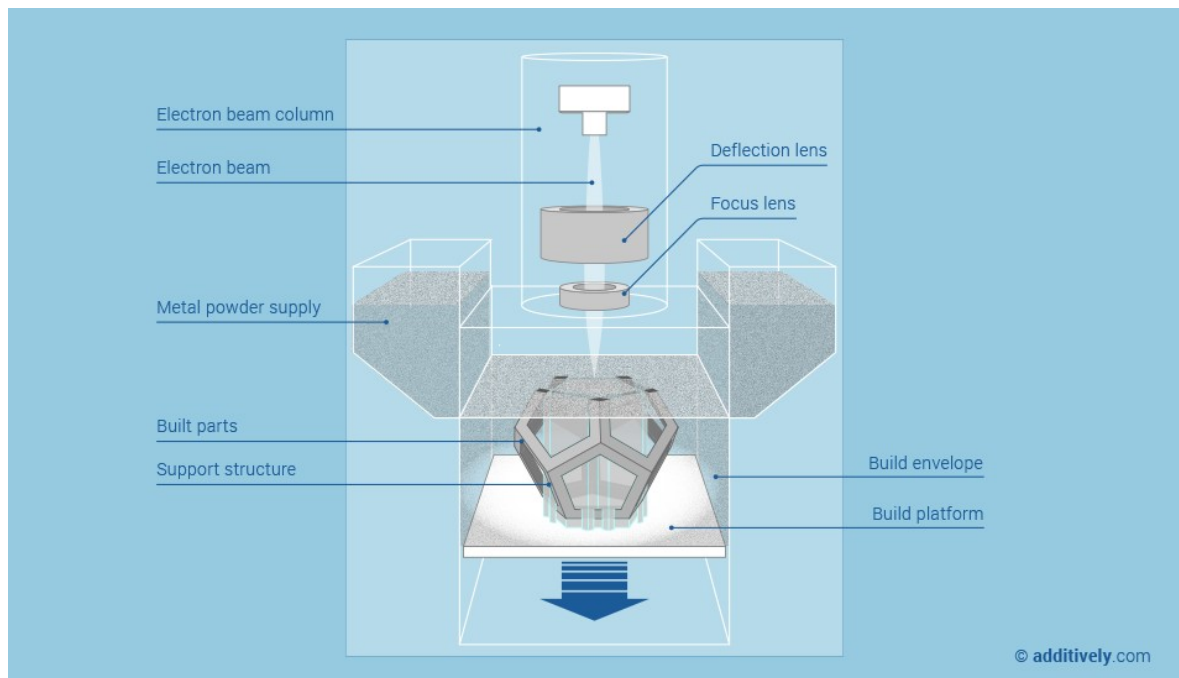
Aditivní technologie Electron Beam Melting je velmi podobná aditivní technologii Laser Sintering. EBM na rozdíl od LS využívá k tavení prášků elektronový paprsek, který taví prášek ve vakuu. [1], [4]

Principem aditivní technologie EBM je nanášení prášku po jednotlivých vrstvách. Po nanesení prášku je průřez tištěné součásti spékán pomocí elektronového paprsku ve vakuu, následně se tisková podložka sníží o výšku vrstvy a ze zásobníku s práškem je nanesena další vrstva a celý proces se znovu zopakuje (Obr. 27). [1], [4]

Při tisku součástí je nutné tisknout podpory pro různé převisy, přesahy atd., nebo z důvodu rozptýlení tepla, které vzniká při spékání. [1], [4]

Pro EBM je možné využít pouze kovové práškové materiály, jsou to např. titan, cobalt chrom atd. [1], [4]

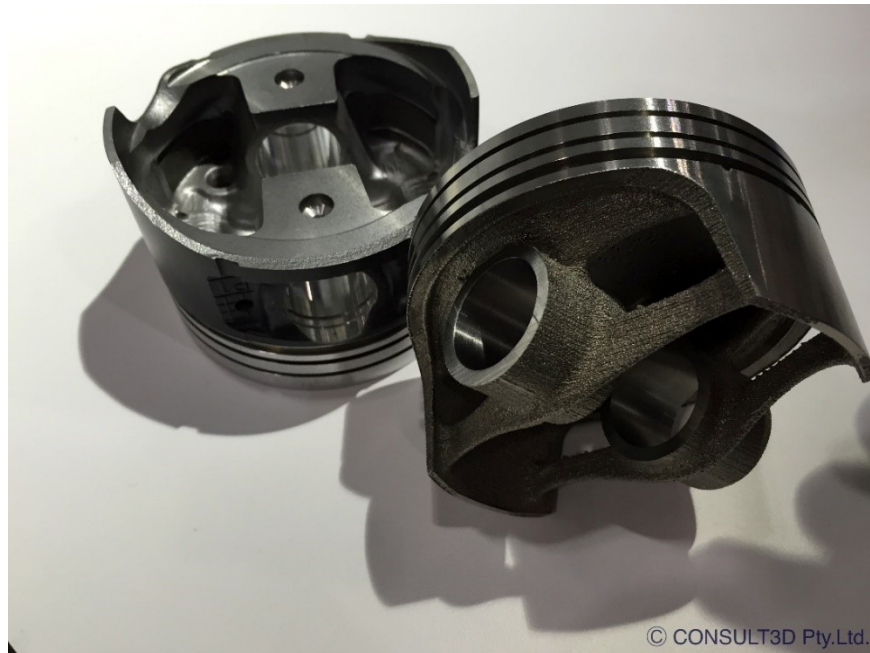
Na rozdíl od LS je možné pomocí EBM vytvářet objekty, které mají vysokou hustotu a jsou vysoce pevné. Dále EBM produkuje méně tepelného namáhání, a proto nepotřebuje tolik podpůrné struktury. [1], [4]



Obr. 27 Schéma aditivní technologie Electron Beam Melting [29]

EBM je stále pomalý a nákladný proces, který pracuje pouze s omezeným množstvím kovů. Díly obvykle vyžadují poměrně hodně dokončovacích operací. EBM nedosahuje dobré drsnosti povrchu v porovnání s LS. [1], [4]

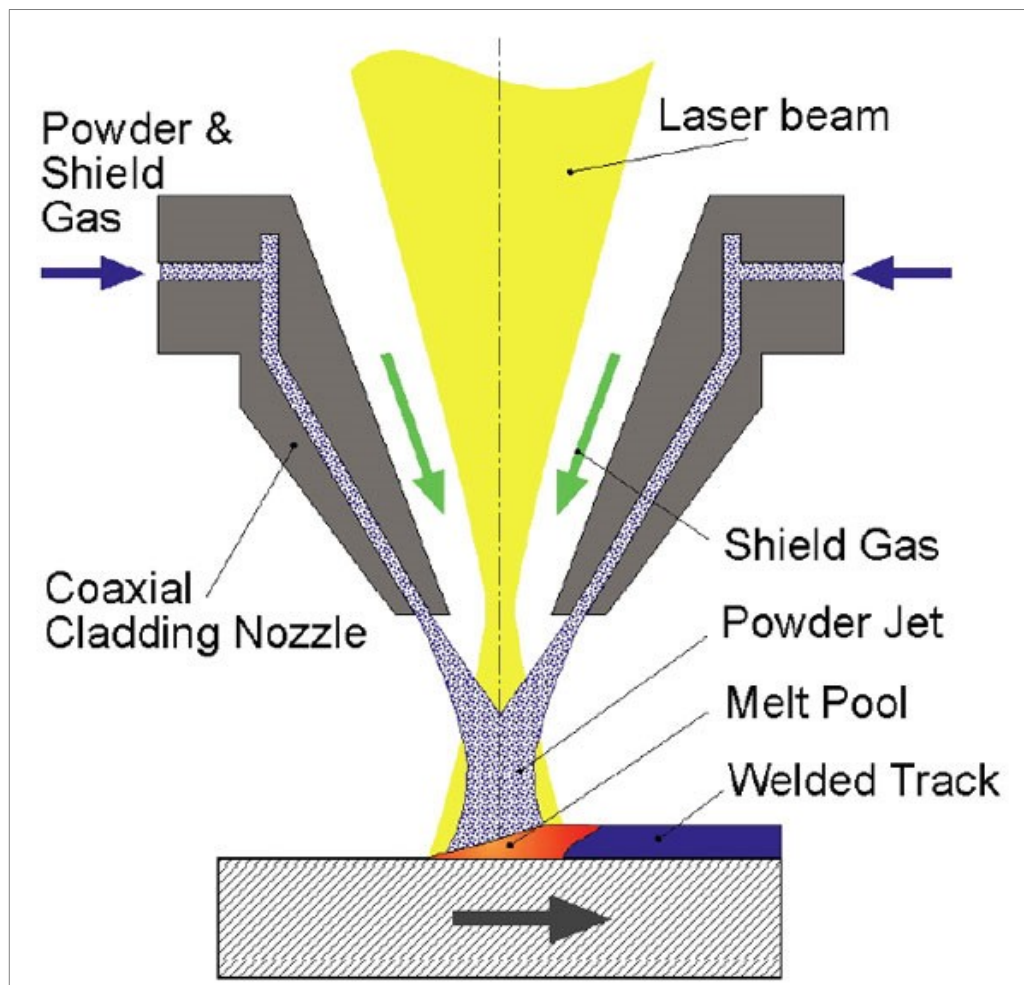
EBM se používá v leteckém průmyslu, v lékařství a dalších specializovaných odvětvích. [1], [4]



Obr. 28 Píst motoru vytištěný pomocí technologie EBM [29]

2.6 Directed Energy Deposition

Aditivní technologie Directed Energy Deposition (DED) využívá ke tvorbě objektů kovové prášky nebo drát, který se taví pomocí laserového paprsku, elektronového paprsku nebo plasmu. Paprsek je soustředěn do velmi úzké oblasti, ve které se přiváděný kovový prášek taví. Tavení kovových prášků probíhá v ochranné atmosféře argonu. DED se hodně podobá aditivní technologii, která využívá proces vytlačování (Obr. 29). [1], [4]

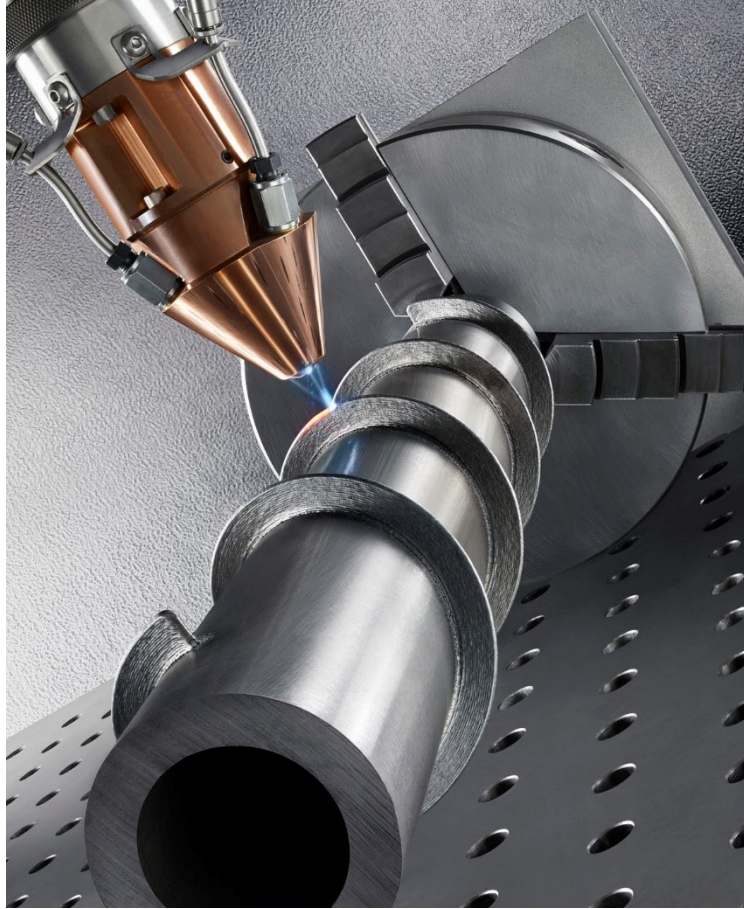


Obr. 29 Schéma aditivní technologie Directed Energy Deposition [31]

Během tisku součástí pomocí aditivní technologie DED se tisková hlava pohybuje v 5 osách a lze průběžně měnit prášek, ze kterého se objekt tiskne. Tzn. že lze vytvořit objekt s různými vlastnostmi, které běžnými technologiemi obrábění nelze dosáhnout. [1], [4]

Aditivní technologii DED vyvinulo několik společností, které ji nazývají jako Laser Metal Deposition (LMD), Laser Engineered Net Shaping (LENS), Directed Light Fabrication (DLF) nebo Direct Metal Deposition (DMD). [1], [4]

Pomocí DED lze tvořit nové objekty, opravovat součásti nebo přidat novou část na již vytvořenou součást. Objekty vytvořené aditivní technologií DED nejsou porézni, podobají se součástem, které jsou vytvořené pomocí tradičních technologií obrábění, ale vyžadují dodatečné dokončovací operace. [1], [4]



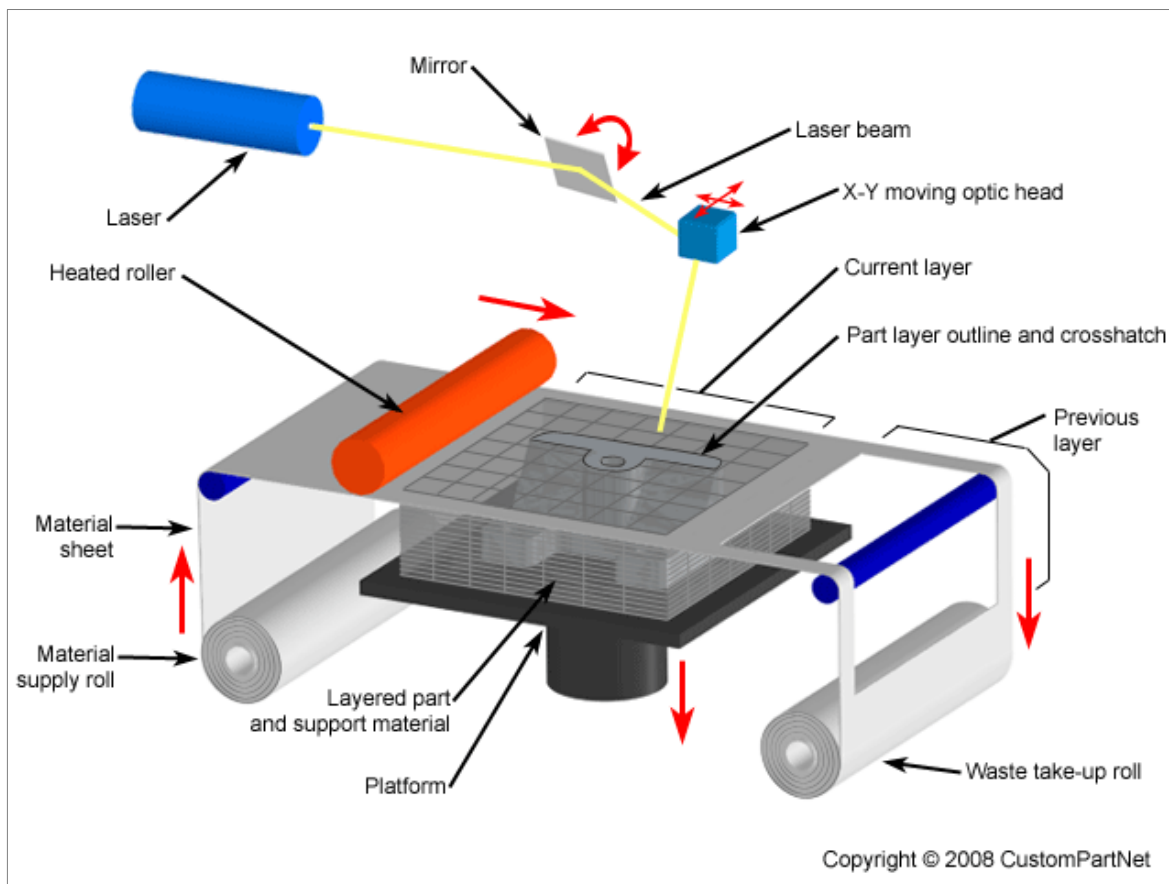
Obr. 30 Dodatečný tisk pomocí LMD na již vytvořenou součást [32]

2.7 Sheet Lamination

Aditivní technologie Sheet Lamination (SL) využívá ke tvorbě objektů papírové, plastové nebo kovové fólie. [1], [4]

Aditivní technologie, která využívá ke tvorbě objektů papírové fólie se nazývá Laminated Object Manufacture (LOM). Papírové fólie jsou opatřeny vrstvou lepidla. Po nanesení vrstvy na základní desku se nejdříve papírové fólie vytvrdí pomocí vyhřívaného válce, tím dojde ke slepení vrstev a následně je vytvrzená vrstva ořezána pomocí CO₂ laseru. Přebytečná fólie se, kvůli lepšímu odstranění od výsledného výtisku, rozřeže na čtverce. Nakonec se základní deska sníží o výšku vrstvy a celý postup se opakuje (Obr. 31). [1], [4]

Při tisku objektů pomocí aditivní technologie SL není nutné používat podpory. Nevýhodou je, že výsledný objekt má horší kvalitu povrchu. Dále nelze tisknout tenkostěnné objekty a taky při tisku vzniká velké množství odpadu. Výhodou SL je, že lze tisknout velké objekty z různých materiálů. [1], [4]



Obr. 31 Schéma aditivní technologie Laminated Object Manufacture [33]

3 REPRAP PROJECT

Po mnoho let byly 3D tiskárny velmi nákladným a složitým zařízením. Až v roce 2005 Dr. Adrian Bowyer na University of Bath ve Spojeném království založil projekt s názvem RepRap. Cílem projektu byl vznik levné open-source 3D tiskárny, která dokáže sama sebe replikovat. RepRap je zkratka slov „replicating rapid prototyper“. Principem bylo, aby tiskárna dokázala tisknout kopii sebe sama. To způsobilo, že uživatelé jsou schopni si tak tisknout a rozmnožovat tiskárny mezi sebou. To přineslo bohatý vývoj v oblasti spotřebitelských 3D tiskáren. [3]

3.1 Význam open-source

Hlavní a nejdůležitější věcí na RepRap projektu bylo to, že byl zcela open-source. Tzn. že návrh a vývoj zařízení byl zcela veřejný. Do RepRap projektu mohl přispět kdokoli a taky kdokoli ho mohl využít. [3]

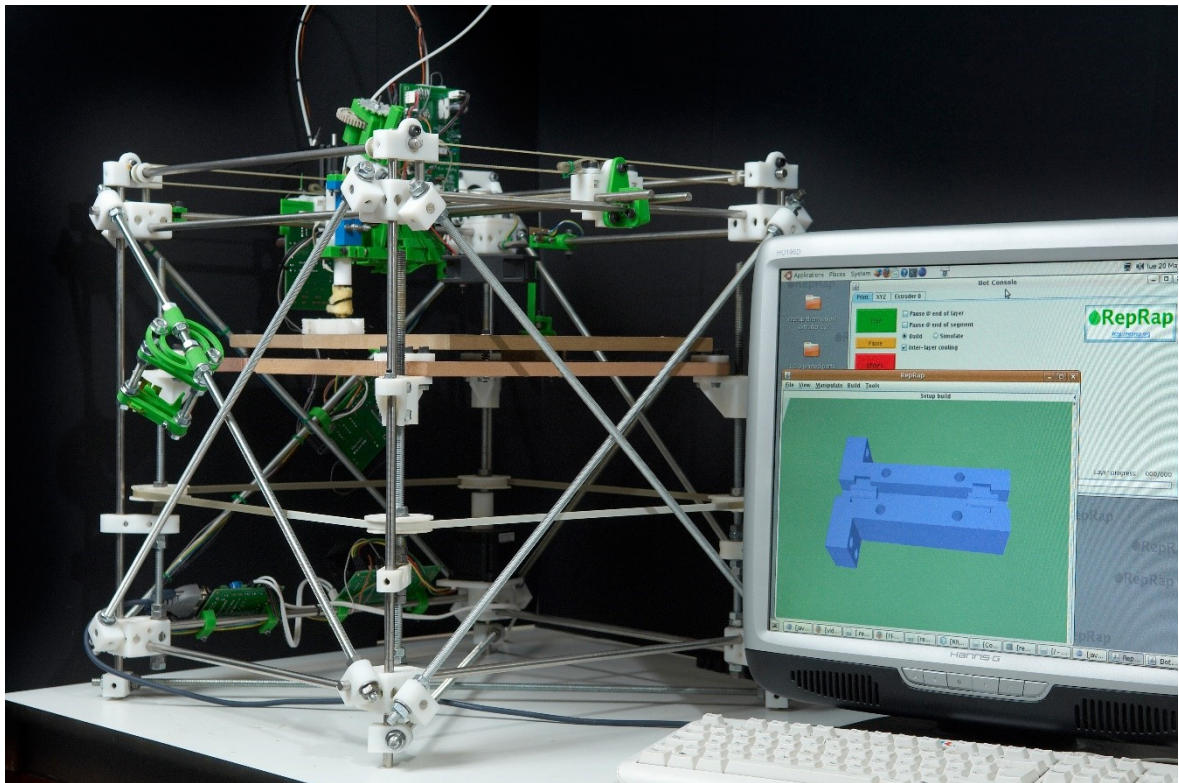
V případě, že nastal v RepRap projektu nějaký průlomový objev, bylo ho možné velmi rychle integrovat do nových 3D tiskáren. Dobrým příkladem je RepRap Arduino Mega Pololu Shield (RAMPS), což je ovládací panel, který je v podstatě mozek 3D tiskárny. RAMPS deska se připojuje k Arduinu, které zajišťuje řízení krokových motorů a extruderu 3D tiskárny. Vývoj RAMPS dovolil lidem rychle, levně a jednoduše řídit jejich 3D tiskárny. [3]

Vzhledem k tomu, že je vše open-source, tak zde nejsou žádné patenty. Tzn. že všechny nově objevené věci lze velmi rychle používat a zlepšovat. [3]

Tento koncept byl základem úspěchu a přispěl k velmi rychlému rozvoji RepRap 3D tiskáren a spotřebitelských 3D tiskáren obecně. [3]

3.2 Vývoj RepRap 3D tiskárny

Vzhledem k tomu, že byl RepRap projekt open-source, tak se vyvinul extrémně rychle. První kompletní RepRap 3D tiskárna Darwin (Obr. 32), byla puštěna do světa v roce 2007. Darwin měl velmi základní provedení a byl schopen pouze průměrné kvality tisku. Darwin využíval metodu tisku Fused Filament Fabrication (FFF). Aditivní technologie FFF je stejná jako aditivní technologie FDM. Byl jen použit jiný název, aby se zabránilo právním problémům s firmou Stratasys, která má patentovanou aditivní technologii FDM. [3]



Obr. 32 RepRap 3D tiskárna Darwin [3]

V roce 2009 byl puštěn do světa nový návrh RepRap 3D tiskárny s názvem Mendel. RepRap 3D tiskárna Mendel přinesla spoustu zlepšení oproti designu Darwinu, která zvýšila spolehlivost, zlepšila kvalitu tisku a snížila obtížnost sestavení 3D tiskárny. [3]

V současné době existuje více než 30 oficiálních RepRap návrhů 3D tiskáren s různými modifikacemi. [3]

Během několika let RepRap 3D tiskárny dosáhly kvality a spolehlivosti tak vysoké, že jsou dokonce používány k profesionální tvorbě prototypů. [3]

3.3 Dostupnost 3D tiskáren

Během několika málo let nastal velký skok mezi drahými profesionálními a uživatelskými 3D tiskárnami, které jsou několikanásobně levnější. Tak rychlý vývoj byl způsoben zejména propagací a úspěchem RepRap projektu a RepRap 3D tiskárnou Darwin. [3]

RepRap projekt způsobil to, že 3D tiskárny jsou dostupné pro každého z nás. To způsobilo, že vznikla spousta společností, které se zabývají výrobou a prodejem cenově dostupných tiskáren. Někteří výrobci využili RepRap projektu a někteří si vyvinuli své vlastní 3D tiskárny. Všichni ale vycházeli z informací a znalostí z projektu RepRap. [3]

Díky tomu tak ceny tiskáren klesly z několika tisíc dolarů na několik stovek dolarů, ale není to jen cena, která se změnila, i kvalita dostupných 3D tiskáren šla mílovými kroky nahoru. [3]

Dalo se tak očekávat, že zařízení s tak krátkou historií nebylo připravené na mainstreamové využití. 3D tisk v domácnostech je stále spíše experimentální záležitostí, protože to není tak jednoduché, jako tisknout na jeden list papíru s inkoustovou tiskárnou. [3]

3D tisk je ale revoluční a tempo, jakým se vyvíjí, je ohromující. [3]

4 FUSED FILAMENT FABRICATION

Fused Filament Fabrication (FFF) je aditivní technologie, která se používá v cenově dostupných 3D tiskárnách. Principem je tavení vlákna (drátu) v extruderu z termoplastického polymeru, který se následně nanáší na tiskovou podložku ve formě „housesky“. Aditivní technologii FFF si lze představit jako tavnou pistoli. Termoplastické vlákno (drát) si lze představit jako tyčinku do tavné pistole, která se taví a je vytlačována z vyhřívané trysky. Pokud bychom tavnou pistolí nakreslili čtverec a na tom čtverci další čtverec a tímto způsobem postupovali dál a dál, tak jsme schopni vytvořit např. kostku. 3D tiskárna, která využívá aditivní technologii FFF, pracuje stejným způsobem, ale mnohem přesněji. [3]

FFF 3D tiskárny využívají stejnou technologii jako profesionální FDM 3D tiskárny s tím rozdílem, že profesionální FDM 3D tiskárny jsou přesnější s mnoha dalšími funkcemi. [3]

Tyto 3D tiskárny jsou populární hlavně proto, že jsou cenově dostupné, snadno pochopitelné a ovladatelné. Bohužel ale nejméně přesné. Výrobci 3D tiskáren vynakládají mnoho úsilí

na to, aby byl 3D tisk aditivní technologií FFF kvalitnější a přesnější, bohužel ale FFF stále zaostává za ostatními aditivními technologiemi. [3]

Další nevýhodou je čas potřebný k vytvoření součásti pomocí aditivní technologie FFF. Největší nevýhodou aditivní technologie FFF jsou deformace, které vznikají při tisku vzhledem k tomu, jak se termoplasty rozpínají a smršťují při zahřívání a ochlazování. Z toho plyne, že pokud některé vrstvy vychladnou dříve než ostatní, tak to způsobí dodatečnou deformaci, která může vést až k prasknutí výtisku (Obr. 33). [3]



Obr. 33 Popraskaný výtisk vlivem deformace [3]

To, jak velké deformace vznikají při tisku, závisí na tom, jaký termoplast se při 3D tisku používá. Např. akrylonitril-butadien-styren (ABS) je obzvláště náchylný k deformaci a k praskání. Použitím jiného materiálu, např. polylaktid acid (PLA), minimalizujeme deformaci, ale žádný z materiálů není schopen se jí úplně vyhnout. [3]

Výrobci 3D tiskáren tak ve snaze vyhnout se deformaci vymysleli řadu způsobů, kterými je možné deformace eliminovat. Mezi nejpoužívanější patří vyhřívaná podložka a vyhřívaná tisková komora. Všechny tyto metody jsou spojené s řízením teploty tištěné součásti tak, aby její teplota byla co nejvíc konstantní po celou dobu tisku. [3]

