



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

3D FDM TISKÁRNA S VÝMĚNNOU TISKOVOU HLAVOU

3D FDM PRINTER WITH A REPLACEABLE PRINT HEAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zdeněk Čuma

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Zdeněk Čuma
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

3D FDM tiskárna s výměnnou tiskovou hlavou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V úvodní části autor provede rešerši zvolené problematiky, zaměřenou na FDM tiskárny a výměnnou tiskovou hlavou. Následně navrhne vlastní mechanismus ustavení a upnutí výměnné hlavy umožňující využití univerzálních nástrojů, například laseru či frézovacího vřetene. Navržené zařízení bude vyrobeno a otestováno v provozu a autor na závěr provede technicko–ekonomické zhodnocení a doporučení.

Cíle diplomové práce:

- rešerše problematiky
- výroba FDM tiskárny
- návrh řešení výměnné hlavy
- výroba a ověření funkce výměnné hlavy
- technicko ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

SLOTA, Ján, Martin MANTIČ a Ivan GAJDOŠ. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.

GROTE, Karl-Heinrich a Erik K. ANTONSSON. Springer handbook of mechanical engineering: určeno pro posl. fak. strojní. 2. New York: Springer, c2009. ISBN 978-354-0491-316.

YILBAS, Bekir Sami. The laser cutting process: analysis and applications. Cambridge, CA: Elsevier, 2017. ISBN 978-012-8129-821.

BUDMEN, Isaac a Anthony ROTOLO. The book on 3D printing. 1. Lexington, KY: CreateSpace, 2013. ISBN 9781489529442.

ŽENÍŠEK, Josef. Teorie a konstrukce výrobních strojů. Praha: SNTL, 1988. 399 s. ISBN 04 -233- 88.

BAUMERS, Martin, Phill DICKENS, Chris TUCK a Richard HAGUE. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. Technological Forecasting and Social Change. 2016, vol 201. 193-201. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.02.015. ISSN 00401625. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162515000530>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je navržení a vyrobení mechanismu ustavení a upnutí výměnné hlavy 3D FDM tiskárny. První část práce pojednává o 3D tisku obecně, druhá část popisuje metodu FDM. Část třetí je věnována výběru a stavbě vhodné 3D tiskárny, čtvrtá část pak vlastnímu návrhu uchycení hlavice. V páté části je provedeno technické a ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

3D tisk, Fused deposition modeling, 3D tiskárna, RepRap, Výměnná tisková hlava

ABSTRACT

The aim of the work is to design and manufacture a mechanism for setting up and clamping the replaceable head of a 3D FDM printer. The first part of the thesis deals with 3D printing in general, the second part describes the FDM method. Part three is devoted to the selection and construction of a suitable 3D printer, the fourth part to the actual design of the head attachment. In the fifth part, a technical and economic evaluation is carried out.

Key words

3D print, Fused deposition modeling, 3D printer, RepRap, Replaceable print head

ČUMA, Zdeněk. *3D FDM tiskárna s výměnnou tiskovou hlavou*. Brno 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 88 s. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **3D FDM tiskárna s výměnnou tiskovou hlavou** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Zdeněk Čuma

Děkuji svému vedoucímu panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	9
1 3D TISK.....	10
1.1 Základní pojmy	10
1.2 Historie 3D tisku a projekt RepRap	10
1.2.1 Historie 3D tisku a projekt RepRap.....	11
1.3 Použití 3D tisku.....	11
1.4 Základní přehled jednotlivých metod 3D tisku.....	12
1.4.1 Tuhý materiál.....	12
1.4.2 Tekutý materiál	13
1.4.3 Materiál v podobě prášku	13
2 FUSED DEPOSITION MODELING – FDM	15
2.1 Struktura výrobku zhotoveného metodou FDM	17
2.1.1 Výška a šířka vrstvy.....	18
2.1.2 Vnější obal a perimetry	20
2.1.3 Výplň výrobku	20
2.1.4 Teplota tisku a chlazení	21
2.1.5 Rychlost tisku	23
2.2 Materiály pro 3D tisk metodou FDM	24
2.2.1 Materiál PLA	24
2.2.2 Materiál ABS	25
2.2.3 Materiál PET - G.....	26
2.3 Druhy tiskáren z hlediska konstrukce	26
2.3.1 Kartézská	26
2.3.2 Delta.....	28
2.3.3 Polar	28
2.3.4 Scara.....	29
2.4 Komponenty FDM 3D tiskárny	30
2.4.1 Tisková hlava	30
2.4.2 Tisková podložka	33
2.4.3 Rám a konstrukce tiskárny.....	33
2.4.4 Elektronika.....	34

3	VLASTNÍ 3D TISKÁRNA	36
3.1	Výběr typu tiskárny	36
3.2	3D tiskárna Rebel II	37
3.3	Stavba.....	39
3.3.1	Návrh a vlastní úpravy	39
3.3.2	Tištěné díly	43
3.3.3	Mechanická konstrukce a rám	44
3.3.4	Montáž jednotlivých os.....	46
3.3.5	Použitá elektronika	49
3.3.6	Firmware tiskárny	50
3.4	Kalibrace	51
3.4.1	Kalibrace os X, Y a Z	51
3.4.2	Kalibrace tiskové hlavy	51
3.4.3	Kalibrace tiskové podložky	51
3.5	Konec stavby a projekt RepRap.....	52
4	ÚPRAVA TISKOVÉ HLAVY	53
4.1	Návrh vlastního řešení upnutí tiskové hlavy.....	54
4.2	Výpočet sil působících na tiskovou hlavu	57
4.3	Tisk testovacích kusů.....	60
4.4	Návrh a řešení umístění kabeláže a přepojovacích konektorů.....	61
4.5	Výroba a instalace konečného modelu výměnné hlavy	63
4.6	Použité tiskové a gravírovací hlavy	64
4.6.1	Originální hlavice 3D tiskárny Rebel II.....	65
4.6.2	Hlavice Prusa i3 MK3.....	67
4.6.3	Hlavice s laserovým modulem.....	69
4.6.4	Hlavice s frézovacím vřetenem.....	71
5	TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	73
5.1	Technické zhodnocení upínacího mechanismu	73
5.1	Technické zhodnocení tiskových hlavic	74
5.1.1	Automatic Bed Leveling	74
5.2	Technické zhodnocení gravírovacích hlavic.....	75
5.2.1	Laserová gravírovací hlavice	75
5.2.2	Frézovací gravírovací hlavice	75
5.3	Ekonomické zhodnocení.....	75
5.3.1	Ekonomické zhodnocení doplňkových hlavic	77

ZÁVĚR	78
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	79
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	83
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	84
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	85
SEZNAM TABULEK	88

ÚVOD

Současná doba je dobou nových moderních technologií. Mezi tyto pokrokové technologie patří i 3D tisk. Rozšíření jeho využití vede i k rozvoji 3D tiskáren. A právě problematice úpravy hlavice 3D tiskárny je věnována tato práce.

První část práce pojednává o 3D tisku obecně, jeho historii, použití a metodách.

Ve druhé části je popsána v dnešní době celosvětově nejrozšířenější a nejdostupnější metoda 3D tisku, metoda FDM (Fused Deposition Modeling). Pozornost je věnována struktuře výrobků zhotovených metodou FDM a materiálům pro uvedenou metodu. Jsou zde popsány druhy tiskáren z hlediska konstrukce, Kartézská, Delta, Polar, Scara. Dále jsou pak zmíněny jednotlivé komponenty 3D tiskáren.

Část třetí je zaměřena na výběr tiskárny vhodné pro stavbu a pro návrh úpravy. Mezi vlastnosti na tiskárnu kladené patří především vysoká tuhost rámu, možnost vlastních úprav z hlediska mechaniky, elektroniky a všeobecná univerzálnost. Po pečlivém zvážení všech parametrů byla vybrána upravená verze hojně se vyskytující české RepRap tiskárny typu Rebel II. Je zde podrobně popsána její stavba a kalibrace.

Čtvrtá část se zabývá vlastní úpravou uchycení tiskové hlavice. Je navržena část pojezdu tiskové hlavice se systémem upínání pomocí výstředníku. Upínací síla tohoto řešení je ověřena prostřednictvím výpočtu. Funkčnost je následně ověřena prostřednictvím testovacích modelů. Navržené řešení je prezentováno použitím dvou tiskových hlavic, hlavice s laserovým modulem a CNC frézovací hlavice.

Pátá část obsahuje technické a ekonomické zhodnocení celého projektu.

1 3D TISK

3D tisk je technologií, při níž dochází k nanášení materiálu ve vrstvách a tím k fyzické tvorbě 3D CAD modelu. Různých technologií 3D tisku je v dnešní době celá řada a 3D tisk je rozšířen napříč komunitou ať už v profi, či hobby segmentu.

1.1 Základní pojmy

Aditivní technologie

Aditivní technologie je založena na vrstvení materiálu, při kterém vzniká 3D model. Může se jednat např. o plast, kov, nebo beton. Na rozdíl od konvenčního obrábění je materiál postupně přidáván, nikoliv odebírán. Nejznámější aditivní technologií je v dnešní době 3D tisk [40].

Rapid prototyping

Pojem Rapid Prototyping je používán od poloviny 80. let minulého století pro označení technologií, které nevyrábí výrobek klasickými postupy. Většinou se jedná o aditivní technologie. Tyto technologie jsou velmi často používány pro výrobu prototypů [41].

Reversní inženýrství

Reversní inženýrství můžeme označit také jako „zpětné inženýrství“, nebo „zpětná analýza“. Cílem reversního inženýrství je zpětně odkrýt funkčnost zkoumaného předmětu. Ve většině případů je cílem výroba stejného, či podobného výrobku [42].

V rámci reversního inženýrství je často využíváno 3D technologií, jako je 3D skenování a následný 3D tisk [42].

1.2 Historie 3D tisku a projekt RepRap

3D tisk je obecně považován za velmi moderní technologii, nicméně jeho počátky sahají až do 80. let 20. století. V roce 1986 byla patentována technologie zvaná stereolitografie, kterou si patentoval Charles Hull. Pod vedením Charlese Hulla začala firma 3D Systems v 90. letech vyrábět první komerčně dostupné 3D tiskárny [43].

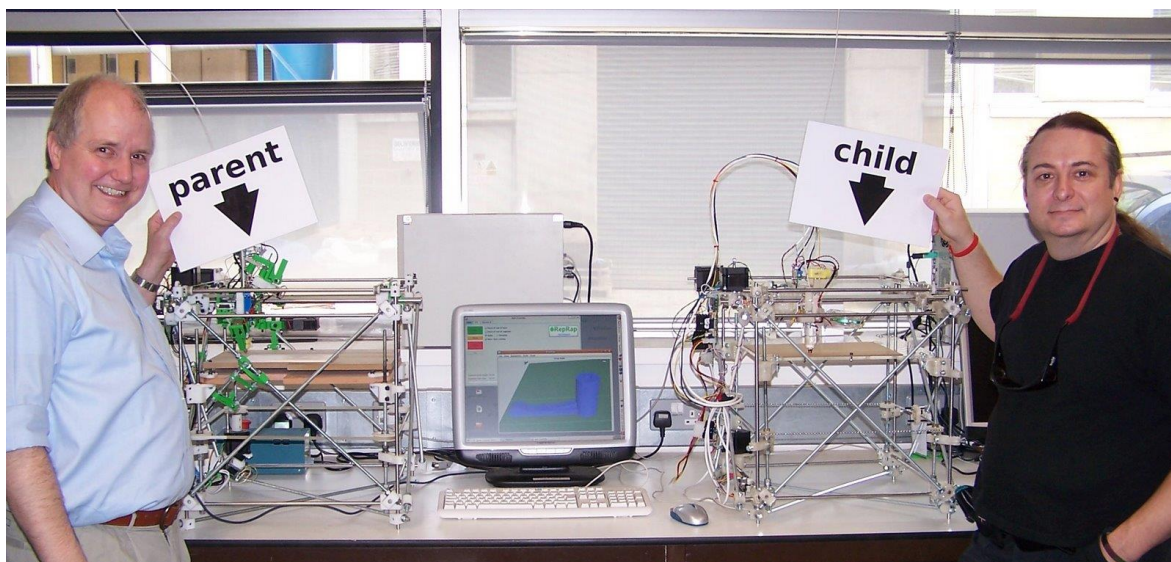
V následujících letech se začala postupně objevovat celá řada dalších technologií 3D tisku, které známe do dnes.

1.2.1 Historie 3D tisku a projekt RepRap

Zlomovým rokem historie 3D tisku byl rok 2005, kdy byl na University of Bath doktorem Adrianem Bowyerem založen projekt RepRap. Cílem tohoto projektu bylo vyrobit 3D tiskárnu, která zvládne sama vyrobit co nejvíce vlastních dílů [4].

Tento projekt byl od začátku koncipován jako tzv. „open source“, v rámci něhož jsou veškerá zdrojová data zdarma veřejně přístupná a volně modifikovatelná. To umožnilo zapojení se do projektu všem nadšencům z celého světa. RepRap tiskárny jsou od té doby nejrozšířenějším typem 3D tiskáren [4].

RepRap je zkratka odvozená z anglického „replicating rapid prototyper“ [44]



Obr. 1.1 Dr. Adrian Bowyer a Vik Oliver s první RepRap tiskárnou [44].

1.3 Použití 3D tisku

3D tisk je v současné době rozšířen napříč prakticky všemi průmyslovými odvětvími a používán k celé řadě různých aplikací. Téměř každá firma zabývající se návrhem a výrobou nových výrobků již disponuje nějakým typem 3D tiskárny. 3D tisk ve firmách je většinou používán především pro výrobu prototypů. Případně složí k malosériové výrobě, nebo k tvorbě přípravků.

Díky cenovému rozpětí, v rámci kterého lze pořídit tiskárnu již zhruba od 3000 Kč se 3D tisk hojně dostal také do hobby segmentu, kde ho hojně využívají např. modeláři a domácí kutilové.

Opakem levných tiskáren jsou tiskárny s cenou v řádu milionů, které umožňují 3D tisk z kovu. V tomto případě lze pomocí 3D tisku vyrobit velmi tvarově náročné výrobky, které by běžnými technologiemi šli jen velmi těžko vyrobit, nebo vůbec. Tyto výrobky navíc disponují velmi čistou strukturou, např. na rozdíl od odlitků nemají žádné nežádoucí vměstky.

Dalším odvětvím kde může být 3D tisk velmi ceněným nástrojem je zdravotnictví. Díky technologiím 3D tisku je možné vyrobit např. protézu přesně na míru pro daného pacienta.

3D tisk začíná být v současné době využíván také ve stavebnictví ke stavbě domů.

1.4 Základní přehled jednotlivých metod 3D tisku

Metod 3D tisku je celá řada, nicméně je můžeme rozdělit do několika základních kategorií podle výchozího materiálu, který daná 3D tiskárna zpracovává.

Mezi tyto materiály patří tuhý materiál, tekutý materiál a materiál v podobě prášku.

V dnešní době existuje celá řada různých metod 3D tisku. V rámci této kapitoly zmíníme ty nejznámější a nejrozšířenější.

1.4.1 Tuhý materiál

Nejrozšířenějším druhem 3D tisku je takový, který zpracovává tuhý materiál. Ve většině případů se jedná o materiál v podobě tiskové struny, tzv. filamentu.

FDM - Fused Deposition Modeling

Tato metoda je ze všech metod 3D tisku zcela nejrozšířenější, ať už v průmyslu, tak i v hobby segmentu [36].

Metoda je založena na tavení filamentu a jeho nanášení v tekutém stavu po jednotlivých vrstvách na sebe ve tvaru průřezu tištěného modelu. Po tisku každé z vrstev dojde k posunutí tiskové podložky v ose Z a poté probíhá opět tisk další vrstvy. Metoda FDM je někdy také známá pod názvem FFF - Fused Filament Fabrication [36].

LOM - Laminated Object Manufacturing

Metoda LOM pracuje na bázi skládání jednotlivých vrstev fólií na sebe. Mezi fólie je nanesen přílnavý nátěr a následně jsou jednotlivé vrstvy přitlačeny k sobě horkým válcem. Pomocí laserového řezání je poté vyřezán obrys výrobky. Tento proces se opakuje, dokud není výrobek zcela hotov [1].

1.4.2 Tekutý materiál

Dalším z používaných vstupních materiálů pro 3D tisk je materiál ve formě kapaliny. Jedná se o kapalinu na bázi fotopolymerů, která je vytvrzována pomocí UV paprsku.

SLA - Stereolitografie

Metoda zvaná stereolitografie je jednou z nejstarších metod 3D tisku. Aktuálně je druhou nejrozšířenější metodou po metodě FDM/FFF.

Tato metoda je založena na vytvrzování tekutého fotopolymeru pomocí UV záření. Fotopolymer je postupně po jednotlivých vrstvách vytvrzován a tím vzniká výrobek. Po ukončení 3D tisku je nutné výrobek vytvrdit. Kromě samotného 3D tisku je tedy nutná ještě další operace [1].

Metoda SLA je vhodná především pro tisk velmi přesných a mechanicky nenamáhaných výrobků, např. šperků.

PJM - PolyJet Matrix

Metoda PJM využívá jako vstupní materiál také fotopolymery. Ty jsou nanášeny pomocí tiskové hlavy s velkým počtem trysek po jednotlivých vrstvách na sebe. Materiál tuhne po dotyku s předchozí vrstvou [1].

Tisková hlava se pohybuje ve dvou osách – X a Y. Podložka, na níž je tištěn daný model, se pohybuje v ose Z [1].

Tato technologie je vhodná pro tisk vícebarevných modelů. Umožňuje také tisk z mnoha materiálů s odlišnými vlastnostmi.

1.4.3 Materiál v podobě prášku

Materiál v podobě prášku je používán především u technologií 3D tisku při nichž dochází k tisku z kovových materiálů. Kov je v podobě prášku a je postupně po vrstvách „spékán“ dohromady dokud nevznikne požadovaný model.

SLS - Selective Laser Sintering

Tato metoda je založena na tavení materiálu v podobě prášku, který je postupně po jednotlivých vrstvách nanášen na sebe. Následně je spékán pomocí výkonného laseru. Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny pomocí vyrovnávacího válce. Tisk probíhá v komoře, která je vyplněna interním plynem [1].

Vstupní materiál v podobě prášku může být kovový, plastový, keramický nebo skleněný. Výhodou této metody je možnost opětovného využití nespotebovaného prášku, který nahrazuje podpurný materiál [1].

Prostřednictvím této technologie je možné vyrobit tvarově velmi složité výrobky stejných, nebo vyšších kvalit než běžnými obráběcími technologiemi. Na rozdíl od odlitků je struktura výrobku zcela čistá neobsazující např. vměstky [1].

DMLS - Direct Metal Laser Sintering

Metoda DMLS je velmi podobná metodě SLS. Rozdíl je především v systému nanášení prášku, který není nanášen pomocí vyrovnávacích válců, ale vyrovnávacího ramena. Vstupní materiál pro tisk prostřednictvím této technologie je výhradně kovový (hliník, ocel, nerezová ocel, titan) [1].

2 FUSED DEPOSITION MODELING – FDM

Metoda FDM je v současné době celosvětově nejrozšířenější a nejdostupnější metodou 3D tisku [5].

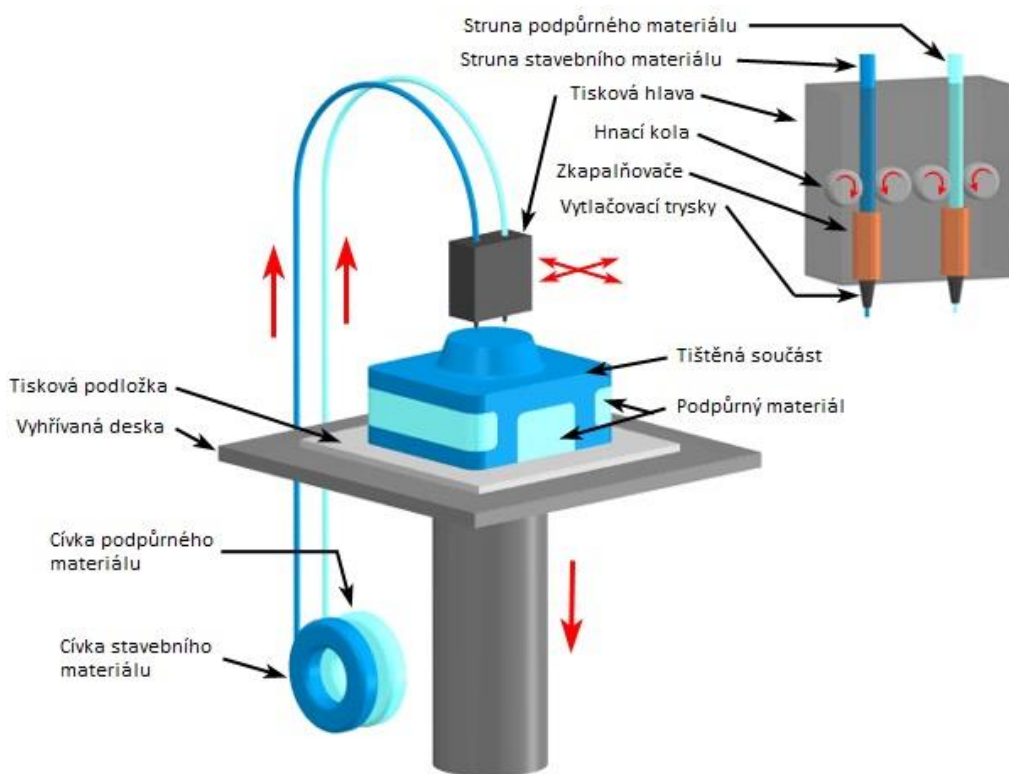
Označení FDM je registrovanou známkou firmy Stratasys. Tato metoda je také známá pod označením FFF – Fused Filament Fabrication, kterou používá např. firma Prusa Research. Tato označení však lze považovat za synonyma [2, 4].

Metoda FDM je založena na nanášení jednotlivých vrstev stavebního materiálu. Materiál je v podobě tiskové struny prostřednictvím ozubených kol vtlačován do tiskové hlavy, kde je nataven a dále vytlačován přes trysku na tiskovou podložku v osách X a Y. Poté, co je nanášena celá jedna vrstva v průřezu tištěného dílu, dojde k posunu v ose Z a následně je nanášena další vrstva, dokud není celý výrobek hotov.



Obr. 2.1 Nanášení vrstev materiálu prostřednictvím technologie FDM [24].

Tiskárna typu FDM může zpracovávat více druhů materiálu současně, během tisku jednoho výrobku. Zejména u profesionálních tiskáren je velmi často využívána možnost tisku stavebního materiálu a zároveň materiálu podpůrného. Podpůrný materiál musí mít podobné tiskové vlastnosti jako materiál stavební, zejména teplotu tavení. Podpůrný materiál je však následně možno rozpustit v příslušném roztoku na rozdíl od materiálu stavebního, který zůstane zachován [3].



Obr. 2.2 Schématické znázornění metody FDM [3].

Další možností využití tisku více materiálů během jednoho tisku je také možnost použití různých odstínů barev.

Tiskárna však musí být pro tento typ tisku vybavena větším počtem tiskových hlav, případně jiným mechanismem, který zajišťuje výměnu jednotlivých tiskových strun.



Obr. 2.3 Ukázka vícebarevných modelů [6].

Metoda FDM slouží především k tisku prototypových součástí, u kterých je možné vyzkoušet jejich funkčnost a design při použití minimálních nákladů. Součásti však mají dobré mechanické vlastnosti, tudíž je možné vyhotovit prostřednictvím této metody taktéž konečné výrobky [4].

Zároveň je tato metoda vhodná pro modeláře nebo architekty pro výrobu modelů a vizualizací [7].



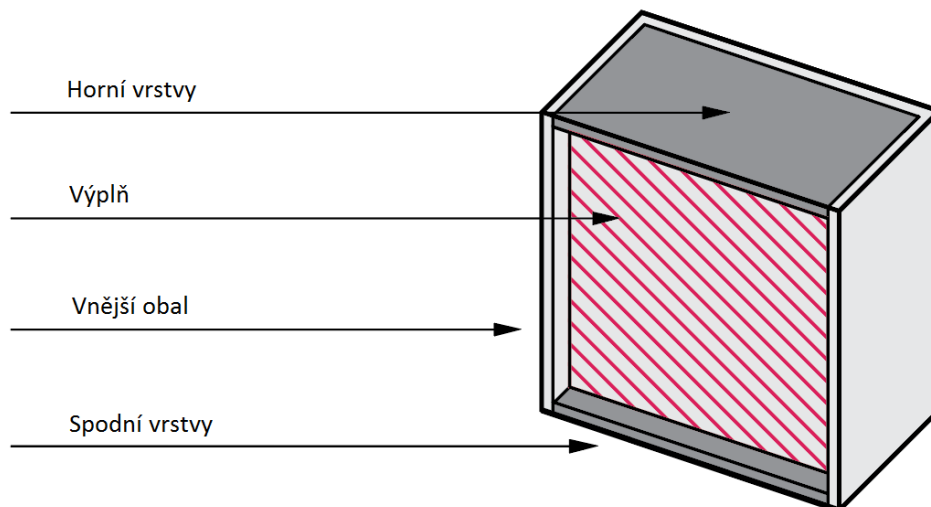
Obr. 2.4 3D model rodinného domu [7].

2.1 Struktura výrobku zhotoveného metodou FDM

Výsledná struktura výrobku vyhotoveného pomocí technologií FDM závisí především na použité trysce, nastavení tisku a mechanické přesnosti konkrétní 3D tiskárny.

Je třeba dopředu určit, k čemu bude výrobek sloužit a jaké jsou požadavky na jeho detaily, přesnost a mechanické vlastnosti.

Běžný model tištěný prostřednictvím technologie FDM můžeme rozdělit na čtyři základní části. Parametry každé z těchto částí lze prostřednictvím nastavení tisku optimalizovat dle požadovaných vlastností daného výrobku [11].

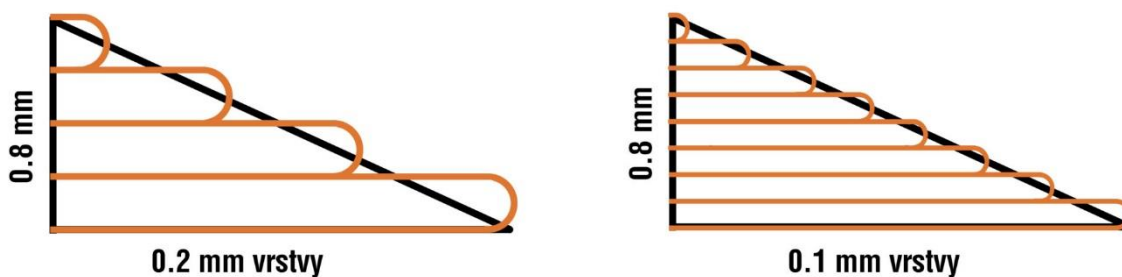


Obr. 2.5 Struktura výtisku [11].

