

Konstrukční úprava 3D tiskárny

Bc. Vlastimil Chalupa

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vlastimil Chalupa**
Osobní číslo: **T17264**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Konstrukční úprava 3D tiskárny**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Provedte zhodnocení stávajícího řešení
3. Vypracujte konstrukční řešení týkající se úprav 3D tiskárny
4. Provedte ekonomické zhodnocení návrhu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **GIBSON, I., David ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Second edition. New York: Springer, [2015], xxi, 498 s. ISBN 978-1-4939-2112-6.**
2. **BRYDEN, Douglas. CAD and rapid prototyping for product design. London: Laurence King Publishing, 2014, 176 s. Portfolio skills. Product design. ISBN 978-1-78067-342-4.**
3. **GEBHARDT, Andreas. Understanding additive manufacturing: rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing. Munich: Hanser Publishers, c2011, ix, 169 s. ISBN 978-1-56990-507-4.**

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 1. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, 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

.....

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). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat dostupný materiál zabývající technologií 3D tisku. Na základě získaných informací byla vypracována literární studie pojednávající jak o různých metodách 3D tisku, jeho historii a použití, tak i o materiálech které se pro 3D tisk využívají. Dále bylo provedeno srovnání dostupných produktů a konstrukcí využívajících se při násobné extruzi v oblasti 3D tisku. Praktickou částí práce bylo vypracování konstrukčního návrhu zařízení s možností duální extruze a následná výroba prototypu. Při tvorbě návrhu byla klíčovým aspektem kompatibilita zařízení s FDM tiskárnou Prusa i3MK2S a byla zachována maximální možná tisková plocha.

Klíčová slova: 3D tisk, duální extruze, prototyp, Prusa i3MK2S

ABSTRACT

The aim of this thesis was to analyze the available material dealing with 3D printing technology. Based on gathered information was elaborated literature study about the different methods of 3D printing, its history and use, as well as the materials that are used for 3D printing. Furthermore, a comparison was made between available products and constructs used in multiple extrusion in the area of 3D printing. The practical part of the thesis was the elaboration of the design of the device with the possibility of dual extrusion and subsequent production of the prototype. When creating the design was a key aspect of compatibility with devices FDM printer Prusa i3MK2S and maintain maximum possible printing area.

Keywords: 3D print, dual extrusion, prototype, Prusa i3MK2S

Rád bych touto cestou poděkoval v první řadě vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za rady a čas strávený nad konzultacemi a jeho odborné vedení. Dále také pak své rodině za jejich trpělivost a podporu během mého studia.

Motto:

„Dělej, pracuj, dokud tvé minuty plynou“

Tomáš Garrigue Masaryk

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 RAPID PROTOTYPING.....	12
1.1 HISTORIE 3D TISKU	13
1.2 POUŽITÍ 3D TISKU	14
1.2.1 Průmysl	14
1.2.2 Medicína.....	15
1.2.3 Architektura.....	15
1.2.4 Móda, šperkařství, design	16
1.2.5 Domácí použití	16
1.3 METODY 3D TISKU	18
1.3.1 Stereolithography – SLA.....	18
1.3.2 Digital Light Processing – DLP	19
1.3.3 Fused Deposition Modeling – FDM	19
1.3.4 Selective Laser Melting – SLM	20
1.3.5 Elelectron Beam Melting – EBM.....	21
1.3.6 Laminated Object Manufacturing – LOM	22
1.3.7 Binder Jetting – BJ.....	23
1.4 MATERIÁLY PRO 3D TISK METODOU FDM	24
1.4.1 PLA (Polyactic Acid).....	24
1.4.2 ABS (Acrylonitril – Butadien – Styren).....	25
1.4.3 ASA (Acrylonitrile – Styren – Acrylate)	25
1.4.4 PET-G (Polyethylene – Terephthalate – Glycol)	26
1.4.5 CPE (Chlorinated – Polyethylene)	27
1.4.6 PA (Polyamid).....	27
1.4.7 TPU (Thermoplastic Polyurethane)	28
1.4.8 PC (Polycarbonate)	29
1.4.9 Plněné filamenty.....	30
1.4.10 Podpůrné materiály	32
1.4.11 Speciální materiály.....	33
1.4.12 Materiály pro tisk ostatními metodami	34
1.5 VÝHODY A NEVÝHODY 3D TISKU	35
2 PROJEKT REPRAP.....	36
2.1 JOSEF PRŮŠA	36
2.2 PRUSA I3 MK2S	37
2.3 PRUSA I3 MK3	38
3 MULTIMATERIAL	40

3.1	MULTIMATERIAL PRUSA	40
3.2	TYPY VYTLAČOVACÍCH HLAV	43
3.3	VYTLAČOVACÍ HLAVA CHIMERA.....	43
3.4	VYTLAČOVACÍ HLAVA CYCLOPS	44
3.5	VYTLAČOVACÍ HLAVA KRAKEN	45
3.6	VÝMĚNNÝ EXTRUDÉR	46
3.6.1	Switching extruder	46
3.6.2	Parking extruder	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
4	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	49
5	KONSTRUKCE.....	50
5.1	ŘEŠENÍ	50
5.1.1	Prvotní návrh.....	50
5.1.2	Tvorba 3D modelu	51
5.1.3	Tisk prototypů	52
5.1.4	Finální návrh a výroba	57
5.1.5	Montáž.....	58
5.2	VYRÁBĚNÉ SOUČÁSTKY	60
5.2.1	Levý konec osy X.....	60
5.2.2	Pravý konec osy X	61
5.2.3	Vozík sondy	62
5.2.4	Vozík extrudéru.....	63
5.2.5	Kryt extrudéru	63
5.2.6	Držák větráků	64
5.2.7	Držák pohonu filamentu.....	65
5.2.8	Držák kladky	66
5.2.9	Spojka na ozubený řemen	66
5.2.10	Napínací matice.....	67
5.2.11	Naváděcí čep	67
5.2.12	Kontakt elektromagnetu	68
5.3	NAKUPOVANÉ SOUČÁSTKY	69
5.3.1	Spojovací materiál.....	69
5.3.2	Elektromagnety	69
5.3.3	Větráčky	70
5.3.4	Sonda.....	70
5.3.5	Krokové motory	70
5.3.6	Ložiska	71
5.3.7	Hot-end.....	72
5.3.8	Kalené tyče.....	72
5.3.9	Řemen s řemenicemi	73
5.3.10	Ostatní nakupované díly.....	73
6	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROJEKTU.....	74
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	75
	ZÁVĚR	77

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	78
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	82
SEZNAM OBRÁZKŮ	83
SEZNAM TABULEK.....	86
SEZNAM PŘÍLOH.....	87

ÚVOD

Celou svou dlouhou historií provází lidstvo také touha po objevování, poznání a sebezdokonalování. S rostoucím poznáním jde ruku v ruce také nástup dokonalejších technologií. Od doby, kdy pazourkový pěstní klín vystřídal první kovový nástroj uplynula dlouhá cesta. Nyní na téhle cestě poznání stojíme my, obklopeni všemi těmi neuvěřitelnými vynálezy, kterým říkáme dnešní svět.

Za každým vynálezem však stojí roky tvrdé práce a vývoje. Teprve poté můžeme vyrobit první prototyp, až následně po jeho testování a upravování ho můžeme pustit do výroby. A právě fáze výroby prototypu je klíčová. Často je takový prototyp vyráběn zcela odlišným způsobem než samotný finální výrobek, který později pochází ze sériové výroby. Důvodů k použití odlišné technologie výroby může být více, avšak nejdůležitější vždy byla rychlost výroby a její cena. Prvního aspektu bylo dlouho dosahováno úspěšně avšak na úkor nesplnění aspektu druhého – ceny.

Výroba prototypů byla vždy velmi nákladná. Nyní, po nástupu technologie 3D tisku, konečně můžeme první, často plně funkční prototypy, vyrábět velmi rychle a levně. Už samotný původní název technologie, Rapid Prototyping – rychlé prototypování, nám říká, proč byla vyvinuta. Většina dnešních strojů používající principy této technologie, dovede vyrobit prototyp skládající se pouze z jednoho druhu materiálu. Možnost tisknout výrobky z kombinovaných materiálů, na jednom stroji, bez složitých výměn součástí stroje je další krok, jak tuto technologii zdokonalovat.

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem prototypu zařízení, které by dokázalo tisknout jeden výrobek ze dvou druhů materiálu, a přitom aby toto zařízení bylo kompatibilní s již existujícím modelem tiskárny. V teoretické části je popsána historie, princip a využití technologie 3D tisku, projekt RepRap, který zpřístupnil a rozšířil 3D tisk, a nakonec jsou popsány aktuální trendy v řešení tisku prototypů skládajících se z více materiálů.

Praktická část se zabývá samotnou konstrukcí a výrobou daného zařízení. Jsou zde jednotlivě popsány komponenty, ze kterých je zařízení složeno.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping (RP) je obecný název pro skupinu technologií, díky kterým je možné vyrábět prototypy za pomoci aditivních technologií. Jedná se o metodu, která je zavedena v průmyslu již spoustu let, avšak až v posledních desetiletích zažívá rychlý rozvoj. Díky technologii výroby pomocí aditivních technologií jsme schopni rychle vyrábět první funkční prototypy, jednotlivé díly ale i cele sestavy funkčních součástí. Oproti konvenčním metodám výroby jako je obrábění, kdy z polotovaru postupně ubíráme materiál až do doby, kdy získáme požadovaný tvar, nebo tváření u kterého probíhá tváření polotovaru za působení tlaku a často i teploty, tak princip aditivních technologií spočívá ve tvorbě jednotlivých vrstev, ze kterých je postupně vytvořen celý dílec. Tento proces je často také označován jako 3D tisk. Metody 3D tisku výrazně zkracují kompletaci a dobu vývoje daných výrobků. [1;2]

Na počátku procesu výroby součástky metodou 3D tisku je CAD model. CAD je zkratka z anglického *Computed Aided Drawing* (počítačem řízené kreslení). Tenhle model můžeme získat jak vlastním návrhem v CAD programu, tak i naskenováním již existující součásti za pomoci 3D skeneru. Následně je třeba model převést na typ soubor typu .stl (zkratka z anglického *Stereolithography* – stereolitografie) a ten nahrát do příslušného softwaru, ve kterém dojde k nasimulování pohybu a procesních podmínek 3D tiskárny. Dalším krokem už je samotný tisk, kterým získáme hotový výrobek (ten je možné následně v případě nutnosti mechanicky dokončit konvenčními metodami. [1;2]



Obr. 1 Proces výroby dílce metodou 3D tisku [3]

1.1 Historie 3D tisku

Historicky první zmínka o metodě zakládající se na principu 3D aditivních technologií je z roku 1890, kdy E. J. Blather vyrobil formu pro topografickou mapu slepením jednotlivých voskových desek. Výšková vzdálenost jednotlivých vrstevnic byla určena výškou jedné voskové desky. Technologie se poté nadále rozvíjela. [2]

V průmyslovém světě je 3D tisk využíván už po desítky let, ale s prvním patentem v této oblasti přišel až v roce 1984 Charles W. Hull, kdy se zabýval povlaky odolnými UV záření. Povlaky z kapalné pryskyřice byly vytvrzovány UV světlem. Díky tomu došlo k síťovací reakci. Takto vznikla stereolitografie (SLA). [2,4]

V roce 1989 přišla společnost Scotta Crumpa další aditivní technologií, jejíž cílem bylo usnadnit výrobu prototypů. Jednalo se o metodu FDM (Fused Deposition Modeling) s níž zároveň vznikly další technologie jako ABS vlákno. Po získání patentu založil Scott Crump společnost Stratasys, která je v dnešní době největším výrobcem 3D tiskáren. [4]

Paralelně s vývojem SLA a FDM technologií, dochází k vývoji dalších aditivních metod. V roce 1980 na univerzitě v Austinu bylo vyvinuto Dr. Carlem Deckardem a Dr. Joem Beamanem selektivní laserové sintrování (SLS). Tuto technologii koupila v roce 2001 společnost 3D Systems, zabývající se metodou SLA. [2;4]

Otevření trhu s domácími 3D tiskárnami předcházelo vypršení patentu na technologii FDM společnosti Stratasys v roce 2009. To umožnilo vznik projektu RepRap. [4]



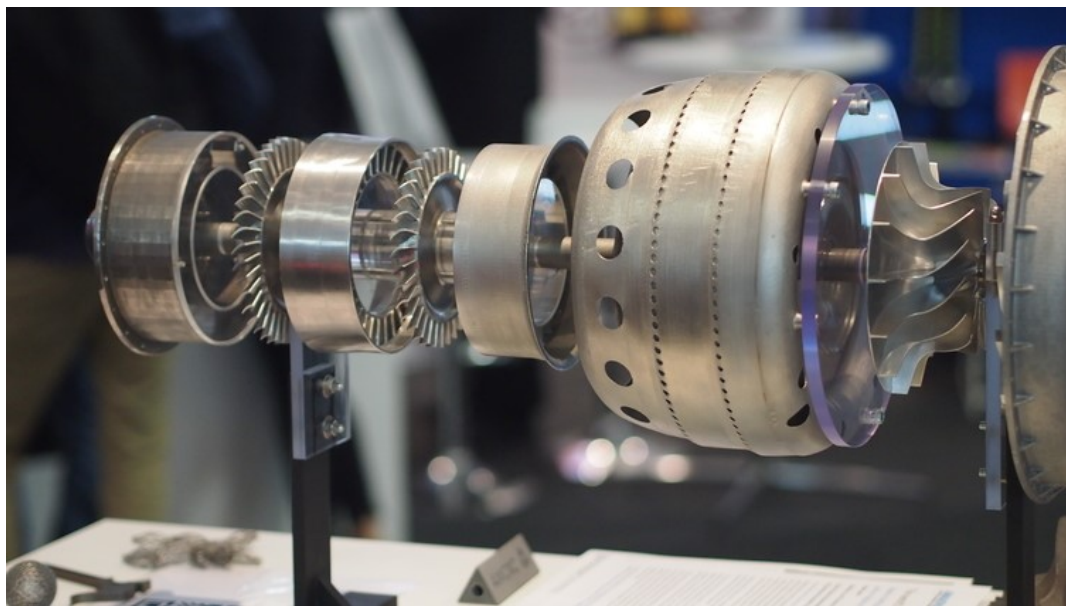
Obr. 2 Scott Crump, vynálezce metody FDM [5]

1.2 Použití 3D tisku

V dnešní době se použití 3D tisku promítá do všech významných odvětví. Jedná se převážně o strojírenský, automobilový, vojenský a letecký průmysl, medicínu, architekturu, reklamu, design a módu až po domácí použití. Trend užití této technologie je rostoucí.

1.2.1 Průmysl

3D tisk má v dnešní době v průmyslu již nenahraditelnou pozici. Jedná se převážně o obtížně vyrobitelné či jinak nevyrobitelné dílce či celé sestavy. Pomáhá zrychlovat a zlevňovat kusovou výrobu, výrobu malých sérií a prototypů. Velký význam je věnován 3D tisku z kovových materiálů. Ten je používán pro výrobu konformního chlazení u forem pro lisování plastů, dílů pro letecký a kosmický průmysl kde se uplatňuje hojně při výrobě sestav proudových motorů či palivových systémů. Je možné také použití při výrobě náhradních dílů, či při repasování za pomoci reverzního inženýrství. [4,6]



Obr. 3 První funkční proudový motor vyrobený metodou 3D tisku [7]

1.2.2 Medicína

V medicíně je využíváno potenciálu 3D tisku z důvodu velké míry přizpůsobení. Díky tomu je možná specifická optimalizace dle potřeb pacienta. Vznikají tak přesně na míru dělané implantáty, umělé klouby, protézy a různé zdravotní pomůcky. Tomu obvykle předchází skenování, na jehož základě vznikne CAD model identických tvarů a rozměrů jako originální předloha. [4;6]



Obr. 4 Protéza vytisknutá na 3D tiskárně [8]

1.2.3 Architektura

V architektuře je převážně využíváno 3D tisku k výrobě modelů budov a návrhů pro prezentaci. Díky tomu je možné snadno simulovat dojem z celé zástavby. V budoucnu je velký potenciál v tisku celých a prvků budov včetně rozvodů. Dále lze najít uplatnění v konstrukci budov z vytištěných prefabrikátů. Agentura NASA se zabývá možností využití těchto metod při stavbě základů na Měsíci a Marsu. [4]



Obr. 5 Architektonický model vyrobený metodou 3D tisku [6]

1.2.4 Móda, šperkařství, design

Velké využití má 3D tisk ve šperkařství, kde slouží k tisku voskových modelů potřebných k tvorbě formy pro odlití daného šperku. Materiálem pro tisk těchto modelů bývá nejčastěji vosk, které lze následně snadno vytavit. 3D tisk se také začíná promítat do módy, kde se prosazuje při výrobě bot a futuristických módních produktů. Stále větší uplatnění můžeme najít i při výrobě různých zdobných předmětů, od nástěnných ozdob, přes věci denní potřeby až po designové vázy, skulptury a modely.



Obr. 6 Designové vázy vytisknuté metodou FDM [9]

1.2.5 Domácí použití

Díky projektu RepRap se stala technologie FDM daleko dostupnější, a pronikla mezi širokou společností. Díky ní vznikly internetové databáze plné modelů přichystaných přímo pro tisk. Nejčastěji se jedná o drobné předměty denního užití, designové prvky do domácnosti. Obsahují ovšem také velké množství modelů různých náhradních dílů pro drobné domácí spotřebiče, automobily a samotné 3D tiskárny. Kombinace zpřístupnění technologie FDM, a nízké ceně jednodeskových počítačů typu Arduino a RaspberryPi dala navíc příležitost k rozšíření různých počítačem řízených amatérsky vyráběných jedno či více účelových strojů, robotických manipulátorů a dronů.



Obr. 7 Dron zcela vytisknutý na 3D tiskárně [10]



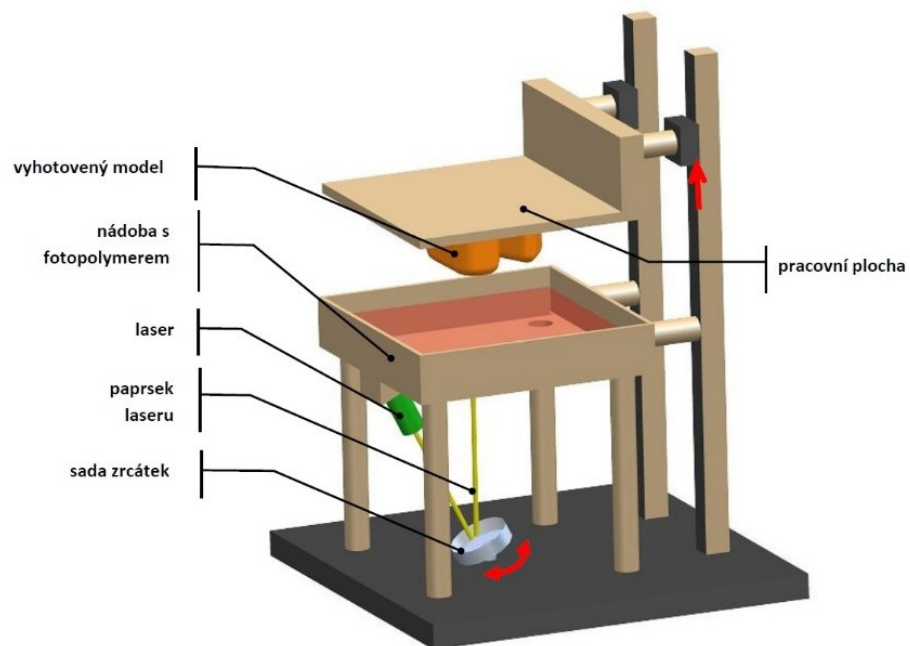
Obr. 8 Stojan na pera [41]

1.3 Metody 3D tisku

Pojmem „3D tisk“ se označuje celá škála aditivních technologií. Mezi nejvýznamnější patří bezesporu FDM (Fused Deposition Modeling) a SLA (Stereolitography).

