

Konstrukční návrh zařízení Rapid Prototyping

Bc. Petr Studenka

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Studenka**
Osobní číslo: **T14553**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Konstrukční návrh zařízení Rapid prototyping**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Navrhněte 3D tiskárnu.
3. Zkonstruujte zařízení pro 3D tisk.
4. Ověřte výsledné vlastnosti 3D tiskárny a vyrobených prototypových součástí.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016

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



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

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 10. 5. 2016

.....

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

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

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo prostudovat dostupné technologie Rapid Prototyping, podrobněji zjistit informace o materiálech, principu a zařízení technologie FDM a následně zkonstruovat zařízení na tvorbu 3D modelů. Rapid Prototyping umožňuje vymodelovat 3D objekt z CAD dat programu do fyzické podoby, a poté tyto součásti slouží zejména jako vizuální prototypy. Dají se použít na méně namáhané prvky konstrukce ve strojírenství, lékařství, automobilovém průmyslu, letectví, designu atd. Mezi velkou výhodou 3D tisku patří i to, že je možné vyrobit v podstatě součásti, které se jinou dostupnou technologií vyrobit nedají nebo by pro jejich výrobu bylo potřeba vyrobit nástroj a použít speciální strojní zařízení. Zvolená konstrukce tiskárny je krabicového typu a vychází z projektu RepRap, který je rozšířen po celém světě a je volně dostupný. Základem zařízení je hliníkový rám a lineární vedení, které slouží k pohybu jednotlivých os. Velmi důležitou součástí je tisková hlava pracující na principu vytlačování roztaveného plastu z trysky, která tento materiál postupně nanáší v 3D prostoru a vytváří model po jednotlivých vrstvách. Elektronika je také nedílnou součástí zařízení a má na starosti hladké a přesné řízení stroje. Závěrem je možno konstatovat, že takto vyrobená tiskárna je mnohem levnější než nynější komerční tiskárny, a to jak z hlediska konstrukce, tak i z hlediska provozních nákladů. Přitom je schopna dosáhnout podobné kvality vyráběných prototypů.

Klíčová slova: Prototyp, Rapid Prototyping, 3D tisk, FDM, RepRap

ABSTRACT

The aim of this work was to study the available rapid prototyping technology, in more detail find the information on materials, equipment and technology principle of FDM and then construct a device for creating 3D models. Rapid Prototyping allows to model 3D object from CAD data program into the physical form and then these components are used mainly as a visual prototypes. They can be used on less exposed structural elements in engineering, medicine, the automotive industry, aeronautics, design etc. Among a great advantage of 3D printing belongs also that it is possible to produce essentially components, which can not be produced by another available technology or for their production it would be needed to produce a tool and use a machiner. The selected design of the printer's box type and is based on the RepRap project, which is spread around the world and is freely available. The base is an aluminum frame and straight lines that are used to move the separate axes. A very important part is a printhead working on the principle of extruding molten plastic from the nozzle, which gradually applies this material in 3D space and creates a model for single layer. Electronics is also an integral part of the device and is responsible for smooth and precise machine control. In conclusion, it can be said that like this made printer is much more cheaper than current commercial printers both from the point of view of design and also from the point of view of operating costs and at the same time it is able to achieve a similar quality produced prototypes.

Keywords: Prototype, Rapid Prototyping , 3D printing, FDM , RepRap

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D., za odborné vedení, rady a čas, které mi po dobu této práce věnoval a také za podporu v účasti soutěže SVOČ. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petrovi Zádrapovi, Ph.D., u něhož byl projekt realizován, zajistil prostory k výrobě a dodal několik komponent na zařízení. Poděkování patří také univerzitě UTB za finanční podporu v rámci školní stáže.

Motto:

„Člověk může dělat to, co chce, ale nemůže chtít, aby chtěl.“

Arthur Schopenhauer

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 HISTORIE	12
2 RAPID PROTOTYPING	14
2.1 POUŽITÍ RAPID PROTOTYPING	14
3 ZÁKLADNÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING	16
3.1 LOM (LAMINATED OBJECT MANUFACTURE).....	16
3.2 SLA (STEREOLITOGRAFIE).....	17
3.3 SLS (SELECTIVE LASER SINTERING).....	18
3.3.1 Laser Sintering – Plast	18
3.3.2 Laser Sintering – Kov	19
3.3.3 Laser Sintering – Slévarénský písek	19
3.3.4 Laser Sintering – Keramika	19
3.4 POLYJET.....	20
4 METODA FDM (FUSED DEPOSITION MODELING)	21
4.1.1 FDM tisková hlava	22
4.2 TVORBA PODPOR	23
4.3 TVORBA MODELU	26
5 MATERIÁLY	28
5.1 ABS	28
5.2 PLA	29
6 3D DATA A JEJICH ZPRACOVÁNÍ	31
6.1 STL FORMAT (STANDARD TESSELLATION LANGUAGE).....	32
6.2 SLICER	34
7 KONFIGURACE ZAŘÍZENÍ	36
7.1.1 Nastavení tiskárny	36
7.1.2 Nastavení vláken	36
7.1.3 Nastavení tisku	36
8 VÝHODY A NEVÝHODY FDM	39
9 ZAŘÍZENÍ PRACUJÍCÍ NA TECHNOLOGII FDM	40
9.1 TŘÍDA PROFESIONÁLNÍCH STROJŮ ZNAČKY STRATASYS	40
9.1.1 Fortus 250/380/450mc	40
9.1.2 Fortus 900mc.....	41
9.2 CENOVĚ DOSTUPNÉ 3D TISKÁRNY	42
9.2.1 Stratasys Mojo.....	42
9.2.2 uPrint SE Plus	42
9.2.3 MakerBot Replicator	43
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
10 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	45
11 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ RAPID PROTOTYPING	46

11.1	KONSTRUKCE	46
12	ELEKTRONIKA	56
12.1	ŘÍDÍCÍ DESKA	56
12.2	NAPÁJECÍ ZDROJ	59
12.3	KROKOVÉ MOTORY	59
12.4	KONCOVÉ SPÍNAČE	59
12.5	TISKOVÁ HLAVA	61
12.6	TERMOČLÁNKOVÝ PŘEVODNÍK AD597	63
12.7	VYHŘÍVANÁ TISKOVÁ PLOCHA	65
13	SOFTWARE	67
13.1	FIRMWARE ZAŘÍZENÍ	67
13.2	SOFTWAREOVÁ PODPORA PRO ZPRACOVÁNÍ CAD DAT	68
13.3	UKÁZKA ZPRACOVÁNÍ CAD DAT	70
14	KALKULACE	72
15	POROVNÁNÍ ZAŘÍZENÍ A VLASTNOSTÍ VÝROBKŮ	73
16	DISKUZE VÝSLEDKŮ	74
	ZÁVĚR	76
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
	SEZNAM TABULEK	85
	SEZNAM PŘÍLOH	86

ÚVOD

Už v dávné historii mělo lidstvo potřebu vynalézat, vyrábět a objevovat nové a nové technologie. V dnešní době je známo mnoho procesů od jednoduchého třískového obrábění až po speciální laserové technologie. Termínem Rapid Prototyping jsou od konce 80. let minulého století označovány ty technologie, které výrobek nevytváří klasickými postupy třískového obrábění, ale vrstveným aditivním procesem.

Prototypovou výrobu lze obecně rozdělit z několika hledisek. Z hlediska charakteru výrobku (prototypu), z hlediska charakteru nástroje pro výrobu výrobku a z hlediska objemu výroby. Prototyp je výrobek, který přebírá některé charakteristiky výrobku sériového, je však vyroben náhradní technologií a mnohdy také z náhradního materiálu. Náhradní technologie bývají obvykle mnohem dražší, než technologie výroby sériového dílu. Jejich společnou předností je však rychlost, s jakou dokáží prototyp vyrobit.

U RP se jedná o složitý proces, který by bez moderních počítačů a speciálního softwaru nemohl fungovat. Při tomto způsobu výroby se neodebírá z polotovaru žádný materiál a cílem je získat konečný tvar výrobku, který se získá poskládáním vrstev, na které je výrobek rozřezán. Tato technologie se stává dostupnější a je jen otázkou času, kdy se dostane i do běžných domácností.

Diplomová práce navazuje na předchozí bakalářskou práci a v teoretické části má za cíl získat základní přehled o problematice související s touto technologií. První dvě kapitoly se věnují především historii a technologii 3D tisku. Další stěžejní kapitoly popisují druhy vhodných materiálů pro FDM technologii a proces zpracování CAD modelu. Poslední kapitola poukazuje na dostupné zařízení FDM tiskáren, které jsou rozděleny podle cenové dostupnosti.

Praktická část se zabývá vlastním konstrukčním návrhem zařízení, které bude sloužit pro účely Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Je zde popsána jeho konstrukce až po uvedení do provozu. Výsledkem této práce oproti předchozí bakalářské práci je konstrukčně složitější zařízení s větším stavebním uzavřeným prostorem.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE

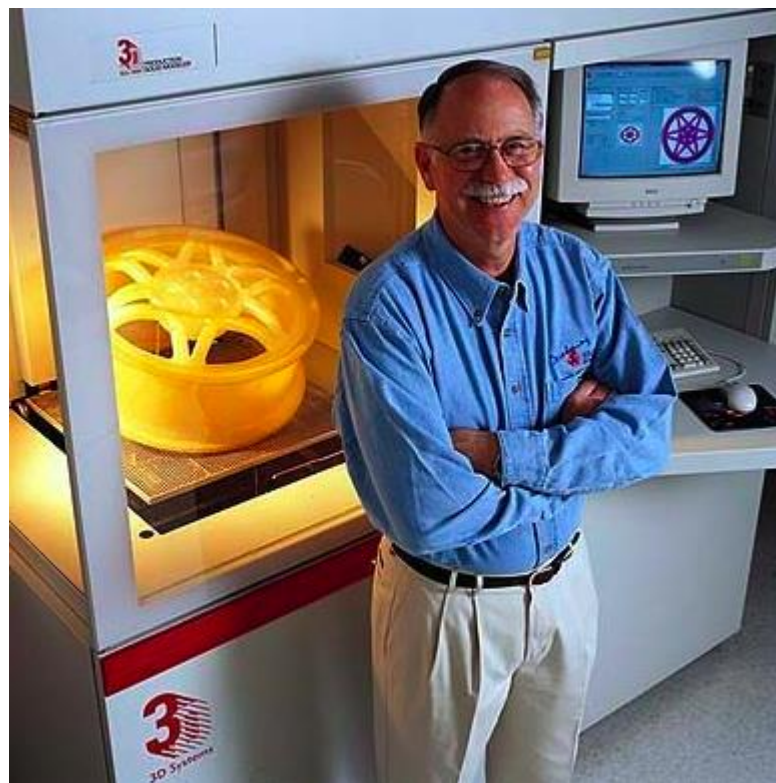
Obvykle dobrou myšlenou je nahlédnout do historie. Bylo by skutečně obtížné pochopit funkci automobilu, pokud by nebylo známo, jak je vyvinut spalovací motor. A 3D tiskárny zpravidla nejsou žádnou výjimkou a mají poměrně bohatou historii.

3D tisk je ve skutečnosti využíván v průmyslovém světě už po desetiletí avšak revoluce 3D tisku nastala při tvorbě zařízení pro běžné uživatele. První patent na 3D tiskárnu byl podán v roce 1984 Charles W. Hullem. Jeho patent byl pro 3D tiskový proces nazývaný stereolitografie (SLA).

V té době pracoval na vývoji UV odolných povlaků. Tyto povlaky byly z kapalně pryskyřice, která reagovala s UV světlem, aby proběhla síťovací reakce. Při práci s touto pryskyřicí si Hull začal představovat zařízení, které by mohlo vytvrdit pryskyřici v následných vrstvách pro vytvoření trojrozměrného objektu. Vývojový proces nebyl bez překážek. Jeden z největších problémů bylo převedení 3D modelu z počítače do speciálního kódu pro zařízení SLA. Totiž na počátku 80. let, počítačově podporované navrhování (CAD) bylo ještě v plenkách a žádný vhodný formát souboru pro SLA zařízení neexistoval. Takže Hull vytvořil svůj vlastní formát, SLA souboru (později STL). S tímto formátem souborů byl schopen vytvořit software překládající 3D model do série instrukcí pro jeho zařízení. V roce 1983 úspěšně vytvořil svůj první 3D model. Svůj patent pro SLA podal v roce 1984. V roce 1986 mu byl jeho patent udělen a ve stejném roce vytvořil společnost 3D Systems s vývojem zařízení pracující na SLA.

Dnes drtivá většina spotřebitelských tiskáren používá technologii FDM. Ta byla původně vyvinuta společností Scotta Crumpa v roce 1989, s cílem usnadnit proces prototypování. Crump spolu s FDM také vyvinul některé z nezbytných souvisejících technologií, jako je např. ABS vlákno. Poté, co vynalezl proces FDM tisku v roce 1989, založil společnost Stratasy - v současné době největší výrobce 3D tiskáren. V roce 2009 vypršel této společnosti patent technologie FDM tisk, a tudíž se otevřel trh pro domácí FDM 3D tiskárny. Ty jsou obvykle označovány technologií fused filament fabrication (FFF).

Během stejného časového období, kdy Stratasys a 3D Systems se vyvíjejí SLA a FDM, vznikají další samostatné technologie. Na univerzitě v Austinu v polovině roku 1980 bylo vyvinuto selektivní laserové sintrování (SLS) Dr. Carlem Deckardem a Dr. Joem Beamanem. Tato technologie byla pak prodána společnosti 3D Systems v roce 2001. Mezitím na počátku 90. let na Massachusetts Institute of Technology (MIT) byl vynalezen inkoustový 3D tisk. Společnost Z. Corp. získala licenci na tuto technologii a produkovala 3D tiskárny až do roku 2012. Dne 3. ledna 2012, byla koupena 3D Systems za účelem získat patent a licenci na inkoustový tisk, aby mohla vstoupit na spotřebitelský trh. Ale byl to právě FDM tisk, který spotřebitelský trh ovládl. Stalo se tak i díky projektu RepRap. [1]



Obr. 1 Charles Hull, vynálezce 3D SLA tisku a zakladatel společnosti Stratasys

[2]

2 RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping (RP) je termín zahrnující celou řadu procesů používaných pro výrobu modelů a prototypových dílů, které používají CAD data z počítačových modelů. RP se nejčastěji vztahuje na soubor procesů, které využívají 3D CAD data pro vytváření trojrozměrných prototypových dílů, ale termín může také odkazovat na automatizované procesy, které používají 2D CAD data pro vytváření prototypových dílů z plošných prvků. Softwarové programy CAD usnadňují proces. Pojem "rychlý" se používá k popisu tohoto procesu z několika důvodů. Schopnost prototypový díl vyrobit rychleji, než-li pomocí tradičních postupů, které trvají v řádu několika dnů či týdnů. Pro určité aplikace, které mohou být také použity pro výrobu dílů, jsou vynechány nástrojové procesy nutné pro některé konvenční výrobní procesy. K výhodám RP patří potenciální úspora nákladů a času v průběhu vývoje produktů, fyzikální vyhodnocení dílů, lepší kontrola kvality, dřívější odhalení chyb v průběhu vývoje modelu, snížený požadavek na změny výrobních nástrojů a pro určité materiály a aplikace lze zhotovené modely použít jako hotový dílec. [3]

2.1 Použití Rapid Prototyping

V každodenním životě 3D tiskárny nemusí být tak běžné. Nicméně jsou široce uplatňovány v mnoha aspektech. Inženýři, vědci, designéři a umělci pracující ve svých laboratořích a dílnách využívají 3D tiskařské techniky a vytvářejí různé inovační koncepty.

Medicína

Pole medicíny je možná první oblast, kde se aktivně začal 3D tisk využívat. Schopnost 3D tisku poskytovat vysokou míru přizpůsobení umožňuje výrobu speciálních optimalizovaných pomůcek pro určitého pacienta, jako jsou např. umělé klouby a různé implantáty. Model je nejprve generován pomocí sekce skenování. Proces skenování může také pomoci chirurgům dělat lepší úsudky a provádět vyšší přesnost chirurgických zákroků, což výrazně zlepšuje jejich úspěchy při operaci. [4]

Leteckví

V leteckém průmyslu je 3D tisk také často využíván. Letecká strojní zařízení podléhají přísným zkouškám v oblasti životnosti a spolehlivosti. Složité svařované nebo montované součástky jsou náchylnější k poruchám nebo poškození. Tištěné produkty mohou přispět ke snížení počtu mechanických dílů a zároveň prodloužovat životnost těchto součástí. [4]

Šperkařství

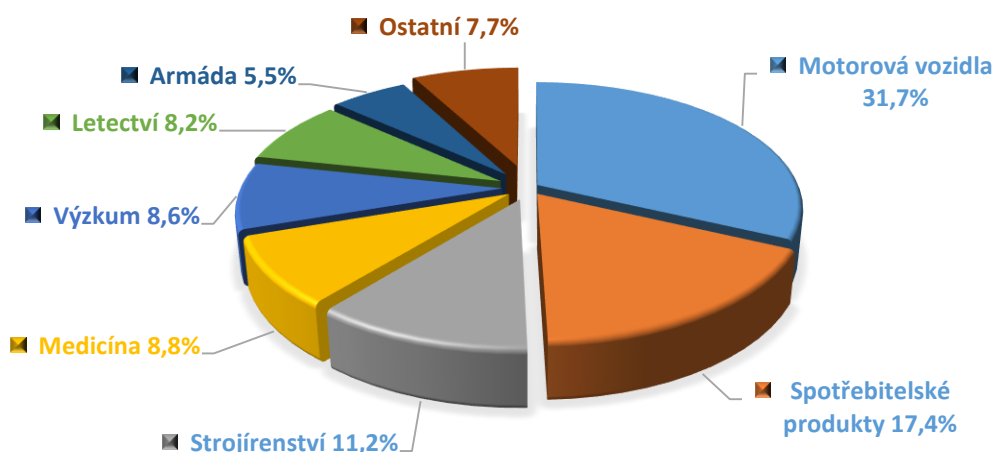
Design a výroba šperků jsou extrémně náročné profese, které vyžadují rozsáhlé znalosti v odlévání, pokovování a geometrickém řezání a broušení. 3D tisk poskytuje šperkařům přesný projev designového konceptu a pomáhá zefektivnit spletné procesy při navrhování šperků. [4]

Architektura

Ve stavebnictví se dříve používalo 3D modelovacích softwarů pouze pro zobrazení virtuálního modelu budovy. Nicméně, přechod z počítačový 3D modelů na fyzikální modely by do budoucna mohlo využívat i při reálné stavbě budovu. Zde je možnost, že 3D tisk může být přímo využit ke stavbě skutečných zdí a prvků budov. Budovy zkonstruované pomocí 3D tištěných dílů již byly postaveny v Číně. Konstrukteři zde byli schopni postavit 10 jednotek 200 m² do 24 hodin, což znamenalo v časově náročných a pracných stavebních procesů převrat. [4]

Móda

Aditivní výroba poskytla neomezený potenciál v módním designu. Vysoké boty na podpatku mohou být nyní přizpůsobeny designu a hladce vytvořeny bez starosti o výrobní techniky. Stále více a více mezinárodních módních přehlídek se začalo zaměřovat na futuristické produkty vyrobené pomocí techniky 3D tisku. [4]



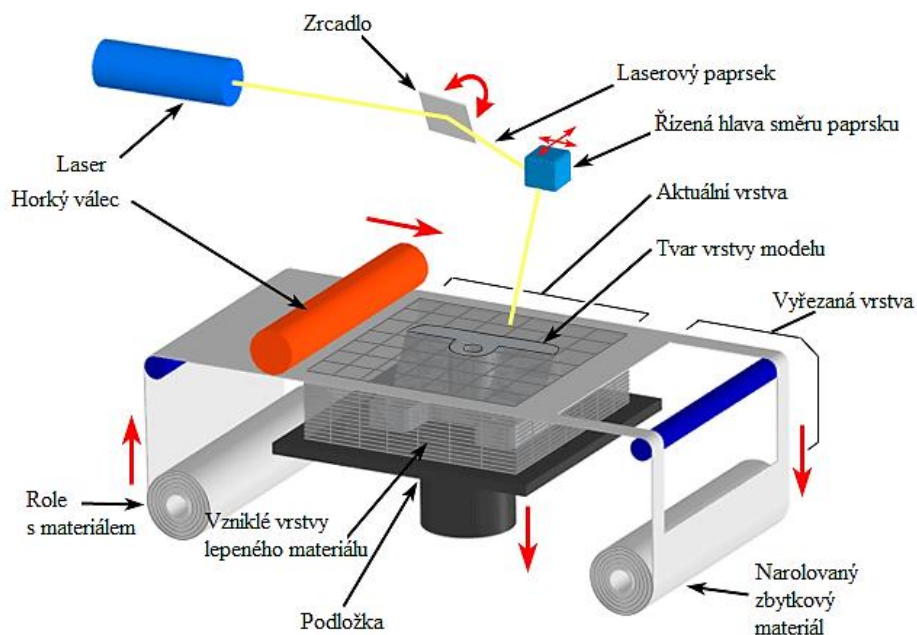
Obr. 2 Graf procentuálního využití technologie Rapid Prototyping [5]

3 ZÁKLADNÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Zde jsou okrajově zmíněny některé z řady technologií Rapid Prototyping.

