

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
**Technická fakulta**

**Návrh a výroba 3D tiskárny**  
Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.  
Autor práce: Bc. Jan Černý

**Praha 2020**

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Černý

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Návrh a výroba 3D tiskárny**

Název anglicky

**Design and manufacture of 3D printer**

---

## Cíle práce

- \* shromáždit informace o konstrukci malých 3D tiskáren
- \* navrhnout, vyrobit, sestavit a zprovoznit 3D tiskárnu

## Metodika

- \* současný stav řešeného problému (literární rešerše)
- \* cíl práce a metody jejího zpracování
- \* výsledky „experimentu“ a jejich diskuse
- \* závěry a přínos práce

## Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

## Klíčová slova

aditivní technologie; 3D tiskárna; plasty; technicko-ekonomické zhodnocení

---

## Doporučené zdroje informací

- BENIAK, J.: Systém rapid prototyping. Vydavatelství STU 2015. 134 s.
- BERMAN, B.: 3-D printing: The new industrial revolution. Business Horizons, 2012, 55 (2). s. 155-162.
- COOPER, K. G.: Rapid Prototyping Technology: Selection and Application. Taylor & Francis Inc. 2001. 248 s.
- GALLIMORE, J. J., BROWN, M. E.: Visualization of 3-D Computer-Aided Design Objects. International Journal of Human-Computer Interaction, 1993, 5 (4). s. 361-382.
- HOPKINSON, N., HAGUE, R., DICKENS, P.: Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age. John Wiley & Sons 2006. 304 s.
- CHUA, CH. K., LEONG, K. F., LIM, Ch. S.: Rapid Prototyping. Principles and Applications. 3rd Edition. WSPC 2010. 518 s.
- CHUA, CH. K., LEONG, K. F.: 3D Printing and Additive Manufacturing. Principles and Applications. Fifth Edition. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 2014. 540 s.
- KHOO, Z. X., TEOH, J. E. M., LIU, Y. et al.: 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. Virtual and Physical Prototyping, 2015, 10 (3). s. 103-122.
- OROPALLO, W., PIEGL, L. A.: Ten challenges in 3D printing. Engineering with Computers, 2016, 32 (1). s. 135-148.
- RAYNA, T., STRIUKOVA, L.: From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. Technological Forecasting and Social Change, 2016, 102. s. 214-224.

---

## Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

## Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

## Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

---

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2019

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 01. 10. 2019

### **Čestné prohlášení**

*Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Návrh a výroba 3D tiskárny vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.*

*Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.*

*Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.*

*Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.*

V Praze dne 20. 4. 2020

.....

Jan Černý

## **Poděkování**

Touto formou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Milanovi Brožkovi, CSc za důvěru a volnost při zpracování, kterou mi poskytl.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za pomoc s korekturou diplomové práce a podporou během celého studia.

## **Abstrakt:**

Práce se ve své první části zabývá technologií 3D tisku, její historií, praktickým využitím a budoucími směry vývoje této technologie. Detailněji jsou popsány nejběžnější polymerní materiály využívané k 3D tisku metodou FDM. Dále jsou stručně charakterizovány jednotlivé metody technologie 3D tisku. Konec první části obsahuje základní konstrukční rozdělení FDM 3D tiskáren a stručný popis základních částí, ze kterých se skládají.

Druhá část této práce je zaměřena na návrh konstrukčního řešení FDM 3D tiskárny a její stavbu. Navržené řešení je doplněno o detailní popis jednotlivých částí obsahující výpočty a pevnostní analýzy. Tato část obsahuje také zkušební tisk.

V závěrečné části práce jsou popsány výsledky zkušebního tisku tří modelů na navržené 3D tiskárně. Hodnocena je kvalita zkušebního tisku, vzhled a kvalita povrchu součástí. V jednom případě je posuzována rozměrová přesnost tištěné součásti. Dále je provedeno technicko-ekonomického zhodnocení navržené 3D tiskárny. Diskuse se zabývá konstrukčními problémy navržené tiskárny a jejich možným řešením.

**Klíčová slova:** aditivní technologie, 3D tiskárna, plasty, technicko-ekonomické zhodnocení

## **Summary:**

The following thesis is broken down into three different segments. The first section covers information on 3D printing technology, its background, practical use, and future developments. It goes into more detail about the most common polymeric materials used for 3D printing with the fused deposition modeling (FDM) method. Additionally, other methods are identified and briefly described. Lastly, the basic constructional components of the FDM 3D printers are identified and are given a brief description.

The second section focuses on the design and construction of the FDM 3D printer. A theory is presented to reach a resolution using obtained calculations and a detailed performance analysis and also including printing test.

In final part, the results of three printed models are administered. The quality of the tested print includes the evaluation of the appearance and surface condition of the components. Alternatively, the dimensional accuracy of one printed component is assessed likewise. The technological and economic value of the designed 3D printer is also described and in the discussion are presented main design deficiencies and their solutions.

**Key words:** additive technology, 3D printer, plastics, technological and economic evaluation

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Metodika .....</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Současný stav řešeného problému.....</b>	<b>3</b>
4.1	3D tisk.....	3
4.2	Výhody a nevýhody technologie 3D tisku.....	4
4.3	Budoucnost 3D tisku.....	5
4.4	Rozdělení podle materiálu .....	6
4.4.1	Polymery .....	7
4.4.2	Kovy.....	11
4.4.3	Ostatní .....	11
4.5	Metody technologie 3D tisku.....	12
4.5.1	Material Extrusion FDM/FFF .....	12
4.5.2	Vat Polymerization SLA, DLP .....	13
4.5.3	Powder Bed Fusion SLS, DLMS, SLM, EBM .....	13
4.5.4	Material Jetting MJ, DOD.....	15
4.5.5	Binder Jetting SBJ, MBJ.....	15
4.5.6	Sheet Lamination LOM .....	16
4.5.7	Direct Energy Deposition LENS, EBAM, LDW.....	17
4.6	FDM 3D tiskárny .....	18
4.6.1	Základní části FDM 3D tiskáren.....	18
4.6.2	Rozdělení FDM tiskáren podle konstrukce.....	26
4.6.3	RepRap.....	29
4.6.4	Komerční FDM 3D tiskárny .....	30
4.6.5	Software .....	32
<b>5</b>	<b>Cíl práce a metody jejího zpracování.....</b>	<b>35</b>
5.1	Navržené konstrukční řešení 3D tiskárny .....	36
5.2	Rámová konstrukce.....	37
5.3	Pojezdový systém v rovině XY.....	39
5.3.1	Porovnání pojezdových systémů.....	39
5.3.2	Řešení pojezdového systému H-bot.....	42
5.4	Pojezdový systém v ose Z.....	46
5.4.1	Pohon pojezdu v ose Z.....	47
5.4.2	Ověření zatížení lineárního vedení .....	47
5.4.3	Ověření průhybu pojezdu v ose Z.....	49

5.5	Tisková hlava .....	50
5.6	Extrudér.....	52
5.7	Elektronika.....	53
5.8	Firmware .....	54
5.9	Zkušební tisk.....	55
<b>6</b>	<b>Výsledky „experimentu“ a jejich diskuse .....</b>	<b>57</b>
6.1	Zhodnocení zkušebního tisku .....	57
6.2	Technicko-ekonomické zhodnocení .....	60
6.3	Diskuse.....	61
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>70</b>
<b>10</b>	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>73</b>
<b>11</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>74</b>



## 1 Úvod

Aditivní technologie, anglicky Additive Manufacturing (AM), nebo také technologie 3D tisku, je populární a neustále se rozšiřující průmyslové odvětví, které nachází uplatnění v celé řadě nejen technických oborů. Největší podíl využití technologie 3D tisku je stále v oblasti Rapid prototypingu, i když tento trend se s neustálým vývojem pomalu mění. Do popředí se dostávají např. aplikace v medicíně či stavebním průmyslu. Výhody a využití technologie 3D tisku se ukazují i na právě probíhající celosvětové pandemii způsobené virovým onemocněním COVID-19, kde tato technologie umožňuje rychle a flexibilně vyrábět celou řadu ochranných pomůcek.

Nejrozšířenější a nejpoblárnější metodou 3D tisku je metoda FDM, zkratka z anglického názvu Fused Deposition Modeling, pracující s termoplastickými polymery. Toto prvenství vychází především z relativně nízkých pořizovacích nákladů v kombinaci s vysokou kvalitou dosahovaného tisku. Výhodou metody FDM oproti ostatním metodám 3D tisku je výrazně nižší energetická náročnost a jednoduchost jednotlivých komponent.

V dnešní době je na trhu celá řada komerčních FDM 3D tiskáren různé cenové kategorie, od nejlevnějších tiskáren v řádech tisíců korun, velmi často prodávaných jako stavebnice, až po profesionální tiskárny v řádech statisíců korun. Stále velmi populární je stavba domácích 3D tiskáren na bázi projektu RepRap. Tento typ tiskáren je založen na jednoduchých open-source stavebnicových konstrukcích, které si uživatel může upravit a modifikovat podle svých představ a požadavků. Takovýto přístup ke stavbě tiskáren umožňuje jejich dlouhodobé vylepšování nahrazování za lepší a sofistikovanější součásti, které pak mohou ve výsledku výrazně ovlivnit kvalitu tisku.

Využití součástí vyrobených na malých FDM 3D tiskárnách je velmi široké a nalézá uplatnění jak pro domácí potřeby, tak i pro komerční využití.

## **2 Cíl práce**

Cílem této práce je na základě teoretických poznatků o 3D tisku a konstrukci malých FDM 3D tiskáren navrhnout, sestavit a zprovoznit autorem navrženou 3D tiskárnu. Navržená tiskárna by měla disponovat vysokou kvalitou tisku, vyšší pracovní rychlostí a umožňovat tisk celé řady běžně používaných materiálů. Samotná konstrukce by měla být tuhá s malými rozměry a designovým provedením.

## **3 Metodika**

Diplomová práce se skládá z části teoretické, praktické a výsledků praktické části. V teoretické části je stručně popsán vznik technologie 3D tisku, jeho aktuální pozice v průmyslu a budoucí směry rozvoje technologie. Dále je v práci technologie 3D tisku rozdělena podle druhu materiálu, který tisknou. Podrobněji jsou popsány nejběžnější polymerní materiály používané technologií FDM. Jsou stručně popsány základní metody aditivní technologie. Teoretická část je zakončena popisem základních typů konstrukcí FDM 3D tiskáren a jejich jednotlivých komponent.

Praktická část je zaměřena na návrh konstrukčního řešení FDM 3D tiskárny a její stavbu. V jednotlivých podkapitolách jsou detailně popsána jednotlivá konstrukční řešení základních částí tiskárny doplněná o výpočty, nebo pevnostní analýzy provedené na základě metody konečných prvků. Za účelem ověření funkčnosti navržené tiskárny je popsán a proveden zkušební tisk tří odlišných modelů. Pro ověření kvality tisku byl pro každý z těchto modelů zvolen odlišný materiál a jiné vstupní parametry tisku.

V poslední části je hodnocena kvalita zkušebního tisku a vzhled povrchu jednotlivých modelů. V jednom případě bylo provedeno měření vnějších rozměrů zkušebního modelu pro posouzení rozměrové přesnosti výtisku. Tato část obsahuje i technicko-ekonomické zhodnocení navržené FDM 3D tiskárny a diskusi zabývající se konstrukčními problémy navržené tiskárny a jejich možným řešením.

## 4 Současný stav řešeného problému

V kapitole je krátce popsána historie, vývoj a budoucí směřování technologie 3D tisku. Další část kapitoly je zaměřena na stručný popis a vlastnosti polymerních materiálů, ze kterých je nejčastěji prováděn tisk metodou FDM. Technologie 3D tisku je rozdělena podle jednotlivých metod. Zbylá část kapitoly je zaměřena na FDM 3D tiskárny, jejich hlavní konstrukční rozdělení a popis základních částí, ze kterých jsou sestaveny.

### 4.1 3D tisk

3D tisk je relativně moderní výrobní technologie a počátky jejího vzniku sahají do druhé poloviny 20. století. Jejím zakladatelem je označován Charless Hull, který v roce 1983 vytiskl první výtisk a rok poté podal patent na technologii Stereolithography apparatus. V roce 1986 založil společnost 3D Systems, která se stala první společností zabývající se 3D tiskem na světě. O rok později byla představena první komerční 3D tiskárna SLA-1 využívající technologii Stereolithografie. [1], [2]

3D tisk patří do kategorie aditivní technologie, spočívající na principu vytváření objektu vrstvením materiálu ve formě tenkých horizontálních vrstev o konstantní výšce, které představují příslušný horizontální průřez objektu. Zjednodušeně se jedná se o opačný proces než je klasické obrábění. První komerční využití technologie 3D tisku se objevilo v leteckém a kosmickém průmyslu. Se snižující se cenou této technologie se pomalu začal 3D tisk rozšiřovat do širšího spektra průmyslu. Technologie 3D tisku je v dnešní době stále populárnější a její možnosti a uplatnění stále rostou. Umožňuje tisk celé řady materiálů od polymerů, kovů, vosků, keramiky až po organické materiály. [3], [4]

3D tisk je velmi často spojován s pojmem Rapid Prototyping (RP), což volně přeloženo znamená rychlé prototypování, kde je v dnešní době uplatnění technologie 3D tisku největší. Rapid Prototyping je technologický proces, který vytváří nový prototyp rychlejším způsobem než běžné konvekční metody, které pak mohou být následně použity k výrobě toho samého výrobku v sériové výrobě. Zkrácení času potřebného na vývoj produktu se odráží především snížením nákladů a lepší konkurenceschopností na trhu, která je v dnešní době zaměřena na nepřetržité představování nových produktů. [2]

Kromě oblasti prototypování se 3D tisk rozšiřuje i do oblasti medicíny, kde se rozděluje na dvě základní kategorie.

První z nich je tisk celé řady protéz od stomatologie, kde slouží k výrobě korunek, můstků, skeletů, nebo hybridních náhrad, přičemž je dosahováno vysoké přesnosti výtisků. Až po výrobu individuálních protéz končetin, nebo různých součástí, které jsou schopné se v rádech měsíců bezpečně a bez následků rozložit v lidském organismu. [5], [6]

Druhou kategorií je tisk organických materiálů, který má velmi slibný budoucí potenciál. Jedná se především o tisk kmenových buněk nanášených na předpřipravené konstrukce. Po zdokonalení této technologie bude možné tisknout celé orgány, což by pomohlo hlavně v oblasti

transplantace orgánů, kde je velký nedostatek dárců. V dnešní době je již možné tisknout materiály podobné kůži nebo chrupavkám. [7]

Mezi další odvětví, kde si začíná 3D tisk získávat svoji pozici, je stavebnictví. Zde se extrudují speciálně upravené betony. To umožňuje např. vytváření vzduchových dutin uvnitř stěn, které slouží jako tepelná izolace. Hlavním cílem je tisknout budovy, které budou jednoduché, ekonomicky výhodné a rychle vytisknutelné. Takovýto směr ve stavebnictví je vhodný k použití v rozvojových zemích, nebo jako levná a rychlá varianta bydlení. To může umožnit například rychlou výstavbu ubytování při živelných pohromách, během válečného stavu apod. Další odvážnou vizí je využití technologie 3D tisku pro výstavbu budov na Měsíci a Marsu, který se chce lidstvo v blízké budoucnosti snažit kolonizovat. Jelikož by přeprava stavebního materiálu na jiné planety byla nesmírně nákladná a obtížná, je myšlenka tisku z lokálních materiálů velmi zajímavá. [8], [9]

#### **4.2 Výhody a nevýhody technologie 3D tisku**

Technologie 3D tisku se v dnešní době stále více rozšiřuje, a to především kvůli neustálému technologickému pokroku a nízkým cenám hobby a poloprofesionálních 3D tiskáren, které dosahují dobré kvality výtisků. Snadná možnost vylepšování těchto tiskáren spolu s širokou komunitou uživatelů po celém světě posouvá technologický vývoj velmi rychlým tempem dopředu.

Mezi hlavní výhodu technologie 3D tisku patří široká tvarová variabilita výtisků, která umožňuje vytvářet daný objekt se všemi výslednými prvky, jako jsou např. otvory, závity, zahlabení apod, aniž je zapotřebí výměna nástroje, nebo změna orientace výrobku pro další technologický proces. Popřípadě nutnost vytváření kompromisů ovlivňující tvar výrobků, kvůli jeho složitému, nebo extrémně nákladnému vyrobění. Další významnou výhodou 3D tisku je vysoká úspora materiálu během výrobního procesu oproti konvenčním metodám a to hlavně metodám obrábění. [10]

Jako každá technologie má i 3D tisk mnoho nevýhod. Jednou z nevýhod je rozměrové omezení tištěných dílů závisující na možnostech daných tiskáren. Rozměry tiskových prostorů průmyslových 3D tiskáren se běžně pohybují v řádech desítek centimetrů. S tím se pojí i tzv. post processing, kdy je například nutné spojit několik menších dílů do jednoho výsledného dílu, odstranění podpůrných konstrukcí nebo dokončovací práce povrchu součástí. [11]

Další nevýhodou je časová a energetická náročnost, které závisí především na přesnosti, která přímo ovlivňuje délku tisku, a použité metodě tisku. Čas potřebný k tisku je oproti ostatním konvenčním technologiím mnohonásobně delší a nehodí se proto příliš pro sériovou výrobu. Energetická náročnost se vztahuje především na metody využívající laserový, nebo elektronový paprsek a nutnost uzavřených vyhřívacích komor, popřípadě komor s ochrannou atmosférou.

Další nevýhodou je vysoká cena profesionálních průmyslových 3D tiskáren, která je obdobná s obráběcími CNC stroji a k tomu spojené nároky na kvalifikovanou obsluhu. [2]

Další nevýhodou může být znečišťování okolního prostředí ultra jemnými částicemi v řádech nanometrů, které vznikají při tavení polymerů. Toto znečišťování se týká především stolních FDM 3D tiskáren, které častokrát nemají uzavřený a odvětrávaný tiskový prostor. [12], [13]

### 4.3 Budoucnost 3D tisku

Technologie 3D tisku má velmi perspektivní budoucnost. Jako jedna z hlavních změn se očekává zvýšení podílu technologie 3D tisku ve výrobním průmyslu než je doposud. Kde se využívá hlavně při výrobě prototypů, speciálních součástí, popřípadě kusové, nebo malosériové výrobě. Toho se dosáhne hlavně neustálým vývojem a zdokonalováním této technologie. Což povede k jejímu zlevnění a širšímu využití jako běžné výrobní technologie. Jednou z takových možností vývoje je rozšiřování materiálů, které bude možné použít pro 3D tisk. Jedná se především o organické a kompozitní materiály s odlišnými vlastnostmi. Dále se očekává snížení využití polymerních materiálů, které jsou v dnešní době nejpoužívanějším materiálem k tisku a nahrazení jejich ekologičtější variantou. [3], [10]

Dalším směrem je větší implementace technologie 3D tisku do vzdělávacích institucí, kde se studenti budou moci zblízka s touto technologií seznámit už během studia. Tento trend je již běžný na technických školách.