Problémy s deformacemi, praskáním a nízkou kvalitou tisku jsou zcela značné nevýhody i přesto mezi největší výhody FFF patří nízké náklady na 3D tisk. [3]

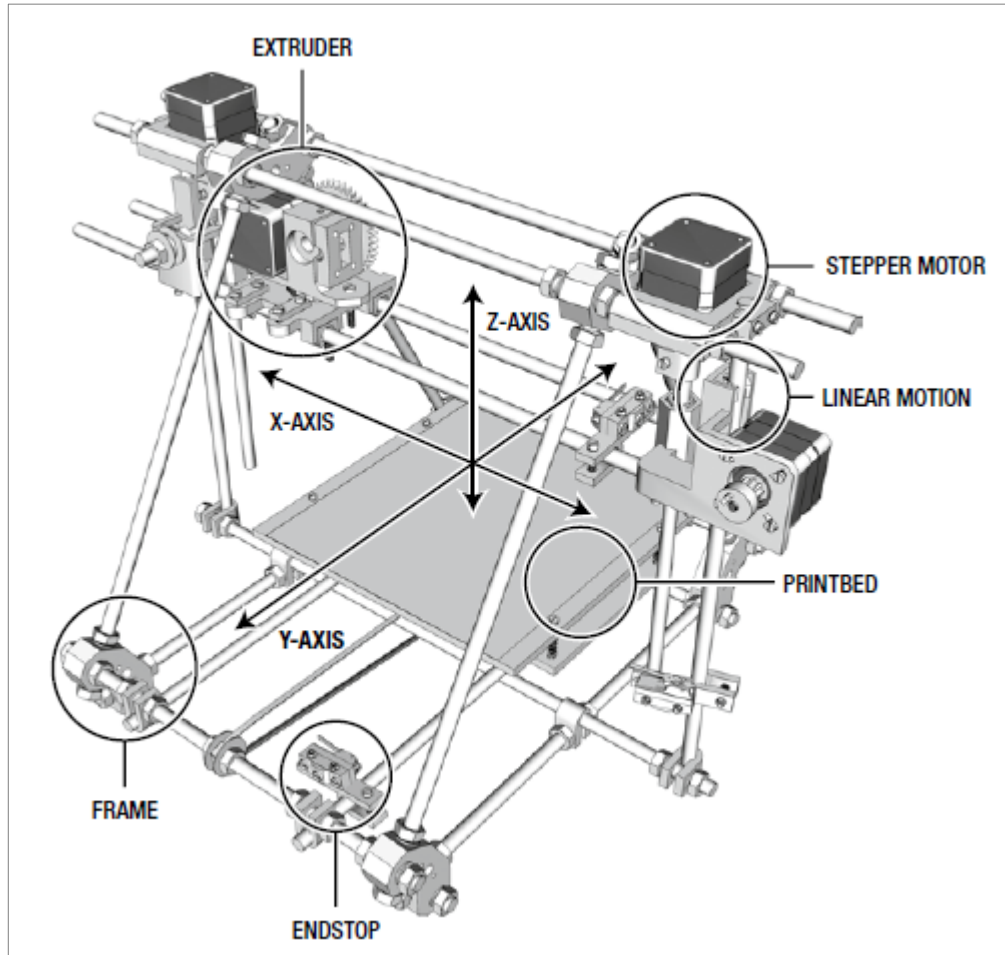
4.1 Typy FFF 3D tiskáren

V dnešní době existuje několik druhů 3D tiskáren, které využívají aditivní technologii FFF. První druh 3D tiskáren, který je zároveň nejpoužívanější, používá kartézský souřadný systém. Dalšími druhy 3D tiskáren jsou tzv. Delta 3D tiskárny, 3D tiskárny s polárním souřadným systémem a SCARA 3D tiskárny. [2], [6]

4.1.1 3D tiskárny s kartézským souřadným systémem

3D tiskárny využívající aditivní technologii FFF nejčastěji používají kartézský souřadný systém (Obr. 34). Kartézský souřadný systém vymyslel francouzský matematik a filozof René Descartes. Používá se k popsání jakékoliv polohy v prostoru, pomocí třech vzájemně kolmých směrů (osy X, Y, Z) od počátečního bodu. [2], [6]

U 3D tiskárny se využívají 2 typy konstrukce. U prvního typu konstrukce se pohybuje extruder v ose X a tisková podložka se pohybuje v osách Y a Z. U druhého typu konstrukce se extruder pohybuje v osách X, Y a tisková podložka se pohybuje v ose Z. [2], [6]



Obr. 34 Návrh 3D tiskárny využívající kartézský souřadný systém [5]

4.1.2 3D tiskárny delta

Dalším druhem 3D tiskáren využívající technologii FFF jsou tzv. Delta 3D tiskárny, které využívají principu tzv. delta robotů (Obr. 35). [2], [6]

U Delta 3D tiskárny (Obr. 36) se tisková podložka nepohybuje a extruder se pohybuje v osách X, Y, Z. Poloha extruderu se počítá pomocí řídicí jednotky tiskárny. [2], [6]

Delta 3D tiskárny byly navrženy pro rychlejší 3D tisk, jejich další výhodou je nepohybující se tisková podložka, kterou lze výhodně využít při některých tiskových úlohách. [2], [6]



Obr. 35 Delta robot od firmy ABB [34]



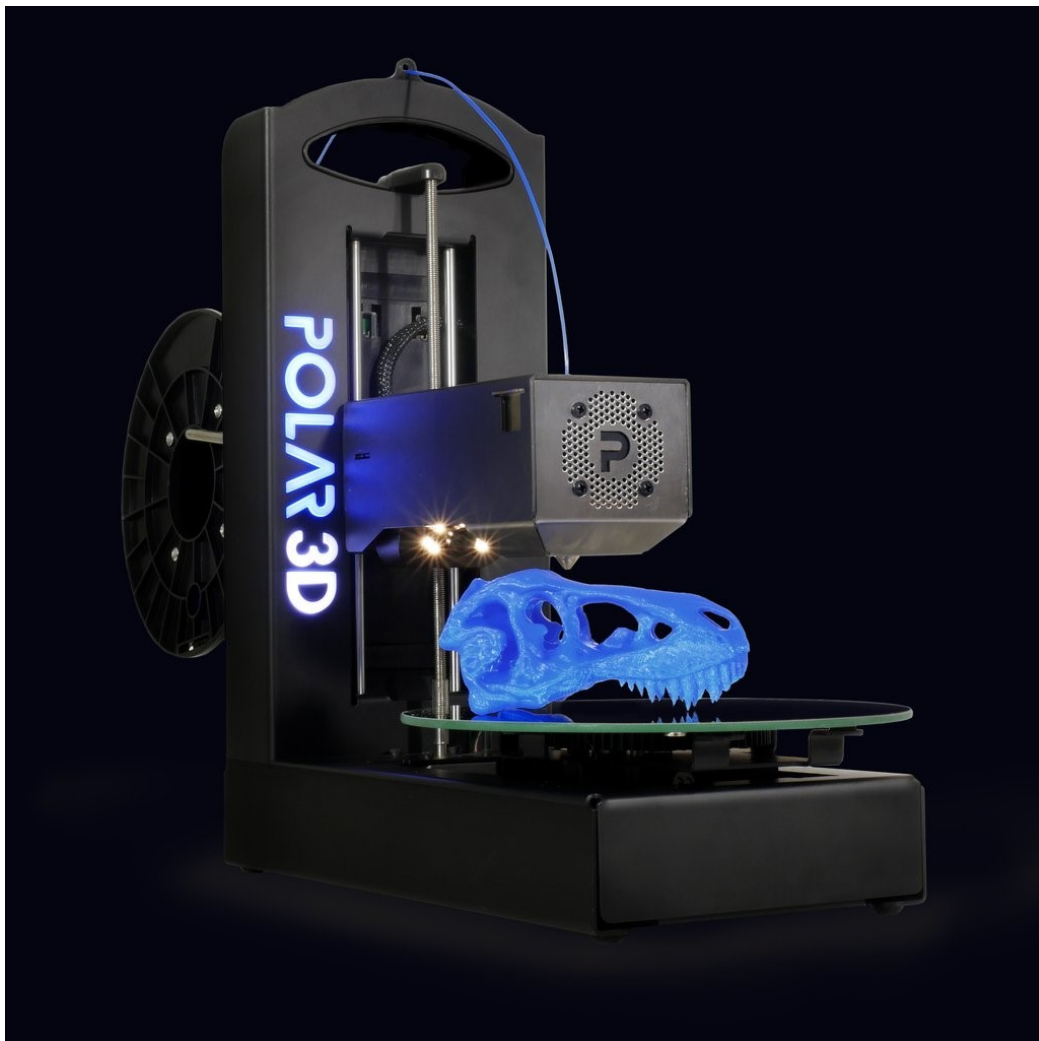
Obr. 36 FFF Delta 3D tiskárna Rostock MAX [35]

4.1.3 3D tiskárny s polárním souřadným systémem

Třetím druhem 3D tiskáren využívající aditivní technologii FFF jsou 3D tiskárny, které využívají polární souřadný systém (Obr. 37). Polární souřadný systém se podobá kartézskému souřadnému systému s tím rozdílem, že se poloha popisuje pomocí kruhové sítě. [2], [6]

U 3D tiskárny s polárním souřadným systémem tisková podložka rotuje a extruder se pohybuje nahoru, dolů, doleva a doprava. [2], [6]

Velkou výhodou 3D tiskárny s polárním souřadným systémem je, že může mít pouze dva krokové motory a je možné využít většího tiskového prostoru na menší tiskové podložce. [2], [6]



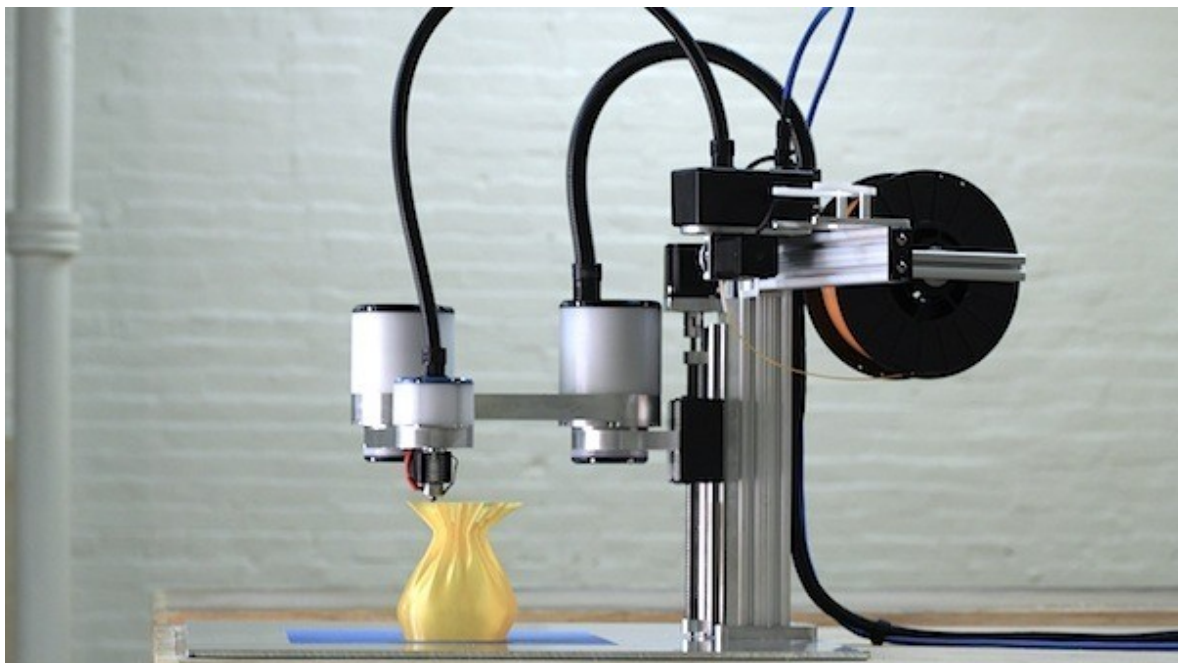
Obr. 37 3D tiskárna Polar 3D s polárním souřadným systémem [36]

4.1.4 3D tiskárny SCARA

Robot SCARA se většinou používá, aby opakovaně zpracovával přesné montážní operace.

SCARA je zkratkou slov Selective Compliant Assembly Robot Arm nebo Selective Compliant Articulated Robot Arm. Rameno SCARA robota pohybuje v rovině X-Y a pomocí přídatného pohonu se pohybuje podél osy Z. [37]

Americká společnost Flux Integration LLC ale vyvinula první cenově dostupné robotické rameno SCARA FLX.ARM.S16.Z8, na které namontovala extruder, a tím vytvořila první SCARA 3D tiskárnu využívající technologii FFF (Obr. 38). [37]



Obr. 38 3D tiskárna SCARA FLX.ARM.S16.Z8 [37]

4.2 Materiály pro 3D tisk metodou FFF

Pro 3D tisk aditivní technologií FFF lze použít téměř všechny druhy termoplastů. Rozhodujícími faktory jsou teplota zpracování a toxicita termoplastu. [6]

Pro 3D tiskárny se používá termoplast ve formě vlákna (drátu), které se vyrábí pomocí vytlačování na vytlačovacím stroji. Vlákno pro 3D tisk se běžně dodává ve standardních průměrech 1,75 mm a 3 mm. Je důležité při výrobě vlákna dodržet co nejpřesnější rozměr průměru vlákna. Skutečný rozměr vlákna má totiž velký vliv na kvalitu 3D tisku, proto ti nejlepší výrobci materiálů pro 3D tisk dodržují toleranci vlákna $\pm 0,05$ mm. [6]

Nejčastěji používané materiály pro 3D tisk jsou PLA a ABS, ale čím dál častěji se na trhu začínají objevovat materiály, které jsou navrženy pro specifické účely elasticita, pevnost, pružnost, optická čírost atd. [6]

4.2.1 PLA – polylaktid acid

PLA je polymer kyseliny mléčné, jedná se o biopolymer, který se obtížně recykluje, protože má podobnou hmotnost jako PET, tudíž znehodnocuje plastový odpad. PLA lze ale recyklovat pomocí průmyslového kompostování. PLA je zdravotně nezávadný polymer, který se dobře zpracovává a má dobré optické vlastnosti. Nevýhodou PLA je jeho velmi nízká teplota skelného přechodu (od 50°C lze pozorovat tvarové deformace) a velmi špatná obrobiteľnosť. [38]

Tab. 1 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál PLA [39]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro PLA	
Teplota zpracování [°C]:	190-210
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	40-50
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	30-40

4.2.2 ABS

Jedná se o kopolymer, který se skládá ze tří skupin => akrylonitril, butadien a styren. Každá z těchto skupin je nositelem určitých vlastností a podle poměru, ve kterém se nachází v ABS, se určují výsledné vlastnosti ABS. ABS je amorfni polymer, který našel velmi široké použití, je zdravotně nezávadný, velmi dobře se zpracovává, má dobré mechanické vlastnosti, je to elektrický izolant a dobře se obrábí. Nevýhodou ABS je, že neodolává UV záření – žloutne. [38]

Tab. 2 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál ABS [40]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro ABS	
Teplota zpracování [°C]:	220-240
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	90-100
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	30-40

4.2.3 ASA

ASA je technický polymer ze stejné skupiny jako ABS. ASA ale neobsahuje butadienovou skupinu, tzn. že má vyšší odolnost proti UV záření. ASA lze velmi dobře zpracovávat a má dobré mechanické vlastnosti. [38]

Tab. 3 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál ASA [41]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro ASA	
Teplota zpracování [°C]:	250-255
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	80-100
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	30-40

4.2.4 Nylon

Nylon patří do skupiny polyamidů, které se vyznačují funkční amidovou skupinou -NH-CO-. Jedná se o semikrystalický plast, který má vysokou smršťivost, vysokou nasákačnost až 10 %. Obsah vody ovlivňuje mechanické vlastnosti a podporuje degradaci polymeru. Pro 3D tisk se používá PA6 nebo PA66, který je pevný, tuhý polymer s vysokou rázovou houževnatostí a nízkým otěrem. [38]

Tab. 4 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál Nylon [42]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro Nylon	
Teplota zpracování [°C]:	235-250
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	80-100
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	30-40

4.2.5 PES – Polyester

Jedná se o technický polymer, který se využívá především v obalovém průmyslu a pro výrobu vláken. Vlastnosti polymeru lze ovlivnit pomocí vhodné kombinace esteru dikarboxylové kyseliny a vícesytného alkoholu. PES má dobré mechanické vlastnosti a výborné optické vlastnosti. [38]

Tab. 5 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál PES [43]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro PES	
Teplota zpracování [°C]:	255-260
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	80-100
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	30-40

4.2.6 Flexfill – Flexible Filament

Jedná se o termoplastické polyuretany. TPU je amorfni plast, který má podobné vlastnosti jako tuhá pryž => vysoká tažnost a rázová houževnatost. TPU je odolný vůči olejům a pohonným hmotám, ale není odolný vůči kyselinám, louhům a alkoholům. Materiál Flexfill je vyráběn ve dvou tvrdostech Shore A a to 98 ShA a 92 ShA. [38]

Tab. 6 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál Flexfill [44]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro Flexfill	
Teplota zpracování [°C]:	200-220
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	30-50
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	10-30

4.2.7 Timberfill – Wood Composite Filament

Timberfill je směs dřevní moučky (cca 30%) a polymeru PLA. [38]

Tab. 7 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál Timberfill [45]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro Timberfill	
Teplota zpracování [°C]:	170-185
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	40-50
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	20-30

4.2.8 HIPS – High Impact Polystyren

HIPS se využívá v 3D tisku jako materiál pro tvorbu podpor. HIPS je nenavlhavý, rozpustný v aromatických terpenech a dobře se zpracovává. [38]

Tab. 8 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál HIPS [46]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro HIPS	
Teplota zpracování [°C]:	245-250
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	90-100
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	30-40

4.2.9 PVA – Polyvinylalkohol

PVA se nejčastěji využívá v 3D tisku jako materiál pro tvorbu podpor. PVA je zdraví neškodný a v přírodě odbouratelný polymer, který se rozpouští ve vodě. Jeho nevýhodou je velmi vysoká navlhavost. Po navlhnutí nabývá a měkne. [38]

Tab. 9 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál PVA [47]

Doporučené nastavení 3D tiskárny pro PVA	
Teplota zpracování [°C]:	205-220
Teplota vyhřívání podložky [°C]:	40-50
Doporučená rychlost tisku [mm/s]:	20-30

4.3 Porovnání standardních a pokročilých materiálů pro 3D tisk metodou FFF

Jednou z nejdůležitějších věcí při 3D tisku je vhodná volba materiálu pro tištěný objekt. Jelikož se poslední dobou objevila na trhu spousta nových materiálů, tak se může zdát, že je volba vhodného materiálu čím dál obtížnější. V této kapitole si shrneme klíčové vlastnosti mezi standardně používanými materiály ABS, PLA a novými pokročilými materiály Nylon, TPU atd. tak, aby se uživatel mohl rychle rozhodnout, jaký materiál bude vhodné zvolit

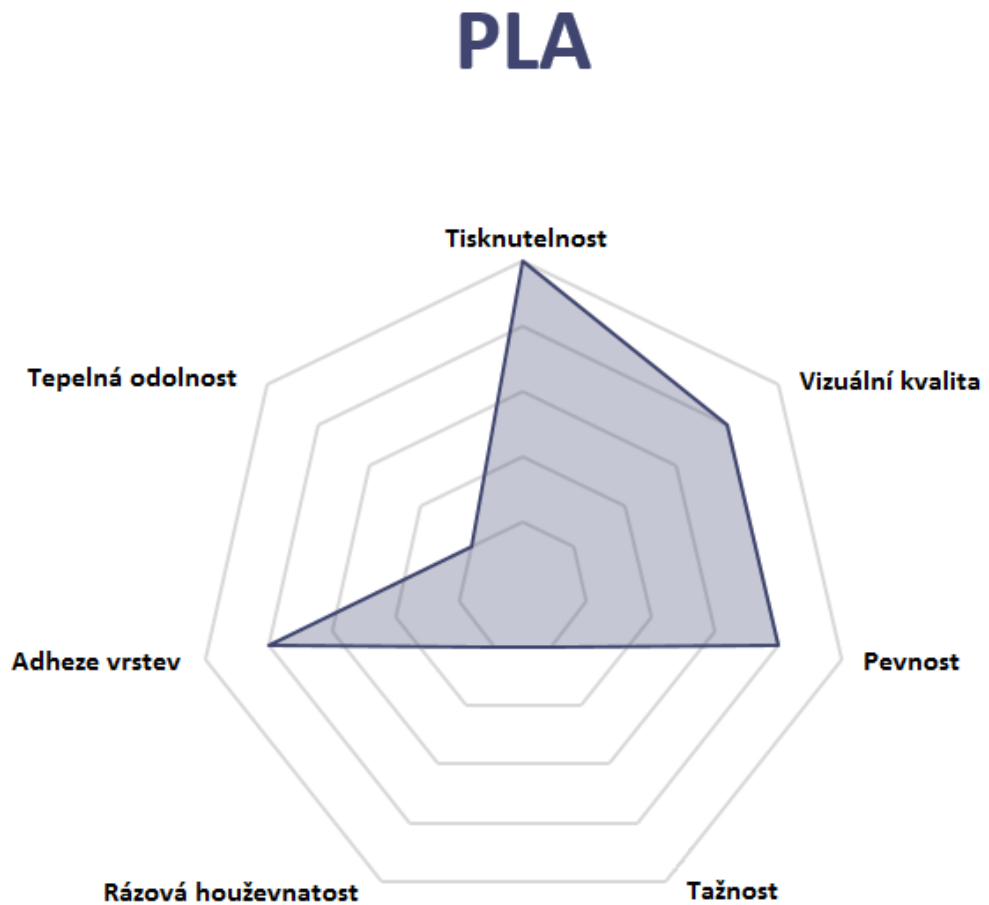
pro 3D tisk součásti. [48]

Vyhodnocované vlastnosti materiálů:

- 1) Tisknutelnost – tzn. jak snadno lze tisknout materiál
- 2) Vizualní kvalita – jak dobře vypadá vytištěný objekt
- 3) Pevnost materiálu
- 4) Tažnost
- 5) Rázová houževnatost
- 6) Adheze vrstev – jak dobrá je přilnavost vrstev, čím lepší je adheze, tím je objekt více izotropní.
- 7) Tepelná odolnost

4.3.1 PLA

- Velmi pevné
- Biopolymer
- Bez zápachu
- Pro dokončovací operace může být použito pískování a lakování
- Dobrá odolnost proti UV záření
- Nízká teplotní odolnost
- Špatně se lepí
- Špatná obrobitelnost

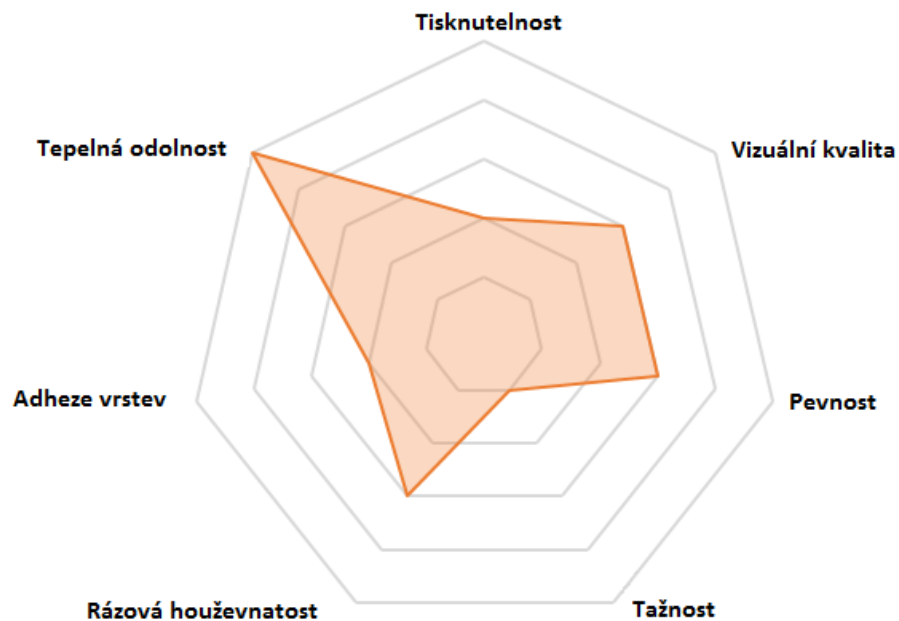


Obr. 39 Vlastnosti PLA [48]

4.3.2 ABS

- Pevné
- Dobrá odolnost proti opotřebení
- Pro dokončovací operace může být použito:
 - broušení a lakování
 - ponoření do acetonu – získáme hladký lesklý povrch
- Lze dobře lepit
- Špatná odolnost proti UV záření
- Zápach při tisku
- Při tisku můžou vznikat škodlivé emise

ABS

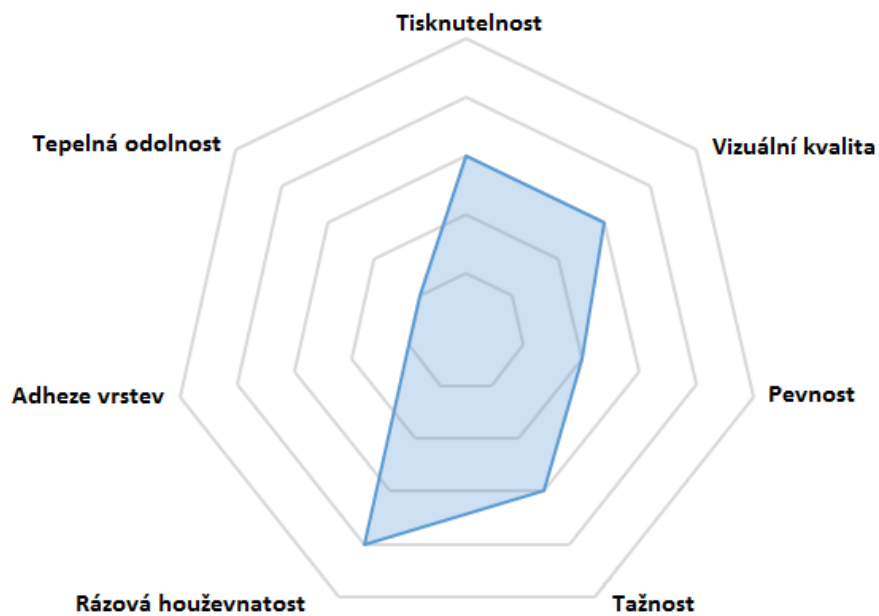


Obr. 40 Vlastnosti ABS [48]

4.3.3 Nylon

- Dobrá rázová houževnatost
- Odolnost proti opotřebení
- Dobrá chemická odolnost
- Vysoká nasákavost
- Velké smrštění
- Při tisku můžou vznikat škodlivé emise