3.1 LOM (Laminated Object Manufacture)

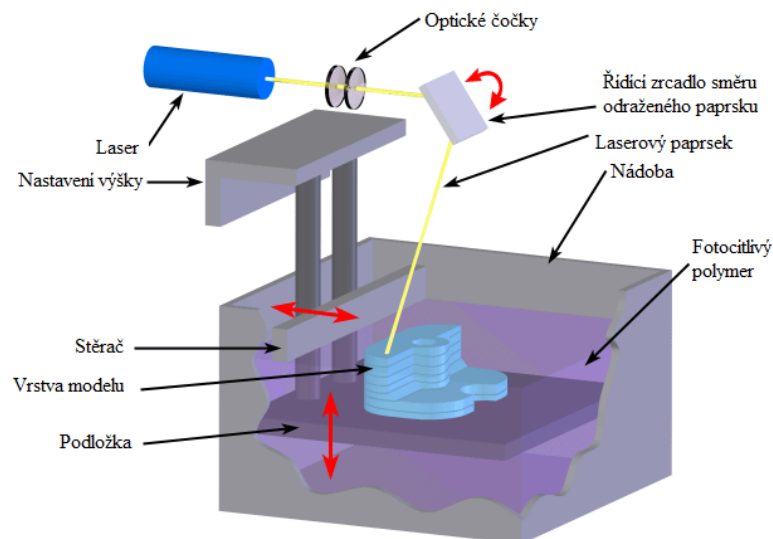
Výchozím polotovarem jsou jednotlivé listy materiálu. Ty jsou nejprve nahřáté a následně mechanicky přitisknuté k předešlé vrstvě. Po tomto kroku laser do listu vypálí 2D obrys aktuální vrstvy. Nejsou potřeba podpory. Zhotovené vrstvy jsou obklopeny materiálem, který slouží jako podpora. Podpory jsou po vyhotovení vylámány ze zhotovené krychle. Při vlastním LOM procesu jsou jednotlivé vrstvy materiálu na spodní straně opatřeny adhezivní vrstvou materiálu. Materiál se podává z tzv. nekonečné role z jedné strany stroje na druhou. Pod vlastním materiálem se nachází základna, na kterou se kladou jednotlivé vrstvy papíru, její svislý pohyb je řízen počítačem. Každá vrstva se přidá k předešlé vrstvě ohřátím a stlačením listu materiálu pomocí válce, který se nad vrstvou pohybuje a je zahřátý na pracovní teplotu. Obrys je pak pomocí laseru vyřezán do vrstvy právě přidaného materiálu. [6]



Obr. 3 Metoda LOM [7]

3.2 SLA (Stereolitografie)

Je to metoda 3-D tisku, který zahrnuje fotosenzitivní pryskyřici a laser. Kapalná pryskyřice je obsažena v těle tiskárny se stavební deskou, která se pohybuje nahoru a dolů. Pryskyřice tuhne, když je vystavena na konkrétní vlnovou délku světla, obvykle v UV spektru. Tiskárna má laser, který je naladěn na tuto konkrétní vlnovou délku. Stavební deska začíná v horní části a lasery se pohybují napříč. Pryskyřice v příslušných oblastech tuhne. Stavební deska se pak snižuje. Tento proces lze provádět také vzhůru nohama, kde stavební podložka je ve skutečnosti nad pryskyřicí, a když se přidávají jednotlivé vrstvy, vytahují se vytvrzené z pryskyřice. Tento druh tisku má několik výhod oproti FDM tisku. Obecně platí, že pryskyřice obsahuje substanciálně větší podporu návrhů, než u FDM tiskáren. Další velkou výhodou je úroveň podrobnosti. Mohou dosahovat velmi jemných detailů. Je možné dosáhnout výšky vrstvy 0,025 mm. Avšak stereolitografie je omezena v některých ohledech. Disponuje pouze omezeným počtem barev, obvykle je transparentní, čirá nebo bílá. Dalším a mnohem více znepokojující omezením je, že většina výrobců tohoto typu zařízení vyrábí svoji vlastní specifickou pryskyřici pro určitou vlnovou délku, a proto je velmi obtížná konkurence s tímto spotřebním materiálem pro tiskárny. Tento fakt vede k finanční náročnosti tisku z fotosenzitivní pryskyřice, protože se jedná o dražší materiál než pro FDM. Nejpopulárnější spotřebitelská SLA tiskárna je Formlabs Form. [8]



Obr. 4 Metoda Stereolitografie [7]

3.3 SLS (Selective Laser Sintering)

Modely vyrobené metodou Selective Laser Sintering jsou velmi pevné. SLS je technologie, při které je laserovým paprskem spékán do určitého tvaru slévárenský písek, plastový nebo kovový prášek. Přídavný materiál je nanášený na nosnou desku v inertní atmosféře po vrstvách. Podle vypočtených souřadnic bodů rovin řezů je řízená XY skenovací hlava, která vede laserový paprsek nad povrchem prášku. V místě působení laseru se přídavný materiál buď zapeče, nebo roztaví. Okolní neosvětlený materiál slouží jako nosná konstrukce. Výroba součástí probíhá po vrstvách, po vytvoření jedné vrstvy se nosná deska sníží o hodnotu odpovídající hloubce vrstvy.

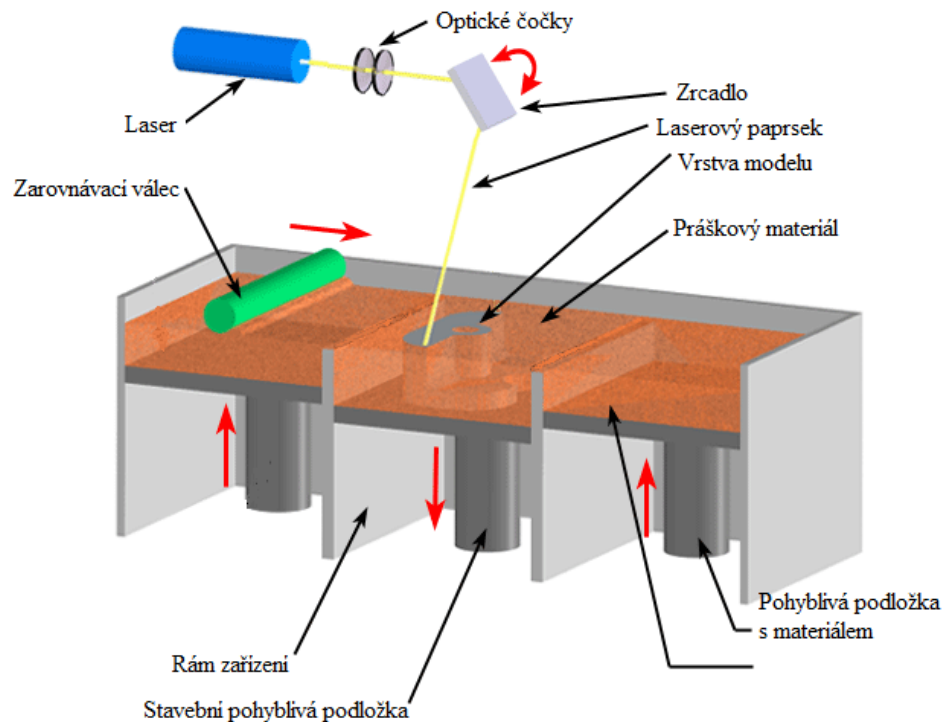
Na rozdíl od jiných metod můžeme využívat široké spektrum materiálů. Principiálně je možné použít jakýkoliv prášek, který se působením tepla taví nebo měkne. V současnosti se v komerčních oblastech používají např. termoplastické materiály: polyamid, polyamid plněný skelnými vlákny, polycarbonát, polystyrén dále speciální nízkotavitelné slitiny z niklových bronzů nebo polymerem povlakovaný ocelový prášek. Většinou však ale není možno přecházet na stejném zařízení od jednoho materiálu k druhému, neboť jejich vytvrzení si vyžaduje výrazně odlišné podmínky. [5]

Podle druhu použitého modelovacího materiálu je možno v rámci této technologie rozlišovat metody:

- *Laser Sintering - Plast*
- *Laser Sintering - Kov*
- *Laser Sintering – Slévárenský písek*
- *Laser Sintering – Keramika*

3.3.1 Laser Sintering – Plast

U Laser Sinteringu – Plast je, stejně jako například u FDM, možno volit z několika druhů termoplastických polymerních materiálů, které svými vlastnostmi určují i způsob využití hotového modelu. Při použití polystyrenu je možné použít výsledný model ve standardní metodě lití do ztraceného vosku, přičemž je možno snadno modelovat i velmi komplikované části výrobku. Při použití polyamidu dosahují výsledné modely vynikající mechanické vlastnosti jako tvrdost, houževnatost, teplotní odolnost atd. Tyto modely jsou proto vhodné pro funkční zkoušky nebo testy lícování. Standardním využitím všech modelů je prostorová vizualizace navrhovaného výrobku. [5]



Obr. 5 Metoda SLS [7]

3.3.2 Laser Sintering – Kov

Modely vzniklé metodou Laser Sintering - Metal dosahují dostatečné pevnosti a mechanické odolnosti, takže je možno je využít především jako formy pro výrobu polymerních součástek vstřikováním nebo lisováním. [5]

3.3.3 Laser Sintering – Slévarénský písek

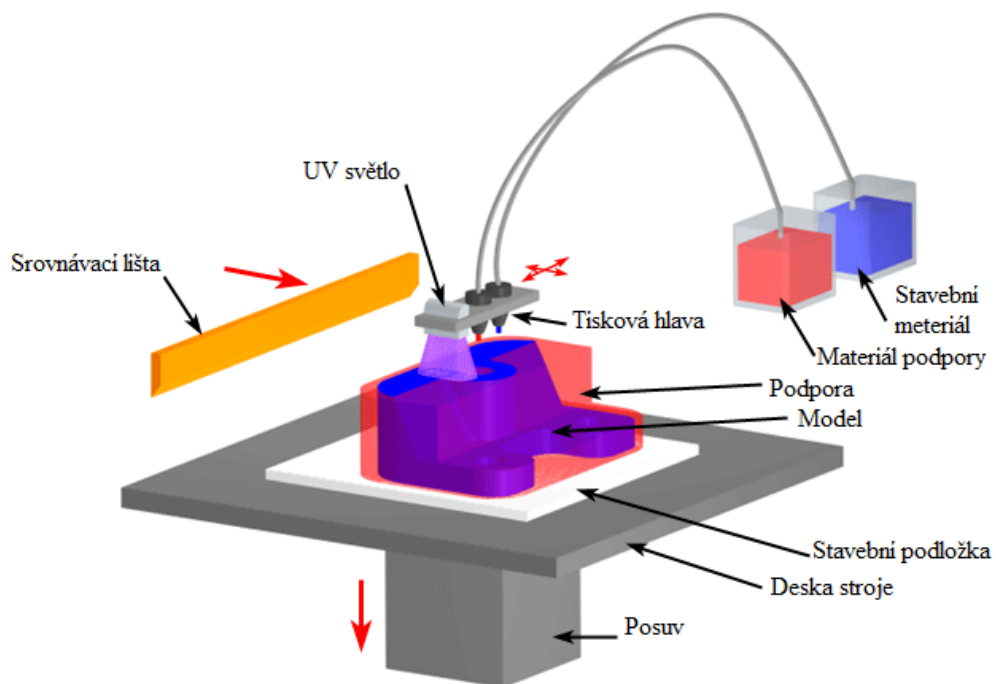
Jednou z nejnovějších technologií Rapid Prototypingu je Laser Sintering - Foundry Sand. Tato metoda používá upravený slévarénský písek, jehož vytvrzováním je možno bez jakýchkoli mezikroků vytvořit na prototypovacím zařízení klasickou pískovou formu pro lití. [5]

3.3.4 Laser Sintering – Keramika

Výchozím materiálem je v tomto případě prášek slepovaný pomocí tekutého pojiva. Nanášení pojiva je zajištěno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy, která je vedena v rovině XY podle předem vypočítaných řídicích údajů. Pomocí této metody se dají vyrábět různé součástky z keramického prášku nebo formy a jádra pro technologii přesného lití. [5]

3.4 PolyJet

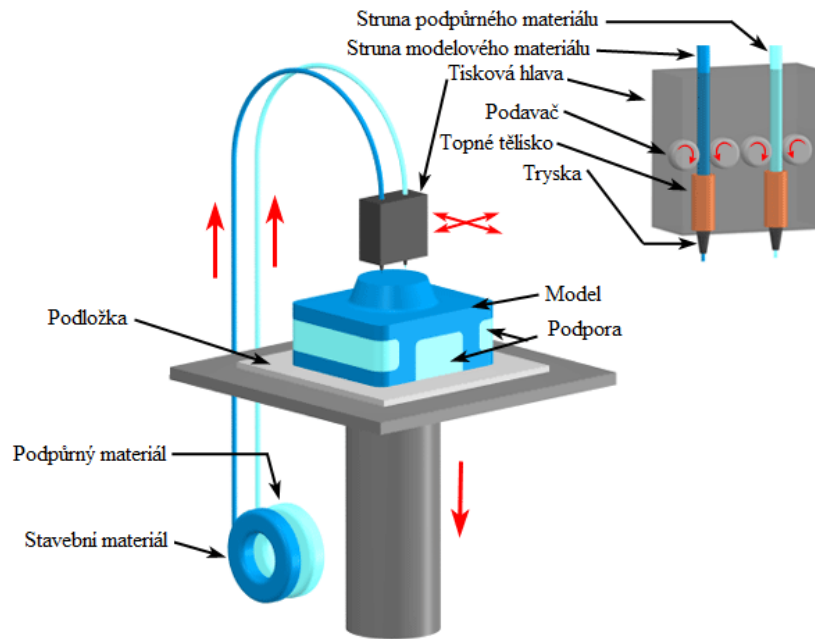
Patentovaná inkoustová technologie PolyJet společnosti Objet pracuje na bázi nastříkávání nejnovějších fotopolymerních materiálů na platformu v ultratenkých vrstvách, vrstva po vrstvě, až do vytvoření konkrétního dílu. Každá fotopolymerní vrstva je vytvrzena UV zářením okamžitě po nastříknutí, což má za následek vytvoření vytvrzených modelů, jež je možné ihned použít bez nutnosti dalšího tvrzení. Podpurný materiál připomínající gel je speciálně navržen pro složité konstrukce a lze jej velmi snadno ručně odstranit vodou. Technologie PolyJet umožňuje vytváření horizontálních vrstev o pouhých 16 μm , jemných detailů a ultratenkých stěn o tloušťce až 0,6 mm v závislosti na geometrii. [9]



Obr. 6 Metoda PolyJet [7]

4 METODA FDM (FUSED DEPOSITION MODELING)

Princip metody FDM je znázorněn na obrázku č. 7. Tento proces nevyžaduje plošné materiální doplňování před vytvářením jednotlivých vrstev jako je tomu například u metody SLS. Nicméně, v případě, že dodávka materiálu v podobě plastové struny nepostačuje k vyhotovení modelu, nebo v případě, že je v průběhu tisku vyčerpána, musí být vložena do zařízení cívka nová s novým materiálem. Teplota v trysce se zvyšuje na provozní úroveň, což je těsně pod teplotu tání použitého materiálu. Na rozdíl od ostatních postupů jsou díly konstruovány v otevřeném prostoru. Tyto díly nejsou obklopeny kapalinou nebo práškovými materiály. Proto po zahájení tisku tisková plocha není snížena o jednu tloušťku vrstvy. Místo toho zajišťuje přesnou polohu mezi tištěným modelem a vytlačovací tryskou. Pracovní prostor bývá nejčastěji vyhříván na 70 – 150°C, dle aktuálně použitého modelového materiálu. Stavební proces používá vytlačovací hlavu, která se nazývá extruder a pohybuje se ve směrech X a Y. Přes tuto vyhřívanou hlavu prochází platová struna, která dodává potřebný materiál pro stavbu modelu. V roztaveném stavu se vlákno se vytlačuje špičkou (tryskou). Tloušťka a hloubka vlákna je definována průměrem vytlačovacího trysky, rychlostí vytlačování, rychlostí pracovních posuvů a výškou vrstvy. Při ukládání na předchozí vrstvy vlákno rychle tvrdne a fixuje svůj tvar. Při dokončení jedné vrstvy modelu se deska sníží o jednu tloušťku vrstvy, nejčastěji (0.13 až 0.30 mm). Na rozdíl od stereolitografie a selektivní laserové sliňování je FDM proces téměř kontinuální. Proces vytlačování z jedné vrstvy do další je s malým nebo žádným zpožděním. Stejně jako u stereolitografie, tento proces vyžaduje podporu modelové struktury. Jedná se zejména o první vrstvy, které mají být uloženy na tiskovou plochu a převislých částí modelu, které nemají předchozí podpurné vrstvy tištěného modelu. Po dokončení tisku se tento podpurný materiál z modelu odstraní vymýváním, nejčastěji roztokem alkoholu. [10]



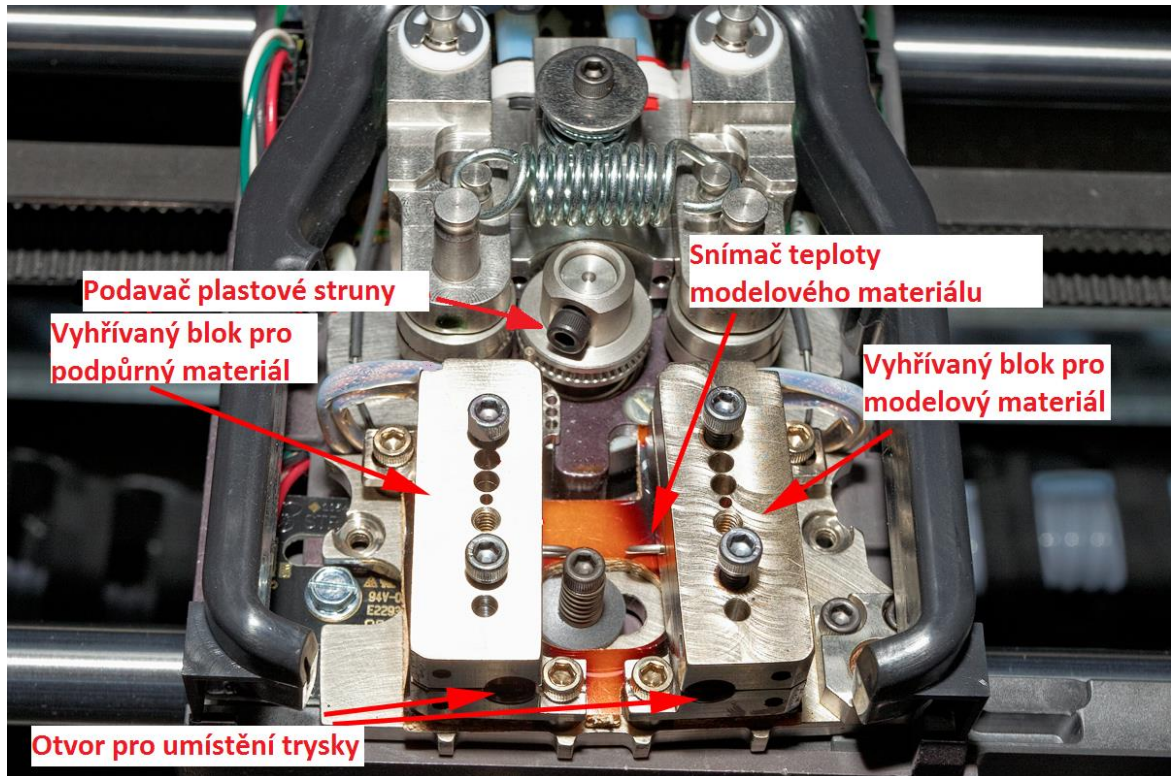
Obr. 7 Princip technologie FDM [7]

4.1.1 FDM tisková hlava

Kritickou součástí, pro vlastní kvalitu 3D tisku je tisková hlava. Podle typu použitého plastu je potřeba materiál zahřát na stabilní teplotu. Stavební materiál je přitom do tiskové hlavy přiváděn ve formě drátu, obvykle o průměru 3 mm, případně 1,75 mm. Dávkování materiálu tiskovou hlavou je prováděno posuvem tohoto materiálu do tiskové hlavy. Rychlost posuvu je dána jednak posuvovou rychlostí tiskové hlavy a jednak průměrem trysky a průměrem tiskového materiálu a může být určena dle vztahu (1),

$$f_f = f_{min} \cdot \frac{d^2}{D^2} \quad (1)$$

kde f_f je rychlost posuvu tiskového materiálu, f_{min} je rychlost pohybu tiskové hlavy, d je průměr vytlačovaného materiálu a D je průměr výchozího materiálu. Tento vztah platí i zpětně, tj. vlivem posuvu tiskové hlavy je možné regulovat rovněž průměr nanášeného tiskového materiálu. Průměr vytlačeného materiálu nebývá totožný s průměrem trysky, často dosahovaný poměr je například: 0,3 mm průměr vytlačeného materiálu ku 0,4 mm průměru trysky. Rovněž rychlost vytlačování materiálu nebývá konstantní. Pro zajištění co nejvýhodnějších podmínek tisku má rozhodující vliv schopnost řídit, jak vytlačování samotného materiálu, tak jeho včasné zastavení. Aby toho bylo dosaženo, snaží se udržovat ve viskózně-tekutém stavu co nejmenší část tiskového materiálu. [11]



Obr. 8 Tisková hlava FDM zařízení Fortus 450 od firmy Stratasys [12]

4.2 Tvorba podpor

Podpurný materiál pro FDM v závislosti na typu modelu může být klasifikován do dvou hlavních typů - **rozpuštné podpory** (*Soluble support*)

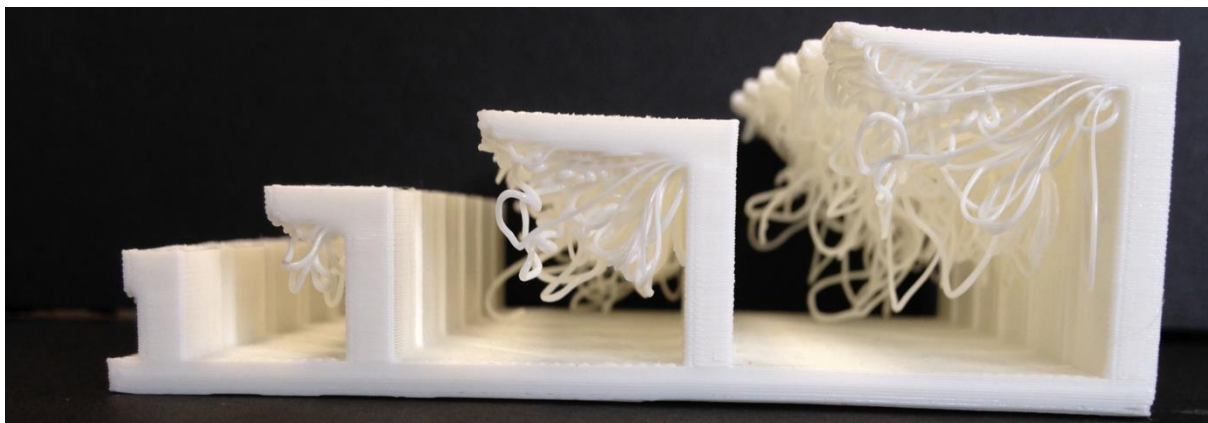
- **odlupovací podpory** (*Break away support*)

Rozpuštná podpora používá "vodou" rozpustný materiál, který je rozpuštěn ve speciální nádrži. Avšak podpora je vhodná pouze pro ABS.

Odlupovací podpory jsou používány pro modely z materiálů, které se taví při vyšší teplotě než ABS. Po procesu tisku je třeba je odstranit pomocí ručního nářadí.

Vznik vlastní podpory pro technologii FDM je nejčastěji při náklonu převislé stěny s úhlem větším jak 45°. [13]

Na obrázku č. 9 lze vidět následky procesu tisku bez použití podpurného materiálu.