Velkým potenciálem 3D tisku je možnost zkracování logistických řetězců napříč obory, kdy výroba náhradních dílů nebude vázaná na jednotlivé výrobce, ale bude možnost výroby různých náhradních dílů na jednom místě. Uplatnění se nalézá především v armádní logistice, kde bude možná výroba náhradních dílů z celého spektra armádní techniky přímo na základně. Popřípadě výroba specifických součástí a jejich snadná modifikace podle jednotlivých požadavků vojáků. [14]

Další oblastí, kde je velký budoucí potenciál pro rozšíření a vývoj technologie 3D tisku je kosmický prostor, ve kterém je oproti zemskému povrchu snížená gravitace, popřípadě mikrogravitace. Jelikož je gravitace pro správnou funkci některých metod 3D tisku nezbytná, tak je využití takovýchto metod v kosmickém prostoru nemožné. Ke konci roku 2014 byl na mezinárodní vesmírné stanici (ISS) vytištěn první výtisk metodou FDM a NASA ve výzkumu nadále pokračuje. Jedním z probíhajících výzkumů NASA je možnost tisku potravin se specifickými kalorickými hodnotami pro jednotlivé astronauty a tím zjednodušení a zlepšení jejich stravování během pobytu v kosmickém prostoru. Další možností, která by mohla mít v budoucnosti uplatnění, je 3D tisk různých konstrukcí a součástí ve volném kosmickém prostoru mimo vesmírnou stanici [15], [16]

#### 4.4 Rozdělení podle materiálu

Jedním z možných rozdělení technologie 3D tisku je podle materiálu používaného k tisku. Jelikož se tato práce zabývá technologií FDM, pracující s termoplastickými polymery, jsou zde podrobněji popsány materiály, které jsou touto technologií využívány.

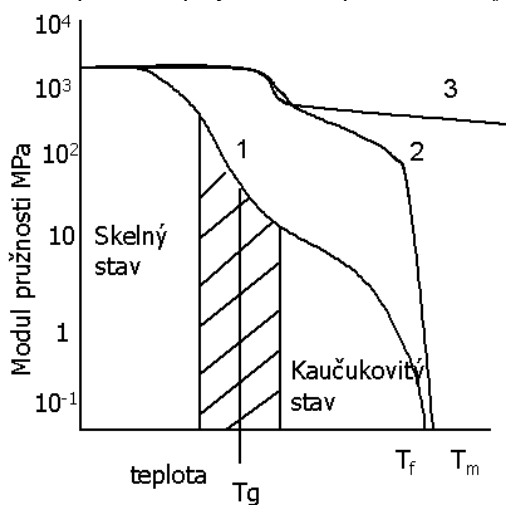
Mezi nejrozšířenější materiály patří PLA, ABS, ASA, PET-G a Nylon. Tiskový materiál, označovaný jako filament, se používá ve formě dlouhých strun, o průměru 3 nebo 1,75 mm navinutých na kotouče. Filament se běžně prodává podle délky nebo hmotnosti.

Metoda FDM využívá termoplastické polymery kvůli jejich schopnosti opakovaně měnit tvar působením tepelné energie. Polymerní materiály se v závislosti na teplotě mohou nacházet v tuhém, kaučukovitém, nebo kapalném stavu. Termoplasty dělíme na dvě základní skupiny, semi-krystalické a amorfní. [17]

U amorfních termoplastů jsou charakteristickými přechodovými teplotami teplota skelného přechodu  $T_g$  a teplota viskózního toku  $T_f$ . Pod teplotou  $T_g$  je termoplast v tuhém stavu, je pevný, tvrdý a má vysoký modul pružnosti, platí zde Hookův zákon. Nad teplotou  $T_g$  se dostává do kaučukovitého stavu, kde se snižuje jeho modul pružnosti. Při teplotě  $T_f$  amorfní termoplast ztrácí modul pružnosti, měkne a stává se vysoce viskózní taveninou. Nad teplotou  $T_f$  se amorfní termoplasty dostávají do oblasti zpracovatelnosti. Teplota skelného přechodu  $T_g$  je také u mechanicky nenamáhaných amorfních polymerů považována za horní hranici použitelnosti, ale běžně se tato teplota snižuje o 10 až 20 °C. [17]

Semi-krystalické termoplasty mají obdobné chování jako amorfní, ale k největším změnám dochází při teplotě tavení  $T_m$ , kdy mění svůj stav z tuhého na tekutý. Teplota  $T_m$  je vyšší než teplota viskózního toku  $T_f$ . Nad teplotou  $T_m$  se semi-krystalické termoplasty dostávají do oblasti jejich zpracovatelnosti. Jelikož k největším a nejrychlejším změnám semi-krystalických termoplastů dochází až při teplotě  $T_m$ , tak se tato teplota považuje za horní hranici použitelnosti. U mechanicky nenamáhaných součástí se tato teplota snižuje o 20 až 40 °. [17]

Obrázek 1 Průběhy závislosti modulu pružnosti polymerů na teplotě, 1- amorfní, 2- semi-krystalické, 3- síťované



Zdroj: [17]

#### 4.4.1 Polymery

##### PLA

Kyselina polylactická, z anglického názvu Polylactic Acid (PLA), je velmi rozšířený organický a úplně rozložitelný semi-krystalický termoplast, nejčastěji vyráběný z kukuřičného či bramborového škrobu, nebo cukrové třtiny. Jedná se o relativně pevný, pružný a lehký materiál. Při tavení nevytváří zápach, nebo jedovaté výpary. Má lesklý povrch a snadno se z něho odstraňují podpůrné konstrukce. Díky svým vlastnostem, které umožňují tisk na téměř jakkoliv FDM 3D tiskárně bez nutnosti vyhřívané podložky, lze PLA považovat za nejuniverzálnější materiál pro tisk metodou FDM. [18]

Jednou z hlavních nevýhod tohoto materiálu je hygroskopicitata, tedy absorbování vzdušné vlhkosti, jež se projevuje jako bublinky na jeho povrchu. Další nevýhodou je relativně nízká teplota tavení, což se může projevovat při dokončovacích operacích broušením povrchu, který se může zahřívat až k bodu tání. Proto nejsou výrobky z PLA materiálů vhodné do prostředí s teplotou nad 50 °C. Další nevýhodou je náchylnost k ucpávání trysky.

Specifikace:

- Hustota  $\rho$  1 250 kg·m<sup>-3</sup> [18]
- Teplota skelného přechodu  $T_g$  45 – 65 °C [18]
- Teplota tavení  $T_m$  130 – 180 °C [18]
- Optimální teplota tisku 180 – 230 °C [19]

##### ABS

Akrylonitrilbutadienstyren, zkráceně ABS, je amorfní termoplastický kopolymer vyráběný polymerací akrylonitrilu a styrénu při přítomnosti polybutadiénu. Jedná se o průmyslově velmi rozšířený materiál pro výrobu hraček, je používán i v automobilovém průmyslu a je vhodný pro tepelně namáhané součásti a prototypy. ABS je dobře opracovatelný, pevný, houževnatý, chemicky a tepelně odolný. Je náchylný k degradaci působením povětrnostních podmínek a slunečního záření. [18]

Mezi hlavní výhody ABS patří jeho nízká cena, dobré mechanické vlastnosti a možnost vyhlazování povrchu výtisků pomocí acetonových výparů.

Hlavní nevýhodou ABS je jeho vysoká míra smrštění, což má za následek kroucení a lámání výtisků. Proto je pro úspěšný tisk nutná vyhřívaná podložka a u větších součástí uzavřená komora, aby vlivem teplotního šoku nedocházelo k poškození výtisků. Mezi další nevýhody patří jeho biologická nerozložitelnost a vznik zápachajících a zdraví nebezpečných výparů, vytvářejících se při jeho tavení, které je nutné odvětrávat.

## Specifikace

- Hustota  $\rho$  1 045 kg·m<sup>-3</sup> [18]
- Teplota skelného přechodu  $T_g \approx 105$  °C [18]
- Teplota tavení  $T_m$  210 – 230 °C [18]
- Optimální teplota tisku 220 – 260 °C [19]

## ASA

Akrylonitril styren akrylát je amorfní termoplast, který byl vyvinut jako odolnější varianta ABS, která lépe odolává slunečnímu záření a povětrnostním podmínkám. Proto je ASA vhodný materiál pro výrobu součástí do venkovního prostředí a je široce používán v automobilovém průmyslu pro výrobu exteriérových dílů. ASA má podobné mechanické vlastnosti jako ABS, a vyžaduje vyhřívanou podložku, popřípadě uzavřený tiskový prostor. [18]

## Specifikace

- Hustota  $\rho$  1 070 kg·m<sup>-3</sup> [18]
- Teplota skelného přechodu  $T_g \approx 100$  °C [18]
- Teplota tavení  $T_m$  210 – 240 °C [18]
- Optimální teplota tisku 220 – 260 °C [19]

## PET

Polyethylentereftalát, zkráceně PET, je semi-krytalický termoplast známý především z potravinářského průmyslu, kde je používán jako obalový materiál. PET je pevný a pružný materiál, odolný proti vyšším teplotám a kyselinám, který se během tisku nekroucí a nesmršťuje. Jednou z jeho hlavních výhod je zdravotní nezávadnost, což umožňuje jeho použití v potravinářském průmyslu. Jednou z nevýhod PET je špatná schopnost barvení jeho povrchu. Ve 3D tisku se povětšinou používá odolnější verze Polyethylentereftalát – glykol, zkráceně PET-G. [18]

## Specifikace

- Hustota  $\rho$  1 350 kg·m<sup>-3</sup> [18]
- Teplota skelného přechodu  $T_g$  70 - 93 °C [18]
- Teplota tavení  $T_m \approx 220$  °C [18]
- Optimální teplota tisku 210 - 230 °C [19]



## **PA**

Polyamid, zkráceně PA, je semi-krytalický termoplast známý především pod označením Nylon. Jedná se o lehký, pružný a odolný konstrukční polymer, vhodný především pro výrobu funkčních dílů a prototypů. Jedná se o materiál, který se složitěji tiskne a je vhodný pro tiskárny vyšší kategorie. Hlavní nevýhodou polyamidu je jeho velká hygroskopicitá, která má negativní vliv na tisk a povrch materiálu. Další nevýhodou je relativně vysoká teplota tisku a uvolňování jedovatých výparů při tavení. [18]

### Specifikace

- Hustota  $\rho$  1 130 kg·m<sup>-3</sup> [18]
- Teplota skelného přechodu  $T_g$  40 - 52 °C [18]
- Teplota tavení  $T_m$  214 - 272 °C [18]
- Optimální teplota tisku 240 - 280 °C [19]

## **PC**

Polykarbonát, zkráceně PC, je amorfni termoplast, který vyniká velmi vysokou houževnatostí a vysokou tepelnou odolností. Jednou z jeho dobrých vlastností je optická transparentnost. Polykarbonát je jako polyamid hygroskopický a řadí se do kategorie náročnějších materiálů k tisku. Pro jeho vysokou tepelnou odolnost je zapotřebí vyšší teploty vyhřívání podložky. [18]

### Specifikace

- Hustota  $\rho$  1 210 kg·m<sup>-3</sup> [18]
- Teplota skelného přechodu  $T_g$  138 - 163 °C [18]
- Teplota tavení  $T_m$  260 – 270 °C [18]
- Optimální teplota tisku 260 - 320 °C

## **PVA**

Polyvinyl alkohol, zkráceně PVA, je amorfni termoplast vyráběný hydrolyzou polyvinylacetátu a jeho zajímavou vlastností je schopnost rozpouštět se ve vodních roztocích. Tato schopnost závisí na obsahu nezhydrolyzovaného polyvinylacetátu, střední molekulové hmotnosti a teplotě. PVA je rozpustný ve vodních roztocích při teplotách nad 65 °C a více než pětiprocentním obsahu vinylacelátových jednotek. [20]

Proto se ve 3D tisku používá primárně jako podpurný materiál, který lze následně snadno a jednoduše odstranit a požadovaný objekt z jiného materiálu zůstane zachován. Nutností je 3D tiskárna s možností více materiálového tisku. Hlavní nevýhodou PVA je jeho hygroskopicitá, se kterou souvisí náročnější skladování a vyšší pořizovací cena.

## Specifikace

- Hustota  $\rho$  1 190 kg·m<sup>-3</sup> [18]
- Teplota skelného přechodu  $T_g \approx 95$  °C [18]
- Teplota tavení  $T_m \approx 200$  °C [18]
- Optimální teplota tisku 190 - 220 °C

## Kompozitní filamenty

Jedná se o kompozitní materiály využívající termoplastického polymeru jako matrice a dalších materiálů, které tvoří výztuž. Mezi nejpoužívanější polymery tvořící kompozitní filamenty patří PLA, ABS, Polyamid a PET-G, ale v podstatě je možné použít jakýkoliv termoplast používaný pro výrobu filamentu. V této práci jsou pospány pouze vybrané materiály, které se používají jako výztuž kompozitních filamentů. [17]

Jedním z materiálů, který tvoří výztuž je uhlík ve formě velmi krátkých uhlíkových vláken o průměru 5 – 10 mikrometrů, které dodávají výsledné součásti velmi dobré mechanické vlastnosti a elektrickou vodivost. To umožňuje tisk nejen pevných a odolných součástí, ale i nízkonapěťových elektrických součástí. Využití uhlíkem vyztužených filamentů se nachází v letectvím, automobilovém a obraném průmyslu, popřípadě v energetice a robotice. Jednou z nevýhod takto vyztužených filamentů je vysoká tvrdost uhlíkových vláken, která abrazivním způsobem opotřebovává vnitřní část trysky, a tak klade vyšší nároky na její kvalitu. [21]

Dalšími materiály vyztužující filament jsou kovové prášky. Používají se nejčastěji prášky ocelové, nebo prášky z neželezných kovů a to hliníku, mědi, bronzu a mosazi. Jedním z využití těchto kompozitních materiálů je tvorba pevných, odolných a funkční součástí vhodných pro prototypování. Ocelovým práškem vyztužené filamenty umožňují tisk elektricky vodivých součástí a součástí s magnetickými vlastnostmi. Výhodou kovem vyztužených filamentů je jejich kovový vzhled, vhodný především pro dekorativní účely. Obdobně jako u uhlíkem vyztužených filamentů vyžadují kovem vyztužené filamenty tvrzené trysky. [22]

Jako výztuž filamentu se také používá vápencového, nebo křídového prášku, který vytisknutým součastem dodává kamenný vzhled. Tyto materiály nejsou příliš pevné a jsou relativně křehké. Jedním z možných využití těchto kompozitních filamentů jsou dekorativní a umělecké účely.

Posledním druhem výztuže filamentů jsou dřevěné prášky, které dávají materiálu dřevu podobný vzhled. Vhodným použitím těchto filamentů jsou dekorativní účely a součásti imitující skutečné dřevo. Při tavení filamentu dochází k pálení dřevěných částic, a proto mají součásti vzhled tmavších odstínů dřeva. Hlavní nevýhodou těchto filamentů je nižší pevnost a vyšší křehkost oproti čistému polymeru.

#### 4.4.2 Kovy

Po plastech jsou kovové materiály druhým nejrozšířenějším materiálem používaným k 3D tisku. Jejich výhodou oproti polymerům je jednodušší recyklovatelnost a ekologičnost. Nejčastěji se používají materiály s lepšími mechanickými vlastnostmi, nebo vyšší jakostí, a to většinou pro speciální součásti, různé prototypy, nebo jinak nevyrobitelné součásti. Používají se čisté kovy i slitiny kovů v závislosti na použité metodě 3D tisku. Mezi nejčastěji používané kovové materiály patří slitiny hliníku, nerezové a nástrojové oceli, slitiny titanu, kobalt-chrom slitiny, nikl-chrom slitiny a drahé kovy. Kovové materiály pro 3D tisk jsou ve formě prášků o velikosti zrn 20 až 50 mikrometrů v závislosti na daném materiálu. [10]

3D tisk kovů můžeme rozdělit na dva základní principy. Tisk kompozitních materiálů polymer-kov a čistých kovů nebo slitin.

První princip je takový, kdy je kovový materiál ve formě prášku obsažen v termoplastickém polymeru a tvoří výztuž kompozitního materiálu. V tomto případě se tiskne při teplotách tavení polymeru, který s kovovým práškem vytváří tvar výsledné součásti. Následně je polymer buď tepelně, nebo chemicky odstraněn a částice kovu spojeny jiným kovem pomocí pájení, nebo spečeny ve speciální peci. Takovéto součásti jsou velmi porézní, jelikož došlo k odstranění polymeru. Rozdíl hustot před odstraněním a po odstranění polymeru se pohybuje kolem 7 %, smrštění takovýchto dílů je přibližně 17 %. [22]

Druhý princip spočívá v tavení, nebo spékání kovových prášků pomocí bodového zdroje tepla ve formě laseru, nebo elektronového paprsku v závislosti na dané metodě. Tyto metody jsou stručně popsány v kapitole 4.5.5.

#### 4.4.3 Ostatní

Ostatní materiály, které lze technologií 3D tisku tisknout, nebo bude možné v blízké budoucnosti tisknout, můžeme rozdělit na organické a neorganické.