1.3.1 Stereolithography – SLA

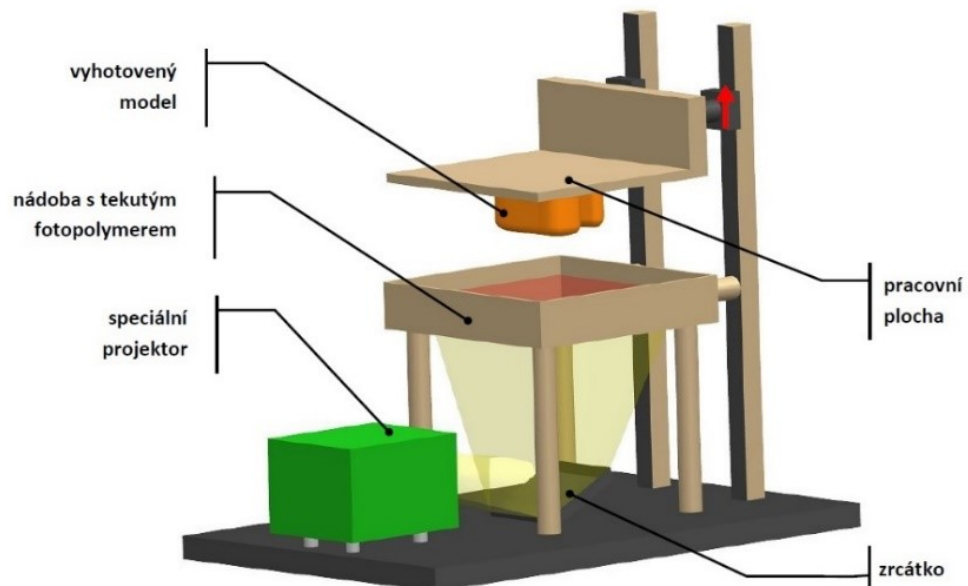
SLA je aditivní metoda postupného vytvrzování fotopolymeru UV laserem. Pracovní stůl je uložen v nádobě naplněné tekutým fotopolymerem. Celý výsledný výrobek se skládá z jednotlivých 2D vrstev tloušťky 0,05 – 0,15 [mm]. Po vytvrzení jedné vrstvy se stůl ponoří do kapaliny fotopolymeru o hodnotu tloušťky vrstvy. Tento proces se opakuje, dokud není výrobek zhotoven. Výhodou této metody je možnost zhotovovat i objemnější výrobky při zachování dostatečné přesnosti. Nevýhodou je nutnost odstraňovat podpory, a sušit výsledný výrobek. SLA nejčastěji nachází uplatnění v automobilovém průmyslu a při výrobě forem pro lití a vstřikování. [11]



Obr. 9 Princip SLA [12]

1.3.2 Digital Light Processing – DLP

Jedná se o stejný proces jako u metody SLA, jediný rozdíl je ve způsobu vytvrzování tekutého fotopolymeru. Zatímco u metody SLA dochází k vytvrzení za pomoci UV laseru, u metody DLP vytvrzuje jednotlivé vrstvy digitální projektor. Jelikož je projektor digitální obrazovka, tak se obraz každé vrstvy skládá z drobných čtvercových pixelů – voxelů. Celá vrstva je tedy tvořena malými čtverci. Díky tomu je DLP metoda vhodná k tisku velmi malých objektů nebo rychlému tisku velkých součástí s malými detaily, zatímco SLA je upřednostňována v případě, že je nutné vytisknout velmi detailní objekty. [13]

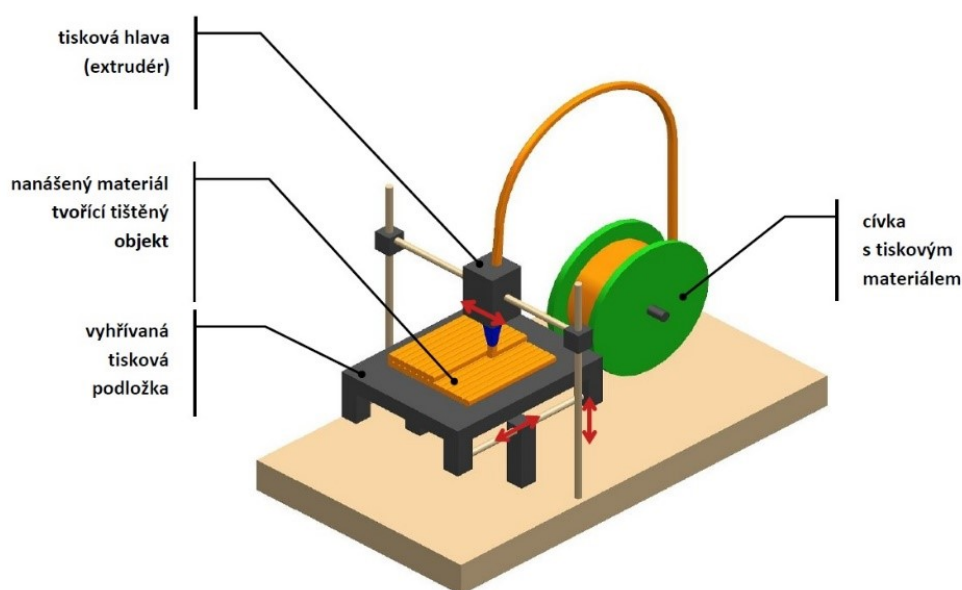


Obr. 10 Princip DLP [12]

1.3.3 Fused Deposition Modeling – FDM

Jedná se o jednu z nejrozšířenějších metod 3D tisku, a také jednu z nejpobulárnějších mezi širokou veřejností. Materiál bývá navinout formou struny do cívky, ze které je pomocí podávacího zařízení odvíjen a podáván k tavící hlavě. Tavící hlava a pracovní stůl vykonávají dohromady pohyb ve 3 osách. Hlava nanáší roztavený materiál formou tenkých vrstev na pracovní stůl. Vždy po dokončení jedné vrstvy se hlava zvedne (nebo stůl klesne) o hodnotu tloušťky vrstvy, a proces se opakuje. Vzniká tak výtisk skládající se z mnoha vrstev. Obvyklá doba tisku se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek hodin, záleží na složitosti a

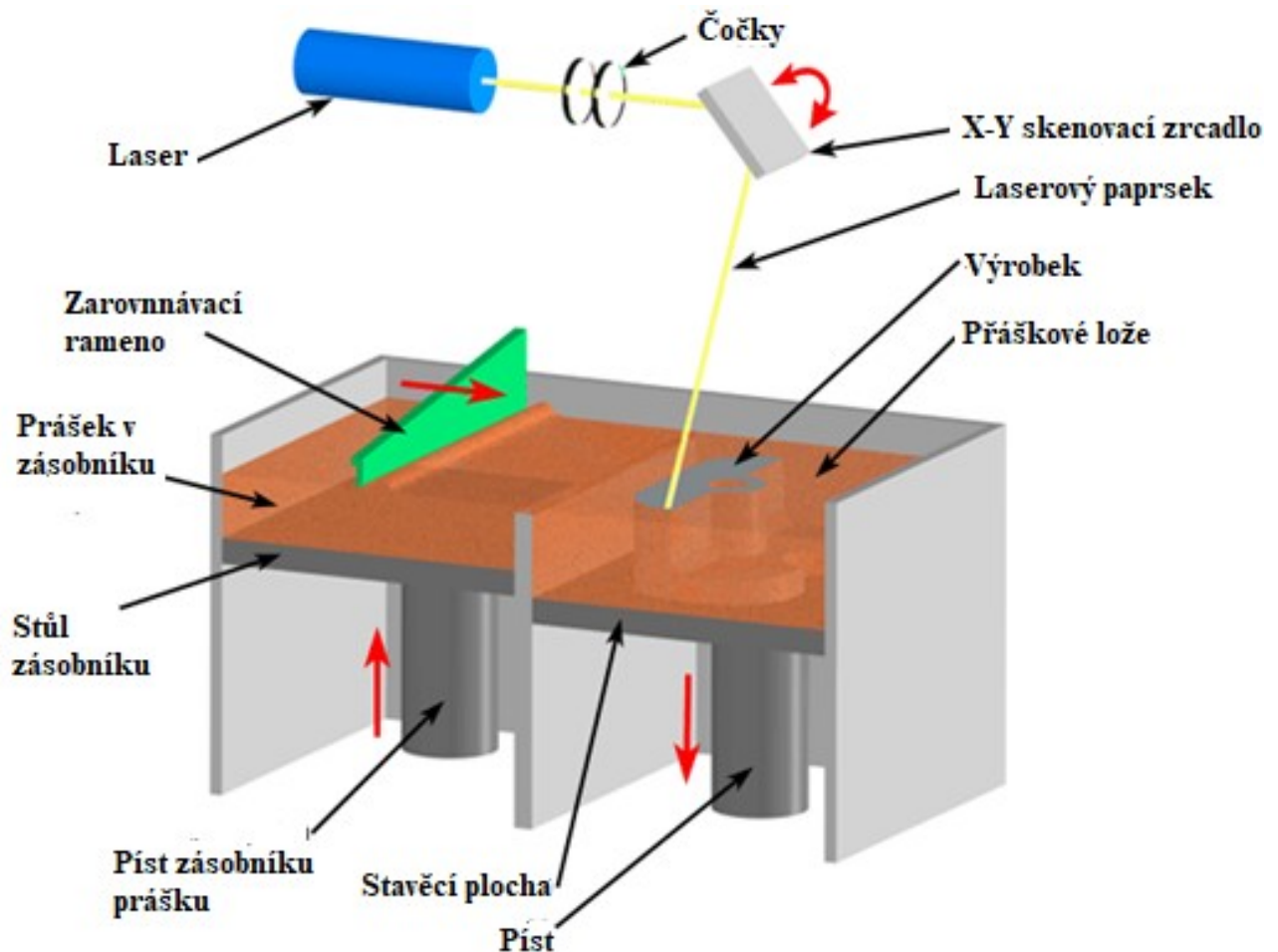
velikosti výtisku. Čas potřebný k tisku je také silně ovlivněn výškou vrstvy, která lze obvykle nastavit. Dnes se velikost jednotlivého kroku u běžných tiskáren pohybuje v rozmezí mezi 0,3 [mm] a 0,05 [mm]. Čím je vrstva tenčí, tím déle pak tisk trvá ale je detailnější. Metoda FDM využívá jednoho nebo více materiálů. Díky této možnosti může vzniknout vícebarevný model, model skládající se z několika materiálů nebo může být jeden materiál použit na stavbu podpor. Použitelných materiálů na výrobu filamentu pro tisk metodou FDM je dnes velké množství. Mezi nejhojněji používané patří ABS, PLA, PETG, PA a mnohé další. [14]



Obr. 11 Princip FDM [12]

1.3.4 Selective Laser Melting – SLM

Princip metody SLM spočívá v laserovém natavování kovového prášku, kdy je ze zásobníku dávkovačem připravena jedna vrstva a ta je následně laserem natavena. Tavenina velmi rychle chladne a celý cyklus se opakuje. Celý proces je pečlivě monitorován. Takto vznikne celá součást, která se dá dále opracovávat konvenčním způsoby obrábění. Metodou SLM lze vytvářet velmi kvalitní a detailní výrobky s jemným povrchem. Velké uplatnění má tato metoda při výrobě implantátů. [15,16]



Obr. 12 Princip SLM [17]

1.3.5 Electron Beam Melting – EBM

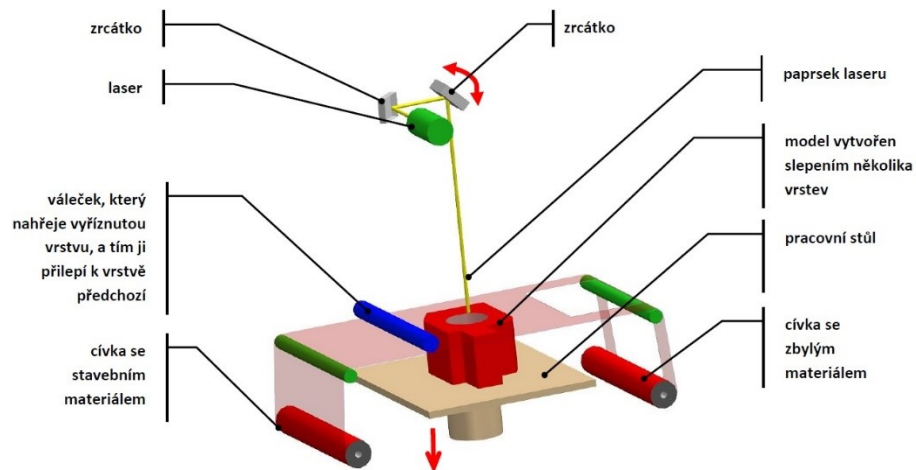
Metodu EBM vyvinula švédská firma ARCAM. Jedná se principiálně o velmi podobnou metodu jako je SLM, která také zpracovává kovový prášek. Firma ARCAM však přišla s odlišným způsobem natavování, a to pomocí elektronového paprsku. Celý tisk probíhá ve vakuu při teplotě 1000 °C. Díky těmhle podmínkám se dá eliminovat vznik vnitřních napětí, a dá se tak docílit lepších vlastností výtisku. Velmi zpevněného povrchu je dosaženo přesně řízeným chlazením součástí. Nejčastější využití metody EBM je při zpracování slitin kobaltu, chromu a titanu, které mají využití jak v lékařství, tak leteckém průmyslu. [16,18]



Obr. 13 Princip EBM [19]

1.3.6 Laminated Object Manufacturing – LOM

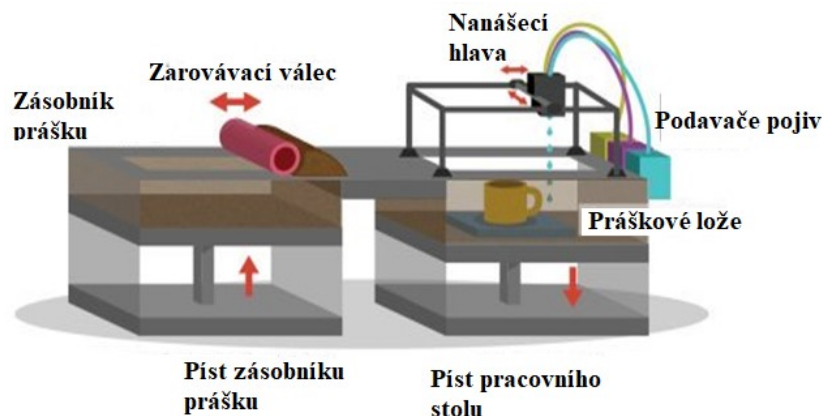
Metoda LOM spočívá v postupném vrstvení listu papírů nebo fólií (nejčastěji polyamid nebo polyester) na sebe. Při tisku metodou LOM není nutno generovat podpory, protože postupně zhotovovaný model je stále obklopen okolním materiálem. Fólie, z jedné strany opatřena přilnavou vrstvou bývá odvíjena z role. Po nanesení vrstvy je fólie přitlačena lisem za působení teploty a ořezána laserem dle obrysu modelu. Z důvodu snadnějšího odstraňování okolního materiálu, bývá nařezán laserem na hrubší síť jednotlivých kvádrů. Takto zhotovená součást se odstraní z podkladové desky a je připravena na dokončovací operace. Mezi ty často spadá pokrytí povrchu součásti silikonovým nástřikem, aby neabsorbovala vlhkost. Největší uplatnění nachází tato metoda při vizuální prezentaci, výrobě vytavitelných modelů nebo prototypování nástrojů metodou vakuového lití do silikonového kaučuku. Velkou výhodou této metody je že jako vstupní materiál lze použít v podstatě jakýkoliv polymer vyráběný formou fólií. [18]



Obr. 14 Princip LOM [12]

1.3.7 Binder Jetting – BJ

Binder Jetting neboli metoda lepení prášku kapalným pojivem vznikla v roce 1993. Metoda spočívá v nanášení prášku na pracovní stůl za pomoci nivelačního válce. V dalším kroku se nanese pojivo pomocí tiskové hlavy do přesně definovaných míst, což způsobí slepení stavebního materiálu. Poté základní stůl klesne o tloušťku vrstvy a je nanesená nová vrstva prášku a celý proces se opakuje, dokud není součást hotová. Poté se odstraní přebytečný prášek, který se recykluje, a působením tepla se odstraní pojivo. V posledním fázi dojed ke slinutí materiálu a případné povlakování či impregnace. Jako materiál bývá použit kovový nebo keramický prášek, písek či sádra. Používá se k výrobě funkčních součástí, které bylo dosud možné vyrábět jen metodou vytavitelného modelu, k výrobě ověření funkčnosti prototypu před zavedením do výroby a tisku pískových forem. [20]



Obr. 15 Princip BJ [21]

1.4 Materiály pro 3D tisk metodou FDM

Jednou z největších výhod tisku metodou FDM je široké spektrum materiálu, které lze použít, níže jsou uvedeny ty nejčastější. Volba vhodného materiálu určuje požadované mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti daného výrobku. Dalším určujícím faktorem při výběru materiálu je také jeho cena, dostupnost a procesní podmínky materiálu shodující se s výkonem dané tiskárny. Většina běžných materiálů se vyrábí v široké škále barev, zatímco speciální materiály jsou obvykle pouze v bílé, černé nebo transparentní.

1.4.1 PLA (Polyactic Acid)

PLA neboli kyselina polylactonová – je vyráběná s bramborového nebo kukuřičného škrobu. Jedná se plně biologicky odbouratelný materiál, který je v průmyslu využíván stále častěji. Patří spolu s ABS mezi nejčastěji používané materiály metodou FDM. Jeho hlavními výhodami je převážně velmi jednoduchý tisk (ve srovnání s ABS), vysoká rozměrová stálost, nízká cena a široké spektrum vyráběných barevných variant. Hlavními nevýhodami je hlavně nízká teplotní odolnost (začíná měknout při 60 °C), nízká pružnost náchylnost na pohlcování vzdušné vlhkosti. Často používán na málo namáhané součástky, prototypy a dekorativní předměty. Ideální teplota extrudéru je 190 – 230 °C, teplota podložky 50 – 60 °C. [22]



Obr. 16 Výtisk z materiálu PLA [23]

1.4.2 ABS (Acrylonitril – Butadien – Styren)

Jedná se velmi rozšířený amorfni termoplastický kopolymer, často využívaný pro výrobu filamentu. Vyniká nízkou nasákavostí, tuhostí, mechanickou odolností. Odolává vysokým i nízkým teplotám, kyselinám olejům a hydroxidům. Z toho důvodu je využíván pro mechanicky a teplotně exponované výrobky. Hlavní nevýhodou ABS z pohledu 3D tisku je velká teplotní roztažnost způsobující kroucení a smršťování výtisku, dále špatná odolnost proti UV záření. Proto není vhodné použití tohoto materiálu pro tisk velkých dílců a výrobků pro venkovní užití. Často bývá používán, pro mechanicky namáhané součástky a funkční prototypy. Vyrábí se v mnoha barevných variantách. Teplota extruderu 220 – 240 °C, teplota podložky 80 – 100°C. [22]



Obr. 17 Výtisk z materiálu ABS [23]

1.4.3 ASA (Acrylonitrile – Styren – Acrylate)

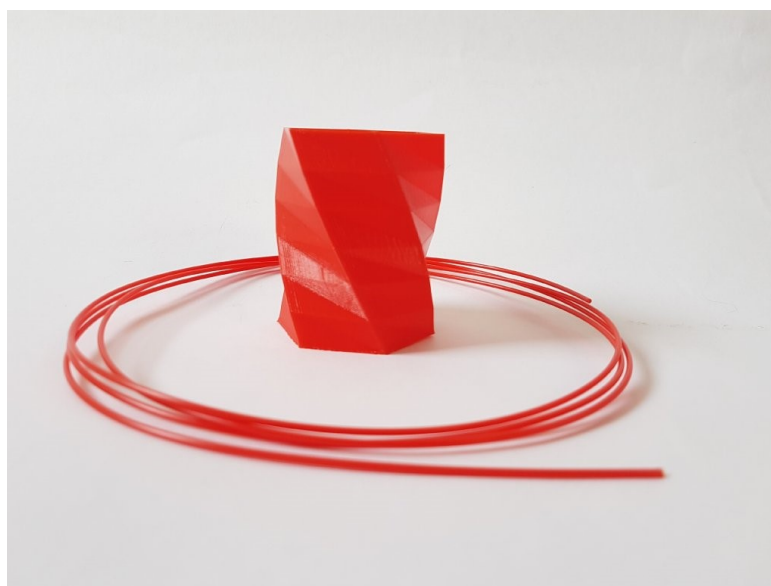
ASA byl vytvořen jako alternativní materiál k ABS. Vlastnostmi se ABS velmi podobá, má však vynikající odolnost vůči povětrnostním podmínkám a UV záření. Dále vyniká velmi nízkou hladinou žloutnutí a uceleným tiskem díky čemuž lze získat velmi detailního povrchu. Díky jeho vlastnostem ho můžeme použít na funkční součástky pro venkovní použití. Výrobky z ASA vynikají dobrou rozměrovou stabilitou. Teplota extruderu 250 – 255 °C, teplota podložky 80 – 100°C. [22]



Obr. 18 Výtisk z materiálu ASA [23]

1.4.4 PET-G (Polyethylene – Terephthalate – Glycol)

Jedná se o vylepšený materiál PET, který známe hlavně díky PET lahvám. Čisté PET vlákno je transparentní, avšak s ohřátím a ochlazováním svou transparentnost mění. PETG je mechanicky a teplotně odolný materiál, vynikající odolností vůči otřesům a vysokou tvrdostí. Častá aplikace je proto na lehké tenkostěnné výrobky vyžadující určitou pevnost. Vyrábí se v různých barevných variantách, a to jako transparentní i zcela neprůsvitný. Teplota extruderu 210 – 235 °C, teplota podložky 45 – 60°C. [22]



Obr. 19 Výtisk z materiálu PET-G [22]

1.4.5 CPE (Chlorinated – Polyethylene)

Kopolyester CPE je předurčen pro tisk funkčních prototypů a mechanicky exponovaných součástek. Jedná se o snadno tisknutelný materiál, nahrazující ABS ve spoustě aplikací bez zdraví škodlivého zápachu a s minimální deformací při chladnutí. Vyniká vyšší pevností než PLA a vyšší odolností než ABS, dále vynikající transparentností u tenkostěnných modelů a přilnavostí jednotlivých vrstev, a to i na odlišný materiál. Jedná se o modifikovaný PETG. Doporučená teplota extruderu je 255 – 275 °C, teplota podložky 70 – 80 °C. [22]



Obr. 20 Výtisk z materiálu CPE [23]

1.4.6 PA (Polyamid)

Polyamid, nebo také NYLON je velmi všestranný materiál, s vynikající odolností a adhezí mezi vrstvami. Dále vyniká nízkým součinitelem tření a vysokou flexibilitou při aplikaci v tenkých vrstvách. Jeho hlavní nevýhodou je velká absorpce vzdušné vlhkosti, jež má za následek velmi nekvalitní tisk. Z tohoto důvodu je vhodné materiál skladovat v uzavřených boxech s odvlhčovači, a před samotným tiskem materiál sušit v sušárně. Díky svým vlastnostem je vhodný na nejvíce namáhané strojní součástky, jako jsou například ozubená kola. Důležité je zamezit při tisku mostování. Polyamid má velké využití v automobilovém průmyslu díky své velké odolnosti a trvanlivosti. Teplota extruderu 235 – 260 °C, teplota

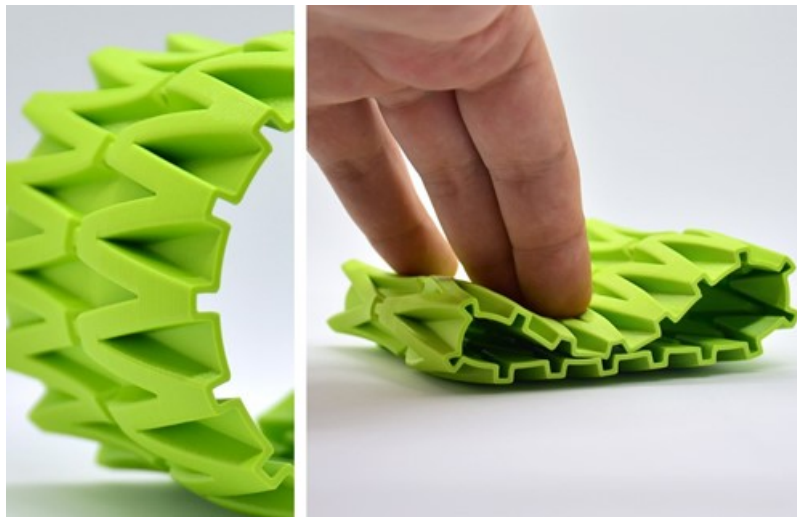
podložky 100 – 135 °C (s rostoucí teplotou podložky se zvyšuje také přilnavost vytlačované struny k podložce). [22]



Obr. 21 Výtisk z materiálu PA [23]

1.4.7 TPU (Thermoplastic Polyurethane)

Termoplastický polyuretan patří do skupiny termoplastických elastomerů. Jako jeho nejzásadnější vlastnost lze určitě vyzdvihnout schopnost návratu do původního tvaru i po výrazné deformaci. Jedná se o měkký, jemný, velmi pružný, odolný, a přesto ohebný materiál. Využití tiskové struny z TPU lze uplatnit kdekoli kde je potřeba flexibilní a ohebný materiál (například kryty na mobily, tablety), nutné je však vyvarovat se tisku drobných detailů. Doporučená teplota extrudéru se pohybuje v rozmezí 240 – 260 °C, teplota podložky 40 – 60 °C. [22]



Obr. 22 Výtisk z materiálu TPU [23]

1.4.8 PC (Polycarbonate)

Polykarbonát je materiál řadící se mezi termoplasty. Díky svým vlastnostem jej lze považovat spolu s PA mezi nejodolnější filamenty. Lze jej použít na i velmi namáhané výtisky, a to díky vysoké nárazové rezistenci. Díky dielektrickým a izolačním vlastnostem je vhodný i na tisk krytů elektroniky. Mezi další přednosti polykarbonátu patří odolnost proti tepelné deformaci (až do 150 °C), nízká hmotnost, velmi vysoká tuhost, pevnost a odolnost vůči oděru. Stejně jako PA, trpí nasákavostí vlhkosti ze vzduchu, proto je nutné jej před použitím sušit a skladovat v boxech s odvlhčovači. Často se vyrábí modifikované varianty, jako PC/ABS a PC/PBT. Doporučená teplota extrudéru je 250 – 290 °C. teplota podložky 100 – 130 °C. [22]



Obr. 23 Výtisk z materiálu PC [24]

1.4.9 Plněné filamenty

Jedná se běžné materiály jako PLA, PETG, ABS atd., které jsou plněné jiným materiálem. Může se jednat o jiný polymer, nebo také dřevěné či kovové piliny a jiné materiály. Nejčastěji se jedná pouze o změnu vzhledu a povrchu výsledného výtisku (imitace dřeva, mramoru), nebo také o úpravu vlastností (zvýšení pevnosti či pružnosti).