Nylon

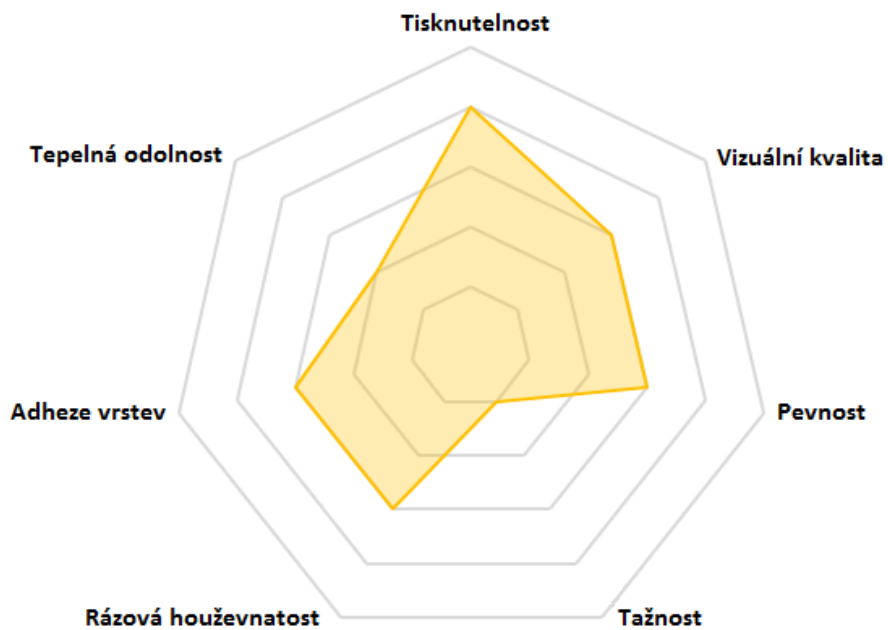


Obr. 41 Vlastnosti Nylonu [48]

4.3.4 PET

- Poměrně pevný
- Zdravotně nezávadný
- Dobrá odolnost proti vlhkosti
- Vysoká chemická odolnost
- Recyklovatelný
- Dobrá odolnost proti opotřebení
- Lze dobře lepit
- Pro dokončovací operace může být použito broušení a lakování

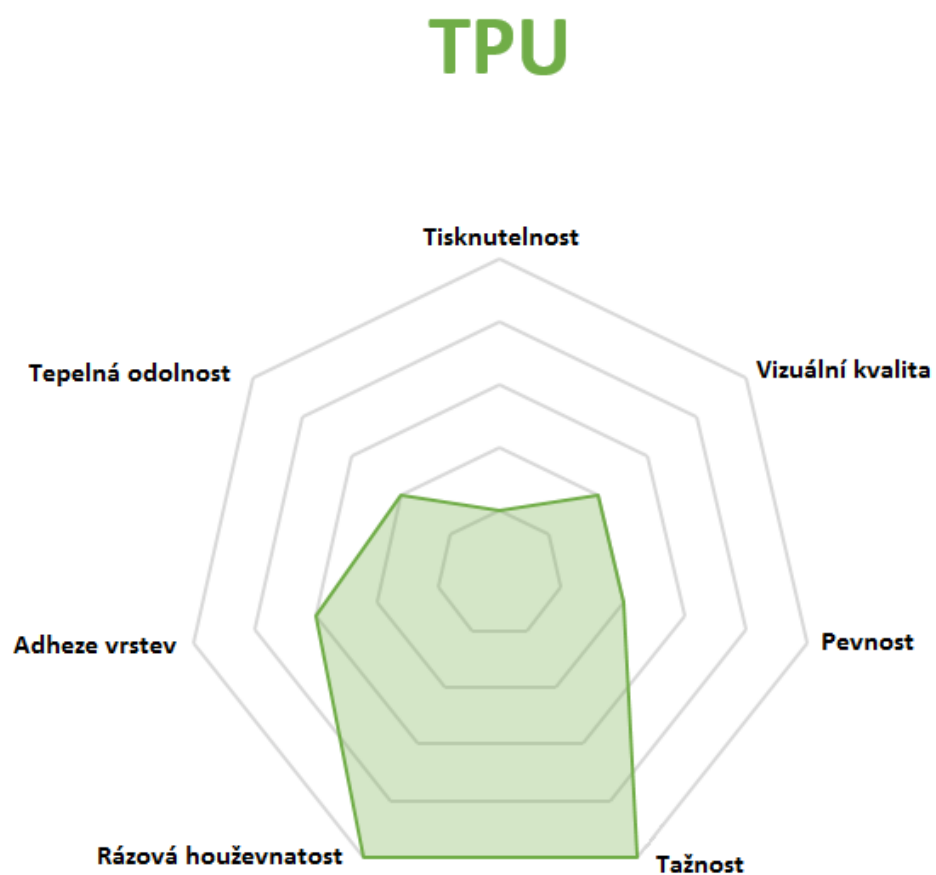
PET



Obr. 42 Vlastnosti PET [48]

4.3.5 TPU

- Flexibilní
- Dobrá rázová houževnatost
- Dobrá odolnost proti olejům a tukům
- Dobrá odolnost proti opotřebení
- Špatně se lepí
- Špatná obrobiteľnosť

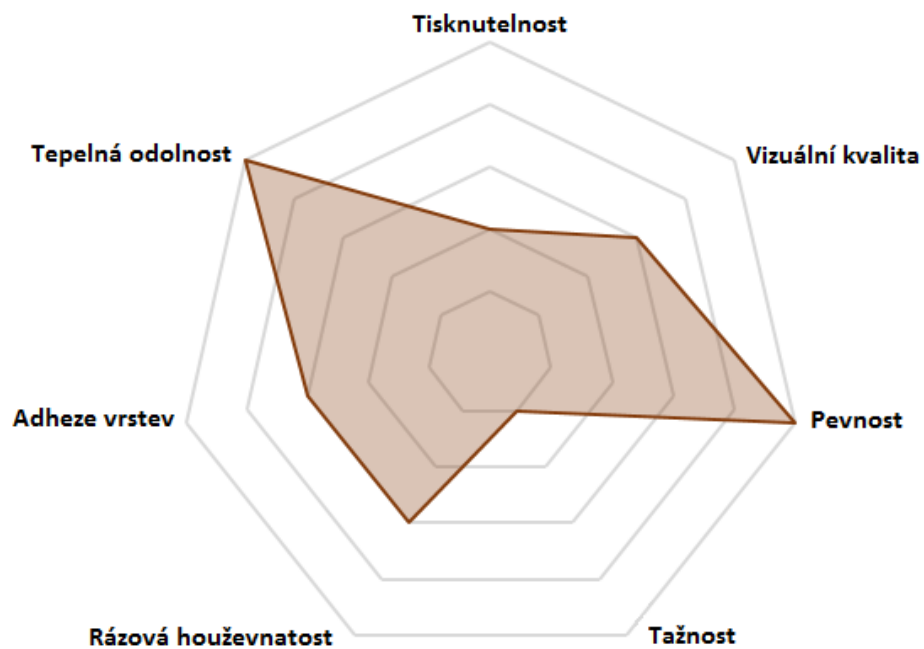


Obr. 43 Vlastnosti TPU [48]

4.3.6 PC – polykarbonát

- Velmi pevný
- Dobrá obrobiteľnosť
- Môže byť sterilizovaný
- Špatná odolnosť proti UV záření

PC



Obr. 44 Vlastnosti PC [48]

4.3.7 Porovnání materiálů

Každý materiál byl hodnocen podle jednotlivých vlastností na stupnici od 1 – nízké až po 5 – vysoké. Následně byly materiály mezi sebou porovnány a seřazeny (Obr. 45). [48]



Obr. 45 Porovnání jednotlivých materiálů mezi sebou [48]

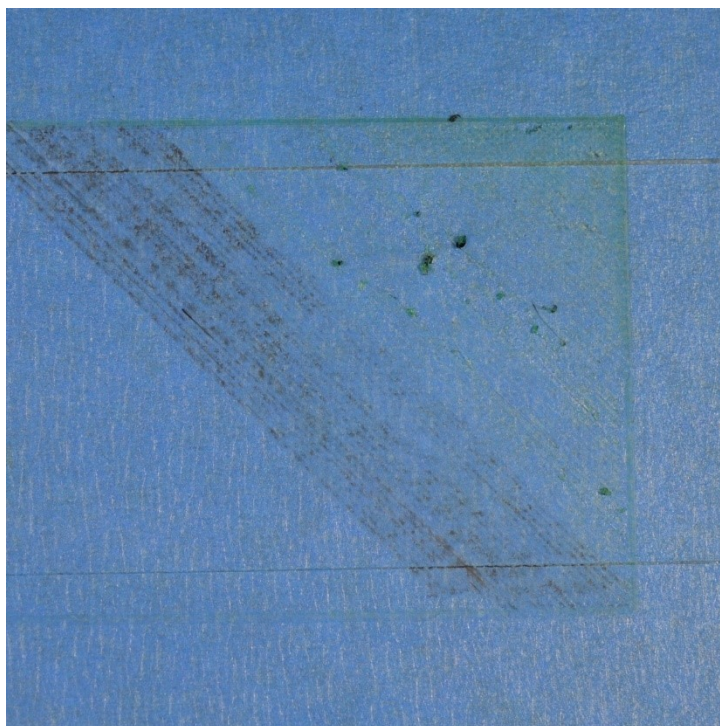
4.4 Problémy s 3D tiskem metodou FFF a jejich řešení

Uživatelský FFF 3D tisk je spojen s mnoha problémy, se kterými se může uživatel setkat a které bude muset vyřešit během 3D tisku. Protože jich je tolik, tak může být obtížné zjistit, v čem je problém a jak ho vyřešit. V této kapitole se budeme věnovat běžným problémům, které vznikají při 3D tisku a jejich řešení. [3]

Je celá řada problémů, které mohou nastat během tisku. Některé mají vliv na kvalitu tisku a některé mohou vést až k selhání celého tisku. Je obvykle frustrující, pokud se vám nedaří dosáhnout aspoň průměrné kvality tisku. Naštěstí se tyto problémy dají obvykle identifikovat pomocí porovnání výtisků, tak můžeme přijít na příčinu našeho problému s 3D tiskem. [3]

4.4.1 3D tiskárna nezačne tisknout

Tento problém se stává velmi často začátečníkům. Ale naštěstí ho lze velmi snadno vyřešit. Pokud se stane, že váš extruder nezačne vytlačovat plast na začátku tisku (Obr. 46), tak je velmi pravděpodobné, že je to kvůli jedné z těchto čtyř příčin: [49]



Obr. 46 3D tiskárna nezačne tisknout [49]

1) Nedostatek materiálu v extruderu:

Z většiny extruderů vytéká plast samovolně, když se nahřejí na teplotu zpracování. Plast má tendenci samovolně vytékat z trysky a tím pádem vytváří mezeru

v extruderu. Samovolné vytékání plastu může nastat na začátku i na konci tisku, když je tisková hlava v klidu. Pokud se snažíte spustit tisk poté, co plast samovolně vytekl z trysky, tak chvíli trvá, než 3D tiskárna začne tisknout. Chcete-li se tomuhle problému vyhnout, tak se ujistěte, že je extruder plný před zahájením tisku. Další možností je tisknout kolem součásti tzv. „skirt“, který obkreslí tvar součásti ve vámi definované vzdálenosti od součásti, a tím tak zamezíte problému s chybějícím materiálem v extruderu na začátku tisku. [49]

2) Tryska je moc blízko tiskové podložce:

Pokud je tryska příliš blízko tiskové podložce, tak nastane to, že materiál nemůže být vytlačen z trysky na podložku. To znamená, že tryska je doslova ucpaná. Tento problém lze poznat snadným způsobem, a to tak, že v prvních několika vrstvách nám tiskárna netiskne a začne tisknout např. až u 3. nebo 4. vrstvy. Tento problém lze vyřešit několika způsoby. První je, že v softwaru, který vytváří G-kód pro 3D tiskárnu, můžeme nastavit příslušný offset v ose Z. Dalším řešením je posunutí koncového snímače osy Z nebo snížení tiskové podložky tak, aby mezi tryskou a tiskovou podložkou byla těsná mezera na protažení obyčejného papíru nebo spárové měřky. [49]

3) Extruder neposouvá vlákno (drát):

Většina 3D tiskáren používá pro podávání vlákna do extruderu malé kolečko, tzv. zubatice, která má po obvodu spoustu malých zoubků, které se „zakousnou“ do vlákna. Někdy se může stát, že jak zubatice tlačí vlákno tam a zpět, vlákno se postupně v jednom místě ohobluje, takže zubatice už není schopna dále podávat materiál do extruderu. To lze poznat tak, že je kolem zubatice napadána spousta malých „hoblinek“ daného materiálu. [49]

4) Ucpaná tryska:

Pokud žádný z výše uvedených problémů nepomohl vyřešit problém s chybějícím materiálem na začátku tisku, tak je velmi pravděpodobné, že se Vám ucpala tryska vlivem nějaké nečistoty nebo vlivem špatně zvolené velikosti trysky pro příslušný materiál. V takovém případě je nutné vyšroubovat trysku z extruderu a vyčistit ji. Nebo pokud chcete tisknout materiály, které obsahují různá plniva (dřevěné piliny, uhlíková vlákna, aramidová vlákna atd.), tak je nutné zvolit větší průměr trysky. [49]

4.4.2 První vrstva se nepřilepí k tiskové podložce

Při 3D tisku je velmi důležité, aby první vrstva byla silně spojená s tiskovou podložkou. V případě, že se nepodaří první vrstvu přilepit k tiskové podložce (Obr. 47), to ve většině případech způsobí, že se nám 3D tisk příslušného dílu z daného materiálu nepodaří. Existuje mnoho způsobů, jak problém s adhezí tiskové podložky řešit. [49]



Obr. 47 Nepřilepená první vrstva k tiskové podložce [49]

1) Tisková podložka není vyrovnaná:

Většina tiskáren využívá polohovatelnou tiskovou podložku a v případě, že se stane, že v určité části tiskové podložky se první vrstva nepřilepí k tiskové podložce, tak je nutné vyrovnat tiskovou podložku pomocí stavěcích šroubů. Tisková podložka musí být před začátkem 3D tisku co nejlépe vyrovnaná. [49]

2) Tryska je moc daleko od tiskové podložky:

Jestliže je tryska příliš daleko od tiskové podložky, tak to způsobí, že se první vrstva nepřilepí k tiskové podložce. Tento problém lze vyřešit několika způsoby. První je, že v softwaru, který vytváří G-kód pro 3D tiskárnu, můžeme nastavit příslušný offset v ose Z. Dalším řešením je posunutí koncového snímače osy Z nebo zvýšení

tiskové podložky tak, aby mezi tryskou a tiskovou podložkou byla těsná mezera na protažení obyčejného papíru nebo spárové měřky. [49]

3) Vysoká rychlost tisku první vrstvy:

Pokud se první vrstva tiskne příliš rychle, tak to způsobí, že vytlačený plast z trysky nemá dostatek času na to, aby se přilepil k podložce. Řešením tohoto problému je snížení rychlosti tisku první vrstvy. [49]

4) Teplota tiskové podložky a chlazení během tisku:

Spousta dnešních FFF 3D tiskáren používá vyhřívanou podložku pro 3D tisk vysokoteplotních materiálů, např. ABS, které mají tendenci se hodně smršťovat. Některé FFF 3D tiskárny také mají ventilátory, které urychlují proces chlazení výtisku.

Pokud zjistíte, že se vám první vrstva nejprve nalepí, ale později se od tiskové podložky oddělí, tak je velmi pravděpodobné, že máte nastavenou nízkou teplotu vyhřívané tiskové podložky nebo máte zapnuté chlazení tisku, které ochlazuje výtisk natolik, že se smrští a odlepí od podložky. Řešením tohoto problému je zvýšit teplotu podložky a vypnout chlazení výtisku aspoň na několik prvních vrstev nebo ho vypnout úplně. [49]

5) Povrch tiskové podložky

Materiály, které se používají pro 3D tisk, mají tendenci lépe přilnout (přilepit se) k různým materiálům. Proto je nutné opatřit tiskovou podložku např. vrstvou lepidla nebo různými druhy lepící pásky atd., aby se tištěný materiál přilepil k tiskové podložce a vydržel tam přilepený po celou dobu tisku. Např. PLA dobře drží na vrstvě BuildTak, tuhém lepidlu na papír nebo na modré malířské pásce. ABS zase dobře drží na kaptonové pásce, laku na vlasy nebo na tzv. ABS juice, což je ABS rozpuštěné v acetonu. Jak si můžete všimnout, na každý materiál platí něco jiného, proto je dobré zkusit experimentovat a zjistit, co vám bude nejlépe vyhovovat. [49]

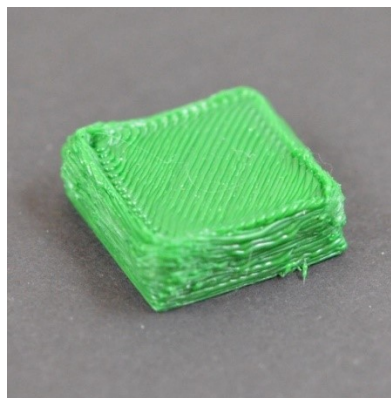
4.4.3 Chybějící nebo přebývající materiál na výtisku

Každá tiskárna by měla být zkalibrována tak, aby vytlačovala potřebné množství materiálu z extruderu. Vzhledem k tomu, že 3D tiskárna neposkytuje žádnou zpětnou vazbu o tom, kolik materiálu se vytlačí z extruderu, tak je možné, že se z extruderu vytlačí méně nebo více materiálu, než očekává software. Pokud k tomu dojde, tak si na (Obr. 48) můžete

všimnout mezer mezi vytlačenými housenkami v každé vrstvě a na (Obr. 49) si můžete všimnout přebytečného materiálu na výtisku. [49]



Obr. 48 Chybějící materiál na výtisku [49]



Obr. 49 Přebývající materiál na výtisku [49]

Řešení tohoto problému je následující:

1) Materiál má jiný průměr, než je uváděn výrobcem

Pokud se stane, že materiál ve formě drátu má jiný průměr, než je uveden na obalu od výrobce, tak to zapříčiní, že ve výtisku chybí materiál nebo naopak materiál přebývá. Proto je dobré si materiál před 3D tiskem přeměřit pomocí posuvného měřidla a nastavit jeho reálný průměr do softwaru. [49]

2) Navýšit nebo snížit množství vytlačovaného materiálu

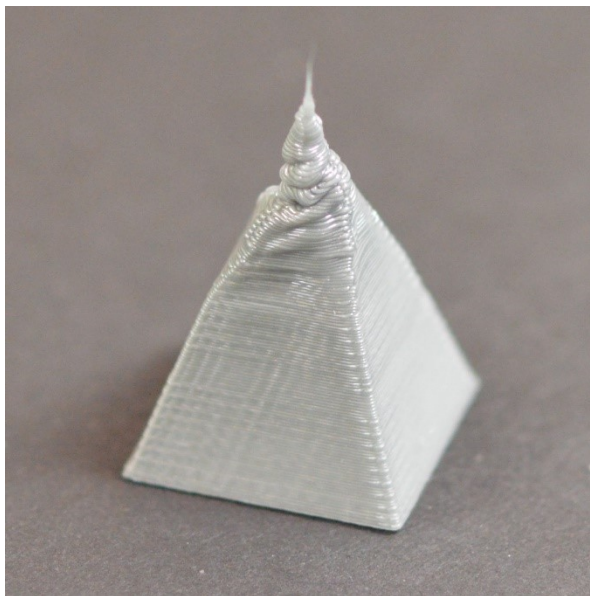
Další možností je upravit množství vytlačovaného materiálu v softwaru, který se používá k ovládání 3D tiskárny nebo přímo na ovládacím panelu 3D tiskárny. [49]

3) Kontrola kalibrace FFF 3D tiskárny

Každá FFF 3D tiskárna by měla být zkalibrována tak, aby extruder vytlačoval požadované množství materiálu. Pokud se tak neděje, je nutné zkalibrovat tiskárnu znovu podle manuálu, který je dodáván s 3D tiskárnou. [49]

4.4.4 Přehřátí výtisku

Vytlačený plast z extruderu má teplotu většinou 190 °C až 250 °C, záleží na použitém materiálu. Při vytlačení je materiál stále ohebný, a může být tak tvarován do různých tvarů. Při ochlazování se, ale stává velmi rychle pevným a zachovává si tvar. Při 3D tisku je nutné dosáhnout rovnováhy mezi teplotou zpracování a chlazením, aby byl materiál z extruderu vytlačen, ale zároveň musí být i ochlazen, aby si zachoval požadovaný tvar a rozměry. Pokud se nepodaří dosáhnout rovnováhy, může to způsobit problémy s kvalitou tisku (Obr. 50). [49]



Obr. 50 Přehřátý výtisk [49]

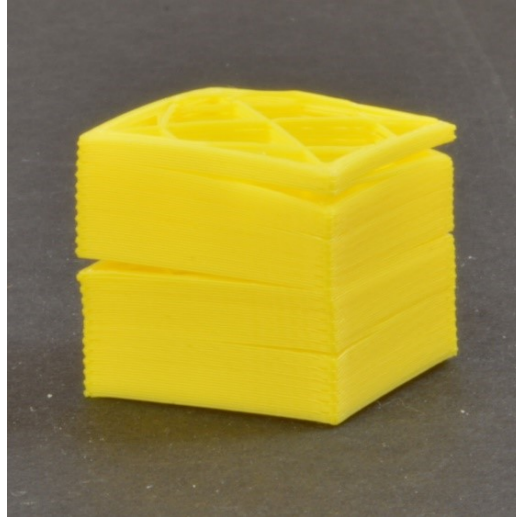
Řešení tohoto problému je následující:

- 1) **Zvýšit intenzitu chlazení**
- 2) **Snížit teplotu zpracování**
- 3) **Snížit rychlost tisku**
- 4) **Tisknout více objektů najednou**

4.4.5 Oddělení jednotlivých vrstev od sebe

Při 3D tisku se tištěný objekt vytváří po jednotlivých vrstvách. Jednotlivé vrstvy se tisknou na sebe, dokud nevytvoří požadovaný tvar. Aby výtisk byl co nejvíce izotropní, tak je nut-

né, aby se jednotlivé vrstvy spojily mezi sebou. Pokud se vrstvy mezi sebou dostatečně nespojí, může dojít k jejich oddělení od sebe (Obr. 51). [49]



Obr. 51 Oddělené vrstvy na výtisku [49]

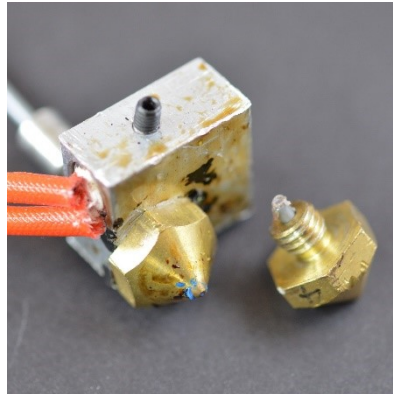
Řešení tohoto problému je následující:

- 1) Zvýšit teplotu zpracování**
- 2) Upravit tloušťku vrstvy**

Většina FFF 3D tiskáren pracuje s tryskou na extruderu o průměru 0,2 mm až 0,5 mm. Nicméně tyto trysky mají svá omezení pro výšku vrstev. Když se tiskne jedna vrstva na druhou, je nutné, aby se tyto vrstvy spojily dohromady. Jako obecné pravidlo platí, že výška vrstvy musí být o 20 % menší, než je průměr trysky na extruderu. [49]

4.4.6 Ucpaná tryska na extruderu

Materiál je z extruderu vytlačován přes trysku, která má většinou průměr 0,2 mm až 0,5 mm. Občas se může stát, že se tryska během vytlačování ucpe (Obr. 52) a tím pádem extruder přestane vytlačovat materiál, což vede k selhání tisku. [49]



Obr. 52 Ucpaná tryska [49]

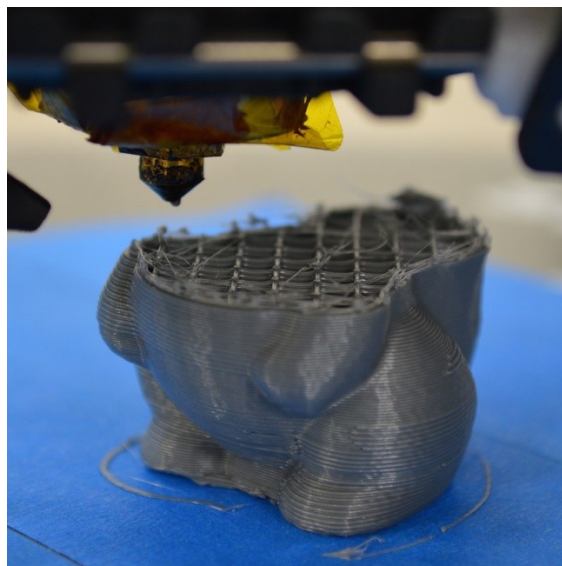
Řešení tohoto problému je následující:

- 1) **Pokusit se ručně vytlačit materiál z extruderu**
- 2) **Vyčistit trysku**

4.4.7 Extruder přestane vytlačovat materiál uprostřed tisku

Jestliže extruder přestane vytlačovat materiál v průběhu tisku (Obr. 53), tak je velmi pravděpodobné, že nastala některá z těchto příčin: [49]

- 1) **Všechn tiskový materiál byl spotřebován**
- 2) **Ucpaná tryska extruderu viz kapitola 4.4.6**
- 3) **Materiál byl ohoblován viz kapitola 4.4.1**

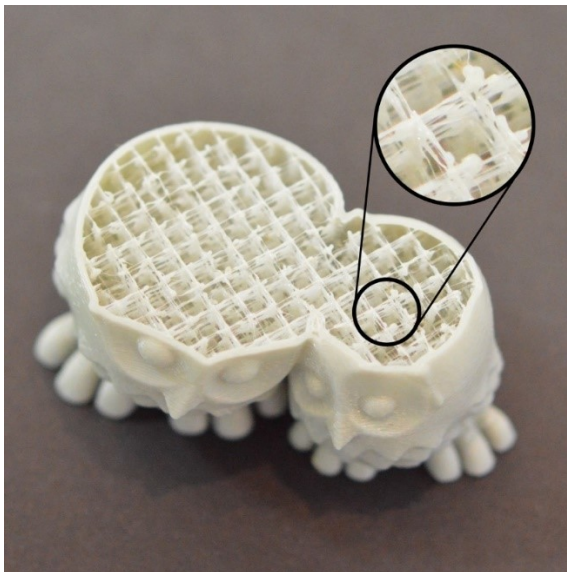


Obr. 53 Přerušeni vytlačování materiálu z extruderu [49]

4.4.8 Špatná výplň

3D tisk umožňuje vytvořit objekt, který má uvnitř výplň. Typ a množství výplně ovlivňuje výslednou pevnost tištěné součásti. Pokud nastane situace, že je výplň tištěného objektu slabá (Obr. 54), tak je velmi pravděpodobné, že nastala některá z těchto příčin: [49]

- 1) **Vysoká rychlost tisku**
- 2) **Chybějící materiál viz kapitola 4.4.3**



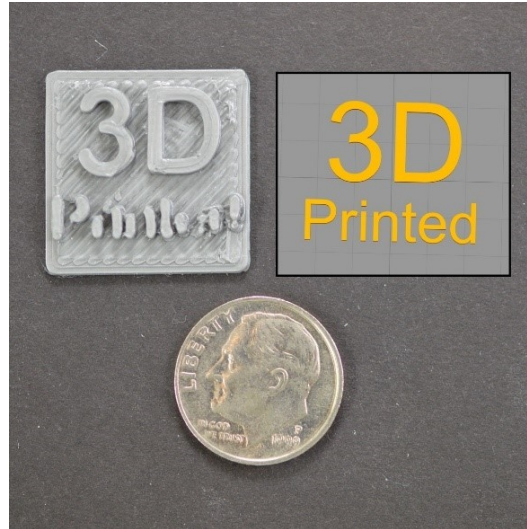
Obr. 54 Slabá výplň v tištěném objektu [49]