Do skupiny neorganických materiálů patří dřevěné a pískové příměsi, speciální betonové směsi nebo pískové materiály. [8]

Mezi organický materiál, který lze relativně jednoduše tisknout, patří speciální čokolády a cukrové směsi, které se využívají v cukrářském průmyslu. Další a významnější organické materiály jsou v oblasti medicíny. Patří sem především kmenové buňky, hydrogel, kolagen a další. Pomocí těchto materiálů bude pravděpodobně možné tisknout náhradní orgány, kloubní chrupavky, kůži apod.[23], [4]

## 4.5 Metody technologie 3D tisku

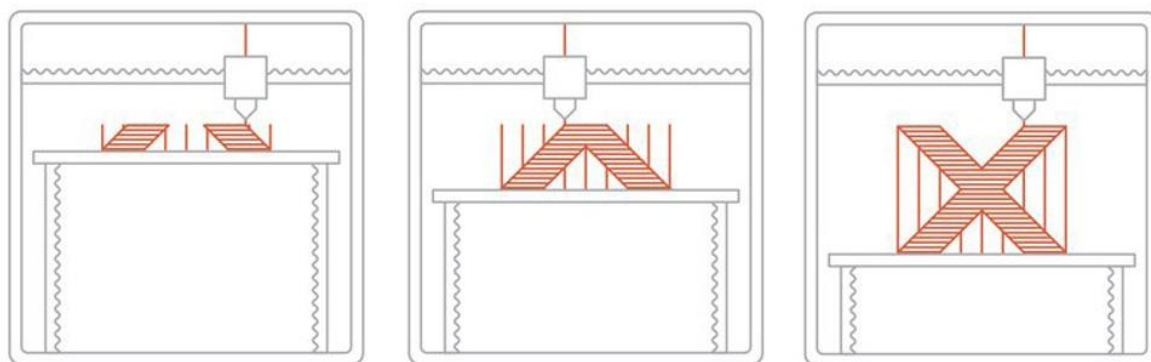
Technologii 3D tisku můžeme obecně rozdělit podle několika základních principů fungování. Existuje mnoho pojmenování, která popisují stejný, nebo podobný princip. Důvodem jsou práva a patenty jednotlivých výrobců a majitelů patentů. Norma ISO/ASTM 52900:2015 (E) definuje sedm základních kategorií aditivní výroby, které jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách. [24]

### 4.5.1 Material Extrusion FDM/FFF

Vytlačování materiálu, z anglického názvu Material Extrusion, je v současnosti pravděpodobně nejrozšířenější a nejlevnější metodou 3D tisku na světě. Tato metoda, označovaná pod názvem Fused Deposition Modeling (FDM), byla patentována v roce 1989 a v roce 2009 tento patent vypršel. Zkratka FDM je registrovanou ochranou známkou, a proto je veřejností tato metoda spíše označována názvem Fused Filament Fabrication (FFF). Tato metoda pracuje s termoplastickými polymery. Mezi nejrozšířenější termoplasty, které jsou touto technologií využívány patří PLA, ABS, ASA, PET, PA a PC. [4]

Materiál ve formě drátu, nazývaný filament, je skrz extrudér mechanicky tlačěn do vyhřívané trysky. Tam se ohřívá nad jeho teplotu tavení a je skrz výchozí otvor trysky se specifickým průměrem vytlačován do tiskového prostoru, kde je nanášen v tenkých vrstvách na tiskovou podložku, kde chladne a tuhne. Tisková hlava, která obsahuje trysku, se pohybuje v tiskovém prostoru, nejčastěji po jedné nebo dvou osách (X, Y), podle dané konstrukce tiskárny, dokud nedokončí tisk dané vrstvy. Po dokončení dané vrstvy se tisková hlava nebo podložka posune vertikálně po ose Z o výšku jedné vrstvy a začne tisk další vrstvy. Nová vrstva je nanášena přímo na vrstvu předchozí. Po dokončení tiskového procesu je výsledný objekt vyjmut z tiskové podložky a v případě použití podpór jsou podpory odstraněny mechanicky, nebo namočením do speciálního roztoku, kde se během krátkého času rozpustí. Přesnost a kvalita tisku je závislá na průměru trysky, rychlosti vytlačovaného materiálu, výšce jednotlivých vrstev a vhodné orientaci objektu. [25], [10]

Obrázek 2 Princip metody Material Extrusion



Zdroj: [26]

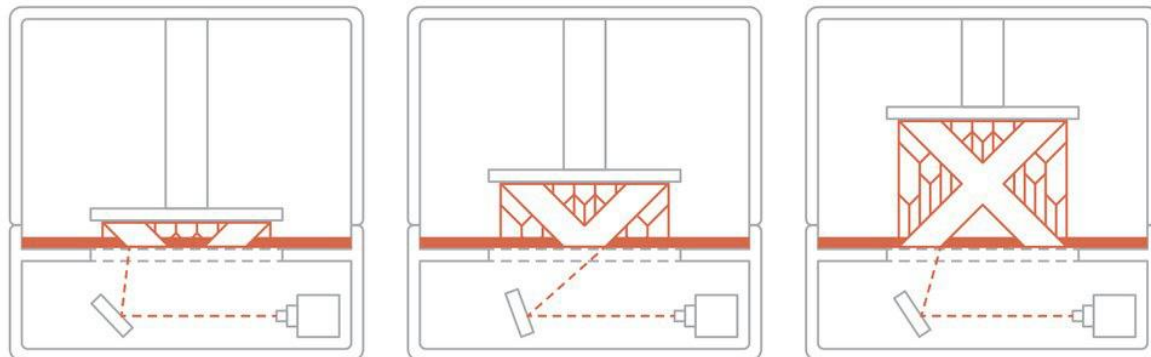
#### 4.5.2 Vat Polymerization SLA, DLP

Je proces, kdy foto-polymerní pryskyřice obsažená v nádržce je selektivně vytvrzována světelným zdrojem. Mezi hlavní metody této technologie patří Stereolithografie (SLA) a Digital Light Processing (DLP). Základním rozdílem mezi těmito metodami je zdroj světla, kterým je pryskyřice vytvrzována. SLA tiskárny používají jako zdroj světla laserový paprsek, DLP tiskárny používají DLP projektor.[25], [10]

Stereolithography Apparatus, zkráceně SLA, je nejstarší metodou 3D tisku vynalezenou Chuckem Hullem v roce 1986, kdy byla tato technologie patentována a založena společnost 3D Systems. SLA tiskárny využívají zrcadla v rovině XY, čímž dokáží velmi rychle a přesně zaměřit laserový paprsek v nádržce s pryskyřicí a vytvrdit průřez daného objektu. Jakmile je daná vrstva vytvrzena tisková podložka se posune svisle po ose Z o výšku jedné vrstvy a začne vytvrzování vrstvy nové. Hlavní nevýhodou této technologie je nutnost zaměření laserového paprsku na každý bod daného průřezu, což je časově náročnější než DLP technologie.[1]

DLP metoda se od metody SLA liší tím, že celkový průřez dané vrstvy objektu je promítán najednou a tím je celý proces urychlen. Zdrojem světla je digitální DLP projektor složený z jednotlivých pixelů. Na rozlišení obrazovky závisí kvalita tisku, čím větší rozlišení, tím vyšší kvalita tisku. [4]

Obrázek 3 Princip metody Vat Polymerization



Zdroj: [26]

#### 4.5.3 Powder Bed Fusion SLS, DLMS, SLM, EBM

Powder Bed Fusion je metoda 3D tisku, kdy dochází ke spékání termoplastického polymeru, nebo kovů ve formě prášku pomocí zdroje tepla, kterým je laser nebo elektronový paprsek. [25]

Selektivní laserové spékání, anglicky Selective Laser Sintering (SLS), je metoda pracující s termoplastickými materiály. Ze zásobníku s polymerovým práškem, který je zahřátý pod jeho teplotu tavení, je pomocí speciální čepele na tiskovou podložku nanášena tenká vrstva prášku. Pomocí laseru, nejčastěji CO<sub>2</sub>, je selektivně spékán prášek do tvaru průřezu požadovaného objektu. Podobně jako u metody SLA musí laserový paprsek ozářit jednotlivě body průřezu. Když

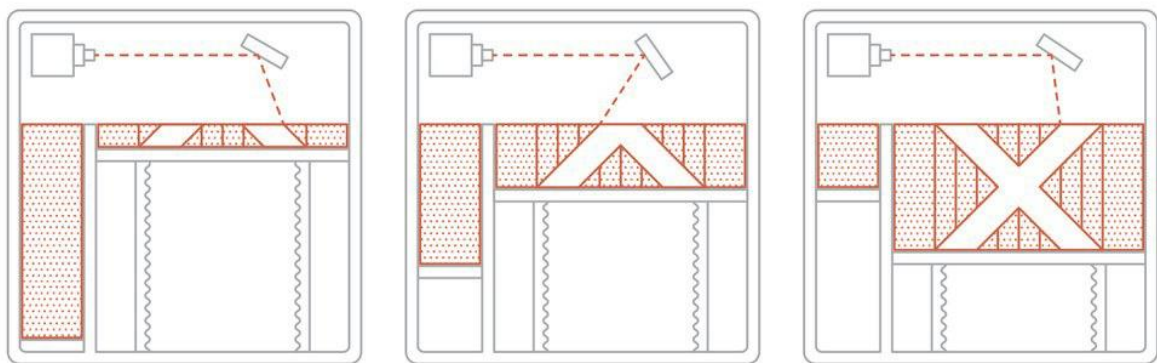
je dané vrstva hotová, tisková podložka se posune vertikálním směrem po ose Z o výšku jedné vrstvy. Na dokončenou vrstvu je opět stejným způsobem nanesen prášek a celý proces se opakuje, dokud není vytvořený požadovaný objekt. Nepoužitý prášek je z tiskového prostoru odstraněn, nejčastěji vysátím a recyklován pro další použití. Nejpoužívanějším materiálem touto metodou jsou polyamidy a jeho směsi. [4]

Metody Direct Laser Metal Sintering (DLMS), Selective Laser Melting (SLM) a Electron Beam Melting (EBM) jsou obdoby metody SLS, ale místo polymerního prášku pracují s kovovými prášky. Dalším rozdílem oproti metodě SLS je u těchto metod nutnost vytvářet podpůrné konstrukce zabraňující zhroucení součásti. Součásti vytvořené těmito metodami jsou pevně připravené k podložce a musí se mechanicky oddělit. Velmi často vyžadují po jejich dokončení tepelnou úpravu, nejčastěji žíhání, které zabrání deformacím, které by mohly vzniknout vlivem vnitřního pnutí. [25]

Metody DLMS a SLM používají jako zdroj tepla laserový paprsek. Rozdílem mezi těmito metodami je použitá teplota spékání. Metoda DLMS pracuje s teplotou, kdy nedochází k tavení prášku, ale ke spojování částic na molekulární úrovni, oproti metodě SLM, kde je kovový prášek taven a vznikají homogenní součásti. Hlavním rozdílem je tedy použitý kovový materiál. Metoda DLMS umožňuje tisk z kovových směsí a metoda SLM pouze tisk z jednoho kovového materiálu. [25]

Metoda EBM využívá jako zdroj tepla elektronový paprsek, který má vyšší hustotu energie a tím je umožněna vyšší rychlost tisku. Nevýhodou oproti DLMS a SLM jsou vyšší nároky na práškové materiály, jejich elektrická vodivost a nutnost pracovat ve vakuu nebo ochranné atmosféře. [25]

Obrázek 4 Princip metody Powder Bed Fusion



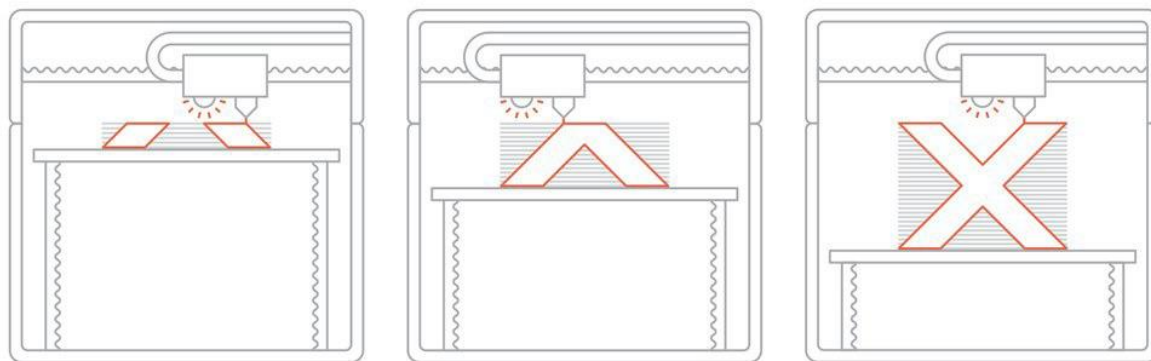
Zdroj: [26]

#### 4.5.4 Material Jetting MJ, DOD

Material Jetting je další metodu 3D tisku, využívající foto-polymerní pryskyřice. Pomocí speciální tiskové hlavy, která umožňuje vytlačování stovky malých kapek polymeru, je na tiskovou podložku v místech průřezu modelu nanášena tenká vrstva foto-polymerní pryskyřice, která je hned po jejím nanesení ozářena světelným UV zdrojem, který ji vytvrdí. Jakmile je vrstva hotová, tisková podložka se posune vertikálním směrem po ose Z o výšku jedné vrstvy a proces se opakuje, dokud není model hotový. Počet otvorů na tiskové hlavě, kterými je vytlačován tiskový materiál, určuje přesnost a kvalitu tisku. Výhodou této technologie je možnost vytváření více objektů na pracovní desce v rámci jediného pohybu tiskové hlavy. Což zvyšuje rychlost výroby. Tato metoda umožňuje jednoduchým způsobem více materiálový tisk. [25]

Metoda Drop on Demand (DOD) je typ 3D tisku, který využívá zároveň dvojici materiálů. Jedním z nich je voskový materiál, který slouží jako výsledný materiál součásti. Druhý materiál je podpurný a po dokončení tisku snadno odstranitelný. Nejčastější využití této technologie je tvorba formových jader z voskového materiálu. [25]

Obrázek 5 Princip metody Material Jetting



Zdroj: [26]

#### 4.5.5 Binder Jetting SBJ, MBJ

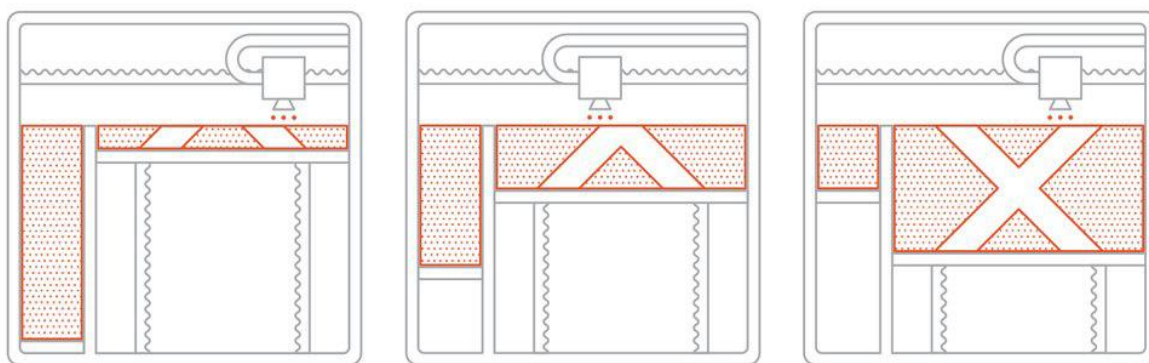
Binder Jetting je dalším typem 3D tisku, kdy je pomocí speciálního kapalného pojiva selektivně spojován práškový materiál na tiskové podložce. Postup je velmi podobný technologii Powder Bed Fusion, jediný rozdíl je v principu spojování prášku. [25]

Sandstone Binder Jetting je metoda, pracující s prášky z pískovce nebo sádry. Z práškového zásobníku je pomocí speciální čepele na tiskovou podložku nanášena tenká vrstva prášku. Následně tisková hlava nanese na práškovou vrstvu v místech průřezu součásti speciální kapalně pojivo formou drobných kapek o velikosti 80 mikrometrů. Tyto kapky spojí práškový materiál. Jakmile je daná vrstva hotová, tak se tisková podložka vertikálně posune po ose Z o výšku jedné vrstvy a proces se opakuje, dokud není vytvořena celá součást. Následně je model po nějaký čas zanechán v prášku, aby bylo zajištěno správné spojení materiálu. Pak je model vyndán a přebytečný prášek odstraněn. Metoda SBJ je vhodná pro tvorbu pískových forem a jader ve

slévárenském průmyslu. Oproti jiným metodám umožňuje tvorbu velkých a geometricky komplexních tvarů za relativně nízkou cenu. Zavedení této technologie do již existujícího procesu výroby je snadné.

Technologii Binder Jetting lze také použít pro výrobu kovových předmětů, kdy je kovový prášek vázán pomocí polymerního pojiva. Metoda se nazývá Metal Binder Jetting (MBJ) a funguje na stejném principu jako SBJ, ale pro vytvoření funkčních kovových předmětů jsou zapotřebí další sekundární procesy, jako pájení nebo spékání, které dané součásti dají požadovanou pevnost. Náklady a kvalita konečného výrobku závisí na druhu sekundárního procesu. MBJ umožňuje výrobu složitých geometrických tvarů oproti běžným výrobním technologiím.