2.1.1 Výška a šířka vrstvy

Nejvýznamnější vliv na výslednou strukturu povrchu daného výrobku má především šířka vrstvy, která je přímo závislá na průměru trysky, přes kterou je vytlačován materiál a výška vrstvy. Obecně platí pravidlo, že výška vrstvy by neměla přesahovat 80 % průměru trysky. Kromě tohoto omezení jsou však na sobě tyto detaily spíše nezávislé [9].

Šířka vrstvy ovlivňuje především detail v rovině XY, která je rovnoběžná s podložkou. Výška vrstvy má naopak vliv hlavně na detail v ose Z a na šikmých stěnách výtisku [9].



Obr. 2.6 Vliv šířky vrstvy na detail v rovině XY [9].

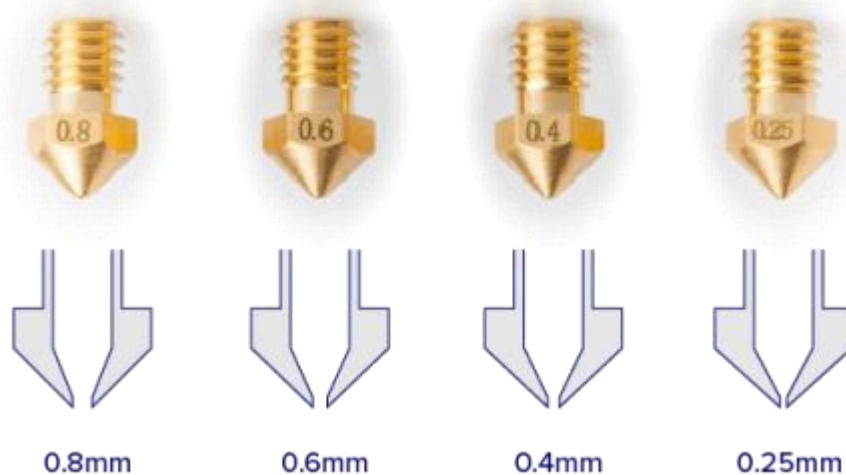


Obr. 2.7 Vliv tloušťky vrstvy na detail v rovině XY [4].

Výška vrstvy a průměr trysky mají také největší vliv na rychlost tisku. Tryska s větším průměrem zvládne vytisknout stejnou tloušťku stěny rychleji než tryška s menším průměrem a zároveň umožňuje tisk větší tloušťky vrstvy [9].

Průměr trysky se v běžných podmínkách pohybuje v rozmezí od 0,2 mm do 1,0 mm. Nejvíce se však používají průměry od 0,25 mm do 0,6 mm.

Nejčastěji používanou tryskou je tryška o průměru 0,4 mm. Výška vrstvy by tedy v tomto případě neměla přesáhnout 0,32 mm [9].



Obr. 2.8 Trysky různých průměrů [8].

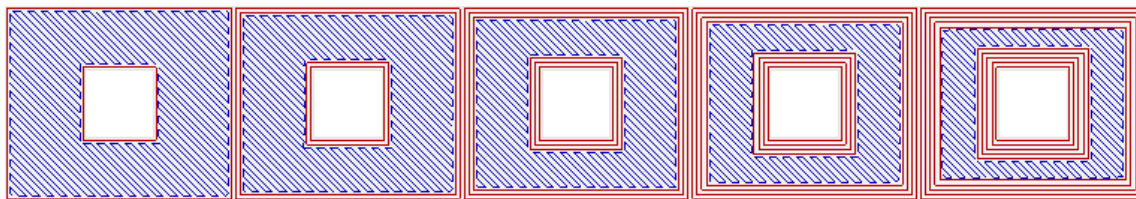
Průměr trysky má také vliv na mechanické vlastnosti výtisku. Výrobky zhotovené pomocí trysek většího průměru mají větší mechanickou odolnost [9].

2.1.2 Vnější obal a perimetry

Vnější obal výrobku je dán počtem tzv. perimetrů. Počet perimetrů definuje počet vláken stěny modelu ležících vedle sebe. S rostoucím počtem perimetrů roste tloušťka stěny tištěného modelu a opačně. S rostoucím počtem perimetrů se však zvyšuje spotřeba materiálů a v závislosti na tom také doba tisku [12, 13].

S počtem perimetrů se však také zvyšuje pevnost modelu, aniž by bylo nutné navyšovat množství materiálu pro výplň modelu [11].

Pokud má být tištěný model následně dále upravován např. prostřednictvím broušení nebo chemickým vyhlazováním, je často nutné navýšit tloušťku stěny a tím i počet perimetrů, protože dokončovací operace snižují tloušťku stěny modelu [11].



Obr. 2.9 Počet perimetrů 1-5 [12].

2.1.3 Výplň výrobku

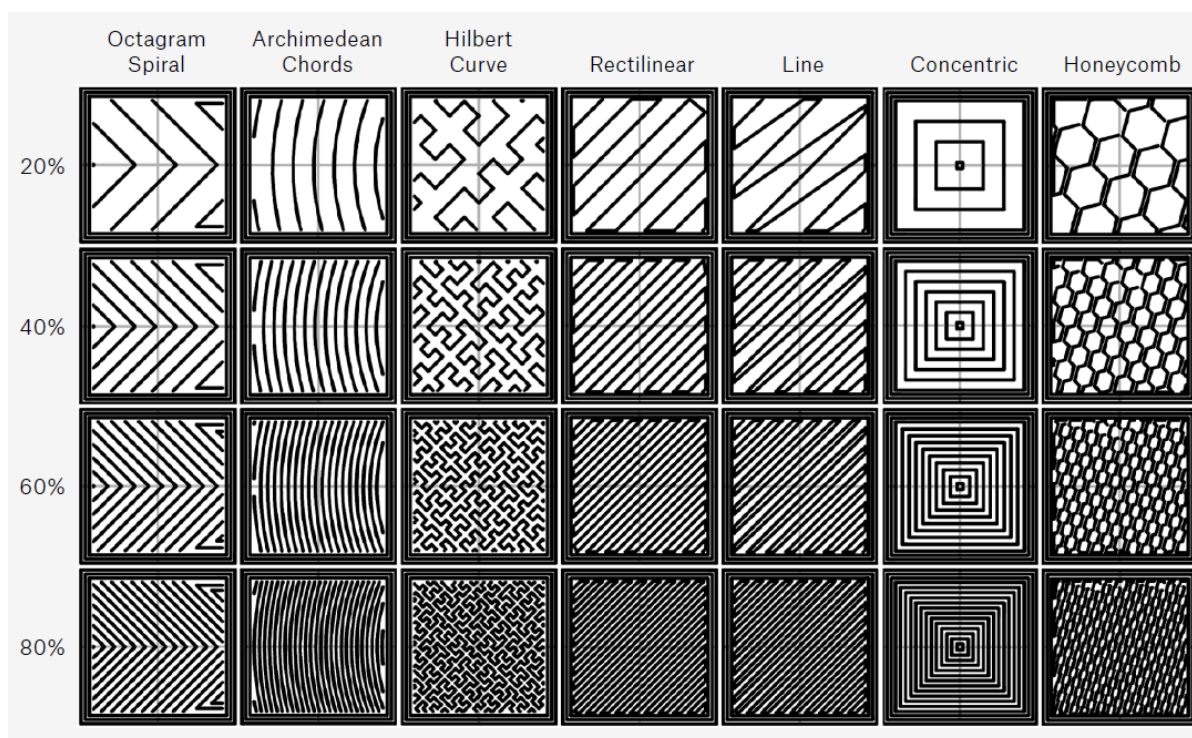
Výrobky zhotovené 3D tiskem nejsou ve většině případů zcela vyplněny materiálem. Dle požadavků na daný výrobek se množství výplně pohybuje mezi 5-100%. Je tomu tak především kvůli úspoře materiálu a významnému zkrácení tiskového času.

Některé výrobky mohou být zcela bez výplně jako skořepiny. Jedná se především o modely tisknuté jako „spirálová váza“.

U designových modelů, které nejsou nijak mechanicky namáhány (např. sošky), se množství výplně pohybuje mezi 5-15 %.

Naopak u mechanicky namáhaných součástí je množství výplně v rozmezí 20-100 %.

Odolnost modelu přímo souvisí s procentem výplně. Výrobek s 50 % výplně ve srovnání s 25 % je obvykle o 25 % silnější, zatímco navýšení výplně z 50 % na 75 % zvyšuje pevnost součásti přibližně pouze o 10 % [11].



Obr. 2.10 Množství a typy výplně [10].

Mechanické vlastnosti výrobku jsou závislé také na vzoru výplně. Některé vzory jsou vhodné pro zatížení pouze v jedné ose, jiné rovnoměrně ve všech osách. Naopak další mohou být použity především jako designový prvek např. u výtisku z průhledného materiálu, případně pokud vzor výplně není uzavřen celistvou vrstvou a zůstává viditelný.

2.1.4 Teplota tisku a chlazení

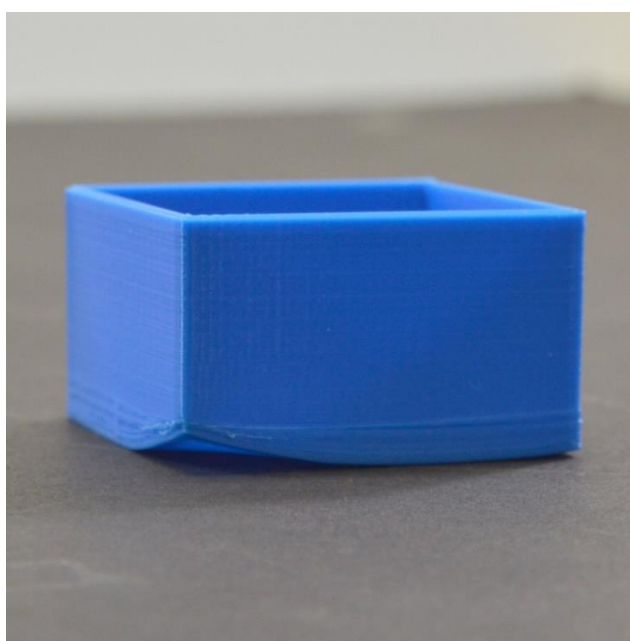
Teplota trysky při tisku je jedním z proměnlivých parametrů a závisí na několika faktorech, mezi které se řadí především druh tištěného materiálu, rychlost tisku, tloušťka trysky, teplota prostředí, ve kterém se tiskárna nachází, požadavky na vnější vzhled a mechanické vlastnosti výtisku [14].

Obecně se teplota trysky pohybuje v rozmezí od 190 °C (materiál PLA) po 280 °C (materiál PC-ABS). V méně častých případech však může být teplota i nižší, případně vyšší. [14].



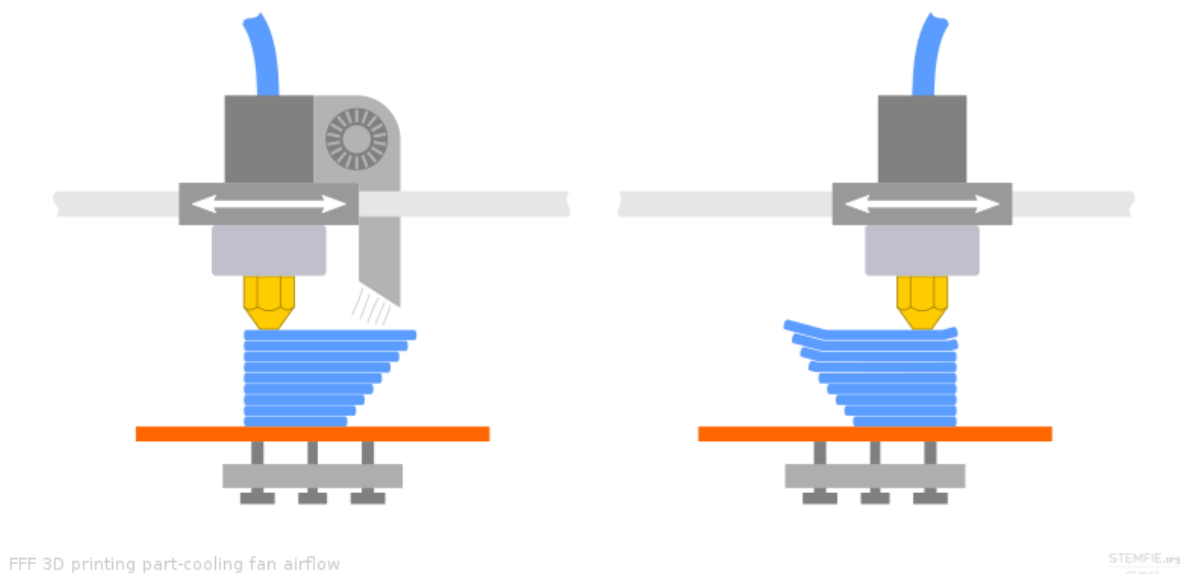
Obr. 2.11 Teplotní testovací věž znázorňující závislost daného materiálu na teplotě tisku [17].

Dalším prvkem 3D tiskárny s proměnnou teplotou je vyhřívaná podložka (pokud jí je tiskárna osazena). Vyhřívaná podložka především brání výtisku v tepelném smrštění prvních vrstev, následkem kterého by došlo k odlepení výtisku od tiskové podložky. V případě vyhřívané podložky je hlavním parametrem určujícím požadovanou teplotu především materiál použitý pro tisk výrobku. Teplota podložky se pohybuje v rozmezí od 50 °C (materiál PLA) po 110 °C (materiály ABS, HIPS, ASA, PC-ABS) [15].



Obr. 2.12 Smrštění materiálu vlivem teplotní roztažnosti při nízké teplotě podložky [19].

Důležitým prvkem hrajícím velkou roli v oblasti teplot je taktéž chlazení výtisku. Před tiskem každé další vrstvy musí předchozí vrstva nejdříve vychladnout, aby si model zachoval svůj tvar. Na intenzitu chlazení má vliv především materiál a konstrukce tištěného modelu. Zatímco např. u materiálu PLA je doporučeno mít chlazení vždy zapnuté, u materiálu ABS je tomu přesně naopak a chlazení se používá případně pouze za určitých podmínek, např. při tisku mostů a převisů. [16].



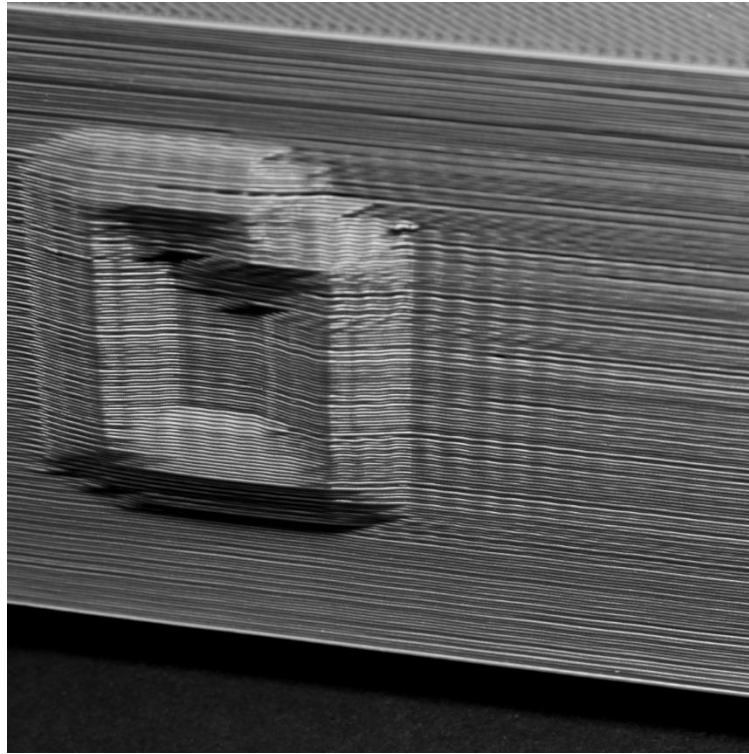
Obr. 2.13 Schématické znázornění tisku s přídavným chlazením a bez přídavného chlazení [18].

2.1.5 Rychlost tisku

Dalším z důležitých parametrů majících vliv na výslednou podobu a kvalitu výrobku je rychlost tisku. Rychlost tisku je závislá především na konstrukci a možnostech 3D tiskárny, konstrukci a materiálu tištěného modelu, nastavení tisku, požadované kvalitě modelu.

Rychlost tisku se obvykle pohybuje v rozmezí 10-80 mm/s. Některé 3D tiskárny ale umožňují rychlost tisku až 200 mm/s.

Každá část struktury výtisku se ve většině případů tiskne rozdílnou rychlostí. Vnější perimetr, který bývá na výtisku viditelný, se zpravidla tiskne výrazně pomaleji, než výplň modelu a další prvky.



Obr. 2.14 Snížená kvalita 3D tisku vlivem vysoké rychlosti a vibrací [19].

2.2 Materiály pro 3D tisk metodou FDM

Jednou z velkých výhod metody FDM je možnost využití mnoha různých materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Materiálů pro tisk metodou FDM je celá řada a liší se mechanickými vlastnostmi, složením, chemickou odolností, náročností tisku, pořizovací cenou a dalšími aspekty.

Mezi nejčastěji používané trio materiálů patří materiál ABS, PLA a PET-G. Používána je však celá řada dalších materiálů, případně jejich variací.

2.2.1 Materiál PLA

Nejpoužívanějším materiálem pro 3D tisk je materiál PLA (Polylactic Acid). Jedná se o biologicky odbouratelný materiál vyráběný např. z dextrózy - cukru extrahovaného z biologických materiálů jako je např. kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. Na rozdíl od takzvaných reaktoplastů je možné PLA opakovaně zahřívat přes jeho teplotu tání s velmi malou degradací materiálu [15, 27].

Materiál PLA je díky nízké tepelné roztažnosti vhodný k tisku velkých objektů, které se tolik nekrotí a dobře drží na tiskové podložce. Vyhřívaná tisková podložka není pro materiál PLA zcela nutná, nicméně se doporučuje. Pokud je jí 3D tiskárna osazena, vytápí se na teplotu kolem 60 °C. Teplota trysky se pak obvykle pohybuje v rozmezí 190 °C až 220 °C [15, 25].

Tento materiál je velmi dobře zpracovatelný. Je tvrdý a poměrně křehký. Při rozbití se třísť a vytváří ostré hrany. Jeho opracování je v závislosti na jeho teplotě tuhnutí náročnější než např. u materiálu ABS. Lze opracovávat mechanickým obráběním, např. broušením [15, 27].

Výhodou tisku z materiálu PLA jsou velmi nízké výpary. Tiskárna tedy může být umístěna přímo na pracovišti nebo v domácnosti, aniž by musela být nutně umístěna ve speciální větrané místnosti.

Mezi nevýhody materiálu PLA patří nevhodnost venkovního použití a nízká tepelná odolnost, která dosahuje přibližně pouze 60 °C. Další nevýhodou je nutnost skladování v suchém prostředí, protože materiál PLA je velmi hydrofobický [27].

Z hlediska pořizovací ceny je tento materiál poměrně levný, avšak dražší než ABS.

2.2.2 Materiál ABS

Materiál ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) je jedním z nejpoužívanějších a nejuniverzálnějších tiskových materiálů. Jedná se o termoplast, tudíž může být opakovaně roztaven a krystalizován, aniž by došlo ke znehodnocení materiálu [15, 26].

Je vhodný pro vnitřní i vnější použití. Mezi jeho výhody patří dobrá odolnost vůči mechanickému poškození, zdravotní nezávadnost, vysoká odolnost vůči kyselinám, louhům, uhlovodíkům, olejům a tukům. Další výhodou je také dobrá tepelná odolnost až do 100 °C. Známým příkladem využití tohoto materiálu jsou kostičky značky LEGO [15, 25, 27].

Materiál ABS lze mechanicky opracovávat např. broušením a je také rozpustný v acetonu, za jehož pomoci lze výtisk vyhladit a jednotlivé díly slepovat dohromady [27].

Nevýhodou tohoto materiálu je vyšší teplota tisku, která se běžně pohybuje v rozmezí od 220 °C do 260 °C. Nutností pro tisk je vyhřívaná podložka, jejíž použití je nutné z hlediska tepelného smrštění, na základě kterého by došlo k oddělení výtisku od podložky. Teplota tiskové podložky se v případě materiálu ABS pohybuje v rozmezí 80 °C až 110 °C [15, 27].

Další nevýhodou tisku z materiálu ABS jsou poměrně silné výpary. Je tedy nutné, aby byla 3D tiskárna umístěna v dobře větrané místnosti [27].

Tento materiál je z hlediska pořizovací ceny nejlevnějším materiálem pro 3D tisk.

2.2.3 Materiál PET - G

Třetím z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk je materiál PET - G, který je dokonale transparentním amorfním kopolyesterem. Písmeno G ve zkratce označuje slovo Glykol, který je do PET plastu přidáván během jeho výroby. Glykol modifikuje vlastnosti PET plastu. Snižuje křehkost, zlepšuje tisknutelnost a zajišťuje průhlednost plastu [15, 27].

Tento materiál je velmi houževnatý a vyniká odolností vůči mechanickému poškození. Je lesklý, tuhý a odolný proti nízkým i vysokým teplotám. Zároveň je také minimálně nasákavý a zdravotně nezávadný. Dále má také nízkou tepelnou roztažnost, díky čemuž se zřídka kdy odlepí od tiskové podložky [15, 27].

Teplota trysky se pohybuje kolem 240 °C a teplota vyhřívané podložky v rozmezí 80 – 100 °C, kterou je důležité při tisku použít [15, 27].

Všeobecně tento materiál kombinuje vlastnosti materiálů PLA a ABS. Má dobré mechanické vlastnosti a tepelnou odolnost, přičemž si zachovává dobrou tisknutelnost.

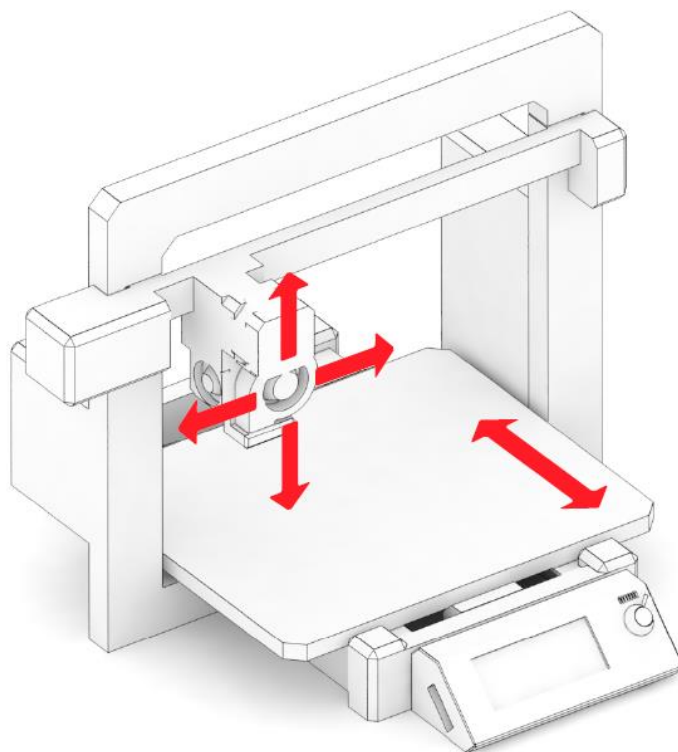
Materiál PET – G má oproti materiálu PLA a ABS z pravidla vyšší pořizovací cenu.

2.3 Druhy tiskáren z hlediska konstrukce

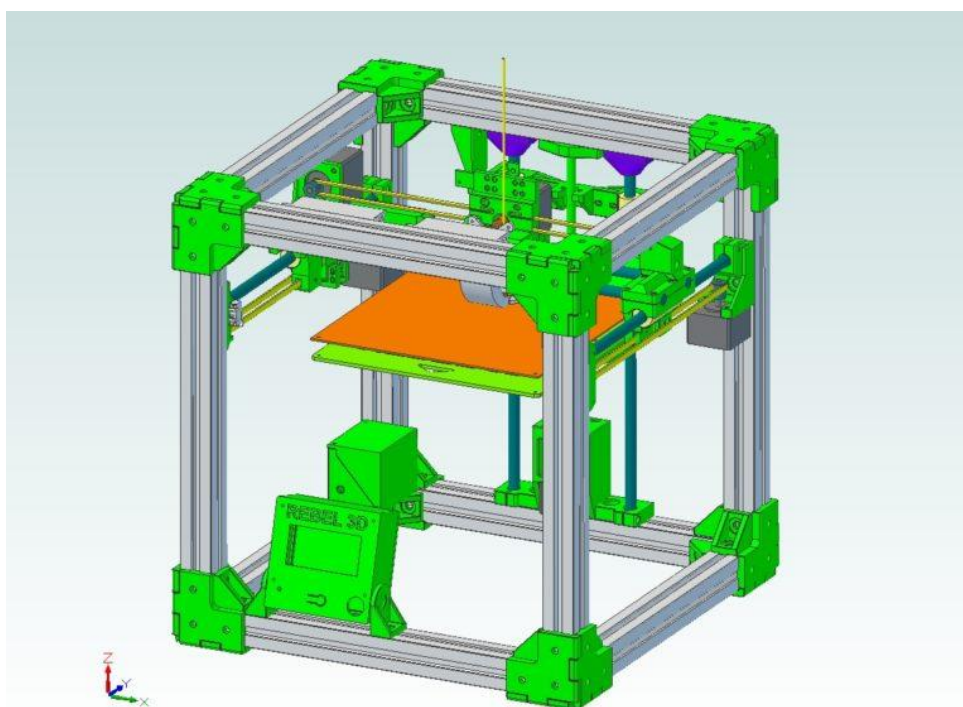
3D tiskárny jsou konstrukčně velmi podobné běžným CNC strojům, případně robotům. Mezi nejzákladnější čtyři druhy konstrukce patří: Kartézská, Delta, Polar a Scara. Každá z těchto konstrukcí má své specifické vlastnosti.

2.3.1 Kartézská

Kartézská 3D tiskárna je založena na pohybu ve třech osách - X,Y,Z. Tisková hlava se nejčastěji pohybuje ve dvou osách a podložka v jedné ose. Nejběžnějším způsobem je pohyb tiskové hlavy v ose X,Z a podložky v ose Y. Tento způsob využívají např. velmi rozšířené tiskárny firmy Prusa Research. Další možností je pohyb tiskové hlavy v osách X,Y a podložky v ose Z. Tento způsob využívají především kartézské tiskárny, jejichž rám je ve tvaru krychle. Tisková podložka je u většiny kartézských tiskáren pravoúhlého tvaru [4, 20].