Obr. 9 Tisk bez podpůrného materiálu [14]

Basic supports

Vytvoří podpěry pod všemi převislými částmi modelu na jejich spodních stranách, které jsou umístěny ve „vzduchu“. Vrchní vrstva každého sloupku podpěry bude mít plnou výplň, jinak budou tvořeny hustější žebrovitou strukturou. Tato žebra jsou nazývány *Support raster curves*. Tento typ podpory je zejména vhodný pro model s jemnými detaily ve spodní stěně modelu, nicméně stavba trvá dlouhou dobu a je použito většího množství podpůrného materiálu na rozdíl od *Sparse supports*. [13]

Sparse supports

Vytváří podpory, na které je použito méně podpůrného materiálu, než na podpory *Basic supports*. Toto je dosaženo vytvořením větších mezer mezi jednotlivými žebry rastru. Jako u základní podpory je vrchní vrstva podpůrných sloupků tvořena plnou výplní. Dalších několik spodních vrstev pod touto vrstvou má několik menších žebor blíže u sebe. S klesajícími vrstvami je vzdálenost mezi žebry postupně zvětšována. Kromě toho je celá oblast jednotlivých žebor ohraničena uzavřenou křivkou perimetru. [13]

Smart supports

Dochází ke snížení množství použitého podpůrného materiálu. Využívá větší velikost vrstvy a mění se s tvarem podporované oblasti. Oblast podpory se zmenšuje a přeměňuje na jednodušší tvar, aby se snížilo množství použitého materiálu a urychlil stavební proces. *Smart supports* funguje podobně jako klasický klenutý oblouk v architektuře, kde se nosné sloupy nahoře postupně rozšíří, takže úzké prvky ve spodní části mohou podporovat strukturu mnohem větší rozměrů ve vyšší části modelu. [15]

Surround supports

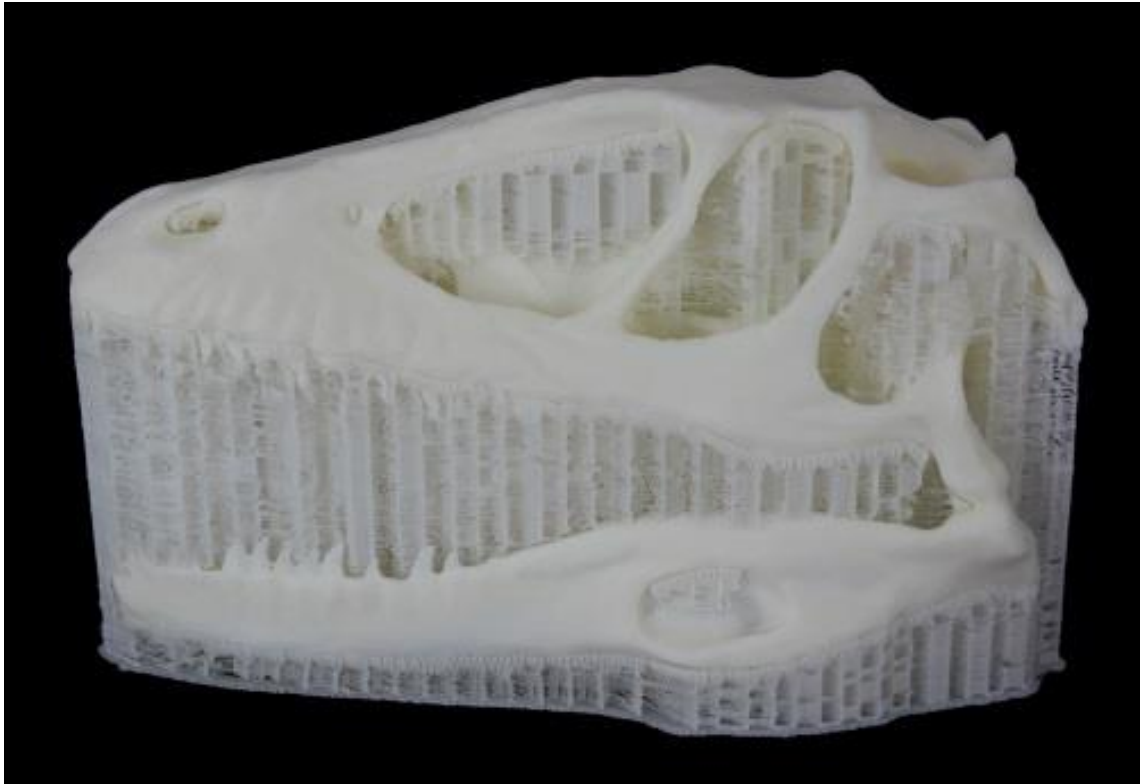
Jsou používány k obklopení drobných prvků nebo částí, které mají malou kontaktní plochu s modelem a malou stabilitu, vzhledem k jejich výšce a nemohou stát vzpřímeně na podložce během tisku. Vytvoří vrchní vrstvu stejně jako *Basic supports*, ale také obklopují každou stranu modelu s minimální tloušťkou podpěr. [13]



Obr. 10 Vlevo podpora *Basic* a vpravo *Smart support* [13]

Break-away supports

Jsou podobné jako *Sparse supports*, ale skládají se z jednotlivých oddělených podpěr namísto souvislých podpěrných částí. Není zde žádná uzavřená křivka okolo modelu. Lze je snadněji odstranit než výše zmíněné styly podpěr, ale stavějí se pomaleji než *Sparse supports*. Tyto podpěry nejsou určeny pro vodou rozpustitelné materiály. [13]



Obr. 11 Vylamovací podpora Break-away [16]

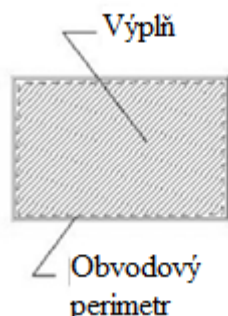
4.3 Tvorba modelu

Software, který je dodáván k technologii FDM a transformuje soubory STL do formátu CMB. CMB formát obsahuje informace o nastavení hardwaru, dráhy pro stavbu částí a detailů, které řídí pohyby stavební podložky a tiskové hlavy. Jednotlivé pohyby jsou různě uspořádány a to jak pro modelovou část, tak pro část podpor. Obsahuje také informace o vyplnění prázdného prostoru uvnitř jednotlivých vrstev v řezu. [13]



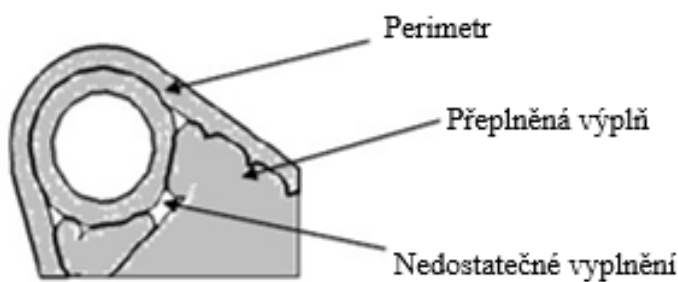
Obr. 12 Dráha tiskové hlavy při nanášení vlákna a zároveň struktura výrobku v jedné vrstvě [13]

Výplně vrstvy obvykle obsahují dvě části. Obvod (perimetr) a vnitřní výplň vrstvy (raster, infill), jak je znázorněno na obr. 13. Jiný vzor výplně lze dosáhnout konfigurací parametrů, aby například vyhovovaly speciální požadavkům při tvorbě modelu a stavební podpory.[13]



Obr. 13 Tvorba výplně [13]

Výplň modelu je potřeba prozkoumat vrstvu po vrstvě, aby bylo zajištěno, že nebude nadměrně přeplněn materiálem. K přeplnění dochází, pokud je do plošného objemu vrstvy naneseno příliš velké množství materiálu. K nedostatečnému vyplnění vrstvy dochází při špatné detekci softwaru při zpracování modelu. Přeplnění může způsobit špatnou povrchovou úpravu vzniklé vrstvy nebo může dokonce převrhnout vznikající model, vlivem nárazu tiskové hlavy do naneseného materiálu. Z tohoto důvodu musí být pevně stanovena již před zpracováním STL souboru do formátu CMB. Obr. 14 ukazuje přeplnění a nedostatečné vyplnění vrstvy. [13]



Obr. 14 Chyby tisku [13]

5 MATERIÁLY

Materiálové vlastnosti jsou jedny z nejdůležitějších a největších předností. Každý z termoplastických materiálů pro FDM tisk je vyroben ze směsi komerčně dostupných termoplastických granulí přetvořených do formy struny (plastového drátu). Téměř všechny zařízení jsou schopny používat materiál ABS a 90% všech prototypů vyrobených FDM technologií jsou z tohoto materiálu. Praktické zkušenosti s materiálem ABS při tisku vycházejí mezi 60 až 80% pevnosti vstříkovaných dílů. Ostatní vlastnosti, jako je tepelná a chemická odolnost se také přibližují nebo jsou totožné. To činí ABS široce používaným materiálem pro funkční aplikace. Také použití nového materiálu, polykarbonátu, rychle roste. Struktura polykarbonátu vytváří prototyp, který vydrží vyšší síly a zatížení, než ABS materiál. Lze proto usoudit, že polykarbonát vytváří prototyp, který demonstruje pevnostní charakteristiky vstříkovaného ABS.

Existují i další speciální materiály pro FDM. Patří mezi ně polyphenylsulfone, elastomer a vosk. Polyphenylsulfone nabízí vysoký teplotní a chemický odpor s velkou pevností a tuhostí. Elastomer je určen pro funkční prototypy, které se chovají jako "guma". Vosková hmota je speciálně vyvinuta pro tvorbu investičních slévárenských modelů. Vlastnosti vosku umožňují pomocí FDM vytvářet modely stejně jako je to u tradičních voskových modelů používaných ve slévárnách. [10]

5.1 ABS

ABS má téměř ideální vlastnosti pro Rapid Prototyping. Je to silný, mírně pružný plast, který se vytlačuje čistě na teplotu mezi 220 až 240 °C. Pro FDM tisk, ABS vyžaduje vyhřívanou tiskovou podložku na zmírnění teplotního šoku. Zahřívání tiskové podložky pomáhá platu ulpívat na desce a zabraňuje jeho příliš rychlému ochlazení, což by mohlo způsobit deformaci výrobku. ABS je v tomto směru hodně tepelně citlivý. Jednou z výhod ABS je to, že se rozpouští v acetonu. Aceton rozpouští ABS úplně, ale při menším množství acetonu jej lze použít i jako lepidlo (spojení dvou vytištěných modelů dohromady). Aceton se také používá k výrobě "lepidlo" pro tiskovou podložku tak, aby umožnilo snadnější přichycení počáteční tištěné vrstvy. Acetonová pára je těžší než vzduch a někteří používají tuto vlastnost k vytvoření acetonové parní lázně a finální povrchové úpravě modelu, kdy dochází k působení acetonu na povrch modelu, což vytvoří hladké okraje vrstev. Nevýhodou tohoto materiálu je, že výrazně zapáchá. [8]

5.2 PLA

PLA je druhým nejpobulárnějším tiskovým materiálem pro FDM tiskárny. PLA je BIOPLAST, vyrobený z kukuřice, řepy nebo brambor, a je kompostovatelný v komerčních kompostovacích zařízeních (teplo a bakteriální reakce v domácím kompostování nejsou dostatečně vysoké, aby se materiál rozpadl). Taje při mnohem nižší teplotě než ABS (150 - 160 °C), ale typicky se vytlačuje při vyšší teplotě, od 180 °C do 220 °C, v závislosti na samotném PLA. Vzhledem ke své nižší teplotě tání není tento materiál vhodný pro použití k výrobě součástek využívaných při vysokých teplotách a přímém slunečním záření. PLA je mnohem více krystalický a rozbije se či praská snadněji než ABS. Nicméně MakerBot společně s mnoha významnými výrobci začíná využívat tento druh materiálu jako primární. PLA nevyžaduje vyhřívanou podložku, což se projeví na snížení finančních nákladů tiskárny. Je mnohem více teplotně stabilní v průběhu tisku než ABS a je mnohem méně pravděpodobné, že dojde k deformaci nebo zvlnění. Další významnou výhodou je, že PLA je mnohem příjemnější při tisku než ABS. Protože se jedná o BIOPLAST, při zahřívání voní jako vafle nebo sirup. Rovněž není spojen s jakýmkoliv typem zdravotních problémů ze zahřátí. PLA je k dispozici v mnoha různých paletách barev, může být i transparentní nebo částečně transparentní. Je k dispozici i ve flexibilní formě, která produkuje výtisky s totožnými vlastnostmi kaučuku. [8]



Obr. 15 Materiály pro FDM [17]

Tab. 1 Materiály pro FDM [15], [18]

NÁZEV	TEPLOTA EXTRUZE	POZITIVNÍ VLASTNOSTI	NEGATIVNÍ VLASTNOSTI	POZNÁMKY
ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	210 – 250 °C	Silný, flexibilní, hladký povrch, odolný vůči vyšším teplotám, snadno se nanáší a obarvuje	Silný zápach, snadno se kroutí, potřebuje vyhřívanou stavební podložku, není biologicky odbouratelný	Stejný materiál jako LEGO
ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate)	220 – 230 °C	Nejkvalitnějšími povrchovými a estetickými vlastnostmi výrobků, vyniká zejména v jemných detailech		
PC (Polycarbonate)	270 – 300 °C	Vysoká pevnost v tahu a v ohybu je ideální pro náročné potřeby		
PLA (Polylactic Acid)	190 - 240 °C	Malé deformace, nevyžaduje vyhřívanou stavební podložku, recyklovatelný, příjemná vůně	Méně pružné, může být křehký, změkčuje se při 60°C	
PPSF/PPSU (polyphenylsulfone)		Nejvyšší tepelná odolnost ze všech FDM termoplastů až do 190°C, chemická odolnost		Automobilový, letecký a zdravotnický průmysl
HIPS (High Impact Polystyrene)	230 - 265°C	Rozpustný pouze v Dlimonene, vhodný pro podpurný materiál		
PET(E/T/G) (Polyethylene Terephthalate)	210 - 250°C	Recyklovatelný, silným transparentní povrch		Stejného plastu jako u láhví se sodou
PVA (Polyvinyl Alcohol)	190 - 210°C	Rozpustný ve vodě	Materiál citlivý na vlhkost	Použitelný jako podpurný materiál
PA (Nylon)	Okolo 245°C	Dobře absorbuje barvy	Materiál citlivý na vlhkost	
NinjaFlex	210 - 240°C	Výtisky jsou pružné	Drahý, přilnavost ke stavební podložce může být obtížná	
Lay Brick and Lay Wood	Liší se podle požadované textury povrchu	Dosáhne vzhledu cihly nebo dřeva použitím FDM tiskárny	Částice mohou poškodit	Směs PLA a cihly nebo dřevěné moučky

Materiál je distribuován převážně v 1 - 3 kg cívkách. V závislosti na výtlačné hlavě, kterou disponuje tiskárna, je možné si vybrat průměr drátu mezi 1,75 mm a 3 mm. [19]

6 3D DATA A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

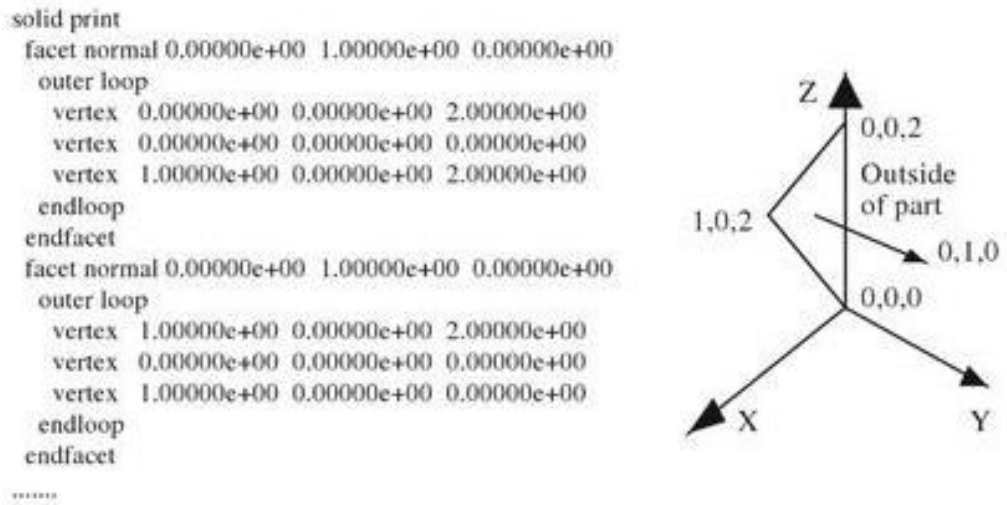
Obecně platí, že 3D soubory modelu jsou vytvořeny pomocí CAD softwaru. Tyto modelové soubory poskytnou konkrétní informace, které popisují strukturu modelu. Vzor souboru 3D je složen z více bodů, čar a rovin ve virtuálním prostoru. Všechny tyto body, čáry a povrchy mají své specifické souřadnice a orientace. Vzhledem k těmto referenční datům modely objektů lze upravit přesunutím, rotací, zvětšením nebo zmenšením či změnou jejich relativních poměrů. Některé soubory také obsahují data, například materiálu, objemu a hmotnosti. [4]

Tab. 2 Přípony souborů podporovaných softwarů pro 3D tisk. [18]

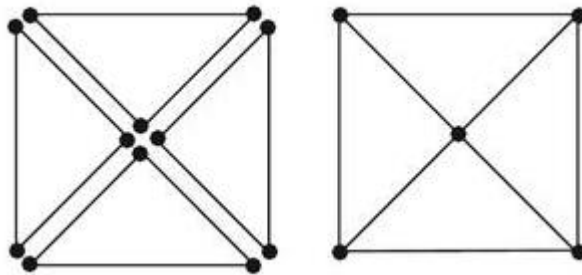
PŘÍPONY SOUBORŮ		PŘIDRUŽENÝ SOFTWARE A POZNÁMKY
.3ds		Formát softwaru autodesk (www.autodesk.com)
.blend		Blender (www.blender.org)
.dae	Digital Asset Exchange	3D obrázkové soubory základní
.dwf	Design Web Format	Formát softwaru autodesk (www.autodesk.com)
.fbx	Filmbox	Formát softwaru autodesk (www.autodesk.com)
.lwo	Lightwave Object	Lightwace (www.lightwave3d.com)
.obj	Object	Univerzální typ formátu (Bourke, 2015a)
.ply	Polygon File Format	Společným znakem mnoha softwarových programů (Bourke 2015b)
.skp	Sketchup	Sketchup (www.sketchup.com)
.shp	Shape	Vyvinutý společností ESRI pro ukládání prostorových dat, může být převeden na .stl soubor 3D tiskem (McCune, 2014)
.thing		MakerBot (www.makerbot.com)
.vrmf	Virtual Reality Modeling Language	Vytvořen jako webový 3D formát v roce 1995 (Web3D Consortium, 2015)
.x3d	X3D	Kódování XML z formátu VRML (Web3D Consortium, 2015)

6.1 STL FORMAT (Standard Tessellation Language)

Reprezentuje metodu používanou k popisu CAD geometrie lišící se z jednoho systému do druhého. Standartní převod potřebuje sdělit popis geometrie z různých CAD souborů pro Rapid Prototyping (RP). STL (StereoLithography) soubory se v praxi používají jako standardní, ale nejsou podporovány všemi RP systémy. Soubor STL byl formulován firmou 3D Systems v USA. Je vytvořen z CAD databáze přes rozhraní CAD systému. Tento soubor se skládá z výčtu trojúhelníkových plošek, představujících vnější povrch objektu. Zde existují dva formáty souborů STL. Jedním z nich je ASCII formát a druhým je binární formát. Velikost souboru ASCII STL je větší než v binárním formátu, ale je lépe čitelný. V souboru STL jsou trojúhelníkové plošky popsány souřadnicemi X, Y, a Z pro každý bod z jejich tří vrcholů a jednotkou normálového vektoru X, Y a Z označující stranu plošky, která je uvnitř nebo vně objektu. Příklad je znázorněn na obrázku č. 16. Protože je soubor STL odvozený od přesných CAD výkresů, jedná se o přibližný, avšak ne úplně stejný model součásti. Také mnohé komerční CAD modely nejsou dostatečně velké, aby generovaly aspekty modelu, a často se potýkají s problémy. Nicméně existuje několik výhod souboru STL. Za prvé poskytuje jednoduchý způsob reprezentace 3D CAD dat. Za druhé se jedná o standart a je používán většinou CAD a RP systémů. Na závěr může poskytnout malé a správné soubory pro přenos dat různých tvarů. Na druhé straně existuje několik nevýhod souboru STL. Formát STL je mnohokrát větší než původní formát CAD. STL soubor nese mnoho nadbytečných informací, jako jsou duplicitní vrcholy a hrany, znázorněné v obrázku č. 17. V souboru STL existují geometrické nedostatky, protože mnoho algoritmů používaných CAD prodejci nejsou dostatečně dobré. To vede k potřebě pro opravy software, který zpomaluje dobu výrobního cyklu. Následné krájení velkých souborů STL může trvat mnoho hodin. Nicméně, RP softwary mohou rozřezávat model po vrstvách, během tisku předchozích vrstev a to tuto nevýhodu zmírňuje. [20]



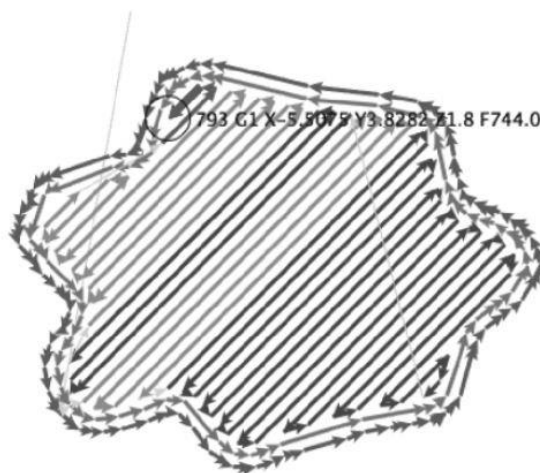
Obr. 16 Ukázkový soubor STL [20]



Obr. 17 Nadbytečné hrany a vrcholy v STL formátu [20]

6.2 SLICER

Chceme-li vytvořit cestu pro extruder 3D tiskárny, musíme použít samostatnou aplikaci zvanou Slicer, aby se celkový 3D model „nakrájel“ do vrstev vhodných pro 3D tisk. Tento proces vytvoří speciální kód, který zajistí pohyb vytlačovací hlavy a určí kdy a kolik plastu má hlava vytlačovat. Tyto příkazy nebo G-kód jsou zasílány z našeho ovládacího softwaru do firmwaru elektroniky tiskárny, který je zodpovědný za interpretaci těchto kódů pro ovládání motorů a dalších elektronických součástí. Chceme-li získat přehled o tom, jak tato dráha nástroje vypadá, můžeme se podívat na obrázek, kde je znázorněna výsledná cesta a směr extruderu (obr. 18). [21]



Obr. 18 Směr pohybu hlavy [21]

Tyto řádky ukazují cestu extruderu při tisku vrstvy modelu. Šipky ukazují směr, kterým extruder cestuje. Zvýrazněná dráha v horní části obrazu je generována z následujícího řádku kódu:

```
793 G1 X-5,5075 Y3.8282 Z1.8 F744.0
```

V tomto řádku č. 793 G-kód říká firmwaru, aby provedl řízené přesunutí na následující souřadnice X, Y a Z; například X-5.5075 pohybuje extruderem v záporném směru podél osy x. Poslední hodnota F744.0 určuje posuv, neboli jak rychle se osa pohybuje v milimetrech za minutu. Pro každý řádek, jak lze vidět na obrázku č. 19, je zde řada G-kódů podobných tomu, který byl vysvětlován výše. 3D model tvoří řádek po řádku a vrstvu po vrstvě. [21]



Obr. 19 Model sestavený z jednotlivých vrstev

Každý střídavý pás tmavě a světle šedý je asi pět vrstev, tedy celkem 100 vrstev v hotovém tisku. Aby slicerovací softwary byly schopny generovat tyto nakrájené vrstvy, je třeba zadat některé obecné informace o tiskárně a vláknu, jako je průměr filamentu, velikost extruderu (trysky) a výšky vrstvy, a také i některé specifické nastavení tisku, jako je například počet perimetrů, výplň a rychlost tisku pro různé části struktury modelu. I když ne všechny Slicery jsou přímo integrovány ve všech řídicích aplikacích pro 3D tisk a jen ve velmi vzácných případech nemusí být vzniklý G-kód kompatibilní s konkrétním firmwarem. G-kód je poměrně standardní kód, takže často můžete použít více Slicerů pro jedno zařízení. [21]

7 KONFIGURACE ZAŘÍZENÍ

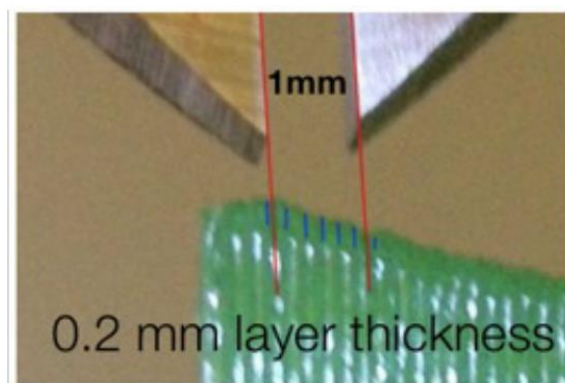
7.1.1 Nastavení tiskárny

- typ tiskárny / firmware
- velikost a posun tiskové plochy, max. výška Z
- počet extruderů, průměry jejich trysek, další parametry pro vytlačování.