Obrázek 6 Princip metody Binder Jetting



Zdroj: [26]

#### 4.5.6 Sheet Lamination LOM

Laminated Object Manufacturing, zkráceně LOM, je další metodou 3D tisku, která není tolik známá jako ostatní metody. LOM metoda nejčastěji k tisku používá papír, plasty a zřídka i kovové materiály, které jsou nejčastěji ve formě fólií navinutých na roli. [25]

Princip metody je následující. Přes pracovní podložku je pomocí kladek natažena fólie, následně pomocí laseru, nebo mechanického bříty je do fólie vyřezán průřez součásti jedné vrstvy. Poté se tisková podložka posune vertikálním směrem dolů po ose Z o výšku jedné vrstvy a přes ní je opět natažena nová část fólie. Tisková podložka se opět posune zpět, aby se jednotlivé vrstvy dotýkaly a přes aktuální vrstvu přejede speciální vyhřívaný válec, který aktivuje lepidlo a tím se dané vrstvy spojí. Do nové fólie je opět vyříznutý požadovaný tvar a proces se opakuje, dokud není požadovaná součást hotová. Tato technologie je relativně levná a jednoduchá, přičemž nedochází k chemickým reakcím a vzniku výparů. Není ani nutnost pracovat ve speciálních atmosférách. Přesnost výtisků není srovnatelná s technologiemi SLA a SLS, přičemž samotná přesnost závisí především na daném materiálu a velikosti vrstvy. LOM je vhodný pro tvorbu konstrukčních prototypů jednodušších geometrických tvarů. Tvorba dutých a tenkostěnných objektů touto metodou není vhodná. [4]



Obrázek 7 Princip metody Sheet Lamination



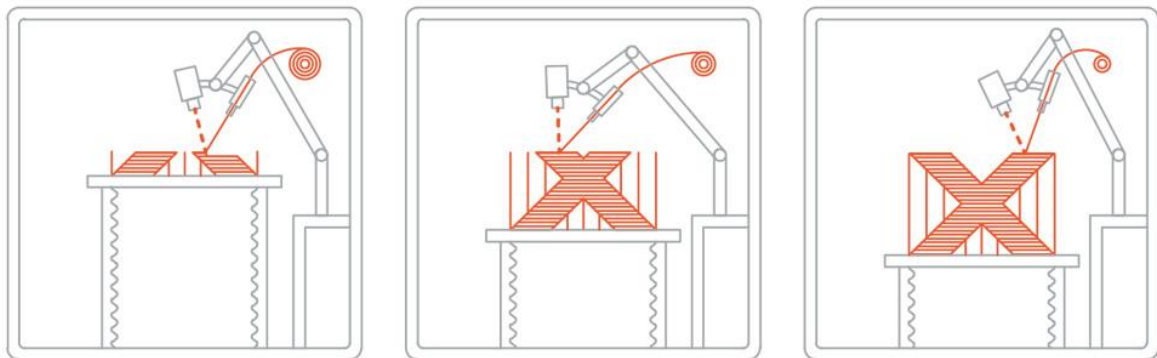
Zdroj: [27] (upraveno)

#### 4.5.7 Direct Energy Deposition LENS, EBAM, LDW

Poslední kategorií je technologie Direct Energy Deposition, která je velmi podobná metodě FDM. Umožňuje tisk kovových, polymerních i keramických materiálů, které jsou ve formě prášků nebo drátů. Výhodou této technologie je možnost tisku nových součástí nebo tisku na již vyrobené součásti za účelem jejich opravy. To zajišťuje především čtyř nebo pěti osé robotické rameno s tavící tryskou na jejím konci, které umožňuje nanášení materiálu z různých směrů a pod různým úhlem. [25]

Metody Laser Engineered Net Shaping (LENS) a Laser Deposition Welding (LDW) používají jako zdroj tepla laserový paprsek. Metoda Electron Beam Additive Manufacturing pracuje s elektronovým paprskem jako zdrojem tepla. Všechny tyto metody vyžadují vakuové nebo argonové pracovní prostředí.

Obrázek 8 Princip metody Direct Energy Depositing



Zdroj: [28] (upraveno)

## 4.6 FDM 3D tiskárny

FDM 3D tiskárny jsou zařízení, která nanášením tenkých vrstvy nataveného termoplastu vrstvu po vrstvě vytvářejí trojrozměrný fyzický objekt z digitálního 3D modelu, nejčastěji vytvořeného v CAD softwaru. FDM 3D tiskárny jsou nejrozšířenějším typem 3D tiskáren díky své relativně jednoduché konstrukci a principu fungování. [10]

S myšlenkou tavení termoplastu a jeho nanášením ve vrstvách do požadovaného tvaru, kde následně polymer zchladl a ztvrdl, přišel S. Scott Crump, když chtěl vytvořit jednodušší cestou hračku žaby pro svoji dceru. Použil pro to tavnou pistoli a stavebním materiál byl polyethylen a svíčkový vosk. Ručním nanášením tenkých vrstev této směsi byl schopný vytvořit požadovanou hračku. Tento způsob výroby ho natolik nadchl, že později tento princip zrychlil a zautomatizoval pomocí NC stroje. V roce 1988 se svojí ženou Lisou Crump představil technologii FDM, kterou o rok později nechal patentovat a spolu se svojí ženou založili společnost Stratasys. [29]

### 4.6.1 Základní části FDM 3D tiskáren

#### Nosný rám

Nosný rám je velmi důležitou součástí každého stroje a zásadně ovlivňuje jeho fungování a kvalitu. U výrobních strojů a zařízení je zásadní tuhost rámu, která má přímý vliv na kvalitu výrobků. Pro rámové konstrukce 3D tiskáren se používá celá řada materiálů podle cenové kategorie tiskárny. Nejlevnější stroje mají rám nejčastěji vyrobený z kombinace profilů z hliníkových slitin, ocelových tyčí, překližkových desek a vytištěných dílů, které způsobují nižší tuhost celé konstrukce. Jednou z výhod takovéto konstrukce, mimo nízké ceny, je schopnost tlumit vibrace vznikající krokovými motory a pohybujícími se součástmi. Vyšší tuhosti dosahují konstrukce vyrobené z plechových výpalků a součástí přesně obrobených na CNC strojích. Nejlepších vlastností dosahují rámy ze svařovaných ocelových profilů, plechových výpalků a přesně obrobených součástí. [30]

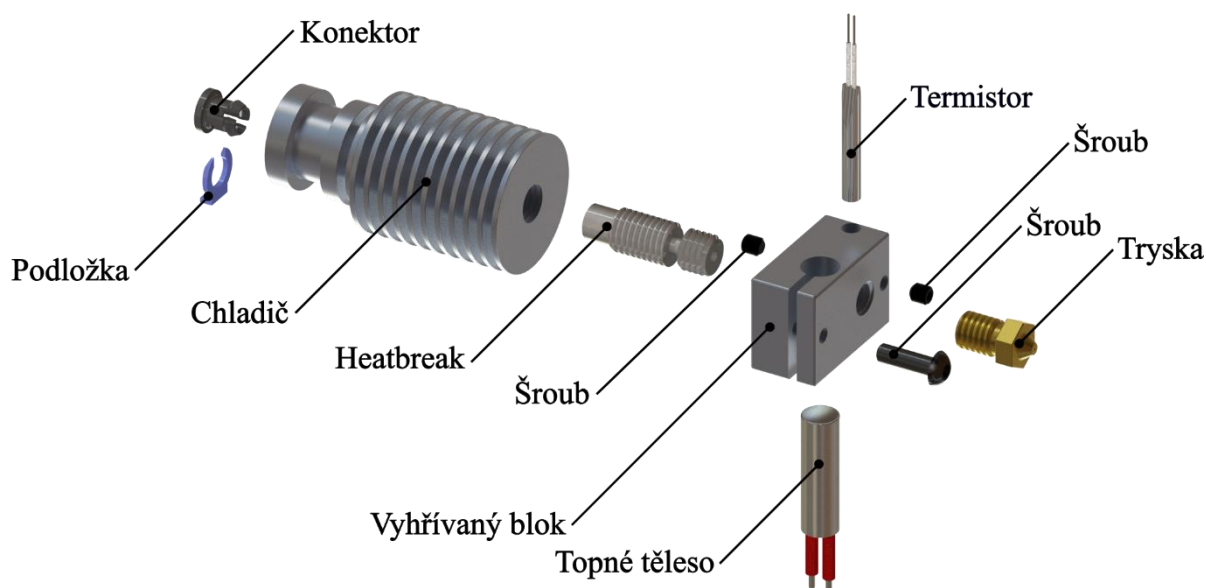
#### Tisková hlava

Tisková hlava je označení pro skupinu součástí pohybujících se v tiskovém prostoru, které přímo, nebo nepřímo ovlivňují tavení a následné nanášení filamentu na tiskovou podložku a jeho následné zchladnutí. Tisková hlava nemá specifický tvar ani součásti, liší se většinou podle konstrukce dané tiskárny. Tisková hlava je nejčastěji tvořena z Hotendu, uložení pro lineární vedení, ventilátorů, koncových spínačů a popřípadě i extrudéru. Existují i tiskárny s univerzální tiskovou hlavou, které během tisku umožňují vyměňovat jednotlivé adaptéry obsahující Hotendy a jejich potřebné příslušenství. Tento systém výměnných adaptérů se nazývá Tool Changer a umožňuje tisk z více druhů materiálů včetně odlišných průměrů trysek podle jednotlivých hotendů.

## HotEnd

Je zařízení, ve kterém dochází k tavení filamentu a jeho přesnému dávkování do tiskového prostoru. Běžně se skládá ze čtyř základních součástí Heatsink, Heatbreak, Heaterblock a Nozle, které jsou zobrazeny na velmi rozšířeném Hotendu E3D V6 (obr. 9). V tabulce 1 jsou vypsané některé fyzikální vlastnosti kovových materiálů běžně užívaných pro výrobu Hotendu. Používané kovy nebo jejich slitiny se liší podle jednotlivých výrobců a kvality výrobku. [30]

Obrázek 9 Rozložená sestava Hotendu V6 od společnosti E3D



Zdroj:[31] (upraveno)

Heatsink, z anglického překladu chladič, je část, která je spojena s extrudérem nebo, v případě nepřímě extruze je do něj přes pneu spojku zavedena teflonová trubička sloužící jako vedení pro filament. Nejčastěji se vyrábí z hliníku, pro jeho dobrý součinitel tepelné vodivosti, a je opatřen žebrováním pro zvýšení účinnosti. Chladič má za úkol co nejvíce ochlazovat filament, aby se zabránilo jeho natavování, než dorazí do trysky. Proto je chladič často ještě dodatečně ochlazován proudícím vzduchem pomocí axiálního ventilátoru nainstalovaného kolmo k ose chladiče. [30]

Další součástí Hotendu je Heatbreak, který spojuje chladič a Heaterblock. Hlavním úkolem Heatbreaku je co největší omezení šíření tepla na chladič, tak aby docházelo k tavení filamentu pouze v trysce. Heatbreak se nejčastěji vyrábí z nerezové oceli, popřípadě z titanu, který má velmi dobré mechanické vlastnosti a nízkou tepelnou vodivost. [30]

Ohřívací blok, z anglického názvu Heaterblock, je součástí Hotendu, který tepelným vedením předává teplo do trysky. Jedná se o kovový blok, který je ohříván tepelným odporem a jeho teplota se reguluje pomocí termistoru. Ten je nejčastěji přimontován k bloku pomocí šroubu.

Poslední částí Hotendu je tryska, ve které se taví filament, který je dále dodáván do tiskového prostoru. Průměr vlákna, které vychází z trysky, je přímo ovlivněno výchozím průměrem trysky

a má přímý vliv na kvalitu, přesnost a vzhled tisku. Výchozí průměr trysek se pohybuje od 0,1 mm do 0,8 mm, ale za univerzální průměr trysky se považuje průměr 0,4 mm, který je dobrým kompromisem mezi rychlostí a přesností tisku. Trysky pro FDM tiskárny jsou nejčastěji vyráběny z mosazi a hliníku, jejich výhodou je dobrá tepelná vodivost a relativně nízká cena mosazi. Běžně se také používají slitiny mědi s niklovým povlakem, který snižuje přilnavost mezi plastem a kovem a mají vyšší tepelnou vodivost než mosaz. Další kategorií jsou trysky z nerezové oceli, které jsou vhodné především pro medicínské účely, jelikož neobsahují olovo. Poslední kategorií jsou trysky vhodné pro kompozitní filamenty, kde dochází k velkému abrazivnímu opotřebením vnitřních ploch trysky. Tyto trysky jsou vyráběné z kalené oceli nebo kombinace materiálů. Více materiálovou trysku tvoří tělo trysky vyrobené z nerezové oceli nebo bronzu a hrot trysky je tvořen nejčastěji ze safíru.

*Tabulka 1 Fyzikální vlastnosti kovových materiálů používaných pro výrobu Hotendu*

Materiál	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Měrná tepelná kapacita $C$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Hustota $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Teplota tavení $T_m$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Měď	394	394	8 930	1 083
Hliník	209	921	2 700	658
Mosaz	112	385	8 400 – 8 700	900
Ocel	47	461	7 850	1 350 – 1 450
Titan	16	560	4 370 – 4 840	1 640 -1 680

*Zdroj: [32], [33]*

## Extrudér

Extrudér je část 3D tiskárny, která zajišťuje dodávání přesného množství materiálu (filamentu) do HotEndu. Existuje velké množství konstrukčních řešení extruderů od komerčních až po domácí konstrukce. Extrudér se obvykle skládá z krokového motoru a podávacího mechanismu, který obsahuje pastorek, kladku, páku a stavěcího šroub. Princip spočívá v posouvání filamentu mezi dvěma protiběžným koly, pastorkem a kladkou. Na otočné páce je umístěna kladka a její poloha a přítlak se nastavuje stavěcím šroubem. Jsou dvě možnosti posuvu filamentu mezi pastorkem a kladkou, jednostranný a oboustranný. V jednostranném posuvu je hnaný pouze pastorek a kladka se odvaluje po filamentu a poskytuje mu podporu. Při oboustranném posuvu má pastorek a kladka na sobě přímé ozubení, a to zajišťuje posuv filamentu z obou stran.

Používají se dva způsoby extruze, přímá a nepřímá. Přímá extruze znamená, že extrudér je součástí tiskové hlavy, nebo je přímo spojen s HotEndem. Výhodou přímé extruze je možnost tisku měkčích i tvrdších materiálů. Hlavní nevýhodou přímé extruze je zvýšení hmotnosti celé

tiskové hlavy, což má vliv na změnu dynamických vlastností tiskové hlavy a zvýšení pevnostních nároků lineárního vedení. [30]

Druhý způsob je nepřímá extruze, kdy je samotný extrudér namontovaný k rámu tiskárny a materiál je do HotEndu dopravován skrz teflonovou trubičku s nízkým součinitelem tření. Výhodou nepřímé extruze je menší hmotnost tiskové hlavy a její lepší dynamické vlastnosti. Nepřímá extruze se také používá při tisku více materiálů současně. [30]

Obrázek 10 Schéma nepřímé (vlevo) a přímé (vpravo) extruze



Zdroj:[34] (upraveno)

## Heated bed

Vyhřívaná podložka, z anglického názvu Heated bed, je část tiskárny, která složí jako základna, na kterou jsou tištěny součásti. Vyhřívání tiskové podložky je z důvodu zamezení rychlého chladnutí součásti, které způsobuje u některých materiálů kroucení a deformace tištěného dílu. Deformace vznikají především na vnějších rozích modelu a na geometriích, kde je velký tvarový rozdíl. Tam nedochází ke stejně rychlému chladnutí a vznikají smršťeniny. Hlavními požadavky na vyhřívané podložky je jejich rovinnost, elektrický výkon a maximální teplota. [30]

Vyhřívané podložky se nejčastěji skládají z nosné platformy, zdroje tepla a speciálních tiskových povrchů.

Nosné platformy se vyrábějí z celé řady materiálů. Jedním z materiálů používaných pro jejich výrobu jsou kovové desky, a především desky hliníkové, které mají velmi dobrý součinitel tepelné vodivosti, ale zároveň mají velkou teplotní roztažnost. Hlavní nevýhodou kovových desek je jejich ohýbání a deformace, jelikož tyto desky mají z výroby v sobě vnitřní pnutí. Opětným zahříváním a chladnutím kovových desek se vnitřní pnutí uvolňuje a způsobuje jejich deformace. Mezi další materiály používané pro výrobu nosných platform patří skleněné a keramické materiály. Ty disponují dobrou rovinností a nízkou teplotní roztažností. Jejich hlavní

nevýhodou je nízký součinitel tepelné vodivosti, který způsobuje zdlouhavé vyhřívání a chladnutí podložky. Další nevýhodou je riziko tvorby prasklin, křehkost a jejich vyšší hmotnost.

Zdrojem tepla vyhřívanych podložek jsou nejčastěji topná tělesa na bázi elektrického odporu. Nosičem topných těles jsou nejčastěji tři typy. Prvním z nich jsou PCB desky, zkratka z anglického názvu Printed Circuit Board, v překladu desky pro plošné spoje. Nevýhodou desek pro plošné spoje je jejich malá rovinnost, a proto se často kombinují s deskami skleněnými. Dalším nosičem topných těles jsou silikonové nalepovací dečky. Ty se nejčastěji používají v kombinaci s hliníkovými deskami pro větší rozměry vyhřívanych podložek. Jejich hlavní nevýhodou je časté nedokonalé spojení s hliníkovou deskou, které se projevuje vzduchovými mezerami tvořícími tepelnou izolaci. Existují vysokoteplotní vyhřívane podložky tvořené silikonovou vrstvou, která je připečena k hliníkové desce. Výhodou těchto desek je dokonalé spojení silikonové a hliníkové vrstvy, bez jakýchkoliv vzduchových bublin. Nevýhodou je jejich vysoká cena. Posledním typem, který je nosičem topných těles jsou samotné hliníkové desky. Topné těleso je ve formě tenké měděné vrstvy o tloušťce 35 mikrometrů z jedné strany součástí hliníkové desky. [35] [36]

Důležitým parametrem vyhřívanych podložek je jejich výkon, který se projeví na maximální teplotě a rychlosti vyhřátí. Elektrický výkon vyhřívanych podložek se nejčastěji pohybuje v řádech stovek Wattů, ale na trhu jsou i vysokoteplotní vyhřívane podložky s výkonem 1100 Wattů, které umožňují její zahřátí na teplotu 250 °C v řádech sekund. [37] [38]

Neméně důležitým faktorem vyhřívanych podložek, který zásadně ovlivňuje kvalitu výtisku, je jejich povrch. Zejména první tisková vrstva je velmi důležitá pro úspěšný a kvalitní tisk. Správná adheze mezi podložkou a tištěnou součástí zajišťuje správné vytvoření první vrstvy a zabraňuje odchlípnutí tištěné součásti od podložky. Dále by také povrch tiskové podložky neměl zabraňovat jednoduchému odstranění vytištěné součásti, aby nedošlo během odstraňování k jejímu poškození. Povrch tiskových podložek je řešen mnoha způsoby. Mezi nejjednodušší a nejlevnější řešení patří různé roztoky a lepidla nanášená na vyhřívanou podložku. Jedná se o ne příliš vhodné řešení, jelikož adheze povrchu není všude stejná a je potřeba před každým tiskem povrch tiskové podložky připravit a po tisku očistit. Dalším řešením jsou speciální polyeterimidové fólie, zkráceně PEI, které se nalepují na vyhřívanou podložku. Pravděpodobně nejlepším řešením je kombinace magnetické vyhřívane podložky, tenkého ocelového plechu a PEI folie. Magnetická podložka je tvořena hliníkovou vyhřívanou deskou s určitým počtem zabudovaných magnetů, které během tisku pevně přidrží tenký ocelový plech s nalepenou PEI folií. Toto řešení umožňuje po dokončení tisku snadné vyjmutí ocelového plechu s vytištěnou součástí od vyhřívane podložky, zároveň vysoká elasticita plechu umožňuje jednoduché odstranění vytištěné součásti od podložky. Hlavní nevýhoda tohoto řešení je vysoká cena.