CARBONFILL

Přidáním uhlíkových vláken se zvyšuje tuhost a pevnost původního materiálu. Typická je kovově černé zbarvení filamentu. Firma Filament PM vyrábí filament PETG/CFJet. Jedná se PET-G plněné uhlíkovými vlákny. [25]



Obr. 24 Výtisk z materiálu Carbonfill [23]

WOODFILL

Jedná se obvykle PLA nebo ABS plněné recyklovaným dřevem. Tištěné objekty vypadají jako by měli strukturu a vůni dřeva. Dobře se brousí a dají se natírat. Mezi velké výhody patří také nízká rozměrová deformace způsobená vlivem chladnutí. Firma Fillamentum vyrábí filament s označením Timberfill. Jedná se PLA plněné dřevěnými pilinami. Vyrábí se v několika odstínech. [22,23]



Obr. 25 Výtisky z materiálu Woodfill [23]

METALFILL

Jedná se o strunu PLA vysoce plněnou měděnými, mosaznými nebo bronzovými pilinami. Podíl kovového prášku dosahuje až 80 %. Výsledný výtisk má obvykle 3x vyšší hmotnost než výrobek z čistého PLA. Díky vysokému podílu kovu mají výrobky prakticky stejné vlastnosti jako daný kov, a to jak po mechanické, tak i po vizuální stránce (výtisk vypadá jako odlitek z daného kovu). Vzhledem k tvrdosti kovových zrn je vhodné pro tisk tímto materiálem použít nerezovou trysku. Výrobcem těchto filamentů je například Leon3D, a jeho produkty jsou BRONZEFILL, COOPERFILL a BRASSFILL. [22,26]



Obr. 26 Výtisk z materiálu Cooperfill [22]

1.4.10 Podpurné materiály

V případě velmi složitých výtisků je vhodné použít podpurné materiály ze kterých jsou stavěny podpory. Tyto podpory se nemusí mechanicky odstraňovat, ale rozpouštějí se chemicky. [22]



Obr. 27 Srovnání rozpustných a mechanicky odstranitelných podpor [27]

HIPS (High Impact Polystyrene)

Houževnatý polystyrén je termoplast s kaučukovým podílem. Díky tomu je velmi houževnatý, pevný a má vynikající teplotní stálost. Často se používá na dvouhlavých tiskárnách jako podpurný materiál, a to pro že lze rozpouštět lemonsolem. Má vlastnosti více podobné k ABS, než má PVA, proto se hodí ke stavbě podpurných konstrukcí při tisku z ABS více než polyvinylalkohol. Doporučená teplota extrudéru se pohybuje v rozmezí mezi 220 – 240 °C, teplota podložky 100 – 120 °C. [22]



Obr. 28 Výtisk s podporami z materiálu HIPS [28]

PVA (Polyvinylalcohol)

Jedná se o materiál z velmi dobrou zpracovatelností, schopností tisku kvalitních detailů a dobrým vrstvením. Jedná se přírodně odbouratelný, netoxický a ve vodě rozpustný polymer. Má vysokou pružnost i pevnost v tahu. Používá se k tisku podpor, převážně při tisku z PLA nebo ABS. Doporučená teplota extrudéru je 180 – 200 °C (při 225 °C začíná krystalizovat), teplota podložky 0 – 50 °C. [22]



Obr. 29 Výtisk s podporami z materiálu PVA [28]

1.4.11 Speciální materiály

Mezi speciální materiály se řadí většinou běžné polymery modifikované tak aby danou vlastností splňovaly určitou vyšší normu v dané aplikaci. Jedná se tak například o PET-G obsahující směs speciálních aditiv mající samozhášivé vlastnosti, antistatické ABS, termosensitivní ABS měnící svou barvu v závislosti na teplotě, které je výtisk vystaven, filamenty se zvýšenou teplotní odolností, UV rezistentní, semiflexibilní a se zvýšenou odolností. Samostatnou skupinou jsou biokompatibilní filamenty, splňující přísnou evropskou normu ISO 10993-1, třídu VI dle USP. Tyto filamenty jsou určeny pro lékařské využití. [22]



Obr. 30 Příklad použití speciálního materiálu [29]

1.4.12 Materiály pro tisk ostatními metodami

Metoda FDM tiskne výrobky z polymerových strun. Ostatní metody 3D tisku však využívají například polymerových lázní, pryskyřic a vosků. Objekty lze vytvářet také spékáním kovových či keramických prášků, vytlačováním hrnčířské hlíny, betonu nebo sádry. Stále se objevují další materiály, které lze ve světě 3D tisku využít.

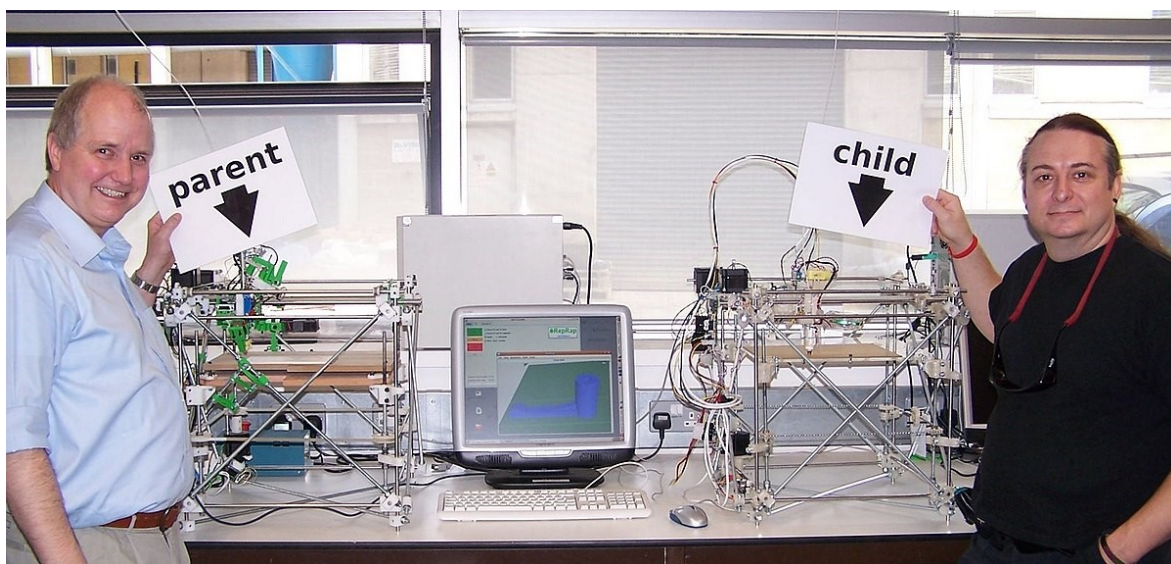
1.5 Výhody a nevýhody 3D tisku

Mezi největší výhody technologie FDM patří jednak možnost tisknout jinak nevyrobitelné nebo velmi obtížně vyrobitelné dílce, tak hlavně urychlení vývoje díky velmi rychlému prototypování. To je umožněno díky možnosti vyrábět funkční prototypy za zlomek času i ceny oproti konvenčním technologiím. Další nespornou výhodou je i možnost vizualizace návrhů a designů, a jejich následná prezentace. Nízká cena filamentu a uvolnění patentu na FDM technologie umožnila široké veřejnosti tuto technologii využívat a dále i rozvíjet. Dnes se setkáváme na specializovaných webových stránkách se statisíci 3D modely které jsou zdarma k dispozici. Velká část těchto modelů se věnuje stavbě a vylepšování 3D tiskáren což dále urychluje jejich vývoj. Díky tomu se patří metoda FDM mezi velmi rychle se rozvíjející.

I přes velké množství pozitiv, má i metoda FDM několik negativ. Mezi hlavní patří nutnost stavění podpor při tisku složitých dílců, omezená maximální velikost výtisku, která je daná velikostí tiskárny, a naopak nedostatečná přesnost při tisku drobných detailů. Spektrum materiálů, ze kterých jsou filameny vyráběny je sice velké, ale stále se nedá tisknout ze všech druhů plastů. Metoda FDM navíc přináší také možnost snadno a rychle vyrábět plně funkční neoriginální náhradní díly, což poškozuje jejich výrobce. Díky rychlosti a jednoduchosti prototypování na 3D tiskárnách vzniká také spousta nepovedených či vadných výtisků, které nesplňují dané požadavky, a tak se z nich stává odpad. Tím je zatěžováno životní prostředí. Podobný problém je i u výroby filamentu, kde recyklát stále příliš hojně nevyužívá.

2 PROJEKT REPRAP

Projekt RepRap vznikl v roce 2005 na University of Bath, pod vedením doktora Adriana Bowyera. Jedná se o open-source projekt zabývající se metodou FDM. Open source znamená že každý může postavit FDM tiskárnu, postupně vylepšovat a poté zveřejnit. Dále je kladen důraz na to, aby se tiskárny mohly z velké části replikovat sami, to znamená že obvykle všechny plastové díly, co tiskárna obsahuje je také schopna vytisknout v plně funkční podobě. Díky tomuto projektu mohlo do vývoje 3D tiskáren zasáhnout spousta odborníků tak i široká veřejnost. Výsledkem jsou 3D tiskárny zhotovitelné za několik tisíc korun, tisknoucí stejně dobře jako průmyslové tiskárny, které před pár lety stály statisíce. [2,30,31]



Obr. 31 První replikovaná tiskárna [32]

2.1 Josef Průša

Josef Průša je český konstruktér zabývající se navrhováním a stavbou 3D tiskáren již od roku 2009. Všechna jeho práce vzniká pod projektem RepRap, který je open-source, takže je volně dostupná. Dále je také zakladatelem a majitelem firmy Prusa Research s.r.o. která vyrábí a prodává FDM a SLA tiskárny a nově se zabývá i vývojem a výrobou tiskových strun, které prodává pod obchodním názvem Prusament. [31]



Obr. 32 Josef Průša se svými tiskárnami [33]

Firma Prusa Research s.r.o. je výrobcem ve světovém měřítku a s tiskárnami Prusa i3 MK2 a Prusa i3 MK2S získala řadu ocenění. Mezi nejvýznamnější patří například „Nejlepší 3D tiskárna roku 2018“ v kategorii Pracant, kde Prusa i3 MK2S získal zatím nejvyšší bodové hodnocení a to 9.3 bodu. Tuhle cenu uděluje prestižní server 3DHubs.com zabývající se novinkami ve světě 3D tisku. [34]

2.2 Prusa i3 MK2S

Jedná se o modernizovanou FDM tiskárnu Prusa i3 MK2 otevřeného designu od firmy Prusa Research s.r.o. Tiskárna má pracovní rozměry 250x210x200 [mm], což odpovídá 10500 [cm³]. Vnější rozměry jsou 420x420x380 [mm] a váha odpovídá 6,5 [kg]. Rám tiskárny je vyfrézován z duralu a povrchově upraven práškovým lakováním. Vysoká přesnost tisku je mimo jiné dosažena díky řemenům GT2 a lineárním ložiskům. Použitá RAMBo elektronika je importovaná od americké firmy Ultimachine, a jedná se o dneska nejlepší dostupnou elektroniku. Díky nové vyměnitelné trysce E3D V6 Full průměru 0,4 [mm] probíhá tisk až o 40 % rychleji oproti předchozímu modelu. Výška jedné vrstvy lze nastavit od

0,05 [mm]. Plně automatická kalibrace tikové plochy zajišťuje velmi přesný tisk. Bezúdržbová vyhřívaná více zónová podložka zajišťuje rovnoměrné chladnutí výtisku. Tiskárna podporuje tisk ze všech běžných materiálů (PLA, ABS, PETG, Nylon, HIPS, FLEX PP, WOODFILL a další). Díky velmi nízké průměrné spotřebě, (ABS 110 W/hod, PLA 70 W/hod) je tiskárna velmi ekonomická. [35]



Obr. 33 Prusa i3MK2S [35]

2.3 Prusa i3 MK3

Prusa i3 MK3 je poslední generace FDM tiskárny od výrobce Prusa Research s.r.o. Konstrukcí vychází z předchozí generace Prusa i3 MK2S, je však vylepšena o řadu inovací:

- **Vyměnitelné tiskové pláty** – speciální magnetická podložka MK52 ukrývá vysoko-teplotní magnety které drží vyměnitelné ocelové pláty na místě. Ty jsou opatřeny oboustranným PEI povrchem, který zaručuje vysokou přilnavost materiálu k tiskové ploše.
- **Tuhost rámu** – díky přepracované ose Y z hliníkového rámu se zvýšila tuhost celé tiskárny

- **Rychlejší a tišší tisk** – jsou použity nové drivery Trinamic 2130 a větrák Noctua, díky tomu se v tichém režimu stává tiskárna Prusa i3MK3 tišší než 99 % ostatních tiskáren. Rychlost tisku se zvýšila na 200 mm/s.
- **Hlídaní přívodu energie** – díky speciálnímu senzoru dovede tiskárna zaznamenat výpadek přívodu proudu, okamžitě vypnout vyhřívání extrudéru i podložky a díky tomu lze po obnovení dodávky elektrického proudu v přerušném tisku pokračovat.
- **Senzor filamentu** – sleduje přítomnost a pohyb filamentu. Dokáže zaznamenat zaseklý nebo docházející filament a následně upozornit na problém.
- **Detekce posunutých vrstev** – nová základní deska EINSY RAMBo zvládá detekci posunutí vrstev. Díky tomu se zvyšuje komfort uživatele a spolehlivost tiskárny.
- **Extruder Bondtech** – extruder je vylepšen od dvojicí podávacích koleček od firmy Bondtech. Ty vytlačují filament z obou stran, díky tomu se zvýší vytlačovací síla, a to vede ke spolehlivějšímu tisku.
- **Sonda P.I.N.D.A. 2** – sonda dovede díky novému termistoru detekovat teplotní drift, díky čemuž je vždy zajištěna poloha první vrstvy.
- **Tryska E3D V6** – celokovová tryska vyniká spolehlivostí při vysokých teplotách, a tak zaručuje vysoký výkon tiskárny. [35]



Obr. 34 Prusa i3MK3 [35]

3 MULTIMATERIAL

Většina 3D tiskáren založených na metodě FDM je konstruována tak že má jen jednu tiskovou hlavu, do které je zaveden jen jeden filament. To vede k tomu že lze tisknout podpory jen ze stejného materiálu, z jakého je samotný výrobek. Tento typ podpor nelze nijak vyprat, musí se mechanicky odstranit. Další nevýhodou této konstrukce tiskáren je že lze tisknout vícebarevný výtisk jen po vrstvách. To znamená že je v určité části tisku nutné vyměnit stávající filament za filament jiné barvy, vytisknout několik vrstev a poté opět filament vyměnit. Díky tomu nelze docílit prolínání barev na výrobku, ani docílit efektivního tisku součástky skládající se z více materiálů (např. atypický tlumící prvek s tuhou základnou z ABS a tvarovou tlumící částí z TPU). Kvůli řešení této problematiky vznikla spousta návrhů, některé jsou již dokončené, jiné se stále vyvíjejí.

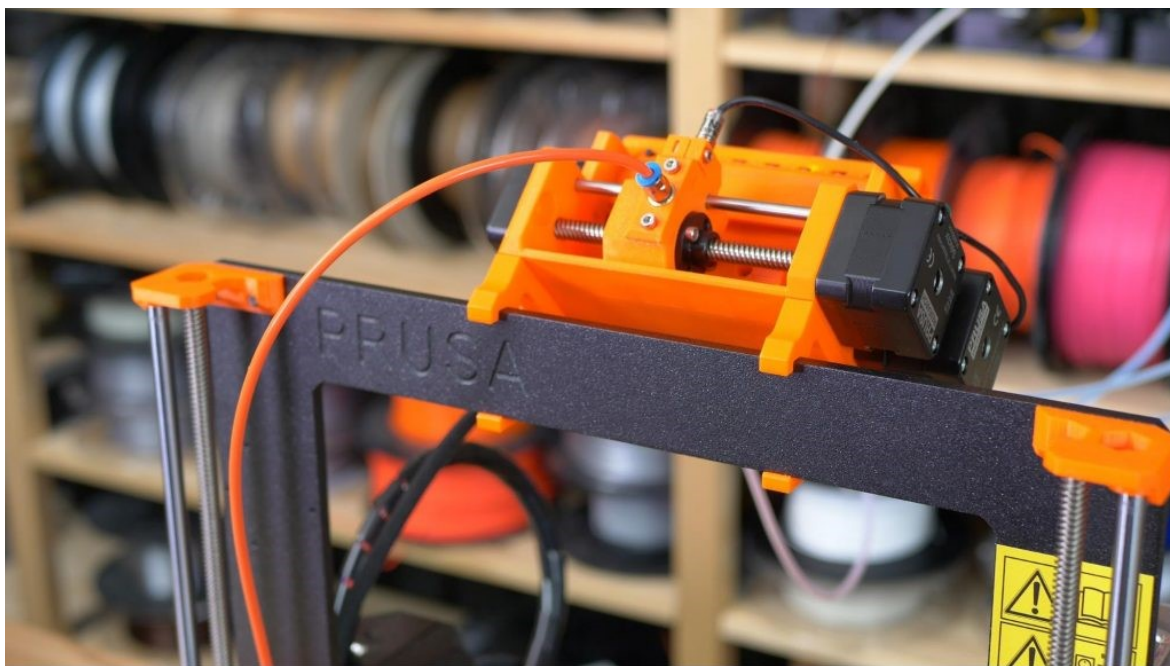
Obecně lze tuto problematiku řešit dvěma odlišnými přístupy:

- **Každý filament má svůj extrudér a svou vylačovací trysku** – výhodou je možnost tisku ze dvou různých materiálů na jednom výtisku (každou trysku jde samostatně regulovat na potřebnou teplotu), odpadá nutnost stavět čistící věž, ale problémem bývá zmenšení tiskové plochy kvůli větším rozměrům hlavy a kalibrace všech trysek na stejnou vzdálenost od tiskové podložky.
- **Všechny filameny jsou podávány do jedné společné vylačovací trysky** – hlavní výhodou je kompaktnost hlavy která neovlivňuje velikost tiskové plochy a možnost tisku jednoho modelu až například z pěti prolínajících se barev. Nevýhodou je nutnost stavět čistící věž kde se při výměně filamentu vytlačí zbytek starého filamentu a barva se vyčistí. Tuhle metodou lze tisknout vždy jen jeden druh materiálu, protože hlava je vyhřívána na jednu konstantní teplotu, která je na začátku nastavena. Lze tedy tisknout model z PLA, na kterém se vyskytuje pět různých barev.