4.4.9 Chybějící detaily na výtisku

Na extruderu 3D tiskárny je našroubovaná tryska o přesném průměru. Při 3D tisku se stává, že některé velmi malé detaily se nevytisknou, protože není možné např. tryskou o průměru 0,4 mm tisknout stěnu o tloušťce 0,2 mm (Obr. 55). Důvodem je, že nelze přesně tisknout tryskou o průměru 0,4 mm „housenku“ o tloušťce 0,2 mm. Šířka vytlačované „housenky“ by měla být vždy stejná nebo větší, než je průměr trysky. Existuje několik možností,

jak tomuhle problému předejít: [49]

- 1) **Překreslit součást tak, aby nejužší místo odpovídalo průměru trysky**
- 2) **Vyměnit trysku za trysku s menším průměrem**

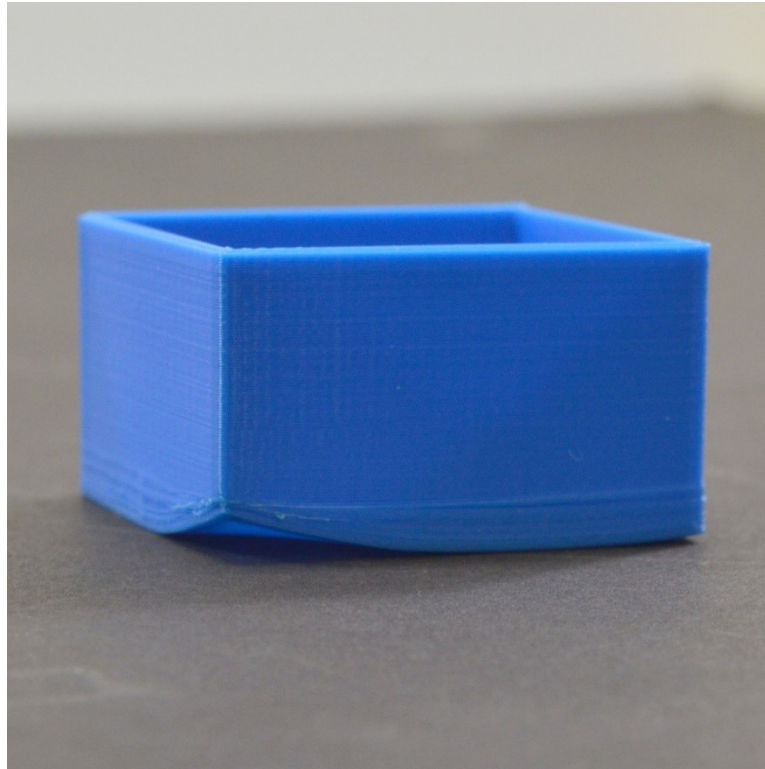


Obr. 55 Chybějící detaily na výtisku [49]

4.4.10 Deformace

Při tisku větších modelů se běžně stává, že i když se první vrstva přilepila k podložce, později se tištěný objekt začne kroutit a deformovat (Obr. 56). Zvlnění a deformace může být natolik závažná, že to může vést až k selhání celého tisku. Toto chování je běžné při tisku velkých objektů nebo velmi dlouhých objektů z materiálů, které mají vysokou teplotu zpracování, např. ABS. Hlavním důvodem tohoto chování je skutečnost, že se polymer ochladí, a tím se začne smršťovat. Např. ABS se smrští až o 1,5 %. U velkých modelů se to může rovnat několika milimetrům. Existuje ale několik možností, jak tomuto částečně předejít: [49]

- 1) Používat vyhřívanou podložku**
- 2) Vypnout chlazení výtisku**
- 3) Používat vyhřívaný box**
- 4) Tisknout kolem objektu tzv. brim a raft**



Obr. 56 Zdeformovaný objekt [49]

4.4.11 Rozměrová přesnost

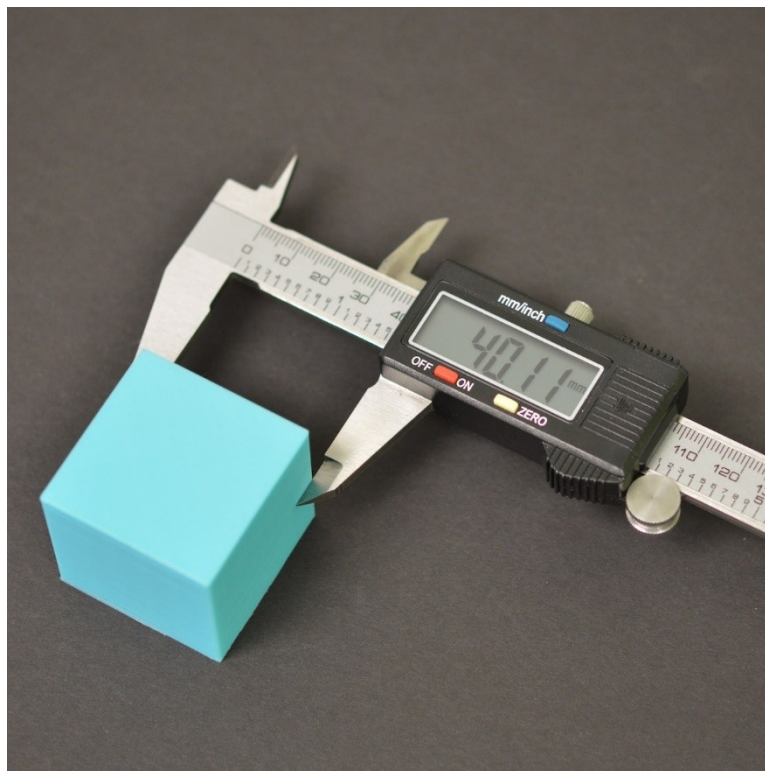
Rozměrová přesnost je velmi důležitá při tisku sestav nebo součástí, které vyžadují velmi přesné rozměry (Obr. 57). Existuje mnoho faktorů, které mohou přesnost tisku ovlivnit: [49]

1) Nastavení první vrstvy

Nastavení první vrstvy může mít velký vliv na výsledné rozměry výtisku. Je-li tryska pro první vrstvu příliš nízko nebo vysoko nad podložkou, tak to ovlivní rozměry prvních 10 až 20 vrstev výtisku. Tzn. že rozměry výtisku se mohou lišit ve spodní a horní části tištěné součásti. [49]

2) Chybějící nebo přebývající materiál na výtisku viz kapitola 4.4.3

3) Kalibrace tiskárny



Obr. 57 Měření rozměrů vytištěného objektu [49]

5 SHRNUTÍ

Hlavním cílem první části diplomové práce bylo seznámit čtenáře s tím, co to je 3D tisk, k čemu se používá a s jakými technologiemi se může v praxi setkat. Dále byla pozornost věnována uživatelskému 3D tisku, tomu, jak uživatelský 3D vznikl, jaké druhy 3D tiskáren, které využívají technologii FFF, jsou na trhu, jaké materiály je možné použít pro uživatelský 3D tisk a jejich porovnání mezi sebou. Nakonec byly popsány nejčastější problémy s uživatelským 3D tiskem a jejich možná řešení.

I. PRAKTICKÁ ČÁST

6 NÁVRH PŘÍPRAVKŮ PRO PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ

Na montážní lince je nutné na dva tvarově složité kryty (Obr. 58, 59) značit pomocí mikroúderového zařízení (Obr. 60) sériové číslo a 2D kód sériového čísla (Obr. 61), který slouží ke sběru dat během montážního procesu. Během značení vzniká nepříjemný hluk, který porušoval hranici limitu hlučnosti 85 dB na pracovišti, ovlivňoval pohodu na pracovišti a soustředění operátora, který vykonává montáž.

Protože bylo nereálné změnit tvar dílu, na který se značí sériové číslo a 2D kód, nebo změnit místo značení, tak bylo nutné vytvořit přípravky, které by částečně eliminovaly hluk během značení.

Vzhledem k tomu, že kryty mají velmi složitý tvar, byla pro výrobu přípravků zvolena aditivní technologie FFF. Dalším důvodem, proč byl zvolen 3D tisk před výrobou přípravků konvenčními metodami, je, že se pryž velmi těžko obrábí a vytvoření formy pro lisování přípravků by nejspíš bylo ekonomicky velmi nákladné.

Návrhy přípravků byly realizovány v 3D CAD softwaru Autodesk Inventor 2015 a v softwaru AutoCAD 2010.



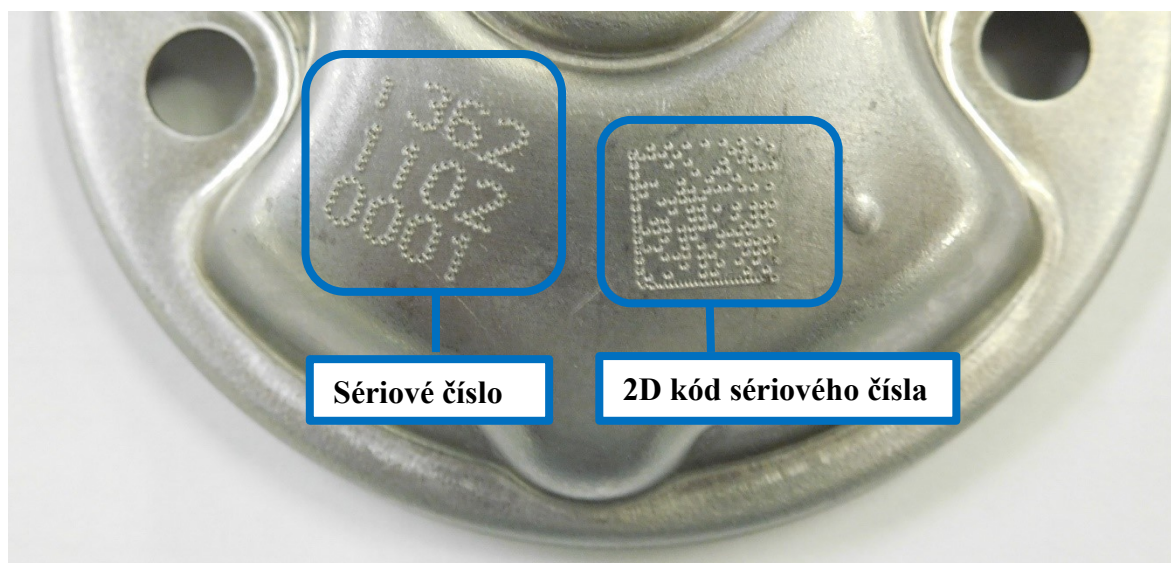
Obr. 58 První kryt



Obr. 59 Druhý kryt



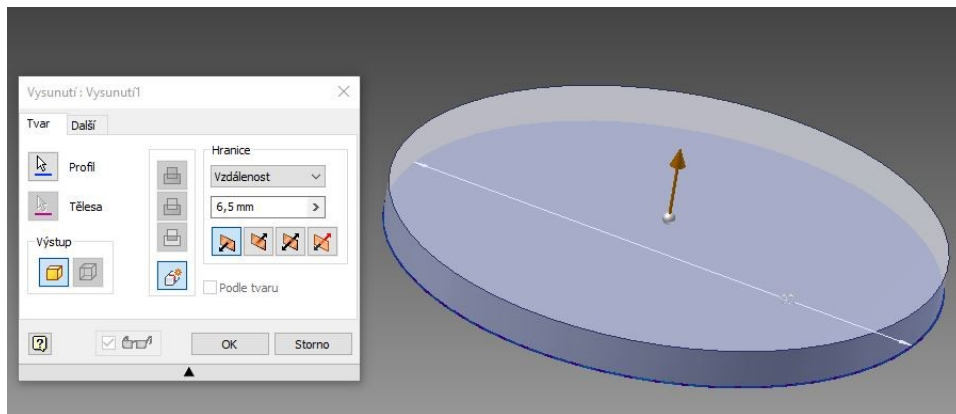
Obr. 60 Mikroúderové značící zařízení RMU



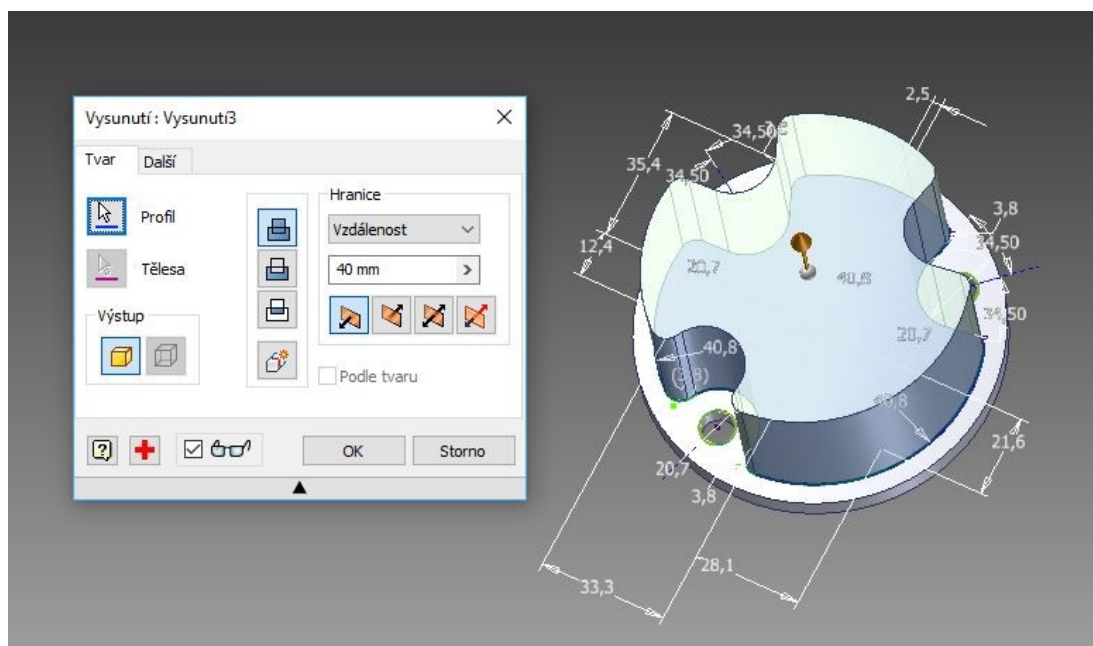
Obr. 61 Vyražené sériové číslo a 2D kód

6.1 Návrh prvního tlumícího přípravku

Prvním krokem bylo vymodelování základního tvaru tlumícího přípravku pomocí příkazu vysunutí (Obr. 62, 63).

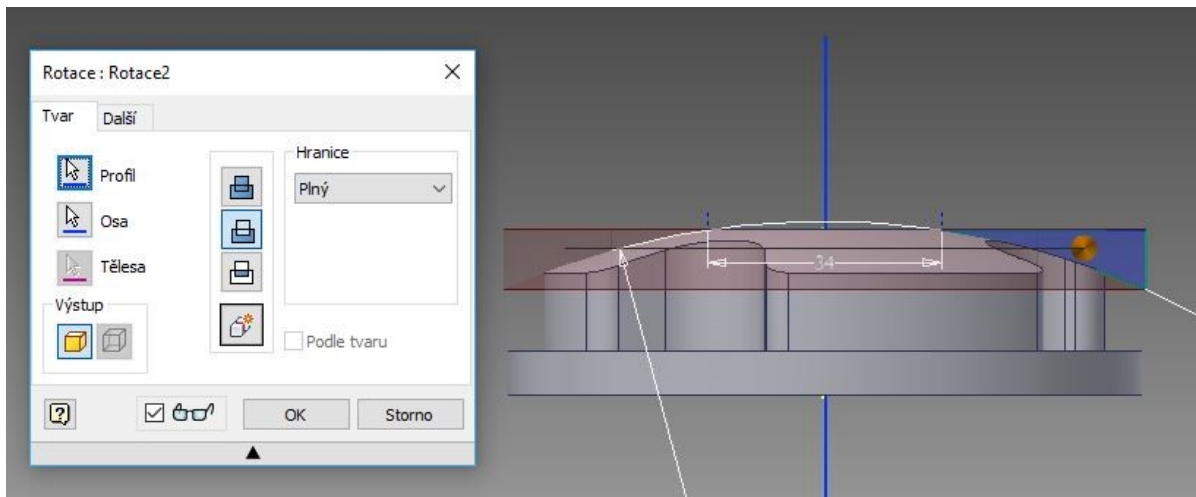


Obr. 62 Vysunutí základního tvaru prvního tlumícího přípravku



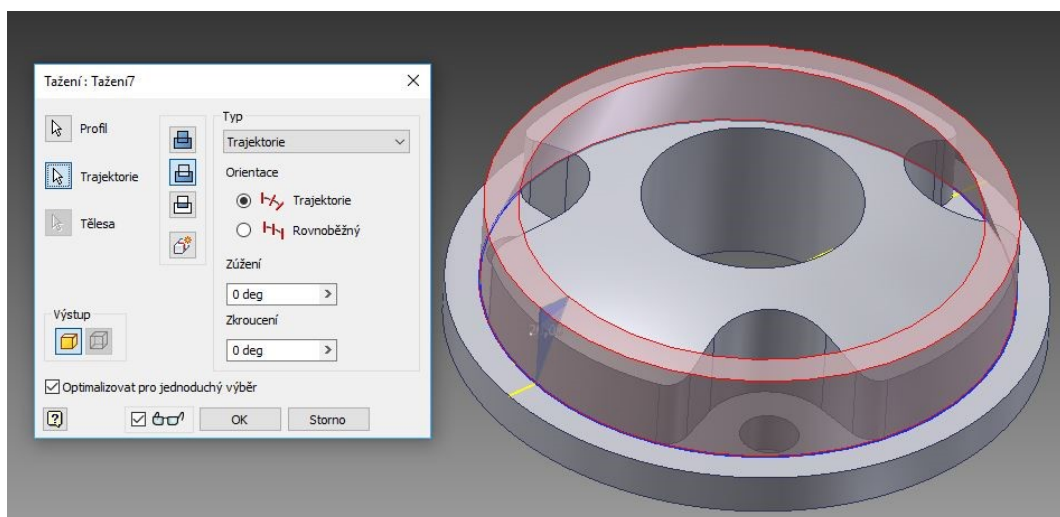
Obr. 63 Vysunutí základního tvaru prvního tlumícího přípravku

Dalším krokem bylo vytvoření kulové plochy na čele prvního tlumícího přípravku pomocí funkce vyříznout rotací (Obr. 64).

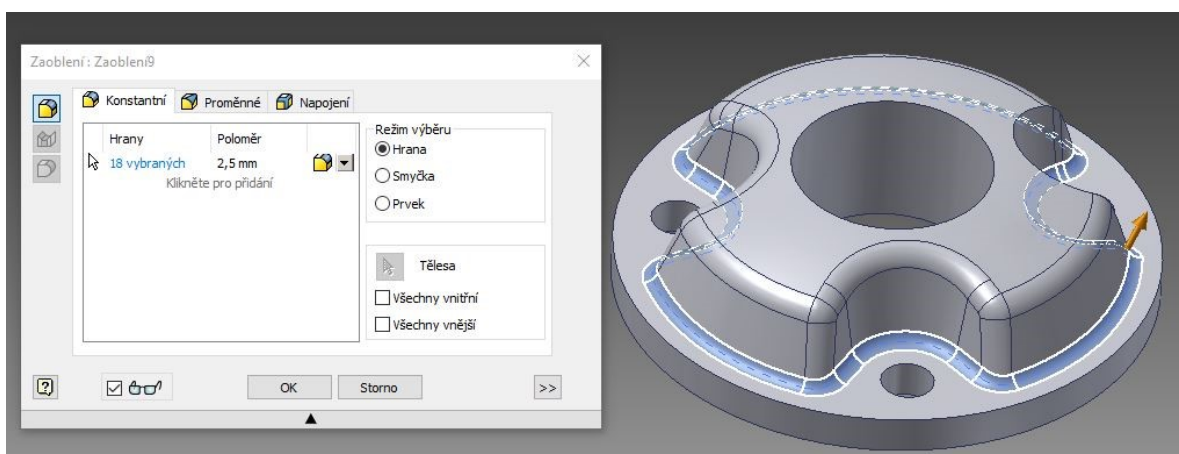


Obr. 64 Vytvoření kulové plochy na prvním tlumícím přípravku

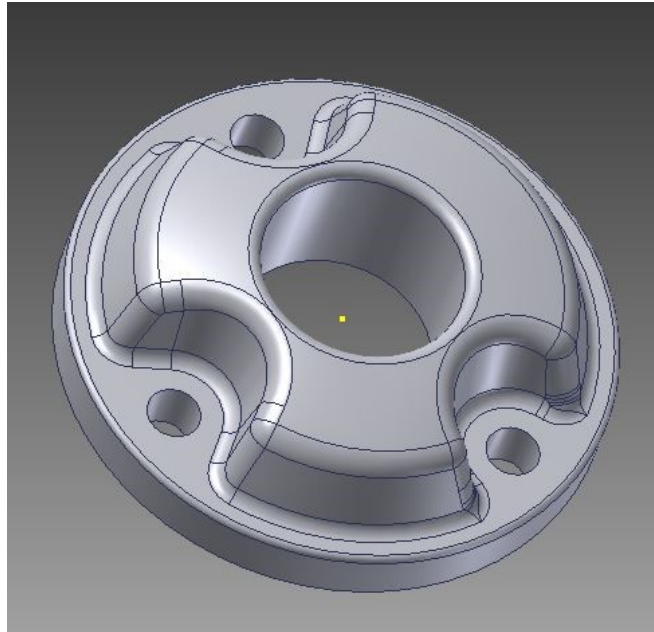
Nakonec byl pomocí funkcí tažení po křivce a zaoblení (Obr. 65, 66) vytvořen konečný tvar prvního tlumícího přípravku (Obr. 67), který byl exportován do formátu STL.



Obr. 65 Vytvoření konečného tvaru pomocí funkce tažení po křivce



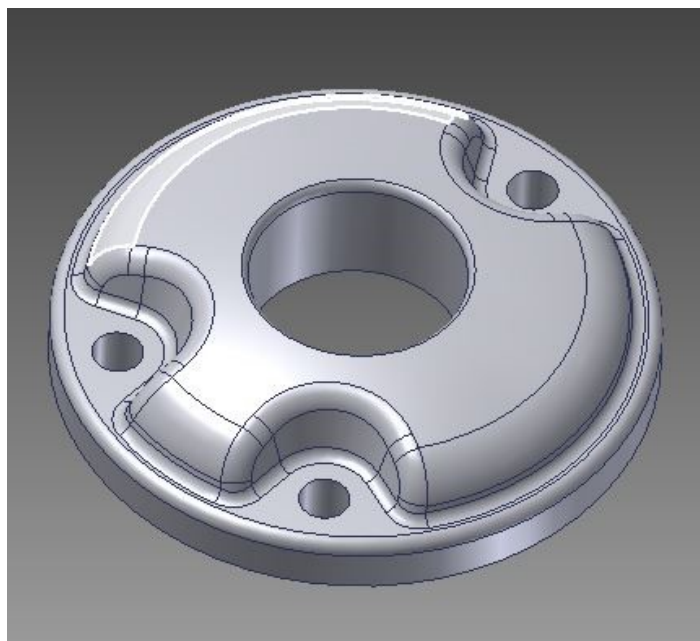
Obr. 66 Nakonec bylo provedeno zaoblení hran



Obr. 67 3D model prvního tlumícího přípravku

6.2 Návrh druhého tlumícího přípravku

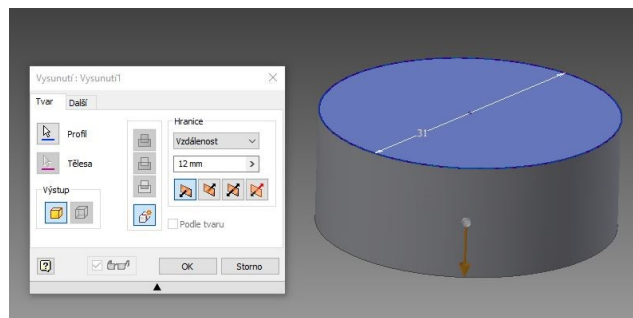
Protože druhý tvarově složitý kryt má podobný tvar jako první kryt (Obr. 59), tak byl druhý tlumící přípravek navržen v softwaru Autodesk Inventor 2015 podobným způsobem. Opět byly pro návrh přípravku využity funkce vysunutí, tažení a zaoblení. Po dokončení návrhu druhého tlumícího přípravku (Obr. 68) byl 3D model vyexportován do formátu STL.



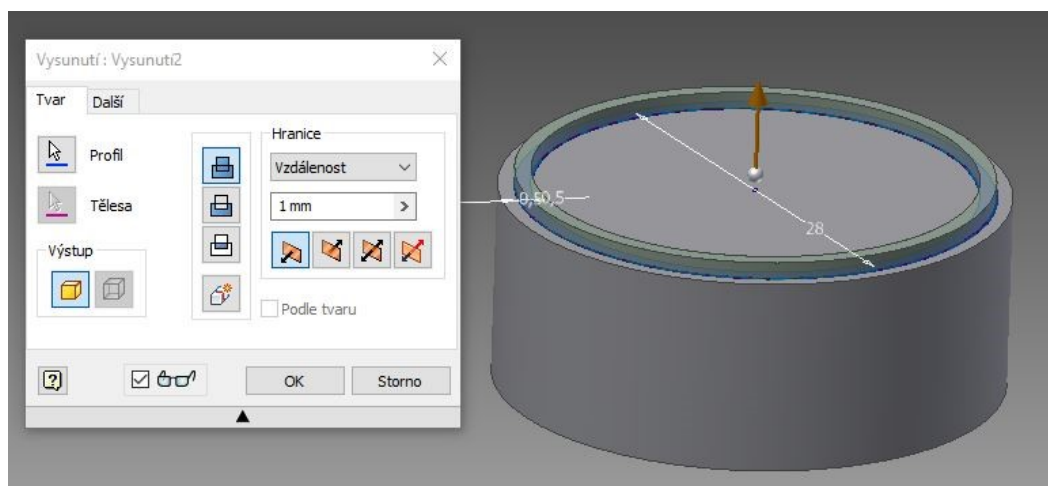
Obr. 68 3D model druhého tlumícího přípravku

6.3 Návrh upínky

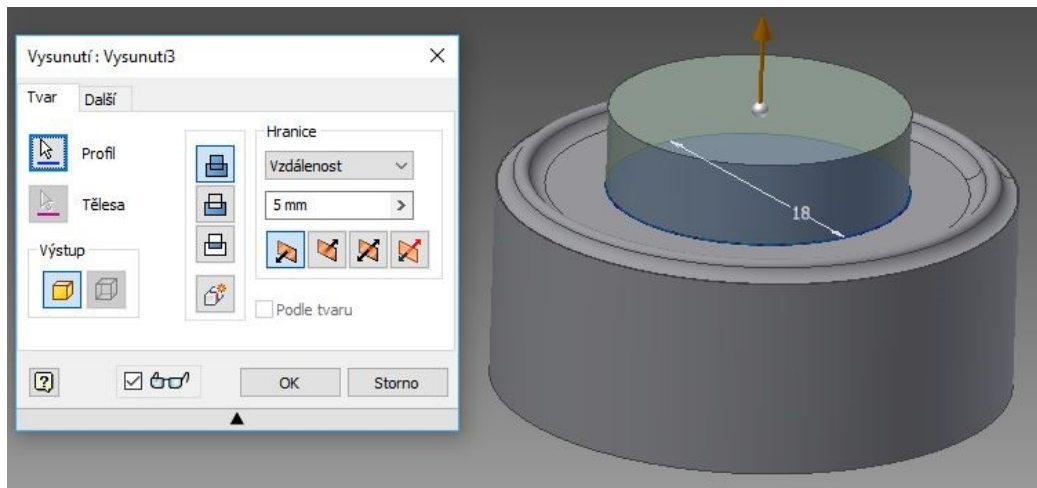
Tvarově složité kryty je nutné během procesu značení sériového čísla a 2D kódu pevně a přesně upnout, proto byla navržena upínka, která by měla splňovat výše zmíněné požadavky. Prvním krokem při návrhu upínky bylo vysunutí základního tvaru upínky (Obr. 69, 70, 71).