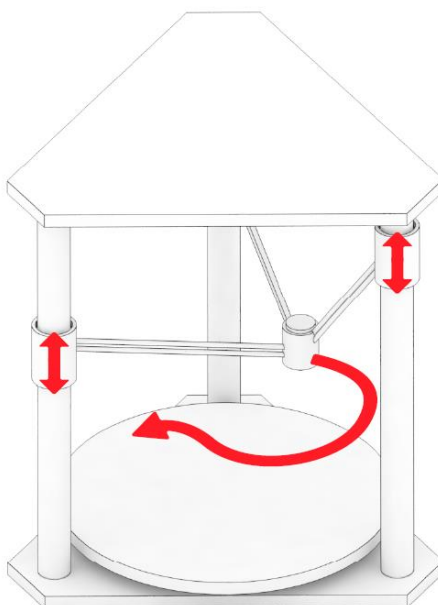
Obr. 2.15 Schématické znázornění kartézské tiskárny Prusa i3 MK3S [4].



Obr. 2.16 Kartézská tiskárna Rebel sCUBE s rámem ve tvaru krychle [22].

2.3.2 Delta

Na tiskárnách typu Delta je tisková hlava zavěšená na třech stejně dlouhých ramenech, která jsou spolu spojena právě v místě tiskové hlavy. Jednotlivá ramena se v místě svého zavěšení posouvají pouze v ose Z. Výhodou této konstrukce jsou rychlé pohyby a velký tiskový prostor v ose Z. Tiskárny tohoto typu jsou tedy vhodné pro vysoké výtisky. Složitá geometrie naopak vyžaduje složité výpočty pro pohyby jednotlivých krokových motorů, které zajišťují posuv jednotlivých ramen [4, 20].



Obr. 2.17 Schématické znázornění Delta tiskárny [4].

2.3.3 Polar

Tiskárny typu Polar jsou založeny na pohybu tiskové hlavy ve dvou osách a rotační podložce. Jedná se o konstrukčně velmi jednoduchý systém z hlediska sestavení tiskárny. Tento typ tiskárny má zpravidla o jeden krokový motor méně než ostatní typy, což může vést k určitému snížení nákladů na stavbu. Naopak příprava modelu pro tisk je velmi složitá a podporuje ji velmi málo programů. Tiskárny typu Polar jsou prozatím velmi málo rozšířené [4, 20].



Obr. 2.18 3D tiskárny R-360 konstrukčního typu Polar [20].

2.3.4 Scara

Tento typ tiskáren používá pro pohyb tiskové hlavy dvě robotická ramena nebo jedno dvoukloubové rameno. Tento typ tiskáren je vhodný zejména pro tisk velkých modelů. Jedná se o velmi málo rozšířený druh 3D tiskáren.



Obr. 2.19 Robotická paže v kombinaci s FDM 3D tiskem [23].

2.4 Komponenty FDM 3D tiskárny

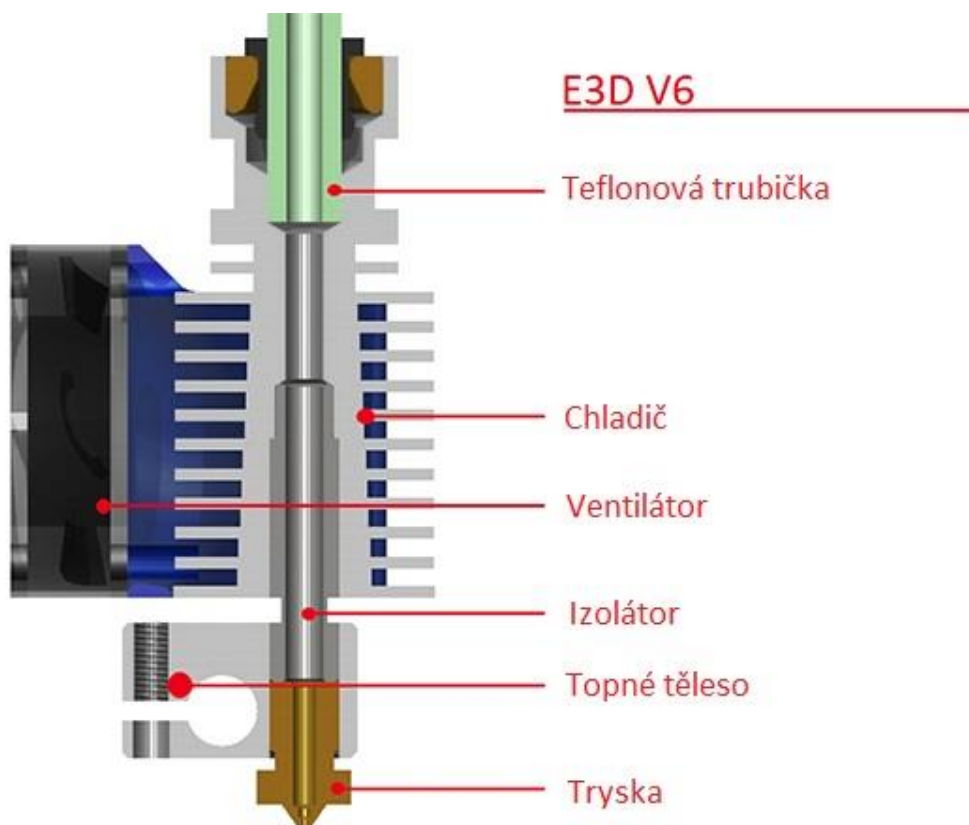
Běžná 3D tiskárna se skládá z několika základních částí, mezi které můžeme zařadit tiskovou hlavu, tiskovou podložku, rám a mechanickou konstrukci a elektroniku. Tyto jednotlivé části a jejich vzájemné seřízení vůči sobě má výrazný vliv na přesnost a výslednou kvalitu tisku.

2.4.1 Tisková hlava

Hlavním prvkem 3D tiskárny je tisková hlava, neboli tzv. extruder, který slouží k nanášení jednotlivých vrstev materiálu [4].

Extruder se skládá z několika prvků, které vtlačují, nahřívají a nanášejí roztavený tiskový materiál na tiskovou podložku a případně jej i chladí [28].

Hlavním prvkem tiskové hlavy je tzv. hotend („horký konec“). Do hotendu je vtlačován materiál pomocí ozubeného kola, které je připojeno ke krokovému motoru. Ozubené kolo s krokovým motorem je umístěno přímo nad hotendem nebo na konstrukci tiskárny v závislosti na tom, zda se jedná o přímý nebo nepřímý extruder.



Obr. 2.20 Konstrukce hotendu výrobce E3D [28].

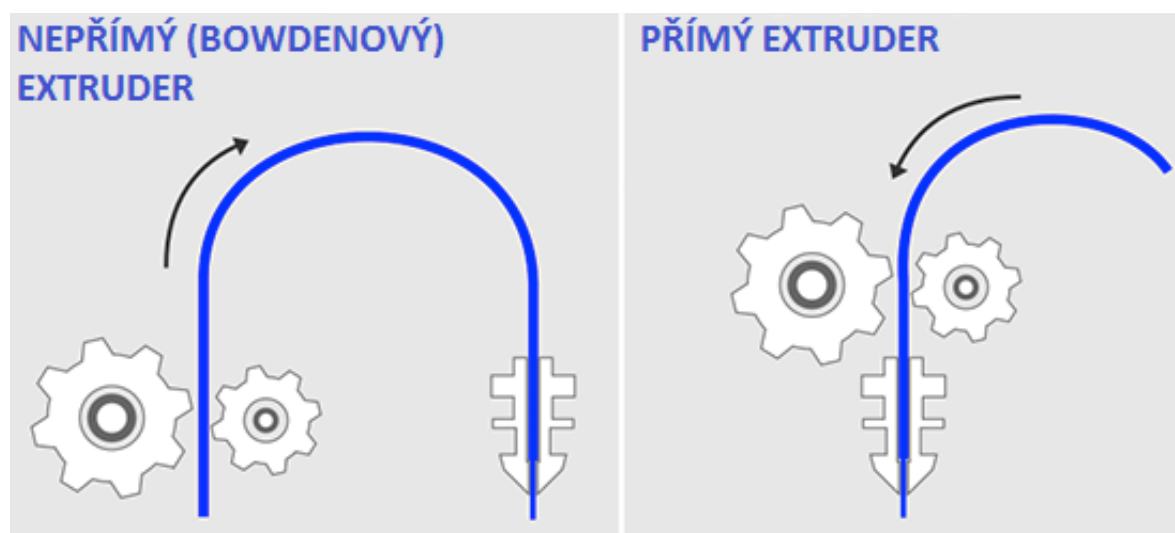
Materiál je do hotendu přiveden nejčastěji prostřednictvím teflonové trubičky, na jejímž konci vstupuje do chladiče. Chladičem je dále veden přes izolátor do topného tělesa, kde je roztaven. Tekutý materiál následně pokračuje přes trysku ven na tiskovou podložku.

Chladič je většinou v žebrovaném provedení pro lepší odvod tepla a musí být dostatečně chlazen za pomoci ventilátoru, případně za pomoci jiného systému chlazení. Během tisku totiž dochází k expanzi tepla především vlivem tzv. retrakce, při níž dochází k natažení roztaveného materiálu zpět směrem nahoru [28].

Retrakce se používá při přejezdech tiskové hlavy tak, aby při přejezdu nedocházelo ke svévolnému vytékání materiálu z trysky.

Topné těleso, které je s chladičem propojeno prostřednictvím izolátoru, je vytápěno na takovou teplotu, aby došlo k roztavení tiskového materiálu. Součástí topného tělesa je termistor, který dává zpětnou vazbu řídicí jednotce tiskárny. Řídicí jednotka následně zapíná/vypíná proud do ohřívače, který je zasunut uvnitř topného tělesa.

Celý hotend je zakončen tryskou, ze které je materiál vytlačován po roztavení v topném tělese. Trysky jsou vyráběny v různých průměrech a z různých materiálů. Liší se především odolností. Pro specifické materiály potřebujete k nim příslušnou trysku [28].



Obr. 2.21 Dva rozdílné způsoby vedení filamentu [28].

Nepřímý, neboli bowdenový druh extruderu má podávací systém umístěný mimo tiskovou hlavu na nepohyblivé části konstrukce tiskárny [28].

Výhodou tiskové hlavy s nepřímým podáváním je především její nízká hmotnost. Lehká tisková hlava může dosahovat vyšších rychlostí při pohybu, protože nemusí vynakládat velké množství energie při akceleraci a deceleraci [28].

Zároveň nevyžaduje tak velkou tuhost konstrukce rámu, jako tiskárny s přímým podáváním materiálu.

Nevýhodou nepřímé tiskové hlavy je větší pravděpodobnost výskytu chyb a vzniku problémů při pohybu materiálu. Tyto problémy jsou úměrné vzdálenosti podávacího mechanismu od hotendu. Nejvíce problematické jsou v tomto ohledu flexibilní materiály [28].



Obr. 2.22 3D tiskárna Creality Ender 3 s bowdenovým extruderem [30].

Mezi přednosti přímého extruderu patří především spolehlivé vytlačování materiálu. Jelikož je motor s podávacím systémem umístěn podstatně blíže hotendu, dochází tak mnohem méně k problémům s vytlačováním materiálu [29].

Dále je výhodou mnohem kratší retrakce, neboli vytahování materiálu zpět z trysky. Protože je extruder blíže, může snadněji vytáhnout vlákno [29].

Přímý extruder je obecně považován za kompatibilnější s širším rozsahem tiskových materiálů. To platí zejména u flexibilních (pružných) a abrasivních materiálů [29].

Nevýhodou je naopak vysoká hmotnost tiskové hlavy a vibrace způsobené krokovým motorem. Dále pak může umístění podávacího mechanismu ztěžovat přístup k určitým částem kvůli údržbě [29].



Obr. 2.23 Přímý extruder tiskárny Originál Prusa i3 MK3 [31].

2.4.2 Tisková podložka

Tisková podložka 3D tiskárny je důležitým prvkem, na kterém dochází ke stavbě samotného modelu. Podložka se ve většině případů při tisku pohybuje v jedné ose.

U většiny dnešních 3D tiskáren je tisková podložka vybavena vyhřívanou deskou, která slouží k lepšímu přilnutí tištěného modelu k podložce. Zabraňuje kroucení tištěné součásti a jejímu smrštění vlivem teploty [4].

2.4.3 Rám a konstrukce tiskárny

Rám 3D tiskárny tvoří její nosnou konstrukci. Tuhost rámu a jeho přesnost má výrazný vliv na výslednou kvalitu tisku. Tuhý a pevný rám omezuje vibrace a tím umožňuje rychlejší tisk bez snížení jeho kvality [4].

Většina 3D tiskáren vyráběných v současné době má rám složen z hliníkových profilů.

U kvalitnějších 3D tiskáren jsou pojezdy jednotlivých os vedeny pomocí lineárních ložisek po broušených kalených tyčích. U levnějších tiskáren jsou pojezdy os většinou vedeny přímo po rámu.

Komponenty konstrukce 3D tiskáren v levnější kategorii jsou většinou plastové. U RepRap tiskáren jsou jednotlivé součásti většinou vyhotoveny přímo 3D tiskem.

2.4.4 Elektronika

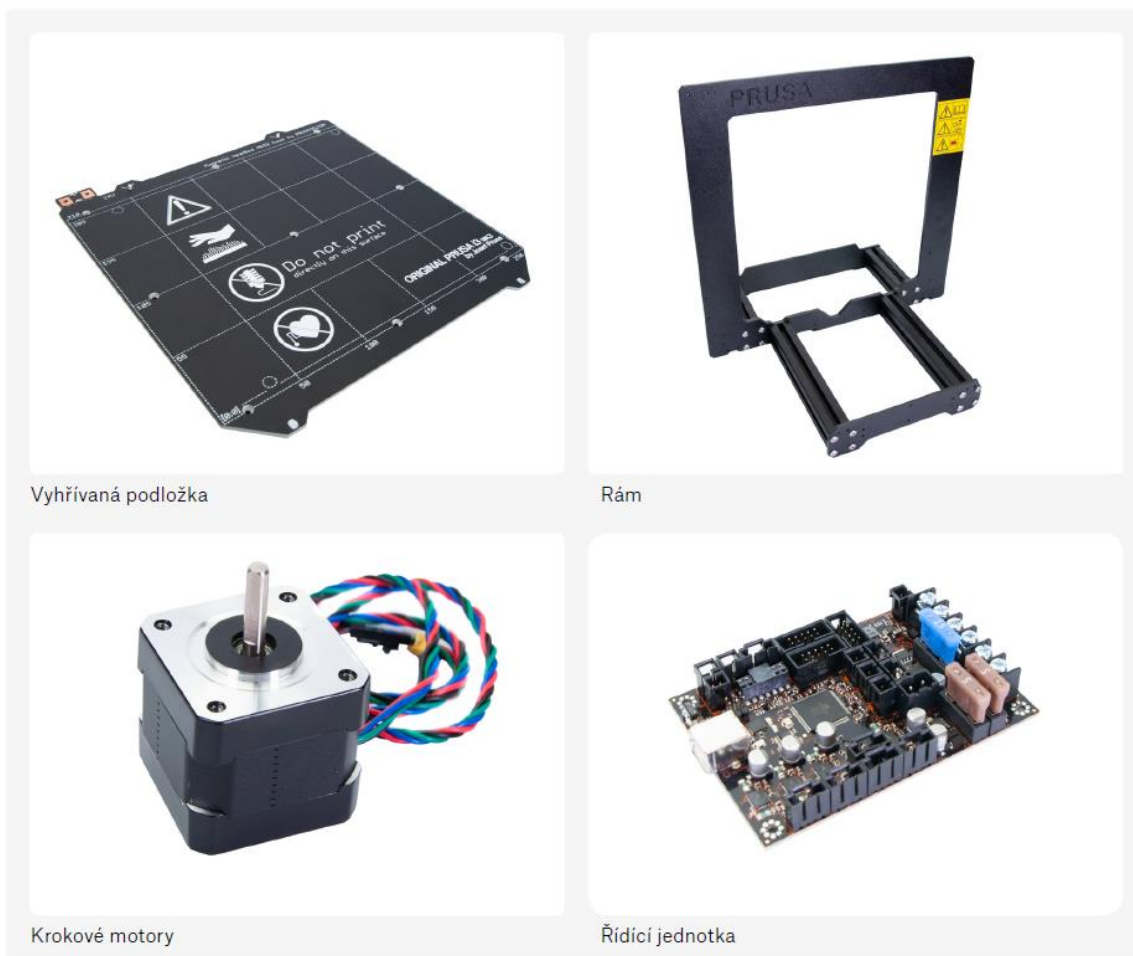
Do elektroniky můžeme zařadit několik komponent, které se starají o chod 3D tiskárny. Jedná se především o zdroj elektrického proudu, řídicí jednotku a krokové motory, čidla a topná tělesa.

Každá tiskárna musí mít zdroj elektrického proudu, který se stará o převod vstupního napětí z elektrické sítě na výstupní napětí, které napájí elektronické součásti tiskárny. Výstupní napětí u 3D tiskáren bývá nejčastěji 12 V nebo 24 V dle výrobce a konkrétního modelu. Příkon zdroje se u jednotlivých modelů pohybuje v rozmezí přibližně od 200 W do 400 W.

Řídicí jednotka se stará o chod celé tiskárny. Jejím primárním úkolem je čtení a zpracování G-kódu, který řídí veškeré pohyby 3D tiskárny a udává teplotu hotendu a vyhřívané podložky. Řídicí jednotky bývají z pravidla osazeny 8 bit až 32 bit čipem [4].

Krokové motory vykonávají veškeré pohyby 3D tiskárny. Jedná se o pohyb jednotlivých os a podávání tiskového materiálu dovnitř extruderu. Počet krokových motorů závisí na konstrukci tiskárny. U nejběžněji používaných kartézských tiskáren je většinou použito celkem pět krokových motorů. Jeden pro osu X, jeden pro osu Y, dva pro osu Z a jeden pro podávání tiskového materiálu. Krokových motorů však může být méně nebo i více [4].

Posledním ze základních elektronických komponent jsou topná tělesa, kterými je osazen hotend a ve většina případů také tisková podložka. Dále pak různá čidla, mezi která se řadí především termistory podávající řídicí jednotce zpětnou vazbu o teplotách na hotendu a vyhřívané podložce. Některé modernější tiskárny jsou však také osazeny např. čidlem přítomnosti tiskového materiálu, nebo kalibrace tiskové podložky apod..



Vyhřívaná podložka

Rám

Krokové motory

Řídicí jednotka

Obr. 2.24 Komponenty 3D tiskárny firmy Prusa Research s.r.o. [4].

3 VLASTNÍ 3D TISKÁRNA

3D tisk je v dnešní době již dobře známou a velmi rozšířenou technologií, která může být využita v širokém spektru napříč průmyslem až k domácímu využití.

3D tiskárna může být nástrojem velmi dobře využitelným pro firmy, které za její pomoci dokáží velmi rychle a poměrně snadno zpracovávat své návrhy, vize a vytvářet prototypy. Případně také finální výrobky a funkční díly.

V domácnosti může 3D tiskárna taktéž sloužit k vytváření modelů všeho druhu, ale i hraček a sloužit všeobecně jako zábavní prvek.

V dnešní době je možné pořídit si základní typ FDM tiskárny v přijatelné cenové kategorii. Vzhledem k finanční dostupnosti si tak tiskárnu může dovolit zcela jistě každá firma, ale také řada domácností.

Koupě tiskárny však není jedinou cestou, jakou se dá 3D tiskárna získat. I když je v dnešní době na trhu již celá řada komerčně prodávaných 3D tiskáren, tak se za určitých okolností může vyplatit si svoji 3D tiskárnu sestavit.

3D tiskárna vlastní výroby může mít řadu výhod, ale také nevýhod. Mezi výhody patří především prakticky neomezená možnost volby tvaru, rozměrů a celkových mechanických parametrů tiskárny. Dále také tvorba, či přizpůsobení si elektroniky a softwarového vybavení tiskárny.

Výše zmíněné výhody však mohou být naopak také nevýhodou, to vše samozřejmě záleží na schopnosti každého konstruktéra, který tiskárnu staví. Mezi nevýhody může patřit především bezpečnost, protože svépomocí vyrobená tiskárna může vykazovat určitá nebezpečí, např. v zapojení a použité elektronice.

Je proto vhodné zvážit, zda se vyplatí stavět vlastní 3D tiskárnu nebo koupit hotový komerčně prodávaný model.

3.1 Výběr typu tiskárny

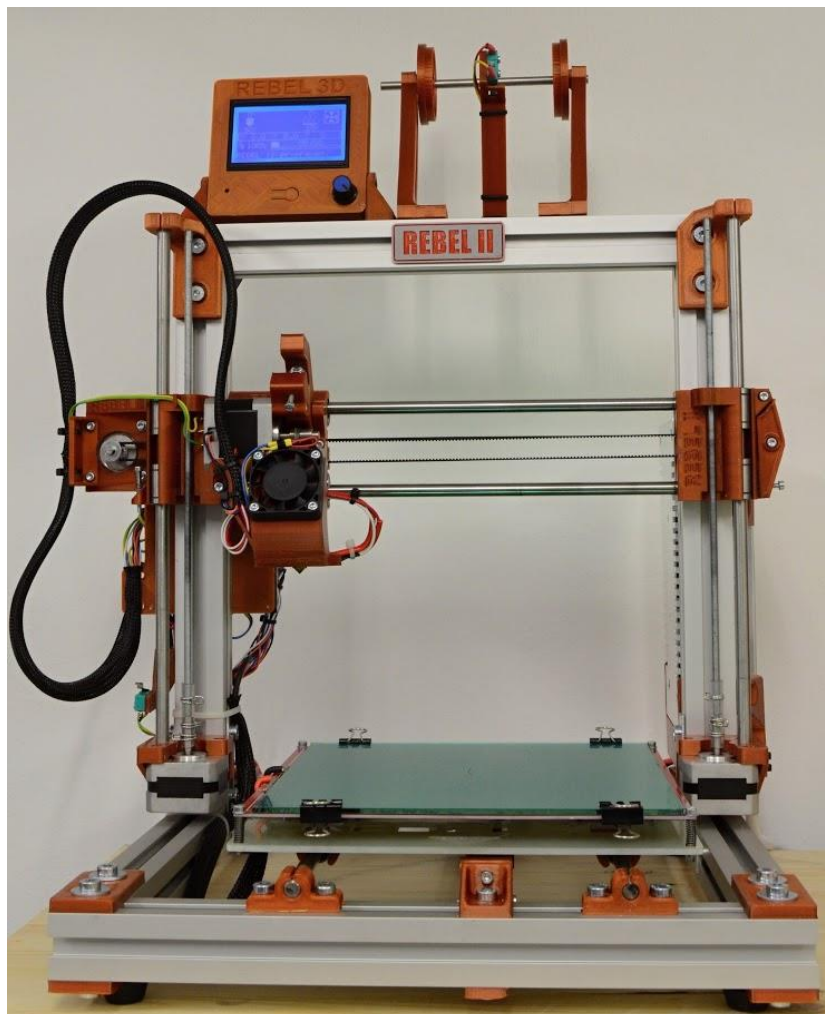
Pro splnění hlavního cíle této práce bylo nutné zvolit vhodnou 3D tiskárnu.

Mezi vlastnosti kladené na tiskárnu, která by byla vhodná k tomuto účelu, patří především vysoká tuhost rámu, možnost vlastních úprav z hlediska mechaniky, elektroniky a všeobecná univerzálnost.

Jelikož většina komerčně prodávaných tiskáren je určena výhradně pouze k 3D tisku a dále postrádá univerzalitu, v rámci které by bylo možné 3D tiskárnu využít i pro další technologie, tak bylo nutné vybrat model, který by tyto požadavky splnil.

Proto byla také zvolena možnost vlastní stavby 3D tiskárny. Konkrétně v rámci projektu RepRap, tedy tiskárny, jejíž velká část je tištěna na jiné 3D tiskárně.

K tomuto účelu byla vybrána upravená verze hojně se vyskytující české RepRap tiskárny typu Rebel II, jejíž CAD modely mechanických částí a návody na její stavbu jsou volně dostupné na internetu.



Obr. 3.1 Základní verze 3D tiskárny Rebel II [32].

3.2 3D tiskárna Rebel II

Rebel II je open source 3D tiskárnou projektu RepRap. Jedná se o velmi oblíbenou 3D tiskárnu, která byla navržena českým autorem a stala se velmi oblíbenou mezi těmi, kteří si chtějí tiskárnu vlastnoručně postavit. Jedná se o 3D tiskárnu kartézského typu [33].

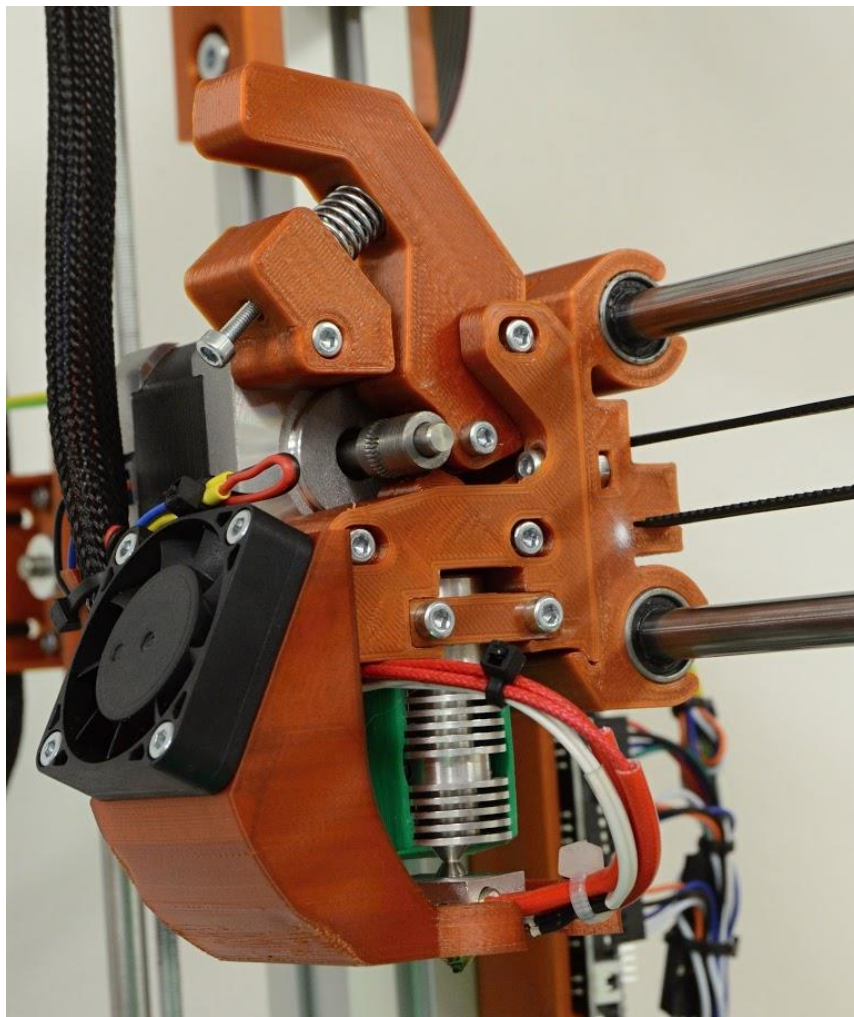
Tato 3D tiskárna je díky své robustní konstrukci velmi pevná a odolná. Rám je složen z hliníkových profilů. Mechanické komponenty tiskárny jsou v rámci projektu RepRap tištěny jinou 3D tiskárnou. Díky tomu je možné tiskárnu dále modifikovat

dle vlastních požadavků. Tiskárnu lze díky její velmi pevné konstrukci snadno transportovat na jiné místo, aniž by došlo k jejímu mechanickému poškození [33].