7.1.2 Nastavení vláken

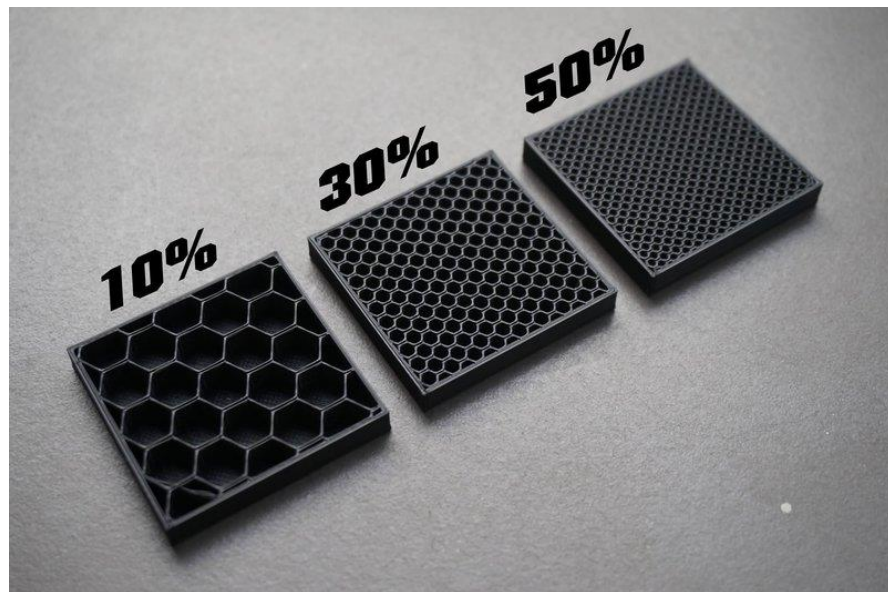
- průměr vlákna: mělo by jít o přesný rozměr (průměr), jmenovitá hodnota není dost dobrá pro správný výpočet délky
- součinitel úměrnosti (používá se pro kompenzaci roztažení plastu, když se taví, hodnota 1 pro PLA a 0,9 nebo méně pro ABS)
- teplota extruderu a podložky (může se lišit pro první vrstvu a další vrstvu)
- chladící ventilátor [22]

7.1.3 Nastavení tisku



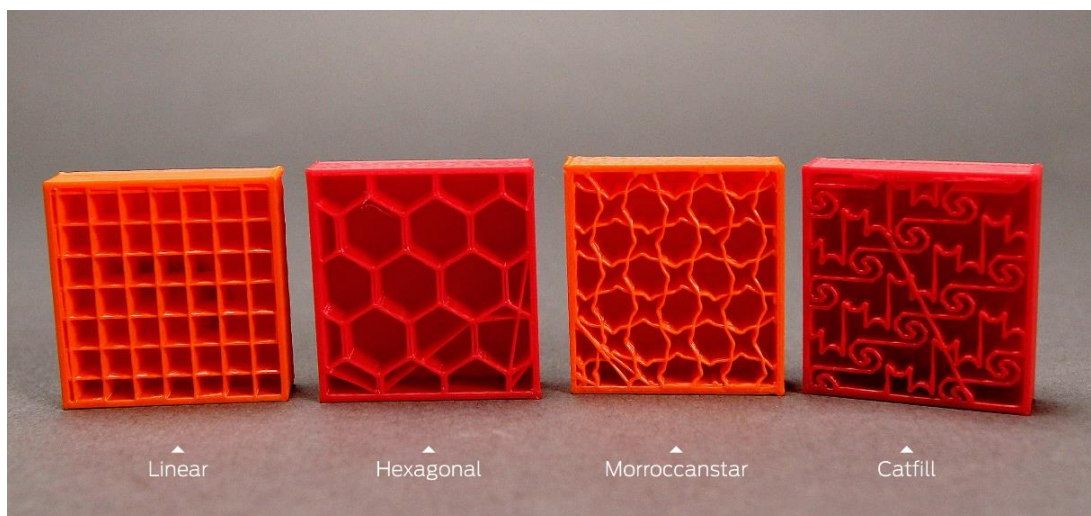
Obr. 20 Výška vrstvy [22]

- výška vrstvy (může se lišit pro první vrstvu): obvykle mezi 0,1 mm a 80% velikosti průměru trysky, 0,25 mm je typická hodnota
- počet perimetrů (obvodů) neboli tloušťka stěn: zvýšením této hodnoty se stane objekt robustnější
- číslo / tloušťka horní / dolní vrstvy: stejné jako výše [22]
- podíl výplní množství plastické hmoty, které mají být použity pro hlavní část objektu, jde normálně od 0% (dutých předmětů) na 50% (pevné, velmi silné díly), více než 50% se používá jen zřídka, a typické hodnoty jsou asi 10-20% [22]



Obr. 21 Podíl výplně [23]

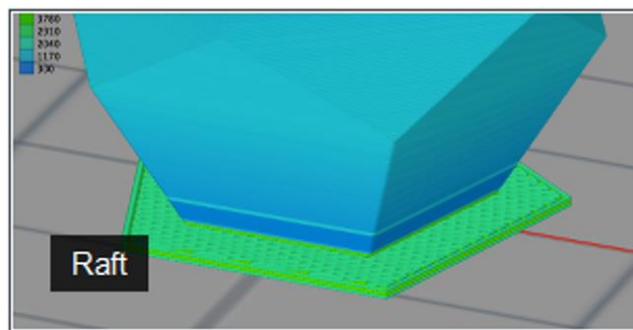
- výplň vzor: je to model použitý k vytvoření výplně, běžně používané jsou čtverce (přímočaré) nebo šestiúhelníky



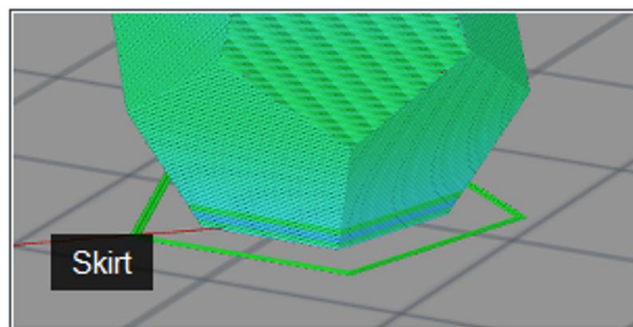
Obr. 22 Struktura výplně [24]

- rychlost tisku (pro různé úkoly): toto nastavení je značně závislá na teplotě trysky, typu vlákna a kvalitě konstrukce tiskárny (množství mazání používá pro osy a ozubená kola), pomalá rychlost obvykle pomáhá pro získávání kvalitnějších výtisků
- *Skirt* a *Brim*: *Skirt* je navíc množství plastu, které se vytlačuje před samotným tiskem, aby nedošlo ke spuštění tisku s prázdnou tryskou, *Brim* je navíc tloušťka vlákna v první vrstvě, pokud objekt má držet lépe na podložce

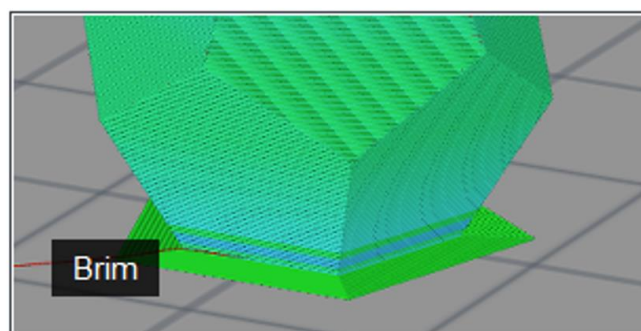
- *Raft a Support*: *Raft* je další způsob, jak zlepšit adhezi mezi objektem a podložkou, tvoří jej jedna nebo dvě vrstvy sítě navíc, zatímco *Support* je speciální houbovitě struktury postaveny zdola jako podpora části objektu, která by nemohla být jinak vytištěna, protože úhel přesahu je velký a vlákna by se nanášela do prázdného prostoru
- další pokročilé nastavení [22]



Obr. 23 Raft [25]



Obr. 24 Skirt [25]



Obr. 25 Brim [25]

8 VÝHODY A NEVÝHODY FDM

Nejzřejmější omezení FDM je povrchová úprava. Vzhledem k vytlačování polo roztaveného plastu, povrch modelu vykazuje větší drsnost než u technologie SLA. Povrchová úprava je srovnatelná s SLS technologií nebo s technologií spojování prášku pomocí lepidla. Zatímco zlepšení povrchové úpravy je možné při použití menších vytlačovacích průměrů a tenčích vrstev. Horní, spodní a boční stěny budou stále ukazovat obrysy průchodu trysky a nanášené vrstvy. Obecně platí, že FDM poskytuje stejnou přesnost jako stereolitografie a lepší než SLS a tisk z práškového materiálu. Přesnost FDM ovlivňuje méně uživatel a více konstrukce stroje. I když míra smrštění materiálů je rovna nebo vyšší než u SLS, FDM modelování přesně předpovídá a kompenzuje tyto změny. [10]

9 ZAŘÍZENÍ PRACUJÍCÍ NA TECHNOLOGII FDM

Zařízení pro 3D tisk lze rozdělit do dvou hlavní kategorií. Jedná se o tiskárny na profesionální úrovni, které zajišťují tisk přesných dílců a jejich cena se pohybuje v řádech stovek tisíc až několika milionů korun a jednodušší zařízení pro domácí použití do sto tisíc korun.

9.1 Třída profesionálních strojů značky Stratasys

9.1.1 Fortus 250/380/450mc

Systémy produkují přesné, odolné a opakovatelné části z velmi kvalitních termoplastů. Fortus 250mc nabízí stavební prostor o velikost 254 x 254 x 305mm, Fortus 380mc o velikosti 355 x 305 x 305mm. Fortus 450mc (406 x 355 x 406mm) je zároveň dodáván s duálními zásobníky materiálu pro nepřerušovanou výrobu. Tloušťka nanášených vrstev je od 0,127 mm do 0,330 mm. Rozmanité materiálové možnosti nabízí řešení pro aplikace, které vyžadují vysoký výkon, biokompatibilitu, staticky disipativní materiály nebo odpor proti teple, chemikáliím a UV záření. [26]



Obr. 26 Fortus řady 380 a 450mc[26]

9.1.2 Fortus 900mc

Fortus 900mc je nejvýkonnější FDM systém, přinášející mimořádnou hbitost, vysokou přesnost a návratnost investic. S 12ti reálnými termoplastickými materiály a obrovským stavebním prostorem, lze stavět velmi odolné součásti, až do velikosti 914 x 610 x 914 mm. Tloušťka nanášených vrstev je od 0,178 mm do 0,330 mm. Systém je vhodný pro nejrůznější aplikace, od výroby koncových prvků, až po stavbu nejnáročnějších funkčních prototypů. Duální zásobníky na materiál umožňují maximalizovat nepřerušovanou výrobu, z vysoce odolných, biokompatibilních, teplotně nebo chemicky odolných materiálů. Se třemi tloušťkami vrstev na výběr lze nalézt tu správnou rovnováhu mezi jemnými detaily a bezkonkurenční rychlostí tisku. [5]



Obr. 27 FDM tiskárna Fortus 900mc [5]

9.2 Cenově dostupné 3D tiskárny

Díky až 100 mikronovým vrstvám jsou modely velmi detailní a hladké. Pro jejich stavbu se využívá technologie FDM (tavení plastového vlákna), přičemž samotné modely jsou z PLA nebo ABS plastu. Tiskárny pro usnadnění práce nabízí řadu nadstandardních funkcí: jako je vestavěná kamera, propojení pomocí Wi-Fi sítě, nebo mobilní aplikace pro sledování tiskového procesu.

9.2.1 Stratasys Mojo

Je cenově dostupná, kompaktní a rychlá 3D tiskárna, která tiskne v jemném rozlišení 0,178 mm. Velikost stavebního prostoru je 127 x 127 x 127 mm. [26]



Obr. 28 Tiskárna Mojo [26]

9.2.2 uPrint SE Plus

Přináší větší stavební prostor: 203 x 203 x 152 mm, možnost nanášení 0,254 mm a 0,330 mm a tisk až z devíti možných modelových barev ABSplus. Volitelné využití duálního zásobníku materiálu znamená nepřetržitý provoz tisku. [26]



Obr. 29 Tiskárna uPrint SE Plus [26]

9.2.3 MakerBot Replicator

Umožňuje díky 100 mikronovému vrstvení tisk velmi hladkých ploch a jemných detailů. Tiskárna vyniká především jednoduchou obsluhou a kvalitou zpracování, ale i spoustou dalších uživatelských možností. Umožňuje tisk z PLA v mnoha barevných kombinacích. Pro připojení lze použít Wi-Fi, USB, nebo modely tisknout přímo z flash disku. Celý proces lze rovněž sledovat pomocí mobilní aplikace, nebo vestavěné kamery. Rozměry stavebního prostoru jsou 252 x 199 x 150 mm. [27]



Obr. 30 FDM tiskárna MakerBot Replicator [27]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

10 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

V diplomové práci byly stanoveny tyto cíle:

- Vypracování literární studie na dané téma.
- Navrhnutí 3D tiskárny.
- Zkonstruování zařízení pro 3D tisk.
- Ověření výsledných vlastností 3D tiskárny a vyrobených prototypových součástí.

Cílem teoretické diplomové práce je vypracovat odbornou studii popisující základní technologie Rapid Prototyping a zaměřit se více na technologii FDM. Jsou zde zmíněny používané materiály a popsán podrobněji proces, jak 3D model vzniká.

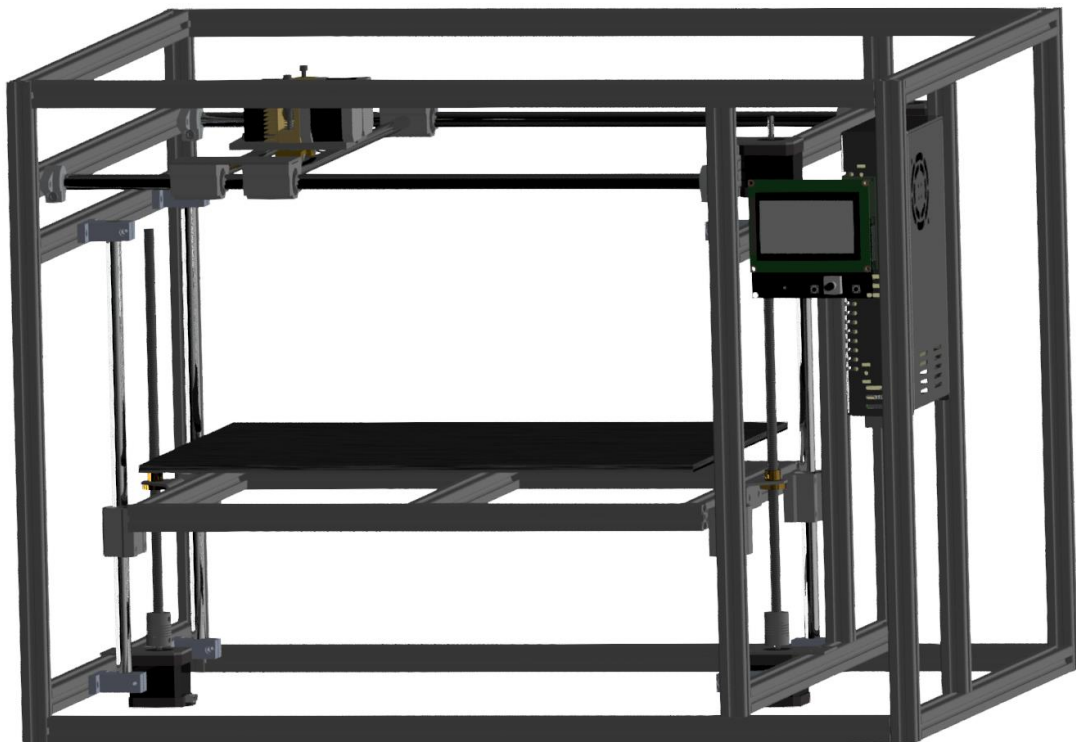
V praktické části je cílem zkonstruovat funkční zařízení, které na technologii FDM pracuje. Navržený stroj bude sloužit ke školním účelům a jeho výrobní náklady nesmí přesáhnout stanovený rozpočet 15 - 20 000 Kč. Nejdříve je navržen základní počítačový model, který určí rozměry celého zařízení a umožní předem zakoupit potřebné díly ke stavbě. Z těchto komponentů je tiskárna sestavena a osazena vhodnou elektronikou. Ve finální fázi je odladěn firmware stroje a provedeno nastavení firmwaru a softwaru. V závěru práce jsou výsledné vlastnosti zhodnoceny s ostatními komerčními stroji a je uskutečněna výroba několika prezentačních modelů, které tato tiskárna je schopna vyrobit.

11 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ RAPID PROTOTYPING

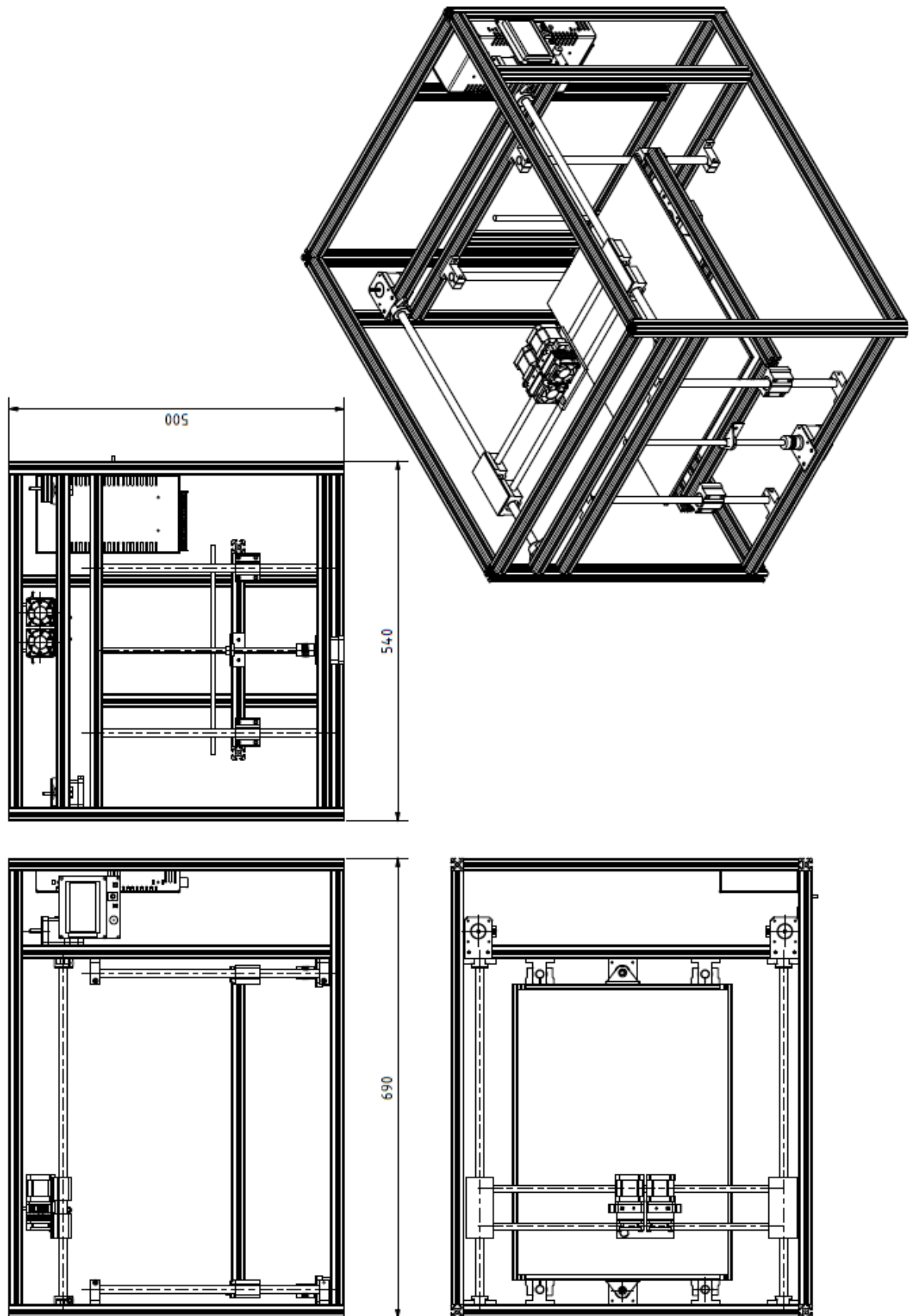
Praktická část se zabývá konstrukcí 3D tiskárny „krabicového typu“, která bude sloužit pro školní účely univerzity. Jedná se o zařízení větších rozměrů, což je konstrukčně náročnější, než tiskárny typu „RepRap“. Tělo tiskárny se skládá z hlavního hliníkového nosného rámu, vodičích prvků a celkového zakrytí. Výpočty tuhosti stroje nejsou v této práci počítány, jelikož zde působí pouze setrvačné síly pohybu hlavy a nedochází k žádnému úběru materiálu. Zařízení bylo zhotoveno v průběhu školního roku 2015/2016 v rámci školní stáže a bylo financováno Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně.

11.1 Konstrukce

Před zahájením stavby byl nejprve vytvořen počítačový model v programu Autodesk Inventor 2016 (obr. 31). Byly zde navrženy rozměry zařízení a potřebné délky profilů, vodičích prvků a základní rozmístění komponent. Rozměry celého zařízení jsou dle přiloženého schématu (obr. 32) 690 x 500 x 540 mm a velikost tiskového prostoru tvoří stavební plocha o rozměrech 300 x 400 mm, která umožňuje nanášení jednotlivých vrstev až do výšky 285 mm. Na základě tohoto modelu byly následně objednány potřebné díly ke stavbě.



Obr. 31 Základní 3D model stroje vytvořený v programu Autodesk Inventor 2016



Obr. 32 Schéma se základními rozměry zařízení

Hlavní kostra zařízení je složena z hliníkových stavebnicových profilů čtvercového průřezu o rozměrech 20 x 20 mm. Drážky v těchto profilech umožňují snadné sestavení konstrukce a jednoduchou montáž komponent tiskárny pomocí speciálních matic. Profily byly dodány v délkách 6 x 2 m a 1 x 1 m, a proto musely být nařezány na požadované délky.

Zařízení obsahuje délky profilů 4 x 650 mm, dále 13 x 500 mm, 3 x 460 mm, 2 x 443 mm a 3 x 289 mm (obr. 33). Po nařezání byly čela profilů zarovnaná na přesné rozměry. Dále byly do profilů navrtány potřebné otvory pro šrouby a závitníkem vyrobeny závity.



Obr. 33 Nařezané a upravené hliníkové profily

Následně z těchto profilů byla sestavena základní konstrukce, která je pomyslně rozdělena na část tvořící tiskový prostor a část pro umístění elektroniky a tiskového materiálu v podobě cívek (obr. 34). Při montáži byly použity v některých místech upevňovací úhelníky, jelikož nevyhovovaly spojovací šrouby z důvodu jejich křížení v otvorech.