## Pohybové strojí

Přenos točivého pohybu krokových motorů na lineárně se pohybující součásti je u FDM tiskáren nejčastěji prováděn dvěma způsoby.

Prvním je přenos pohybu pomocí ozubeného řemenu. Nejčastěji se používají ozubené řemeny GT2 (2GT) v různé šířce, méně časté jsou řemeny T5. Výhodou řemenového přenosu je relativně vysoká rychlost pohybu bez vůlí, jeho nízká hmotnost a cena, popřípadě možnost připevnění řemenic přímo na výstupní hřídel krokového motoru. Nevýhodou je natahování řemenu, nutnost napínacího mechanismu a u větších rozměrů tiskáren i příliš velká délka řemene. Ozubené řemeny nejsou vhodné do tiskáren s vyhřívanou tiskovou komorou. Ozubené řemeny GT se nejčastěji vyrábí z polyuretanu, polyamidu a kaučuku. Možností jsou i ozubené řemeny s kordem z oceli nebo skelných vláken, které mají vyšší tuhost a méně se natahují než řemeny bez kordu. Ozubené řemeny s kordem nejsou vhodné pro malé průměry kladek a řemenic, na kterých dochází k lámání kordu. [30]

Druhým způsobem přenosu pohybu jsou pohybové šrouby, nejčastěji trapézové nebo kuličkové. Trapézové šrouby se u FDM tiskáren nejčastěji používají pro polohování po ose Z, kde nedochází k rychlému a velkému posuvu. Posuv během tisku je v rádech desetin milimetrů, které odpovídají výšce tiskové vrstvy. Kuličkové šrouby jsou lepší a přesnější variantou trapézových šroubů a nacházejí se na dražších strojích. Kuličkové šrouby je možné použít i pro polohování os X a Y. Výhodou pohybových šroubů je jejich vyšší přesnost a možnost většího zatížení. Nevýhodou je menší pracovní rychlost, vyšší cena, požadavky na přesnější a větší uložení a průhyb šroubu při jeho větší délce. [30]

## Lineární vedení

Přesný a plynulý pohyb pohybujících se součástí 3D tiskárny zajišťuje lineární vedení. Je řešeno několika způsoby, které se liší především konstrukcí, ale i jejich cenou. Nejrozšířenějším a nejjednodušším typem je kombinace ocelových kalených tyčí s uzavřenými lineárními kuličkovými ložisky. Průměr vodicích tyčí se nejčastěji pohybuje od 8 mm do 12 mm. Výhodou tohoto řešení je nízká cena, jednoduchost montáže. Mezi nevýhody patří průhyb vodicích tyčí a nižší přesnost vedení. Při nedostatečné tvrdosti povrchu tyčí dochází k vytváření drážek na jejich povrchu odvalováním kuliček v ložisku. Alternativou uzavřených lineárních kuličkových ložisek jsou lineární plastová ložiska. Tato ložiska jsou samomazná, lehká a vhodná do prašného prostředí. Nevýhodou je jejich vyšší cena a pro správné fungování montáž s předpětím do přesně obroběných domečků. [30]

Další možností lineárního vedení, které je velmi podobné předchozímu, jsou podepřené vodicí ocelové tyče s kaleným povrchem a otevřená lineární kuličková ložiska. Jedná se o kruhovou tyč ve spodní části podepřenou krátkým krčkem a přírubou pro montáž jdoucí po celé délce tyče. Výhodou tohoto řešení je celkově větší přesnost vedení, vyšší tuhost podepřených tyčí a možnost přenosu většího zatížení. Nevýhodou je vyšší cena a větší hmotnost, proto se toto

řešení hodí pouze pro vedení, které je pevně připevněno k rámu a nevykonává žádný pohyb. [30]

Další variantou lineárního vedení jsou pojezdová kolečka, která jezdí v drážkách speciálních hliníkových profilů, ze kterých je postaven rám tiskárny. Jedná se o nepříliš přesné vedení, které se vyskytuje na nejlevnějších 3D tiskárnách. Pojezdová kolečka obsahují radiální kuličková ložiska pro hladší chod a jsou vyráběna z plastu, nejčastěji polyacelátu, nebo kombinací kovu a plastu. Výhodou je nízká cena, tichý chod a jednoduchost celého vedení, které využívá rám tiskárny jako součást lineárního vedení. Nevýhodou je především nižší přesnost a průběžné opotřebovávání pojezdových koleček. [30]

Posledním a nejlepším řešením lineárního vedení, který se využívá na 3D tiskárnách, jsou přesná kuličková lineární vedení. Tento typ vedení se skládá ze speciální kolejnice, nejčastěji vyráběné z nerezové oceli, a pojezdového vozíku, který obsahuje dvě nebo více řad kuliček, které se při pohybu vozíku po kolejnici odvalují. Tento typ lineárního vedení je velmi přesný, umožňuje vysoké rychlosti vozíku, který je zároveň schopný přenášet velká statická zatížení. Velmi často je tento typ vedení pro jeho vysokou přesnost používán na kvalitních průmyslových NC a CNC strojích. Nevýhodou kuličkového lineárního vedení je jeho velmi vysoká cena a vyšší hlučnost. [30]

## **Pohony**

Pohony FDM 3D tiskáren jsou nejčastěji řešeny krokovými motory bez zpětné vazby. Tiskárny vyšší kategorie využívají krokové motory se zpětnou vazbou, které zabráňují ztrátě kroku. Jsou však mnohem dražší, vyžadují více řídicí elektroniky, složitější software, mají větší rozměry a proto nejsou vhodnou volbou pro stolní 3D tiskárny.

Krokové motory jsou synchronní motory, kde k tvorbě magnetického točivého pole dochází zapínáním jednotlivých cívek statoru, pólových dvojic, které jsou napájeny impulsem stejnosměrného proudu. Počet pólových dvojic určuje počet kroků motoru. Pro ovládání krokových motorů je zapotřebí řídicí elektroniky tzv. driverů, které generují impulzy o určitém sledu a délce. Tvar křivky impulsů určuje, o jaký typ ovládání se jedná. Nejčastěji se používá mikro-krokování, které rozděluje celý krok na menší kroky nejčastěji o velikosti 1/16 nebo 1/32 celého kroku. Mikro-krokování umožňuje plynulejší chod motoru zabráňující vibracím.

Pro polohování pohybujících se součástí a extrudéru hobby a poloprofesionálních 3D tiskáren se nejčastěji používají krokové motory s přírubou NEMA 17, které běžně disponují krokem o velikosti 1,8°, popřípadě 0,9°. Statický točivý moment se pohybuje od 0,12 Nm do 0,65 Nm. Motory s menším točivým momentem a tím pádem i menšími rozměry a hmotností se používají pro pohon extrudéru přímo na tiskové hlavě. Motory s větším točivým momentem se používají pro pohon tiskové hlavy, tiskové podložky a extrudéru s nepřímou extruzí. Tyto krokové motory pracují s maximálním napětím 36 V a maximálním proudem 2 A. Ideální teplota pracovního prostředí je od -10 °C do 50 °C, proto je vhodné, aby krokové motory 3D tiskáren s vyhřívaným tiskovým prostorem byly chlazené nebo odizolované. Krokové motory s přírubou



NEMA 17 mají nejčastěji vývodový hřídel o průměru 5 mm, popřípadě pohybový šroub, který je součástí rotoru. Výhodou těchto krokových motorů je jejich relativně nízká cena, dobrá účinnost a životnost, jelikož k mechanickému kontaktu dochází pouze v ložiscích. Nevýhodou je možnost ztráty kroku, které se dá předejít vhodným dimenzováním a volbou správného driveru.

## **Elektronika**

Řízení každé 3D tiskárny zajišťuje řídicí jednotka, kterých je v dnešní době celá řada. Nejrozšířenější řídicí jednotkou RepRap 3D tiskáren je pravděpodobně kombinace Arduina řady MEGA 2560 a nadstavby RAMPS 1.4 pracující s 8 - bitovými řadiči. Čím dál častěji se však přechází na 32 - bitové verze. [30]

Samotné řízení tiskárny zajišťuje firmware nahraný v řídicí jednotce, který udává např. přesné krokování motorů, maximální teploty Hotendu a Heatbedu, přepočty souřadnic. Mezi open-source firmwary patří např. Marlin, Repetier-firmware, Klipper, Prusa firmware...

Pro napájení celého stroje se nejčastěji používají průmyslové elektrické zdroje o napětí 12 V, nebo 24 V. Výkon použitých zdrojů se liší podle potřeb jednotlivých tiskáren, ale nejčastěji se pohybuje v rozmezí 300 W až 1000 W. Výkon použitého zdroje závisí především na součástech s největším odběrem, mezi které patří krokové motory, vyhřívaná podložka a Hotend. Dostatečný výkon vyhřívané podložky a Hotendu je důležitý především pro rychlost jejich výhřevu a udržení požadované teploty.

## 4.6.2 Rozdělení FDM tiskáren podle konstrukce

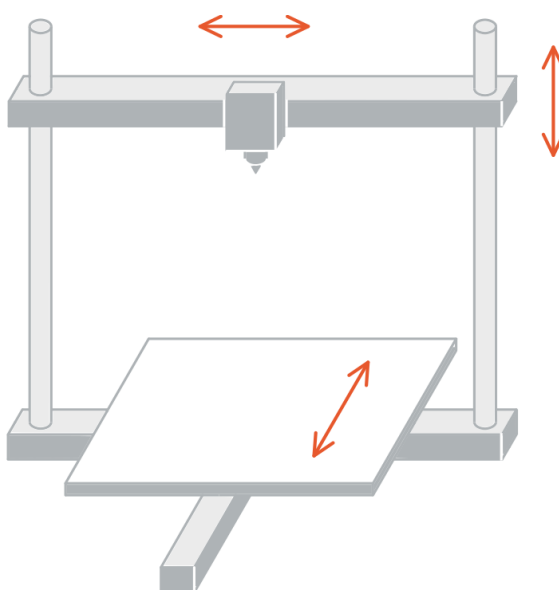
Jedním z možných rozdělení FDM tiskáren je způsob, jakým řídicí jednotka vypočítává pozici tiskové hlavy v tiskovém prostoru a způsob, jakým se tisková hlava, popřípadě tisková podložka pohybují. V této kapitole jsou detailněji popsána čtyři základní konstrukční řešení FDM 3D tiskáren.

### Kartézská

Kartézská konstrukce je nejrozšířenějším a nejjednodušším konstrukčním řešením FDM 3D tiskáren. Svůj název má podle kartézského souřadnicového systému, který tiskárna používá pro výpočet polohy tiskové hlavy a její pohyb v tiskovém prostoru. Jelikož se jedná o pravoúhlý systém, tak pracovní oblast má nejčastěji tvar krychle, nebo kvádra. 3D tiskárny kartézské konstrukce vynikají v tisku vodorovných modelů a umožňují tisk s přímou i nepřímou extruzí. [30]

Nejčastěji se pro pohyb v jedné ose používá jeden krokový motor. Díky své jednoduchosti a nízké výrobní ceně je tento typ konstrukce velmi rozšířený v RepRap komunitě. Velmi rozšířenou konstrukcí jsou tiskárny odvozené od konstrukce Mendel, kde se tisková podložka pohybuje po ose Y a tisková hlava vykonává pohyb v osách X a Z. Tento typ konstrukce je vhodný pro tiskový prostor menších rozměrů. S rozvojem stále sofistikovanějších zařízení se častěji využívá klasického systému kombinovaného s paralelní kinematikou v rovině XY. To umožňuje snížení pojízdných setrvačných hmot díky staticky uloženým motorům. Proto tiskárny s touto konstrukcí umožňují rychlost pohybu tiskové hlavy vyšší než  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a jsou vhodné pro tiskový prostor větších rozměrů. Mezi nejrozšířenější konstrukce patří systémy CoreXY a H-bot, méně rozšířené jsou systémy D-bot a T-bot

Obrázek 11 Schéma kartézské konstrukce

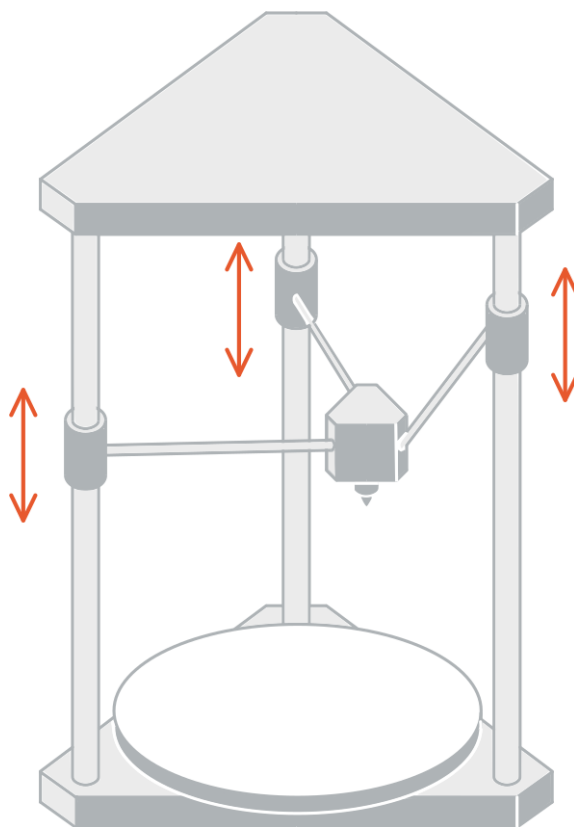


Zdroj: [23] (upraveno)

## Delta

Po kartézské konstrukci jsou Delta tiskárny druhou nejznámější konstrukcí FDM tiskáren se svým typickými třemi pohyblivými rameny. Tisková hlava je zavěšena kloubovým spojem na třech pohyblivých ramenech rozmístěných pod úhlem  $120^\circ$ , které jsou poháněny staticky uloženými motory ve spodní části tiskárny. Uložení pohyblivých ramen umožňuje jejich pohyb pouze vertikálním směrem po ose Z a jejich vzájemným synchronizovaným pohybem se tisková hlava pohybuje v tiskovém prostoru. Výpočet přesné polohy tiskové hlavy je složitější oproti kartézské konstrukci a vyžaduje složitější software. Tisková podložka má většinou kruhový, nebo n-gonový tvar a je statická. Delta tiskárny umožňují rychlejší tisk díky menším setrvačným hmotám tiskové hlavy, a proto se na nich používá nejčastěji nepřímá extruze. Proto nejsou vhodné pro tisk flexibilních materiálů. Hlavní nevýhodou konstrukce delta tiskáren je tzv. „mrtvý“ prostor nad tiskovou hlavou, který má za následek velký rozměr tiskárny v ose Z. Jejich stavba a kalibrace je náročnější oproti tiskárnám kartézské konstrukce. Delta tiskárny jsou vhodné především pro tisk vertikální modelů. [30]

Obrázek 12 Schéma Delta konstrukce

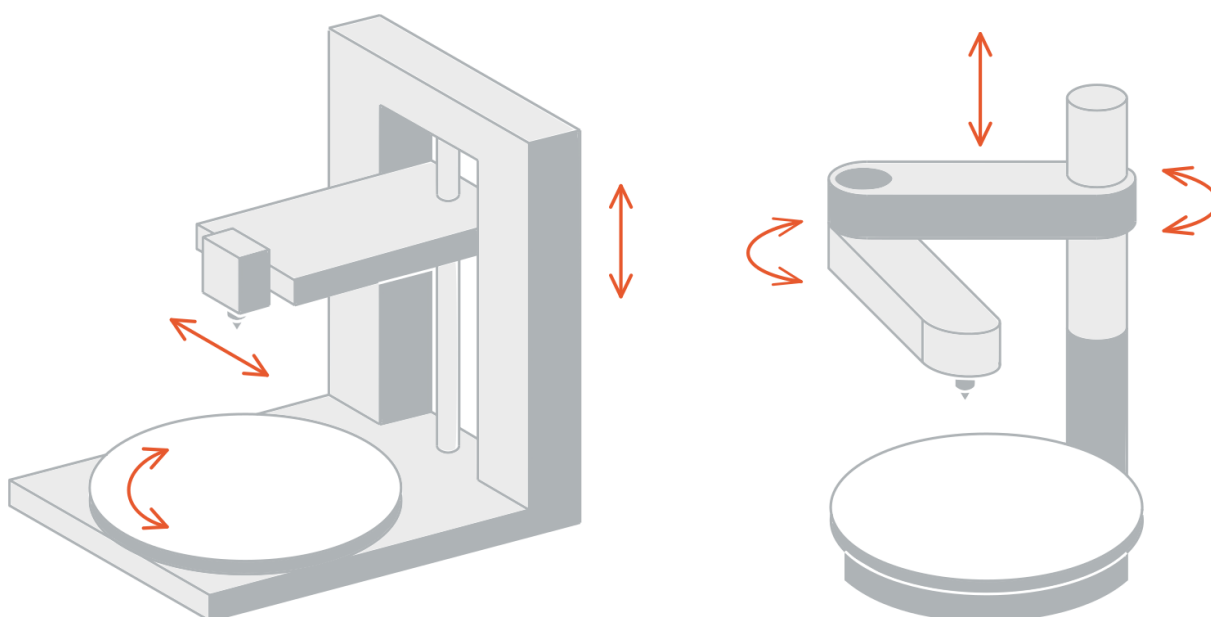


Zdroj: [23] (upraveno)

## Polar

Tiskárny konstrukce Polar používají k vypočtu pozice tiskové hlavy polární souřadnicový systém. Horizontální pozice a pohyb tiskové hlavy v tiskovém prostoru jsou určeny vzdáleností a úhlem od počátku. Tisková hlava nejčastěji provádí lineární pohyb po dvou osách a tisková podložka má kruhový tvar a rotuje kolem svého středu. Jednou z výhod tiskáren konstrukce Polar jsou její relativně malé rozměry a rychlý tisk. Nevýhodou těchto tiskáren je složitější ovládání a menší množství slicer softwarů, které dokáží převádět 3D modely do polárního souřadnicového systému. [30]