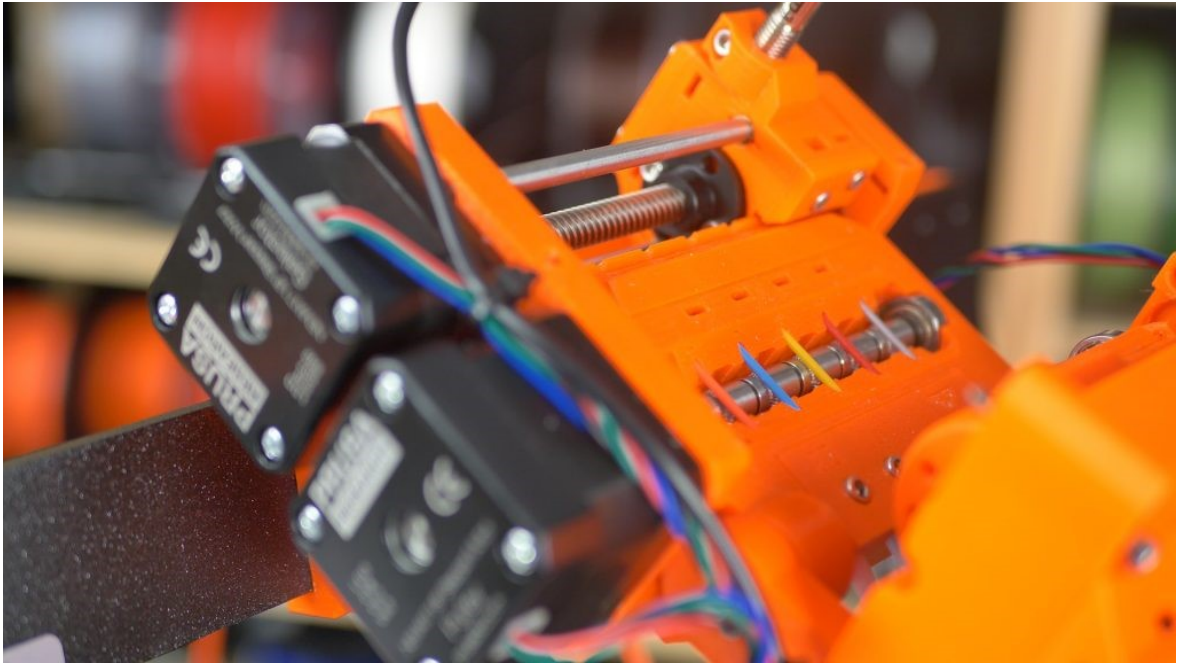
3.1 Multimaterial Prusa

Firma Prusa Research s.r.o. přišla s produktem Multi Material Upgrade 2.0 (MMU 2.0) pro svou tiskárnu Prusa i3 MK3. Jedná se druhou generaci vylepšení tiskáren Prusa. Využívá princip tisku z pěti materiálů z jedné vylačovací hlavy. Na rozdíl od MMU 1.0 (první generace), není podávání filamentu řešeno bodnovým systémem ale hybridním systémem pomocí jednoho motoru extruderu. Nová sonda kontroly zavedení filamentu

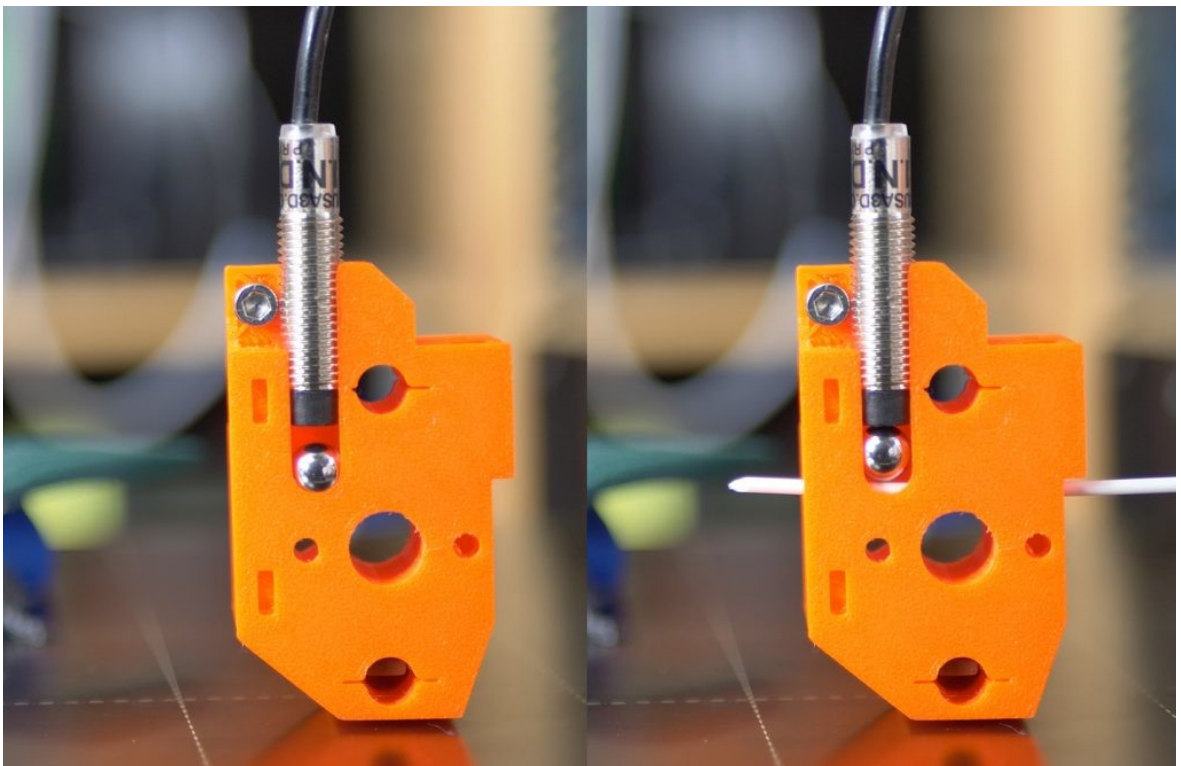
F.I.N.D.A je po celou dobu v kontaktu s filamentem a okamžitě upozorňuje na výskyt případného problému se zaváděním, průchodem či docházejícím filamentem. Velkou výhodou MMU 2.0 je jednoduchost konstrukce a možnost odinstalace či instalace v celého modulu v krátkém čase pro případ jen občasné potřeby barevného tisku. Hlavní nevýhodou je nutnost stavby čistící věže kde se vytlačuje starý materiál při výměně barvy, aby došlo k vyčištění trysky. Tato věž může v některých případech dosahovat až dvojnásobné váhy jako samotný výtisk. Tímto dochází k velkému plýtvání materiálu. Doporučovaný software Slic3r Prusa Edition je velmi povedeným rozhraním pro nastavování tisku s MMU 2.0. Podporuje také tvorbu vypratelných, či kombinaci standartních a vypratelných podpěr. Celkově se jedná o jediný oficiálně prodávaný a podporovaný modul pro barevný tisk na tiskárny Prusa. [35]



Obr. 35 MMU 2.0 umístěné na horním rámu tiskárny [36]



Obr. 36 Detailní pohled na MMU 2.0 [36]



Obr. 37 Sonda F.I.N.D.A.[36]

3.2 Typy vytlačovacích hlav

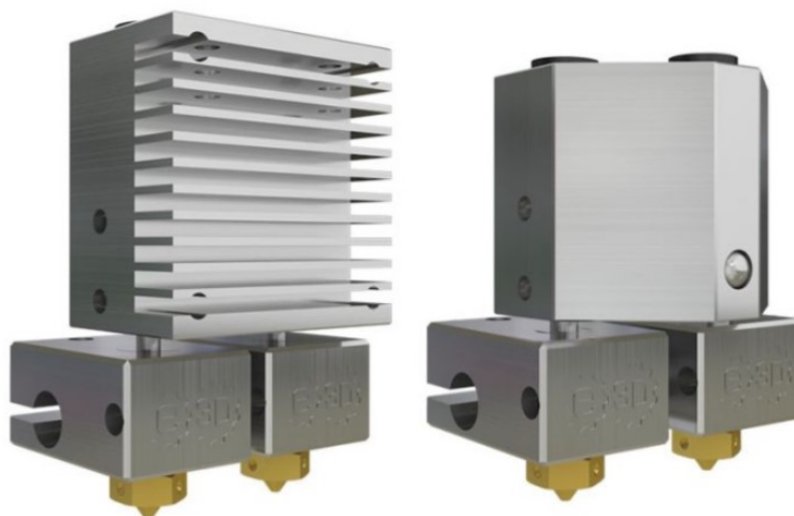
Existuje mnoho konstrukcí vytlačovacích hlav pro vícenásobnou extruzi. Firma E3D se mimo jiné zabývá výrobou a prodejem několika vícenásobných vytlačovacích hlav, které spadají mezi světovou špičku. Jedná se o modely Chimera, Cyclops a Kraken. [37]

3.3 Vytlačovací hlava Chimera

Vytlačovací hlava Chimera od firmy E3D je konstruována pro tisk dvěma materiály. Každý materiál je vytlačován samostatnou tryskou. Při vytlačování nedochází k míchání materiálů v hlavě, proto není nutné stavět čistící věž. Každý materiál je nahříván samostatně na svou teplotu. Celá hlava včetně trysek je navržena pro filament tloušťky 1,75 mm. Vyrábí se v provedení se vzduchovým i vodním chlazením. [37]



Obr. 38 Princip vytlačovací hlavy Chimera [37]



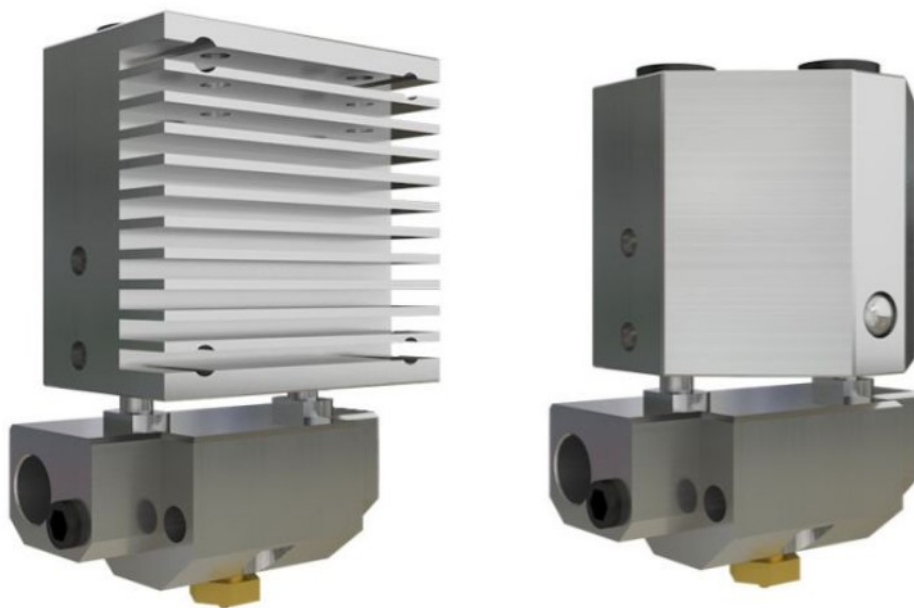
Obr. 39 Vytlačovací hlava Chimera [37]

3.4 Vytlačovací hlava Cyclops

Dalším produktem firmy E3D je vytlačovací hlava Cyclops, která vytlačuje dva filameny jednou tryskou. V hlavě dochází k míchání materiálů, proto je nutné čistit trysku při změně filamentu pomocí stavby čistící věže. Hlava je schopna vytlačovat filament o průměru 1,75 mm. Vyrábí se ve dvou variantách, a to se vzduchovým a vodním chlazením. [37]



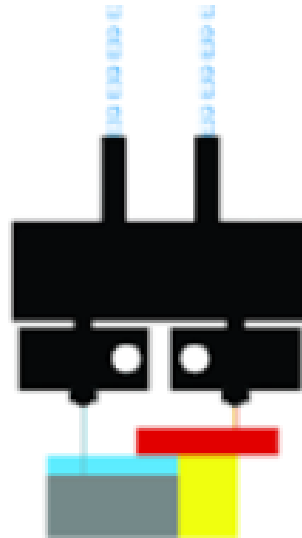
Obr. 40 Princip vytlačovací hlavy Cyclop [38]



Obr. 41 Vytlačovací hlava Cyclop [37]

3.5 Vytlačovací hlava Kraken

Největší vytlačovací hlavou pro multiextruzi od firmy E3D je model Kraken. Jedná se o hlavu s podporou tisku ze čtyř materiálů, vytlačovaných ze čtyř samostatně vyhřívaných trysek. Jeho velkou výhodou jsou rozměry, které i při použití na menší tiskárně nezmenšují příliš pracovní plochu. Vyrábí se v jedné variantě, a to vodou chlazené s tryskami pro filament o průměru 1,75 mm. [37]



Obr. 42 Princip vytlačovací hlavy Kraken [38]



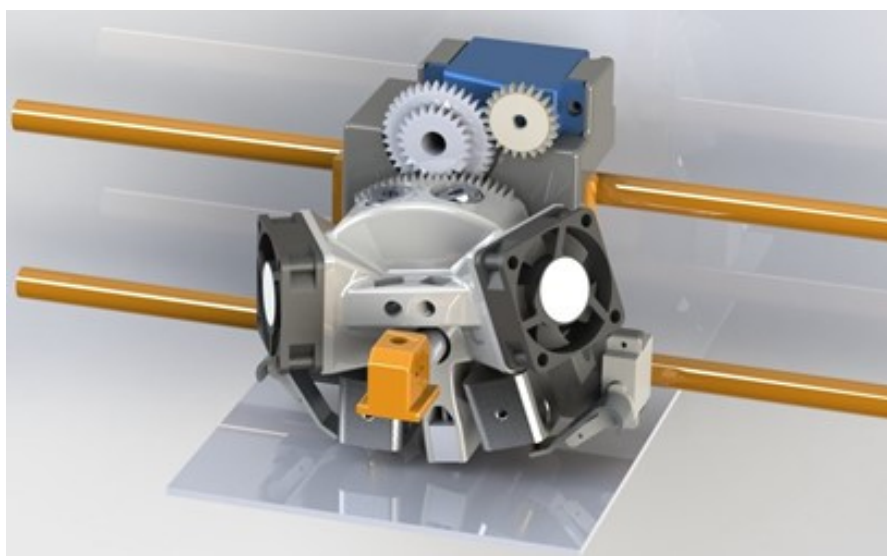
Obr. 43 Vytlačovací hlava Kraken [37]

3.6 Výměnný extrudér

Jedná se o nepříliš rozšířenou metodu násobné extruze, při níž dochází k výměně extrudéru při každé změně materiálu nebo barvy. Využívá se nejčastěji při potřebě tisknout jeden výtisk ze dvou nebo třech materiálů. Hlavní výhodou je absence stavby čistící věže a zachování velikosti tisknutelné plochy. Na druhou stranu konstrukce výměnných extrudérů bývá mnohem složitější, obsahující často více pohonů a pohyblivých mechanismů u kterých je kladen důraz na vysokou přesnost a polohování. Obvykle jsou struny filamentu do extrudéru zaváděny za pomoci bovdenů. Použití přímého pohonu struny obvykle není možné kvůli zástavbě a velikosti. Existuje více konstrukčních řešení, obecně je lze však rozdělit na dvě skupiny:

3.6.1 Switching extruder

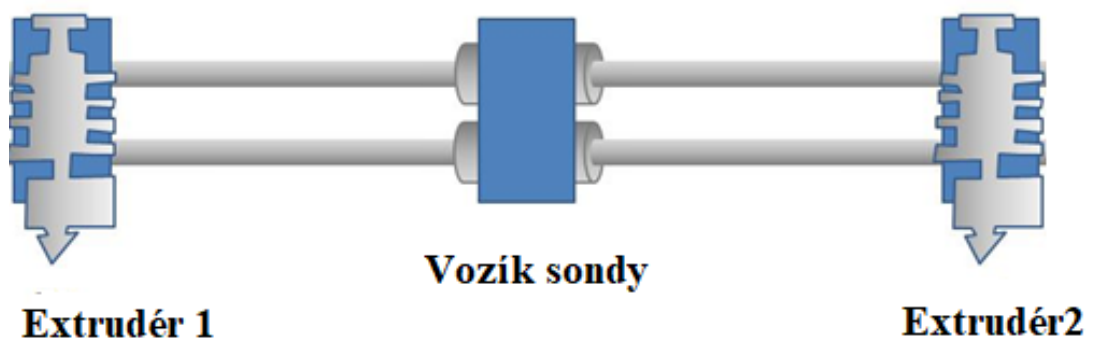
Při konstrukci tohoto typu lze mít na jedné tiskové hlavě obvykle dva nebo tři extrudéry které jsou uchyceny v držáku, který je spojen s vozíkem na ose pomocí čepu. Na vozíku je také umístěn pohon pro polohovací zařízení, krokový motor, na jehož hřídeli je ozubené kolo – pastorek. Pastorek zabírá s ozubeným kolem umístěným na držáku extrudérů. Nejedná se obvykle o kolo se záběrem 360°, ale o ozubený hřeben, který je stočen do oblouku. Jeho rozsah závisí na počtu extrudérů. Pro dva extrudéry stačí obvykle úhlový rozsah ozubení okolo 90° pro tři je zapotřebí hřeben s rozsahem pohybu pootočení o 120° až 150°.



Obr. 44 Switching extruder [39]

3.6.2 Parking extruder

Konstrukce tohoto typu výměnných extrudérů jde zcela jinou cestou. Tenhle typ řešení lze uplatnit jen pro tisk dvěma materiály. Hlavní výhodou je téměř úplné zachování původní velikosti tiskové plochy. Princip parkujících extrudérů spočívá ve třech samostatných vozících na jedné ose. Krajní vozíky s extrudéry jsou zaparkované na konci osy a mezi nimi je vozík se sondou. Během tisku je vozík sondy spojen s jedním vozíkem extrudéru, zatímco druhý je odložený na opačném konci osy. Při změně extrudéru je nejprve ten používaný odložen na druhém konci osy a vozík sondy se spojí s druhým, a tisk pokračuje.



Obr. 45 Parking extruder [40]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Zásady pro vypracování

- 1) Vypracujte literární studii na dané téma
- 2) Proveďte zhodnocení stávajícího řešení
- 3) Vypracujte konstrukční řešení týkajících se úprav 3D tiskárny
- 4) Proveďte ekonomické zhodnocení návrhu

Cílem praktické části bylo navržení konstrukčního řešení duálního extrudéru pro tiskárnu Prusa i3 MK2S. Celý návrh spočívá ve tvorbě 3D modelu osy X a systému podávání struny, tisku navrhnutých dílů a sestavení prototypu.

Jako výchozí program pro tvorbu 3D modelů byl zvolen Autodesk Inventor Professional 2018 a tiskárna pro tisk součástek Prusa i3MK2S. Tvorba G-kódu byla provedena za pomoci programu Slic3r Prusa Edition 1.41.

5 KONSTRUKCE

Pro řešení problematiky duální extruze pro tiskárnu Prusa i3 MK2S byl zvolen model parkujících extrudérů z důvodu minimálního zmenšení plochy tisku.

Celý návrh konstrukčního řešení probíhal v několika fázích. Prvotní návrh byl řešen skicami na papíře a nakoupením nejdůležitějších dílů a spojovacího materiálu. Ve druhé fázi byly navrženy 3D modely a z nich byly vyrobeny první prototypy tištěných dílů. Následující úpravy modelů byly realizovány kvůli rozměrovým odchylkám nakupovaných součástí, a úpravám procesních podmínek při tisku. Jednalo se hlavně o snahu zajistit co nejmenší použití podpěr.

Prototypy pro první verze byly vytisknuty z ABS a PLA, kvůli jejich ceně a stabilitě při tisku. Finální výtisky jsou realizovány z PET-G (příloha P1), z důvodu lepších mechanických a fyzikálních vlastností, které lépe vyhovují dané aplikaci.

5.1 Řešení

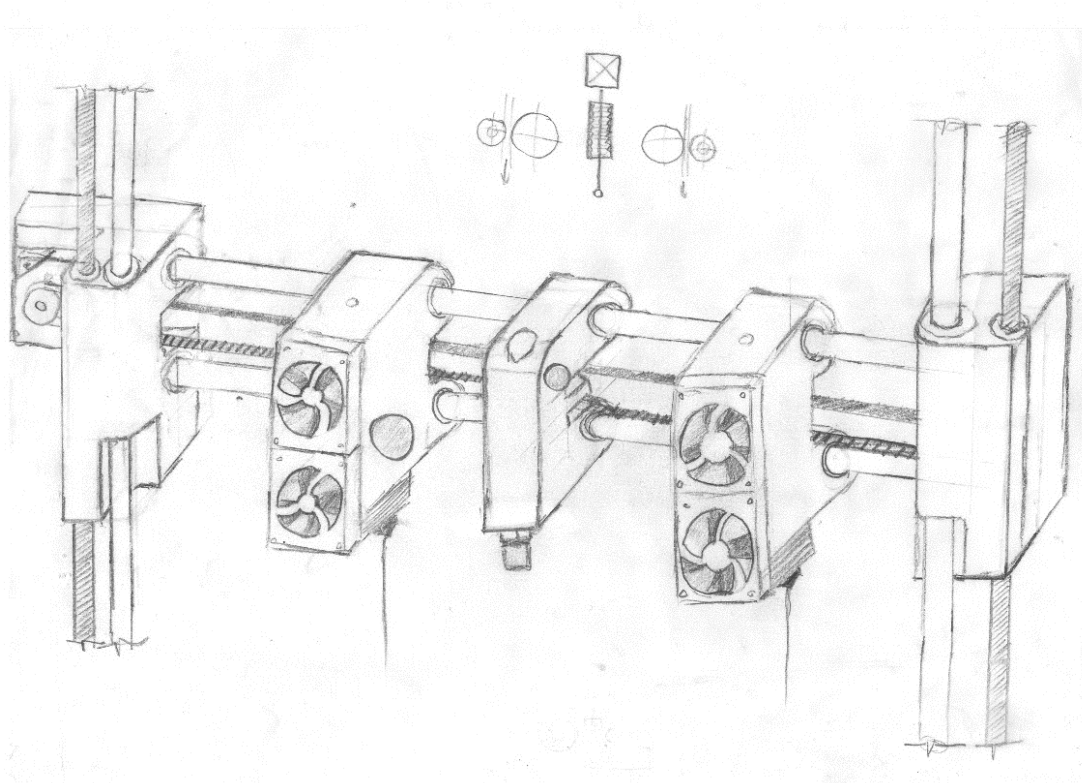
Během řešení musela být brána v potaz řada faktorů. Nejdůležitější ze všech bylo kladení důrazu na zachování co největší plochy tisku, proto bylo upuštěno od přímého pohonu filamentu, který byl nahrazen nepřímým posuvem skrze bovden. Celé zařízení zajišťující posuv materiálové struny (dále jen „filament“) může být umístěné externě mimo tiskárnu nebo na jejím horním rámu.