Obr. 34 Sestavený hlavní rám stroje

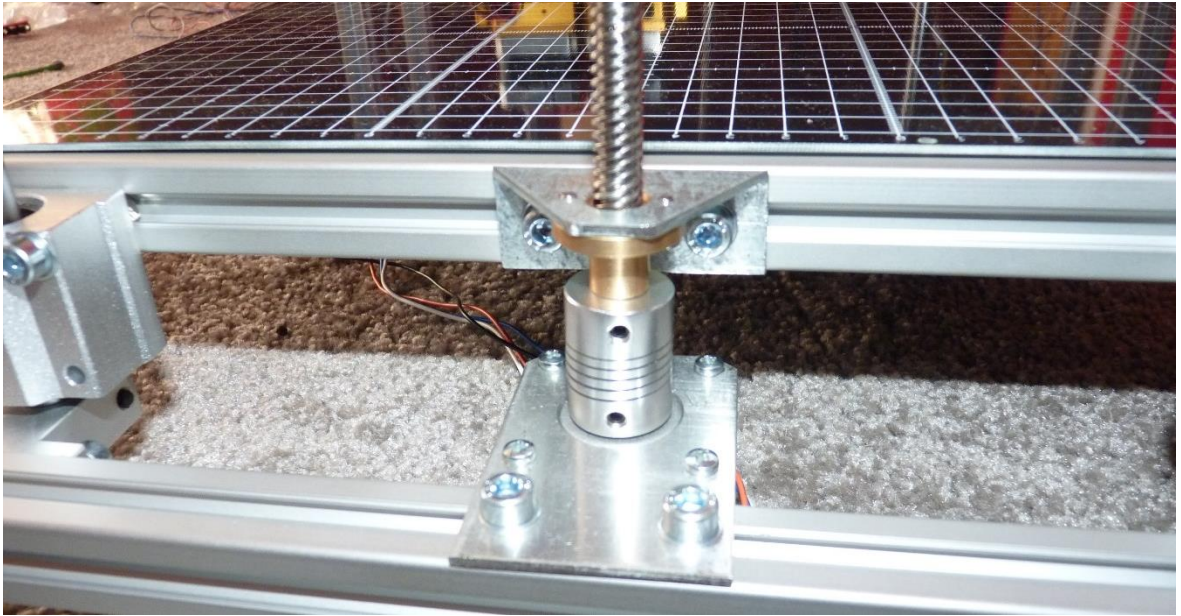
Po sestavení byl do konstrukce umístěn pohyblivý stůl, tvořící osu Z. Ta se skládá ze čtyř vodících tyčí o průměru 12 mm a lineárních vozíků. Jednotlivé tyče jsou ke konstrukci připevněny pomocí osmi držáků (obr. 35).



Obr. 35 Umístění osy Z do konstrukce stroje

Pohyb osy Z je uskutečněn dvěma trapézovými šrouby o průměru 8 mm a stoupáním 8 mm. Každý z nich je poháněn krokovým motorem Nema17, který je připevněn k motoru přes hřídelovou spojku. Pohyb tímto šroubem umožňuje plynulou a jemnou regulaci posuvu stolu, a tím velmi jemné rozlišení výšky vrstvy při tisku. Matice je připevněna ke stolku pomocí speciálního držáku, jak je znázorněno na obr. 36.

Kvůli lepší synchronizaci a stabilizaci rovinnosti tiskové podložky s tiskovou hlavou při zapnutí stroje by toto řešení do budoucna mohlo být upraveno propojením jednotlivých motorů ozubeným řemenem.



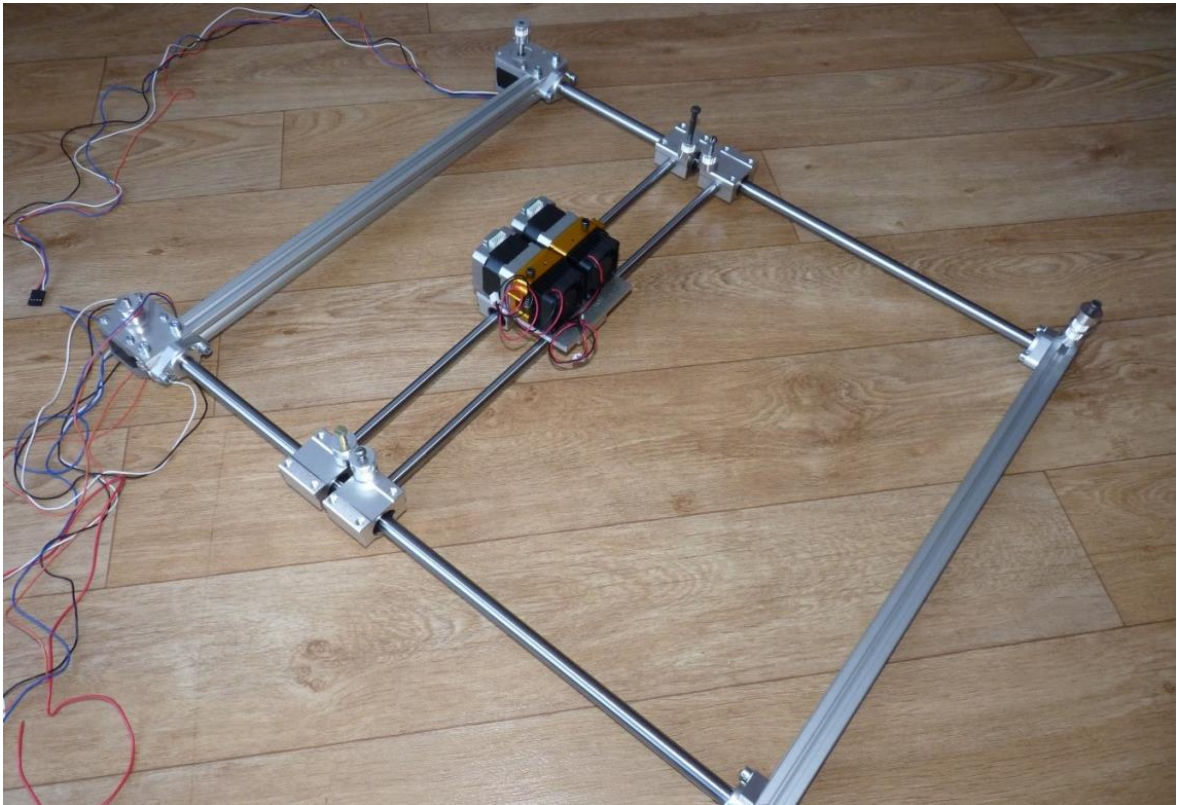
Obr. 36 Pohyb osy Z pomocí trapézového šroubu

Stolek se skládá z rámu, který tvoří hliníkové profily. Na nich je umístěna pomocí sloupků vytvořených ze šroubů vyhřívaná PCB deska a nerezový plech o síle 4 mm. Sloupky minimalizují styčnou plochu s rámem a nedochází tak k velkému přenosu tepla do konstrukce. Celá spodní vyhřívaná část je pak ještě tepelně izolována pomocí sololitové a pěnové polystyrenové desky.



Obr. 37 Kompletně sestavený stůl osy Z skládající se z vyhřívané desky, nerezového plechu a nosné konstrukce.

Osa X a Y slouží k pohybu tiskové hlavy. Skládá se z vodících tyčí průměru 12 mm pro osu X a tyčí o průměru 10 mm pro osu Y. Čtyři lineární ložiska osy X jsou upravena a zároveň tak tvoří držáky tyčí osy Y. Jsou na nich také umístěny vodící řemenice pro ozubený řemen. Hlava je umístěna na pohyblivém stolku, který tvoří hliníkový plech a tři kusy lineárních kuličkových ložisek, které se pohybují po vodících tyčích osy Y.



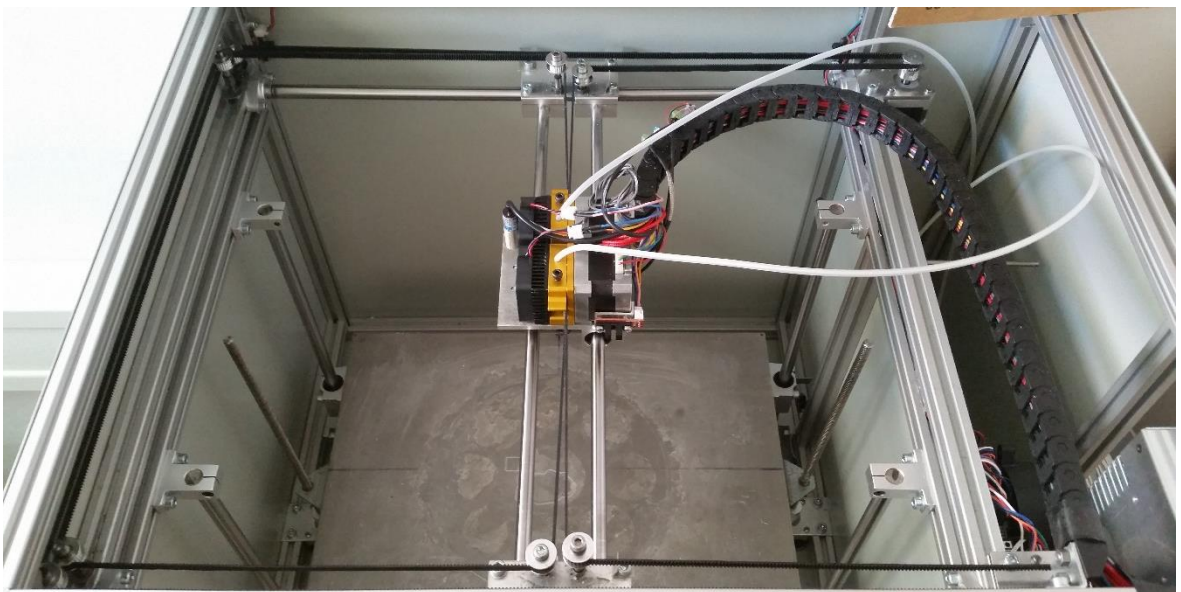
Obr. 38 Osa X a Y sloužící pro pohyb tiskové hlavy.

Pohyb hlavy je uskutečněn pomocí ozubených řemenů. Aby byla snížena hmotnost pohyblivých součástí, byl zvolen systém CoreXY. To znamená, že motor není součástí pohyblivé osy, ale oba motory, jak pro osu X tak i Y, jsou umístěny pomocí speciálních držáků na konstrukci stroje. Dva ozubené konečné řemeny jsou vedeny přes řemenice s ložisky (obr. 39) a uchyceny k tiskové hlavě. K jejich křížení nedochází, jelikož je každý řemen veden po řemenicích v odlišné výšce. Napínání řemenů se provádí pomocí řemenic, které se dají posouvat v drážce hliníkového profilu.



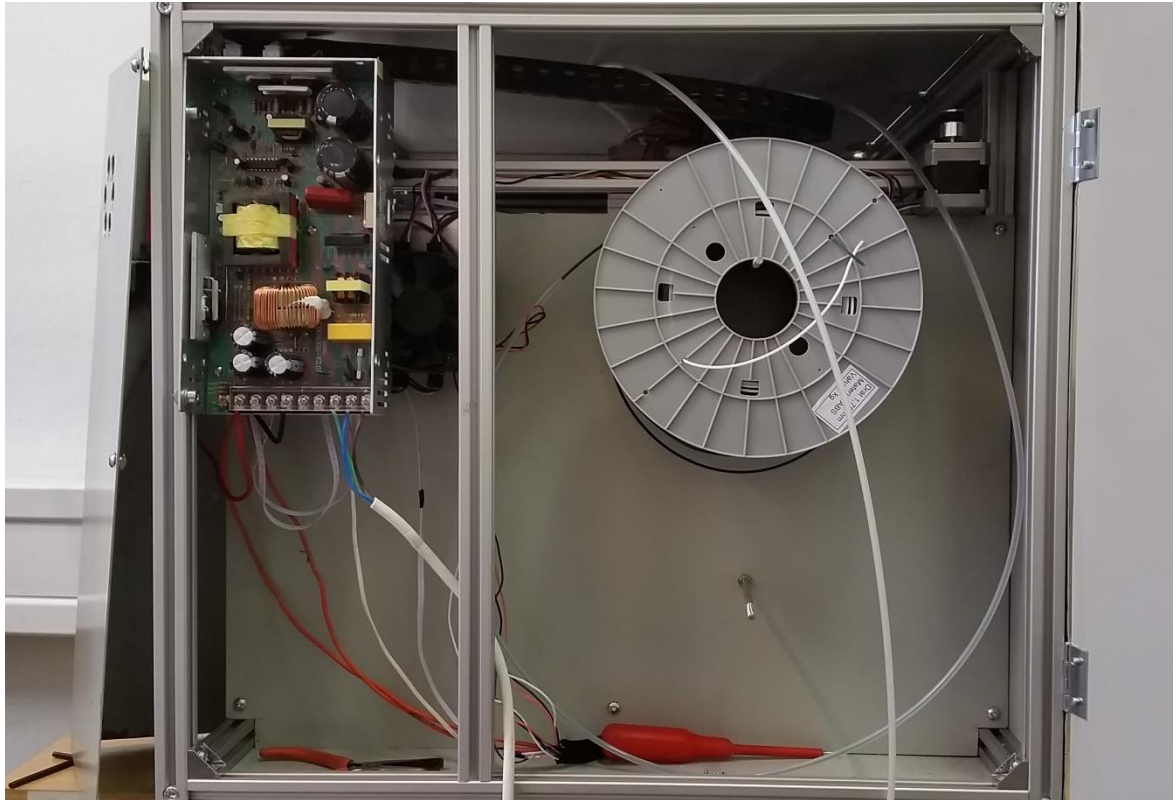
Obr. 39 Řemenice pro vedení ozubeného řemene sloužícího k pohybu tiskové hlavy a upravná lineární ložiska, která slouží zároveň jako držáky vodících tyčí osy Y

Schéma a princip pohybu lze vidět na obr. 40, kde je celý mechanismus umístěn do konstrukce a přichycen pomocí upevňovacích úhelníků k rámu.



Obr. 40 Natažený ozubený řemen a princip pohybu tiskové hlavy způsobem CoreXY

Před zakrytím bylo zařízení seřizováno a zúhlováno, aby se předešlo nepřesnostem, které by měly pozdější vliv na samotný proces tisku. Dále byla veškerá ovládací elektronika a i napájecí zdroj umístěn do oddělené části společně s tiskovým materiálem, který zde lze vložit v podobě dvou cívek (obr. 41).



Obr. 41 Umístění elektroniky a tiskového materiálu

Ve finální fázi stavby bylo celé zařízení zakrytováno pomocí plechů. Ty byly rovněž připevněny šrouby a speciálními maticemi do nosného rámu konstrukce. Krytování stroje zajišťuje stabilní teplotní prostředí, které je navíc vyhříváno od tiskové plochy. Výrobky jsou vzhledově a rozměrově přesnější, než u tiskáren bez zakrytování. Samotný proces tisku je tak méně náchylnější na teplotní změnu prostředí.

Horní a boční strana plechování je otevírací, kvůli nutnému doplňování tiskové struny a případné opravě či kalibraci stroje.

Následně do krytování byly vyrobeny otvory pro displej, SD kartu a hlavní vypínač. Dále v místě umístění zdroje byly zhotoveny otvory pro nutnou cirkulaci vzduchu, sloužícího k chlazení elektroniky. Celý stroj byl následně z venkovní strany nastříkán modrou barvou.

Z přední strany tiskárny byly vytvořeny dvířka z PMMA, aby bylo možné ze zařízení vyjmout vytištěný model a kontrolovat pracovní průběh stroje.



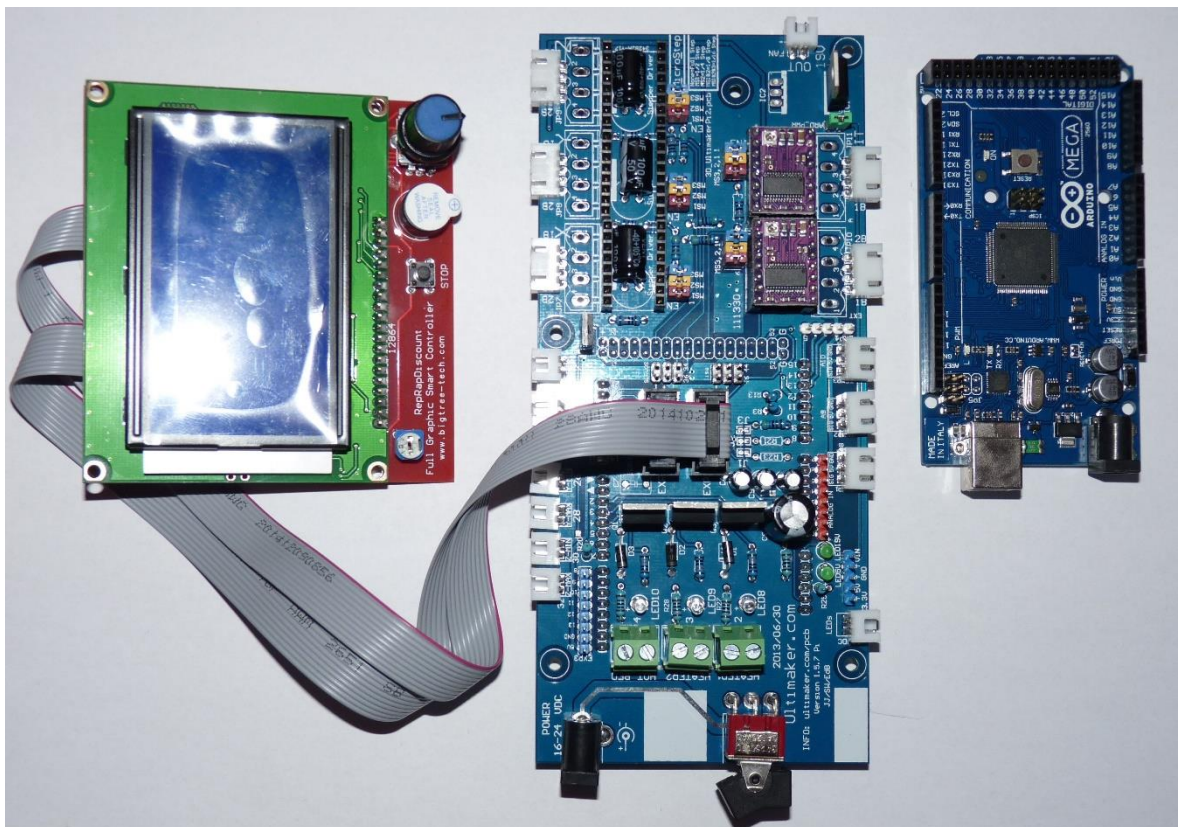
Obr. 42 Nástřik krytování modrou barvou

12 ELEKTRONIKA

Elektronika pro zařízení byla použita a upravena převážně přímo z komponent pro stavbu domácích 3D tiskáren. Nákup kvůli úspoře financí byl proveden z velké části ze zahraničních obchodů. Jedná se o základní vybavení tiskárny v dané cenové relaci. Později by šlo uvažovat o jejím rozšíření, například sledování průběhu tisku pomocí webkamery a ovládání zařízení přes internet na dálku.

12.1 Řídící deska

Skládá se z mikro kontroléru Arduino ATmega2560, rozvodné desky Ultimaker 1.5.7. a zobrazovacího displeje s integrovanou čtečkou SD karet.

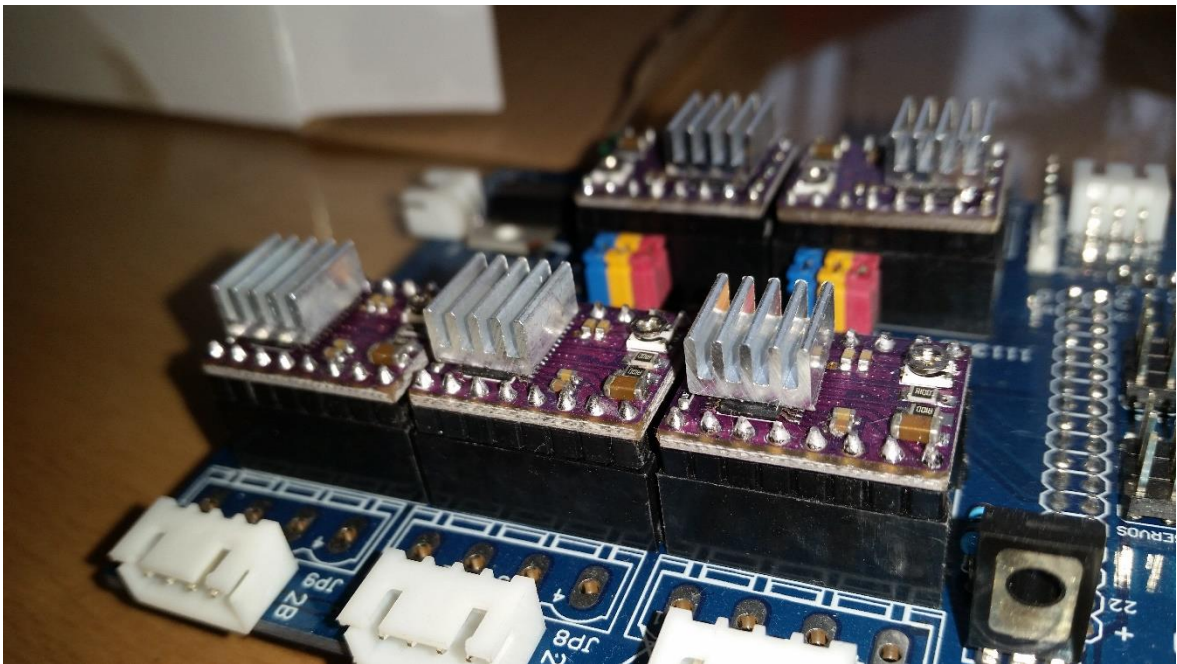


Obr. 43 Vpravo Řídící elektronika Arduino ATmega2560, uprostřed rozvodná deska Ultimaker 1.5.7 a nalevo displej Full Graphic Smart Controller

Arduino ATmega2560 je mozkiem celého zařízení. Je zde nahrán firmware stroje a převádí řídicí kód a pokyny z počítače nebo i z SD karty. Tvoří jej 16 Mhz procesor s 256 kb flash pamětí. Obsahuje 54 digitálních a 16 analogových vstupů.

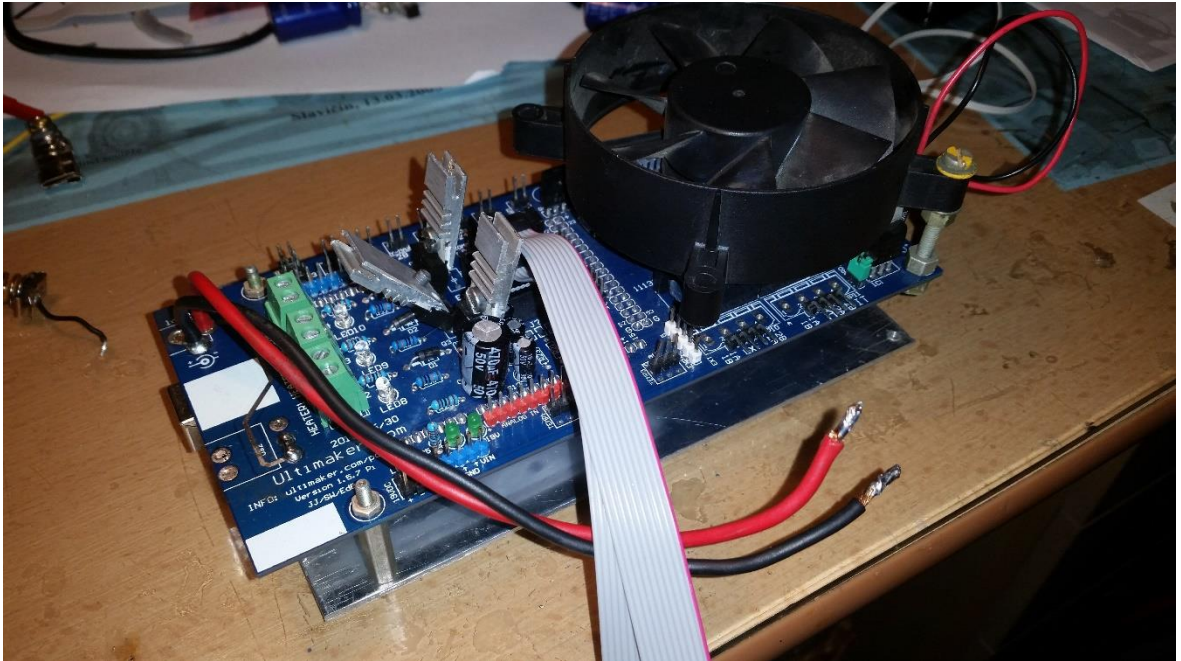
Na něj je připojena pomocí výstupních pinů rozvodná deska Ultimaker 1.5.7. Ta ovládá větší proudy a napětí. Má výstup na tři topné prvky a tři teplotní senzory. Lze k ní připojit šest koncových spínačů (pro každou osu krajní a maximální pozice) a také ventilátor s regulací otáček pro chlazení naneseného materiálu při tvorbě modelu. Dále je na ní umístěn regulační člen, který snižuje napětí 24V na napájecí napětí pro Arduino.