Obrázek 13 Schéma konstrukce Polar (vlevo) a konstrukce SCARA (vpravo)



Zdroj:[23] (upraveno)

## SCARA

SCARA konstrukce, z anglického názvu Selective Compliance Assembly Robotic Arm, je robotická paže vynalezená v 80. letech 20. století. Pro stavbu 3D tiskáren však zatím není tato konstrukce příliš rozšířena. První Scara roboty pracovaly pouze v jedné horizontální rovině. Samotná konstrukce se nejčastěji skládá ze dvou ramen, které jsou spolu spojeny čepem. První rameno je spojeno se základnou a na konci druhého ramene se nachází tisková hlava. Polohování vertikálním směrem po ose Z provádí tisková podložka, nebo obě ramena. [30]

### 4.6.3 RepRap

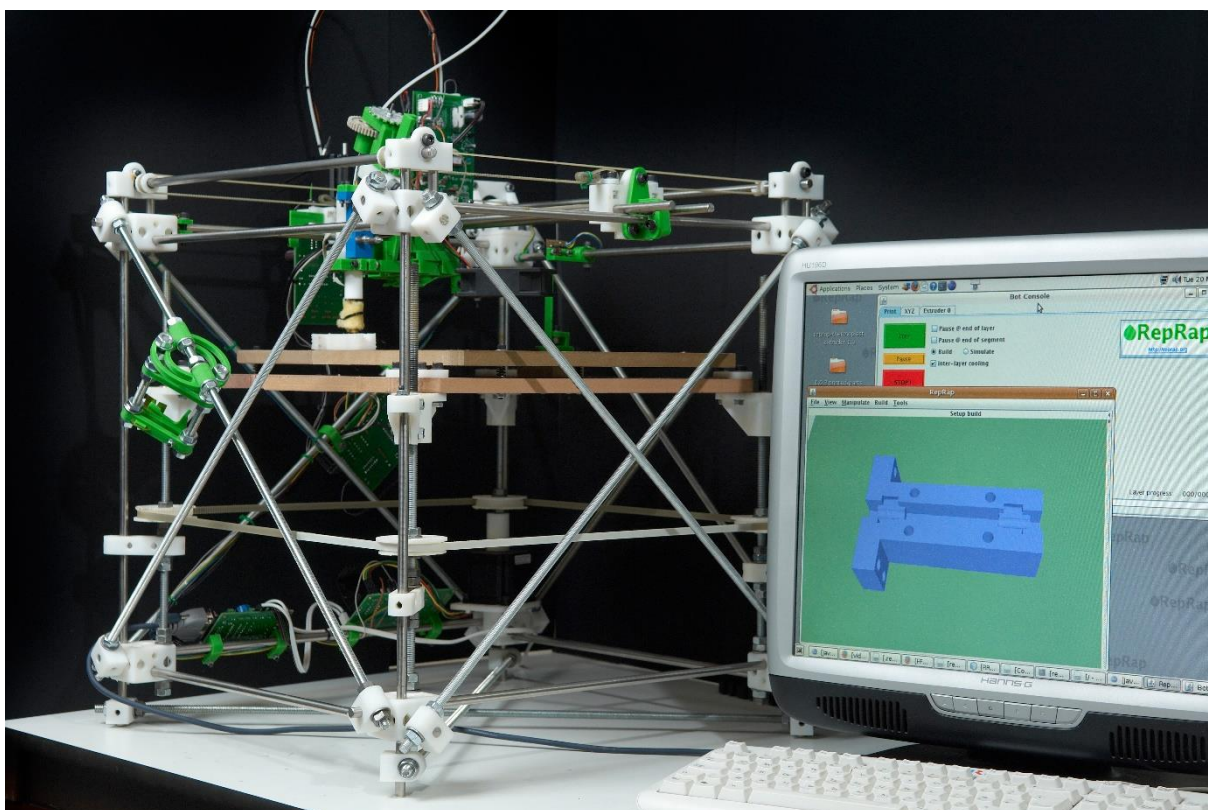
RepRap, zkratka z anglického spojení Replicating Rapid Prototyper, je opensourcový, replikující, rychlý prototypér. Stroj, který využívá technologii FFF k výrobě technických součástí z řady termoplastických polymerů. Projekt RepRap byl navržen tak, aby umožňoval vytisknout většinu dílů své vlastní konstrukce. Zbylé díly by měly být relativně jednoduše dostupné všude po světě. Jelikož se jedná o opensourcové zařízení, kdokoli si může zdarma a volně vytvářet jeho kopie, které může modifikovat podle svých potřeb. Označení RepRap se používá převážně pro oblast 3D tisku, ale v podstatě do této kategorie patří jakýkoliv stroj, který je schopný vytvořit svojí funkční kopii. Avšak myšlenka plně replikujících zařízení je pouze teoretická a v praxi je u takto složitých zařízení nedosažitelná. [39]

Za projektem RepRap stojí Dr. Adrian Bower a Vik Olliver z anglické University of Bath, kteří sestrojili první prototyp RepRap FFF 3D tiskárny v březnu 2007. Ten byl pojmenován Darwin po britském vědci Charlesi Darwinovi, který se zabýval evoluční teorií. Evoluční teorie je důvodem tohoto pojmenování, jelikož RepRap tiskárny v principu vytvářejí své vlastní klony-potomky a tím dochází k evolučnímu procesu. Novější typy RepRap tiskáren jsou pojmenovány po dalších významných vědcích. Druhý typ je pojmenován po Gregorovi Mendelovi a třetí typ, který je menší verzí druhého, je pojmenován po Thomasovi Henry Huxleym. S postupným vývojem technologie 3D tisku a velkým počtem členů RepRap komunity v současnosti existuje velké množství typů RepRap tiskáren.[39]

Základními parametry RepRap FFF 3D tiskáren jsou hlavně nízká cena, jednoduchá dostupnost použitého materiálu a snadná obsluha. Proto byla zvolna technologie FFF, která oproti ostatním technologiím vychází nejlevněji a nejjednodušeji. A to především díky absenci laseru, popřípadě elektronového paprsku, který je potřebný u většiny ostatních technologií. RepRap tiskárny mají nejčastěji kartézský typ konstrukce, pro jeho jednoduchost a snadnou stavbu.

První RepRap tiskárna Darwin byla kartézské konstrukce, kde nosný rám byl tvořen závitovými tyčemi M8 spojenými ve vytištěných domcích a zajištěn spojovacím materiálem. Prvním polymerovým materiálem pro stavbu byl použit polykaprolakton (PCL) díky svému nízkému bodu tavení (60 °C), který se však nakonec ukázal jako nevhodný. Proto se přešlo na ABS, které má lepší mechanické vlastnosti a je velmi rozšířeným polymerem. Paralelně s použitím ABS se zkoušel PLA polymer, a to hlavně kvůli svému biologickému původu a biologické rozložitelnosti. Tiskárna Darwin byla napájena 12 V zdrojem. Zvolené napětí je dostačující pro pohyb krokových motorů a tavení filamentu, zároveň umožňuje tiskárně být napájena z průmyslového zdroje nebo 12 V akumulátoru. Pro filament byly použity struny o průměru 3 mm, které se běžně používají pro svařování polymerů. Pohyb jednotlivých částí zajišťovaly krokové motory a pro přenos pohybu byly použity ozubené řemeny a pohybový šroub. [39]

Obrázek 14 První exemplář RepRap FDM 3D tiskárny Darwin



Zdroj: [40]

#### 4.6.4 Komerční FDM 3D tiskárny

Na trhu se v dnešní době vyskytuje velké množství komerčních FDM 3D tiskáren ve velmi širokém cenovém rozpětí. Od nejlevnějších produktů z východního trhu v řádech tisíců korun, až po profesionální stroje v řádech statisíců korun. Výslednou cenu určují hlavně kvalita a konstrukce jednotlivých komponent.

Mezi nejlevnější FDM 3D tiskárny patří RepRap produkty, které jsou vyrobeny z jednoduše dostupných materiálů. Pro nosnou konstrukci jsou použity levné materiály jako jsou systémové profily z hliníkových slitin, ocelové závitové tyče, desky z dřevěné překližky a stále častěji hliníkové výpalky. Velká část funkčních dílů je tištěna a celá tiskárna je ve formě stavebnice, kterou si zákazník sám sestaví. Takovýto přístup ke stavbě 3D tiskárny se projeví její nižší cenou, ale delším časem potřebným k její stavbě a zprovoznění. Do této kategorie patří např. Prusa i3 MK3 (obr. 15) od české společnosti Prusa Research s.r.o. vycházející z RepRap konstrukce Mendel. Jedná se o velmi populární tiskárnu ve své kategorii, pravděpodobně nejlepší volba v poměru cena/výkon.

Obrázek 15 FDM 3D tiskárna Prusa i3 MK3



Zdroj: [41]

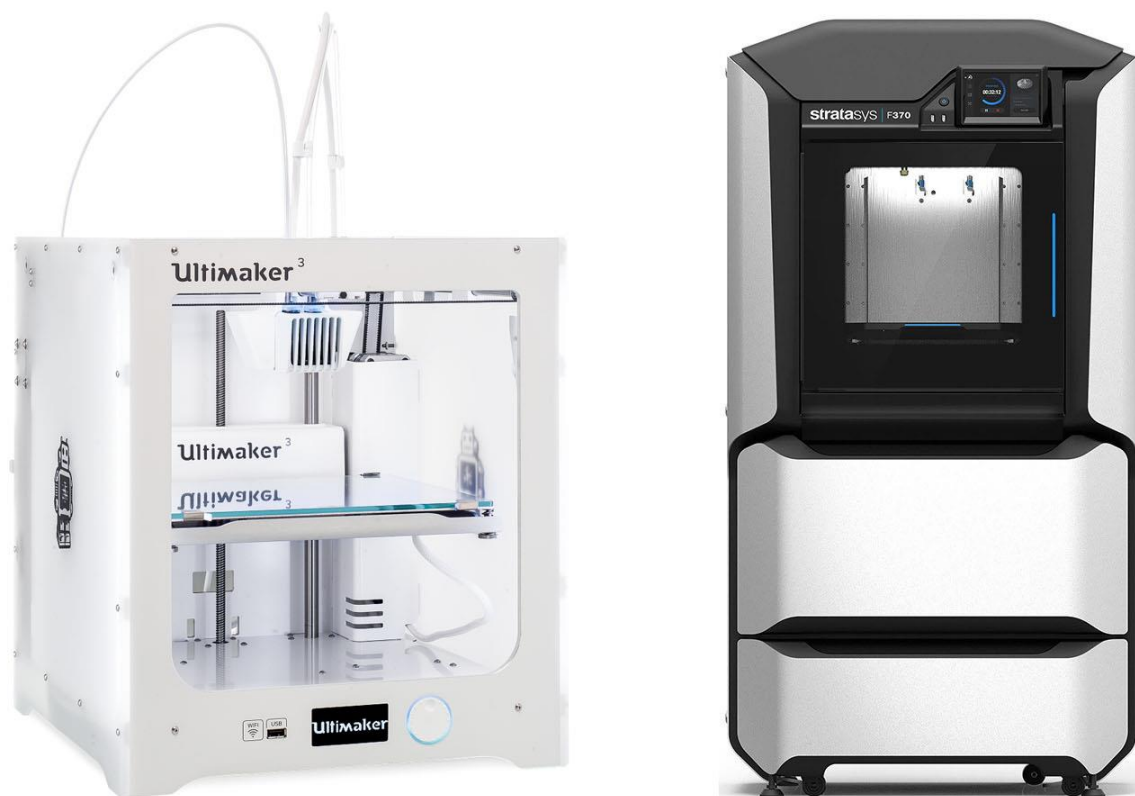
Tiskárny střední kategorie se vyznačují hlavně propracovanější a tužší konstrukcí, kvalitnějšími materiály součástí, lepším lineárním vedením a přesně obroběnými součástmi na CNC strojích. Nosná konstrukce bývá nejčastěji z ocelových, nebo hliníkových plechů, popřípadě překližkových nebo akrylátových desek, které zajišťují vyšší tuhost celé konstrukce. Takovéto řešení umožňuje relativně jednoduchou velkosériovou výrobu a přesnou montáž jednotlivých součástí. Na tiskárny této kategorie je už velmi často kladen důraz na design a bezpečí, což se projevuje vhodným zakrytím celé konstrukce. Do této kategorie patří např. Ultimaker 3 (obr. 16 vlevo).

Poslední kategorií jsou profesionální průmyslové FDM 3D tiskárny. Nosné konstrukce se vyrábějí z hliníkových, nebo ocelových plechů a profilů. Bývají nejčastěji šroubované, nebo svařované a zakrytované plastovým opláštěním. Toto řešení umožňuje nejvyšší možnou tuhost konstrukce. Přesná kuličková lineární vedení s kuličkovými pohybovými šrouby a krokovými motory se zpětnou vazbou dávají pohybujícím se součástím těchto strojů vynikající dynamické vlastnosti.

Profesionální průmyslové FDM 3D tiskárny se od předchozích hobby a poloprofesionálních tiskáren liší uzavřenou a vyhřívanou komorou, která umožňuje udržovat nastavenou teplotu v pracovním prostoru.

Dalším rozdílem jsou možnosti tiskového materiálu, kdy předchozí kategorie umožňují tisk více druhů termoplastických filamentů oproti profesionálním tiskárnám, které jsou většinou omezeny jen na tisk materiálu jednoho nebo menšího množství materiálů. Do kategorie profesionálních FDM 3D tiskáren patří např. Stratasys F370 (obr. 16 vpravo).

Obrázek 16 FDM 3D tiskárna Ultimaker 3 (vlevo) a Stratasys F370 (vpravo)



Zdroj: [42], [43]

#### 4.6.5 Software

V této kapitole jsou stručně popsána vstupní data a potřebný software k jejich zpracování a přípravě před samotným tiskem.

##### 3D soubor

Pro tisk požadované součásti je potřebný její digitální 3D model, který je možné získat několika způsoby. Prvním je možnost vytvoření digitálního 3D modelu za pomoci CAD softwarů. Druhým způsobem je možnost využití 3D skenerů a fyzický objekt oskenovat. Podporované jsou pouze modely objemové a plošné, nikoliv modely drátové. Připravený digitální model je nutné exportovat do podporovaného formátu. Tím je nejčastěji formát STL, jedná se o zkratku z anglického názvu Stereolithography, který byl vyvinut firmou 3D Systems a je nejpoužívanějším formátem pro práci s 3D tiskárnami. STL je neutrální formát popisující geometrii digitálních 3D modelů pomocí sítě tvořené nejčastěji trojúhelníky spojenými společnými vrcholy. Ideálně trojúhelníky se potkávají ve 2 rozích a jejich normály směřují ven z objemu tělesa. Exportováním modelu do formátu STL se zachovává pouze geometrie objektu, vlastnosti jako barva, textury, materiál a další vlastnosti nejsou zachovány. Druhým stále více se rozšiřujícím formátem je 3MF, zkratka z 3D Manufacturing Format, který je novějším a optimálnějším formátem než STL. Formát 3MF má menší velikost a obsahuje více informací o modelu. [2], [44]



Při převádění oblých ploch na plochy tvořené polygony dochází ke zjednodušení výsledné geometrie oproti původní. Velikost vzniklých odchylek, je závislá na míře zjednodušení, tedy na počtu výsledných polygonů. Počet vytvořených polygonů, který můžeme před exportováním nastavit, ve výsledku ovlivňuje velikost exportovaného souboru. [2]

## Slicer

Slicery jsou softwary které podle určitých parametrů rozřezou exportovaný 3D model na tenké horizontální vrstvy, odtud z angličtiny název Slicer. Vstupními daty Slicerů jsou nejčastěji soubory ve formátu STL.

Samotnou přípravu, před rozřezáním 3D modelu pomocí Sliceru, je jeho ideální umístění a orientace na virtuální podložce. To je velmi důležitý krok, který vyžaduje základní schopnosti prostorové představivosti a technického myšlení a má přímý vliv na kvalitu výtisku. Nevhodné umístění může způsobit vznik špatně tisknutelných geometrií a přebytečných podpůrných konstrukcí. Dále také zvýšením počtu vrstev přibude i množství posunu v ose Z a více pohybů tiskové hlavy, což se projeví navýšením času potřebného k tisku.

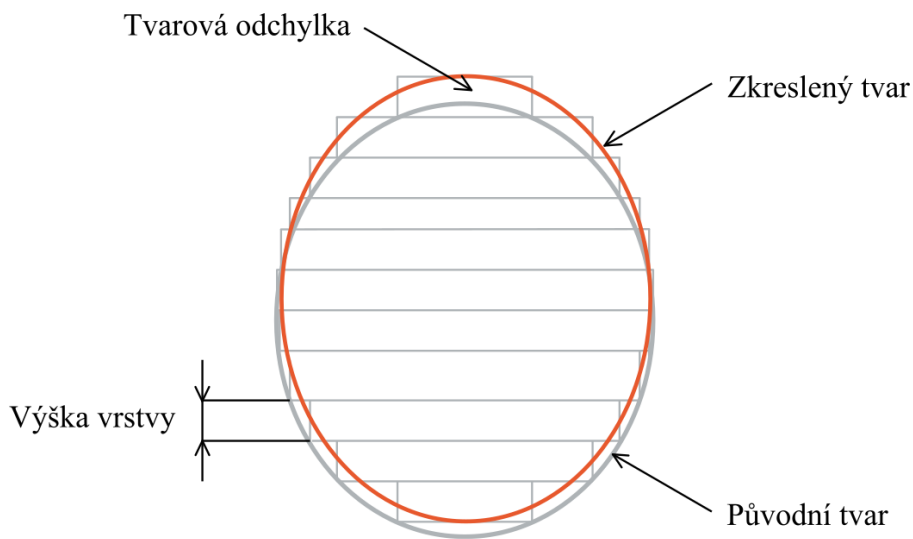
Mezi obtížně tisknutelné geometrie patří otvory a klenby, vyžadující podpůrné konstrukce, které zabraňují jejich hroucení během tisku. Negativní vlastností otvorů, kleneb a oblých ploch je deformace jejich skutečného tvaru, zapříčiněná rozdělením oblých tvarů na vrstvy o určité výšce. Tento negativní jev se nazývá „stair stepping“. Rozdíl mezi teoretickým a deformovaným tvarem je přímo závislý na výšce jednotlivých vrstev. Schéma tohoto jevu je zobrazeno na obr. 17. [2]

Slicer softwary umožňují celou řadu doplňujících funkcí, které zlepšují vlastnosti modelu, nebo průběh samotného tisku. Jednou z těchto funkcí, je tvorba podpůrných konstrukcí, které software automaticky vypočítá a vygeneruje. Další funkcí je možnost nahrazení plného objemu daného modelu odlehčenou výplní podle určitých pravidel. To znamená vyplnění vnitřního objemu modelu s méně než 100 % vyplněním. Je možné nastavit hustotu, velikost, tvar a procento výplně. Výhodou této funkce je především úspora použitého materiálu při dosažení stejných, nebo podobných vlastností jako se 100 % výplní. Ta se projeví výrazným snížením tiskového času. Mezi další doplňkové funkce patří např. příprava první vrstvy tisku apod.