3D tiskárna je osazena vyhřívanou podložkou a je tak na ní možné tisknout prakticky jakýkoliv materiál určený pro FDM tiskárny. Tisková podložka je uložena na stolku, který se pohybuje v ose Y. O její pohyb se stará krokový motor připojený k řemeni pomocí řemenice.

Vstupním materiálem pro tiskárnu Rebel II je tisková struna o průměru 1,75 mm.

Tisková plocha, kterou Rebel II ve své základní verzi disponuje, se pohybuje okolo 200 x 200 x 200 mm.



Obr. 3.2 Tisková hlava tiskárna Rebel II [32].

Tisková hlava tiskárny Rebel II je přímého provedení, tedy hnací mechanismus filamentu je umístěn přímo na hotendem.

O pohon hnacího mechanismu se stará krokový motor, na jehož hřídeli je umístěna zubatice. O zubatici se opírá ložisko, kterým je přitlačována tisková struna prostřednictvím páky s pružinou. Odtud je tisková struna vtačována do hotendu, který je nejčastěji typu E3D.

Chladič je osazen ventilátorem o rozměrech 30 x 30 x 10 mm, chladič výtisku je osazen ventilátorem o rozměrech 40 x 40 x 10 mm. Výstupní část ofuku výtisku je kruhového tvaru, tudíž chlazení tištěného modelu je rovnoměrně rozloženo.

Tisková hlava se pohybuje v osách X a Z. Vedení pojezdu tiskové hlavy je zprostředkováno pomocí ložisek LM8UU, která jsou uložena na broušených kalených tyčích. V ose X se o pohon stará krokový motor, který je prostřednictvím řemenice propojen s řemenem. V ose Z jsou dva krokové motory, které pohánějí závitové tyče.

V závislosti na tomto provedení je tedy tiskárna velmi přesná.

3.3 Stavba

Pro stavbu vlastní 3D tiskárny byl tedy vybrán model Rebel II, jehož komponenty a návody na stavbu jsou v rámci open source projektu RepRap volně ke stažení na internetu.

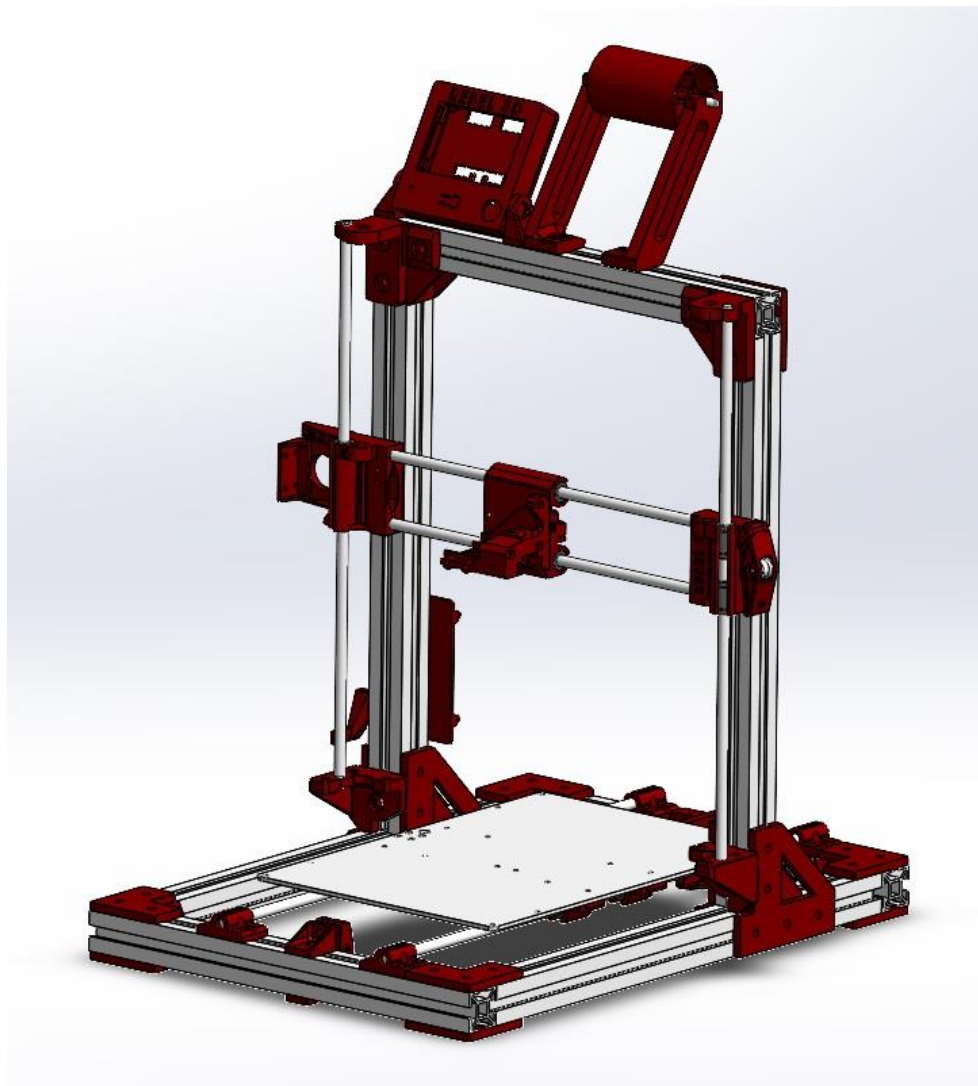
Konkrétně byla vybrána již mírně upravená verze tiskárny, která disponuje zesílenou konstrukcí rámu a zesíleným uložením závitových tyčí [34].

Nevýhodou této upravené konstrukce je nutnost použití vyššího množství tiskového, spojovacího a dalšího stavebního materiálu tiskárny. Tato nevýhoda však oproti příznivým vlastnostem je spíše zanedbatelná.

Na tiskárně byly však provedeny také další konstrukční úpravy, jako je další mírné zesílení konstrukce, umístění rozměrově většího a výkonnějšího zdroje, zvětšení tiskového prostoru na 300 x 200 x 250 mm.

3.3.1 Návrh a vlastní úpravy

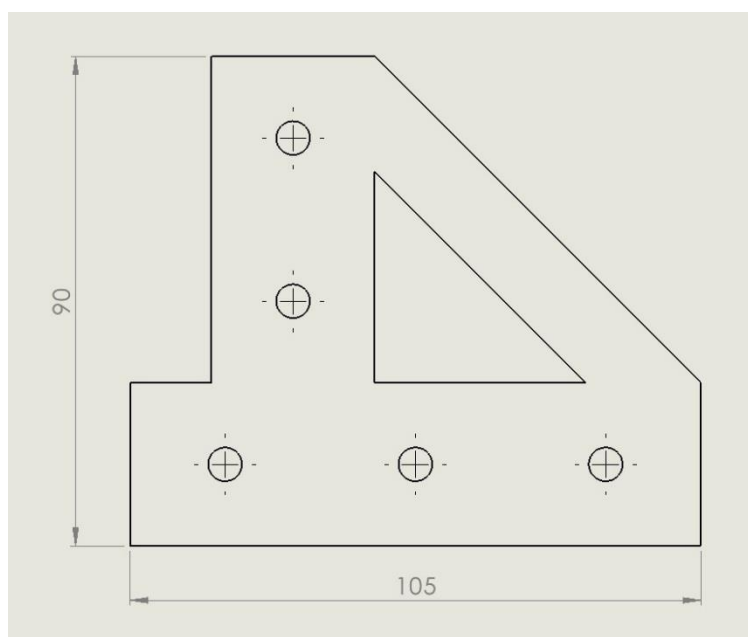
Konstrukce tiskárny byla vymodelována v programu SolidWorks, kde poté proběhla editace daných součástí. Všechny díly bylo nutné znovu překreslit, protože výchozí model byl ve formátu .stl, který nelze bezproblémově editovat.



Obr. 3.3 Návrh mechanické konstrukce vlastní 3D tiskárny Rebel II v programu SolidWorks.

Nejvýraznější úpravou tiskárny bylo zvětšení tiskového prostoru o 55 mm v ose Z a 100 mm v ose Y. Zvětšení tiskového prostoru obnášelo především prodloužení Al profilů, nicméně také mírné zpevnění celkové konstrukce.

Konstrukce byla zpevněna editací „T“ dílu, který drží svislé profily. K „T“ dílu byla přidána vzpěra. Tuto změnu bylo možné přidat pouze na vnějších „T“ dílech, protože na vnitřních by úprava kolidovala s vedením kabeláže.

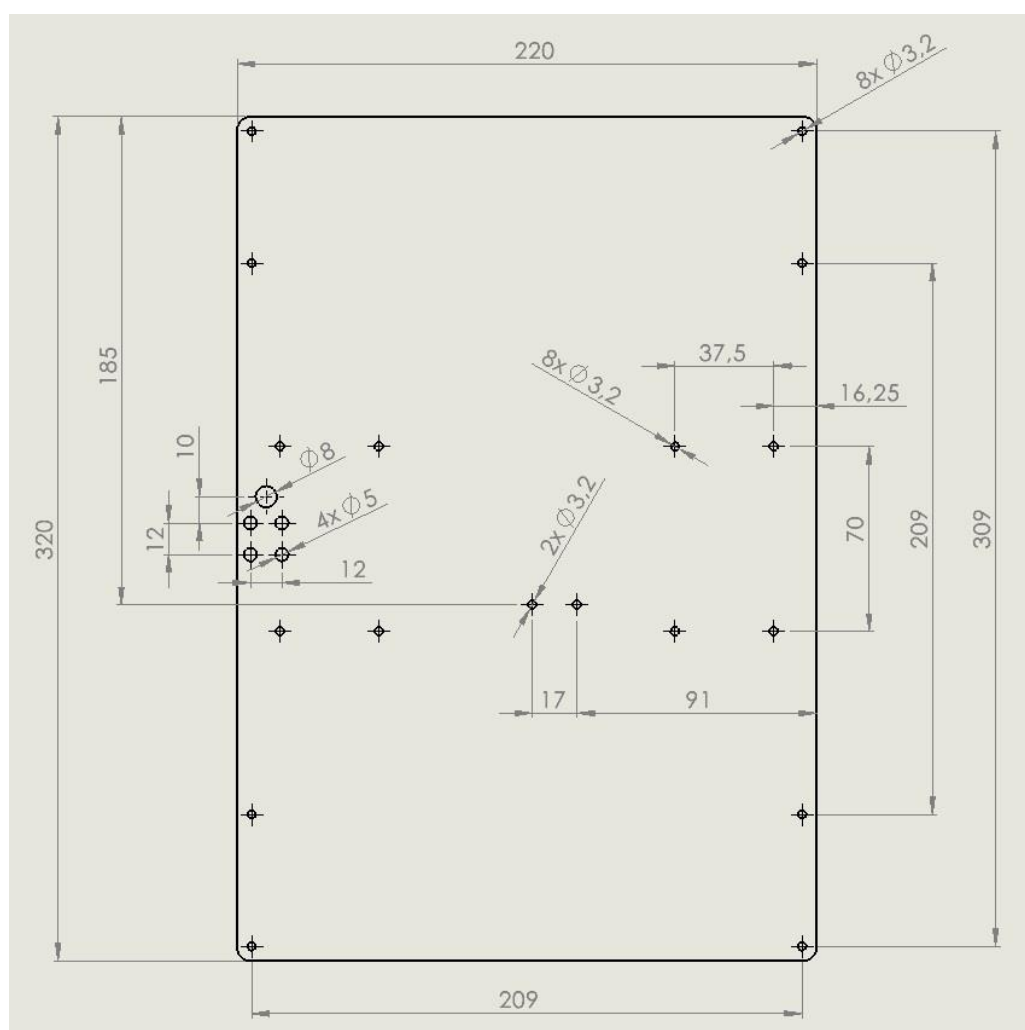


Obr. 3.4 Návrh zesílení „T“ profilu v programu SolidWorks.

Dále byly změněny rozměry stolku, který byl v ose Y prodloužen o 100 mm. Vhodnou technologií pro obrobění stolku je laserové řezání.

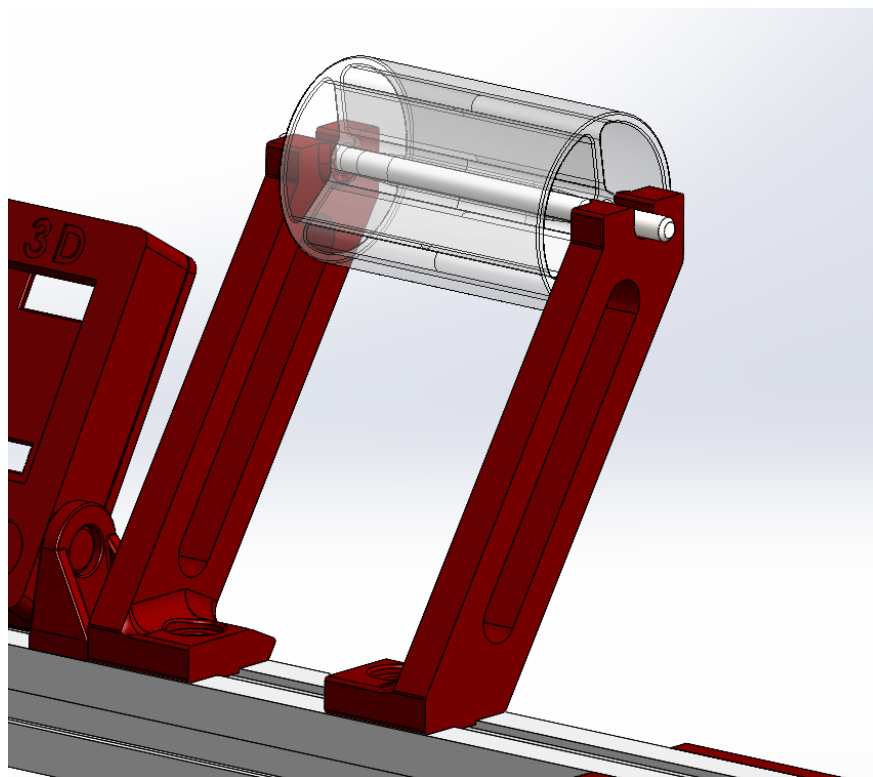
Do stolku byly navrženy otvory pro montáž vyhřívané podložky s tiskovou plochou 200 x 300 mm, ale i pro původní velikost 200 x 200 mm z důvodu možné výměny v případě poruchy.

Ostatní rozměry a otvory stolku byly ponechány v původním provedení. Pro zvýšení pevnosti by bylo také vhodné umístit držáky ložisek dále od sebe, nicméně to by však znamenalo nutnost dalšího prodloužení Al profilů a tím i zvýšení nároků na prostor tiskárny.



Obr. 3.5 Návrh stolku v programu SolidWorks.

Poslední z výraznějších editací mechanické konstrukce bylo uchycení filamentu na špulce. V základním provedení docházelo k pádu špulky mimo její uchycení, případně k velkému tření, které silově zatěžovalo extruder. Proto bylo toto uložení špulky filamentu editováno tak, aby zamezilo zmiňovaným negativním vlivům.



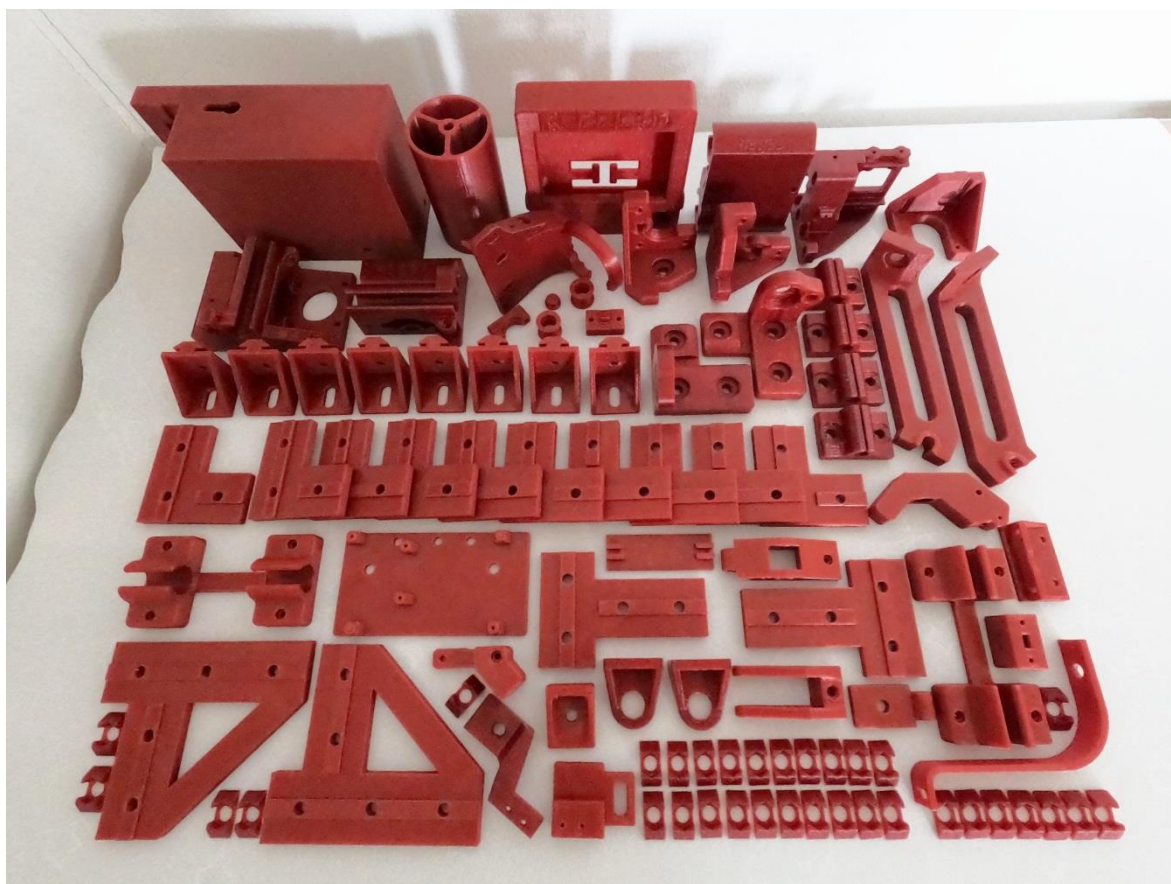
Obr. 3.6 Návrh uložení špulky filamentu v programu SolidWorks.

3.3.2 Tištěné díly

Díly byly tištěny na jiné tiskárně typu Rebel II a jako vstupní materiál byl vybrán Prusament PET-G Carmine Red. Jedná se jak už název napovídá o materiál typu PET-G vyráběný společností Prusa Research s.r.o..

Tento materiál má vhodné vlastnosti právě pro konstrukční díly 3D tiskáren. Je velmi houževnatý, má dobrou tepelnou odolnost a mechanické vlastnosti. Tento materiál je taktéž používán pro výrobu tiskáren společností Prusa Research s.r.o..

Barva materiálu je označena jako „Carmine Red“, tedy v doslovném překladu „karmínově červená“. V případě barevného odstínu se však jedná pouze o estetickou vlastnost.



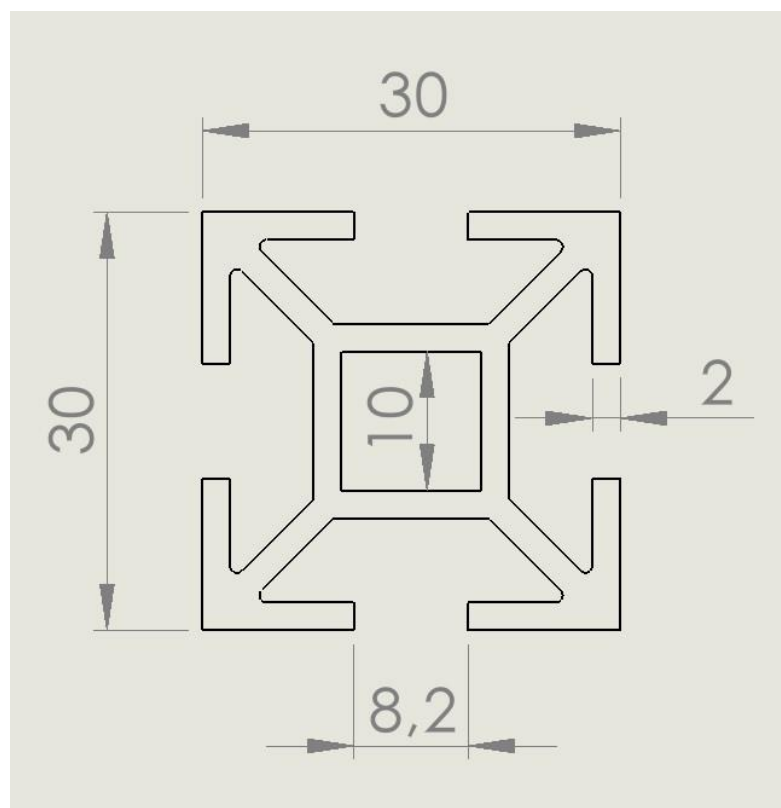
Obr. 3.7 Tištěné díly upravené verze tiskárny Rebel II.

Mechanické díly byly tištěny s 40 % výplní převážně typu plástev. Tento druh výplně dodává dílům dostatečnou pevnost a umožňuje silné dotažení šroubů, aniž by došlo k deformaci dílu.

3.3.3 Mechanická konstrukce a rám

Pro stavbu rámu byly použity Al profily kombi o rozměrech 30 x 30 mm. Tyto profily jsou vyráběny dle normy EN 573-3 AW 6060 T66 EN 755-1,2,9.

Al profily typu kombi umožňují jakkoliv přizpůsobit konstrukci požadavkům zákazníka a jsou tedy vhodné pro stavbu originálních konstrukcí, aniž by bylo nutné navrhovat a vyrábět specifické díly.



Obr. 3.8 Průřez profilem Al kombi 30 x 30 mm.

Jako spojovací materiál pro mechanickou konstrukci byly použity převážně šrouby M6 s kulatou hlavou s límcem. Ke šroubům příslušné matice byly uchyceny do 3D tiskem zhotovených lůžek tak, aby do rámu přesně pasovaly a mohly se pohybovat pouze v jedné ose.

Při stavbě rámu bylo nutné dbát na přesné rozměry a ustavení jednotlivých dílů. Vzhledem k nepřesnosti plastových dílů a nepřesnému řezu profilů bylo nutné všechny části vůči sobě správně ustavit pomocí úhelníku.



Obr. 3.9 Rám 3D tiskárny Rebel II sestavený z AL profilů a dílů zhotovených 3D tiskem.

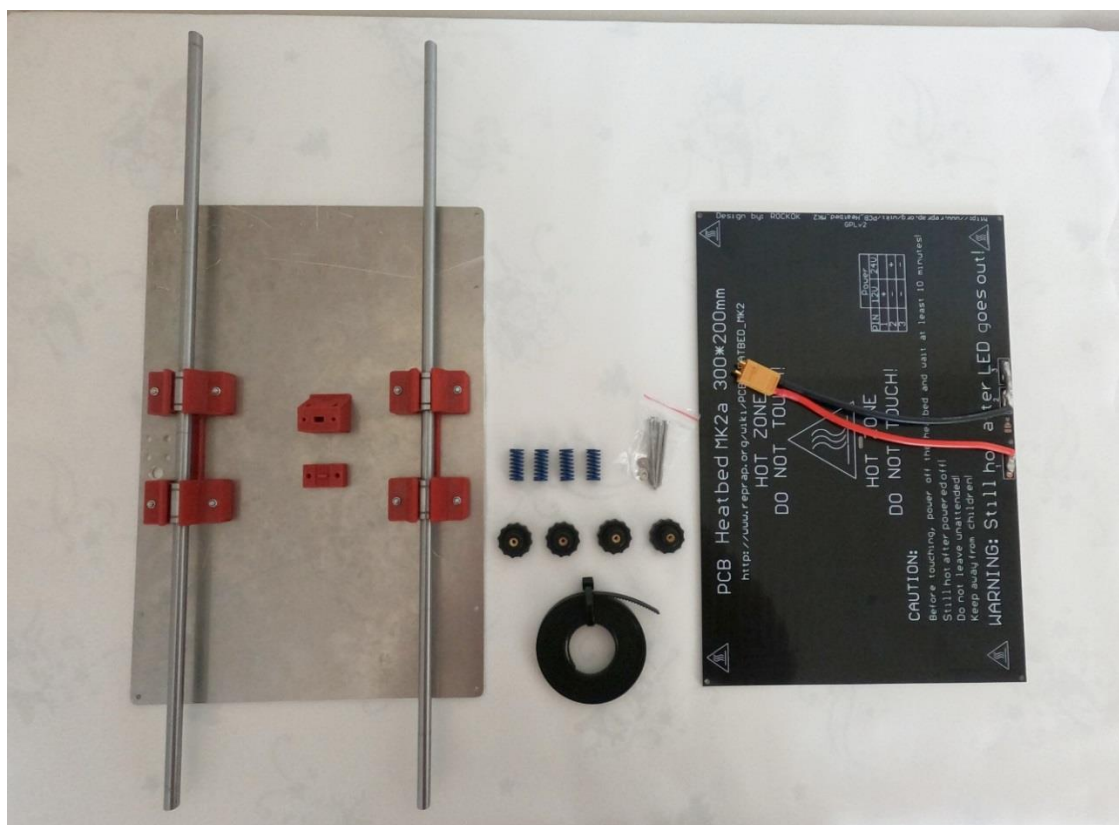
3.3.4 Montáž jednotlivých os

Jako první byla na rám nainstalována osa Y, která je řešena prostřednictvím pohyblivého stolku. Stolek se pohybuje pomocí lineárních ložisek po kalených broušených tyčích.