Je osazena pěti drivery DRV8825 s mikro krokováním až 1/32, které jsou konstruovány na maximální napětí 45V a proudovému zatížení do 2.2 A. V případě poškození jsou vyměnitelné. V budoucnu lze dovybavit o případné bluetooth k bezdrátové komunikaci.



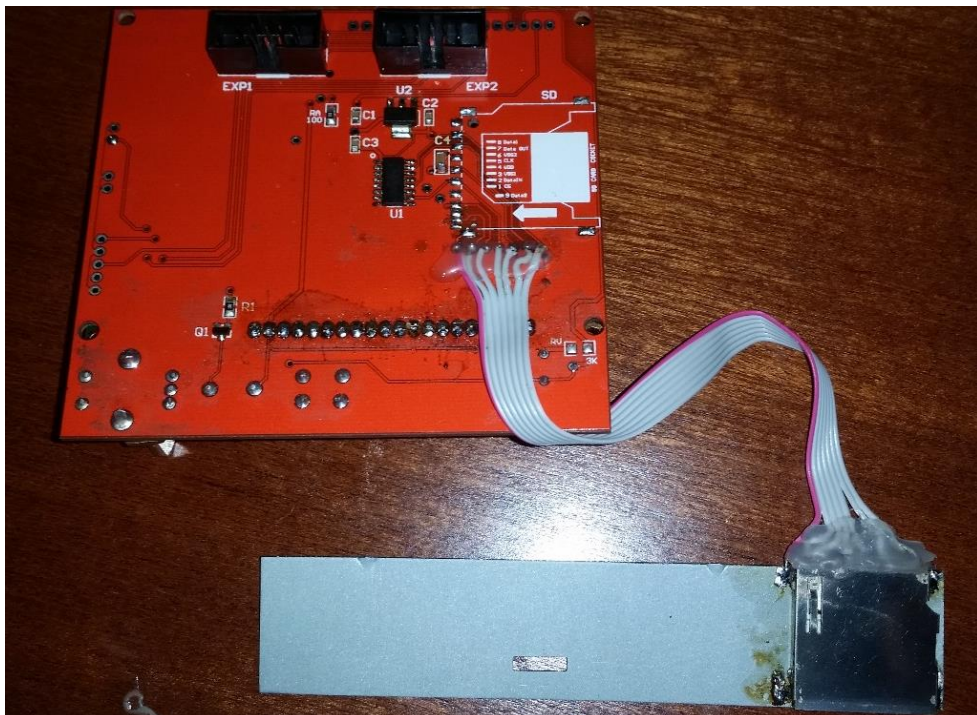
Obr. 44 Rozvodná deska osazená pěti drivery krokových motorů DRV8825

Dále tato deska obsahuje tranzistory, které spínají jednotlivé topné tělesa. Pro bezproblémové spínání vyhřívané desky jsou spoje proletovány, jelikož zde prochází vyšší proud. Kably připojené k vyhřívané podložce jsou rovněž silnějšího průřezu, aby nedošlo k jejich přepálení. Tyto tranzistory a drivery krokových motorů jsou osazeny chladiči a na desku byl umístěn navíc ventilátor pro lepší odvod tepla (obr. 45).



Obr. 45 Kompletně sestavená řídicí elektronika s chladícím ventilátorem

Displej slouží k zobrazování průběhu tisku, teplot a také k ovládání zařízení bez připojení počítače. Jedná se o LCD displej 128 x 64 rozlišovacích bodů. Kvůli konstrukci zařízení a umístění musel být upraven a SD čtečka na plošném spoji přemístěna viz. obr 46.



Obr. 46 Přemístěná SD čtečka z desky displeje

12.2 Napájecí zdroj

Zařízení je napájeno pomocí stejnosměrného 24 V zdroje o výkonu 500 W. Dle výrobce je schopen dodat až 20 A, a je proto plně dostačující. Pokud je počítáno s nejvyšší zátěží, kdy je zapnuta vyhřívaná deska (11 A), topná tělesa a krokové motory (5 A), činí celková spotřeba 16 A.

12.3 Krokové motory

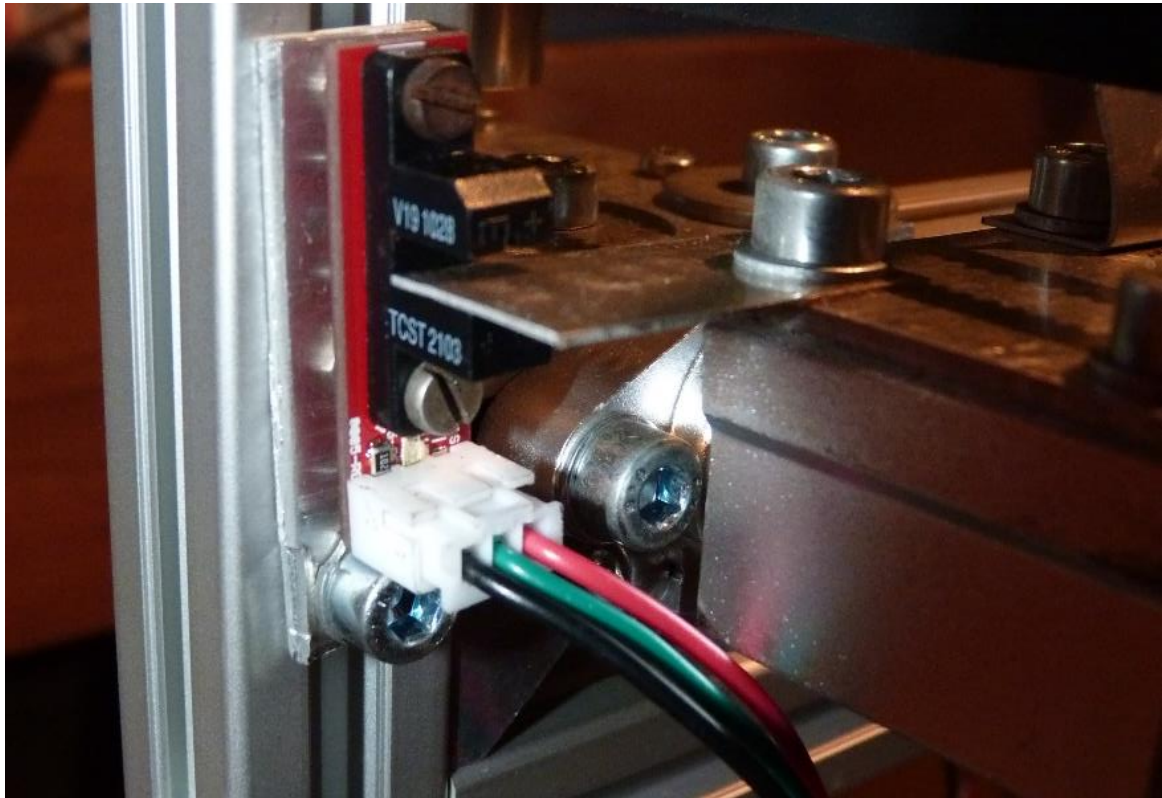
V zařízení je celkem šest krokových motorů s přírubou Nema17. Počet kroků u těchto motorů na jednu otáčku je 200 a maximální statický kroučící moment je 0,52 Nm. Dva krokové motory slouží k pohybu osy Z, další dva pohybují osou X a Y a poslední dva motory jsou umístěny na tiskové hlavě k dopravě materiálu do trysky.



Obr. 47 Krokové motory s přírubou Nema 17

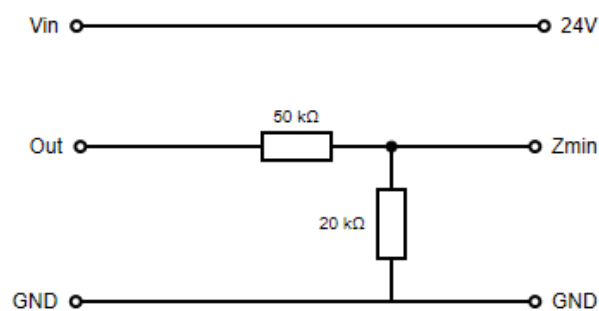
12.4 Koncové spínače

Snímání koncových poloh jednotlivých os je uskutečněno pomocí snímačů. Pro osy X a Y jsou to optické prvky umístěné v obou krajních pozicích (min a max) pro případné a včasné zastavení pohybu při přeskočení kroku motoru. Dva senzory jsou uloženy přímo na rámu konstrukce a dva jsou součástí tiskové hlavy. Přerušování paprsku v senzoru je uskutečněno tenkým plechem.

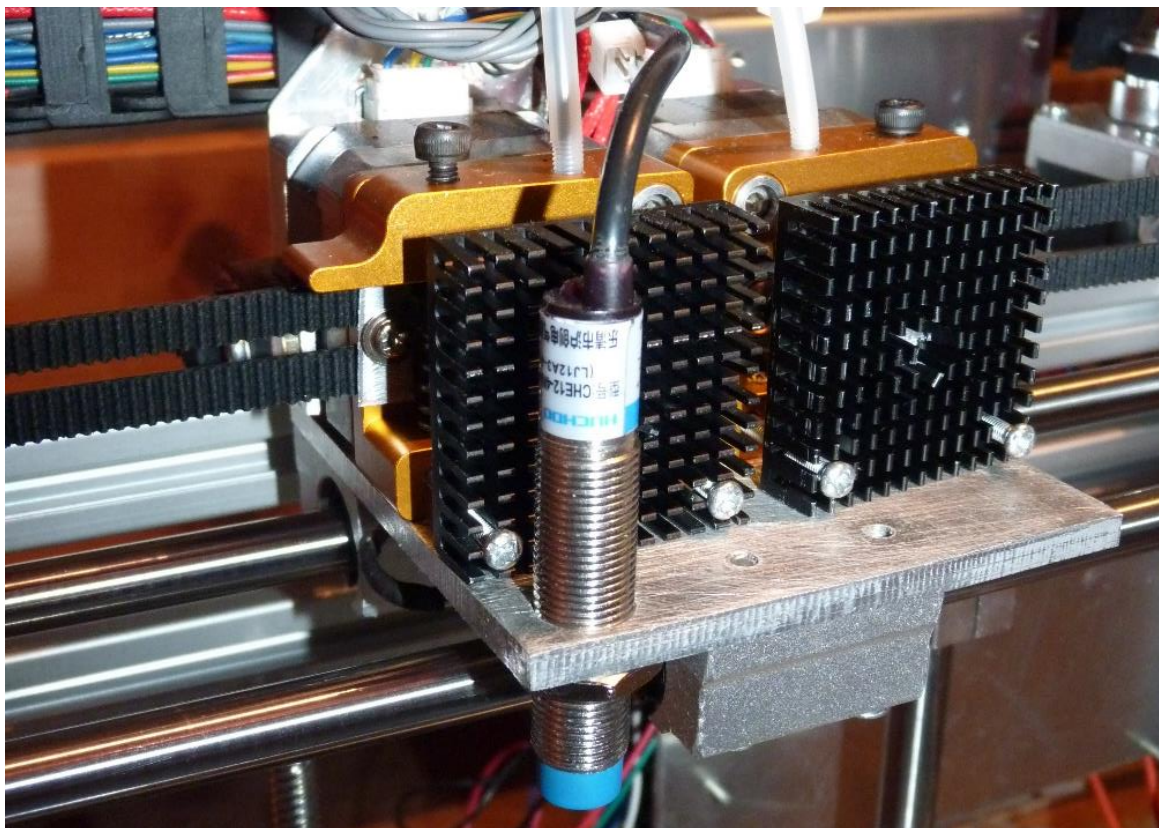


Obr. 48 Upevnění jednoho z optických koncových snímačů

Pro osu Z je to kombinace optického členu a indukčního senzoru. Indukční senzor slouží k přesnému odměření pozice podložky, kdy se nedotýká tiskové plochy, ale odměřuje ji ve výšce 1-2 mm od čidla a je součástí tiskové hlavy (obr. 50). Software je nastaven na odměřování tiskové plochy ve čtyřech místech z důvodu kalibrace rovinnosti podložky s pohybem tiskové hlavy. Zapojení indukčního senzoru k rozvodné desce muselo být upraveno napětovým děličem dle schématu (obr. 49).



Obr. 49 Schéma zapojení indukčního senzoru



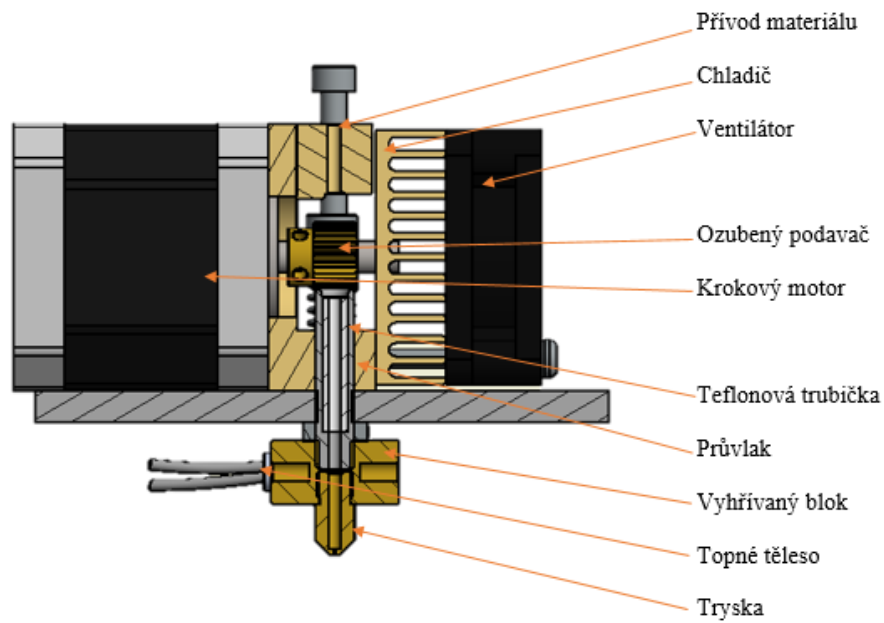
Obr. 50 Umístění indukčního senzoru na tiskové hlavě

12.5 Tisková hlava

Tisková hlava u tohoto zařízení je tvořena klasickou konstrukcí. Bouvdenový extruder, který by umožňoval sice rychlejší přejezdové rychlosti, byl zavržen z důvodu dlouhého bouvdeny a s tím spojeného velkého pnutí plastové struny materiálu uvnitř.

Tato hlava umožňuje tisk ze dvou různých materiálů. Její hlavní část tvoří dva krokové motory Nema17, které mají dostatečný kroučící moment k posuvu struny. Na hřídel každého z motorů je umístěn ozubený člen, který slouží k posuvu drátu. Ten je na toto ozubení přitlačen přítlačným ložiskem, které je umístěno na páce a síla přítlačku se nastavuje pomocí pružiny stlačované stavěcím šroubem. Dále je struna dopravována do průvlaku a následně do vyhřívané části, kde se materiál taví a je vytlačován tryskou ve formě tenkého vlákna.

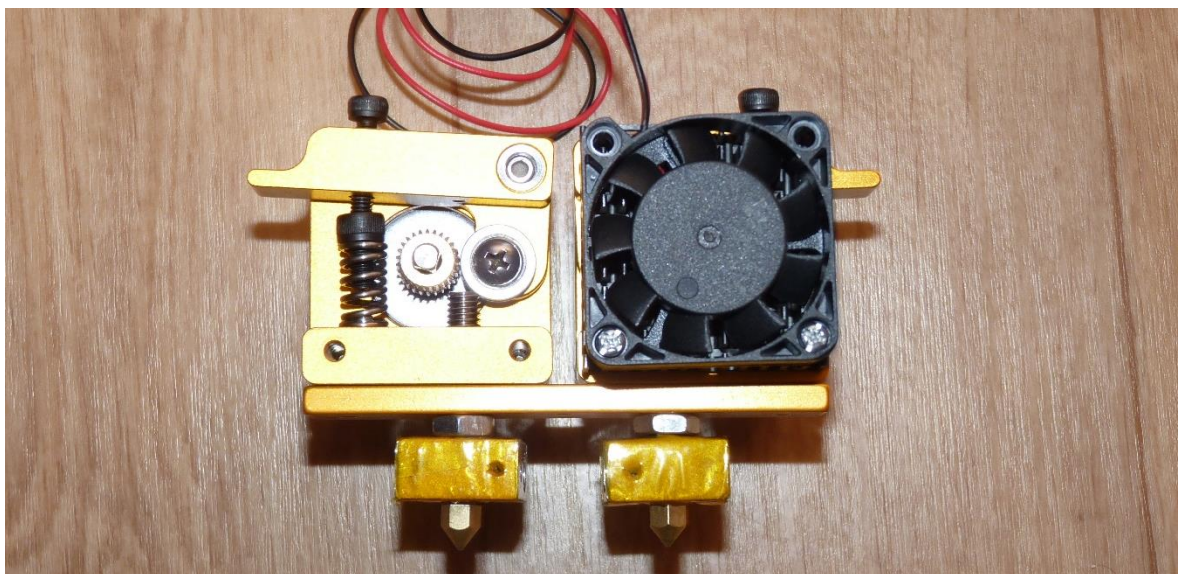
Vyhřívané hliníkové bloky na spodní části hlavy v sobě mají umístěny topná tělesa a termočlánky. Je zde připevněna i tryska, která je v případě ucpaní vyměnitelná.



Obr. 51 Řez tiskovou hlavou

Nežádoucí tepelná energie, která prostupuje průvlakem do horní části je odváděna pomocí dvou chladičů a ventilátorů umístěných na každém extruderu. Na hlavě jsou umístěny také optické koncové spínače pro osu Y.

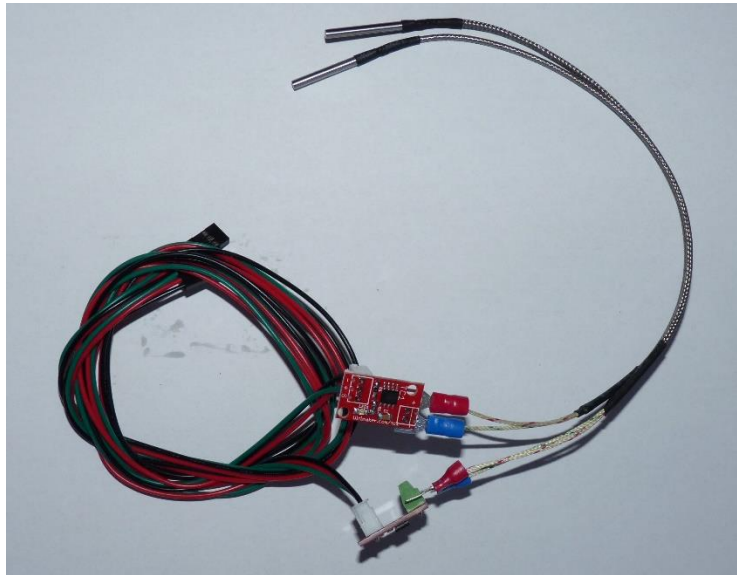
Veškerá kabeláž od motorů a další elektroinstalace je umístěna a vedena energetickým řetězem do části s řídicí elektronikou, aby tak nepřekážela v pohybu tiskové hlavy. Materiál je do tiskové hlavy dopravován uvnitř polyamidové trubičky.



Obr. 52 Tisková hlava s duálním extruderem MK8

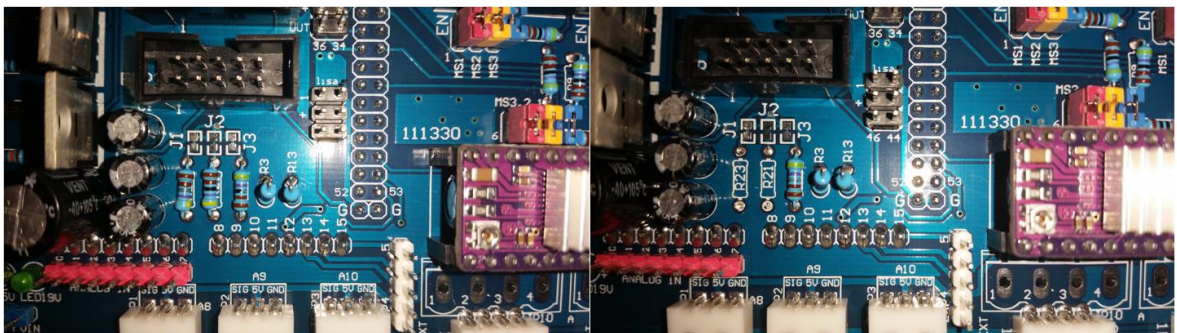
12.6 Termočlánekový převodník AD597

Pro měření teplot jednotlivých tiskových trysek (hotend) byly zvoleny termočlánky. Oproti klasickým termistorům mají větší tepelný rozsah měření a jsou přesnější. Řídící deska ovšem nemá zabudovaný převodník a je z výroby osazena pro měření termistory. Signál termočlánku se pohybuje v řádech milivoltů, a proto jejich signál musí být pro desku zesílen. K tomu slouží převodník AD597, který byl zakoupen již v osazeném modulu (obr. 53)



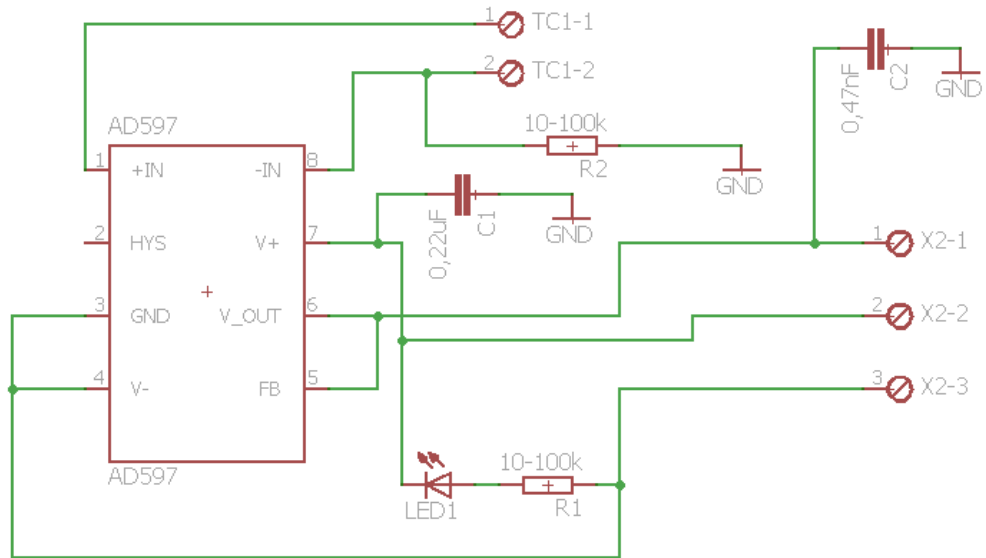
Obr. 53 Neupravený modul s převodníkem AD597 a připevněnými termočlánky

Rozvodná deska musela být pro použití převodníku upravena tak, že byly odstraněny odpory R23 a R21, jejichž použití na desce slouží pouze pro měření termistory. Pro správné měření teploty bylo ve firmwaru zařízení nastaveno měření pomocí tohoto převodníku, který vychází ze speciální tabulky pro termočlánky typu K.