Obr. 69 Vysunutí základního tvaru upínky

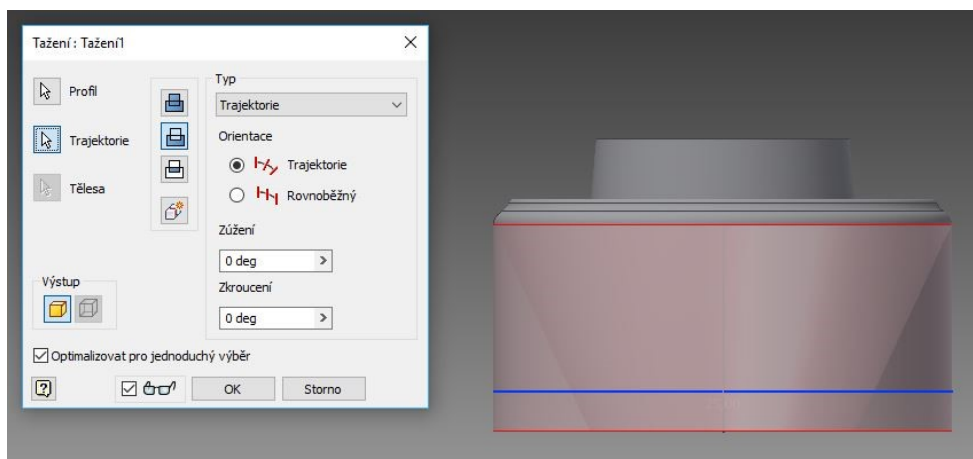


Obr. 70 Vysunutí lemu na upínce

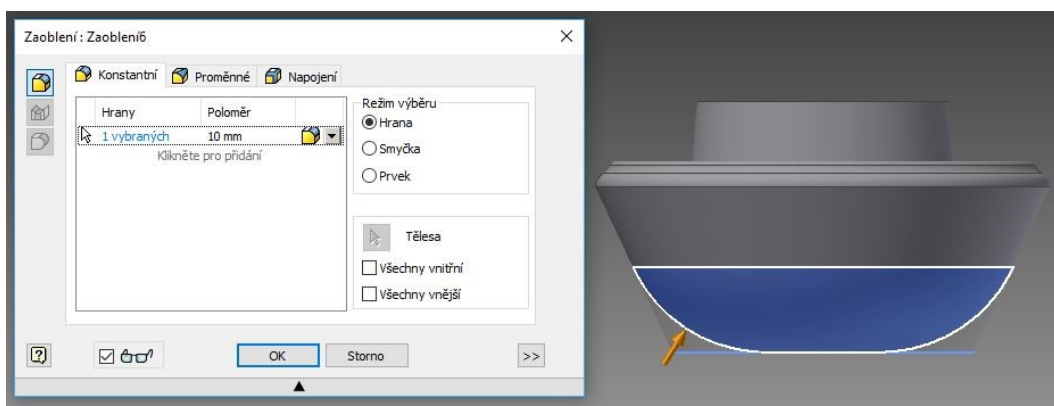


Obr. 71 Vysunutí základního tvaru upínky

Dalším krokem bylo vytvoření konečného tvaru upínky pomocí příkazů tažení a zaoblení (Obr. 72, 73).

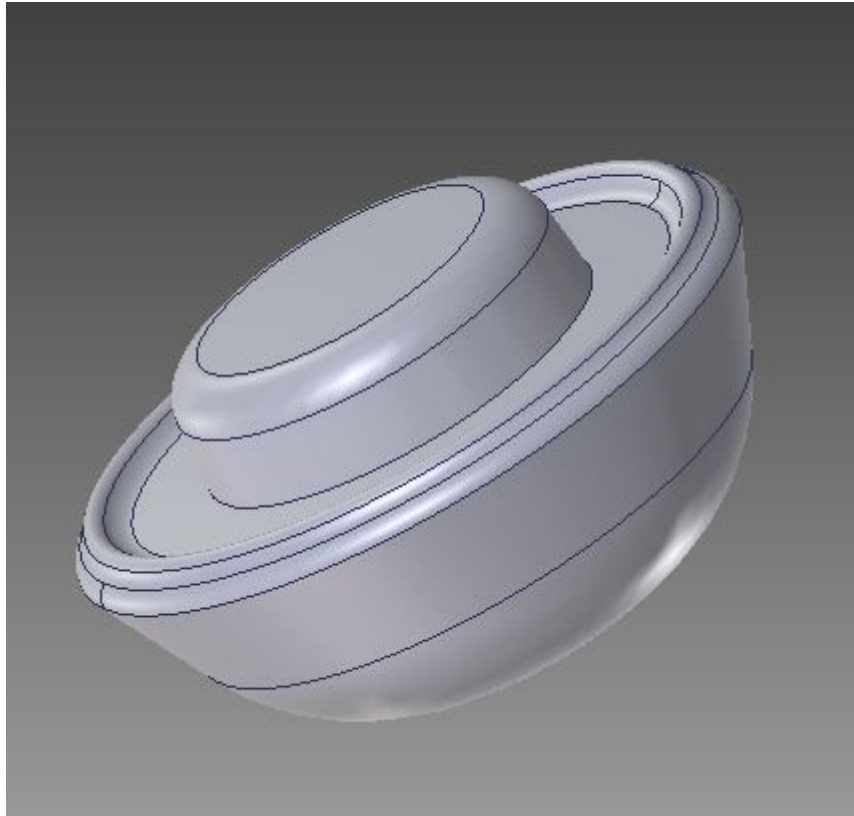


Obr. 72 Vytvoření konečného tvaru upínky pomocí příkazu tažení



Obr. 73 Vytvoření konečného tvaru upínky pomocí příkazu zaoblení

Nakonec byl 3D model upínky (Obr. 74) exportován do formátu STL.



Obr. 74 3D model upínky

6.4 Návrh dalších dílů tlumících přípravků

Celkově se tlumící přípravky skládají z několika dalších dílů, které byly vyrobeny pomocí konvenčních metod obrábění. Výrobní výkresy jednotlivých dílů jsou v příloze.

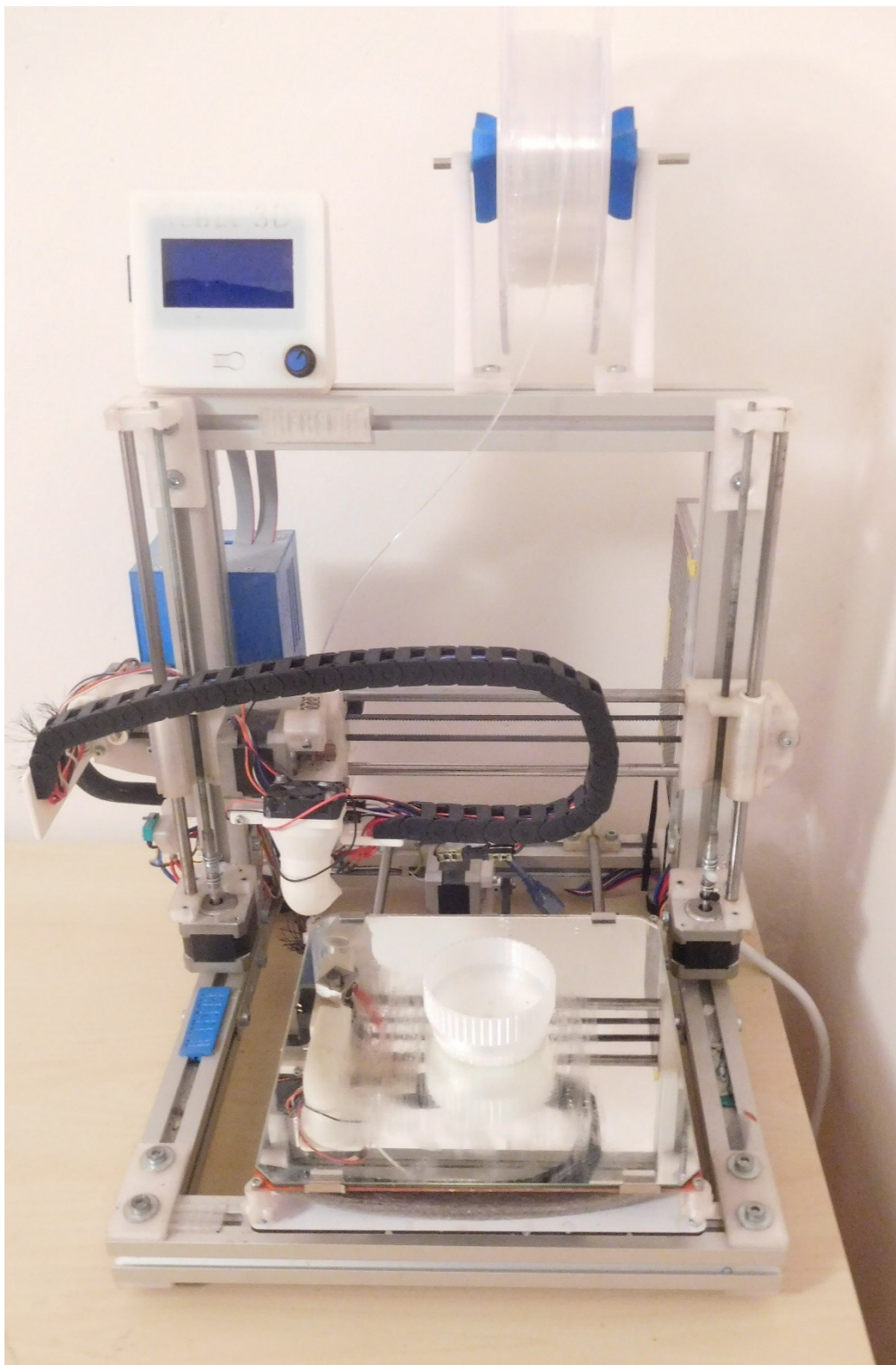
Aby bylo možné tlumící přípravky připevnit k mikroúderovému stroji, bylo nutné navrhnout v softwaru AutoCAD 2010 podstavu, která se pomocí šroubu připevní k rámu mikroúderového stroje a do které bude přišroubována vložka, na které budou ležet tlumící přípravky. Tlumící přípravky budou vystředěny na středící kolíky, které budou nalisovány ve vložce pro tlumící přípravky. Dále bylo nutné navrhnout držák pro upínku, který se našroubuje

do podstavy a zároveň bude sloužit jako držák pro upínku, která bude upínat značený díl.

Výroba podstavy, vložky, středících kolíků a držáku pro upínku byla realizována v zámečnické dílně, která se nachází přímo v montážní firmě.

7 VÝROBA DÍLŮ NA REPRAP 3D TISKÁRNĚ REBEL II

Navržené díly byly vtištěny na RepRap 3D tiskárně Rebel II, která využívá aditivní technologii FFF (Obr. 75).



Obr. 75 RepRap 3D tiskárna Rebel II

7.1 Technické parametry tiskárny Rebel II

RepRap 3D tiskárna Rebel II má tyto technické parametry (Tab. 10):

Tab. 10 Technické parametry RepRap 3D tiskárny Rebel II

Velikost tiskového prostoru [mm]:	cca 200x200x200
Počet extruderů [ks]:	1
Přesnost [mm]:	±0,1
Minimální velikost trysky [mm]:	0,2
Minimální tloušťka vrstvy [mm]:	0,05
Maximální rychlost tisku [mm/s]:	150
Průměr používaného materiálu [mm]:	1,75
Vyhřívaná podložka:	MK2b s termistorem
Elektronika:	Arduino MEGA, RAMPS 1.4, průmyslový zdroj 12V/18A (250W), LCD12864 s čtečkou SD
Cena stavebnice:	12 300 Kč

7.2 Výroba tlumících přípravků a upínky

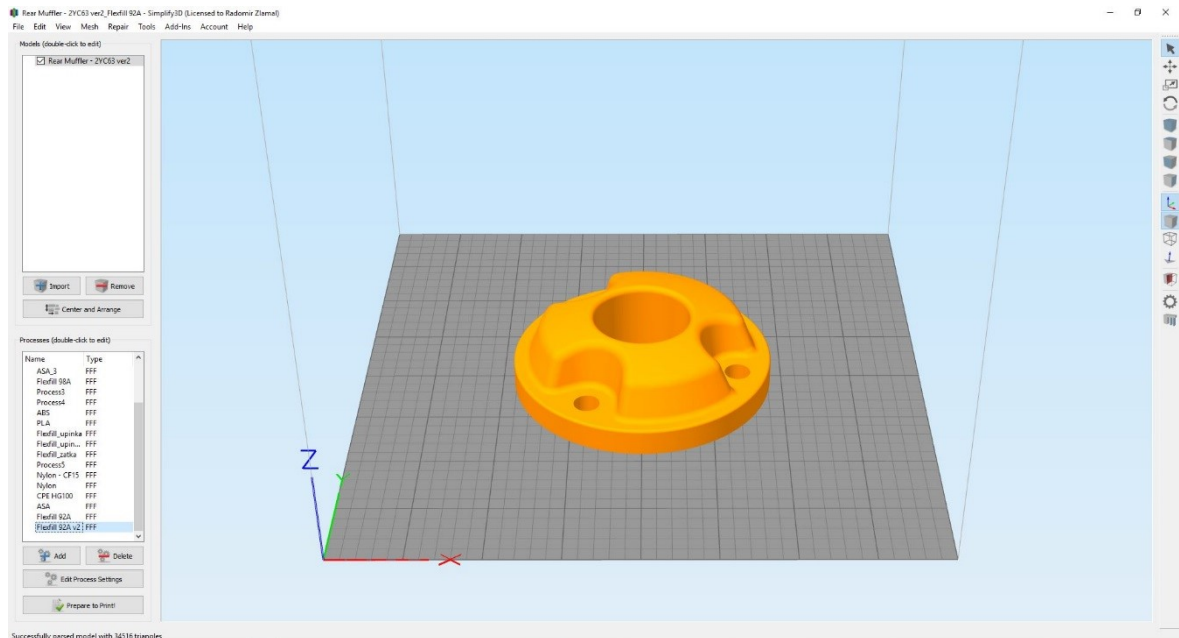
Prvním krokem byla volba materiálu, ze kterého budou tlumící přípravky a upínka vytištěny. Vytištěné tlumící přípravky a upínka musí dobře tlumit hluk a vibrace, které vznikají během značení a zároveň musí mít dobrou odolnost proti opotřebení. Na základě těchto požadavků byly zvoleny materiály Flexfill 98A a Flexfill 92A, které vyrábí firma Parzlich s.r.o

pod značkou Fillamentum a které jsou elastické s dobrou odolností proti opotřebení.

Následovalo importování modelu do Simplify3D a nastavení tiskových parametrů pro importovaný model a vygenerování G-kódu.

7.2.1 Nastavení procesních parametrů 3D tisku v softwaru Simplify3D

Software Simplify3D (Obr. 76) je tzv. „plátkovač“, který rozřeže 3D model ve formátu STL na jednotlivé vrstvy a následně podle nastavených procesních parametrů vygeneruje G-kód, podle kterého 3D tiskárna vytiskne požadovaný díl.

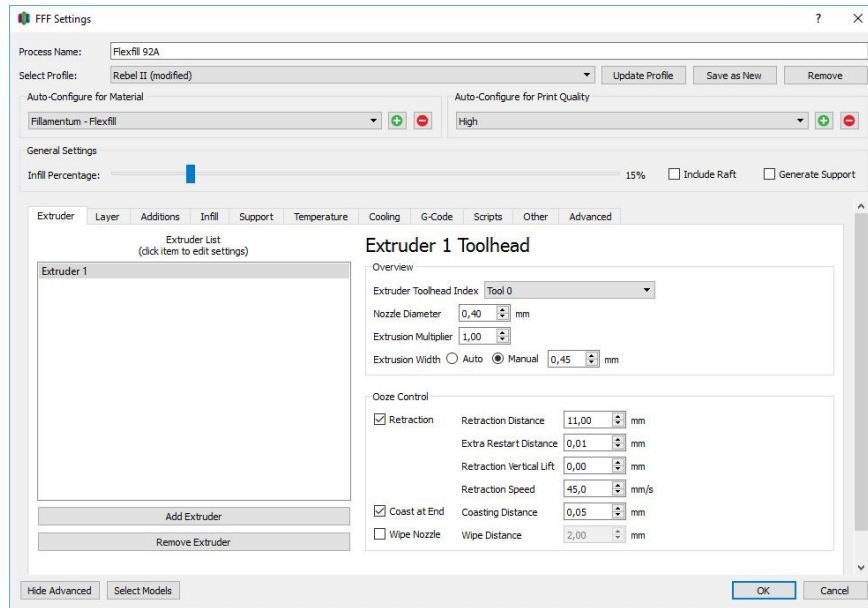


Obr. 76 Simplify 3D

Prvním krokem bylo importování 3D modelu ve formátu STL do softwaru Simplify3D (Obr. 76), poté následovalo nastavení jednotlivých parametrů tisku podle typu materiálu, tvaru tištěné součásti a předchozích praktických zkušeností s 3D tiskem aditivní technologií FFF. Nakonec byl vygenerován G-kód (Obr. 85), který byl nahrán na SD kartu.

V záložce Extruder (Obr. 77) byly nastaveny tyto parametry:

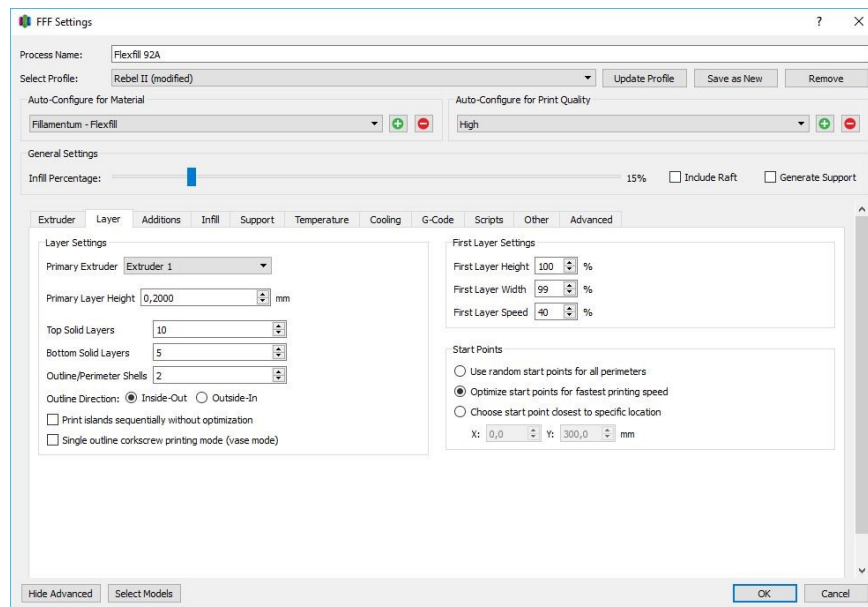
- Nozzle Diameter – průměr trysky [mm]
- Extrusion Width – šířka extruze [mm]
- Retraction Distance – hodnota retrakce [mm]
- Retraction Speed – rychlost retrakce [mm/s]



Obr. 77 Nastavení extruderu v Simplify 3D

V záložce Layer (Obr. 78) byly nastaveny tyto parametry:

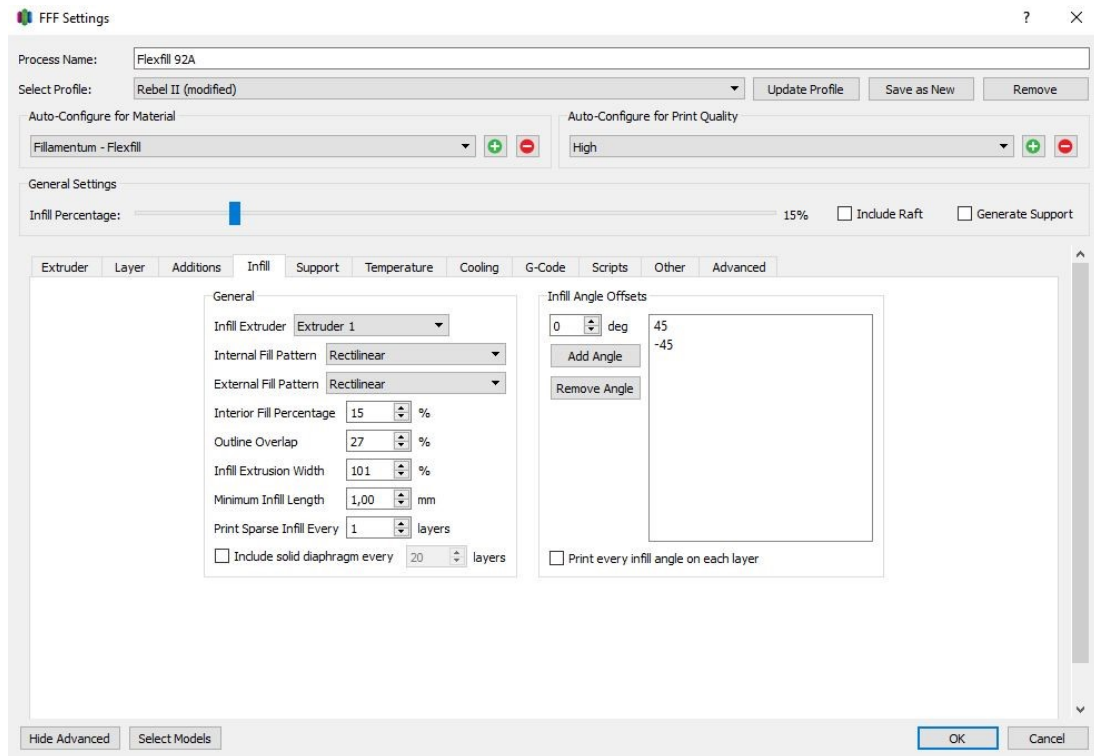
- Primary Layer Height – výška vrstvy [mm]
- Top Solid Layers – počet horních vrstev
- Bottom Solid Layers – počet spodních vrstev
- Outline/Perimeter Shells – počet perimetrů (tloušťka stěny)
- First Layer Height – výška první vrstvy [%]
- First Layer Width – šířka extruze první vrstvy [%]
- First Layer Speed – rychlost tisku první vrstvy [%]



Obr. 78 Nastavení vrstvy v Simplify 3D

V záložce Infill (Obr. 79) byly nastaveny tyto parametry:

- Interior Fill Percentage – hustota vnitřní výplně [%]
- Infill Extrusion Width – šířka extruze vnitřní výplně [%]



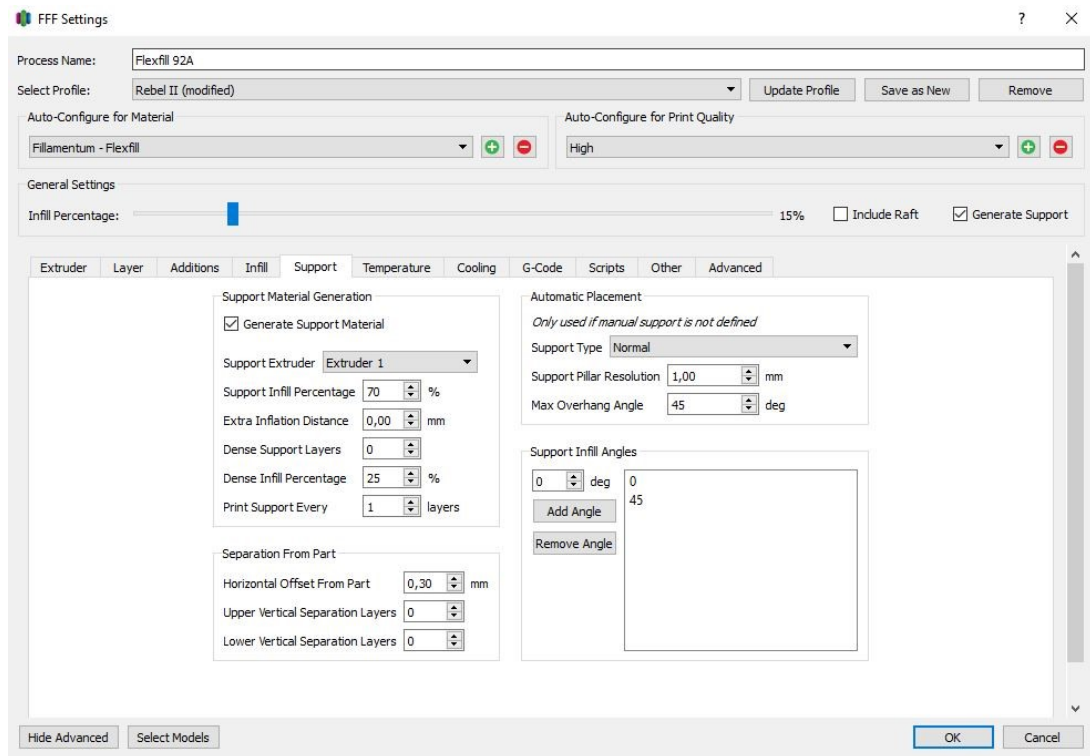
Obr. 79 Nastavení výplně v Simplify 3D

Při tisku tvarově složitějších dílů bylo nutné nastavit v záložce Support (Obr. 80) tyto parametry:

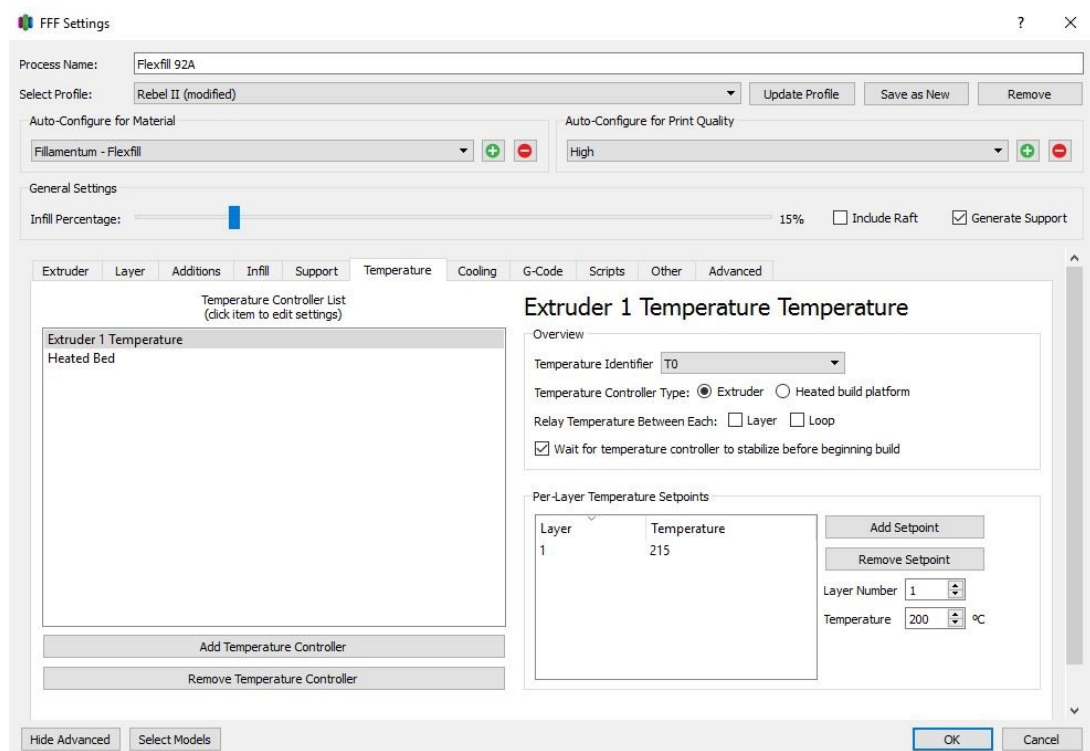
- Support Infill Percentage – hustota podpor [%]
- Horizontal Offset From Part – horizontální vzdálenost podpor od součásti [mm]

V záložce Temperature (Obr. 81) byly nastaveny tyto parametry:

- Extruder 1 Temperature – teplota zpracování materiálu [°C]
- Heated Bed – teplota vyhřívání podložky [°C]



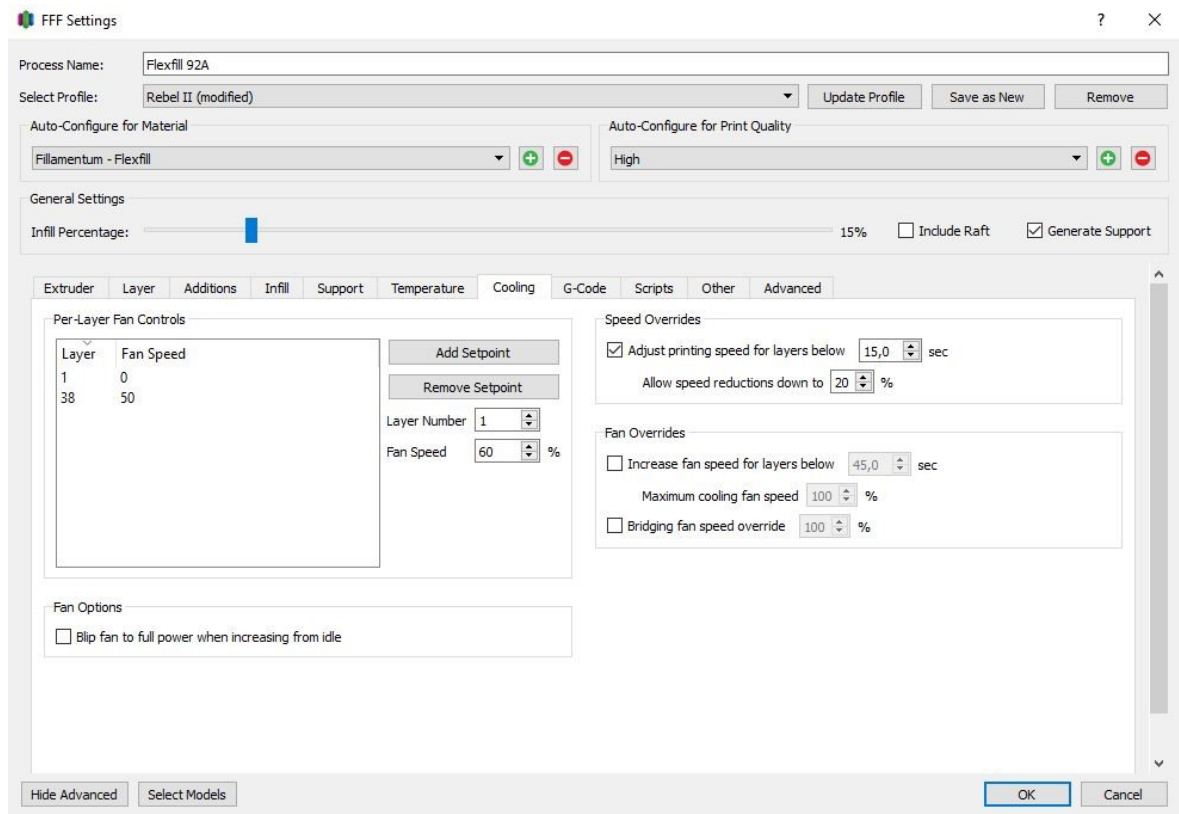
Obr. 80 Nastavení podpór v Simplify 3D



Obr. 81 Nastavení teplot v Simplify3D

Při tisku tvarově složitějších součástí bylo nutné nastavit od určité vrstvy rychlost chlazení. V záložce Cooling (Obr. 82) bylo nutné nastavit tyto parametry:

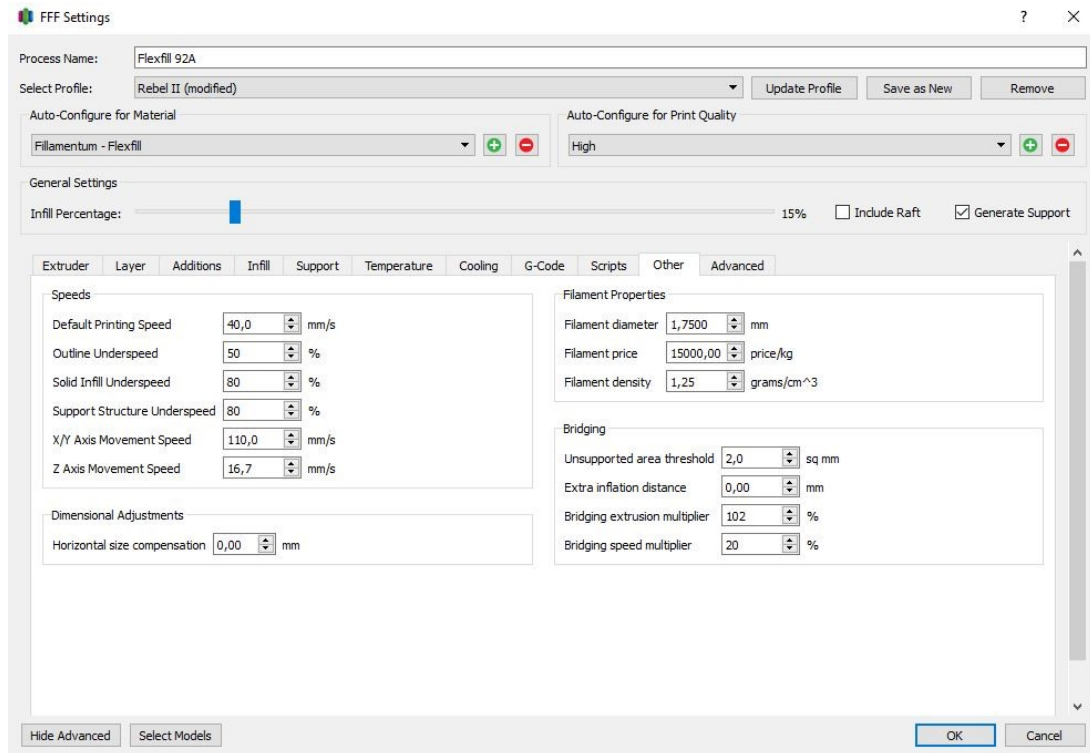
- Layer Number – číslo vrstvy od které se zapne chlazení
- Fan Speed – rychlost chlazení [%] (viz obr.).



Obr. 82 Nastavení chlazení tisku v Simplify3D

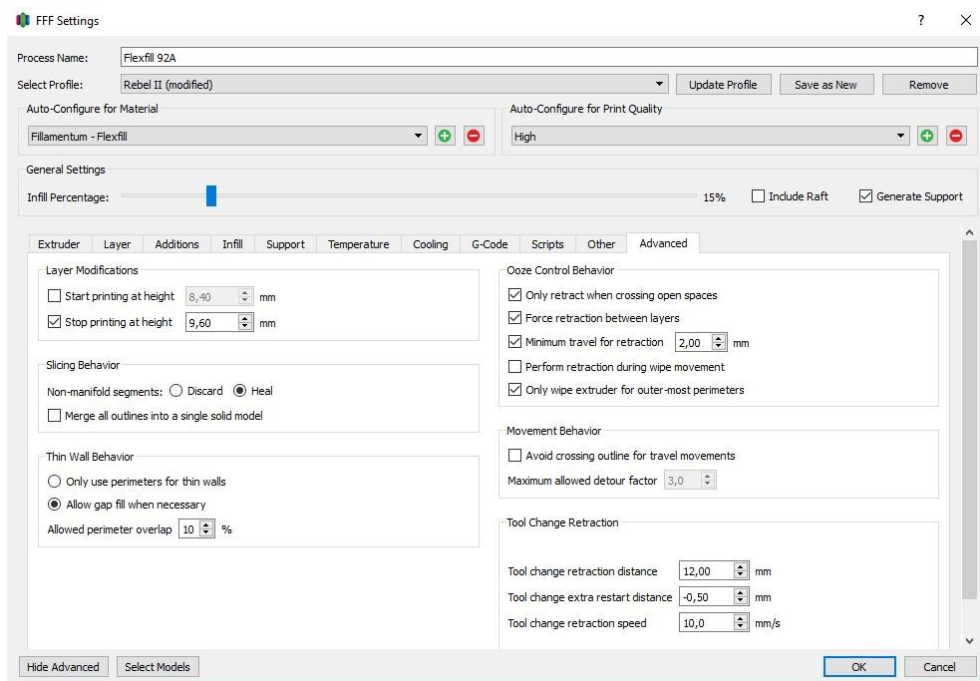
V záložce Other (Obr. 83) byly nastaveny tyto parametry:

- Default Printing Speed – rychlost tisku [mm/s]
- Outline Underspeed – redukce rychlosti tisku vnějšího obvodu [%]
- Solid Infill Underspeed – redukce rychlosti tisku výplně [%]
- Support Structure Underspeed – redukce rychlosti tisku podpor [%]
- Filament diameter – průměr vlákna [mm]

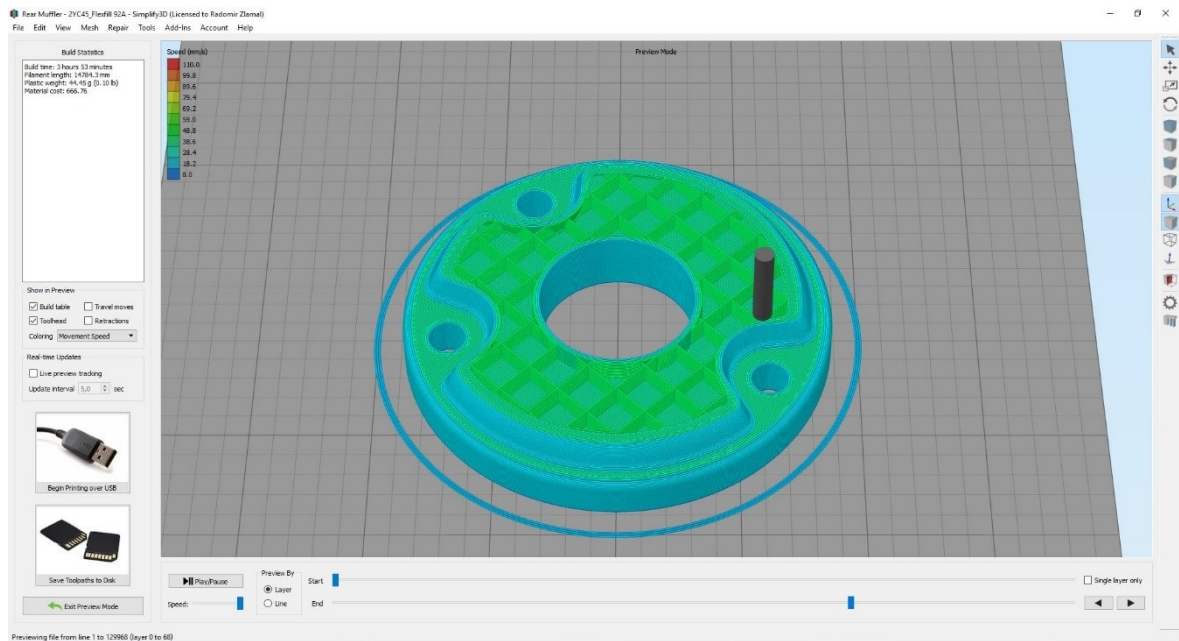


Obr. 83 Nastavení rychlosti tisku v Simplify 3D

Velkou výhodou Simplify3D je možnost nastavit více tiskových parametrů v různých výškách 3D modelu, jedná se o parametry Start printing at height a Stop printing at height (Obr. 84). U tisku některých dílů toho bylo využito, protože se v různých výškách měnila hustota vnitřní výplně.



Obr. 84 Nastavení začátku a konce tisku v určité výšce v Simplify3D



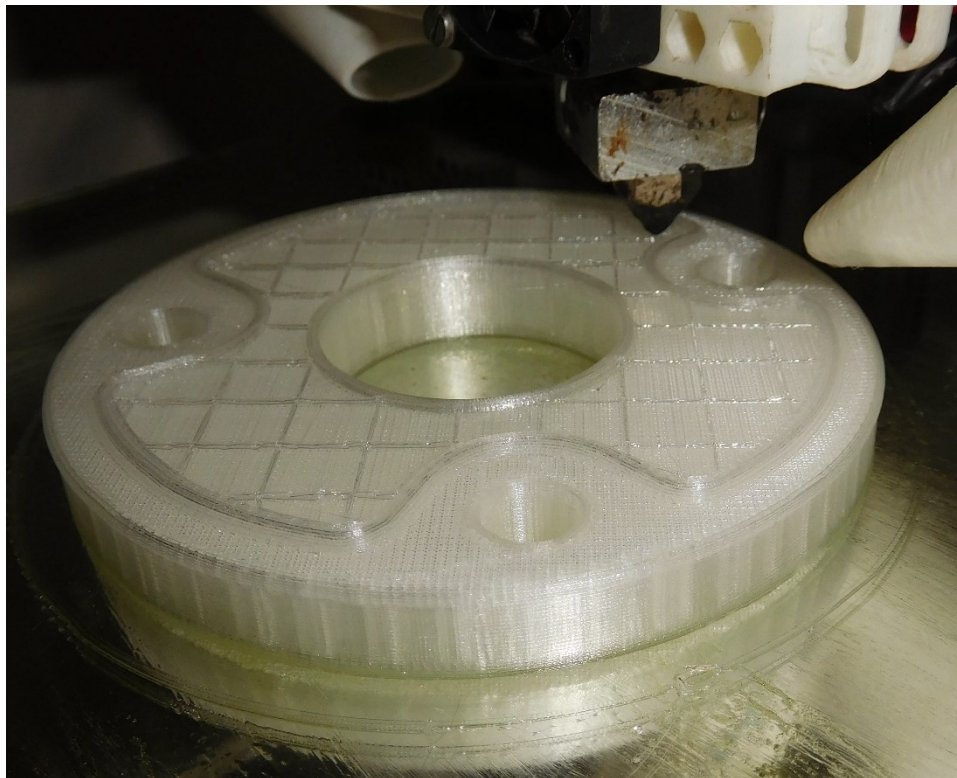
Obr. 85 Vygenerovaný G-kód a simulace 3D tisku v Simplify3D

7.2.2 Příprava 3D tiskárny Rebel II

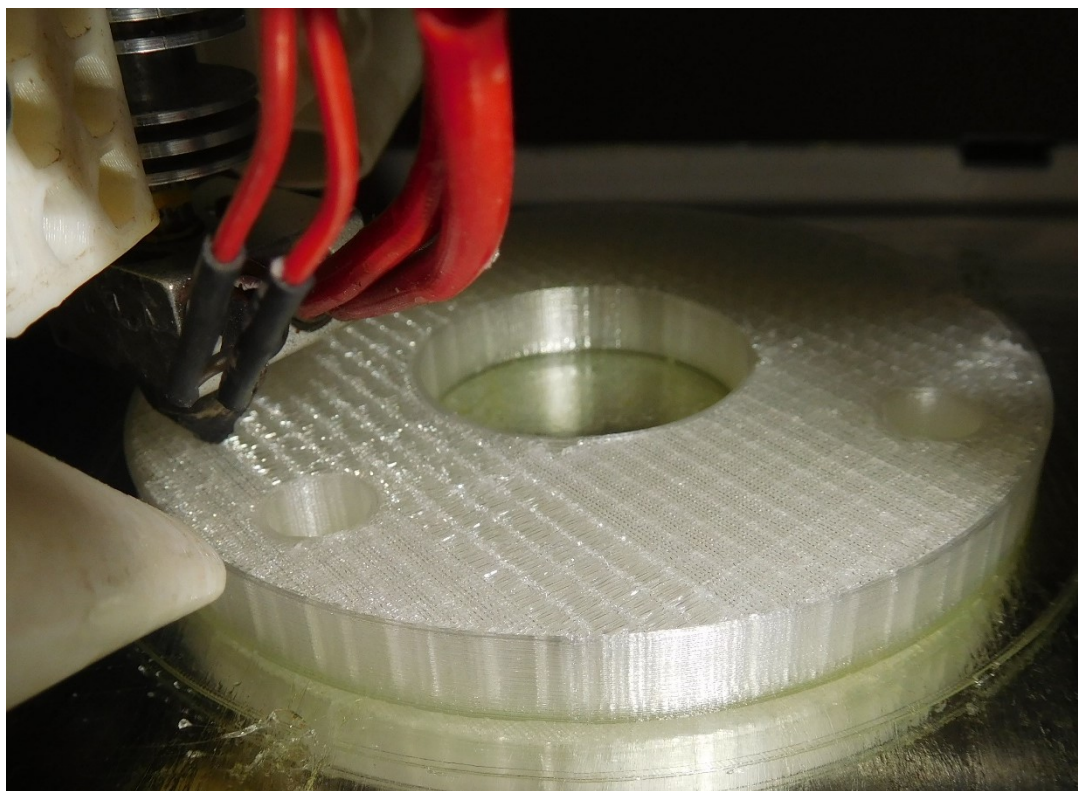
Dalším krokem byla samotná příprava 3D tiskárny k tisku. Nejprve byla na vyhřívanou tiskovou podložku nanášena vrstva ABS juice, která slouží k přilepení výtisku na podložku. ABS juice byl zvolen na základě praktických zkušeností s 3D tiskem a zjištěním, že materiály Flexfill dobře drží na tiskové podložce s vrstvou ABS juice, takže nedochází k odlepování výtisků od tiskové podložky a k selhání tisku.

7.2.3 Tisk tlumících přípravků a upínky

Dále následovalo nahrání vygenerovaného G-kódu na SD kartu a spuštění tisku přípravků. Tlumící přípravky byly vytištěny každý zvlášť po jednom kuse (Obr. 86, 87), jen při tisku upínky bylo nutné tisknout více kusů najednou z důvodu dostatečného chlazení výtisku vzhledem ke tvaru upínky (Obr. 88).



Obr. 86 Tisk prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A



Obr. 87 Tisk druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A



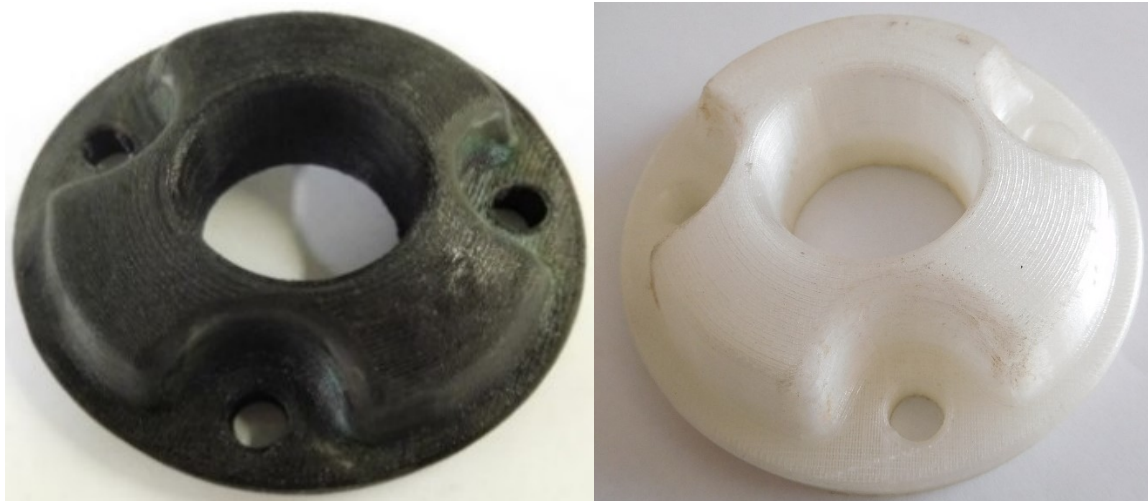
Obr. 88 Tisk upínky z materiálu Flexfill 98A

7.2.4 Vytištěné přípravky

Tlumící přípravky (Obr. 90, 91, 92) musely být po vytištění jemně zabroušeny, aby jednotlivé kryty seděly na tlumících přípravcích úplně přesně. Jelikož ruční broušení šlo velmi těžce vzhledem ke špatné obrobitelnosti materiálů Flexfill, k opracování přípravků musela být použita elektrická mikrovrtáčka Proxxon MM50/ E (Obr. 89), pomocí které se podařilo dosáhnout požadovaného tvaru.



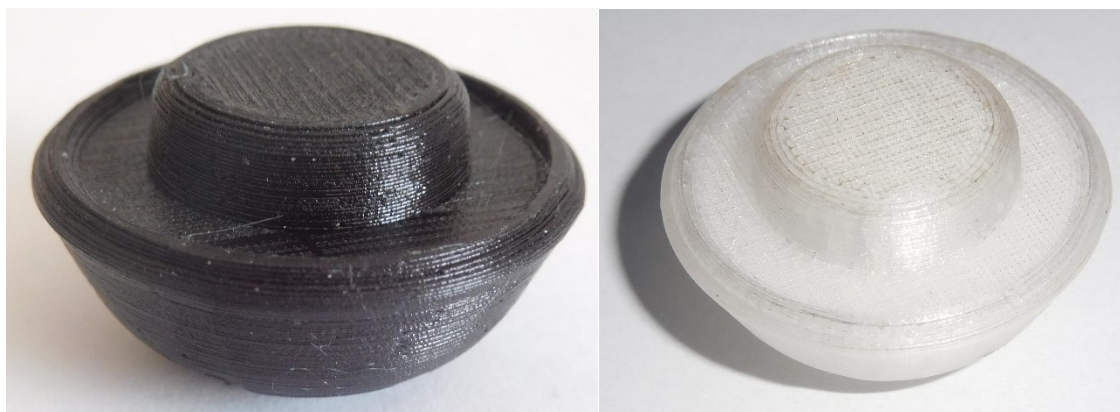
Obr. 89 Mikrovrtáčka Proxxon MM50/E [50]



Obr. 90 Vytištěný první tlumicí přípravek z materiálů Flexfill 98A (černý) a Flexfill 92A (bílý)



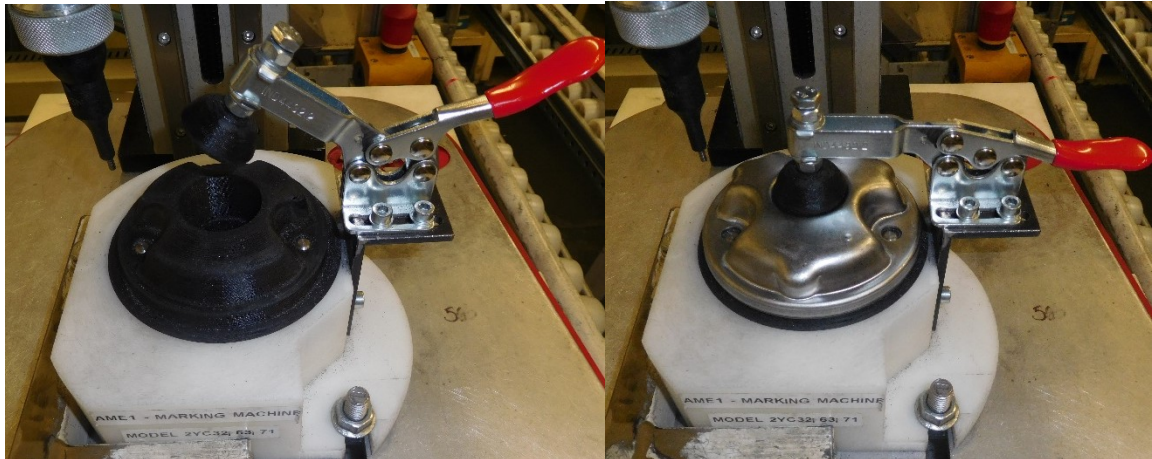
Obr. 91 Vytištěný druhý tlumicí přípravek z materiálů Flexfill 98A (černý) a Flexfill 92A (bílý)



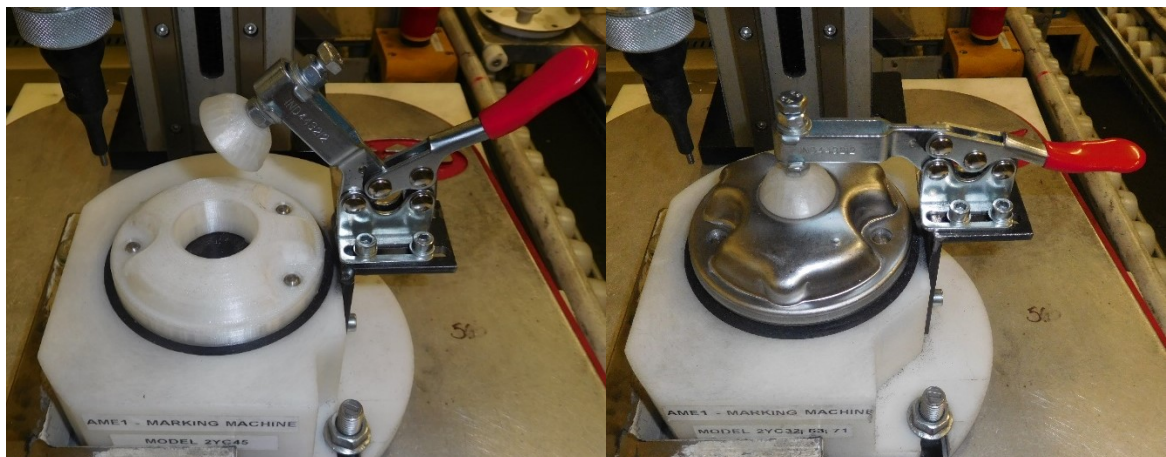
Obr. 92 Vytištěná upínka z materiálů Flexfill 98A (černý) a Flexfill 92A (bílý)

7.3 Použití přípravků ve výrobě

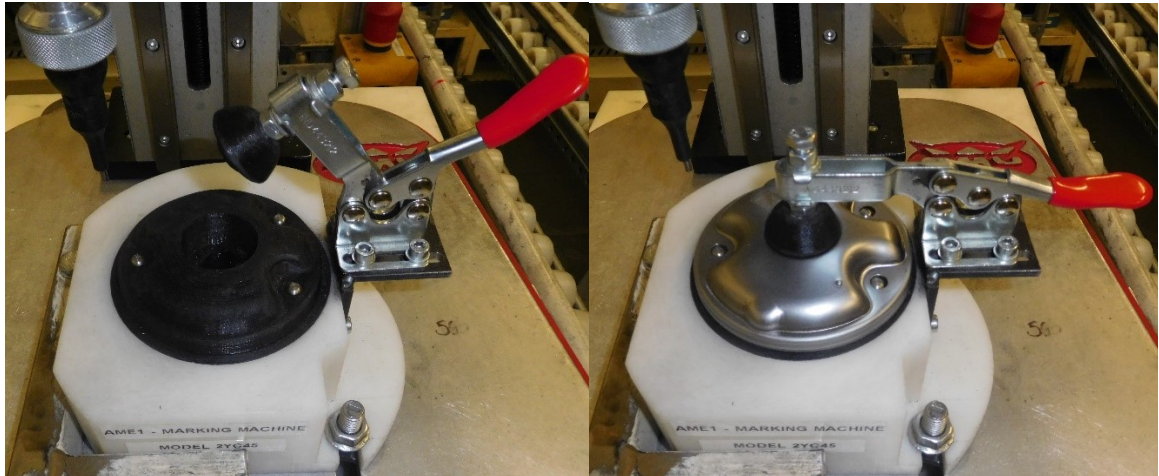
Po vytištění a vyrobení všech potřebných dílů ke tlumícím přípravkům následovalo vyzkoušení přípravků při sériové výrobě (Obr. 93, 94, 95, 96) a opětovné měření hladiny hluku na pracovišti pomocí hlukoměru.