Ložiska jsou upevněna ke stolku, který je zhotoven z Al plechu o tloušťce 3 mm pomocí laserového řezání.

Ke stolku je upevněna vyhřívaná podložka s využitelnou tiskovou plochou 300 x 200 mm. Vyhřívaná podložka má výkon 200 W a je napájena napětím 12 V.

Mechanický pohyb v ose Y zajišťuje krokový motor, který je prostřednictvím řemenice připojen řemenem ke stolku. Řemen je napínán pomocí napínacího šroubu a je nutné jej před prvním tiskem patřičně napnout.

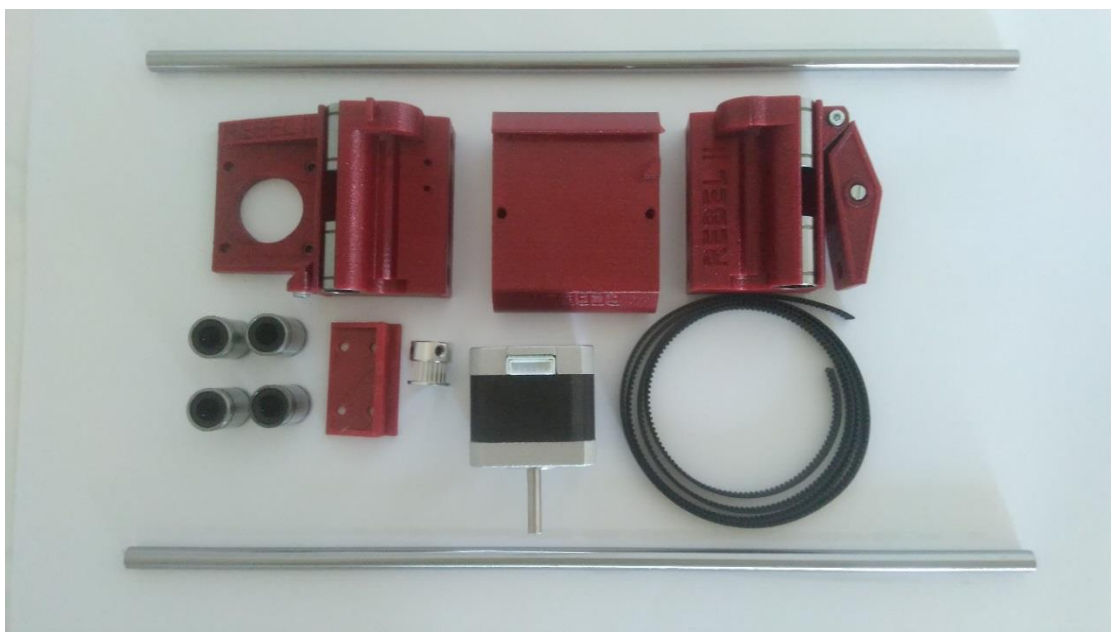


Obr. 3.10 Sestava osy Y před montáží.

Další osou, která byla následně sestavena, je osa X. Pojezd této osy je řešen stejně jako u osy Y prostřednictvím pojezdu lineárních ložisek po kalených broušených tyčích. Pohyb této osy zajišťuje krokový motor, který je uchycen na levé straně.

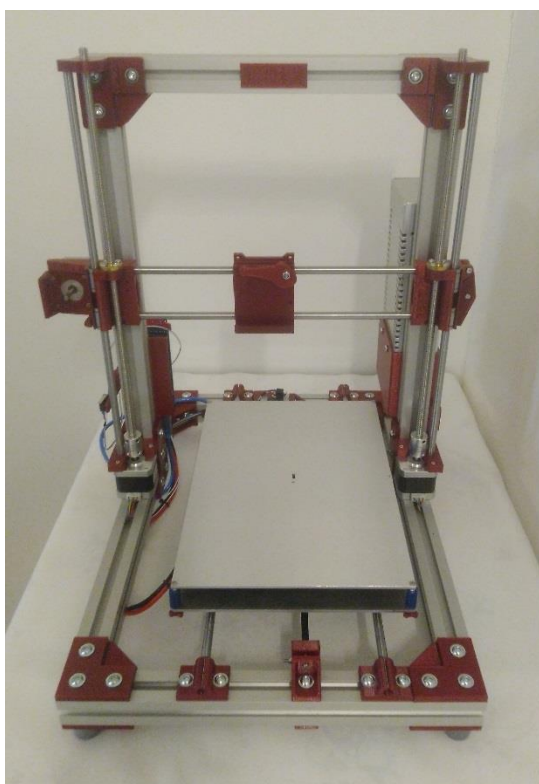
Napínání řemene je řešeno opět pomocí napínacího šroubu, který je umístěn na straně pravé.

Přímo na této ose je umístěn pojezd, který na sobě nese tiskovou hlavu. Tisková hlava je v originálním řešení uchycena prostřednictvím šroubu.



Obr. 3.11 Sestava osy X před montáží.

Poslední osou souřadného systému tiskárny je osa Z. Tato osa je na rozdíl od osy X a osy Y poháněna dvěma krokovými motory, které jsou prostřednictvím pružné spojky připevněny k závitovým tyčím, které zajišťují pohyb této osy. Pojezd osy je řešený stejně jako u obou předešlých prostřednictvím lineárních ložisek a broušených kalených tyčí.



Obr. 3.12 Rám tiskárny osazený osami X, Y, Z a částí elektroniky.

3.3.5 Použitá elektronika

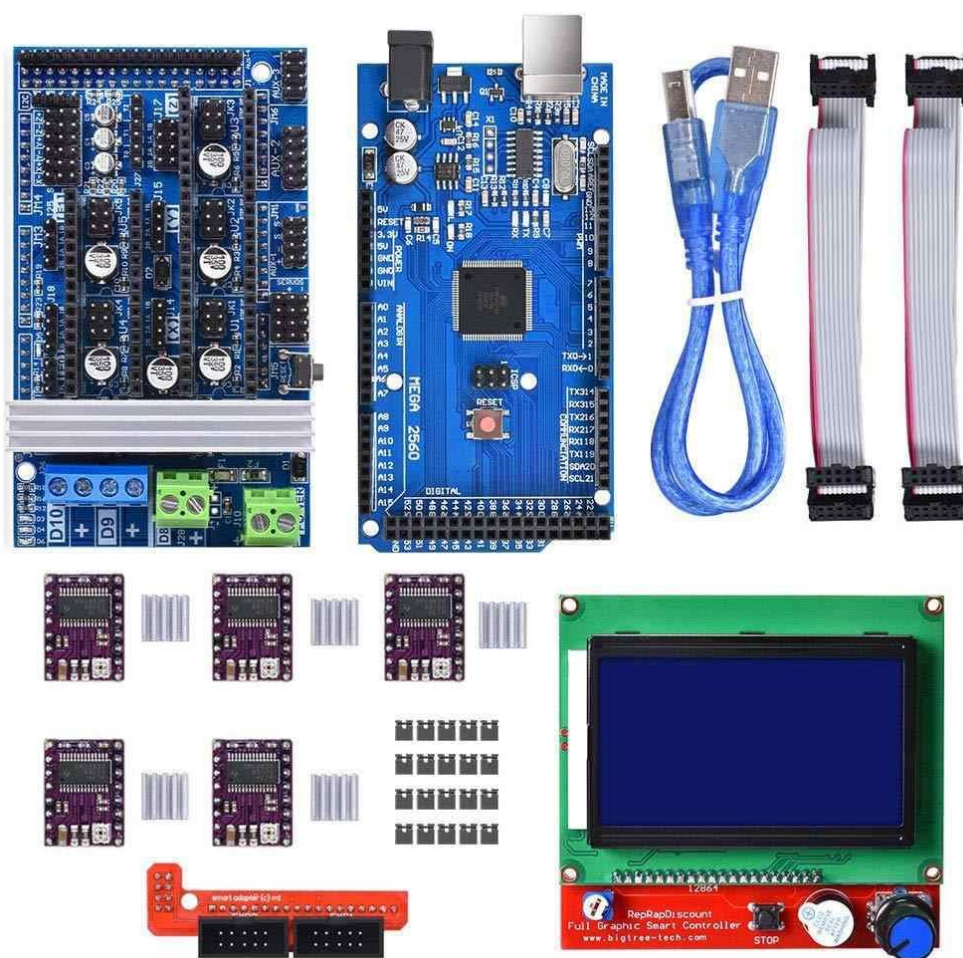
Pro chod 3D tiskárny je kromě její mechanické části nutné zajistit také správně zvolenou elektroniku, do které můžeme zařadit řídicí jednotku, zdroj, čidla, topná tělesa a krokové motory.

Řídicí jednotka stavěné tiskárny je založena na programovatelné stavebnici Arduino. Tiskárna byla osazena řídicí deskou Arduino Mega 2560, která disponuje 8 bitovým čipem. Výpočetní výkon pro základní RepRap 3D tiskárnu je však dostatečný.

Rozšiřujícím modulem pro řídicí desku Arduino byl použit rozšiřující modul pro 3D tiskárny Ramps 1.6 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield verze 1.6). Tento modul umožňuje jednoduché zapojení driverů krokových motorů, koncových spínačů, LCD displaye a dalších elektronických součástí 3D tiskárny [38].

Deska Ramps 1.6 byla osazena drivery DRV 8825 pro mikrokrokování krokových motorů, které umožňují 32 mikrokroků na otáčku.

Na tiskárnu byl osazen display s ovládacím panelem typu LCD 12864 RepRap.



Obr. 3.13 Použitá elektronika [35].

3.3.6 Firmware tiskárny

Firmware, neboli mikroprogramové vybavení, je označení pro software, který zprostředkovává řízení určitého vestavěného systému, jako je např. 3D tiskárna [37].

Vestavěný systém je jednoúčelovým počítačem, který má svůj řídicí systém zcela zabudován do ovládaného zařízení. Na rozdíl od univerzálních osobních počítačů jsou vestavěné systémy specializované pro předem definované činnosti [38].



Obr. 3.14 Obrazovka 3D tiskárny s uživatelským prostředím firmwaru Repetier.

Pro chod 3D tiskárny je nutné do řídicí desky nahrát firmware a v něm definovat potřebné hodnoty. Výhodou řídicí desky Ramps 1.6 je možnost instalace více různých firmwarů.

Mezi nejznámější firmwary pro daný typ desky patří firmware Marlin, Repetier a RepRap.

Pro 3D tiskárnu stavěnou v rámci této práce byl vybrán Firmware Repetier, který umožňuje konfiguraci přes webové rozhraní. Výhodou tohoto firmwaru je také možnost nastavení laserového a CNC řízení přímo v základní konfiguraci.

3.4 Kalibrace

Kalibrace 3D tiskárny je nedílnou součástí její stavby či úpravy, při které je nutné tiskárnu správně zkalibrovat a uvést do provozu.

3D tiskárna však vyžaduje kalibraci mnohem častěji, než pouze při stavbě či úpravě. Kalibraci je nutné provádět pro jednotlivé druhy materiálu a s tím spojené rozdílné teploty, ale také prakticky před každým jednotlivým tiskem.

Kalibraci můžeme rozdělit do několika kategorií, mezi které patří kalibrace jednotlivých os, kalibrace tiskové hlavy a kalibrace tiskové podložky.

3.4.1 Kalibrace os X, Y a Z

Základní kalibrací 3D tiskárny po její stavbě je výpočet a kalibrace rozměrů v jednotlivých osách. Kalibrace se provádí pomocí měření rozměrů vytištěného zkušebního modelu a následným výpočtem krokování dle vzorce.

$$N_n = \frac{L_p}{L_n} \cdot N_p \quad (3.1)$$

N_n je počet nových kroků, N_p je počet původních kroků, L_p je požadovaný rozměr a L_n je naměřený rozměr.

Tuto kalibraci je vhodné provést několikrát, dokud nebude daný výrobek co nejpřesnější.

3.4.2 Kalibrace tiskové hlavy

Při kalibraci tiskové hlavy postupujeme téměř stejným způsobem jako při kalibraci jednotlivých os.

Na rozdíl od kalibrace os je kalibraci tiskové hlavy nutné dělat pro každou tiskovou hlavu zvlášť. Taktéž pro každý druh materiálu je vhodné provést kalibraci tiskové hlavy.

3.4.3 Kalibrace tiskové podložky

Nejčastěji prováděnou kalibrací je kalibrace tiskové podložky. Tuto kalibraci je vhodné provádět prakticky před každým tiskem.

Kalibrace tiskové podložky spočívá v nastavení vzdálenosti trysky od podložky, na kterou je nanášena první vrstva. Tuto kalibraci je třeba provádět při provozní teplotě jak tiskové hlavy, tak i podložky pro daný konkrétní materiál.

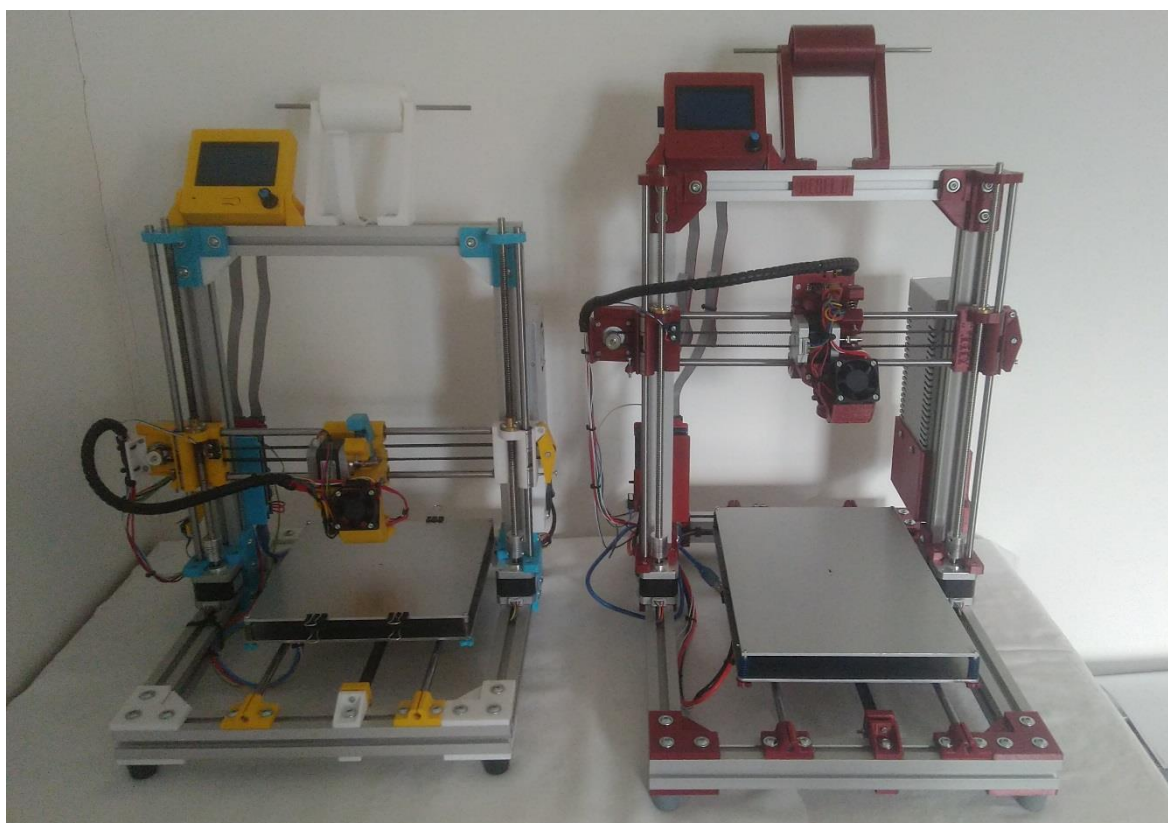
Nejjednodušším způsobem odměření správné vzdálenosti mezi tryskou a podložkou je použitím běžného kancelářského papíru, jehož tloušťka (0,7 mm) přibližně odpovídá ideální vzdálenosti mezi tryskou a tiskovou podložkou.

Výhodou je, pokud je 3D tiskárna vybavena Auto Bed levelingem. V tom případě tuto kalibraci provede tiskárna před každým tiskem automaticky.

3.5 Konec stavby a projekt RepRap

Dokončená tiskárna Rebel II byla kompletně vytištěna na tiskárně stejného typu. Nová tiskárna má na rozdíl od svého předchůdci pouze několik menších úprav, jako je např. velikost tiskové plochy.

3D tiskárna byla replikována stejným způsobem, jako na počátcích projektu RepRap. Tedy vytištěna jinou 3D tiskárnou.



Obr. 3.15 Na levé straně původní 3D tiskárna Rebel II a na pravé straně její replika.

4 ÚPRAVA TISKOVÉ HLAVY

Cílem této práce bylo sestavení 3D tiskárny, která v rámci své univerzality umožňuje výměnu jednotlivých tiskových hlavic za jiné.

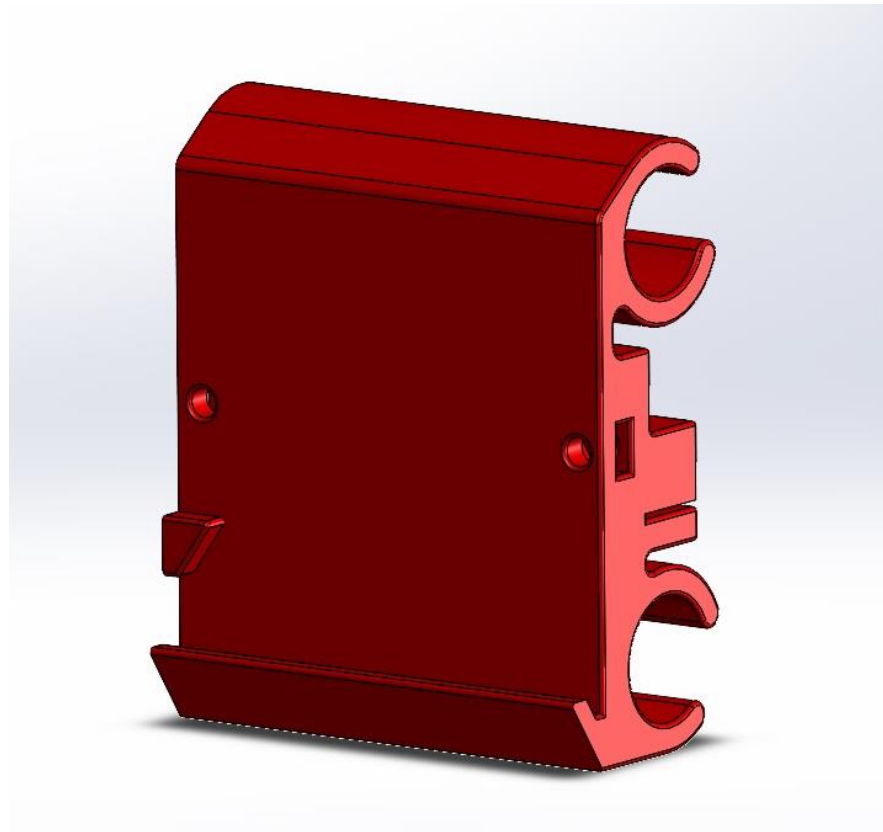
K tomu bylo třeba upravit upínací mechanismus tiskové hlavy tak, aby umožňoval rychlou a nenáročnou výměnu celé tiskové hlavy za jinou zároveň při zachování požadovaných mechanických vlastností.

Primárním cílem bylo umožnit výměnu různých tiskových hlavic za jiné s rozdílnými vlastnostmi zahrnující např. rozdílnou velikost trysky nebo intenzitu a směr chlazení.

K demonstraci této funkcionality byla vybrána originální tisková hlava z příslušné 3D tiskárny Rebel II a druhá tisková hlava z 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3, která je jednou z nejrozšířenějších na světě a její hlavice prošla náležitým vývojem.

Další hlavicí, která byla v rámci této práce navržena, je hlavice s uchycením laserového modulu. Tato hlavice je určena primárně pro laserové gravírování nebo pro řezání tenkých materiálů, např. kancelářského papíru.

Čtvrtá navržená hlavice je hlavicí s frézovací hlavou, která je určena taktéž pro gravírování, např. do překližky. S hlavicí by bylo možné případně i frézovat klasickým způsobem, avšak pouze do velmi měkkých materiálů.



Obr. 4.1 Model původního pojezdu osy X 3D tiskárny Rebel II v programu SolidWorks.

4.1 Návrh vlastního řešení upnutí tiskové hlavy

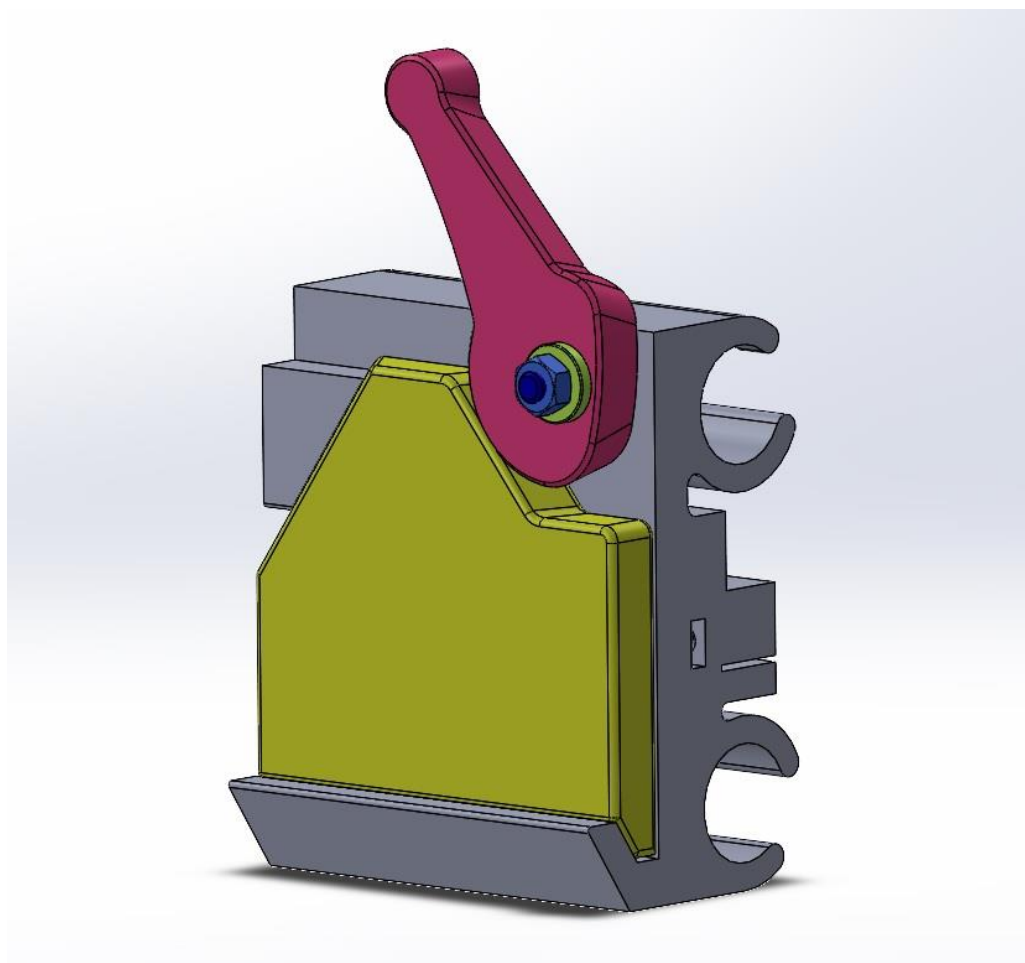
V rámci návrhu vlastního řešení upínání tiskové, případně jiné hlavy, bylo nejdříve nutné vybrat způsob, jakým bude hlava uchycena, a poté tento návrh zrealizovat.

Mezi zvažované návrhy patřilo uchycení hlavy např. pomocí šroubů, odpružené západky, magnetů, nebo výstředníku.

Uchycení pomocí šroubů je realizováno přímo na výchozích modelech a z časového hlediska a z hlediska náročnosti výměny bylo toto řešení vyhodnoceno jako nevhodné.

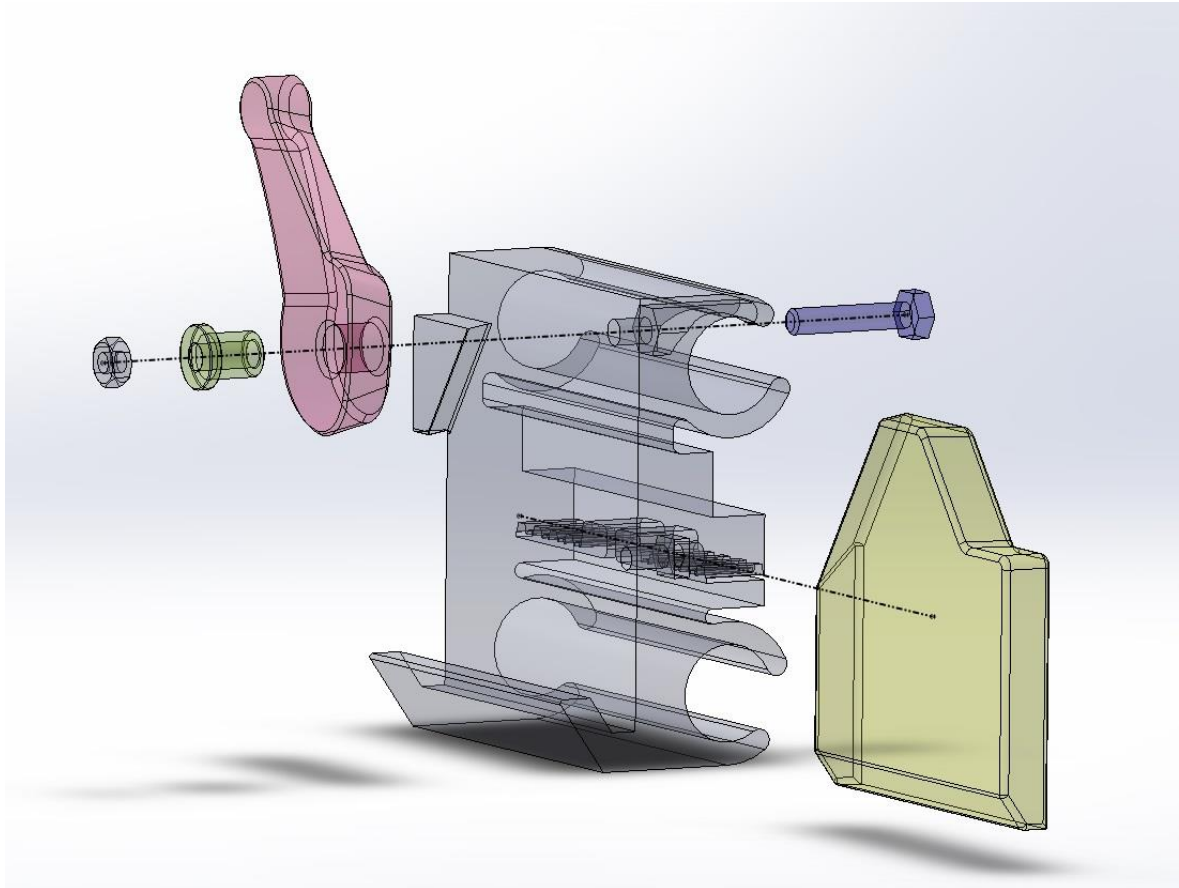
Dalšími možnými řešeními by bylo užití odpružené západky nebo magnetů. Tato uložení by splňovala nároky na výměnu hlavičky především z časového hlediska. Byla však zavržena, jelikož je mezi výměnnými hlavicemi zahrnuta také hlavička určená k frézování a uložení pomocí těchto dvou způsobů by pravděpodobně nezajistilo dostatečnou pevnost.