Posledním krokem při použití Slicer softwaru je vygenerování G-kódu, podle něhož tiskárna bude schopná daný 3D objekt vytisknout. Jedná se o souhrn pokynů a informací, jak má tiskárna během tisku postupovat. Vygenerovaný G-kód je možné poslat do tiskárny, nebo ho zkopírovat na přenosné médium a následně nahrát do 3D tiskárny.

V dnešní době existuje celá řada Slicer programů, některé jsou open-source s free licencí, jiné jsou placené. Některé modernější verze CAD softwarů mají v sobě již zabudovaný slicer a umožňují vytvoření G-kódu přímo, bez nutnosti dalších mezikroků. Mezi nejznámější volně použitelné Slicery patří Slic3r, Cura, Prusaslicer a další. Komerční FDM 3D tiskárny jsou běžně dodávány s vlastním Slicer softwarem.

Obrázek 17 Schéma jevu „stair stepping“



Zdroj: [2] (upraveno)

## G-kód

Jedná se o označení programovacího jazyka, vytvořeného v 50. letech 20. století, který slouží k řízení NC a CNC strojů. I když je G-kód standardizován, tak mnozí výrobci vytvářejí vlastní upravené kódy podle specifických potřeb. Je to soubor po sobě jdoucích příkazů, označených podle písmen abecedy, které říkají stroji, co a jakým způsobem má provést. V oblasti 3D tisku jsou nejčastěji používány příkazy G a M. G-kódy popisují nejen pohyb tiskové hlavy uvnitř tiskového prostoru, ale i další parametry tisku. Mezi ně patří teplota trysky a vyhřívané podložky, objem a rychlost extrudovaného materiálu, chlazení výtisku a další.

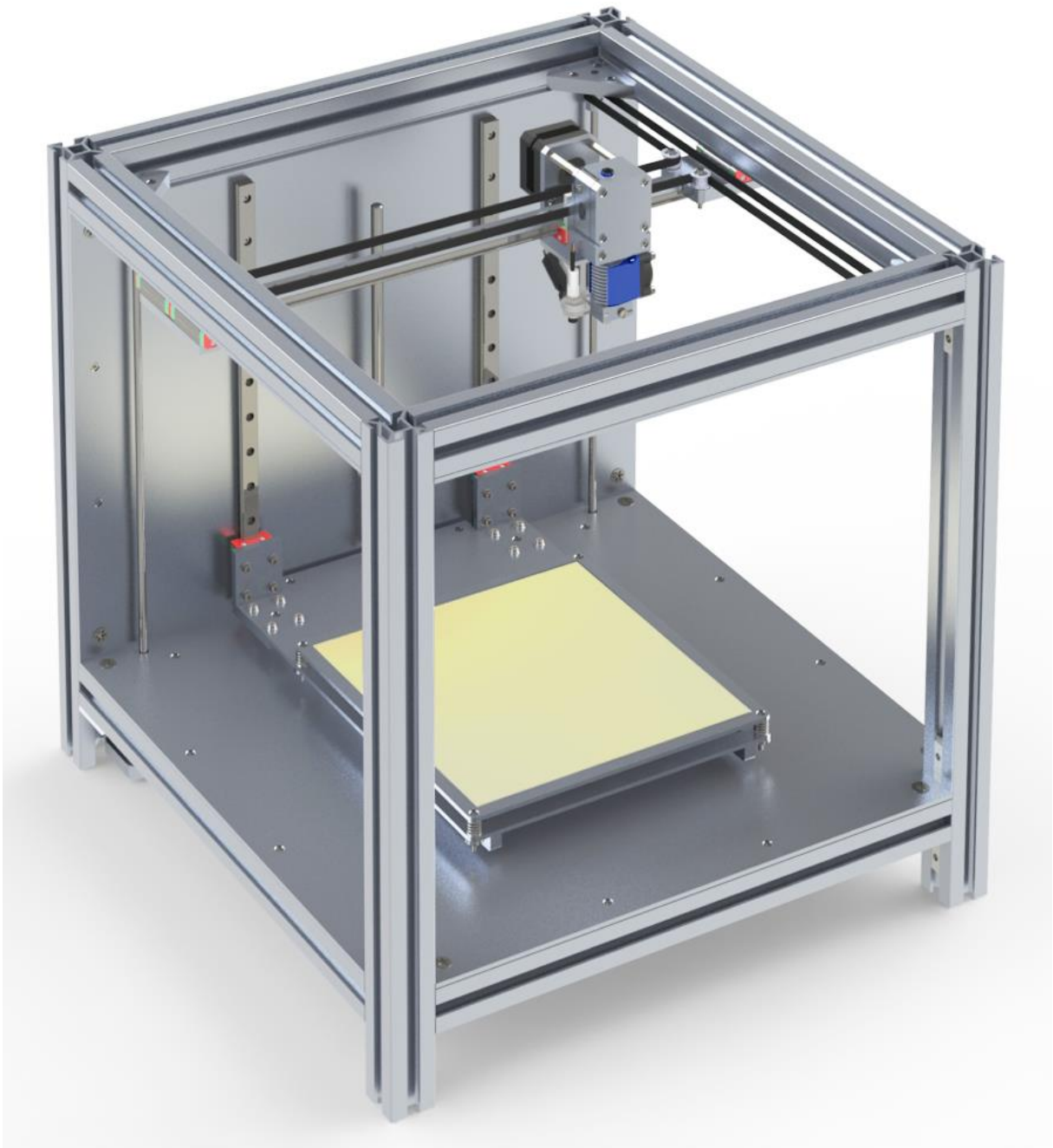
Vytvořený a připravený G-kód je potřeba nahrát do řídicí jednotky 3D tiskárny, kde je zpracován nahráním firmwarem. Způsob provedení je závislý na dané tiskárně. Často je G-kód nahráný na paměťové médium, popřípadě je 3D tiskárna propojena s počítačem pomocí datového kabelu, nebo přes bezdrátovou síť.

## 5 Cíl práce a metody jejího zpracování

V této části práce je detailně popsána navržená FDM 3D tiskárna. Jednotlivé základní konstrukční části tiskárny jsou popsány a doplněny o výpočty a analýzy, které zdůvodňují tyto konstrukční řešení. Jednotlivé části navržené tiskárny jsou rozděleny do kapitol 5.1 až 5.8.

V závěru této kapitoly je detailně popsán zkušební tisk na navržené 3D tiskárně za účelem ověření její funkčnosti a zjištění její kvality tisku. Výsledky zkušebního tisku jsou popsány v kapitole 6.1.

*Obrázek 18 Navržená FDM 3D tiskárna*



## 5.1 Navržené konstrukční řešení 3D tiskárny

Mezi hlavní požadavky autora patří celková velikost tak, aby se jednalo o stolní tiskárnu s co nejmenšími vnějšími rozměry a designovým provedením. Vnější rozměry tiskárny jsou 430 x 430 x 430 mm a vycházejí z rozměrů tiskového prostoru. Pro 3D tiskárnu byly zvoleny rozměry tiskového prostoru 200 x 200 x 200 mm, které jsou dostatečné pro autorovy potřeby.

Předpokládá se tisk především menších součástí horizontálního charakteru. Z toho vyplývá zvolení kartézské konstrukce, která je oproti ostatním konstrukcím velmi rozšířená, jednodušeji vyrobitelná a snadně ovladatelná.

Dalším faktorem je samotná rychlost tisku, která přímo závisí na zvoleném pojezdovém systému. Tím byl zvolen pojezdový systém H-bot, jeho přednosti oproti klasickému systému jsou detailněji popsány v kapitole 5.3.1.

Dále autor počítá s tiskem celé řady běžně používaných materiálů, mimo jiné i flexibilních, a proto je tisková hlava navržena pro použití přímé i nepřímé extruze. Navržené konstrukční řešení je detailněji popsáno v kapitole 5.5.

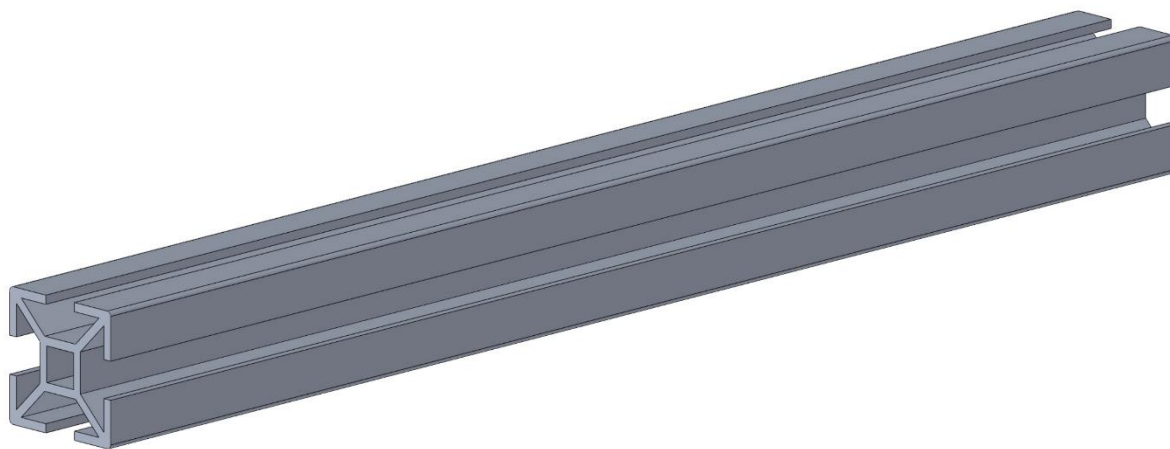
Jedním z požadavků autora je možnost snadného zakrytí celé tiskárny a snadný přístup do tiskového prostoru z více stran. Zakrytí navržené 3D tiskárny umožní vyhřívání tiskového prostoru pro obtížnější tisk některých materiálů. Snadnější přístup do tiskového prostoru zjednoduší odstranění dokončených výtisků z vyhřívání podložky.

Konstrukce tiskárny je navržena tak, aby bylo použito co nejmenší množství vytištěných dílů. Ty jsou použity pouze pro mechanicky nenamáhané součásti jako jsou např. difuzory svorky řemene atd... Na obr. 18 je zobrazeno navržené konstrukční řešení 3D tiskárny.

## 5.2 Rámová konstrukce

Pro rámovou konstrukci je použita kombinace tažených profilů a plechových výpalků z hliníkových slitin. Jedná se o profily stavebnicového systému „kombi“ s průřezem 30 x 30 mm vyrobených z hliníkové slitiny EN AW 6060 T66. Profily disponují podélnou „T“ drážkou o šířce 8 mm na každé straně, která umožňuje zasunutí kladívkových matic do drážky a s jejich pomocí montáž jednotlivých součástí k rámu. Výhodou stavebnicového systému kombi je jeho relativně nízká cena, snadná dostupnost a možnost dělení materiálu podle potřeby přímo u prodejce. Celková délka použitých profilů i s prořezy je 5795 mm. Spojení jednotlivých profilů konstrukce je provedeno dvěma druhy rohovníků. Prvním jsou rohovníky vnější, s příčnou výztuhou, které vyžadují k fixaci šroub a kladívkovou matici. Jsou vhodné do míst, kde je zapotřebí velmi tuhého spojení a kde nezabírají prostor. Druhým typem jsou rohovníky vnitřní, které mají otvory se závitem a jsou zasunuty v drážkách. Pomocí stavěcích šroubů jsou zafixovány v požadované poloze. Výhodou těchto vnitřních rohovníků je, že nepřesahují linii profilů, tím vytvářejí elegantní spojení a umožňují montáž jednotlivých dílů přímo v rohu. To se projevuje především v celkové velikosti výsledné konstrukce.

*Obrázek 19 Systémový profil kombi 30 x 30 mm*

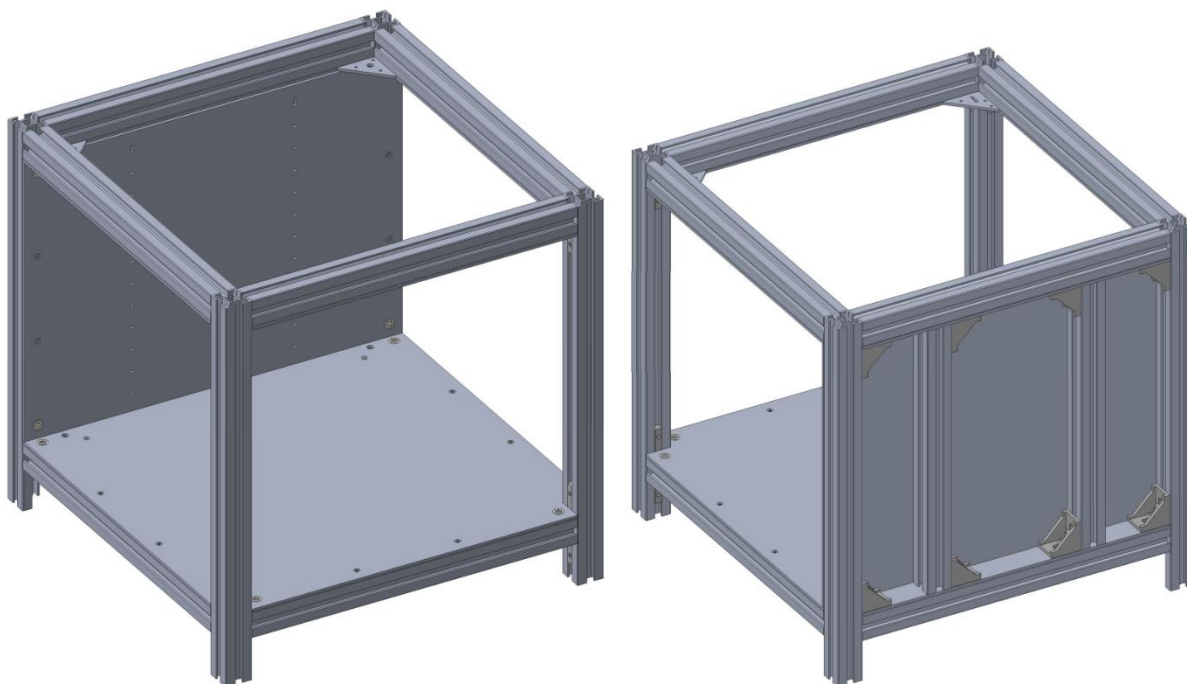


Druhým typem materiálu použitého na konstrukci jsou plechové výpalky z hliníkové slitiny EN AW5754 H22 o tloušťce 3 mm. Výhodou plechových výpalků je možnost široké tvarové rozmanitosti, relativně nízká cena a příprava otvorů pro tvorbu vnitřních závitů. A především vysoká přesnost celé geometrie výpalků díky CNC laserovým strojům, které zaručují přesnost 0,1 mm. Plechové výpalky dávají celé konstrukci větší tuhost, umožňují oddělení tiskového prostoru od dalších součástí např. krokových motorů a elektroniky. V neposlední řadě vytvářejí elegantní design. Na konstrukci jsou použity 3 plechové výpalky, dva horizontální a jeden vertikální.

Horní horizontální plech je umístěn ze spodní strany profilů horní části konstrukce a zvyšuje tuhost této části. V zadních rozích vytváří podporu pro uložení dvou hnacích řemenic, jedné

hnané řemenice v pravém předním rohu a jedné hnané řemenice v levém předním rohu, které slouží i pro napínání řemene. Na bočních stranách jsou otvory s roztečí 25 mm pro připevnění kolejnic lineárního vedení v ose Y, které je částí pojezdového systému popsaného v kapitole 5.3.2. Vertikální plech slouží především pro čisté uzavření tiskového prostoru a přesnou polohu kolejnic lineárního pojezdu v ose Z, které je popsáno v kapitole 5.4. Spodní horizontální plech slouží především pro oddělení tiskového prostoru od elektroniky a krokových motorů.

*Obrázek 20 Rámová konstrukce zepředu (vlevo) zezadu (vpravo)*



Celkové rozměry rámu tiskárny jsou 430 x 430 x 430 mm. Pro snížení materiálové různorodosti byly použity pouze dvě velikosti spojovacího materiálu. Jedná se o velikosti M6, které jsou použity k vzájemné fixaci profilů pomocí rohovníků. Druhá velikost M3 vychází z příruby krokových motorů NEMA 17 a lineárního vedení MGN12.

Tato konstrukce umožňuje v budoucnu jednoduché zakrytování díky tvaru krychle a použitým profilům kombi, ke kterým se dá snadno přidělat. Hlavním důvodem zakrytování je možnost udržet požadovanou teplotu uvnitř tiskového prostoru, kterou pro správný tisk vyžadují některé tiskové materiály. Nabízejí se dvě jednoduchá řešení možného zakrytování. Prvním je pevně spojený kryt kopírující tvar konstrukce obsahující dvířka, který se jednoduše nasune z horní části na konstrukci tiskárny. Druhou možností zakrytování jsou jednotlivé desky připevněné ke konstrukci pomocí magnetů.