Dále bylo nutné zvážit použití správných materiálů a procesních podmínek pro tisk. Ty ovlivňují jak tuhost, tak pevnost celé soustavy. Správná orientace výtisku na podložce také zaručuje válcovitost otvorů.

Jako hlavní spojovací materiál byly vybrány šrouby DIN 912 velikosti M3, které nejsou příliš rozměrné, a přitom mají dostatečnou pevnost pro danou aplikaci.

5.1.1 Prvotní návrh

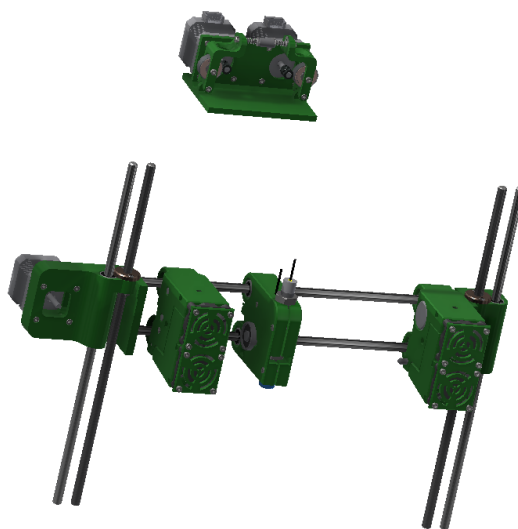
Při prvotním návrhu byla zhotovena skica celé sestavy na jejímž základě byl následně realizován jednotlivé 3D modely. Tento přístup byl zvolen kvůli navržení celkového designu a rozvržení celé práce. Stejný přístup byl použit i před modelováním tvarově složitějších součástí.



Obr. 46 Prvotní skica

5.1.2 Tvorba 3D modelu

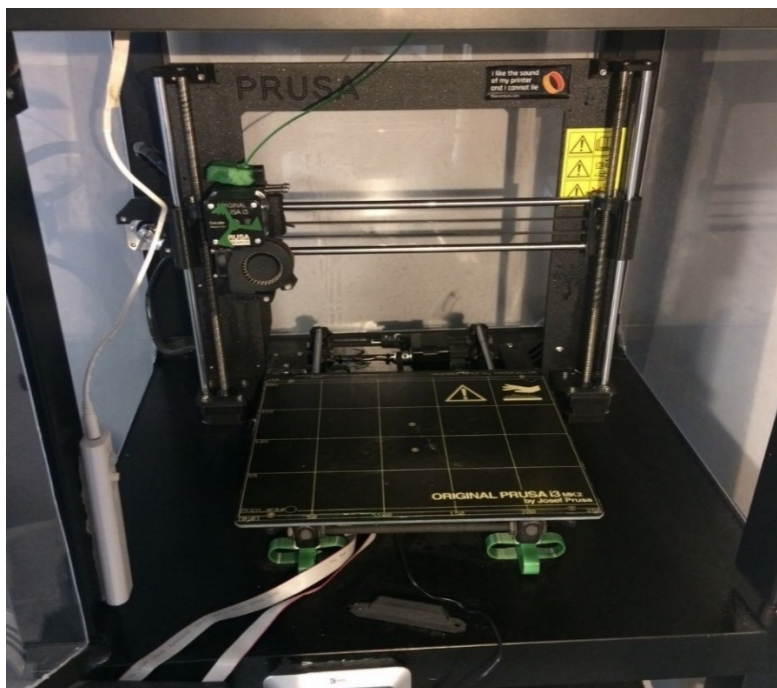
Tvorba 3D modelů byla provedena v programu Autodesk Inventor Professional 2018. Nejdříve byly namodelovány jednotlivé součásti a následně z nich byla vytvořena sestava.



Obr. 47 Rozpracovaný model sestavy

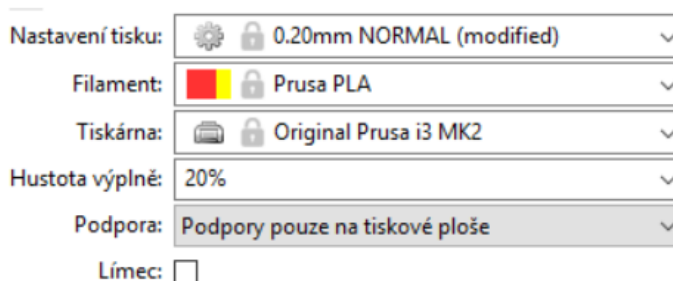
5.1.3 Tisk prototypů

Pro samotný tisk byla použita tiskárna Prusa i3 MK2S, uzavřená do boxu pro lepší tepelnou stabilitu při tisku. Filament tloušťky 1,75 mm byl vytlačován skrze trysku průměru 0,4 mm.



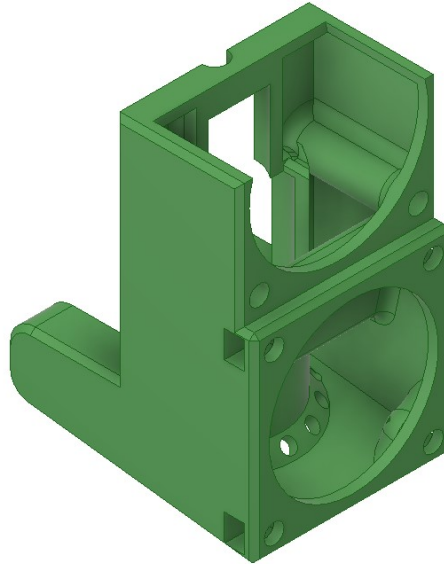
Obr. 48 Tiskárna Prusa i3MK2S na niž byl prototyp vytisknut

Tisk jednotlivých prototypů byl vyveden z materiálů PLA a ABS, pro jejich nízkou cenu a vcelku snadný tisk. Nastavení pro oba případy materiálu bylo stejné (hustota výplně 20 %, výška vrstvy 0,2 mm), lišilo se pouze teplotní nastavení u trysky a podložky. Pro PLA bylo zvoleno 220 °C na extrudéru a 50 °C na podložce, zatímco u ABS byla teplota na extrudéru navýšena na 245 °C a na podložce na 110 °C.

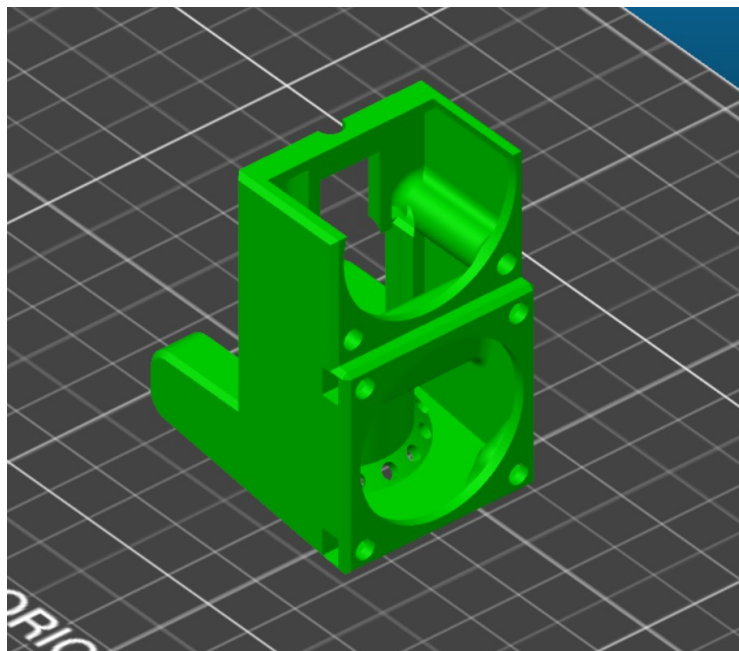


Obr. 49 Náhled do nastavení v programu Slic3r Prusa Edition při tisku prvních prototypů

Během přípravy souboru pro tisk je nutné převést původní soubor 3D modelu vytvořeného v programu Autodesk Inventor Professional 2018 s příponou .ipt na typ souboru .stl, který lze následovně otevřít v programu Slic3r Prusa Edition.

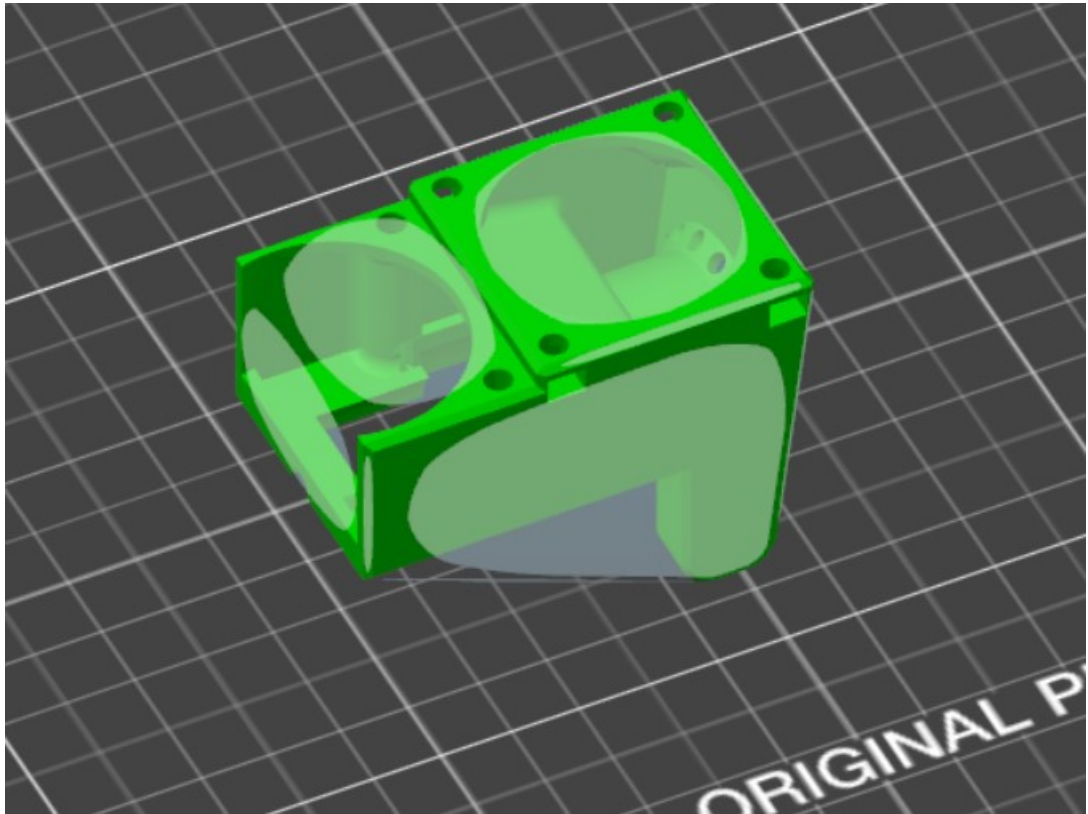


Obr. 50 3D model s programu Autodesk Inventor Professional 2018 s příponou .ipt



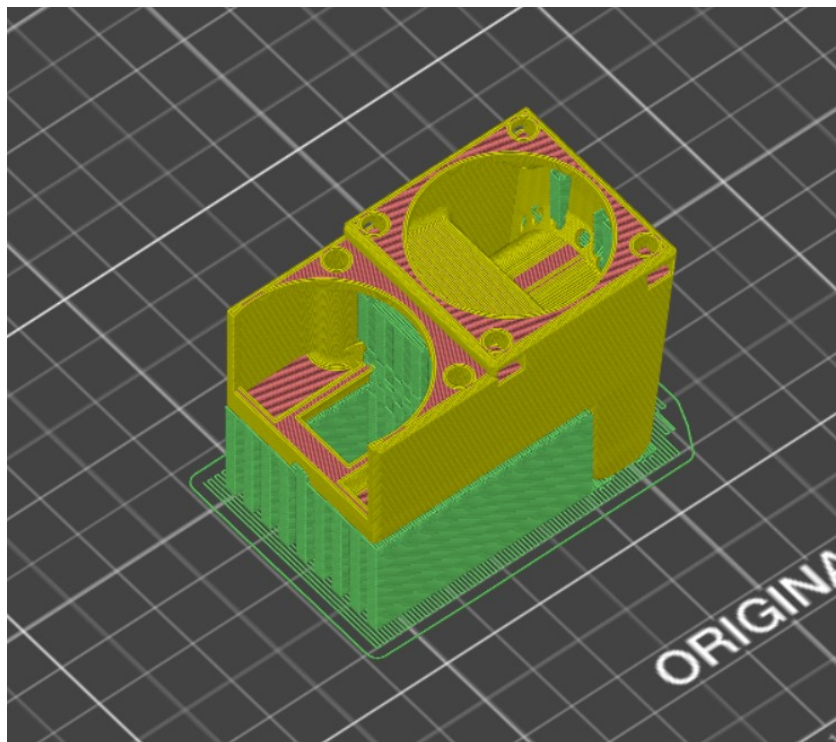
Obr. 51 3D model v programu Slic3r Prusa Edition již konvertovaný na typ .stl

Po importu 3D modelu ve formátu .stl do programu Slic3r Prusa Edition, je nutné díl správně naorientovat aby bylo nutno stavět co nejméně podpor či je dokonce úplně eliminovat. Podpory by také neměly být umístěny pod funkčními plochami, jinak se zvyšuje riziko horšího povrchu a nižší přesnosti v daných oblastech.

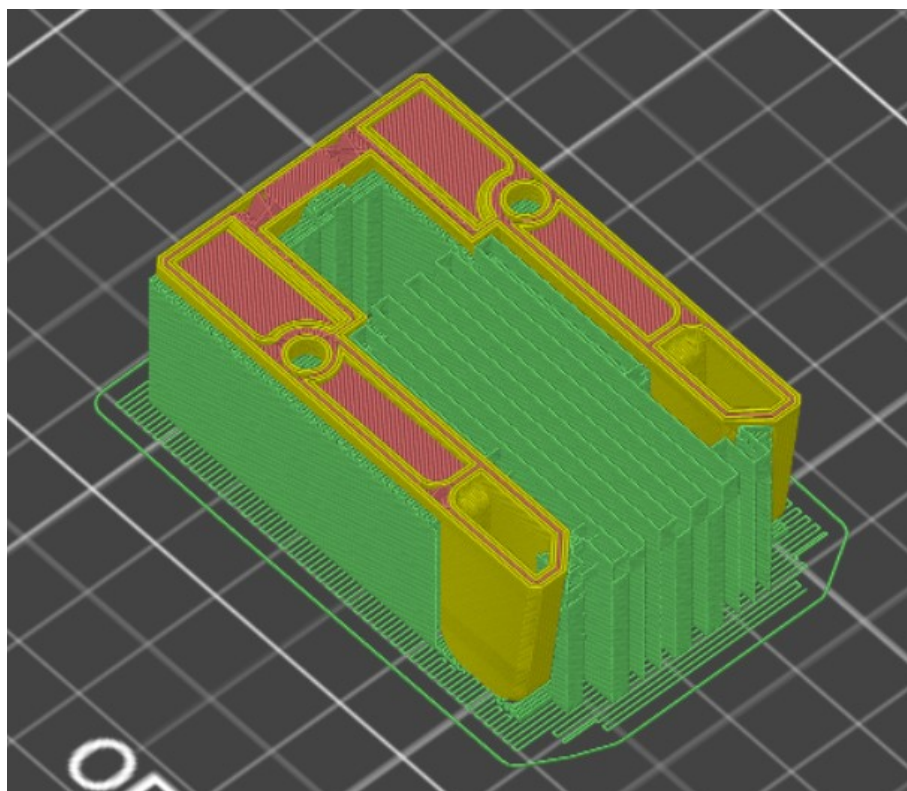


Obr. 52 Orientace dílu v rozhraní programu Slic3r Prusa Edition

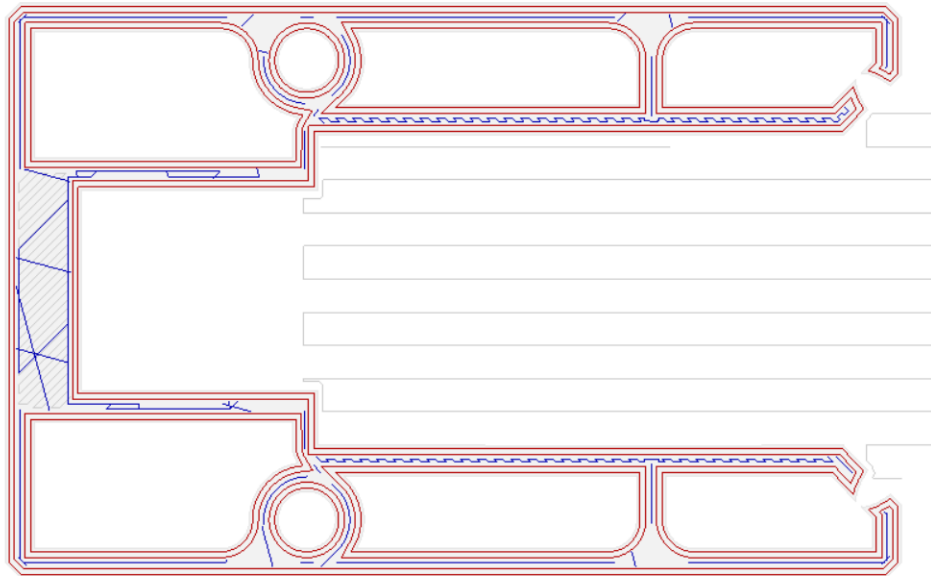
Po vytvoření vygenerování podpor v programu byly tyto zkontrolovány ve 3D náhledu i náhledu zobrazující jednotlivé vrstvy tisku. V obou případech je barevně rozlišen materiál vnějších vrstev (žlutá), výplně (červená) a oddělitelných podpor (zelená).



Obr. 53 Trojrozměrný náhled na celý model po vygenerování podpor



Obr. 54 Trojrozměrný náhled na model po vygenerování podpor v řezu určité vrstvy



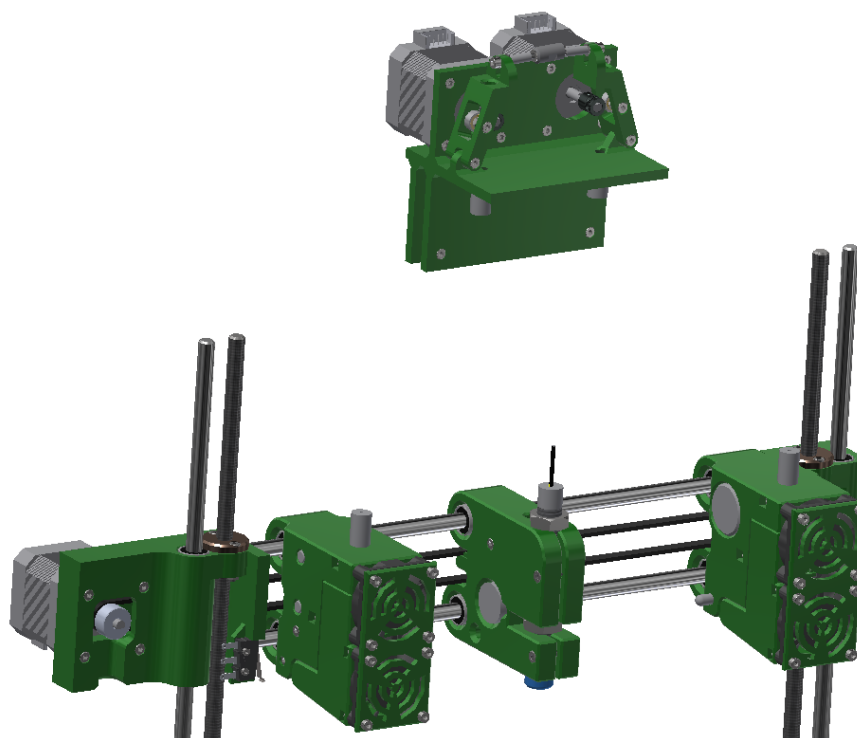
Obr. 55 Náhled na model po vygenerování podpor v řezu určité vrstvy zobrazený ve 2D



Obr. 56 Vytisknuté prototypy (zelená – ABS, černá – PLA)

5.1.4 Finální návrh a výroba

Do finálního návrhu připraveného pro finální výrobu, jsou zapracovány veškeré změny a úpravy, které bylo nutné udělat po odhalení chyb a problémů na vytisknutých prototypch. Jednalo se zejména změny tvaru některých ploch za účelem zkvalitnění tisku, nebo za účelem lepší přístupnosti při montáži. Dále bylo zapracováno několik dalších úprav, jako například vytvoření kapsy pro koncový snímač nebo změna velikosti otvoru pro šroub na němž je umístěna pravá řemenice.