Nakonec bylo tedy jako způsob upínání vybráno upínání pomocí výstředníku, které poskytuje dostatečnou pevnost a také splňuje požadavky na časovou náročnost výměny.



Obr. 4.2 Návrh vlastního upínacího mechanismu pomocí výstředníku v programu SolidWorks.

Tento návrh bylo nutné vypracovat tak, aby nedošlo k nárůstu rozměrů především v ose X, čímž by došlo k zúžení tiskového prostoru v této ose. Zároveň bylo nutné co nejméně navýšit celkový rozměr také v ose Y, kde při oddálení těžiště tiskové hlavy od jejího uložení dochází k nárůstu ohybového momentu. Osa Z nám pro toto řešení poskytuje naopak prostoru dostatek.



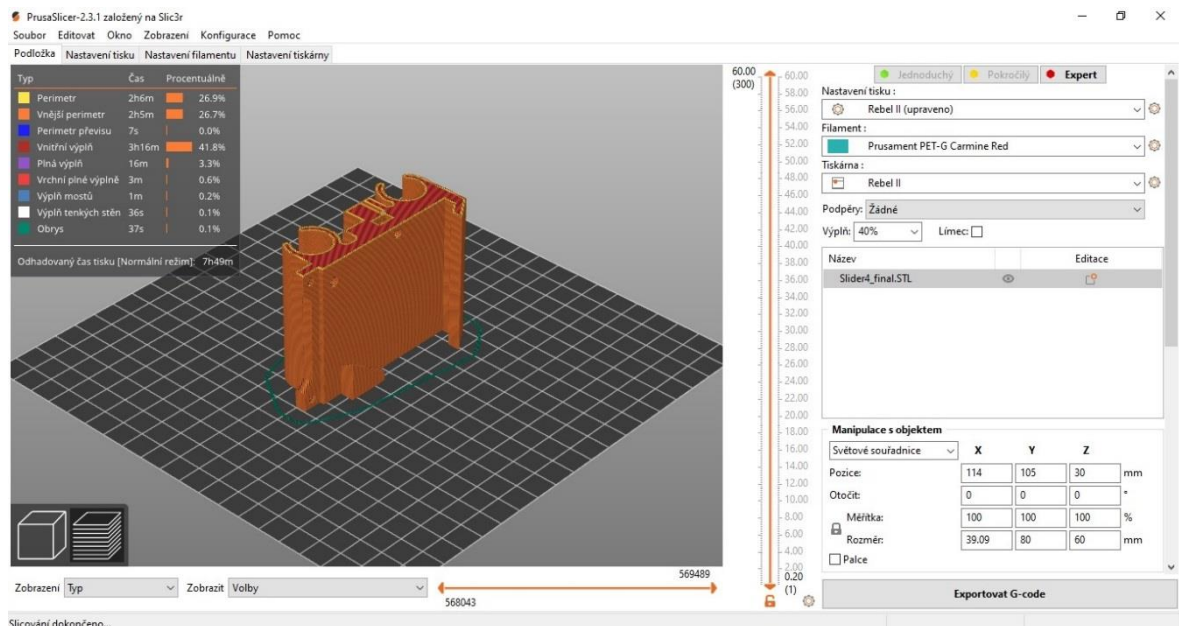
Obr. 4.3 Náhled na konstrukční řešení pomocí tzv. „rozpadu“ v programu SolidWorks.

Navrhované konstrukční řešení je realizováno na principu dotlačení adapteru na šikmé plochy pomocí výstředníku tak, aby došlo k odebrání všech stupňů volnosti adapteru.

Při zatažení páčky výstředníku proti směru hodinových ručiček dojde k natlačení adapteru na šikmé plochy a tím k pevnému ustavení adapteru.

Páčka výstředníku je uložena v pouzdře, které je umístěno na ose šroubu. Šroub je uložen ve vybrání v zesíleném těle pojezdu osy X.

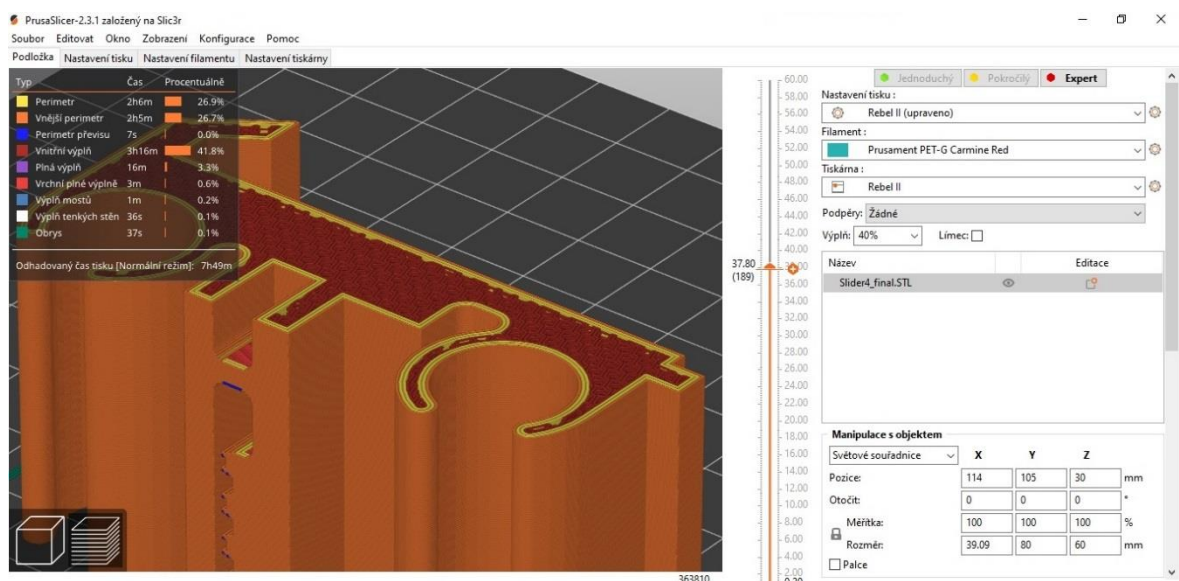
V rámci zajištění pevnosti uložení tohoto řešení byla navýšena tloušťka pojezdu o 3 mm v ose Y. Toto navýšení rozměru můžeme považovat za nepatrné, nicméně důležité vzhledem k pevnosti daného řešení.



Obr. 4.4 Tvorba modelu pro 3D tisk v programu Prusa Slicer.

Jedním z důležitých aspektů konstrukce celého pojezdu byla také jeho tisknutelnost. Z technologického hlediska je při 3D tisku metodou FDM bez použití odlamovacích podpor nutné zachovat určitá pravidla. Zejména není možné tisknout do volného prostoru a v případě převisů lze bezproblémově tisknout maximální šikmou plochu bez podepření pod úhlem zhruba $45^\circ - 60^\circ$.

V případě nutnosti použití podpor, které by bylo po tisku nutné odlomit, by došlo ke znehodnocení dané plochy a tím i k výrazné nepřesnosti. Z daného hlediska bylo tedy vhodné navrhnout upínací mechanismus tak, aby byl tisknutelný bez podpor, případně s použitím minimálního množství podpor.



Obr. 4.5 Pohled na vnitřní strukturu modelu v programu Prusa Slicer.

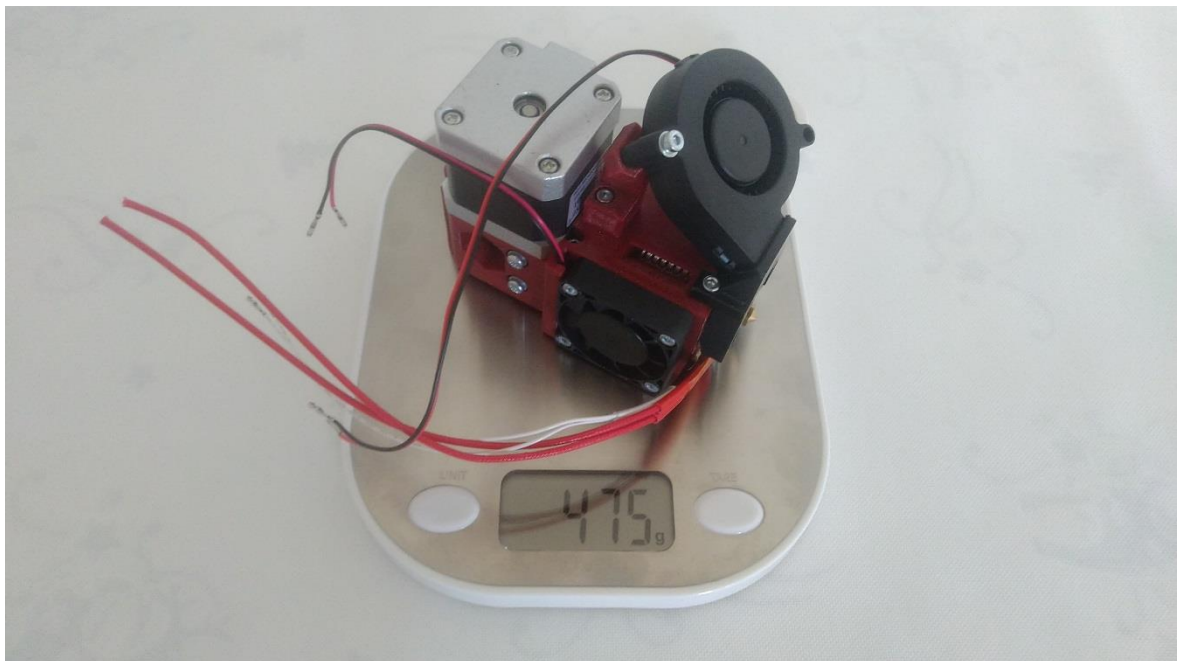
V případě možnosti tisku ze dvou materiálů, hlavního stavebního a podpůrného, by bylo možné navrhovat také tvarově složitější mechanismy s menším ohledem na výše zmiňovanou tisknutelnost. K použití této varianty je však nutné 3D tiskárnu vybavit dvěma hotendy, případně mechanismem pro automatickou výměnu materiálu. To je však zpravidla výsadou řádově dražších 3D tiskáren.

4.2 Výpočet sil působících na tiskovou hlavu

K realizaci tohoto návrhu bylo nutné provést výpočty, které zaručí dostatečnou upínací sílu navrženého výstředníku vzhledem k adapteru, ke kterému jsou přidělány jednotlivé hlavice.

Na tiskovou hlavu působí kromě tíhové síly (F_G) při jejich přejezdech také síla setrvačná (F_a), způsobená zrychlením tiskové hlavy.

Hmotnost tiskové hlavy byla změřena experimentálně pomocí kuchyňské váhy, která byla vzhledem k přibližnému určení hmotnosti zcela dostačující.



Obr. 4.6 Experimentální určení hmotnosti pojezdu osy X a tiskové hlavy.

Hmotnost obou tiskových hlav použitých v této práci se pohybuje kolem necelých 490 g. Uvažovaná hmotnost tiskové hlavy byla tedy zaokrouhlena na 500 g. Hlavice s laserovým modulem a hlavice s frézovacím vřetenem mají hmotnost nižší než hlavice tiskové. Z tohoto důvodu je tedy pro výpočet použita hmotnost tiskových hlav.

K hmotnosti tiskové hlavice je také nutné přičíst hmotnost kabeláže a konektorů, kterými v době vážení nebyla hlavice osazena. Taktéž je vhodné počítat např. s budoucí výměnou některých komponent za jiné, např. krokového motoru. Proto k hmotnosti 500 g přičteme ještě dalších 200 g a pro výpočet tedy použijeme výchozí hodnotu $m_H = 0,7$ kg.

Zrychlení hlavy a_H je $1,2$ m/s², což odpovídá dosažené rychlosti v_H 0,12 m/s za čas t_H 0,1 s.

Výpočet tíhové síly:

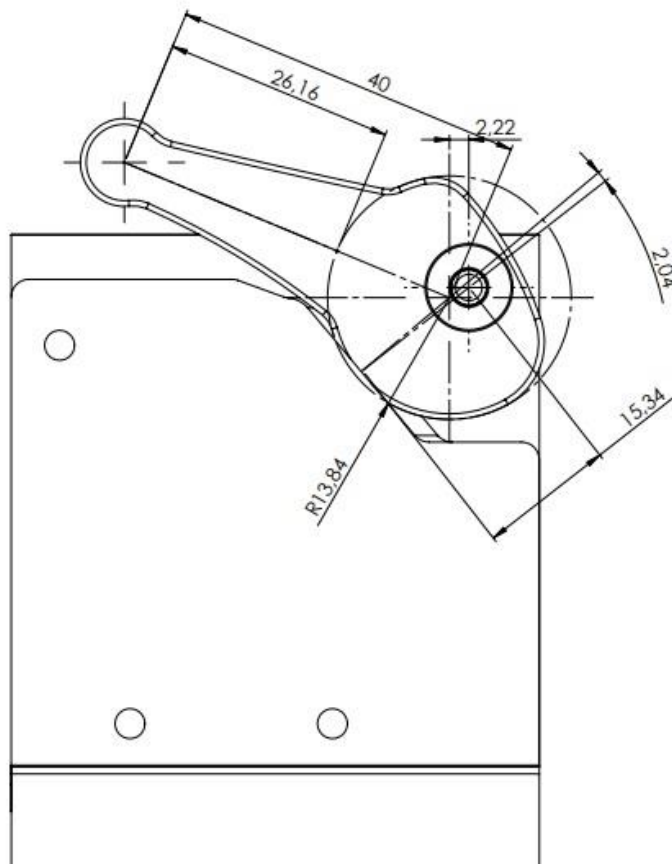
$$F_G = m_H \cdot g \quad (4.1)$$

$$F_G = 0,7 \cdot 9,81 = 6,9 \text{ N}$$

Výpočet setrvačné síly od zrychlení hlavy:

$$F_a = m_H \cdot a_H \quad (4.2)$$

$$F_a = 0,7 \cdot 1,2 = 0,84 \text{ N}$$



Obr. 4.7 Nákres výstředníku v programu SolidWorks, pomocí kterého byly odečteny dané hodnoty.

Vzorec pro výpočet poměru páky mezi ramenem a excentrem:

$$F_1 \cdot l = T_1 \cdot r \quad (4.3)$$

Vzorec pro výpočet velikosti upínací síly:

$$F = \frac{F_1 \cdot l}{r \cdot [\operatorname{tg}(\delta + \gamma) + f]} \quad (4.4)$$

Zjednodušený výpočet velikosti upínací síly ($F = 150 \text{ N}$, $f = 0,1$):

$$F = 1500 \cdot \frac{l}{r} [\text{N}] \quad (4.5)$$

$$F = 1500 \cdot \frac{40}{13,84} = 4335 \text{ N}$$

$$F_x = \cos \alpha \cdot F \quad (4.6)$$

$$F_x = \cos 45 \cdot 4335 = 2277 \text{ N}$$

$$F_y = \sin \alpha \cdot F \quad (4.7)$$

$$F_y = \sin 45 \cdot 4335 = 2277 \text{ N}$$

Hodnoty veličin byly zjištěny z CAD modelu. Na základě výpočtu bylo stanoveno, že přítláčná síla, kterou vyvíjí výstředník na adapter je ve srovnání s gravitační a setrvačnou silou zcela dostatečná.

Mechanická konstrukce pojezdu společně s adapterem a výstředníkem je však vyhotovena z plastu. Tudíž je třeba počítat především s pevností plastového provedení.

Pevnost byla prakticky ověřena pomocí 3D tiskem vyhotovených testovacích kusů.

4.3 Tisk testovacích kusů

V rámci konstrukce finálního řešení upínacího mechanismu bylo postupně vyhotoveno několik testovacích modelů k ověření mechanických vlastností. Tyto modely byly z důvodu ušetření finančních nákladů tištěny z levnějšího, avšak typově stejného materiálu PET-G.

Na testovacích modelech byla prakticky otestována funkčnost daného řešení a pevnost provedení. Testovacích kusů bylo během úprav především výstředníkové části výměnné hlavice vyhotoveno několik a byla na nich prakticky otestována funkčnost navrženého řešení.



Obr. 4.8 Testovací modely vyhotovené pomocí 3D tisku.

4.4 Návrh a řešení umístění kabeláže a přepojovacích konektorů

Většina 3D tiskáren včetně modelu Rebel II má kabeláž vedoucí z tiskové hlavy připojenu přímo k řídicí desce tiskárny. Při demontáži, případně výměně celé tiskové hlavy, je tedy nutné celou kabeláž rozpojit a demontovat.

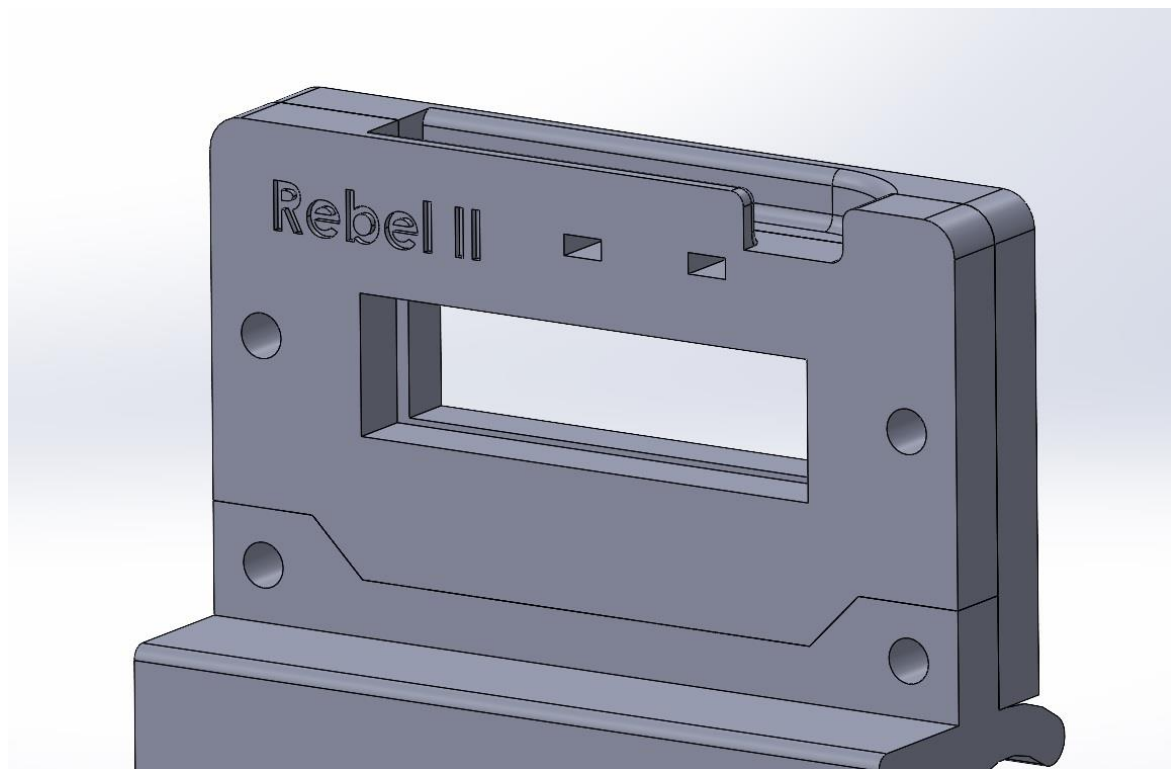
Tento krok je velice náročný a hrozí při něm také poškození elektroniky.

Z toho důvodu bylo tedy nutné navrhnout a nainstalovat kromě mechanického řešení upínání tiskové hlavy na pojezd osy X také systém přepojování elektroniky.

Ideálním řešením by byl konektor, který by zahrnoval veškerou kabeláž vedoucí z tiskové hlavy do řídicí desky. Toto řešení by však bylo velmi náročné, protože napájecími kabely topného tělesa prochází daleko větší proud, než ostatními kabely. Pro tyto kabely bylo tedy nutné osadit vlastní konektor.

Konektory bylo třeba umístit přímo na pojezd osy X tak, aby byly pevně uchyceny a při výměně bylo možno do nich bezproblémově zasunout příslušnou kabeláž dané hlavy.

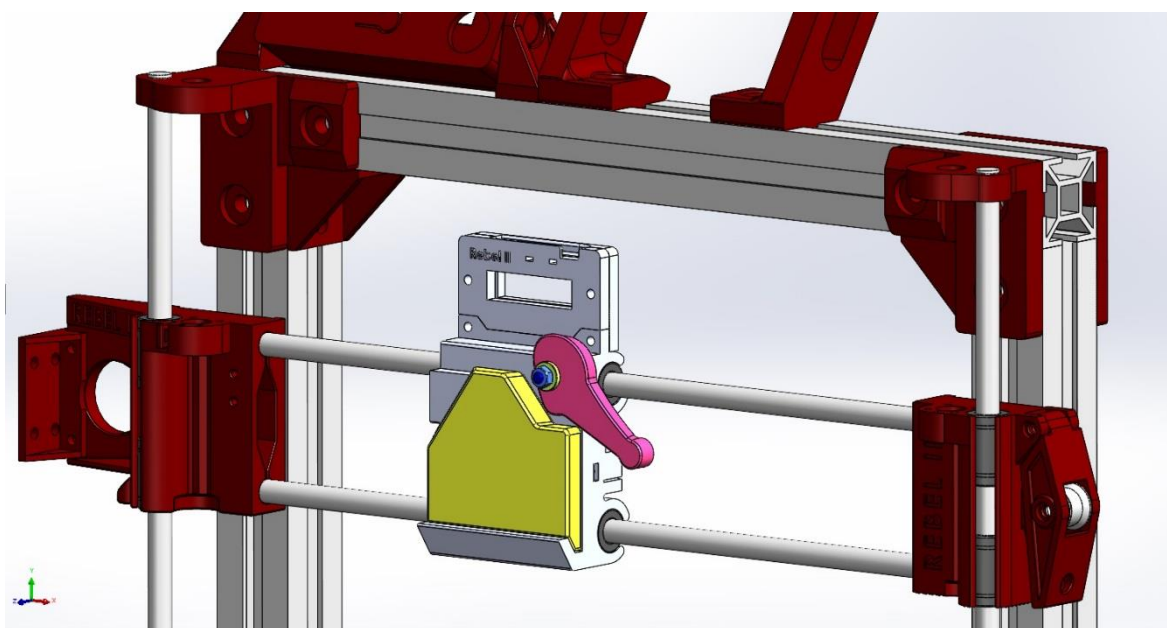
Pro tento účel byla tedy navržena konstrukce, která drží konektory připájené k elektronické desce.



Obr. 4.9 Návrh konstrukce připevnění konektorů k pojezdu osy X v programu SolidWorks.

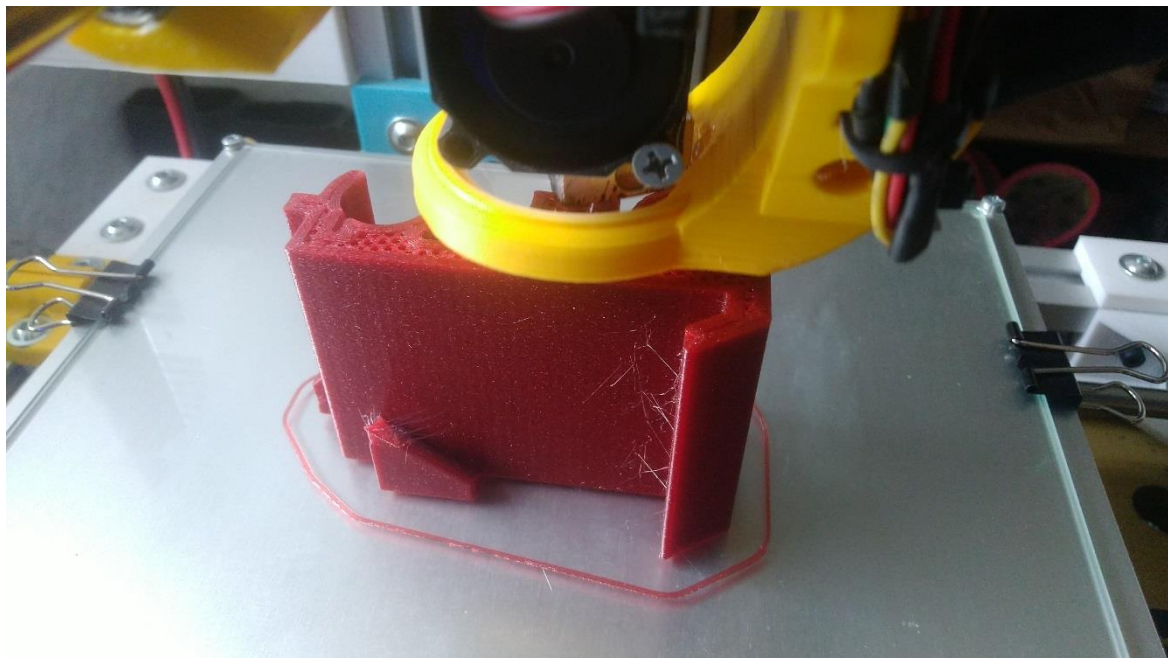
Do navržené konstrukce bude vložena destička s připájenými konektory, pomocí kterých dojde k propojení tiskové hlavy s elektronikou tiskárny. Díky tomu bude možné při výměně tiskové hlavy vysunout a zasunout pouze dva konektory. Tím se výrazně sníží riziko poškození elektroniky a čas výměny hlavice.

Pro napájecí kabely topného tělesa byl vybrán jako vhodný a dostačující konektor typu XT 30. Pro ostatní kabeláž zahrnující připojení ventilátorů, teplotního čidla a krokového motoru byly použity konektory typu Dupont s roztečí pinů 2,54 mm.