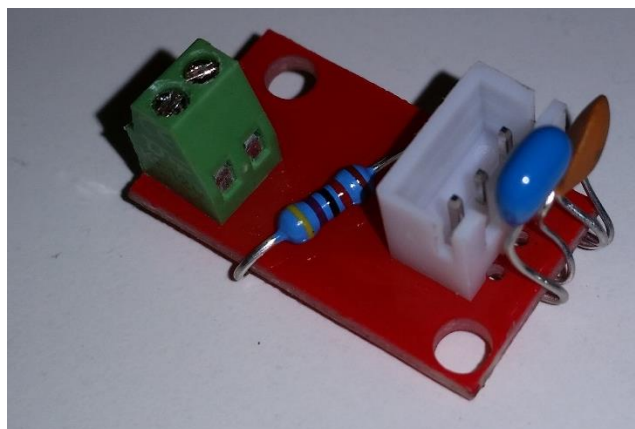


Obr. 54 Úprava rozvodné desky Ultimaker 1.5.7 pro měření teploty pomocí termočlánku provedená odstraněním rezistorů R23 a R21

Takto upravená a zapojená elektronika ovšem fungovala dobře pouze mimo konstrukci tiskárny. Po umístění do zařízení byla rušena frekvenčním šumem a to jak ze strany krokových motorů, tak i z napájecího zdroje. Způsobovalo to nevhodné osazení převáděcího modulu, a tak musel být dodatečně upraven a odrušen pomocí keramických kondenzátorů a odporů dle schématu (obr. 55). Po této úpravě již teplota byla správně vyhodnocována a stabilizována na danou konstantní teplotu.



Obr. 55 Schéma úpravy obvodu termočláňkového modulu AD597 pomocí keramických kondenzátorů a odporů



Obr. 56 Upravený termočláňkový modul AD597 s odporem a odrušovacemi keramickými kondenzátory

12.7 Vyhřívání tisková plocha

Vyhřívání tisková plocha neboli Heatbed slouží k lepšímu uchycení tištěného modelu k podložce a to převážně z materiálu ABS, jelikož jeho tepelná dilatace je značná a má tendenci vlivem tepelného smrštění od podložky odskakovat. Dále vyhřívá celkový tiskový prostor a vznikající model lépe teplotně stabilizuje. Je zde menší teplotní rozdíl ΔT – model versus okolní prostředí.

Pro vyhřívání podložku byla zvolena a zakoupena PCB deska o rozměru formátu A4 ve dvou kusech. Její zapojení lze provést jak pro napětí 12 V, tak pro 24 V. Odpor jedné desky pro napětí 12V byl naměřen 2,2 Ω , pro 24 V zapojení 4,4 Ω (obr. 57). Desky byly proto zapojeny paralelně na 24 V, kde celkový odpor dle výpočtu (2) vychází 2,2 Ω . Vypočítaný teoretický proud při tomto zapojení je 10,9 A (3), a tedy k jeho spínání je dostačující tranzistor na rozvodové desce. Pokud by mělo dojít k rychlení ohřevu desky, daly by se zapojit desky na 12 V, ovšem bylo by nutné vyměnit napájecí zdroj za výkonnější a na místo spínání tranzistorem použít relé.

Paralelní zapojení vyhřívání podložky pro 24 V:

$$R_c = \frac{R \cdot R}{R + R}$$

$$R_c = \frac{4,4 \cdot 4,4}{4,4 + 4,4} \quad (2)$$

$$R_c = 2,2 \Omega$$

Výsledný proud při paralelním zapojení na 24 V:

$$U = R \cdot I$$

$$I = \frac{U}{R_c} \quad (3)$$

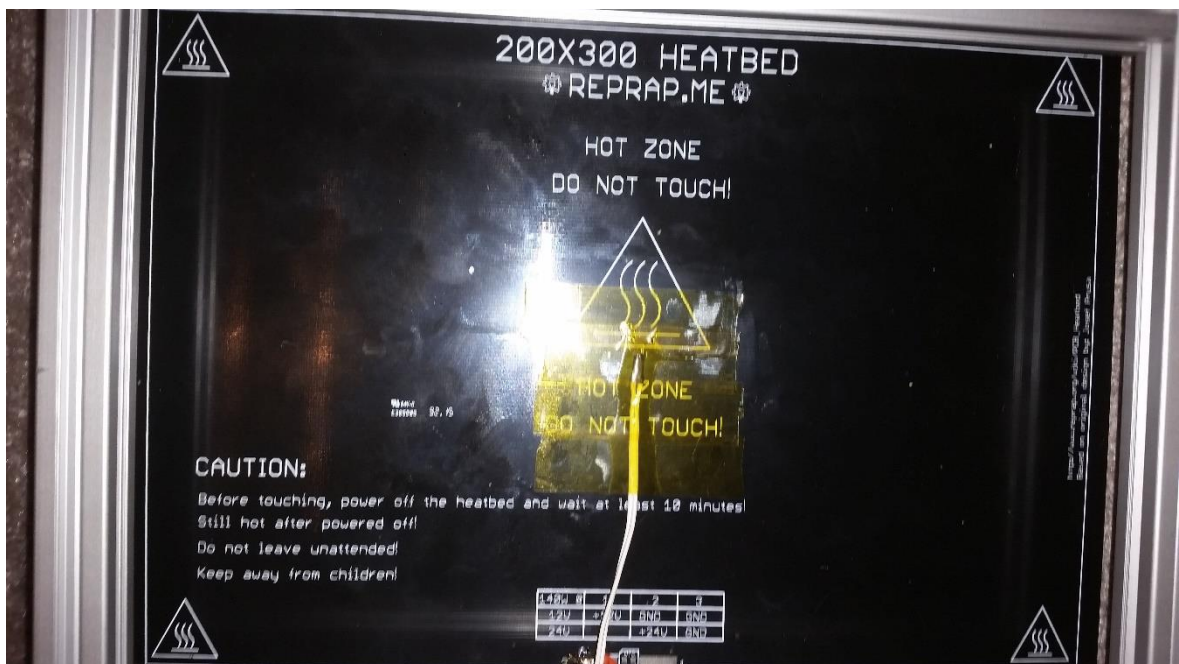
$$I = \frac{24}{2,2}$$

$$I = 10,9 \text{ A}$$



Obr. 57 Naměřené hodnoty odporů tiskové podložky pro 12 V a 24 V

Podložka je nejčastěji vyhřívána na teplotu 90 °C (při tisku z materiálu ABS) a teplota je měřena pomocí teplotního čidla. To je tvořeno termistorem umístěným na jednu z částí vyhřívané podložky. Přichyceno je pomocí kaptonové pásky. (obr. 58)



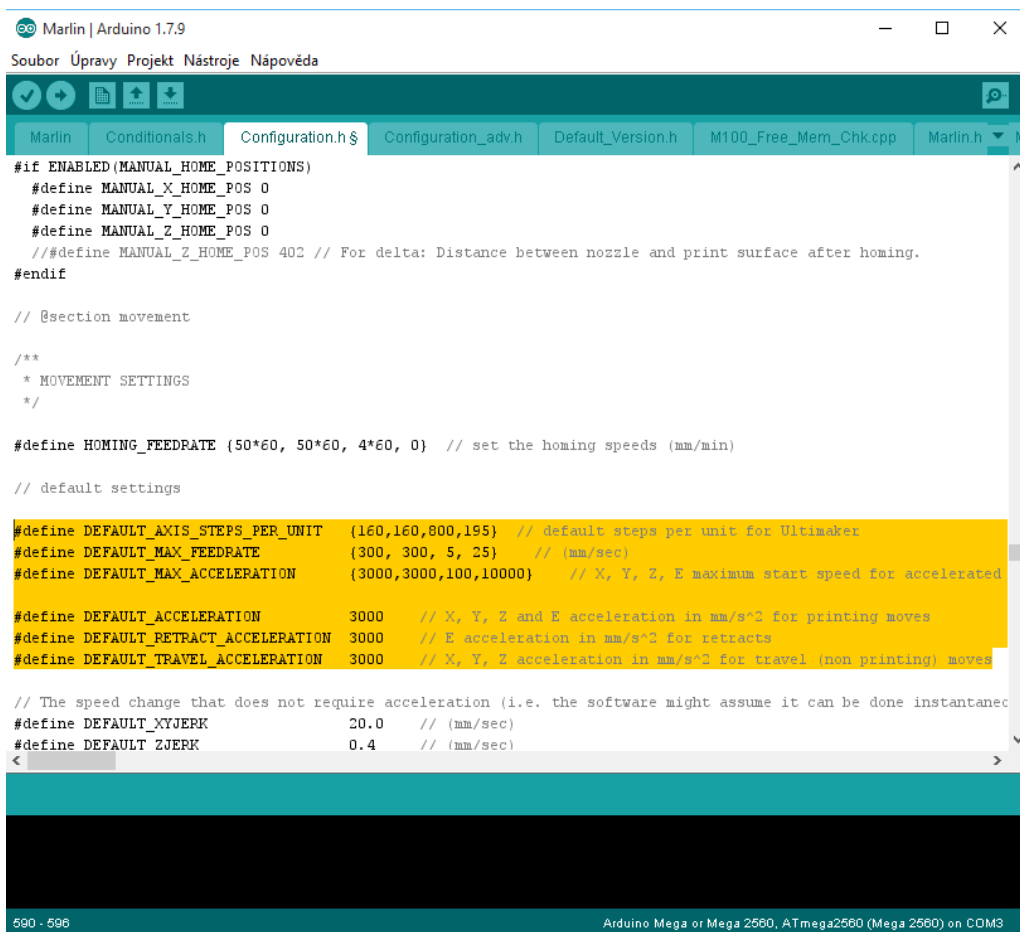
Obr. 58 Připojení teplotního čidla (termistoru) k vyhřívané desce pomocí kaptonové pásky

13 SOFTWARE

Software pro 3D tiskárnu se skládá ze dvou základních částí: firmwaru stroje a softwarové podpory pro zpracování CAD dat. Firmware zařízení slouží ke správné funkci 3D tiskárny. Obsahuje informace o počtu kroků na jeden milimetr, maximálních rychlostí, nastavení maximálních teplot, použitých elektronických senzorech atd. Softwarová podpora v počítači zpracovává a zobrazuje nahraný model (nejčastěji ve formátu STL) do jednotlivých vrstev a vytváří řídicí kód pro stroj.

13.1 Firmware zařízení

Existuje několik variant volně dostupných firmwarů pro tiskárny typu RepRap. Pro toto zařízení byl zvolen firmware Marlin, který ovšem musel být poupraven. Je napsán v jazyce Wiring a je nahrán přímo do paměti Arduina. Softwarové prostředí a jedna z úprav o počtu kroků a přejezdových rychlostech je znázorněna na obrázku č. 59.



```
Marlin | Arduino 1.7.9
Soubor Úpravy Projekt Nástroje nápověda
Marlin Conditionals.h Configuration.h$ Configuration_adv.h Default_Version.h M100_Free_Mem_Chk.cpp Marlin.h M
#if ENABLED(MANUAL_HOME_POSITIONS)
  #define MANUAL_X_HOME_POS 0
  #define MANUAL_Y_HOME_POS 0
  #define MANUAL_Z_HOME_POS 0
  // #define MANUAL_Z_HOME_POS 402 // For delta: Distance between nozzle and print surface after homing.
#endif

// @section movement

/**
 * MOVEMENT SETTINGS
 */

#define HOMING_FEEDRATE {50*60, 50*60, 4*60, 0} // set the homing speeds (mm/min)

// default settings

#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {160,160,800,195} // default steps per unit for Ultimaker
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {300, 300, 5, 25} // (mm/sec)
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {3000,3000,100,10000} // X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated

#define DEFAULT_ACCELERATION 3000 // X, Y, Z and E acceleration in mm/s^2 for printing moves
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 3000 // E acceleration in mm/s^2 for retracts
#define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 3000 // X, Y, Z acceleration in mm/s^2 for travel (non printing) moves

// The speed change that does not require acceleration (i.e. the software might assume it can be done instantane
#define DEFAULT_XYJERK 20.0 // (mm/sec)
#define DEFAULT_ZJERK 0.4 // (mm/sec)
<
590 - 598 Arduino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) on COM3
```

Obr. 59 Firmware Marlin a informace o počtech kroků na jeden milimetr pro každou osu

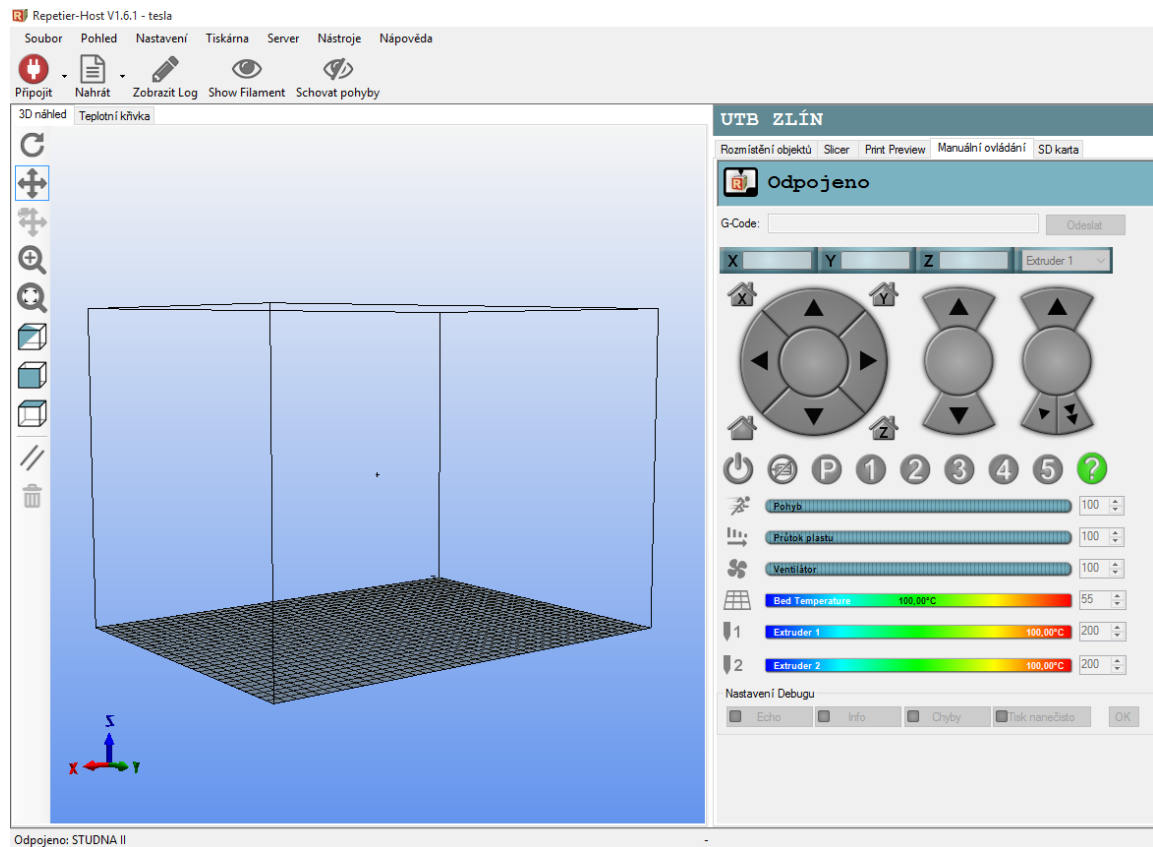
Do firmwaru je nahrána dostupná čeština a zařízení lze ovládat a provozovat bez nutnosti připojení počítače. Postačí vygenerovaný řídicí G-kód na SD kartě. Na obrázku č. 60 lze vidět informační a ovládací zobrazení displeje, kde se zobrazují teploty jednotlivých tiskových hlav a vyhřívané podložky. Také se zde zobrazuje údaj o zbývajícím a uplynulém čase tisku.



Obr. 60 Zobrazení informačního displeje

13.2 Softwarová podpora pro zpracování CAD dat

Pro přípravu 3D tisku existuje též více počítačových programů a většina z nich zná a podporuje firmware Marlin. Pro toto zařízení je využíván program Repetier Host. Slouží převážně k zobrazování CAD modelu vygenerovaného řídicího kódu v jeho drahách a lze přes něj zařízení ovládat například přes USB kabel. Jeho prostředí je přehledné a snadno ovladatelné. Jedná se o volně dostupný program bez nutnosti použití licenčního klíče a jeho konfigurace není omezena, jen pouze na některé typy komerčních zařízení, jako je tomu u jiných softwarů. Obsahuje již při instalaci slicerovací programy Cura, Slic3r a Skeinforge. Ty slouží ke zpracování modelu, respektive rozřezáním do jednotlivých vrstev. Do těchto programů se nastavuje mnoho různých parametrů a většinou se jedná o zdlouhavý a náročný proces, než je zařízení dokonale odladěno a zkalibrováno.

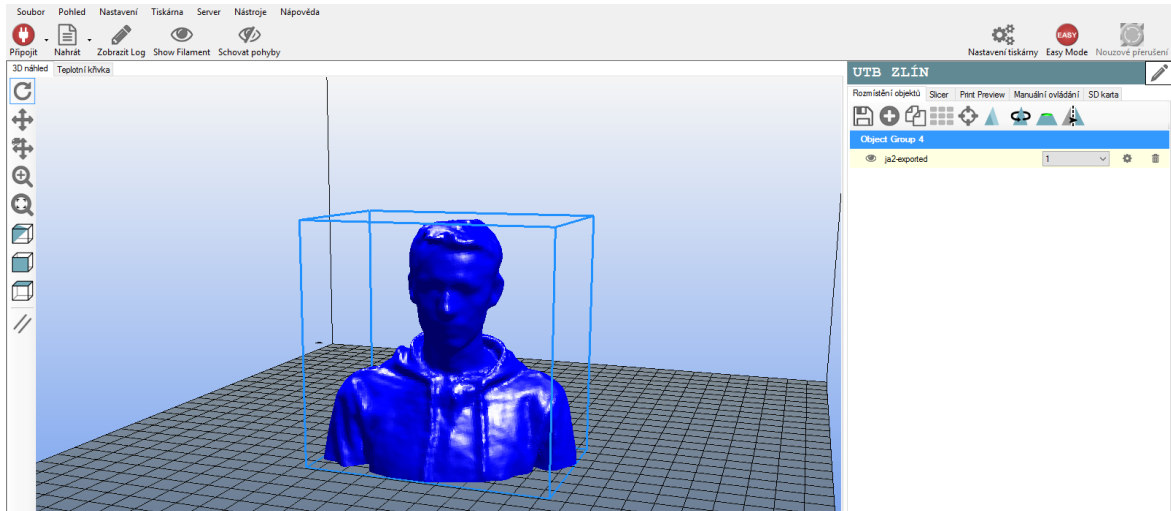


Obr. 61 Program Repetier – Host verze 1.6.1

Pro pozdější využívání zařízení lze doporučit program Simplify3D. Při testování tohoto programu vznikaly lepší dráhy tiskové hlavy a nastavení bylo jednodušší a časově méně náročné. Jeho verze ovšem není volně dostupná a licence k tomuto programu je k zakoupení v částce asi 3 600 Kč.

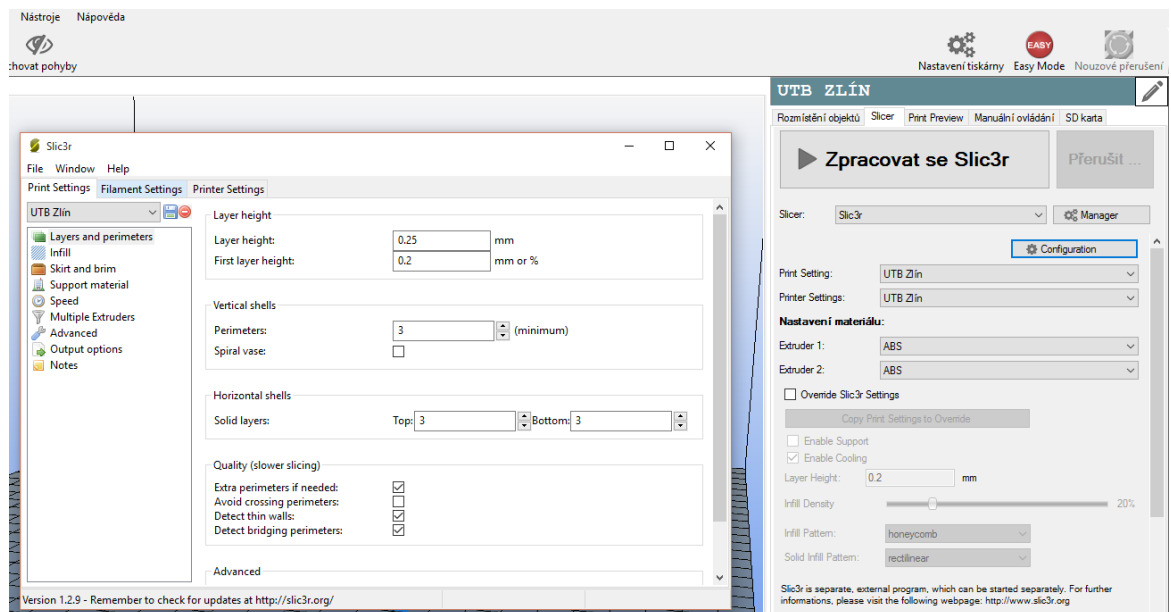
13.3 Ukázka zpracování CAD dat

Model ve formátu STL (v tomto případě zmenšený model bysty) je nahrán do programu Repetier Host, kde je umístěn na stavební podložku a vycentrován. Může zde být také dodatečně zvětšen či zmenšen, případně jej lze rozkopírovat.