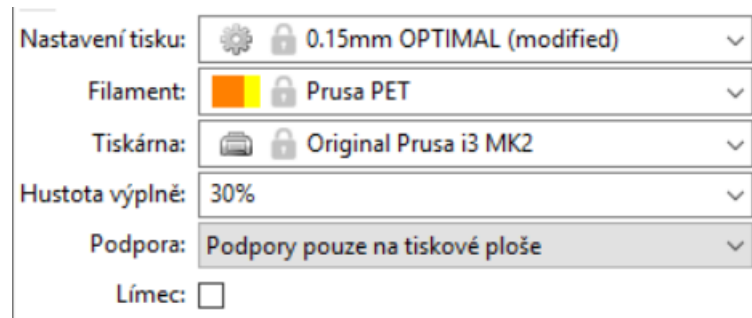


Obr. 57 Finální verze celé sestavy v programu Autodesk Inventor Professional 2018

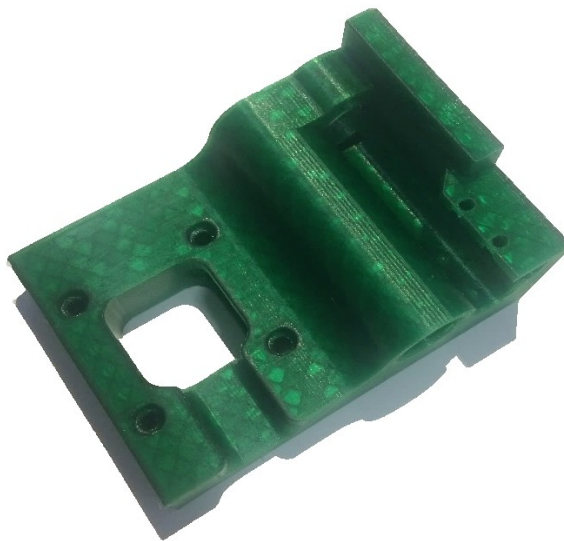
Na základě hotových modelů byla vyhotovena výkresová dokumentace a připraveny podklady pro tisk všech 13 dílů a výroby 5 dílů z oceli.

Finální výrobky z materiálu PET-G jsou vytisknuty se 30 % výplní a výškou vrstvy 0,15 mm. Teplota při tisku byla nastavena na 245 °C na extruderu a 90 °C na vyhřívané podložce.

Výroba ocelových dílů mohla díky jednoduchým operacím proběhnout v domácí dílně. Použitými nástroji byl pilník, stolní vrtačka, závitníky, úhlová bruska a stojanová bruska.



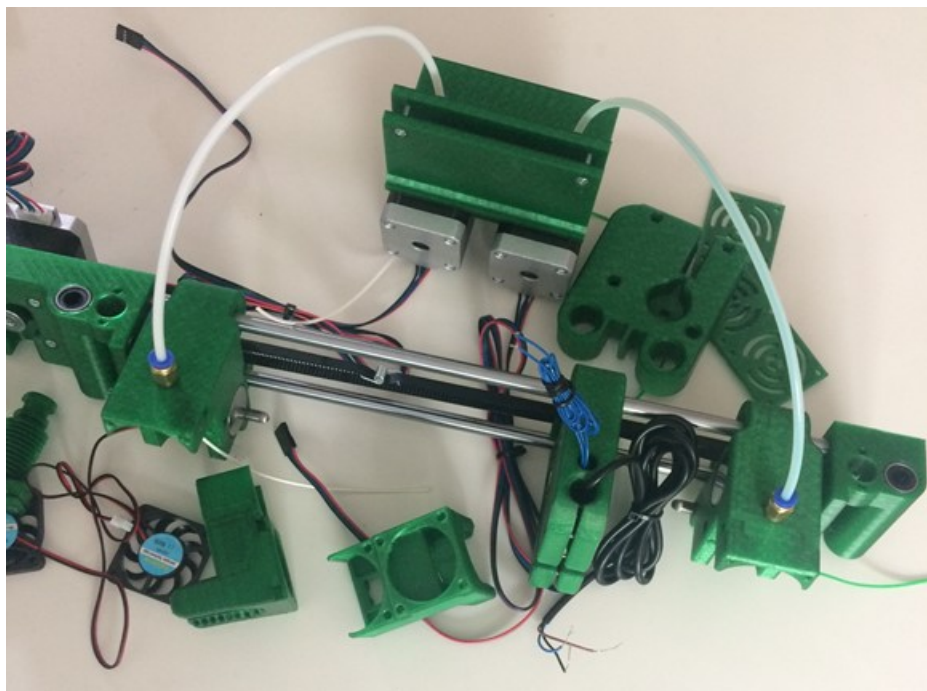
Obr. 58 Náhled do nastavení programu Slic3r Prusa Edition zobrazující nastavení tisku finálních výtisků



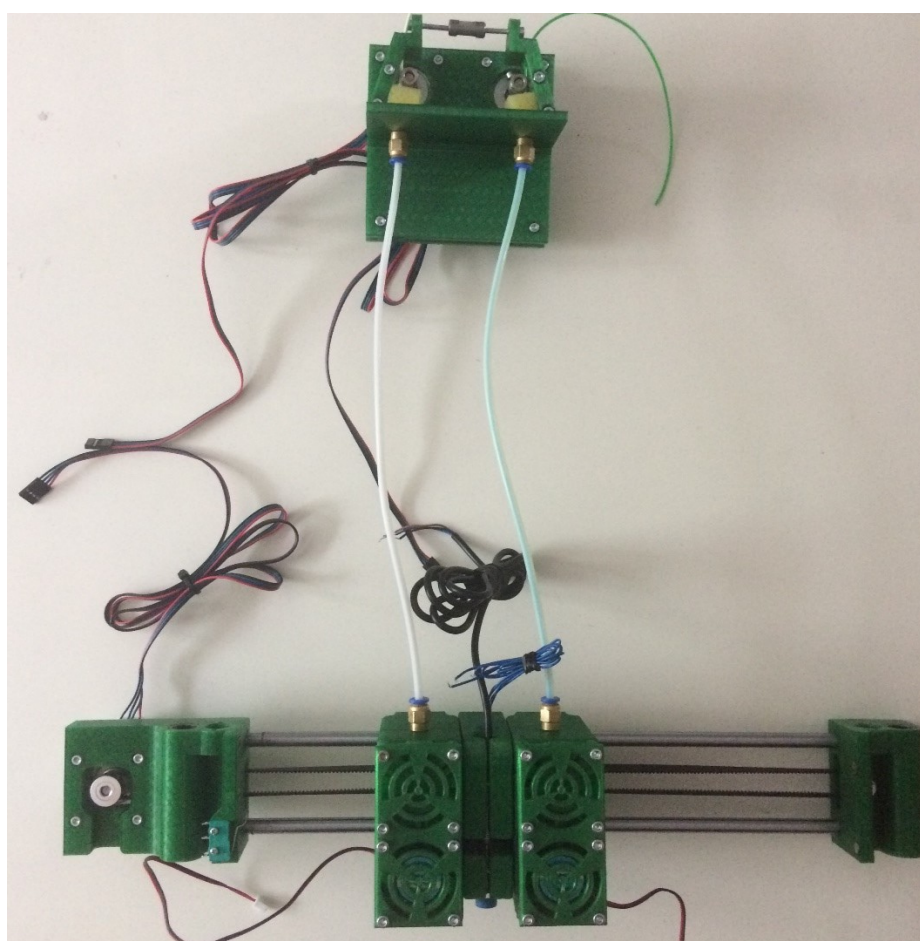
Obr. 59 Finální výtisk jedné ze součástí

5.1.5 Montáž

Ve fázi montáže byly zkompletovány vyráběné a nakupované položky do celku výsledné sestavy. U tisknutých dílů bylo nutné na některých místech mechanicky uvolnit některé díry. Veškeré spoje byly montované pomocí šroubů dle DIN 912, pouze neodmyslitelné magnety držící vozíky extrudérů v zaparkovaných polohách na svém místě, byly přilepeny lepidlem.



Obr. 60 Průběh montáže



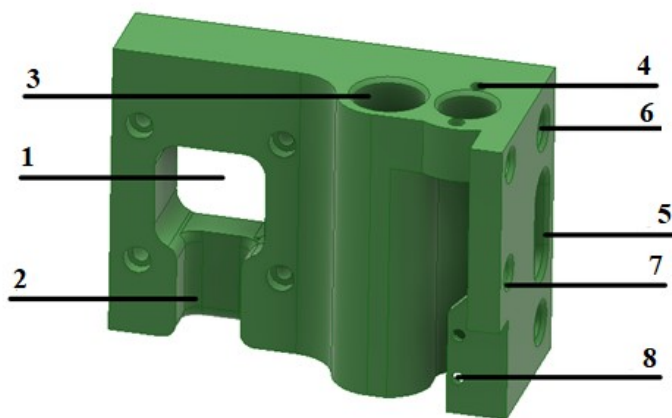
Obr. 61 Složená setava osy X

5.2 Vyráběné součástky

Celkově bylo tisknuto třináct kusů součástek a pět kusů ocelových součástek bylo vyráběno dílensky. Jednotlivé komponenty jsou popsány a odkazy k popiskům jsou vyneseny v obrázcích.

5.2.1 Levý konec osy X

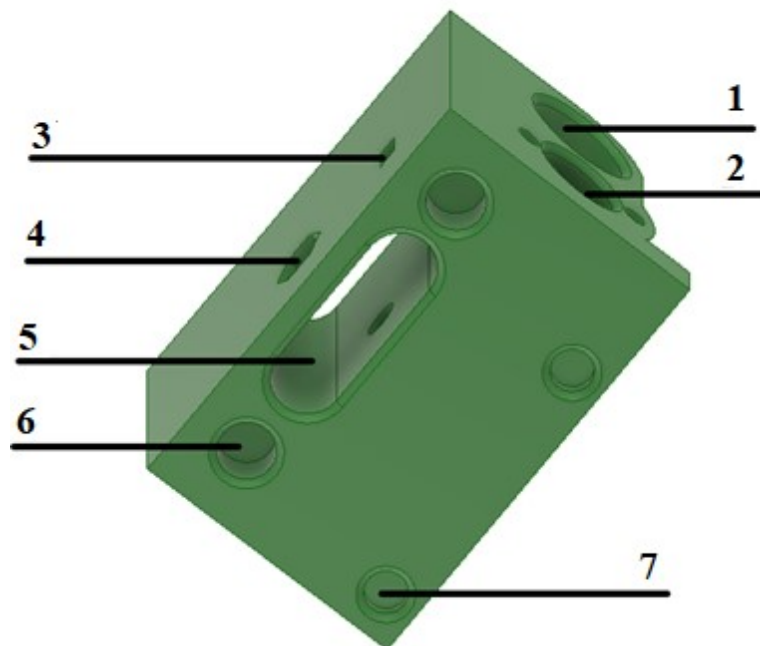
Levý konec osy X spolu s pravým koncem osy X fixují lineární vedení ve formě dvou tyčí, a je mezi nimi natažen ozubený řemen, jež obstarává pohyb vozíku sondy. Součástka je vytisknuta z materiálu PET-G. Na levé straně je kapsa spolu se čtyřmi průchozími otvory pro šrouby M3. Kapsa slouží k vyvedení hřídele krokového motoru, na níž je nasazena hnací řemenice, a díry pro šrouby které motor drží na svém místě (1). Ve spodní části kapsy je vytvořen zářez pro lepší manipulaci a nastavení pozice řemenice (2). Na horní straně se nacházejí dva velké otvory. Větší z nich je pro ložiska lineárního vedení osy Y (3), menší pro ukotvení matice pohybového šroubu za pomoci dvou šroubů M3 (4). Na zadní straně se nachází obdélníková kapsa pro zavedení matice k dotažení jednoho šroubu matice zajišťující pohyb po ose Y. Skrze levý konec osy X prochází drážkový otvor pro hnací řemenici a ozubený řemen (5). Na pravé straně se nachází v horní a spodní části součástky dva otvory pro zavedení lineárního vedení osy X ve formě kalených tyčí (6). Zbylé dva otvory jsou pro fixační neodymové magnety držící vozík extrudéru v zaparkované poloze (7). Na přední straně je vyhotoven výřez se dvěma otvory pro šrouby velikosti M3, které zde fixují koncový spínač (8).



Obr. 62 Levý konec osy X

5.2.2 Právý konec osy X

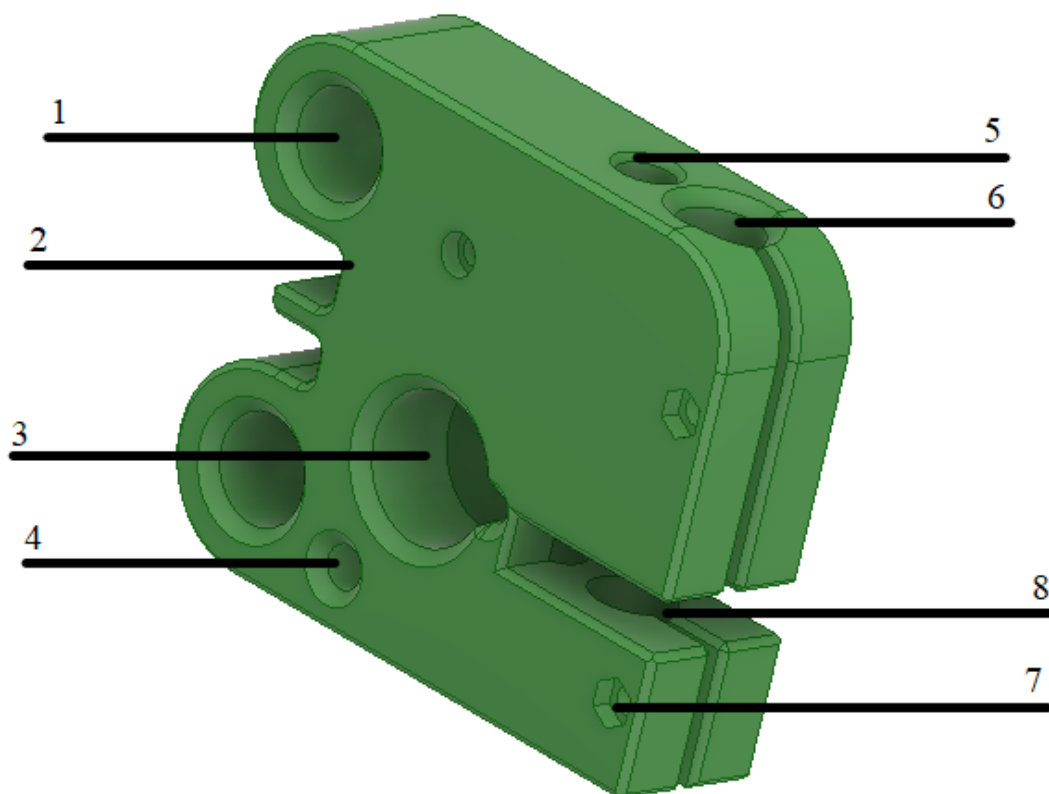
Právý konec osy X spolu s levým koncem osy X fixují lineární vedení ve formě dvou tyčí, a je mezi nimi natažen ozubený řemen, jež obstarává pohyb vozíku sondy. Součástka je vytisknuta z materiálu PET-G. Na horní straně se nacházejí dva velké otvory. Větší z nich je pro ložiska lineárního vedení osy Y (1), menší pro ukotvení matice pohybového šroubu za pomoci dvou šroubů M3 (2). Na zadní straně se nachází obdélníková kapsa pro zavedení matice k dotažení jednoho šroubu matice zajišťující pohyb po ose Y (3). Pod ní se nachází průchozí otvor z jedné strany osazený pro matici a z druhé pro hlavu šroubu M5, na němž je nasazena hnaná řemenice (4). Skrze celý pravý konec osy X prochází drážkový otvor pro hnanou řemenici a ozubený řemen (5). Na levé straně se nachází v horní a spodní části součástky dva otvory pro zavedení lineárního vedení osy X ve formě kalených tyčí (6). Zbylé dva otvory jsou pro fixační neodymové magnety držící vozík extrudéru v zaparkované poloze (7).



Obr. 63 Prává stran osy X

5.2.3 Vozík sondy

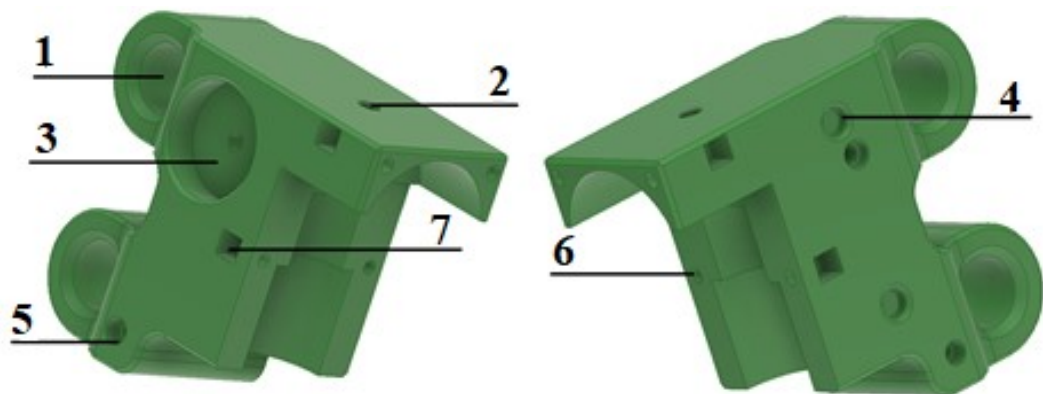
Vozík sondy je vytisknutý z materiálu PET-G. Ze zadní strany jsou dva otvory pro nalisování ložisek (1). Mezi nimi prostor pro spojku řemenu (2). Na levé i pravé straně jsou nad sebou uloženy kapsy pro přišroubování elektromagnetů (3). Průchozí otvor slouží k zavedení naváděcího čepu (4). Na horní straně jsou dva otvory. Menší slouží k vyvedení elektrických kabelů od elektromagnetů (5), zatímco větší průchozí pro umístění indukční sondy (6). Dále jsou skrze vozík sondy vyvedeny dvě díry (7) pro šrouby velikosti M3, jež mají pomoci fixovat indukční sondu. Tyto díry mají na jedné straně vyvedené zhloubení pro hlavu šroubu, a na druhé zhloubení pro matici. Kapsa vytvořena skrze otvor pro indukční sondu slouží k dotažení fixační matice velikosti M12 (8).



Obr. 64 Vozík sondy

5.2.4 Vozík extrudéru

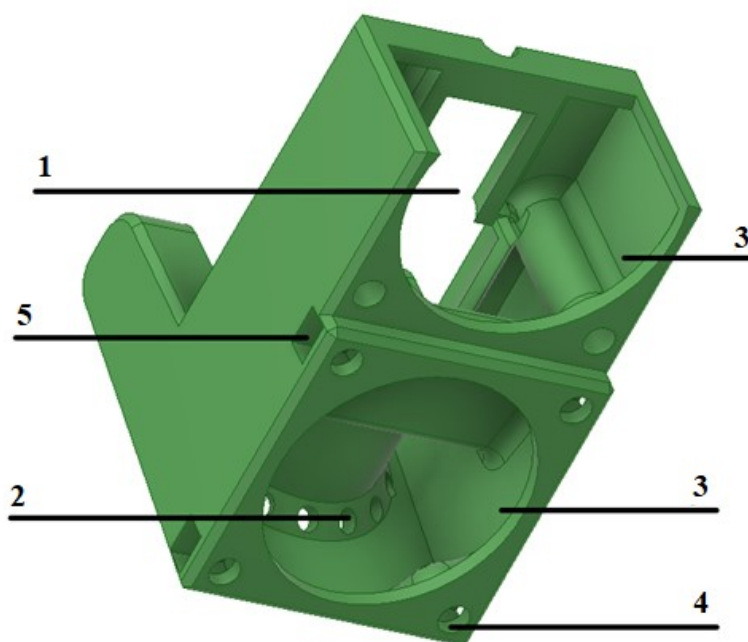
Vozík extrudéru je vytisknut z materiálu PET-G. Jedná se o zrcadlově symetrickou součást, která je vyrobena ve dvou kusech. Na zadní straně má připravené dva otvory pro nalisování ložisek (1). Na vrchní straně je průchozí díra, částečně opatřená závitem pro uchycení přímého šroubení, jímž prochází filament do extrudéru (2). Na jedné straně je vždy opatřen kapsou pro přišroubování kontaktu elektromagnetu (3), a na druhé straně dvěma menšími kapsami (4) pro usazení neodymových magnetů sloužících k ukotvení ve správné pozici v zaparkované poloze. Na stejné straně, kde se nachází kontakt magnetu je ve spodní části i kapsa pro přišroubování naváděcího čepu (5). K vozíku extrudéru je 4 šrouby M3 přišroubován také kryt extrudéru (6). Pro přitažení těchto šroubů je použito šestihranných matic, které jsou vloženy do obdélníkových kapes, které jsou po stranách vozíku extrudéru (7).



Obr. 65 Vozík extrudéru

5.2.5 Kryt extrudéru

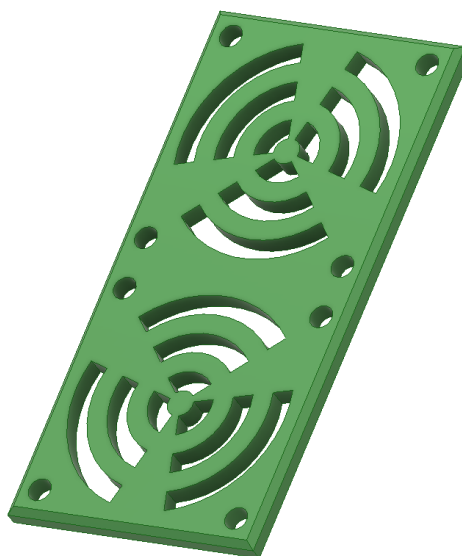
Kryt extrudéru je tvarově velmi složitá součástka sloužící k uchycení extrudéru k vozíku extrudéru (1). Dále je v ní udělaný rozvod vzduchu jak pro chlazení extrudéru, tak pro chlazení samotného výtisku. K přívodu vzduchu od větráků slouží dva vstupní otvory (3). Celý kryt extrudéru je přišroubován 6 šrouby M3, a to jak k vozíku extrudéru, tak i ke krytu větráků (4). Šestihranné matice, jež přitahují kryt větráků, jsou usazeny v obdélníkových kapsách po stranách krytu extrudéru (5). Kryt extrudéru je vytisknutý z materiálu PET-G a to ve dvou kusech – každý pro jeden vozík extrudéru.