Obr. 4.10 Navržená konstrukce společně s mechanickou konstrukcí 3D tiskárny v programu SolidWorks.

4.5 Výroba a instalace konečného modelu výměnné hlavy



Obr. 4.11 Výroba finálního modelu výměnné hlavy.



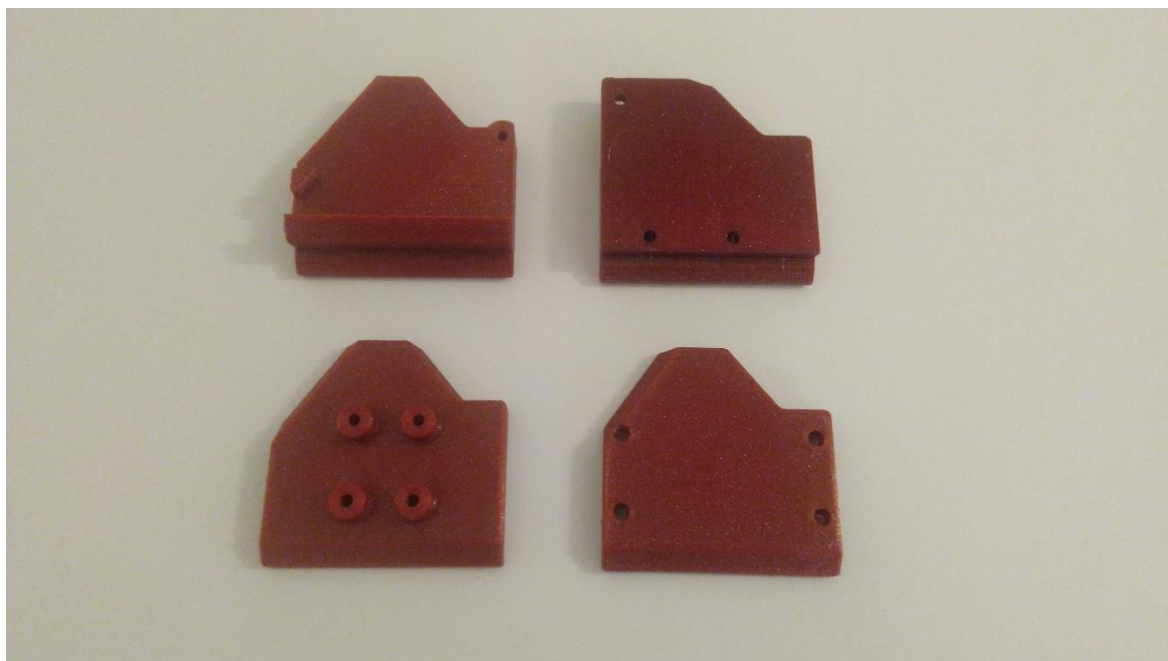
Obr. 4.12 Mechanismus výměnné hlavice před sestavením.

4.6 Použité tiskové a gravírovací hlavy

V rámci prezentace této diplomové práce byly vyhotoveny čtyři hlavice, z nichž dvě jsou určené pro 3D tisk a dvě pro gravírování. Z gravírovacích hlavic je jedna laserová a druhá frézovací.

Tiskových hlavic bude do budoucna vhodné vyhovit více především z důvodu úspory času při výměně trysky za jinou velikost. Vhodné by tedy bylo mít pro každou používanou velikost trysky vlastní hlavici.

Zároveň je však možná výměna za hlavici rozdílného typu, u kterého hraje roli především druh a intenzita chlazení výtisku. Dále pak každá z rozdílných typů hlavic může být více či méně vhodná k tisku specifických materiálů.



Obr. 4.13 Vytisknuté adaptéry pro jednotlivé hlavice před montáží.

Vzhledem k tomu, že modely jednotlivých tiskových hlavic jsou ve většině případů volně dostupné na internetu ve formátu určeném pro 3D tisk, který nelze lehce editovat, tak je vhodné a mnohem jednodušší navrhnout a vyrobit pro každou tuto hlavici specifický adapter.

Adapter je následně přidělán na danou hlavici a poté svojí konstrukcí upnut na navržený mechanismus.

Z každé používané hlavic je vyvedena kabeláž, která je sjednocena do dvou konektorů. Tohle řešení výrazně zkracuje čas přepojení elektroniky a snižuje riziko jejího poškození.

4.6.1 Originální hlavice 3D tiskárny Rebel II

Originální tisková hlava 3D tiskárny Rebel II je vybavena hotendem typu E3D celokovový, který byl i v tomto případě použit.

K přítlaku tiskové struny je použita pružina průměru 10 mm o délce 30 mm. Průměr drátu pružiny je 1 mm. Tato pružina, jejíž přítlak může být regulován pomocí šroubu, je zcela vyhovující.

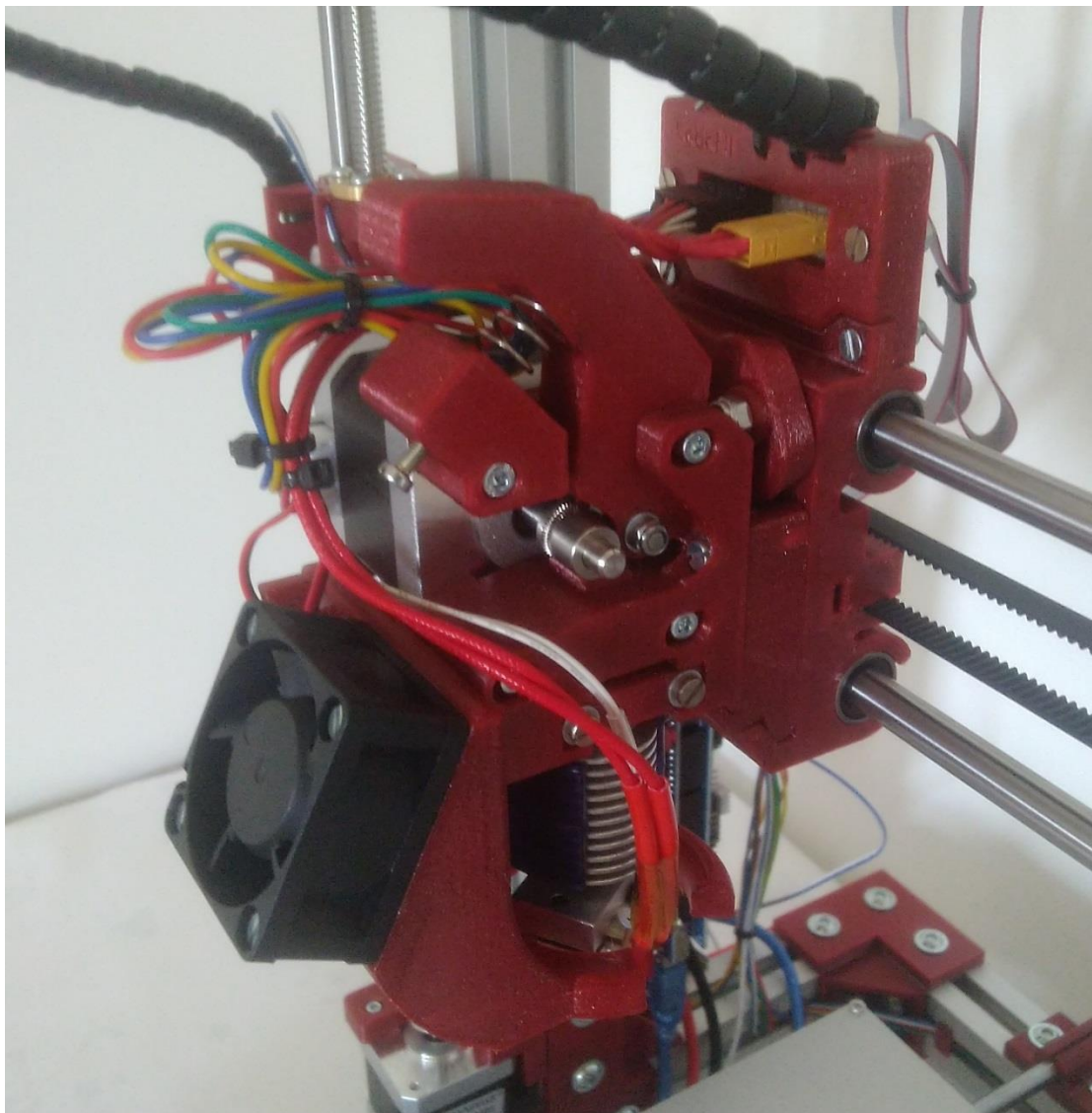
Přítlak tiskové struny k podávacímu kolu je zprostředkován prostřednictvím ložiska 623 2RS CX.

O pohyb podávacího kola se stará krokový motor upevněný k mechanické konstrukci tiskové hlavy. Podávací kolo má průměr vnějšího ozubení 7 mm.



Obr. 4.14 Tisková hlava typu Rebel II před sestavením.

Hotend je chlazen prostřednictvím ventilátoru o velikosti 30 x 30 x 10 mm. Chladič výtisku využívá v originální verzi ventilátoru o velikosti 40 x 40 x 10 mm. Pro možnost intenzivnějšího chlazení byl však v tomto případě chladič osazen ventilátorem o velikosti 40 x 40 x 20 mm. V případě příliš intenzivního chlazení lze otáčky ventilátoru softwarově regulovat. Výhodou konstrukce chladiče tohoto provedení je rovnoměrné chlazení trysky téměř ze všech stran.



Obr. 4.15 Sestavená tisková hlava typu Rebel II upnutá na 3D tiskárně pomocí navrženého řešení.

4.6.2 Hlavice Prusa i3 MK3

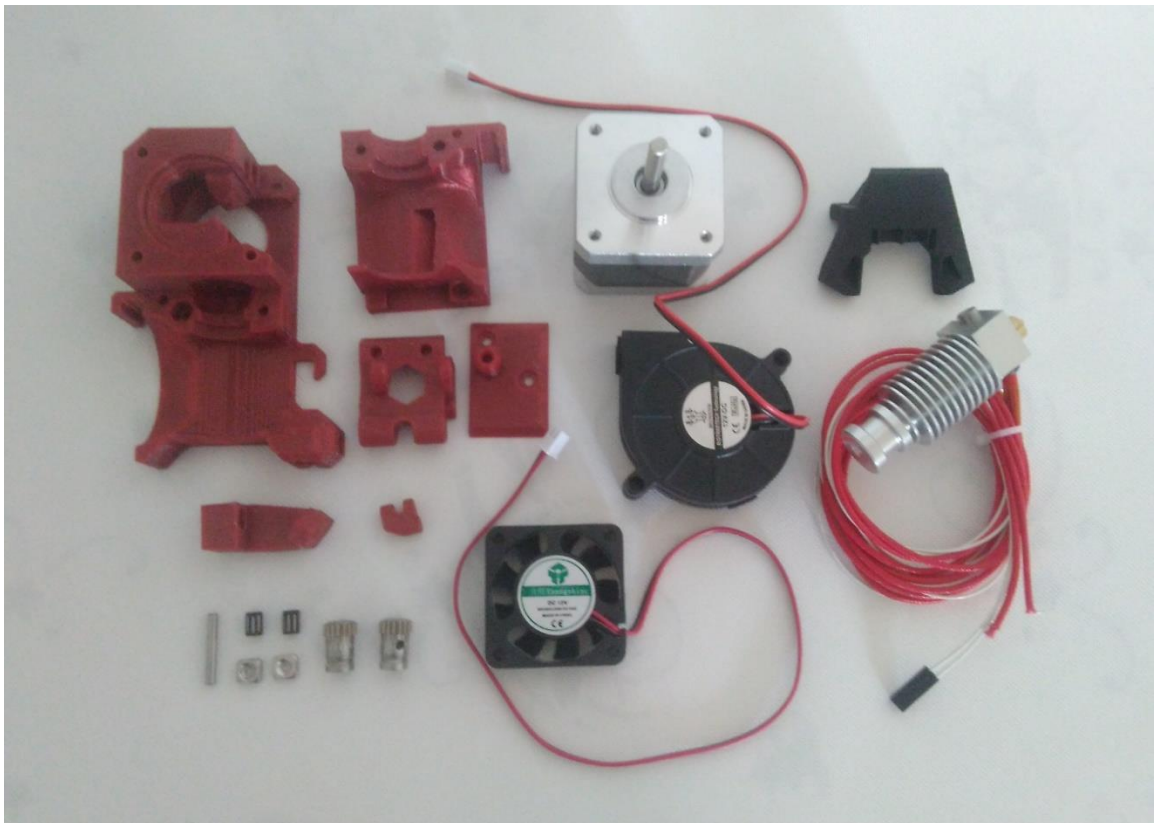
Tato hlavice je kopií tiskové hlavy z 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3, která je jednou z nejrozšířenějších tiskáren na světě. Díky tomu, že se jedná o profesionálně navrženou tiskárnu, tak tomu odpovídá i její kvalita a stupeň vývoje.

Osazený hotend je v tomto případě typu E3D celokovový, stejně jako u předchozího modelu tiskové hlavy.

K přítlaku filamentu jsou používány dvě menší pružiny, které k sobě dotlačují dvě protilehlá hnací kola. Tento systém je nazýván podle názvu jeho výrobce Bondtech. Výhodou je lepší přítlak a sevření tiskové struny. O pohyb hnacích kol se stará krokový motor.

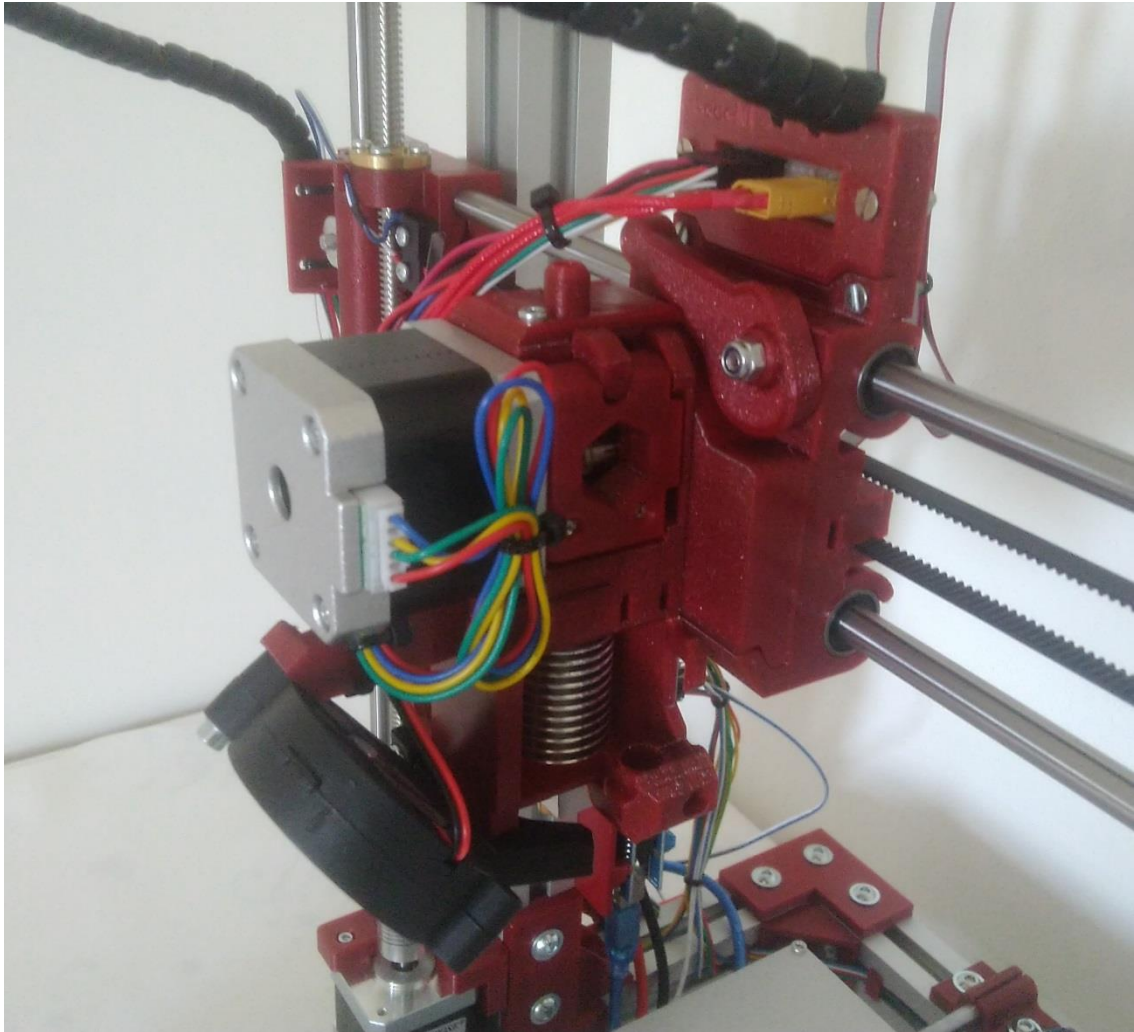
Přítlak filamentu lze regulovat dotažením šroubů, na kterých jsou navlečeny přítlačné pružiny.

Hotend je v tomto případě chlazen ventilátorem o rozměrech 40 x 40 x 10 mm, přičemž efektivitě chlazení také přispívá konstrukce chladiče, který přisává vzduch bočním otvorem.



Obr. 4.16 Tisková hlava Prusa i3 MK3 před sestavením.

Chladič výtisku je osazen radiálním ventilátorem o velikosti 50 x 50 x 15 mm. Nevýhodou je, že tvar chladiče umožňuje chlazení pouze z jedné strany trysky. Chlazení je tedy nerovnoměrné. Na druhou stranu je intenzivnější než u předchozí zmiňované tiskové hlavy.



Obr. 4.17 Sestavená tisková hlava typu Prusa i3 MK3 upnutá na 3D tiskárně pomocí navrženého řešení.

Tisková hlava Prusa i3 MK3 má také v sobě zabudované úchyty pro senzor konce filamentu a pro sondu pro tzv. Automatic Bed Leveling. Těmito součástmi však není hlavice osazena, protože základní verze tiskárna Rebel II nedisponuje tímto vybavením. Lze jej však do budoucna nainstalovat a zprovoznit.

4.6.3 Hlavice s laserovým modulem

Hlavice určená ke gravírování pomocí laseru je velmi jednoduché konstrukce. Prakticky se jedná pouze o upravený adapter osazený laserovým modulem.

Laserový modul disponuje laserem modré barvy o vlnové délce $445 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$. Vstupní napětí pro laserový modul je 12 – 24 V. V tom případě bude laser napájen napětím 12 V v závislosti na elektronice 3D tiskárny.

Výkon laserového paprsku použitého modulu je 500 mW, který by měl být dostatečný pro gravírování na papír, případně do překližky.

Bylo by taktéž možné použít výkonnější laserový modul, nicméně v rámci bezpečnosti byla prozatím pro prvotní zkoušku použita méně výkonná varianta.

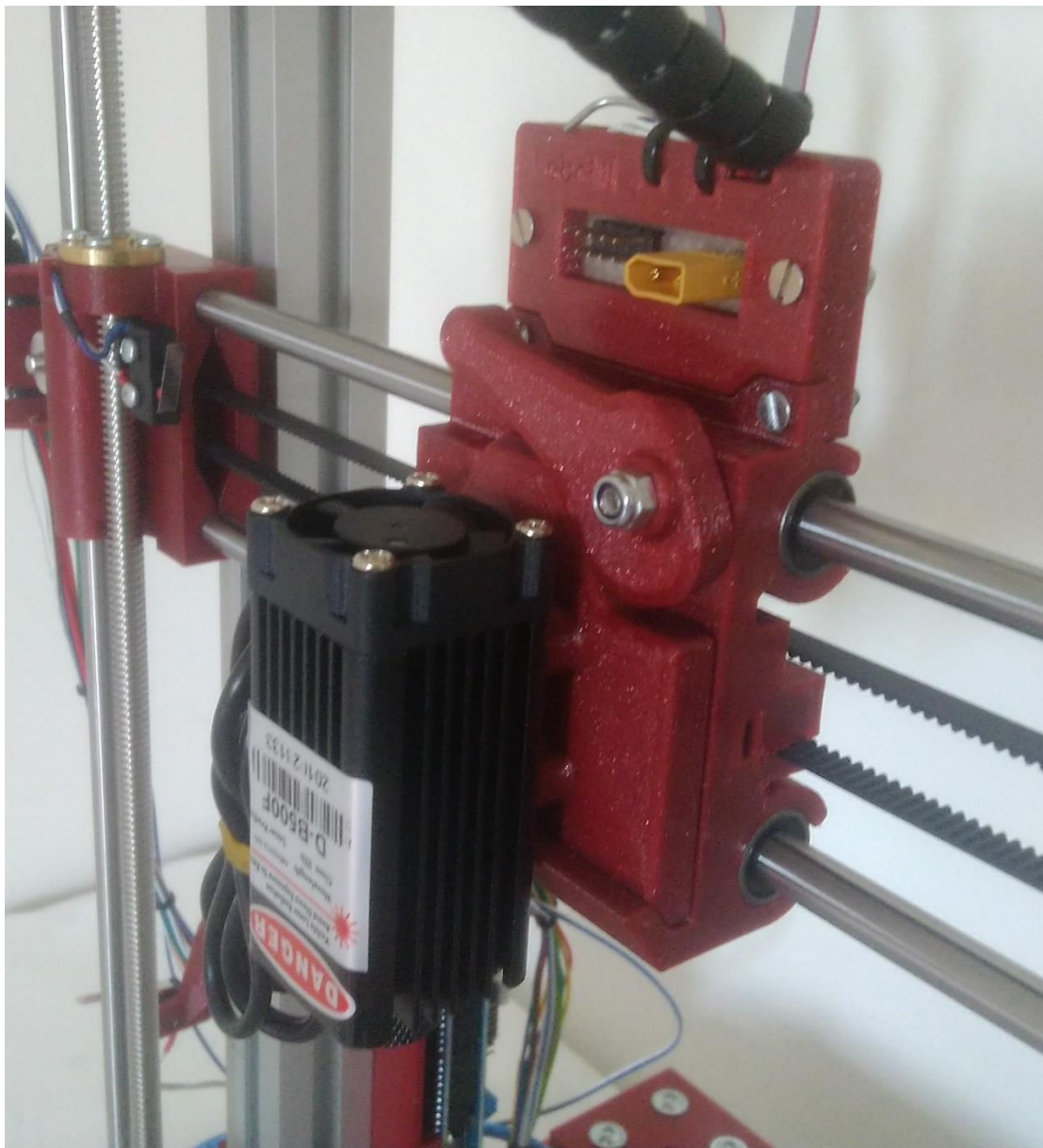


Obr. 4.18 Laserový modul s příslušenstvím.

Během laserového gravírování je vždy nutné, aby všichni přihlízející měli nasazeny ochranné brýle určené k ochraně před příslušným typem laseru.

Do budoucna by bylo vhodné vybavit 3D tiskárnu ochranným krytem vybaveným ochranným sklem příslušené vlnové délky tak, aby bylo bezpečné pohybovat se v okolí 3D tiskárny během laserového gravírování bez použití ochranných brýlí.

Ochranný kryt by zároveň mohl sloužit jako vyhřívaná komora při 3D tisku.



Obr. 4.19 Sestavená hlavice s laserovým modulem upnutá na 3D tiskárně pomocí navrženého řešení.

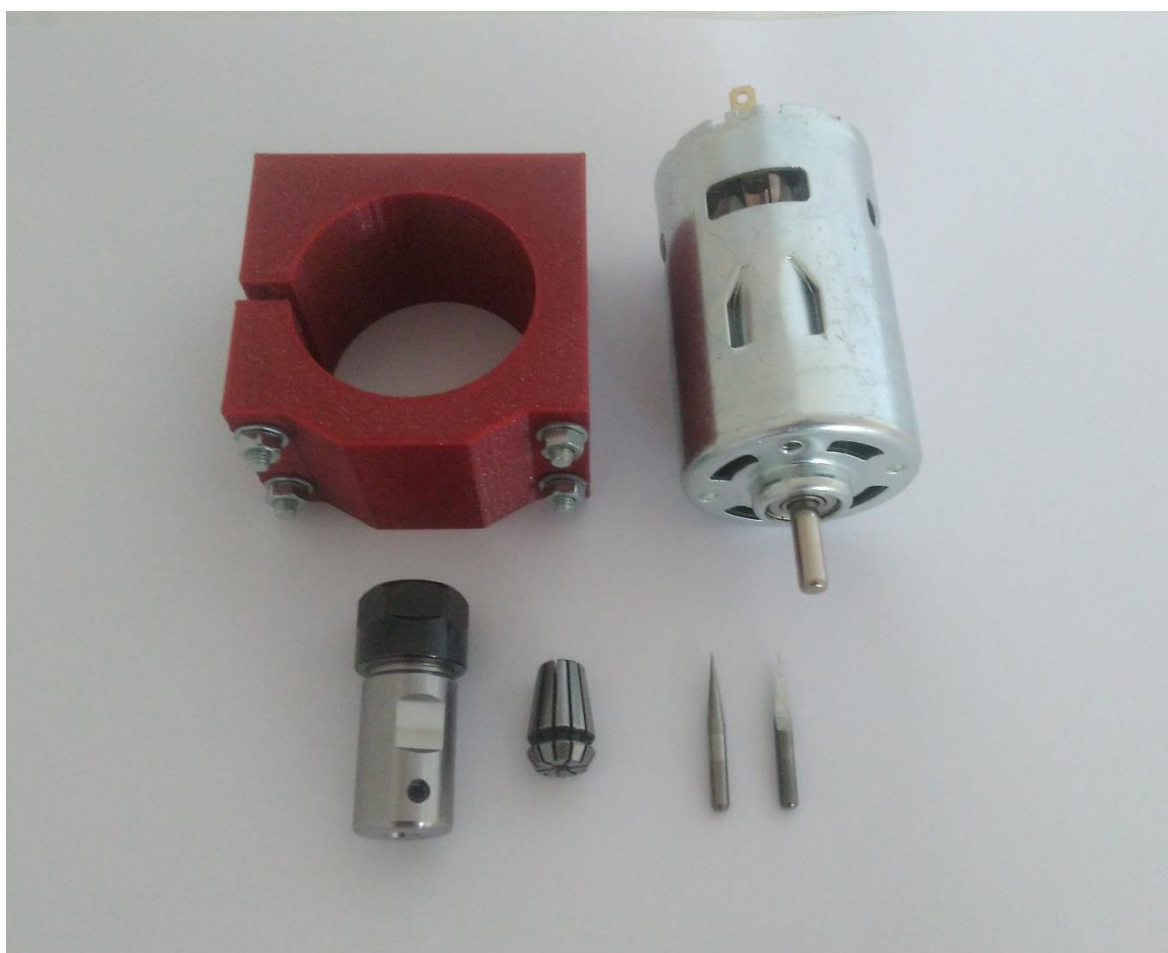
4.6.4 Hlavice s frézovacím vřetenem

Hlavice s frézovacím vřetenem je jednoduché konstrukce. DC motor určený k CNC gravírování je uchycen prostřednictvím navrženého držáku k adapteru výměnné tiskové hlavy.