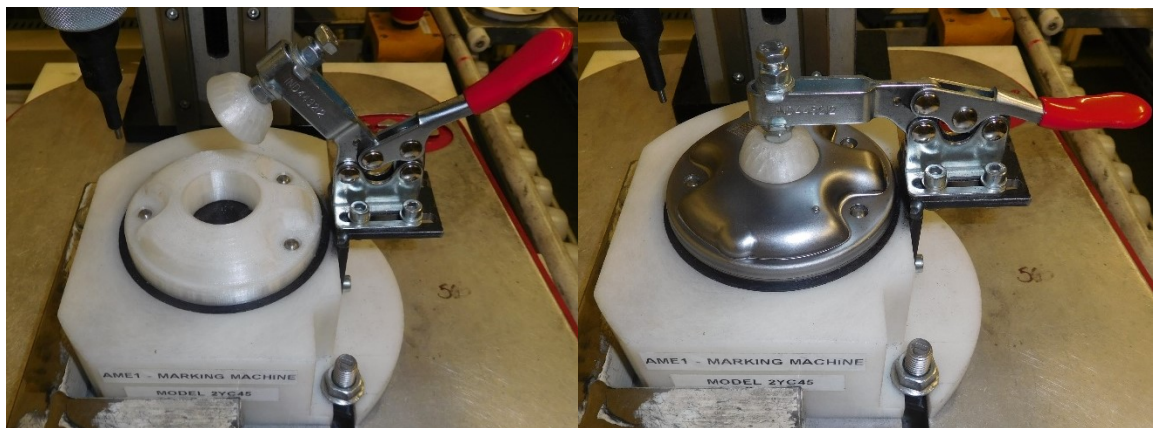
Obr. 93 Aplikace prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 98A při sériové výrobě na montážní lince



Obr. 94 Aplikace prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A při sériové výrobě na montážní lince



Obr. 95 Aplikace druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 98A při sériové výrobě na montážní lince



Obr. 96 Aplikace druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A při sériové výrobě na montážní lince

7.3.1 Měření a vyhodnocení hluku na pracovišti

K měření hladiny hluku na pracovišti byl použit hlukoměr Voltcraft SL-100 (Obr. 97), který má tyto technické parametry (Tab. 11):

Tab. 11 Technické parametry hlukoměru Voltcraft

Doba odezvy [ms]:	125/1000
Napájení [V]:	9
Rozlišení hladiny zvuku [dB]:	0,1
Frekvenční rozsah [KHz]:	31,5 až 8
Přesnost:	±2 dB (94 dB/1 KHz)
Rozsah měření hladiny zvuku [dB]:	30 až 130



Obr. 97 Hlukoměr Voltcraft SL-100 [51]

Pomocí hlukoměru Voltcraft SL-100 byly naměřeny tyto hodnoty hladiny hluku:

Tab. 12 Naměřené hodnoty hladiny hluku

Přípravek	Použitý materiál	Nejvyšší naměřená hodnota hladiny hluku [dB]	Rozdíl původních a nových hodnot hladiny hluku [dB]
Původní tlumící přípravek pro první kryt	-	86,6	-
Původní tlumící přípravek pro druhý kryt	-	88,2	-
Tlumící přípravek pro první kryt	Flexfill 98A	81,3	5,3
Tlumící přípravek pro první kryt	Flexfill 92A	80,7	5,9
Tlumící přípravek pro druhý kryt	Flexfill 98A	81,5	6,7
Tlumící přípravek pro druhý kryt	Flexfill 92A	80,8	7,4

Dle naměřených hodnot (Tab. 12) můžeme zjistit, že se díky novým přípravkům vyrobených na 3D tiskárně Rebel II podařilo snížit hlučnost na pracovišti tak, aby byl splněn hygienický limit pro hlučnost na pracovišti 85 dB. Pozitivní vliv na hlučnost měla i volba měkčího materiálu Flexfill 92A, který má tvrdost 92 ShA. Celkově se tak podařilo snížit hlučnost při značení sériového čísla a 2D kódu sériového čísla na první kryt o 5,9 dB na hodnotu 80,7 dB a na druhý kryt o 7,4 dB na hodnotu 80,8 dB. Obecně platí, že pokud se sníží hladina zvuku o 3 dB, tak se poměr akustických výkonů sníží přibližně o polovinu. V praxi to znamená, že se podařilo u prvního tlumícího přípravku snížit poměr akustických výkonů 3,89x a u druhého tlumícího přípravku se podařilo snížit poměr akustických výkonů 5,495x.

8 DALŠÍ PRAKTICKÁ VYUŽITÍ POKROČILÝCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ PRO 3D TISK

Na trhu existuje více pokročilých polymerních materiálů, které mají specifické vlastnosti a lze je tedy v praxi užitečně využít. I proto Ing. Jaroslav Maloch, CSc. poskytl návrhy svých dílů, které následně byly vytištěny na 3D tiskárně s využitím dalších pokročilých materiálů.

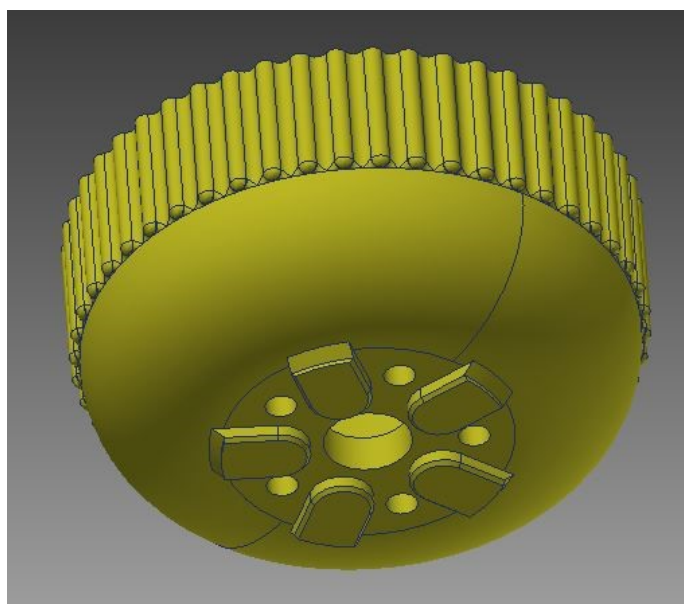
Na jednotlivé díly byly kladeny různé požadavky, takže bylo nutno volit různé typy materiálů. K tisku dílů byla použita RepRap 3D tiskárna Rebel II, k nastavení procesních parametrů 3D tisku a k vygenerování G-kódu byl použit software Simplify 3D.

8.1 Harmonická převodovka

Aditivní technologie FFF byla využita pro tisk tří dílů ze sestavy harmonické převodovky, kterou navrhl a zkonstruoval Ing. Jaroslav Maloch, CSc.

8.1.1 Výroba dílu Kernel – součást harmonické převodovky

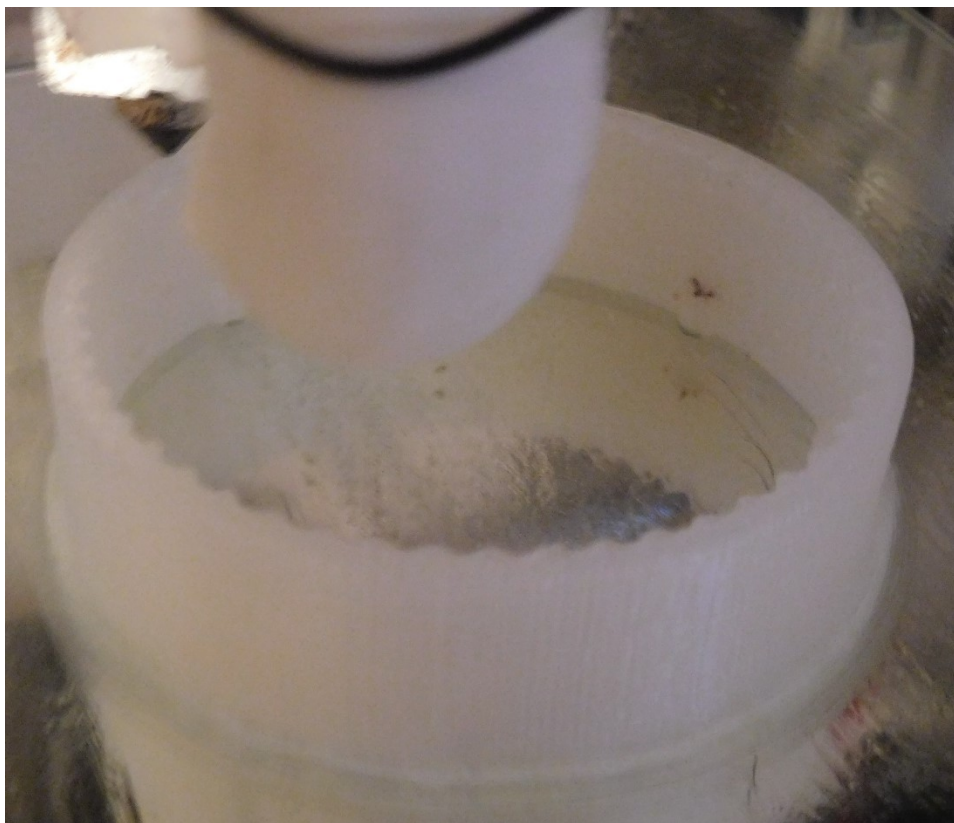
První díl, tzv. Kernel (Obr. 98) musel být vyroben z elastického materiálu, protože pro zajištění správné funkčnosti musí být deformovatelný, zároveň dostatečně torzně tuhý s dobrou odolností proti mazivům. Jelikož se pryž obtížně obrábí a nedosahuje se u ní dostatečné tvarové přesnosti, byl proto zvolen 3D tisk z flexibilních materiálů Flexfill 98A a Flexfill 92A.



Obr. 98 3D model dílu Kernel

8.1.1.1 Tisk dílu Kernel – součást harmonické převodovky

Prvním krokem bylo importování 3D modelu Kernel do softwaru Simplify3D, kde byly nastaveny procesní parametry 3D tisku, a to podle praktických zkušeností s 3D tiskem materiálů Flexfill 92A, Flexfill 98A, a následně byl vygenerován G-kód, který byl nahrán na SD kartu. Nakonec byla tisková podložka opatřena speciální adhezivní vrstvou a poté byl spuštěn 3D tisk.



Obr. 99 Tisk dílu Kernel

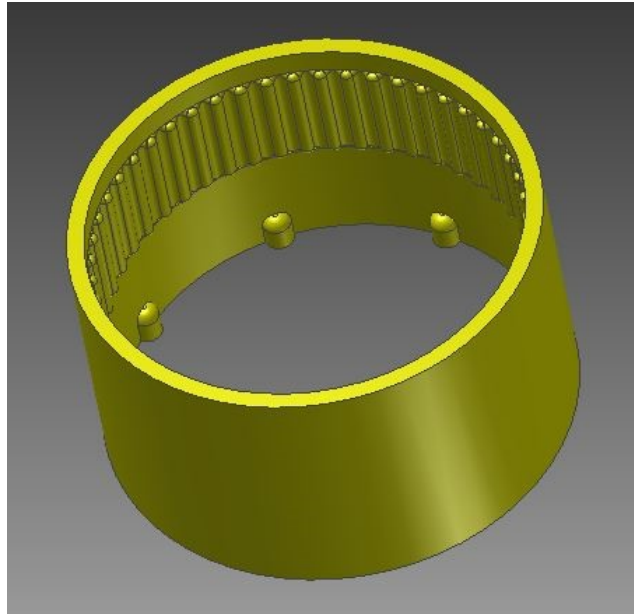
8.1.1.2 Vytištěný díl Kernel – součást harmonické převodovky



Obr. 100 Vytištěný díl Kernel z materiálu Flexfill 92A

8.1.2 Výroba dílu Case – součást harmonické převodovky

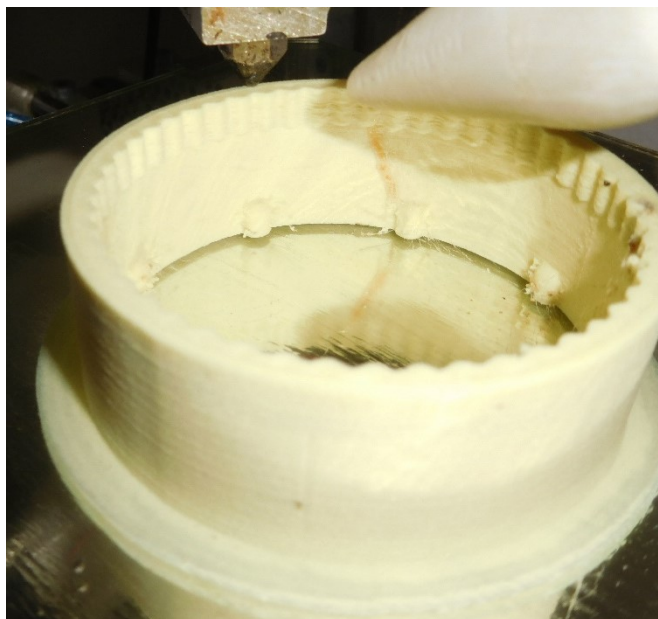
Druhý díl, tzv. Case (Obr. 101) musel být vyroben z vysoce pevného materiálu s dobrou odolností proti mazivům. Jelikož se na dílu nachází ozubení, které musí odolat opotřebení a musí mít dobré kluzné vlastnosti, tak byl zvolen 3D tisk z materiálu Nylon AF80, který obsahuje aramidová vlákna. Nylon AF80 splňuje požadavky na mechanické, kluzné vlastnosti, odolává opotřebení a mazivům.



Obr. 101 3D model dílu Case

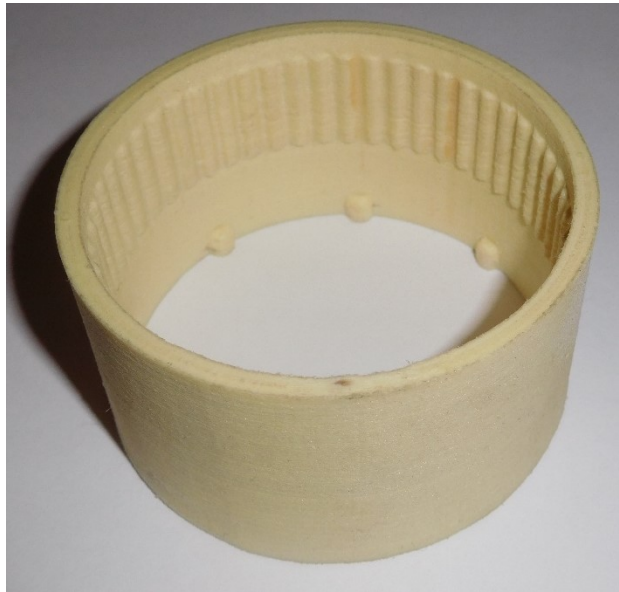
8.1.2.1 Tisk dílu Case – součást harmonické převodovky

Prvním krokem bylo importování 3D modelu Case do softwaru Simplify3D, kde byly nastaveny procesní parametry 3D tisku. Procesní parametry byly nastaveny podle praktických zkušeností s 3D tiskem z materiálu Nylon AF80 a následně byl vygenerován G-kód, který byl nahrán na SD kartu. Nakonec byla tisková podložka opatřena speciální adhezivní vrstvou a poté byl spuštěn 3D tisk.



Obr. 102 Tisk dílu Case z materiálu Nylon AF80

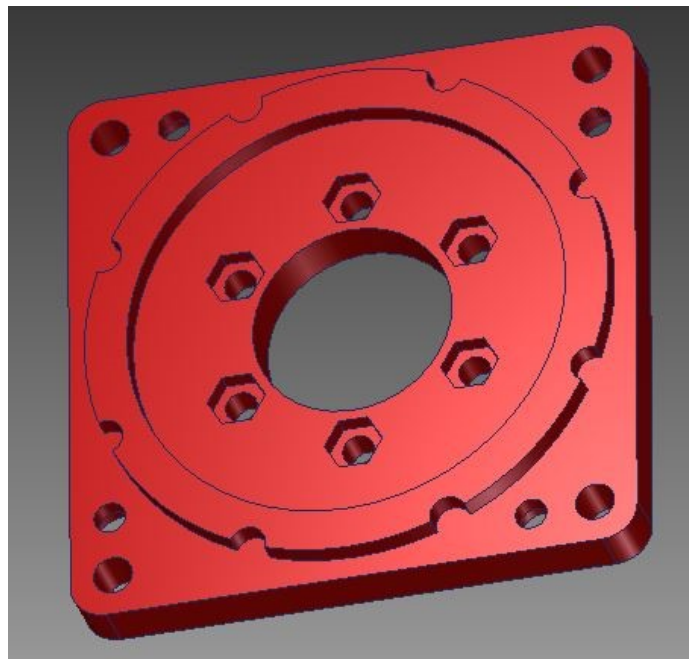
8.1.2.2 Vytištěný díl Case – součást harmonické převodovky



Obr. 103 Vytištěný díl Case z materiálu Nylon AF80

8.1.3 Výroba dílu Flange Out

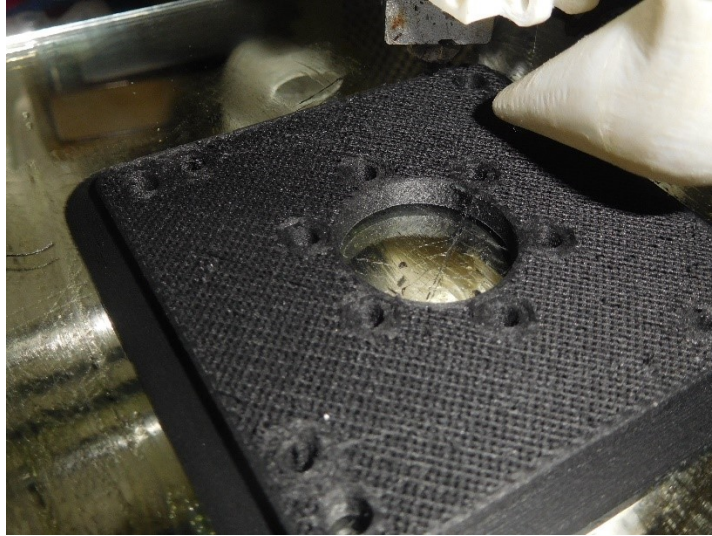
Třetí díl, tzv. Flange Out (Obr. 104) musel být vyroben z materiálu s dobrými mechanickými vlastnostmi a dobrou odolností proti mazivům. Proto byl pro 3D tisk zvolen materiál Nylon CF15, který obsahuje uhlíková vlákna.



Obr. 104 3D model dílu Flange Out

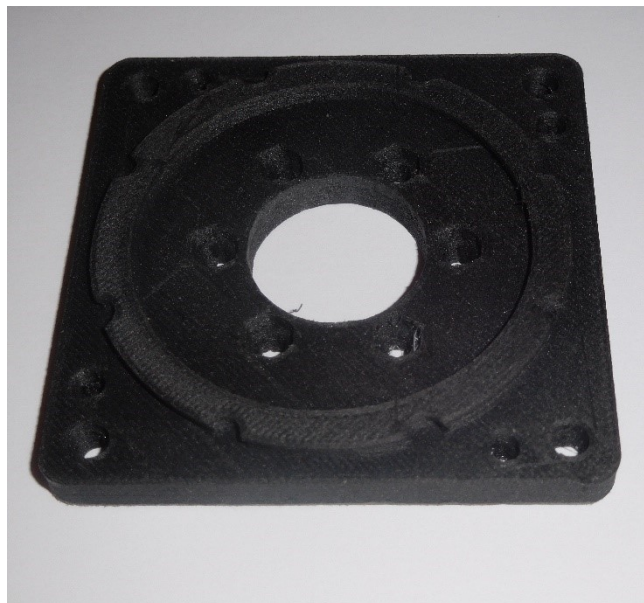
8.1.3.1 Tisk dílu Flange Out – součást harmonické převodovky

Prvním krokem bylo importování 3D modelu Flange Out do softwaru Simplify3D, kde byly nastaveny procesní parametry 3D tisku. Procesní parametry byly nastaveny podle praktických zkušeností s 3D tiskem z materiálu Nylon CF15 a následně byl vygenerován G-kód, který byl nahrán na SD kartu. Nakonec byla tisková podložka opatřena speciální adhezivní vrstvou a poté byl spuštěn 3D tisk.



Obr. 105 Tisk dílu Flange Out z materiálu Nylon CF15

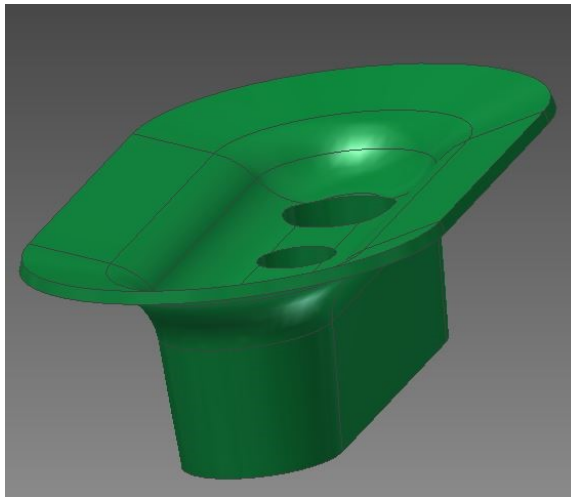
8.1.3.2 Vytištěný díl Case – součást harmonické převodovky



Obr. 106 Vytištěný díl Flange Out z materiálu Nylon CF15

8.2 Výroba dílu Savka

Aditivní technologie FFF byla využita pro tisk náhradního dílu Savka (Obr. 107), který navrhl a zkonstruoval Ing. Jaroslav Maloch, CSc. Savka musela být vyrobena z elastického materiálu, protože pro zajištění správné funkčnosti musí být deformovatelná. Proto byl pro tisk zvolen nejměkčí elastický materiál Flexfill 92A.



Obr. 107 3D model náhradního dílu Savka

Prvním krokem bylo importování 3D modelu Savka do softwaru Simplify3D, kde byly nastaveny procesní parametry 3D tisku. Procesní parametry byly nastaveny podle praktických zkušeností s 3D tiskem z materiálu Flexfill 92A a následně byl vygenerován G-kód, který byl nahrán na SD kartu. Nakonec byla tisková podložka opatřena speciální adhezivní vrstvou a poté byl spuštěn 3D tisk.

8.2.1 Vytištěný díl Savka



Obr. 108 Vytištěný náhradní díl Savka z materiálu Flexfill 92A

9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Celkové náklady na tisk dílů byly spočítány z nákladů na materiál, energie a amortizaci tiskárny. Do celkových nákladů nebyly započítány náklady na obsluhu tiskárny, protože 3D tisk dílů probíhal z SD karty, tudíž obsluha u 3D tiskárny nebyla potřebná. Náklady na přípravu 3D tiskárny, 3D tisku a dokončovací operace byly zanedbatelné.

Cena za 1 m materiálu:

Tab. 13 Cena materiálu Flexfill 98A

Flexfill 98A	
Hmotnost balení [g]	500
Průměr vlákna [mm]:	1,75
Návin vlákna v balení [m]:	175
Cena za 1 m vlákna:	5,25 Kč
Cena celkem:	918 Kč

Tab. 14 Cena materiálu Flexfill 92A

Flexfill 92A	
Hmotnost balení [g]	500
Průměr vlákna [mm]:	1,75
Návin vlákna v balení [m]:	180
Cena za 1 m vlákna:	5,10 Kč
Cena celkem:	918 Kč

Tab. 15 Cena materiálu Nylon CF15 Carbon

Nylon CF15 Carbon	
Hmotnost balení [g]	600
Průměr vlákna [mm]:	1,75
Návin vlákna v balení [m]:	250
Cena za 1 m vlákna:	5,62 Kč
Cena celkem:	1 404 Kč

Tab. 16 Cena materiálu Nylon AF80 Aramid

Nylon AF80 Aramid	
Hmotnost balení [g]	600
Průměr vlákna [mm]:	1,75
Návin vlákna v balení [m]:	250
Cena za 1 m vlákna:	7,02 Kč
Cena celkem:	1 755 Kč

Amortizace tiskárny:

Amortizace 3D tiskárny Rebel II byla stanovena na 3,4 Kč/hod. Předpokladem bylo, že 3D tiskárna Rebel II bude v provozu průměrně 2 hod denně po dobu 5 let. Z toho plyne, že roční odpis bude 2 482 Kč.

Cena za energii:

Cena za energie stojí 0,8 Kč za hodinu provozu tiskárny.

Celková spotřeba materiálu a předpokládaná doba tisku, byla spočítána v softwaru Simplify3D.