Obr. 66 Kryt extrudéru

5.2.6 Držák větráků

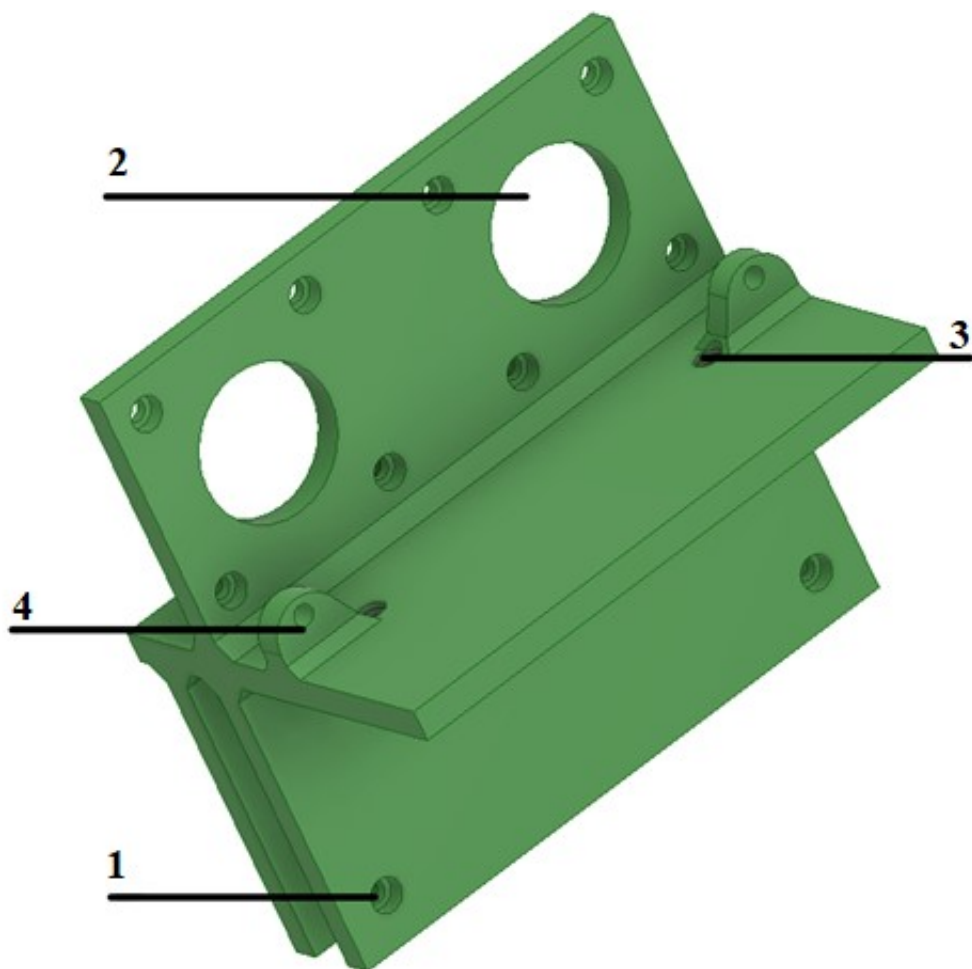
Držák větráků je vytisknutý z materiálu PET-G. Slouží k přišroubování větráků k vozíku extrudéru a krytu extrudéru. Horní větrák slouží k chlazení extrudéru a trysky (dále jen „hot-end“), zatímco spodní k ochlazování právě vytlačeného filamentu. Držák větráků je opatřen osmi otvory pro šrouby velikosti M3. Jsou vyrobeny dva kusy – pro každý vozík extrudéru jeden.



Obr. 67 Držák větráků

5.2.7 Držák pohonu filamentu

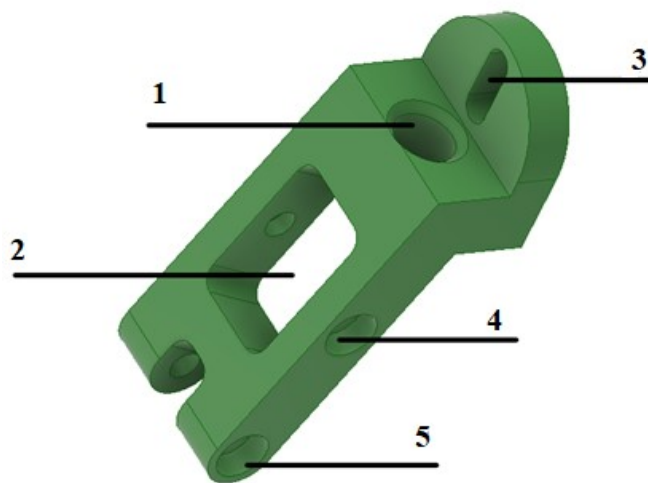
Držák pohonu filamentu navržen pro uchycení na horním rámu tiskárny, nebo kdekoliv mimo tiskárnu. Pro usazení na horním rámu je vytvořen výřez, v jehož spodní části jsou udělány dva otvory pro šrouby M3x16, vzadu s osazeními pro šestihorné matice (1). V horní části jsou nachystané osazení pro dva krokové motory, z nichž každý je uchycen 4 šrouby M3x10 (2). V místech pod hřídelem vycházejících z krokových motorů je průchozí díra opatřena závitem, do níž je zašroubováno přímé šroubení, jímž prochází filament (3). Na levé i pravé straně jsou výstupky opatřené rádiusy a otvory v jejich osách, skrze něž jsou vedeny šrouby M3x20 držící na svém místě držáky kladek. Celý držák pohonu filamentu je vytisknutý z materiálu PET-G.



Obr. 68 Držák pohonu filamentu

5.2.8 Držák kladky

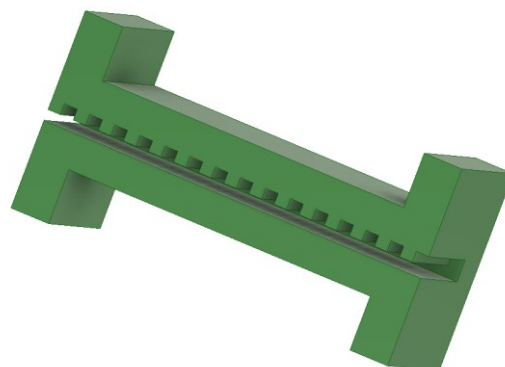
Držák kladky je přišroubován k držáku pohonu filamentu šroubem M3x20 (5). Je do něj připevněna kladka skládající se z ložiska 623 2Z, tří šestihhranných matic M3 a šroubu M3x20 (4,2). Druhou funkcí držáku kladky je její napínání vůči drážkovanému kolečku podavače filamentu pomocí šroubu M3x25 (3). Držákem kladky je veden otvor, kterým prochází filament do podavače (1). Celá součástka je vytisknuta z materiálu PET-G a jsou jí vyrobeny dva kusy – pro každou kladku jeden.



Obr. 69 Držák kladky

5.2.9 Spojka na ozubený řemen

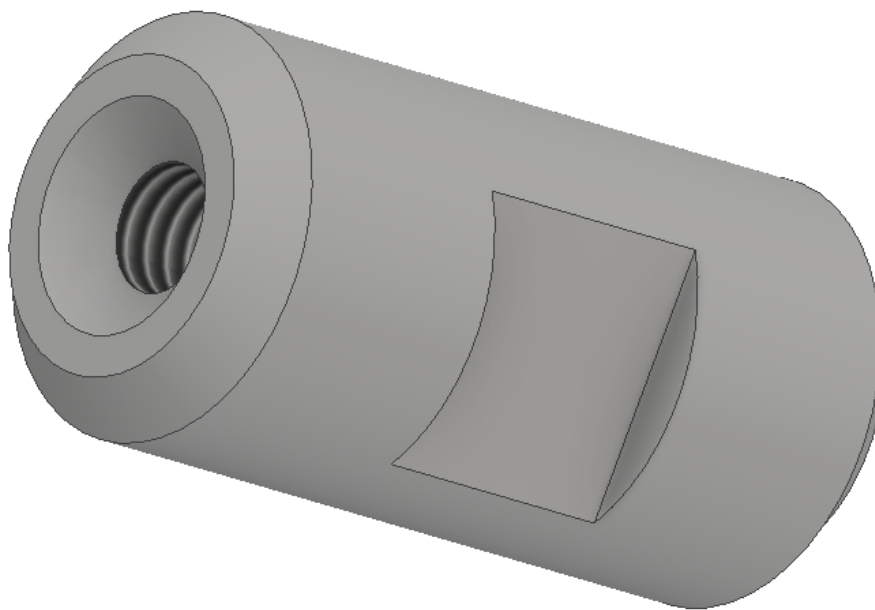
Jedná se o součástky zajišťující spojení a napnutí ozubeného řemene. Je vytisknuta z materiálu PET-G. Spojka na ozubený řemen je umístěná na zadní straně vozíku sondy.



Obr. 70 Spojka na ozubený řemen

5.2.10 Napínací matice

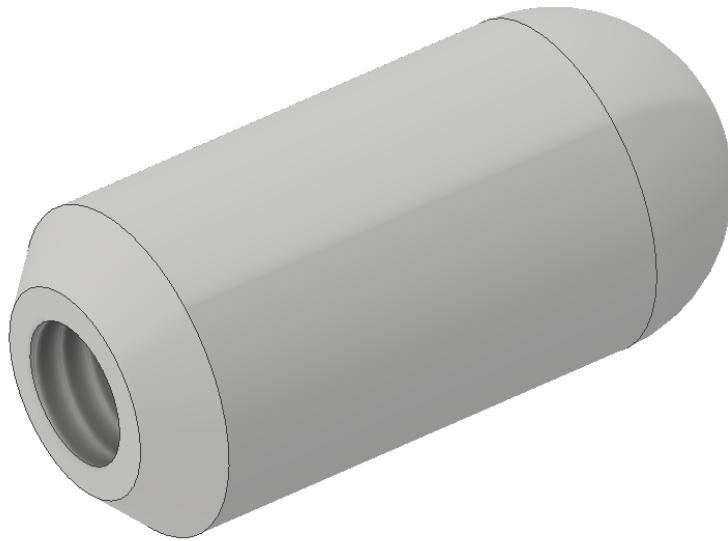
Napínací matice slouží k dotlačení kladky vůči drážkovanému kolečku podavače filamentu. Matice je z obou stran v ose opatřena vnitřním závitem velikosti M3. Do těchto závitů jdou proti sobě dva šrouby M3x25, které přes pružiny na ně nasunuté pružně dotlačí kladky na filament. Matice je vyrobená z konstrukční oceli a na obvodu je opatřena dvěma ploškami pro utahovací klíč. Matice je zhotoven jeden kus.



Obr. 71 Napínací matice

5.2.11 Naváděcí čep

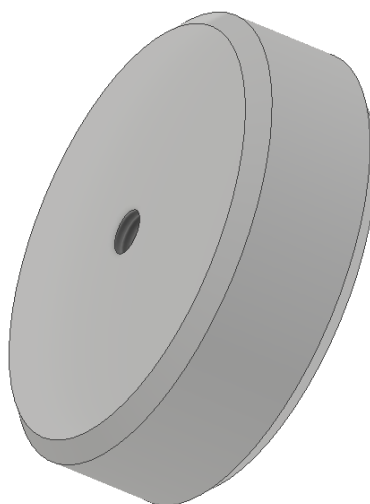
Naváděcí čep je uchycen v dolní části vozíku extrudéru pomocí šroubu M3x35. Slouží k navedení vozíku extrudéru do správné polohy při spojování s vozíkem sondy. Je vyroben z konstrukční oceli a ve spodní části je opatřen vnitřním závitem velikosti M3 vyvedeným v ose součásti. Celkově jsou vyrobeny dva kusy – pro každý vozík extrudéru jeden.



Obr. 72 Naváděcí čep

5.2.12 Kontakt elektromagnetu

Jedná se součástku vyrobenou s konstrukční oceli, která slouží jako hlavní kontaktní bod vozíku extrudéru při spojení s vozíkem sondy. Kontaktní plocha je přebroušena a spodní strana je opatřena vnitřním závitem velikosti M3 vyvedeným v ose součásti. Je uchycen šroubem M3x35 k vozíku extrudéru. Celkově jsou vyrobeny dva kusy – pro každý vozík extrudéru jeden.



Obr. 73 Kontakt elektromagnetu

5.3 Nakupované součástky

Mimo vyráběné součástky bylo nutné některé koupit. Jednalo se o spojovací materiál, normálie, elektroniku a hot-endy.

5.3.1 Spojovací materiál

Jedná se převážně o zápusťné šrouby s vnitřním šestihranem velikosti M3, šestihranné matice velikosti M3 a adekvátní podložky.



Obr. 74 Spojovací materiál

5.3.2 Elektromagnety

Elektromagnet konstruovaný na napětí 12 V, o průměru 20 mm a délce 15 mm. Síla, jež elektromagnet vyvine je rovna 25 N. Spolu s elektromagnetem je dodáván i šroub M3x14 kterým lze magnet ze zadní strany upevnit. Celkově jsou použity 2 kusy elektromagnetů, a to na upínání vozíků s hot-endy k vozíku se sondou.



Obr. 75 Elektromagnet

5.3.3 Větráčky

Kvůli chlazení tisknutých součástí jsou nutné dva větráčky Pengda Technology konstruované na napětí 12 V, se zástavbovými rozměry 40x40x7 mm.



Obr. 76 Větráček

5.3.4 Sonda

Indukční sonda snímající vzdálenost hot-endu od podložky. Funguje od vzdálenosti 4 mm. Je opatřena závitem M12x1,25. Je připevněna maticemi k vozíku sondy.



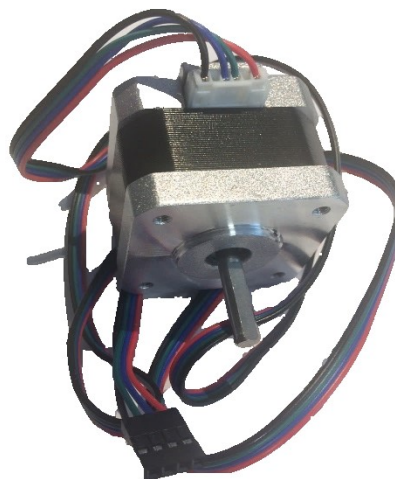
Obr. 77 Indukční sonda

5.3.5 Krokové motory

Celkově jsou potřeba 3 krokové motory Nema 17, každý o kroutícím momentu 26 N/cm. Zástavbové rozměry jsou 42x42x34 mm a z motoru vystupuje na délku 20 mm hřídel

průměru 5 mm. Na hřídeli je vytvořena ploška pro dosednutí utahovacího šroubu na náboji. Motor je opatřen 4 závity M3 pro upevnění v zástavbě.

Jeden motor zajišťuje posuv vozíků po ose X pomocí řemenice s ozubeným řemenem, a každý ze dvou dalších krokových motorů obstarává podávání materiálů do extrudérů.



Obr. 78 Krokový motor

5.3.6 Ložiska

Celkově jsou v sestavě obsaženy dva druhy ložisek. Prvním z nich jsou 2 kusy kuličkového ložiska 623 2Z které přitlačují filament v podavači filamentu k drážkovanému náboji, a tak zajišťují jeho pohyb.

Druhým typem jsou kuličkové ložiska zajišťující lineární pohyb vozíku po ose X a Y. Vnitřní průměr je 8 mm, vnější průměr 15 mm a délka 24 mm. Celkově je zapotřebí 10 kusů těchto ložisek.



Obr. 79 Ložiska

5.3.7 Hot-end

Jedná se o součást, díky které dochází k natavení materiálu jejím vytlačení přes trysku. Jsou použity dva hot-endy, na každém vozíku extrudéru jeden. Jedná se o model Highall – metal E3D v6 Hotend 12 V od firmy Trianglelab. Průměr vytlačovacího otvoru v trysce je 1,75 mm.



Obr. 80 Hot-end E3D v6

5.3.8 Kalené tyče

Tyto tyče jsou určeny k zajištění lineárního pohybu na ose X. Vozíky extrudérů i sondy jsou po nich vedeny ložisky. Celkově bylo zapotřebí dvou chromovaných kalených tyčí průměru 8 mm a délky 330 mm.



Obr. 81 Vodící tyč

5.3.9 Řemen s řemenicemi

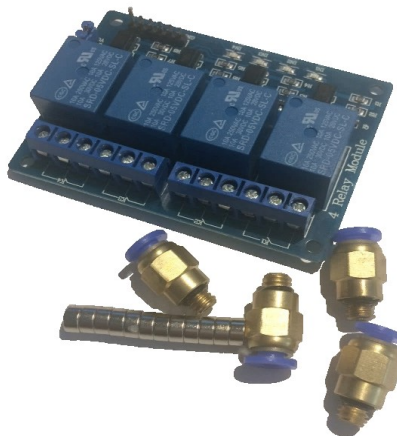
Krokový motor zajišťující pohyb na ose X je osazen na hřídeli řemenicí. Ta je spojena s řemenicím na druhém konci osy ozubeným řemenem značeným GT2, který unáší vozík sondy na ose X.



Obr. 82 Řemen s řemenicemi

5.3.10 Ostatní nakupované díly

Mezi další nakupované komponenty patří například neodymové magnety, které drží zaparkovaný vozík extruderu na svém místě, koncový spínač zajišťující krajní polohu vozíků, dva drážkované náboje nasazené na hřídelích krokových motorů zajišťujících posun filamentu, teflonové hadičky, jimiž je filament dopravován k extrudérům, přímé pneumatické šroubení pro upevnění hadiček k vozíkům extrudérů a 4 – kanálový relé modul zajišťující spínání elektromagnetů.



Obr. 83 Ostatní součástky

6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROJEKTU

Celkové zhodnocení všech nákladů na stavbu prototypu osy X upravené pro duální extruzi:

Tab. 1 Zhodnocení finančních nákladů

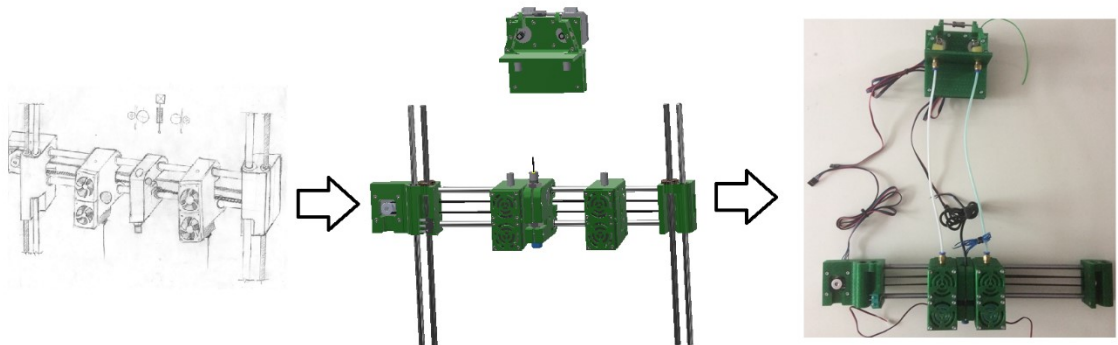
POLOŽKA	CENA [KČ]
Materiál na prototypy	180
Materiál na finální výrobky	300
Režie tiskárny	600
Spojovací materiál	50
Elektromagnety	182
Neodymové magnety	20
Kalené tyče vedení	250
Elektromotory	624
Řemen s řemenicemi	182
Indukční sonda	84
Větráky	342
Koncový spínač	25
Relé modul	60
Přímé šroubení	36
PTFE trubička	105
Ložiska lineárního vedení	260
Ložiska	44
Hutní materiál	10
Hot-endy E3D v6	780
SOUČET	4134

Celkové náklady nakonec mírně překročily původní rozpočet, který byl nastaven na 4000 Kč. Většina součástí byla nakupována z e-shopu Aliexpress. Materiál pro tisk byl od firem Devil Design a Filament PM.

Jednou z nejdražších položek byly režie tiskárny. Celkově bylo tisknuto 120 hodin. Při sazbě 5 Kč za hodinu provozu tiskárny bylo dosaženo částky 600 Kč. Při tisku prvotních prototypů byl tisk rychlejší než při tisku finálních výrobků. To bylo způsobeno nastavením výšky vrstvy (0,2 mm) oproti procesním podmínkám použitých u finálních výrobku, kde byla výška vrstvy (0,15 mm). Dalším důvodem tak dlouhých tiskových dob je i fakt že při tisku finálních výrobku bylo použito v místech rádiusů funkce vyhlazování vrstev, což způsobilo lokální zpřesnění tisku (velikost vrstvy 0,05 mm).

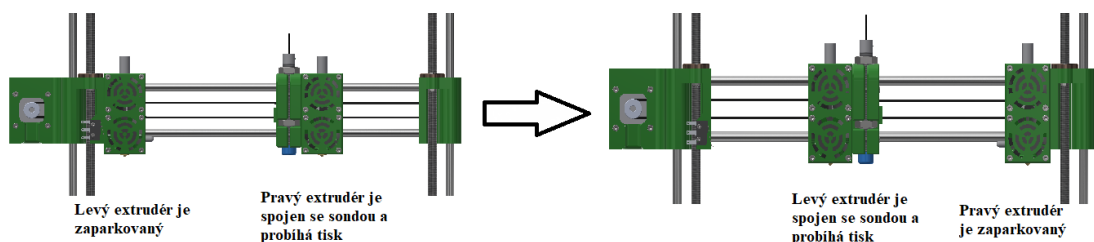
7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na základě zadání byl vypracován konstrukční návrh osy X s možností duální extruze. Při řešení bylo využito principu parkujících extrudérů. Hlavním důvodem této volby je možnost tisknout jeden výrobek ze dvou materiálů s různými extruzními teplotami, bez nutnosti stavět čistící věž. Další výhodou jsou kompaktní zástavbové rozměry.