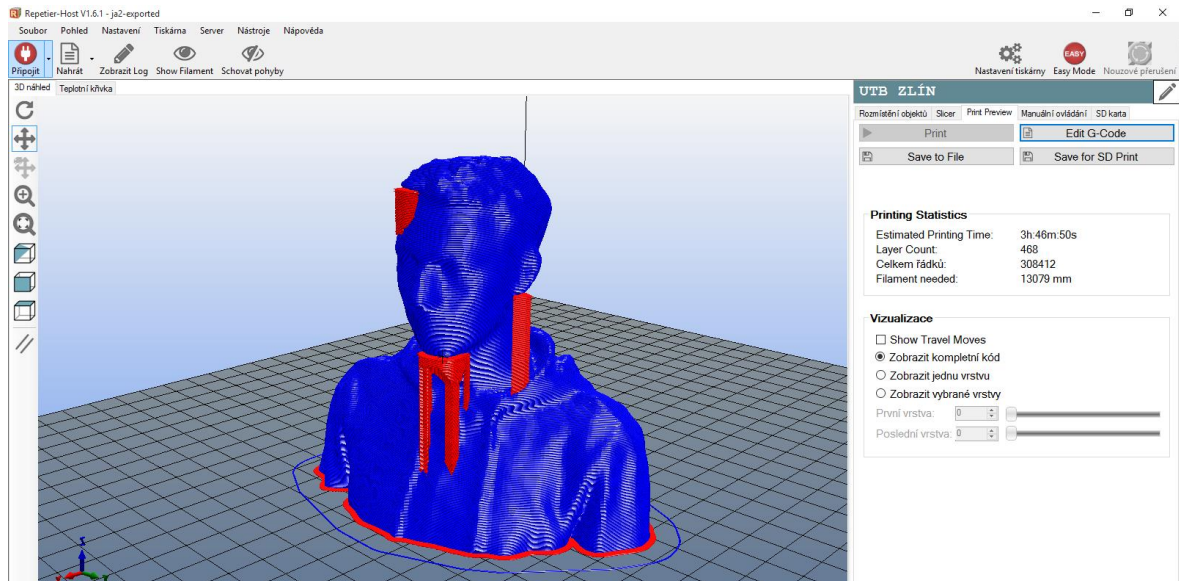


Obr. 62 Model bysty umístěný v programu Repetier Host

K samostatnému zpracování dat je vybrán program Slic3r. Jeho základní konfigurace je zobrazena na obr. 63. Je zde nastavena výška vrstvy, hustota vnitřní výplně, tloušťka stěny a generování raftu pro lepší adhezi k podložce. Jelikož má model převislé části, program automaticky v těchto místech vygeneroval strukturu podpůrného materiálu (obr. 64).



Obr. 63 Konfigurace softwaru Slic3r



Obr. 64 Zpracovaný model včetně zobrazení podpůrného materiálu (červeně)

Po zpracování program vytvoří G- kód a vypíše orientační informace o stavebním procesu, jako je čas tisku, počet vrstev, na které byl model rozřezán, a množství spotřebovaného materiálu.

```

UTB ZLÍN
Rozmístění objektů Slicer Print Preview Editor G-Codu Manuální ovládání SD karta
6 ; solid infill extrusion width = 0.34mm
7 ; top infill extrusion width = 0.34mm
8 ; support material extrusion width = 0.30mm
9
10 M190 S90 ; set bed temperature
11 M104 S250 T0 ; set temperature
12 M104 S250 T1 ; set temperature
13 G28 ; home all axes
14 G29 ;
15 G1 Z5 F5000 ; lift nozzle
16
17 M109 S250 T0 ; wait for temperature to be reached
18 M109 S250 T1 ; wait for temperature to be reached
19 G21 ; set units to millimeters
20 G90 ; use absolute coordinates
21 M82 ; use absolute distances for extrusion
22 G92 E0
23 T0
24 G92 E0
25 G1 Z0.200 F7800.000
26 G1 E-2.00000 F2400.00000
27 G92 E0
28 G1 X180.100 Y127.739 F7800.000
29 G1 E2.00000 F2400.00000
30 G1 X180.775 Y126.965 E2.02745 F1800.000
31 G1 X181.545 Y126.139 E2.05761
32 G1 X182.337 Y125.361 E2.08729
33 G1 X196.784 Y111.476 E2.62274
34 G1 X197.463 Y110.860 E2.64725
35 G1 X197.983 Y110.440 E2.66510
  
```

Obr. 65 Vygenerovaný řídicí G – kód pro zařízení

14 KALKULACE

Celá tiskárna byla na začátku omezena školním finančním rozpočtem a to do částky 20 000 Kč. Proto byla konstrukce před stavbou nejdříve podrobně propočítána, aby byl finanční plán dodržen. Většina součástí je zakoupena v zahraničních internetových obchodech, kde byla výrazně nižší cena než v České republice. Tabulka č. 3 ukazuje ceny jednotlivých hlavních komponent, které zařízení obsahuje. Nejsou zde ovšem zahrnuty náklady na plechové krytování, jelikož to bylo poskytnuto zdarma ze strany školy. Celková cena zařízení tedy s dostatečnou rezervou nepřesahuje limitovanou částku.

Tab. 3 Ceník jednotlivých použitých komponent na zařízení

Komponenta	počet kusů	cena s DPH (Kč)
Koncový optický snímač	5x	30
Driver DRV8825	5x	187
Displej	1x	271
Ultimaker 1.5.7	1x	558
Arduino ATmega2560	1x	237
Krokový motor	4x	1206
Zdroj	1x	806
Vyhřívaná podložka	2x	1492
Ozubený řemen - nekonečný	5 m	120
Hliníkové profily	13 m	4121
Řemenice	10x	500
Trapézový šroub + matice	2x	416
Spojka	2x	54
Ložiska SC12UU	8x	636
Vodící tyč Ø10	2x	132
Držáky tyčí SK12	8x	294
Ložiska SC10UU	4x	252
Upevňovací matice	200x	415
Vodící tyč Ø12 350 mm	4x	227
Vodící tyč Ø12 515 mm	2x	175
Držáky tyčí SHF12mm	4x	147
Indukční snímač	1x	70
Energetický řetěz	1x	323
Šrouby	-	160
Duální extruder	1x	2105
Termočlánkový převodník	2x	435
Deska PMMA	1x	500
Celkem		15 869 Kč

15 POROVNÁNÍ ZAŘÍZENÍ A VLASTNOSTÍ VÝROBKŮ

Při pohledu na zařízení a jeho srovnáním s 3D tiskárnami, které se dají s tímto zařízením porovnat, lze konstatovat, že je schopno konkurovat strojům v cenovém rozmezí 80 – 100 000 Kč. A to jak kvalitním zpracováním, tak uzavřeným tiskovým prostorem. Tuhost konstrukce je určitě větší, než ve srovnání s tiskárnami RepRap, kdy jsou jednotlivé prvky uchyceny pomocí plastových dílů. Zařízení umožňuje tisk ze dvou různých materiálů, čili zvládne při použití tisku podpůrného materiálu vyrobit i složitější dílce, aniž by bylo nutné CAD model dělit kvůli převislým částem na několik samostatně vyráběných částí. Obsahuje také vyhřívanou plochu a umožňuje tisk z mnoha druhů termoplastických materiálů na rozdíl od tiskáren bez vyhřívané desky, které tisknou pouze z materiálu PLA.

Cena těchto materiálů se finančně liší. Tiskárny na profesionální úrovni používají plastové struny v cenovém rozmezí několika tisíc korun za 1kg, kdežto u tohoto zařízení lze používat termoplasty v řádech několika stovek korun. Zejména při použití materiálu, který je vyráběn na vytlačovacím stroji na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně, by se cena pohybovala ve velmi nízkých částkách. Zde ale musí být nejdříve upravena kalibrace a vytvořeno speciální navíjecí zařízení, aby byl dodržen konstantní průměr drátu. Od něj se odvíjí kvalita výsledného povrchu a vlákno z trysky musí být nanášeno s konstantní tloušťkou, aby nevznikaly povrchové vady typu chybějícího nebo nadbytečně vytlačeného materiálu.

Celková cena dílu vyrobeného na tomto zařízení je tedy mnohonásobně levnější než cena modelů vyrobených na drahých a finančně provozně náročných strojích.

Široká škála softwarového nastavení umožňuje zařízení odladit na konkrétní model, kdy povrchové, rozměrové a mechanické vlastnosti můžou být i lepší, než u strojů, kde toto nastavení kvůli dodanému přesně odladěnému softwaru nelze přesně definovat.

Například při zlepšení mechanických vlastností lze zvýšit podíl výplně materiálu v modelu a nastavit vyšší teploty trysky tak, aby se zlepšila soudržnost nanášeného materiálu.

Jelikož se jedná o prototyp stroje, bylo by nutné provést designové úpravy a odladit software, aby se toto zařízení mohlo začít vyrábět a uchytit se na trhu s těmito stroji.

16 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Celková stavba zařízení vychází z předchozí bakalářské práce, která se zabývala problematikou 3D tisku a konstrukcí jednoduššího stroje pracujícího na technologii FDM. Bez těchto poznatků by nebylo možné zařízení sestavit. Celý stroj je navržen tak, aby se jednalo převážně o stavebnici, bez nutnosti vyrábět mnoho speciálních komponent.

Během stavby bylo provedeno několik úprav v konstrukci. Byly zesíleny držáky krokových motorů osy X a Y. Dále byly vyměněny vodící řemenice ozubeného řemenu za řemenice s kuličkovými ložisky, kde došlo ke značnému snížení odporu při pohybu. Tuhost celé konstrukce je dostačující, ovšem pohyb posuvného stolu by chtěl modifikovat, jelikož dochází ke chvění tiskové podložky. Řešením je použití čtyř trapézových závitů. V současnosti je posuvný stůl uchycen pouze dvěma trapézovými závity. Tím by se zamezilo případnému naklánění stolu v momentě, kdy tisková hlava přejíždí přes nadbytečně nanesený materiál na vznikajícím modelu. Současně se softwarovou úpravou by se dala překonstruovat tisková hlava a to tak, aby docházelo k vysouvání jedné z trysek a zamezilo se tak nechtěnému zásahu právě nepracující tryskou do vznikajícího modelu.

Elektronika byla rovněž upravována. Při průběhu nastavování zařízení došlo k vyhoření napájecího zdroje. Proto musel být vyměněn za nový. Ten ovšem vysílal rušivý frekvenční šum a nastalo špatné vyhodnocování teplot. Z tohoto důvodu, jak je v práci výše zmíněno, musel být upraven termočlánekový převodník.

V rámci řídicí desky a Arduina Mega2560 jako takového, lze uvažovat v případě častějšího tisku složitých a časově náročných dílců o jeho výměně za Arduino Due s rychlejším procesorem, případně osazením tiskárny mini počítačem Raspberry.

Přesto, že byly mechanické a elektronické problémy odstraněny, bylo nutné zařízení řádně zkalibrovat a nastavit. Zde se jedná o zdlouhavý a časově náročný proces zejména v nastavování parametrů, které mají zásadní vliv na mechanické a pohledové vlastnosti výrobků. Software Repetier Host a slicerovací program Slic3r by mohl být později nahrazen programem Simplify3D, který dosahuje kvalitnějšího zpracování CAD dat.

Diskutovat lze taky o použitém materiálu při tisku, který má též zásadní vliv na kvalitu hotového výrobku. Platí pravidlo, co materiál, to jiné parametry. Zde byl nejvíce testován materiál vyrobený pomocí univerzitního vytlačovacího stroje a jeho vlastnosti, jako je průměr struny, nebyly zatím úplně technologicky vyřešeny.

Jelikož se jedná o prototyp zařízení, lze uvažovat o pozdějších úpravách a vylepšení v další verzi tohoto stroje. Při malosériové výrobě by šla cena ve formě nákladů ještě o nemalou částku snížit a tiskárna by byla schopná konkurovat menším tiskárnám na trhu. Určitě se jedná o zařízení, které předčí tiskárny typu RepRap a i některé zařízení vyšší kategorie, jelikož u tohoto zařízení je už vyhřívaná tisková plocha a současně od ní i vyhřívaný tiskový prostor.

Nelze tento stroj ovšem srovnávat s profesionálními tiskárnami například firmy Stratasys. Zde na vývoji zařízení pracuje celý tým inženýrů a částky stroje se pohybují v řádech stovek tisíc až několika milionů korun.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zkonstruovat zařízení, které umožní vytvářet objekty technologií 3D tisku. V teoretické části byla zmíněna historie a technologie, které jsou v dnešní době používány. Bylo čerpáno především z aktuální odborné zahraniční literatury. Dále byly popsány materiály a tvorba modelu u technologie FDM. V závěru teoretické práce byly zmíněny dostupná zařízení na trhu a to jak velké profesionální tiskárny, tak i menší a finančně dostupné širší veřejnosti.

Praktická část se zabývala vlastním návrhem a konstrukcí zařízení. Přínosem bylo mnoho dalších a nových zkušeností, které navazovaly na předchozí bakalářskou práci. Konstrukce tiskárny byla ovšem mnohem náročnější, protože se jedná o složitější zařízení. Celá práce byla omezena maximálním finančním rozpočtem 20 000 Kč, který byl dodržen.

Přesnost pohybů stroje nebyla podrobněji měřena, ale díky počtu kroků krokového motoru na 1 mm (160 kroků) lze teoreticky hrubě předpokládat, že se bude pohybovat v desetinách milimetru.

Zařízení je schopné vyrábět díly ze dvou různých materiálů. Díky použití duální hlavy tak může vytvářet složitější modely s podpurným materiálem. Vzhledem k rozsáhlému nastavení softwaru a vyhřívané podložky lze provádět tisk z mnoha termoplastických materiálů, které u některých komerčně dostupných zařízení nejdou použít. Využití výrobků z tohoto stroje najde uplatnění u designerů, v konstrukčních odděleních, v architektuře atd.

Na základě poznatků při stavbě byla již navržena další odladěná verze tiskárny, která je nyní ve výrobní fázi. Proto lze uvažovat o budoucím prodeji těchto zařízení a to jak do domácností, tak například i do malých firem a škol, pro které by toto zařízení bylo cenově dostupné.

3D tisk je čím dál víc populárnější a v blízké budoucnosti má velký potenciál.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] COWARD, Cameron. *Idiot's Guides: 3D Printing*. Penguin, 2015. ISBN 9781615647453.
- [2] *AV Plastics* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.avplastics.co.uk/3d-printing-history>
- [3] BRYDEN, Douglas. *CAD and rapid prototyping for product design*. London, [England]: Laurence King Publishing, 2014, 1 online zdroj (176 pages). ISBN 978-1-78067-570-1.
- [4] LIN, Allan, Jassmine YEH a Studio X.Y.Z. *Envolve Your 3D Printing: XYZprinting Nobel High Precision SLA 3D Printer*. 1. XYZprinting, Inc, 2015.
- [5] HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍRENSTVÍ o.s.* [online]. In: . 2013, s. 25 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivni-technologie/85/>
- [6] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [7] *Custompart* [online]. 2014 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.custompart-net.com/>
- [8] GRIFFEY, Jason. *3-D Printers for Libraries*. 1. USA: Amer Library Assn, 2014, 30 s. ISBN 9780838959305. ISSN 0024-2586.
- [9] PolyJet. *Materialise* [online]. 2014 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.materialise.cz/polyjet-prototypu>.
- [10] GRIMM, Todd. *User's guide to rapid prototyping*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2004, xvi, 404 p. ISBN 0872636976.
- [11] ZEMČÍK, Oskar a Jan DVOŘÁČEK. ROZLOŽENÍ TEPLITNÍHO POLE V FDM TISKOVÉ HLAVĚ. In: *Consulting point* [online]. 2010 [cit. 2016-4-12]. Dostupné z: <http://cp.forever.cz/en/node/67>.

- [12] *Corecompute* [online]. 2012 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.corecompute.com/reprap/reprap_20141123.html
- [13] *Rapid Prototyping & Manufacturing Technologies* [online]. Hong Kong, 2012 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [http://www.ic.polyu.edu.hk/student_net/training_materials/2012/IC LearningSerie 2012 - Rapid Prototyping & Manufacturing Technologies.pdf](http://www.ic.polyu.edu.hk/student_net/training_materials/2012/IC_LearningSerie_2012_-_Rapid_Prototyping_&_Manufacturing_Technologies.pdf). Polytechnic University.
- [14] *Tips for Designing 3D Printed Parts* [online]. 2014 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <https://innovationstation.utexas.edu/tip-design>
- [15] *Stratasys* [online]. 2012 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com>.
- [16] Isis3D creates low-cost, high-quality desktop 3D Printer for everyone. *3ders* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20130816-isis3d-creates-low-cost-high-quality-desktop-3d-printer-for-everyone.html>
- [17] How to choose a FFF/FDM 3D printer – What type of material do i plan to use. *Nutz95* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <https://nutz95.wordpress.com/2015/02/22/how-to-choose-a-fff-fdm-3d-printer-what-type-of-material-do-i-plan-to-use/>
- [18] RUSSELL GONZALEZ, Sara Ann a Denise Beaubien BENNETT. 3D printing: a practical guide for librarians. Lanham: Rowman & Littlefield, 2016. ISBN 9781442255487.
- [19] SEHNÁLEK, Stanislav a Tomáš URBÁNEK. 3D tiskárna na bázi projektu RepRap - 1.část. *Posterus* [online]. 2013, roč. 6, č. 8 [cit. 2016-01-5]. DOI: 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=16065&output=pdf> .
- [20] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. ISBN 9812778977.
- [21] EVANS, Brian. *Practical 3D printers*. New York: Apress, 2012. ISBN 9781430243939.

- [22] CANESSA, Enrique, Carlo FONDA a Marco ZENNARO. *Low-cost 3D Printing: for Science, Education & Sustainable Development*. 1. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013. ISBN 92-95003-48-9.
- [23] FAQs about 3D printing. *Inventadore* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.inventadore.com/faq.html>
- [24] A tour around the world of 3D-printing technologies: Extrusion Deposition Modeling. *AptGadget* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://aptgadget.com/a-tour-around-the-world-of-3d-printing-technologies-extrusion-deposition-modeling/>
- [25] Rafts, Skirts and Brims!. *Simplify3D* [online]. 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/tutorials/rafts-skirts-and-brims/>
- [26] *Objet* [online]. 2015 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://objet.cz/>
- [27] *MakerBot* [online]. 2014 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.makerbot.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	Procento
°C	Stupeň celsia
2D	Dvojdimenzionální rozměr.
3D	Trojdimenzionální rozměr
A	Ampér
ABS	Akrylonitril-butadien-styren.
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aided Design.
CAM	Computer Aided Manufacturing.
D	Průměr výchozího materiálu
d	Průměr vytlačovaného materiálu
FDM	Fused Deposition Modeling.
ff	Rychlost posuvu tiskového materiálu
FFF	Fused Filament Fabrication.
fmin	Průměr výchozího materiálu
I	Proud
kb	Kilobyte
Kč	Koruna česká
kg	Kilogram
LCD	Liquid Crystal Display.
LOM	Laminated Object Manufacture.
m ²	Metr čtvereční
MHz	Megahertz
mm	Milimetr

Nm	Newton metr
PC	Polykarbonát.
PCB	Printed Circuit Board
PLA	Polylactic acid.
PMMA	Polymethylmethakrylát
PPSF/PPSU	Polyphenylsulfone.
R	Odpor
R _c	Celkový odpor
RepRap	Replicating Rapid Prototyper.
RP	Rapid Prototyping.
SLA	Stereolitografie.
SLS	Selective Laser Sintering.
STL	Standard Tessellation Language
U	Napětí
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultrafialové záření.
V	Volt
ΔT	Rozdíl teplot
Ω	Ohm

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Charles Hull, vynálezce 3D SLA tisku a zakladatel společnosti Stratasys [2].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2 Graf procentuálního využití technologie Rapid Prototyping [5]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3 Metoda LOM [7]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4 Metoda Stereolitografie [7].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 5 Metoda SLS [7]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 6 Metoda PolyJet [7].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 7 Princip technologie FDM [7].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 8 Tisková hlava FDM zařízení Fortus 450 od firmy Stratasys [12]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 9 Tisk bez podpůrného materiálu [14]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 10 Vlevo podpora Basic a vpravo Smart support [13]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 11 Vylamovací podpora Break-away [16]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 12 Dráha tiskové hlavy při nanášení vlákna a zároveň struktura výrobku v jedné vrstvě [13]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 13 Tvorba výplně [13]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 14 Chyby tisku [13]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 15 Materiály pro FDM [17]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 16 Ukázkový soubor STL [20]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 17 Nadbytečné hrany a vrcholy v STL formátu [20].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 18 Směr pohybu hlavy [21]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 19 Model sestavený z jednotlivých vrstev</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 20 Výška vrstvy [22].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 21 Podíl výplně [23].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 22 Struktura výplně [24]</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 23 Raft [25]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 24 Skirt [25]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 25 Brim [25].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 26 Fortus řady 380 a 450mc[26]</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 27 FDM tiskárna Fortus 900mc [5].....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 28 Tiskárna Mojo [26]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 29 Tiskárna uPrint SE Plus [26]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 30 FDM tiskárna MakerBot Replicator [27]</i>	<i>43</i>

<i>Obr. 31 Základní 3D model stroje vytvořený v programu Autodesk Inventor 2016 ..</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 32 Schéma se základními rozměry zařízení</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 33 Nařezané a upravené hliníkové profily</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 34 Sestavený hlavní rám stroje</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 35 Umístění osy Z do konstrukce stroje</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 36 Pohyb osy Z pomocí trapézového šroubu</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 37 Kompletně sestavený stůl osy Z skládající se z vyhřívané desky, nerezového plechu a nosné konstrukce.</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 38 Osa X a Y sloužící pro pohyb tiskové hlavy</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 39 Řemenice pro vedení ozubeného řemene sloužícího k pohybu tiskové hlavy a upravná lineární ložiska, která slouží zároveň jako držáky vodících tyčí osy Y</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 40 Natažený ozubený řemen a princip pohybu tiskové hlavy způsobem CoreXY</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 41 Umístění elektroniky a tiskového materiálu</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 42 Nástřík krytování modrou barvou</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 43 Vpravo Řídící elektronika Arduino ATmega2560, uprostřed rozvodná deska Ultimaker 1.5.7 a nalevo displej Full Graphic Smart Controller</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 44 Rozvodná deska osazená pěti drivery krokových motorů DRV8825</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 45 Kompletně sestavená řídicí elektronika s chladícím ventilátorem</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 46 Přemístěná SD čtečka z desky displeje</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 47 Krokové motory s přírubou Nema 17</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 48 Upevnění jednoho z optických koncových snímačů</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 49 Schéma zapojení indukčního senzoru</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 50 Umístění indukčního senzoru na tiskové hlavě</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 51 Řez tiskovou hlavou</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 52 Tisková hlava s duálním extruderem MK8</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 53 Neupravený modul s převodníkem AD597 a připevněnými termočládky</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 54 Úprava rozvodné desky Ultimaker 1.5.7 pro měření teploty pomocí termočládku provedená odstraněním rezistorů R23 a R21</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 55 Schéma úpravy obvodu termočládkového modulu AD597 pomocí keramických kondenzátorů a odporů</i>	<i>64</i>

<i>Obr. 56 Upravený termočlánekový modul AD597 s odporem a odrušovacími keramickými kondenzátory</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 57 Naměřené hodnoty odporů tiskové podložky pro 12 V a 24 V</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 58 Připojení teplotního čidla (termistoru) k vyhřívané desce pomocí kaptonové pásky.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 59 Firmware Marlin a informace o počtech kroků na jeden milimetr pro každou osu</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 60 Zobrazení informačního displeje.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 61 Program Repetier – Host verze 1.6.1</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 62 Model bysty umístěný v programu Repetier Host</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 63 Konfigurace softwaru Slic3r</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 64 Zpracovaný model včetně zobrazení podpůrného materiálu (červeně)</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 65 Vygenerovaný řídicí G – kód pro zařízení.....</i>	<i>71</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Materiály pro FDM [15], [18]</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 2 Přípony souborů podporovaných softwarů pro 3D tisk. [18]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 3 Ceník jednotlivých použitých komponent na zařízení</i>	<i>72</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Kompletně sestavená 3D tiskárna

Příloha P II: Ukázka vyrobených modelů

Příloha P III: Ukázka vyrobeného modelu bysty

Příloha P IV: CD – obsahuje diplomovou práci, sestavu základního počítačového modelu 3D tiskárny v programu Autodesk Inventor 2016 a firmware Marlin

PŘÍLOHA P I: KOMPLETNĚ SESTAVENÁ 3D TISKÁRNA



PŘÍLOHA P II: UKÁZKA VYROBENÝCH MODELU



PŘÍLOHA P III: UKÁZKA VYROBENÉHO MODELU BYSTY