Celkové náklady na 3D tisk byly spočítány podle následujících vzorců:

$$N_C = N_{MAT} + N_E + N_A \quad (1)$$

Kde:

N_C – Celkové náklady na 3D tisk [Kč]

N_{MAT} – Celkové náklady na materiál na vytištěný model [Kč]

N_E – Náklady za energie [Kč]

N_A – Náklady na amortizaci 3D tiskárny [Kč]

$$N_{MAT} = N_L \times S_M \quad (2)$$

Kde:

N_{MAT} – Celkové náklady na materiál na vytištěný model [Kč]

N_L – Náklady na 1 metr materiálu [Kč]

S_M – Spotřeba materiálu na tisk součásti [m]

$$N_E = T_P \times E \quad (3)$$

Kde:

N_E – Náklady za energie [Kč]

T_P – Předpokládaná doba tisku [hod]

E – Náklady na energie za hodinu tisku [Kč]

$$N_A = T_P \times A \quad (4)$$

Kde:

N_A – Náklady na amortizaci 3D tiskárny [Kč]

T_P – Předpokládaná doba tisku [hod]

A – Amortizace 3D tiskárny Rebel II [Kč]

9.1 Náklady na 3D tisk tlumících přípravků a upínky

Tab. 17 Cena prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 98A

První tlumící přípravek	
Materiál:	Flexfill 98A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	16,9
Předpokládaná doba tisku [hod]:	4,5
Cena za materiál:	91,04 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	15 Kč
Cena za energie:	4 Kč
Cena celkem:	110 Kč

Tab. 18 Cena prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A

První tlumící přípravek	
Materiál:	Flexfill 92A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	16,9
Předpokládaná doba tisku [hod]:	4,5
Cena za materiál:	89,55 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	15 Kč
Cena za energie:	4 Kč
Cena celkem:	108 Kč

Tab. 19 Cena druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 98A

Druhý tlumící přípravek	
Materiál:	Flexfill 98A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	14,8
Předpokládaná doba tisku [hod]:	3,9
Cena za materiál:	79,72 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	13 Kč
Cena za energie:	3 Kč
Cena celkem:	96 Kč

Tab. 20 Cena druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A

Druhý tlumící přípravek	
Materiál:	Flexfill 92A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	14,8
Předpokládaná doba tisku [hod]:	3,9
Cena za materiál:	78,42 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	13 Kč
Cena za energie:	3 Kč
Cena celkem:	95 Kč

Tab. 21 Cena upínky z materiálu Flexfill 98A

Upínka – tisk po 3 ks	
Materiál:	Flexfill 98A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	4,68
Předpokládaná doba tisku [hod]:	2,5
Cena za materiál:	25,21 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	9 Kč
Cena za energii:	2 Kč
Cena celkem za 3 ks:	36 Kč
Cena celkem za 1 ks:	12 Kč

Tab. 22 Cena upínky z materiálu Flexfill 92A

Upínka – tisk po 3 ks	
Materiál:	Flexfill 92A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	4,68
Předpokládaná doba tisku [hod]:	2,5
Cena za materiál:	24,80 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	9 Kč
Cena za energii:	2 Kč
Cena celkem za 3 ks:	35 Kč
Cena celkem za 1 ks:	11,8 Kč

9.2 Náklady na 3D tisk dílů harmonické převodovky

Tab. 23 Cena dílu Kernel z materiálu Flexfill 98A

Kernel	
Materiál:	Flexfill 98A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	12,56
Předpokládaná doba tisku [hod]:	3,1
Cena za materiál:	67,66 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	11 Kč
Cena za energii:	2 Kč
Cena celkem:	81 Kč

Tab. 24 Cena dílu Kernel z materiálu Flexfill 92A

Kernel	
Materiál:	Flexfill 92A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	12,56
Předpokládaná doba tisku [hod]:	3,1
Cena za materiál:	66,55 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	11 Kč
Cena za energii:	2 Kč
Cena celkem:	80 Kč

Tab. 25 Cena dílu Case z materiálu Nylon AF80 Aramid

Case	
Materiál:	Nylon AF80 Aramid
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	14,54
Předpokládaná doba tisku [hod]:	3,25
Cena za materiál:	102,07 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	11 Kč
Cena za energii:	3 Kč
Cena celkem:	116 Kč

Tab. 26 Cena dílu Flange Out z materiálu Nylon CF15 Carbon

Flange Out	
Materiál:	Nylon CF15 Carbon
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	15,84
Předpokládaná doba tisku [hod]:	3,2
Cena za materiál:	88,96 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	11 Kč
Cena za energii:	3 Kč
Cena celkem:	102 Kč

9.3 Náklady na tisk náhradního dílu Savka

Tab. 27 Cena náhradního dílu Savka z materiálu Flexfill 92A

Savka	
Materiál:	Flexfill 92A
Celková spotřeba materiálu na model [m]:	20,33
Předpokládaná doba tisku [hod]:	6,9
Cena za materiál:	107,72 Kč
Cena za amortizaci 3D tiskárny:	23 Kč
Cena za energie:	6 Kč
Cena celkem:	137 Kč

ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byly navrženy a vyrobeny tlumící přípravky, které se používají na montážní lince během značení sériového čísla a 2D kódu sériového čísla.

První i druhý tlumící přípravek s upínkou byl vyroben ze dvou materiálů Flexfill 98A a Flexfill 92A od firmy Parzlich s.r.o, která prodává materiály pod značkou Fillamentum. Na snížení hladiny zvuku měla pozitivní vliv i volba měkčího materiálu Flexfill 92A, který má tvrdost 92 ShA. Tlumící přípravky a upínka z materiálu Flexfill 92A tak dosáhly největšího snížení hladiny zvuku.

U prvního tlumícího přípravku a upínky z materiálu Flexfill 92A byla snížena hlučnost o 5,9 dB na hodnotu 80,7 dB. U druhého tlumícího přípravku a upínky z materiálu Flexfill 92A byla snížena hlučnost o 7,4 dB na hodnotu 80,8 dB. Díky tlumícím přípravkům byla na montážní lince snížena hlučnost pod 85 dB, aby tak vyhovovala hygienickým limitům pro hluk na pracovišti. Požadavek na snížení hlučnosti na pracovišti montážní linky byl tedy splněn.

Dále v rámci diplomové práce byly ukázány možnosti dalšího praktického využití pokročilých polymerních materiálů pro 3D tisk aditivní technologií FFF.

Z ekonomického hlediska je 3D tisk aditivní technologií FFF velmi zajímavý. Celkové náklady na tisk jednotlivých dílů nebyly vysoké a vzhledem k tomu, že se nabídka pokročilých materiálů pro 3D tisk aditivní technologií FFF stále rozšiřuje, myslím si proto, že se 3D tiskány budou čím dál více používat v průmyslu pro tvorbu přípravků, prototypů, náhradních dílů atd., protože jsou cenově dostupné a dosahují dostatečné přesnosti výtisků.

Lze tedy konstatovat, že pokročilé polymerní materiály pro 3D tisk aditivní technologií FFF nabízí uživatelům 3D tiskáren možnost velmi zajímavých praktických využití, jak v průmyslové praxi, tak při tvorbě náhradních dílů apod.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARNATT, Christopher. *3D printing: Third Edition*. 3. dopl. vyd. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN 978-1539655466.
- [2] HORVATH, Joan C. *Mastering 3D printing*. Berkeley, California: Apress, 2014. Technology in action series. ISBN 978-148-4200-261.
- [3] COWARD, Cameron. *Idiot's Guides: 3D Printing*. USA: Alpha, 2015. ISBN 978-1615647446.
- [4] 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.
- [5] EVANS, Brian. *Practical 3D printers*. New York: Distributed to the book trade world wide by Springer Science Business Media, 2012. Technology in action. ISBN 14-302-4392-9.
- [6] HAUSMAN, Kalani Kirk a Richard HORNE. *3D printing for dummies*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-66077-5.
- [7] How GM Used 3D Printing To Refresh Interior, Exterior Of 2014 Chevy Malibu. In: [Http://gmauthority.com](http://gmauthority.com) [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://gmauthority.com/blog/2013/06/how-gm-used-3d-printing-to-refresh-interior-exterior-of-2014-chevy-malibu/>
- [8] Imperia GP: a legendary Belgian marque is back, thanks to 3D printing. In: [Http://www.3ders.org](http://www.3ders.org) [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20130624-imperia-gp-a-legendary-belgian-marque-is-back-thanks-to-3d-printing.html>
- [9] Stratasys Announces Two New Dental Wax Based 3D Printers, CrownWorx and FrameWorx. In: [Https://3dprint.com/](https://3dprint.com/) [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2014/05/dental-2.jpg>
- [10] 3D Printing for Direct Digital Manufacturing. In: [Http://www.smg3d.co.uk](http://www.smg3d.co.uk) [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: http://www.smg3d.co.uk/images/direct_digital_parts_fortus_900mc_resized.jpg
- [11] The secret behind James Bond's Aston Martin DB5: How Skyfall producers used 3D PRINTED cars to spare the priceless original. In: [Http://i.dailymail.co.uk](http://i.dailymail.co.uk) [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2012/11/13/article-0-1600BB12000005DC-905_634x423.jpg
- [12] Samuel Bernier creates designer lampshade using UP! 3D printer. In: [Http://www.3ders.org](http://www.3ders.org) [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/images/lamp-3d-printed-samuel-bernier-9.jpg>
- [13] Fused Deposition Modeling (FDM). In: [Https://www.additively.com](https://www.additively.com) [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/fused-deposition-modeling>

- [14] A general presentation on the WAAM technology.
In: [Http://waammat.com](http://waammat.com) [online]. 2015 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://waammat.com/documents/waam-2015-general>
- [15] WinSun Uses Waste to 3D Print Houses for Only 4800 Dollars.
In: [Https://3dprinting.com](https://3dprinting.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/news/winsun-uses-waste-3d-print-houses-4800-dollars/>
- [16] Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-Story Apartment Building and an Incredible Home. In: [Https://3dprint.com](https://3dprint.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>
- [17] Dubai debuts world's first fully 3D-printed building.
In: [Http://inhabitat.com](http://inhabitat.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://inhabitat.com/dubai-debuts-worlds-first-fully-3d-printed-building/>
- [18] Stereolithography (SL). In: [Https://www.additively.com](https://www.additively.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography>
- [19] Stereolithography: The Science behind 3D Printing.
In: [Https://www.pixel77.com](https://www.pixel77.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.pixel77.com/stereolithography-science-3d-printing/>
- [20] Reify Solus DLP 3d printer. In: [Http://diy3dprinting.blogspot.cz](http://diy3dprinting.blogspot.cz) [online]. 2014 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://diy3dprinting.blogspot.cz/2014/12/reify-solus-dlp-3d-printer.html>
- [21] High-aspect 3D two-photon polymerization structuring with widened objective working range (WOW-2PP). In: [Https://www.researchgate.net](https://www.researchgate.net) [online]. 2013 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/260174531_High-aspect_3D_two-photon_polymerization_structuring_with_widened_objective_working_range_WOW-2PP
- [22] 3D Printing Processes. In: [Https://3dprintingindustry.com](https://3dprintingindustry.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>
- [23] Stratasys Invents 3D Printing. Again. In: [Http://www.stratasys.com](http://www.stratasys.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://global72.stratasys.com/~media/en/j750/03-vers.ashx>
- [24] Binder Jetting (BJ). In: [Https://www.additively.com](https://www.additively.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>
- [25] Material Jetting (MJ). In: [Https://www.additively.com](https://www.additively.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/material-jetting>

- [26] Binder Jetting. In: [Http://consult3d.com](http://consult3d.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://consult3d.com/wp-content/uploads/2015/02/IMG_5393printed-mold.jpg
- [27] Laser Sintering (LS). In: [Https://www.additively.com](https://www.additively.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-sintering>
- [28] The another level of metal. In: [Https://www.rapidsol.org](https://www.rapidsol.org) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.rapidsol.org/dmlp.aspx>
- [29] Electron Beam Melting (EBM). In: [Https://www.additively.com](https://www.additively.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting>
- [30] INSIDE 3D PRINTING [Melbourne Australia].
In: [Http://consult3d.com](http://consult3d.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://consult3d.com/blog/inside-3d-printing-melbourne-australia/>
- [31] THE EFESTO 557 IS AN ENORMOUS METAL PRINTING PHENOMENON.
In: [Http://www.3dprinterworld.com](http://www.3dprinterworld.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.3dprinterworld.com/article/efesto-557-enormous-metal-printing-phenomenon>
- [32] Additive Manufacturing: Making Sense of Laser Metal Deposition and 3D Printing. In: [Http://www.fabricatingandmetalworking.com](http://www.fabricatingandmetalworking.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/07/additive-manufacturing-making-sense-laser-metal-deposition-3d-printing/>
- [33] Laminated Object Manufacturing (LOM).
In: [Http://www.custompartnet.com](http://www.custompartnet.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [34] Delta robot / 4-axis / 3-axis / packaging.
In: [Http://www.directindustry.com](http://www.directindustry.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/abb-robotics/product-30265-169123.html>
- [35] Rostock MAX. In: [Https://www.3dhubs.com](https://www.3dhubs.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://www.3dhubs.com/s3fs-public/styles/printer_main_picture/public/3d-printer-seemecnc-rostock-max-v3-front.jpg?itok=FNwolckr
- [36] Polar 3D Printer. In: [Https://shop.polar3d.com](https://shop.polar3d.com) [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://shop.polar3d.com/products/polar-3d-printer>
- [37] FLX.ARM: Low-cost SCARA robotic arm for 3D printing, milling & dispensing, now on Kickstarter. In: [Http://www.3ders.org](http://www.3ders.org) [online]. 2014 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20140917-flx-arm-low-cost-scara-robotic-arm-for-3d-printing.html>
- [38] DOLEČEK, Josef. FILLAMENTUM S.R.O. *Materiály pro 3D tisk*. [cit. 2017-04-24].

- [39] Technical data sheet for PLA. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
https://www.dropbox.com/s/xhzxtbtarhqax5z/datasheet_pla_extrafill.pdf?dl=0
- [40] Technical data sheet for ABS. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
https://www.dropbox.com/s/pb9kxtuj8ei2t8y/datasheet_abs_extrafill.pdf?dl=0
- [41] Technical data sheet for ASA. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
https://www.dropbox.com/s/s579e4zxqkbfvgn/datasheet_asa_extrafill.pdf?dl=0
- [42] Technical data sheet for Nylon FX256. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
https://www.dropbox.com/s/jyervf5aa5x7n5q/datasheet_nylon_fx256.pdf?dl=0
- [43] CPE HG100 "Natural". <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24].
Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/cpe-filaments/products/cpe-hg100-natural>
- [44] Technical data sheet for Flexfill 98A. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
https://www.dropbox.com/s/c3d4gfy4lh1zhve/datasheet_flexfill98a.pdf?dl=0
- [45] Technical data sheet for Timberfill. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
https://www.dropbox.com/s/dnxcc7l8ppma8j2/datasheet_timberfill.pdf?dl=0
- [46] Technical data sheet for HIPS. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
https://www.dropbox.com/s/z1hb2eg3rn3g2j6/datasheet_hips_extrafill.pdf?dl=0
- [47] Technical data sheet for PVA. <https://fillamentum.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
https://www.dropbox.com/s/etwbzm3oi7iolqk/datasheet_PVA_extrafill.pdf?dl=0
- [48] What is the best type of plastic for my 3D printing application?
In: <http://my3dmatter.com> [online]. 2016 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
<http://my3dmatter.com/what-is-the-best-type-of-plastic-for-my-3d-printing-application/>
- [49] Print Quality Troubleshooting Guide.
In: <https://www.simplify3d.com> [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#not-extruding-at-start-of-print>
- [50] Mikrovrtáčka Proxxon MM50/E. <http://www.proxxon.com> [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.proxxon.com/en/micromot/28500.php>

[51] Voltcraft SL-100. *Http://www.conrad.com* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.conrad.com/ce/en/product/100804/Voltcraft-SL-100-Digital-Sound-Level-Meter-5-Hz-8-kHz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

RP	Rapid prototyping
DDM	Direct Digital Manufacturing
USD	United States Dollar
CAD	Computer Aided Design
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
FDM	Fused Deposition Modeling
PJP	Plastic Jet Printing
FFM	Fused Filament Modelling
MEM	Melted and Extruded Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
WAAM	Wire And Arc Additive Manufacturing
MIG	Metal Inert Gas
CMT	Cold Metal Transfer
UV	Ultraviolet – ultrafialové záření
SLA	Stereolitografie
DLP	Digital Light Processing
2PP	Two-photon Polymerization
MJ	Material Jetting
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
PP	Polypropylen
BJ	Binder Jetting
LS	Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting

SHS	Selective Heat Sintering
DMLS	Direct metal laser sintering
SLM	Selective Laser Melting
LBM	Laser Beam Melting
DMP	Direct Metal Printing
LMF	Laser Metal Fusion
DED	Directed Energy Deposition
LMD	Laser Metal Deposition
LENS	Laser Engineered Net Shaping
DLF	Directed Light Fabrication
DMD	Direct Metal Deposition
SL	Sheet Lamination
LOM	Laminated Object Manufacture
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
PLA	Polylaktid Acid
SCARA	Selective Compliant Assembly Robot Arm nebo Selective Compliant Articulated Robot Arm
ASA	Acrylonitril-styrén-acrylát
PES	Polyester
HIPS	High Impact Polystyrene
PVA	Polyvinylalkohol
PET	Polyethylentereftalát
TPU	Termoplastický polyuretan
PC	Polykarbonát

mm/s	Milimetr za sekundu
mm	Milimetr
g	Gram
STL	Standard Triangulation Language
°C	Stupeň Celsia
N_C	Celkové náklady na 3D tisk [Kč]
N_{MAT}	Celkové náklady na materiál na vytištěný model
N_E	Náklady za energie
N_A	Náklady na amortizaci 3D tiskárny
N_L	Náklady na 1 metr materiálu
S_M	Spotřeba materiálu na tisk součásti
T_P	Předpokládaná doba tisku
E	Náklady na energie za hodinu tisku
A	Amortizace 3D tiskárny Rebel II
dB	Decibel
Kč	Koruna česká
hod	Hodina
m	Metr

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Návrh lékařského implatátu [6]	13
Obr. 2 3D tisk domu [6].....	13
Obr. 3 Šaty vytištěné na 3D tiskárně [6].....	13
Obr. 4 Návrh interiéru Chevroletu Malibu [7].....	14
Obr. 5 Písková forma vytvořená pomocí 3D tisku [8].....	15
Obr. 6 Vytištěný voskový model [9]	16
Obr. 7 Vytištěný Aston Martin DB5 v měřítku 1/3 [11]	17
Obr. 8 Malosériově vyráběné díly [10].....	17
Obr. 9 Uživatelský 3D tisk [12].....	18
Obr. 10 Schéma FDM technologie [13].....	20
Obr. 11 Svařovací robot a portálová svářečka pro technologii WAAM [14].....	20
Obr. 12 Součást vytvořená pomocí aditivní technologie WAAM [14]	21
Obr. 13 Vytištěný dům z betonu [15]	21
Obr. 14 Vila a pětipatrový dům vytištěný na 3D tiskárně [16].....	22
Obr. 15 Kancelářský komplex v Dubaji vytištěný na 3D tiskárně [17].....	23
Obr. 16 Schéma aditivní technologie SLA [18]	24
Obr. 17 Součást vytvořená aditivní technologií SLA [19]	25
Obr. 18 Schéma aditivní technologie DLP projection [22]	26
Obr. 19 Objekty vytištěné technologií DLP Projection [20]	26
Obr. 20 a) vytištěná síťová struktura technologií 2PP b) vytištěná telekomunikační věž v Tokiu technologií 2PP [21].....	27
Obr. 21 Schéma aditivní technologie Material Jetting [25].....	28
Obr. 22 Model vytištěný na tiskárně Stratasys J750 [23].....	29
Obr. 23 Schéma aditivní technologie Binder Jetting [24]	30
Obr. 24 Vytištěná písková forma pomocí aditivní technologie Binder Jetting [26].....	30
Obr. 25 Schéma aditivní technologie Laser Sintering [27]	31
Obr. 26 Kovová součást vytvořená pomocí aditivní technologie DMLS [28].....	32
Obr. 27 Schéma aditivní technologie Electron Beam Melting [29]	33
Obr. 28 Píst motoru vytištěný pomocí technologie EBM [29].....	34
Obr. 29 Schéma aditivní technologie Directed Energy Deposition [31]	35
Obr. 30 Dodatečný tisk pomocí LMD na již vytvořenou součást [32].....	36
Obr. 31 Schéma aditivní technologie Laminated Object Manufacture [33].....	37

Obr. 32 RepRap 3D tiskárna Darwin [3]	39
Obr. 33 Popraskaný výtisk vlivem deformace [3]	42
Obr. 34 Náskres 3D tiskárny využívající kartézský souřadný systém [5].....	43
Obr. 35 Delta robot od firmy ABB [34]	44
Obr. 36 FFF Delta 3D tiskárna Rostock MAX [35]	44
Obr. 37 3D tiskárna Polar 3D s polárním souřadným systémem [36].....	45
Obr. 38 3D tiskárna SCARA FLX.ARM.S16.Z8 [37]	46
Obr. 39 Vlastnosti PLA [48].....	52
Obr. 40 Vlastnosti ABS [48].....	53
Obr. 41 Vlastnosti Nylonu [48]	54
Obr. 42 Vlastnosti PET [48]	55
Obr. 43 Vlastnosti TPU [48].....	56
Obr. 44 Vlastnosti PC [48]	57
Obr. 45 Porovnání jednotlivých materiálů mezi sebou [48].....	58
Obr. 46 3D tiskárna nezačne tisknout [49]	59
Obr. 47 Nepřilepená první vrstva k tiskové podložce [49].....	61
Obr. 48 Chybějící materiál na výtisku [49]	63
Obr. 49 Přebývajícím materiálem na výtisku [49].....	63
Obr. 50 Přehřátý výtisk [49]	64
Obr. 51 Oddělené vrstvy na výtisku [49].....	65
Obr. 52 Ucpaná tryska [49].....	66
Obr. 53 Přerušeno vytlačování materiálu z extruderu [49].....	66
Obr. 54 Slabá výplň v tištěném objektu [49]	67
Obr. 55 Chybějící detaily na výtisku [49].....	68
Obr. 56 Zdeformovaný objekt [49].....	69
Obr. 57 Měření rozměrů vytištěného objektu [49]	70
Obr. 58 První kryt	73
Obr. 59 Druhý kryt.....	73
Obr. 60 Mikroúderové značící zařízení RMU	74
Obr. 61 Vyražené sériové číslo a 2D kód	74
Obr. 62 Vysunutí základního tvaru prvního tlumícího přípravku	75
Obr. 63 Vysunutí základního tvaru prvního tlumícího přípravku	75
Obr. 64 Vytvoření kulové plochy na prvním tlumícím přípravku	76

Obr. 65 Vytvoření konečného tvaru pomocí funkce tažení po křivce	76
Obr. 66 Nakonec bylo provedeno zaoblení hran	76
Obr. 67 3D model prvního tlumícího přípravku	77
Obr. 68 3D model druhého tlumícího přípravku	77
Obr. 69 Vysunutí základního tvaru upínky	78
Obr. 70 Vysunutí lemu na upínce	78
Obr. 71 Vysunutí základního tvaru upínky	79
Obr. 72 Vytvoření konečného tvaru upínky pomocí příkazu tažení	79
Obr. 73 Vytvoření konečného tvaru upínky pomocí příkazu zaoblení	79
Obr. 74 3D model upínky	80
Obr. 75 RepRap 3D tiskárna Rebel II	81
Obr. 76 Simplify 3D	83
Obr. 77 Nastavení extruderu v Simplify 3D	84
Obr. 78 Nastavení vrstvy v Simplify 3D	84
Obr. 79 Nastavení výplně v Simplify 3D	85
Obr. 80 Nastavení podpor v Simplify 3D	86
Obr. 81 Nastavení teplot v Simplify3D	86
Obr. 82 Nastavení chlazení tisku v Simplify3D	87
Obr. 83 Nastavení rychlosti tisku v Simplify 3D	88
Obr. 84 Nastavení začátku a konce tisku v určité výšce v Simplify3D	88
Obr. 85 Vygenerovaný G-kód a simulace 3D tisku v Simplify3D	89
Obr. 86 Tisk prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A	90
Obr. 87 Tisk druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A	90
Obr. 88 Tisk upínky z materiálu Flexfill 98A	91
Obr. 89 Mikrovrtáčka Proxxon MM50/E [50]	91
Obr. 90 Vytisknutý první tlumící přípravek z materiálů Flexfill 98A (černý) a Flexfill 92A (bílý)	92
Obr. 91 Vytisknutý druhý tlumící přípravek z materiálů Flexfill 98A (černý) a Flexfill 92A (bílý)	92
Obr. 92 Vytisknutá upínka z materiálů Flexfill 98A (černý) a Flexfill 92A (bílý)	92
Obr. 93 Aplikace prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 98A při sériové výrobě na montážní lince	93

Obr. 94 Aplikace prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A při sériové výrobě na montážní lince	93
Obr. 95 Aplikace druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 98A při sériové výrobě na montážní lince	94
Obr. 96 Aplikace druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A při sériové výrobě na montážní lince	94
Obr. 97 Hlukoměr Voltcraft SL-100 [51].....	95
Obr. 98 3D model dílu Kernel	97
Obr. 99 Tisk dílu Kernel	98
Obr. 100 Vytištěný díl Kernel z materiálu Flexfill 92A	99
Obr. 101 3D model dílu Case	100
Obr. 102 Tisk dílu Case z materiálu Nylon AF80	100
Obr. 103 Vytištěný díl Case z materiálu Nylon AF80.....	101
Obr. 104 3D model dílu Flange Out	101
Obr. 105 Tisk dílu Flange Out z materiálu Nylon CF15	102
Obr. 106 Vytištěný díl Flange Out z materiálu Nylon CF15.....	102
Obr. 107 3D model náhradního dílu Savka	103
Obr. 108 Vytištěný náhradní díl Savka z materiálu Flexfill 92A	103

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál PLA [39]	47
Tab. 2 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál ABS [40]	47
Tab. 3 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál ASA [41]	48
Tab. 4 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál Nylon [42]	48
Tab. 5 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál PES [43]	49
Tab. 6 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál Flexfill [44]	49
Tab. 7 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál Timberfill [45]	49
Tab. 8 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál HIPS [46]	50
Tab. 9 Doporučené nastavení 3D tiskárny pro materiál PVA [47]	50
Tab. 10 Technické parametry RepRap 3D tiskárny Rebel II	82
Tab. 11 Technické parametry hlukoměru Voltcraft	95
Tab. 12 Naměřené hodnoty hladiny hluku	96
Tab. 13 Cena materiálu Flexfill 98A	104
Tab. 14 Cena materiálu Flexfill 92A	104
Tab. 15 Cena materiálu Nylon CF15 Carbon	104
Tab. 16 Cena materiálu Nylon AF80 Aramid	105
Tab. 17 Cena prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 98A	106
Tab. 18 Cena prvního tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A	107
Tab. 19 Cena druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 98A	107
Tab. 20 Cena druhého tlumícího přípravku z materiálu Flexfill 92A	107
Tab. 21 Cena upínky z materiálu Flexfill 98A	108
Tab. 22 Cena upínky z materiálu Flexfill 92A	108
Tab. 23 Cena dílu Kernel z materiálu Flexfill 98A	108
Tab. 24 Cena dílu Kernel z materiálu Flexfill 92A	109
Tab. 25 Cena dílu Case z materiálu Nylon AF80 Aramid	109
Tab. 26 Cena dílu Flange Out z materiálu Nylon CF15 Carbon	109
Tab. 27 Cena náhradního dílu Savka z materiálu Flexfill 92A	110

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Výkres ZL001.1 – PODSTAVA
- P II Výkres ZL001.2 – VLOŽKA
- P III Výkres ZL001.3 – ČEP
- P IV Výkres ZL001.4 – DRŽÁK
- P V Výkres ZL002.1– PODSTAVA
- P VI Výkres ZL002.2 – VLOŽKA
- P VII Výkres ZL002.3 – ČEP
- P VIII Výkres ZL002.4 – DRŽÁK