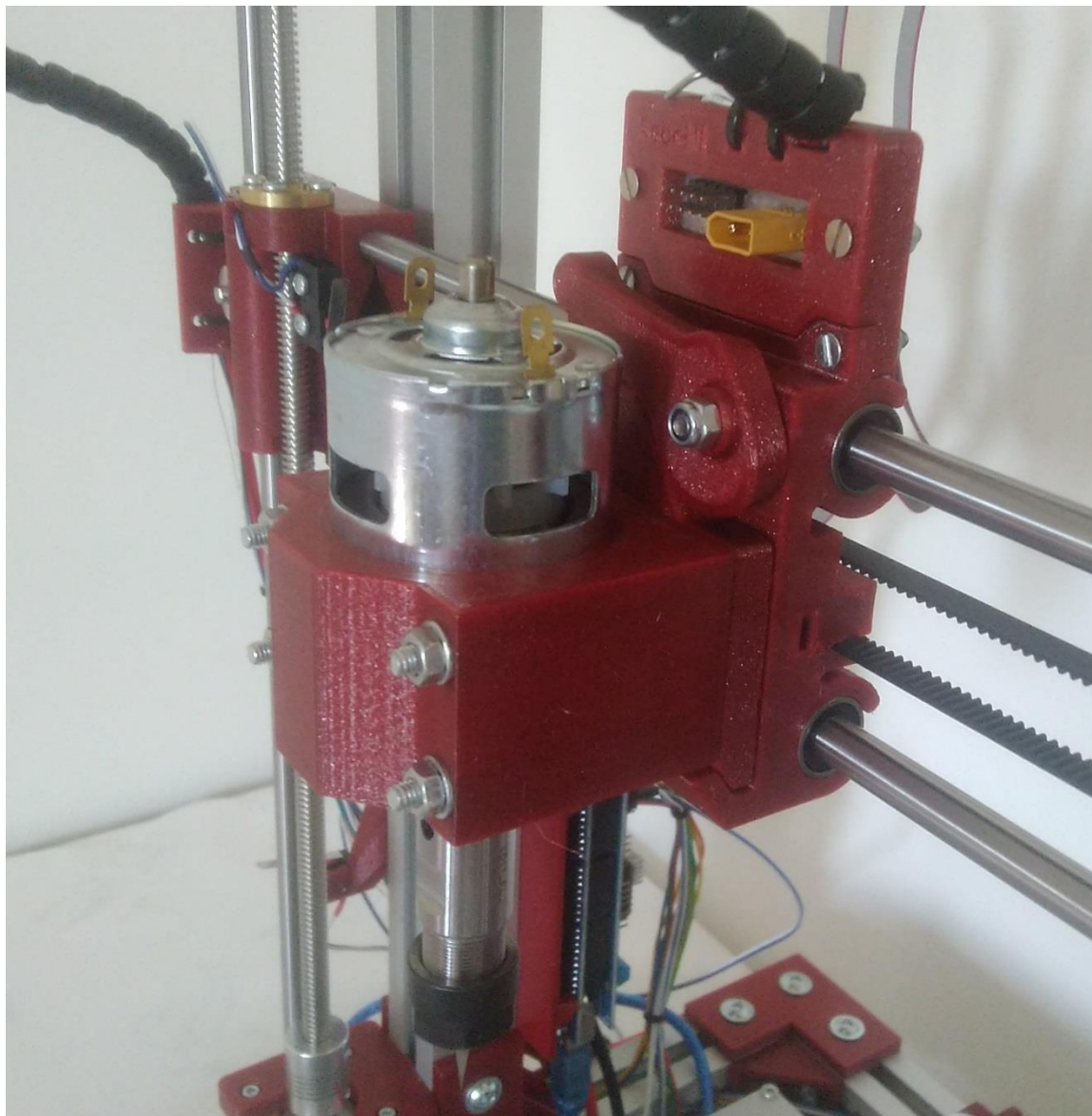
Motor disponuje otáčkami v rozmezí 4000 – 12000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na vstupním napětí, které se pohybuje v rozmezí 12-36 V.

Na hřídeli DC motoru je prostřednictvím upínacího mechanismu s kleštinou upnut gravírovací nástroj.

Tato CNC hlavice je určena především pro gravírování do měkkých materiálů, jako je např. dřevo nebo plast.



Obr. 4.20 Hlavice s frézovacím vřetenem před sestavením.



Obr. 4.21 Sestavená frézovací hlavice upnutá na 3D tiskárně pomocí navrženého řešení.

5 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ



Obr. 4.22 Tiskové a gravírovací hlavice.

5.1 Technické zhodnocení upínacího mechanismu

Z technického hlediska bylo navržené řešení prakticky vyzkoušeno a je zcela funkční. V jednom případě byla provedena drobná manuální úprava tiskové hlavice, kde došlo k mírné kolyzi konstrukce tiskové hlavy s upínacím mechanismem. Tato úprava je však nepatrná a do budoucna bude vhodné provést drobnou změnu v CAD modelu před tiskem adapteru.

Z hlediska opotřebení je pravděpodobné, že při čtenějších výměnách dojde k vymačkání, či vydření plastového adapteru a výstředníku. Oba tyto díly jsou vyrobeny z materiálu PET-G. Částečným řešením by bylo vyrobít tyto díly z plastu, který má vyšší povrchovou tvrdost – např. PLA. Tento materiál však zase na rozdíl od PET-G méně tlumí vibrace. Výměna výstředníku a adapteru však není nijak složitá, ani nákladná. Z toho důvodu můžeme aktuální řešení považovat za bezproblémové a funkční.

Řešením problému opotřebení upínacích ploch by mohla být taktéž implementace kovových destiček, které by bylo vhodné umístit např. prostřednictvím šroubů na upínací plochy. Tím by bylo opotřebení výrazně eliminováno. Tímto řešením by se však navýšila hmotnost, náročnost a náklady daného řešení.

Z hlediska zapojení elektroniky je výměnná hlavice taktéž funkční. Do budoucna by bylo vhodné mírně upravit uchycení kabeláže na přepojovací desce, které musí být při zatažení výstředníku mírně přizvednuto. Jedná se však pouze o detail.

5.1 Technické zhodnocení tiskových hlavic

Obě použité tiskové hlavice (model Rebel II a Prusa i3 MK3) jsou funkční a mohou bezproblémově splňovat svoji funkci.

V původní základní konstrukci hlavice je nutné k výměně trysky celou hlavici odšroubovat, odstranit ventilátor chlazení výtisku a následně chladič, abychom se ke trysce vůbec dostali. Trysku je pak po výměně nutné dotáhnout při zahřátém hotendu na provozní teplotu a vše zase zpět namontovat. Celý tento proces je tedy velmi náročný a v neposlední řadě při něm hrozí také popálení. Navržené řešení umožňuje snížení času výměny trysky z řádu desítek minut na jednotky minut, není při něm nutné nic demontovat pomocí nástrojů a vše probíhá za studena, bez rizika popálení. V obou případech je však nutné provést kalibraci tiskové podložky.

Do budoucna bude počet tiskových hlavic navýšen dle potřebného počtu používaných trysek tak, aby bylo možné měnit hlavice dle potřebného průměru trysky pro požadovanou operaci.

Případně je možné upravit adapter pro další rozdílný typ tiskové hlavice.

5.1.1 Automatic Bed Leveling

Vhodným doplňkem pro výměnné tiskové hlavice je Automatic Bed Leveling, který prozatím v rámci této práce nebyl zprostředkován.

Automatic Bed Leveling je funkcí, která zajišťuje automatické zkalibrování podložky. V případě že tiskárna Auto Bed Levelingem disponuje, je před každým tiskem zkalibrována vzdálenost trysky, tedy i celé tiskové hlavice od tiskové podložky. Díky tomu pak není třeba při každé výměně hlavice provádět ruční kalibraci.

Automatickou kalibraci zajišťuje mechanická, nebo indukční sonda, která změří vzdálenost tiskové hlavice od tiskové podložky v devíti bodech. Následně je prostřednictvím firmwaru tiskárny proveden výpočet a tím je kalibrace dokončena. Velkou výhodou je také programové vyrovnání nerovností podložky.

Do budoucna tedy bude vhodné Auto Bed Leveling na tiskárnu a jednotlivé tiskové hlavice nainstalovat.

5.2 Technické zhodnocení gravírovacích hlavic

Obě gravírovací hlavice prozatím nebyly z elektronického hlediska připojeny k tiskárně. Řešení obsažené v této práci se tak týká pouze mechanického upnutí těchto hlavic.

Mechanické upnutí gravírovacích hlavic je funkční a dostatečné.

5.2.1 Laserová gravírovací hlavice

Teoreticky by bylo možné laserovou gravírovací hlavici připojit k výstupu pro ventilátor chlazení výtisku a laser by tak mohl být zprovozněn. Toto provedení však většinou není příliš spolehlivé a kvalita laserovaného obrazce není příliš dobrá.

Spolehlivějším řešením je použití řídicího modulu, který dokáže laserový modul lépe ovládat. Především se jedná o včasné vypínání a zapínání laserového paprsku při přejezdech, kdy má být laser vypnut.

Tento modul bude vhodné v budoucnu k 3D tiskárně doplnit.

5.2.2 Frézovací gravírovací hlavice

CNC gravírovací hlavice by mohla být bez větších problémů připojena přímo ke zdroji a elektronika tiskárny by se poté starala pouze o posuv jednotlivých osách. Vhodnějším řešením je opět instalace CNC řídicího modulu, který se stará např. o řízení otáček vřetene.

Modul pro řízení otáček bude k tiskárně taktéž doplněn.

5.3 Ekonomické zhodnocení

Z ekonomického hlediska stavba tiskárny stála přibližně 6300 Kč. V částce nejsou zahrnuty doplňkově hlavice.

Tab. 5.1 Cena jednotlivých komponent 3D tiskárny.

Al profily	744	Kč
Euro zástrčka	20	Kč
Elektronika	725	Kč
Hotend s příslušenstvím	192	Kč
Kabely	300	Kč
Konektory	150	Kč
Koncové spínače	30	Kč
Krokové motory	800	Kč
Ložiska lineární	125	Kč
Ložiska ostatní	135	Kč
Ochrana kabeláže	42	Kč
Podložka příslušenství	60	Kč
Podložka vyhřívaná	325	Kč
Řemenice a řemeny	75	Kč
Spojky k závitovým tyčím	40	Kč
Spojovací materiál	250	Kč
Termistor k podložce	24	Kč
Tištěné díly	1000	Kč
Vodící tyče	637	Kč
Zdroj	480	Kč
Závitové tyče	144	Kč
Celkem	6298	Kč

5.3.1 Ekonomické zhodnocení doplňkových hlavice

Tab. 5.2 Cena komponent hlavice Rebel II.

Hnací kolo	34	Kč
Hotend s příslušenstvím	192	Kč
Konektory	40	Kč
Krokový motor	160	Kč
Pružina	20	Kč
Tištěné díly	80	Kč
Ventilátory	50	Kč
Celkem	576 Kč	Kč

Tab. 5.3 Cena komponent hlavice Prusa i3 MK3.

Hnací kola	70	Kč
Hotend s příslušenstvím	192	Kč
Konektory	40	Kč
Krokový motor	160	Kč
Pružiny	30	Kč
Tištěné díly	76	Kč
Ventilátory	70	Kč
Celkem	638	Kč

Z tabulek vyplývá, že cena jednotlivých doplňkových hlavice se pohybuje kolem 600 Kč. Při výrobě každé další hlavice, která bude následně používána jako výměnná společně se zmiňovanými, bude tedy nutné vynaložit přibližně tuto částku.

Cena laserového modulu je 775 Kč za laser s příslušenstvím. Cena tištěného adapteru je 14 Kč za tiskový materiál. Cena laserové hlavice je tedy celkem 789 Kč.

Cena frézovací hlavice je 755 Kč za motor s příslušenstvím a 46 Kč za tištěné díly zahrnující adapter a držák motoru. Celková cena této hlavice je tedy 801 Kč.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo navržení a vyrobení mechanismu ustavení a upnutí výměnné hlavy 3D FDM tiskárny. Bylo nutné sestavit 3D tiskárnu, která v rámci své univerzality umožňuje výměnu hlavic. Zvolena byla upravená verze české RepRap tiskárny typu Rebel II.

První část práce pojednává o 3D tisku obecně, druhá část popisuje metodu FDM. Část třetí je věnována výběru a stavbě vhodné 3D tiskárny, čtvrtá část pak vlastnímu návrhu uchycení hlavice.

Upínací mechanismus tiskové hlavy bylo třeba upravit tak, aby umožňoval rychlou a nenáročnou výměnu celé tiskové hlavy za jinou zároveň při zachování požadovaných mechanických vlastností. Primárním cílem bylo umožnit výměnu různých tiskových hlavic za jiné s rozdílnými vlastnostmi zahrnující např. rozdílnou velikost trysky nebo intenzitu a směr chlazení. K demonstraci této funkcionality byla vybrána originální tisková hlava z příslušné 3D tiskárny Rebel II a druhá tisková hlava z 3D tiskárny Prusa i3 MK3, která je jednou z nejrozšířenějších na světě a její hlavice prošla náležitým vývojem. Další hlavicí, která byla v rámci této práce navržena, je hlavice s uchycením laserového modulu. Čtvrtá hlavice je hlavicí s frézovací hlavou.

Mezi zvažované návrhy patřilo uchycení hlavy např. pomocí šroubů, odpružené západky, magnetů, nebo výstředníku.

Uchycení pomocí šroubů je realizováno přímo na výchozích modelech a z časového hlediska a z hlediska náročnosti výměny bylo toto řešení vyhodnoceno jako nevhodné.

Dalšími možnými řešeními by bylo užití odpružené západky nebo magnetů. Tato uložení by splňovala nároky na výměnu hlavice především z časového hlediska. Byla však zavržena, jelikož je mezi výměnnými hlavicemi zahrnuta také hlavice určená k frézování a uložení pomocí těchto dvou způsobů by pravděpodobně nezajistilo dostatečnou pevnost.

Nakonec bylo tedy jako způsob upínání vybráno upínání pomocí výstředníku, které poskytuje dostatečnou pevnost a také splňuje požadavky na časovou náročnost výměny.

V páté části je provedeno technické a ekonomické zhodnocení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [2] SVĚT HARDWARE: *3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna ?* [online]. Brno, ČR, 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
- [3] CUSTOM PART NET: *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. USA, 2008 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [4] PRŮŠA, Josef a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha, ČR, 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [5] COTU BLOG: *FDM (Fused deposition modeling)* [online]. Praha, ČR [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/134/fdm-fused-filament-fabrication>
- [6] PRUSA PRINTERS BLOG: *Update on Multi Material Upgrade #2* [online]. Praha, ČR, 2017 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/update-multi-material-upgrade-2_6845/
- [7] ARCH PRINT: *3D TISK* [online]. Praha, ČR, 2016 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <http://www.archprint.cz/3dtisk.html>
- [8] MY 3D CONCEPTS: *Main Components of FDM 3D Printers* [online]. USA, 2017 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <http://my3dconcepts.com/explore/main-components-of-desktop-3d-printers/>
- [9] JOSEF PRŮŠA: *Vše o tryskách s různým průměrem* [online]. Praha, ČR [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem/>
- [10] MY 3D PRINT PRO: *Infill Settings* [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <http://www.my3dprintpro.com/infill.html>
- [11] 3D HUBS: *Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing* [online]. 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing/>
- [12] GILES BATHGATE: *The effect of extra Perimeters in 3D printing*. [online]. 2016 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://gilesbathgate.com/2016/02/14/the-effect-of-extra-perimeters-in-3d-printing/>
- [13] PRUSA PRINTERS BLOG: *What are perimeters good for?* [online]. Praha, ČR, 2015 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters_3963/

- [14] INVENTOR BLOG: *3D tisk – Teplota trysky, rychlost tisku a materiál* [online]. Zlín, ČR, 2017 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-teplota-trysky-rychlost-tisku-material/>
- [15] PRUSA 3D: *Průvodce materiály* [online]. Praha, ČR, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [16] ALL 3D P: *3D Printer Fan – Do I Really Need One?* [online]. 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-fans-do-i-really-need-one/>
- [17] FABBALOO: *How To Use A 3D Print Temperature Tower* [online]. 2020 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/blog/2020/4/9/how-to-use-a-3d-print-temperature-tower>
- [18] COMMONS WIKIMEDIA: *File:3D printing calibration part-cooling fan airflow.svg* [online]. USA, 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_printing_calibration_part-cooling_fan_airflow.svg
- [19] LEVNÉ 3D TISKÁRNÝ: *Chyby při 3D tisku* [online]. Frenštát pod Radhoštěm, ČR, 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.levne3dtiskarny.cz/cs/content/7-chyby-pri-3d-tisku>
- [20] MAKERS LAB: *Typy 3D tiskáren* [online]. Praha, ČR, 2016 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
- [21] ALL 3D P: *The Types of 3D Printing Technology* [online]. 2020 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [22] 3D TISK: *Novinky od českých vývojářů #1: Rebel sCUBE dorazí už letos na jaře (rozhovor s Danem Lencem)* [online]. Brno, ČR, 2017 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/novinky-od-ceskych-vyvojaru-1-rebel-scube-dorazi-uz-letos-na-jare-rozhovor-s-danem-lencem/>
- [23] 3D SOURCED: *The 4 Types of FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar & Scara)* [online]. 2020 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printers/types-of-fdm-3d-printer-cartesian-delta/>
- [24] INVENTOR BLOG: *FDM technologie* [online]. Zlín, ČR, 2016 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/fdm-technologie/>
- [25] SIMPLIFY 3D: *Ultimate 3D Printing Materials Guide* [online]. 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- [26] MAKERBOT: *What Are 3D Printed Materials And How Are They Used?* [online]. USA, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/stories/design/3d-printing-materials/>
- [27] MK ESHOP: *Přehled materiálů pro 3D tisk* [online]. Praha, ČR, 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk>

- [28] SVĚT HARDWARE: *3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?* [online]. Brno, ČR, 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [29] ALL 3D P: *Direct Drive vs Bowden Extruder Setup: The Differences* [online]. 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>
- [30] CREALITY 3D OFFICIAL STORE: *Ender 3 3D Printer* [online]. China, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.creality3dofficial.com/products/official-creality-ender-3-3d-printer>
- [31] PRUSA KNOWLEDGE BASE: *2C. Demontáž extruderu u MK3/MK2.5* [online]. Praha, ČR, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/guide/2c-demontaz-extruderu-u-mk3-mk2-5_37384
- [32] REBEL 3D: *Rebel II - V33* [online]. 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <http://www.rebelove.org/viewtopic.php?f=11&t=1987>
- [33] COMPUTER LABORATORY: *3D tiskárna Rebel 2Z* [online]. Ústí nad Labem, ČR, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.clexpert.cz/3dtisk/rebel2z/>
- [34] SAKUL WORLD: *Stavba 3D tiskárny Rebel II* [online]. 2018 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://forum.sakul.cz/viewtopic.php?p=2115>
- [35] ALI EXPRESS: *3D Printer Controller Kit Mega 2560 Uno R3 Starter Kits+RAMPS 1.6+5Pcs DRV8825 Stepper Motor Driver + LCD 12864 Reprap* [online]. 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/4000287477657.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.27424c4daLHiOe>
- [36] 3D TISK: *Fused Deposition Modeling* [online]. Brno, ČR, 2013 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>
- [37] WIKIPEDIA: *Firmware* [online]. USA, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Firmware>
- [38] WIKIPEDIA: *Vestavěný systém* [online]. USA, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vestav%C4%9Bn%C3%BD_syst%C3%A9m
- [39] REP RAP: *Arduino Mega Pololu Shield* [online]. 2018 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Arduino_Mega_Pololu_Shield
- [40] SHARPLAYERS: *Základní principy aditivní výroby* [online]. Praha, ČR, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://sharplayers.cz/support/aditivni-vyroba/>
- [41] 3D TECH: *Rapid Prototyping* [online]. Ondřejov, ČR, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dtech.cz/rapid-prototyping/>
- [42] 3DEES: *Co je to reverzní inženýrství?* [online]. Praha, ČR, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/faq/75-co-je-to-reverzni-inzenyrstvi>

- [43] 3D SYSTEMS: *Our story* [online]. USA, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>
- [44] WIKIPEDIA: *RepRap project* [online]. USA, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_project

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

3D	trojrozměrný
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
CAD	Computer Aided Drafting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LOM	Laminated Object Manufacturing
PC	Polykarbonát
PET	Polyethylentereftalát
PJM	PolyJet Matrix
PLA	Polyactid acid
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
UV	ultrafialový

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
F	[N]	upínací síla
F _a	[N]	setrvačná síla od zrychlení hlavy
F _G	[N]	tíhová síla
a _H	[m·s ⁻²]	zrychlení hlavy
l	[m]	délka ramene výstředníku
m _H	[kg]	hmotnost hlavy
r	[m]	poloměr vačky výstředníku
t _H	[s]	čas dosažení rychlosti hlavy
v _H	[m·s ⁻¹]	rychlost hlavy

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Dr. Adrian Bowyer a Vik Oliver s první RepRap tiskárnou [44].	11
2.1	Nanášení vrstev materiálu prostřednictvím technologie FDM [1].	15
2.2	Schématické znázornění metody FDM [3].	16
2.3	Ukázka vícebarevných modelů [6].	16
2.4	3D model rodinného domu [7].	17
2.5	Struktura výtisku [11].	18
2.6	Vliv šířky vrstvy na detail v rovině XY [9].	18
2.7	Vliv tloušťky vrstvy na detail v rovině XY [4].	19
2.8	Trysky různých průměrů [8].	19
2.9	Počet perimetrů 1-5 [12].	20
2.10	Množství a typy výplně [10].	21
2.11	Teplotní testovací věž znázorňující závislost daného materiálu na teplotě tisku [17].	22
2.12	Smrštění materiálu vlivem teplotní roztažnosti při nízké teplotě podložky [19].	22
2.13	Schématické znázornění tisku s přídavným chlazením a bez přídavného chlazení [18].	23
2.14	Snížená kvalita 3D tisku vlivem vysoké rychlosti a vibrací [19].	24
2.15	Schématické znázornění kartézské tiskárny Prusa i3 MK3S [4].	27
2.16	Kartézská tiskárna Rebel sCUBE s rámem ve tvaru krychle [22].	27
2.17	Schématické znázornění Delta tiskárny [4].	28
2.18	3D tiskárny R-360 konstrukčního typu Polar [20].	29
2.19	Robotická paže v kombinaci s FDM 3D tiskem [23].	29
2.20	Konstrukce hotendu výrobce E3D [28].	30
2.21	Dva rozdílné způsoby vedení filamentu [28].	31
2.22	3D tiskárna Creality Ender 3 s bowdenovým extruderem [30].	32
2.23	Přímý extruder tiskárny Prusa MK3 [31].	33
2.24	Komponenty 3D tiskárny firmy Prusa Research s.r.o. [4].	35
3.1	Základní verze 3D tiskárny Rebel II [32].	37
3.2	Tisková hlava tiskárna Rebel II [32].	38

3.3	Návrh mechanické konstrukce 3D tiskárny Rebel II v programu SolidWorks.	40
3.4	Návrh zesílení „T“ profilu v programu SolidWorks.	41
3.5	Návrh stolku v programu SolidWorks.	42
3.6	Návrh uložení špulky filamentu v programu SolidWorks.	43
3.7	Tištěné díly upravené verze tiskárny Rebel II.	44
3.8	Průřez profilem Al kombi 30 x 30 mm.	45
3.9	Rám 3D tiskárny Rebel II sestavený z AL profilů a dílů zhotovených 3D tiskem.	46
3.10	Sestava osy Y před montáží.	47
3.11	Sestava osy X před montáží.	48
3.12	Rám tiskárny osazený všemi osami a elektronikou.	48
3.13	Použitá elektronika [35].	49
3.14	Obrazovka 3D tiskárny s uživatelským prostředím firmwaru Repetier.	50
3.15	Na levé straně původní 3D tiskárna Rebel II a na pravé straně její replika.	52
4.1	Model původního pojezdu osy X 3D tiskárny Rebel II v programu SolidWorks.	53
4.2	Návrh vlastního upínacího mechanismu pomocí výstředníku v programu SolidWorks.	54
4.3	Náhled na konstrukční řešení pomocí tzv. „rozpadu“ v programu SolidWorks.	55
4.4	Tvorba modelu pro 3D tisk v programu Prusa Slicer.	56
4.5	Pohled na vnitřní strukturu modelu v programu Prusa Slicer.	56
4.6	Experimentální určení hmotnosti pojezdu osy X a tiskové hlavy.	57
4.7	Nákres výstředníku v programu SolidWorks, pomocí kterého byly odečteny dané hodnoty.	58
4.8	Testovací modely vyhotovené pomocí 3D tisku.	60
4.9	Návrh konstrukce připevnění konektorů k pojezdu osy X v programu SolidWorks.	61
4.10	Navržená konstrukce společně s mechanickou konstrukcí 3D tiskárny v programu SolidWorks.	62
4.11	Výroba finálního modelu výměnné hlavy.	63
4.12	Mechanismus výměnné hlavice před sestavením.	63

4.13	Vytištěné adaptory pro jednotlivé hlavice před montáží.	64
4.14	Tisková hlava typu Rebel II před sestavením.	65
4.15	Sestavená tisková hlava typu Rebel II upnutá na 3D tiskárně pomocí navrženého řešení.	66
4.16	Tisková hlava Prusa i3 MK3 před sestavením.	67
4.17	Sestavená tisková hlava typu Prusa i3 MK3 upnutá na 3D tiskárně pomocí navrženého řešení.	68
4.18	Laserový modul s příslušenstvím.	69
4.19	Sestavená hlavice s laserovým modulem upnutá na 3D tiskárně pomocí navrženého řešení.	70
4.20	Hlavice s frézovacím vřetenem před sestavením.	71
4.21	Sestavená frézovací hlavice upnutá na 3D tiskárně pomocí navrženého řešení.	72
4.22	Tiskové a gravírovací hlavice.	73

SEZNAM TABULEK

5.1	Cena jednotlivých komponent 3D tiskárny.	76
5.2	Cena komponent hlavice Rebel II.	77
5.3	Cena komponent hlavice Prusa i3 MK3.	77