Obr. 84 – Skica, 3D model, prototyp

Výsledný prototyp byl složen z nakupovaných a vyráběných součástí. Jedná se o konstrukci tvořenou dvěma kalenými tyčemi, jež fungují jako lineární vedení. Na tyčích jsou pohyblivě uloženy pomocí lineárních kuličkových ložisek tři vozíky. Dva krajní vozíky obsahují extrudéry a prostřední je vybaven indukční sondou měřící vzdálenost od tiskové plochy. Vozík se sondou je také opatřen dvěma elektromagnety, jejichž pomocí se spojuje s vozíky extrudérů. Celý pohyb vozíků po lineárním vedení je zprostředkován pomocí ozubeného řemene, který je napnut mezi dvěma řemenicemi umístěnými na koncích osy. Levá řemenice je pak hnaná krokovým motorem. Tím rozpohybuje ozubený řemen, který je napevno spojený s vozíkem sondy. Při tisku je vozík sondy spojen s jedním vozíkem extrudéru za pomoci elektromagnetu, druhý vozík extrudéru je mezitím zaparkován na svém konci osy.



Obr. 85 Princip přepínání mezi extrudéry

Druhou částí konstrukčního návrhu je držák na pohon filamentu. Ten se skládá ze dvou krokových motorů, jejichž hřídele jsou usazeny drážkovanými kolečky. Na kolečka je vždy přitlačeno kuličkové ložisko. Mezi ložiskem a drážkovaným kolečkem prochází podávaný filament je veden do bovdenu, který spojuje podávací zařízení s extrudérem. Podávací zařízení je navrženo tak aby se dalo umístit na horní rám tiskárny Prusa i3MK2S, lze je však uchytit pomocí šroubů i kamkoliv mimo tiskárnu.

Jedním z cílů byla kompatibilita s tiskárnou Prusa i3MK2S, a ten byl splněn. Bylo nutné zajistit, aby rozměr 375 mm mezi vodícími tyčemi osy Y na tiskárně byl shodný s rozměrem mezi pouzdry ložisek na prototypu osy X. V případě potřeby většího či menšího rozměru, není nutné modifikovat či vyrábět nové díly prototypu, stačí pouze vyměnit vodící tyče a ozubený řemen.

Velkým problémem u násobných extruzí často bývá velké zmenšení tiskové plochy. Prusa i3 MK2S disponuje stolem o šířce 250 mm. Prototyp nové osy s parkujícími extrudéry má největší rozjezd vozíků extrudéru 225 mm, čímž zmenšuje tiskovou plochu pouze o 25 mm. Tímto bylo splněno i další konstrukční kritérium, a to minimalizovat zmenšení tiskové plochy.

Celkové náklady na vývoj prototypu jsou 4134 Kč a tím mírně přesáhly stanovený rozpočet 4000 Kč. I přesto jsme získali prototyp, který splnil zadaná kritéria a má potenciál k dalšímu pokračování vývoje.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout konstrukční řešení pro 3D tisk součástek obsahující dva typy materiálu.

V teoretické části se pojednává o historii 3D tisku, typech technologií pracujících na principu 3D tisku a materiálech které lze touto metodou zpracovávat. Dále jsou zde shrnuty dostupné zařízení a konstrukční řešení problematiky vícenásobné extruze. Jednotlivé typy jsou zde popsány včetně výhod a nevýhod.

Praktická část se zabývá konstrukčním návrhem a výrobou prototypu zařízení umožňující duální extruzi. Jedná se o sestavu osy X pracující na principu parkujících extrudérů s externím pohonem filamentu dopravovaného do extrudérů pomocí bovdenů. Celá sestava osy X je navržena s ohledem na kompatibilitu s tiskárnou Prusa i3MK2S. Po ucelení představy o designu a funkci zařízení pomocí skici, byl vytvořen 3D model sestavy. Následně byly jednotlivé součásti vytisknuty a spolu s nakupovanými součástkami sestaveny do prototypu.

Takto získaný prototyp splňuje požadované parametry, jako je možnost duálního tisku, kompatibilita s tiskárnou Prusa i3MK2S a minimalizace zmenšení tiskové plochy. Díky tomu má potenciál k dalšímu vývoji.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PROUZA, Bc. Tomáš. *Návrh duální tiskové hlavy pro FDM 3D tiskárnu* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=89236. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík Ph.D.
- [2] ČADA, Bc. Jiří. *Povrchové změny v závislosti na parametrech FDM tisku* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=89236. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík Ph.D.
- [3] CHAMBERLIN, Bill. 3D Printing: A 2014 Horizonwatching Trend Summary Report. In: *SlideShare.net* [online]. IBM Corporation: IBM Corporation, 2013, 2013 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/HorizonWatching/s12-3-d-printing-2014-horizonwatching-trend-summary-report-17apr2014>
- [4] STUDENKA, Petr. *Konstrukční návrh zařízení Rapid Prototyping*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2016, 86 s., IV s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/37946>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Staněk, Michal.
- [5] ALDRIDGE, William. S. Scott Crump. In: [Http://personal.psu.edu/wra5025/](http://personal.psu.edu/wra5025/) [online]. Erie, PA 16510 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <http://personal.psu.edu/wra5025/S.%20Scott%20Crump.jpg>
- [6] 3D tisk podle odvětví. *Uprint3D* [online]. Olomouc: Vědeckotechnický park Univerzity Palackého v Olomouci [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <http://www.uprint3d.cz/odvetvi/>
- [7] First 3D Printed Jet Engine. In: *Engineering* [online]. Toronto: Toronto West Office, 2015, 6. března 2015 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/Education/EducationArticles/ArticleID/9726/First-3D-Printed-Jet-Engine.aspx>
- [8] These 3D-Printed See-Through Prosthetics are Incredible. In: *Interesting Engineering* [online]. 2016, 25. listopadu 2016 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/3d-printed-see-prosthetics-incredible>
- [9] 3D Printed Vases That Give New Life to Old Bottles. In: *Design - Milk* [online]. 2016, 25. března 2016 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://design-milk.com/images/2016/03/3D-Printed-Vases-Libero-Rutilo-1.jpg>

- [10] MENDOZA, Hannah Rose. Disaster Inspires Japanese Designers: Generative Design & 3D Printing Create Relief Effort X VEIN Drone. In: *3D Print* [online]. 2017, 19. června 2017 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2017/07/flying-xvein-full-width-1024x495.jpg>
- [11] *Aditivní technologie - metody Rapid Prototyping* [online]. In: . 1. Vysoké učení technické v Brně, fakulta Strojního inženýrství: Ústav strojírenské technologie, 2010, s. 35 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podkladysto_bak/cv_STV_04_Aditivni_tecnologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [12] DK Metal. *Přehled technologií 3D tisku* [online]. 9.1.2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [13] SLA vs. DLP: A 3D Printing Technology Comparison. *Formlabs.com* [online]. USA, 2017, 5.7.2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>
- [14] VÁLEK, Lukáš. *VÝROBA PROTOTYPU NABÍJECÍHO STOJANU METODOU FDM TISKU* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_ve-rejne.php?file_id=87081. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta Strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík Ph.D.
- [15] PETER, Bednár. *ZPRACOVÁNÍ PODKLADŮ PRO NÁVRH OBJEMOVÝCH A PLOŠNÝCH STRUKTUR* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_ve-rejne.php?file_id=69391. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [16] RAFAJA, Hynek. *KONSTRUKCE NANÁŠECÍHO SYSTÉMU SEZABUDOVANOU FRÉZOVACÍ HLAVOU PRO 3D TISK KOVOVÝCH PROTOTYPŮ* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1281/Rafaja_Hynek_170519.pdf. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [17] LM. In: *Ordina JWorks Tech BLog* [online]. 2008 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://ordina-jworks.github.io/img/2018-09-28-3D-Printing/dmls-slm.png>
- [18] SEKERKA, Bc. Vít. *VÝROBA DÍLŮ TECHNOLOGIÍ DMLS A JEJICH POROVNÁNÍ S JINÝMI KONVENČNÍMI TECHNOLOGIEMI Z HLEDISKA EKONOMICKÉ NÁROČNOSTI* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_ve-rejne.php?file_id=41825. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

- [19] Electron Beam Melting (EBM). In: *Mechanical Engineering blog* [online]. 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://ss.whiteclouds.com/3dpedia-index/electron-beam-melting-ebm>
- [20] KOZEL, Jan. *Návrh výrobní součásti vyráběné technologií 3D tisku* [online]. Zlín, 2108 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42351/kozel_2018_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Lukáš Maňas.
- [21] *Binder Jetting* [online]. In: . [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://www.threading.com/image/500x200xobject_image_15297.jpg.pagespeed.ic.aMrSXYfvsi.jpg
- [22] *Materiál pro 3D* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [23] Fillamentum. In: *Fillamentum* [online]. Hulín, 2018, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/pla-extrafill/products>
- [24] *Airwolf3D* [online]. In: . 11208 Young River Avenue Fountain Valley, CA 92708, 2018, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://airwolf3d.com/shop/platinum-series-abs-filament-2-88mm-2-2lbs-122/>
- [25] CFJET. In: *Plasty Mladeč* [online]. Haňovice 18 Chudobín 783 21, 2018, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/cfjet-1-75>
- [26] Metalfill. *Leon 3D* [online]. 2018, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.leon-3d.es/>
- [27] Podprůrný materiál. *ABC3D* [online]. 2015, 2015 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/>
- [28] HIPS and PVA. *Simplify3D* [online]. 2017, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/hips/>
- [29] Speciální materiály. In: *OpenBioMedical* [online]. 2015, 1.10.2015 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.openbiomedical.org/medical-applications-are-leading-the-next-generation-of-3d-printing-hype/>
- [30] RepRap. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/RepRap>

- [31] Co je to RepRap. *Josef Prusa* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/co-je-reprap/>
- [32] First replication. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a7/First_replication.jpg/1200px-First_replication.jpg
- [33] Josef Prusa. In: *Česká televize* [online]. Praha: Česká televize, 2018, 12.5.2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://ct24.ceskatelevize.cz/sites/default/files/styles/node-article_horizontal/public/images/2033254-f201608110048401.jpeg?itok=72J-cWnW
- [34] *Prusa 3D* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>
- [35] *Prusa 3D Shop* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com>
- [36] *Multi Material Upgrade 2.0* [online]. 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://blog.prusaprinters.org/multi-material-upgrade-2-0-is-here/>
- [37] *Typy vytlačovacích hlav* [online]. Chalgrove, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/>
- [38] Typy multiextruzních hlav. In: *Matterhackers* [online]. 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/store/printer-accessories/e3d-the-cyclops-switching-hotend>
- [39] Switching extruder. In: *Youtube* [online]. 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://i.ytimg.com/vi/9aekOiyL1qY/maxresdefault.jpg>
- [40] Parking extruder. In: *Githun: Multiple Z-Probes Issue* [online]. 2018, 4.2.2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin/issues/9480>
- [41] Stojan. In: *Interesting Engineering* [online]. 2019, 15.2.2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/17-cool-and-useful-things-to-3d-print-around-your-home>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SLA	Stereolitography
FDM	Fused Deposit Modeling
DLP	Digital Light Processing
SLM	Selective Laser Melting
EBM	Electron Beam Melting
LOM	Laminated Object Manufacturing
BJ	Binde Jetting
PLA	Kyselina polymléčná
ABS	Akrylonitril-Butadien-Styren
ASA	Akrylonitril–Styren-Akryl
PET-G	Polyethelen-Tereftalát–Glykol
CPE	Chlorinated-Polyethelen
TPU	Termoplastický polyuretan
PC	Polykarbonát
PA	Polyamid
PVA	Polyvinylalkohol
HIPS	High Impact Polystyrene
MMU	Multi Material Upgrade
mm	milimetry
Hod	Hodiny
g	gram

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Proces výroby dílce metodou 3D tisku [3]</i>	12
<i>Obr. 2 Scott Crump, vynálezce metody FDM [5]</i>	13
<i>Obr. 3 První funkční proudový motor vyrobený metodou 3D tisku [7]</i>	14
<i>Obr. 4 Protéza vytisknutá na 3D tiskárně [8]</i>	15
<i>Obr. 5 Architektonický model vyrobený metodou 3D tisku [6]</i>	15
<i>Obr. 6 Designové vázy vytisknuté metodou FDM [9]</i>	16
<i>Obr. 7 Dron zcela vytisknutý na 3D tiskárně [10]</i>	17
<i>Obr. 8 Stojan na pera [41]</i>	17
<i>Obr. 9 Princip SLA [12]</i>	18
<i>Obr. 10 Princip DLP [12]</i>	19
<i>Obr. 11 Princip FDM [12]</i>	20
<i>Obr. 12 Princip SLM [17]</i>	21
<i>Obr. 13 Princip EBM [19]</i>	22
<i>Obr. 14 Princip LOM [12]</i>	23
<i>Obr. 15 Princip BJ [21]</i>	23
<i>Obr. 16 Výtisk z materiálu PLA [23]</i>	24
<i>Obr. 17 Výtisk z materiálu ABS [23]</i>	25
<i>Obr. 18 Výtisk z materiálu ASA [23]</i>	26
<i>Obr. 19 Výtisk z materiálu PET-G [22]</i>	26
<i>Obr. 20 Výtisk z materiálu CPE [23]</i>	27
<i>Obr. 21 Výtisk z materiálu PA [23]</i>	28
<i>Obr. 22 Výtisk z materiálu TPU [23]</i>	29
<i>Obr. 23 Výtisk z materiálu PC [24]</i>	29
<i>Obr. 24 Výtisk z materiálu Carbonfill [23]</i>	30
<i>Obr. 25 Výtisky z materiálu Woodfill [23]</i>	31
<i>Obr. 26 Výtisk z materiálu Cooperfill [22]</i>	31
<i>Obr. 27 Srovnání rozpustných a mechanicky odstranitelných podpor [27]</i>	32
<i>Obr. 28 Výtisk s podporami z materiálu HIPS [28]</i>	32
<i>Obr. 29 Výtisk s podporami z materiálu PVA [28]</i>	33
<i>Obr. 30 Příklad použití speciálního materiálu [29]</i>	34
<i>Obr. 31 První replikovaná tiskárna [32]</i>	36
<i>Obr. 32 Josef Průša se svými tiskárnami [33]</i>	37

<i>Obr. 33 Prusa i3MK2S [35]</i>	38
<i>Obr. 34 Prusa i3MK3 [35]</i>	39
<i>Obr. 35 MMU 2.0 umístěné na horním rámu tiskárny [36]</i>	41
<i>Obr. 36 Detailní pohled na MMU 2.0 [36]</i>	42
<i>Obr. 37 Sonda F.I.N.D.A.[36]</i>	42
<i>Obr. 38 Princip vytlačovací hlavy Chimera [37]</i>	43
<i>Obr. 39 Vytlačovací hlava Chimera [37]</i>	43
<i>Obr. 40 Princip vytlačovací hlavy Cyclop [38]</i>	44
<i>Obr. 41 Vytlačovací hlava Cyclop [37]</i>	44
<i>Obr. 42 Princip vytlačovací hlavy Kraken [38]</i>	45
<i>Obr. 43 Vytlačovací hlava Kraken [37]</i>	45
<i>Obr. 44 Switching extruder [39]</i>	46
<i>Obr. 45 Parking extruder [40]</i>	47
<i>Obr. 46 Prvotní skica</i>	51
<i>Obr. 47 Rozpracovaný model sestavy</i>	51
<i>Obr. 48 Tiskárna Prusa i3MK2S na níž byl prototyp vytisknut</i>	52
<i>Obr. 49 Náhled do nastavení v programu Slic3r Prusa Edition při tisku prvních prototypů</i>	52
<i>Obr. 50 3D model s programu Autodesk Inventor Professional 2018 s příponou .ipt</i>	53
<i>Obr. 51 3D model v programu Slic3r Prusa Edition již konvertovaný na typ .stl</i>	53
<i>Obr. 52 Orientace dílu v rozhraní programu Slic3r Prusa Edition</i>	54
<i>Obr. 53 Trojrozměrný náhled na celý model po vygenerování podpor</i>	55
<i>Obr. 54 Trojrozměrný náhled na model po vygenerování podpor v řezu určité vrstvy</i>	55
<i>Obr. 55 Náhled na model po vygenerování podpor v řezu určité vrstvy zobrazený ve 2D</i>	56
<i>Obr. 56 Vytisknuté prototypy (zelená – ABS, černá – PLA)</i>	56
<i>Obr. 57 Finální verze celé sestavy v programu Autodesk Inventor Professional 2018</i>	57
<i>Obr. 58 Náhled do nastavení programu Slic3r Prusa Edition zobrazující nastavení tisku finálních výtisků</i>	58
<i>Obr. 59 Finální výtisk jedné ze součástí</i>	58

<i>Obr. 60 Průběh montáže</i>	59
<i>Obr. 61 Složená setava osy X</i>	59
<i>Obr. 62 Levý konec osy X</i>	60
<i>Obr. 63 Pravá stran osy X</i>	61
<i>Obr. 64 Vozík sondy</i>	62
<i>Obr. 65 Vozík extrudéru</i>	63
<i>Obr. 66 Kryt extrudéru</i>	64
<i>Obr. 67 Držák větráků</i>	64
<i>Obr. 68 Držák pohonu filamentu</i>	65
<i>Obr. 69 Držák kladky</i>	66
<i>Obr. 70 Spojka na ozubený řemen</i>	66
<i>Obr. 71 Napínací matice</i>	67
<i>Obr. 72 Naváděcí čep</i>	68
<i>Obr. 73 Kontakt elektromagnetu</i>	68
<i>Obr. 74 Spojovací materiál</i>	69
<i>Obr. 75 Elektromagnet</i>	69
<i>Obr. 76 Větráček</i>	70
<i>Obr. 77 Indukční sonda</i>	70
<i>Obr. 78 Krokový motor</i>	71
<i>Obr. 79 Ložiska</i>	71
<i>Obr. 80 Hot-end E3D v6</i>	72
<i>Obr. 81 Vodicí tyč</i>	72
<i>Obr. 82 Řemen s řemenicemi</i>	73
<i>Obr. 83 Ostatní součástky</i>	73
<i>Obr. 84 – Skica, 3D model, prototyp</i>	75
<i>Obr. 85 Princip přepínání mezi extrudéry</i>	75

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1</i> Zhodnocení finančních nákladů.....	74
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

Materiálový list filamentu Devil Desing – PET-G

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST DEVIL DESIGN PET-G



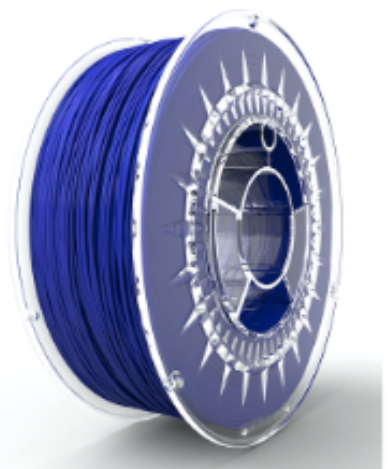
Devil Design Sp. J.
Zwirki i Wigury 65
43-190 Mikołów
Poland

Product card: PET-G filament for 3D printing.

Product description: Filament PET-G - a thermoplastic polymer from the group of polyesters in the form of fiber, used for 3D printing using the FFF method. Filament wound on a spool, vacuum packed with a moisture absorber. The spool contains 1 kg of net material. It can be used in all FFF printers that are not protected from external suppliers and open source structures before using. PET-G is a material friendly for beginners, material available in covering and transparent colors.

Physical properties of the product:

Diameter of filament	1.75 mm / 2.85 mm
Dimensional tolerance of filament	+/- 0.05 mm
Roundness of filament	+/- 0.02 mm
Surface of the material	High Gloss
Shrinkage of the material	Very low
Product weight	1.0 kg net, 1.36 kg gross
Spool - material	Transparent polycarbonate
Weight of the empty spool	~260 g
The diameter of the spool	200 mm
Width of spool	~70 mm
Diameter of mounting hole	62 mm
Packaging	Printed cardboard
Package size	~206x206x80 mm
Vacuum packing	Yes
Moisture absorber	Yes



Suggested printing parameters:

Hotend	220-250°C
Heated bed	70-80°C
Cooling the printout	Optional

Due to the structural differences of printers, the above figures should be considered as guidelines and the corresponding values must be determined experimentally.

Physical properties of the material:

Specific Density	1.23 g/cm ³	-
Glass Transition Temperature	80°C	ASTM 3418
Moisture	± 0.3%	-

Availability of colors and diameters:

Color	Kolor	1.75	2.85
Natural	Naturalny	✓	
White	Biały	✓	✓
Vanilla	Waniliowy	✓	
Bright Yellow	Jasnożółty	✓	✓
Yellow	Żółty	✓	
Bright Orange	Jasnopomarańczowy	✓	
Orange	Pomarańczowy	✓	
Bright Pink	Jasnoróżowy	✓	
Pink	Różowy	✓	
Lilac	Wzrosowy	✓	
Red	Czerwony	✓	✓
Raspberry Red	Malinowy	✓	
PC Gray	Jasnoszary	✓	
Gray	Szary	✓	
Blue	Błękitny	✓	
Super Blue	Niebieski	✓	✓
Navy Blue	Granatowy	✓	
Galaxy Violet	Galaktyczny Fioletowy	✓	
Violet	Fioletowy	✓	
Mint	Szałdymowy	✓	
Bright Green	Jasnozielony	✓	✓
Green	Zielony	✓	
Gold	Złoty	✓	
Aluminum	Aluminiowy	✓	
Copper	Miedziany	✓	
Beige	Beżowy	✓	
Brown	Brązowy	✓	
Galaxy Black	Galaktyczny Czarny	✓	
Black	Czarny	✓	✓
Transparent	Transparentny	✓	
Bright Yellow Transparent	Jasnożółty Transparentny	✓	
Bright Green Transparent	Jasnozielony Transparentny	✓	
Ruby Red Transparent	Rubinowy Transparentny	✓	
Blue Transparent	Błękitny Transparentny	✓	