### 5.3 Pojezdový systém v rovině XY

Na kvalitu tisku má vliv mnoho faktorů, jedním z nich je přesný a tuhý pojezdový systém, který umožňuje správné polohování tiskové hlavy během tisku. Pro stavbu této tiskárny byl zvolen v rovině XY pojezdový systém H-bot. Ten oproti ostatním systémům disponuje lepší dynamikou pohybu a přesnějším polohováním. Oproti klasickému systému je H-bot schopný vyvinout větší síly za použití stejných motorů. Staticky uložené krokové motory snižují pojezdové setrvačné hmoty pojezdového systému a tím umožňují vyšší rychlost tisku oproti klasickému systému. V porovnání s pojezdovým systémem CoreXY má systém H-bot jednodušší konstrukci, méně dílů a pouze jeden řemen v jedné rovině.

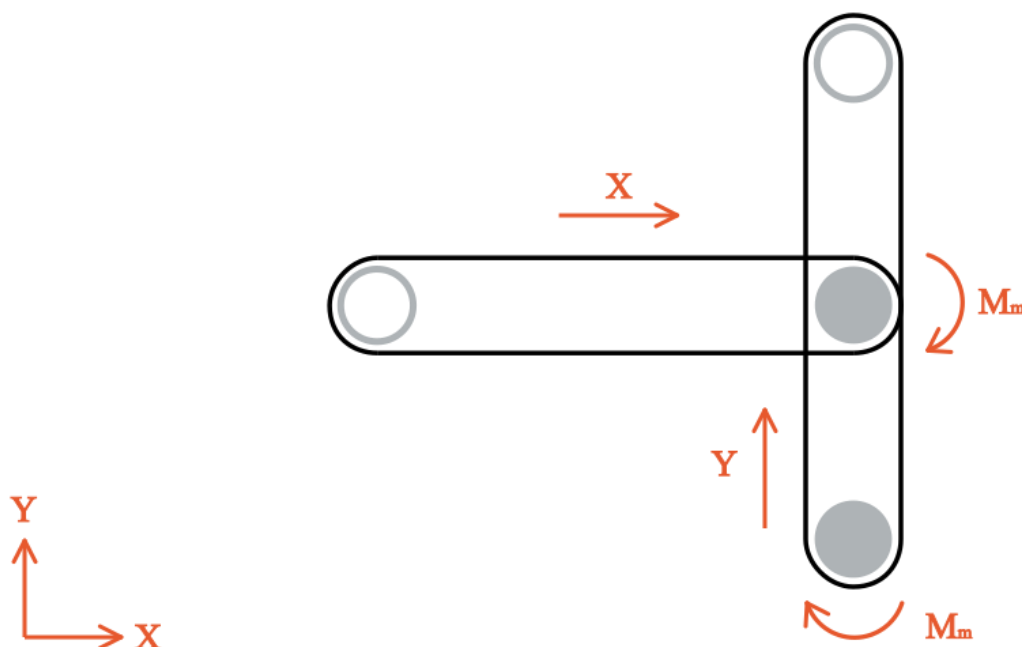
V další části této kapitoly jsou mezi sebou porovnány maximální možné síly a minimální posuvy pojezdového systému H-bot a klasického systému.

#### 5.3.1 Porovnání pojezdových systémů

##### Klasický systém

Pro klasický systém je charakteristické, že posuv v jedné ose je prováděn jedním nezávislým motorem. Na obr. 21 je znázorněno schéma klasického pojezdového systému v rovině XY. Postup výpočtu je znázorněn v rovnicích (1) až (3).

Obrázek 21 Schéma klasického pojezdového systému v rovině XY



Síla  $F_{1xy}$ , kterou jsou krokové motory s točivým momentem  $M_m = 0,45 \text{ Nm}$  schopny vyvinout v jedné ose při použití řemenic o poloměru  $r_f = 4,47 \text{ mm}$  (GT2 16 zubů).

$$F_{1xy} = \frac{M_m}{r_f} = \frac{0,45}{0,00447} = 100,671 \text{ N} \quad (1)$$

Minimální posuv  $L_{1xy}$  v jedné ose s velikostí kroku  $\alpha_k = 1,8^\circ$ . [32]

$$L_{1xy} = \frac{\pi \cdot r_f}{180} \cdot \alpha_k = \frac{\pi \cdot 4,47}{180} \cdot 1,8 = 0,14 \text{ mm} \quad (2)$$

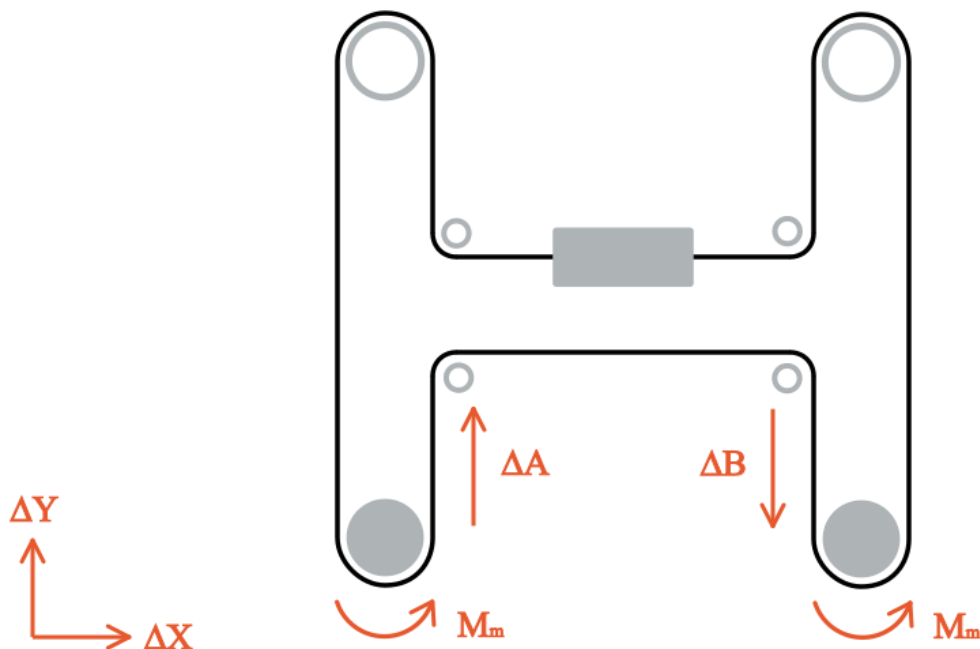
Minimální posuv  $L_{1Mxy}$  v jedné ose s mikro-krokováním  $1/16$ .

$$L_{1Mxy} = \frac{L_{1xy}}{16} = \frac{0,14}{16} = 0,009 \text{ mm} \quad (3)$$

### System H-bot

Pro pohyb tiskové hlavy v rovině XY tento systém využívá synchronizovaného pohybu dvou motorů. Schéma systému H-bot je znázorněno na obr. 22. Postup výpočtu je znázorněn v rovnicích (4) až (9).

Obrázek 22 Schéma pojízdového systému H-bot v rovině XY





Síla  $F_{2xy}$ , kterou jsou krokové motory s kroutícím momentem  $M_m = 0,45 \text{ Nm}$  schopné vyvinout v jedné ose při použití řemenic o poloměru  $r_f = 4,47 \text{ mm}$  (GT2 16 zubů).

$$F_{2xy} = \frac{2 \cdot M_m}{r_f} = \frac{2 \cdot 0,45}{0,00447} = 201,342 \text{ N} \quad (4)$$

Pohybové rovnice systému H-bot v rovině XY, ze kterých je zřejmé, že pro pohyb v jedné či dvou osách je zapotřebí dvou motorů. [45]

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B) \quad \Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B) \quad (5, 6)$$

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y \quad \Delta B = \Delta X - \Delta Y \quad (7, 8)$$

Pro pohyb v ose X a Y tedy platí.

$$\Delta x = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot r_f}{180} \cdot \alpha_{k1} + \frac{\pi \cdot r_f}{180} \cdot \alpha_{k2} \right) \quad \Delta y = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot r_f}{180} \cdot \alpha_{k1} - \frac{\pi \cdot r_f}{180} \cdot \alpha_{k2} \right) \quad (9, 10)$$

Minimální posuv  $L_{2xy}$  v jedné ose s velikostí kroků  $\alpha_{k1,2} = 1,8^\circ$ . [32]

$$L_{2xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot r_f}{180} \cdot \alpha_{k1,2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot 4,47}{180} \cdot 1,8 \right) = 0,07 \text{ mm} \quad (11)$$

Minimální posuv  $L_{2Mxy}$  v jedné ose s mikro-krokováním 1/16.

$$L_{2Mxy} = \frac{L_{2xy}}{16} = \frac{0,07}{16} = 0,0044 \text{ mm} \quad (12)$$

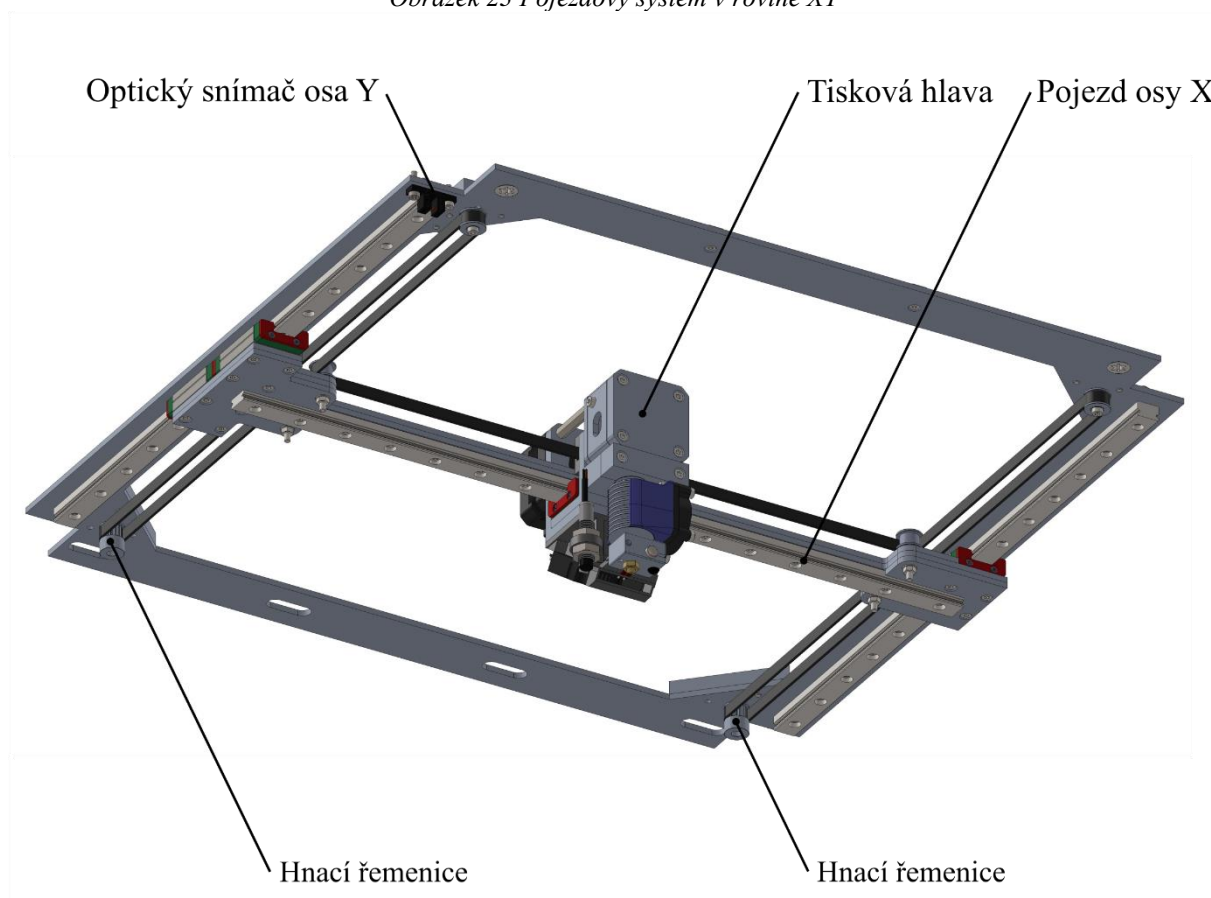
Z dosažených výpočtů v rovnicích (1) až (12), je na první pohled jasný rozdíl mezi klasickým systémem a systémem H-bot. Maximální dosažitelná síla klasického systému je  $100,671 \text{ N}$ . Minimální možný posuv v jedné ose za použití mikro-krokování 1/16 vyšel  $0,009 \text{ mm}$ . Oproti tomu systém H-bot je schopný za stejných podmínek vyvinout maximální možnou sílu o velikosti  $201,342 \text{ N}$ . Minimální posuv v jedné ose systému H-bot za použití mikro-krokování 1/16 vychází  $0,0044 \text{ mm}$ .

Pojezdový systém H-bot má však jednu negativní konstrukční vlastnost, kterou je potřeba při konstrukci zohlednit. Tato negativní vlastnost je patrná ze schématu na obr. 23. Při pohybu pojezdového vozíku doleva po ose X se musí oba motory otáčet doprava po směru hodinových ručiček. Při tomto pohybu ve vedení dochází ke vzniku momentu, který má tendenci přičít vedení. Při nedostatečně tuhém lineárním vedení může docházet k přičení os, které vyvolá trhavý pohyb tiskové hlavy. To se negativně projeví na kvalitě tisku. Konstrukční řešení, které by mělo tuto vlastnost vyřešit je stručně popsáno v další kapitole.

### 5.3.2 Řešení pojezdového systému H-bot

Navržený pojezdový systém H-bot v rovině XY je pro větší přehlednost zobrazen bez části rámové konstrukce na obr. 23. Lineární vedení je tvořeno miniaturním vedením MGN12 a pojezdovými vozíky MGN12H. Výhodou tohoto lineárního vedení je vysoká přesnost, schopnost přenášet vysoké zatížení a možnost vysokých pojezdových rychlostí. Řada MGN12 byla zvolena z důvodu své velikosti, kdy šířka pojezdového vozíku nepřesahuje vnější obrys celé konstrukce a kolejnice v ose Y zvyšují tuhost celé rámové konstrukce. Orientace lineárního vedení směrem dolů omezuje usazování prachu na kolejnicích. Pro přenos pohybu z motorů na tiskovou hlavu je použit ozubený řemen řady GT2 o šířce 6 mm, který je veden přes hladké a ozubené řemenice s 16 zuby. Hlavní výhodou tohoto konstrukčního řešení pojezdového systému v rovině X Y je použití plechového výpalku, ke kterému je připevněno lineární vedení. Jedná se tedy o nezávislý konstrukční prvek, který po správné instalaci zajišťuje kolmost mezi osami X a Y. Nevýhodou tohoto řešení by mohla být rozdílná tepelná roztažnost plechů z hliníkových slitin a ocelových kolejnic, při zakrytí celé konstrukce a její vyhřátí na vyšší teplotu za účelem tisku určitých materiálů. Odlišná tepelná roztažnost jednotlivých prvků by mohla zapříčinit deformace a negativně ovlivnit přesné nastavení celého pojezdového systému.

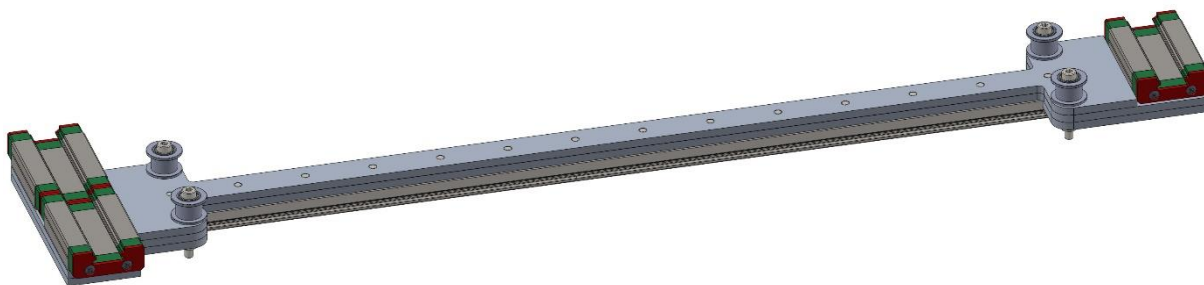
Obrázek 23 Pojezdový systém v rovině XY



## Pojezd osy X

Konstrukce pojezdu osy X, která je zobrazena na obr. 24, je tvořena kombinací plechových výpalků a kolejnice lineárního vedení MGN12. Pro přenos pohybu slouží čtyři hladké řemenice GT2 (16 zubů). Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.3.1 pojezdový systém H-bot má negativní konstrukční vlastnost, která může vyvolat přičení pojezdu osy X a tiskové hlavy. Tuto vlastnost by mělo zčásti eliminovat tuhé lineární vedení pevně spojené s rámem a zdvojené vedení na jedné straně pojezdu osy X.

Obrázek 24 Pojezd osy X



Pro ověření konstrukčního návrhu pojezdu osy X byla provedena statická analýza, zjišťující maximální průhyb a maximální napětí působením tiskové hlavy na pojezd osy X. Statická analýza byla provedena použitím softwaru SOLIDWORKS Simulation, který provádí výpočty na základě metody konečných prvků.

Model pojezdu byl v prostoru ukotven přes plochy znázorňující stykové plochy mezi plechovým výpalkem a pojezdovými vozíky. Model pojezdu byl zatížen dvěma druhy zatížení. Prvním zatížením je vlastní tíha celého pojezdu, velikost a její pozice je automaticky vypočtena softwarem. Druhé zatížení reprezentuje tiskovou hlavu. Velikost tohoto zatížení je pouze přibližná, jelikož přesnou hmotnost není možné získat z CAD modelu, ten neobsahuje kabeláž jednotlivých komponent. Proto byla hmotnost tiskové hlavy lehce navýšena. Výpočet síly reprezentující zatížení tiskové hlavy je znázorněn v rovnici (13). Největší průhyb pojezdu může nastat, když bude tisková hlava uprostřed pojezdu. Přenos zatížení tiskové hlavy na pojezd je reálně přenášen bodově přes jednotlivé kuličky, ale jelikož je tento přenos zatížení složitě simulovatelný, tak bylo zvoleno jeho zjednodušení. Zatížena byla obdélníková část kolejnice o délce pojezdového vozíku a šířce jedné kuličky.

Zatížení  $F_{th}$  reprezentující tíhu tiskové hlavy o hmotnosti  $m_{th} = 0,6 \text{ kg}$ .

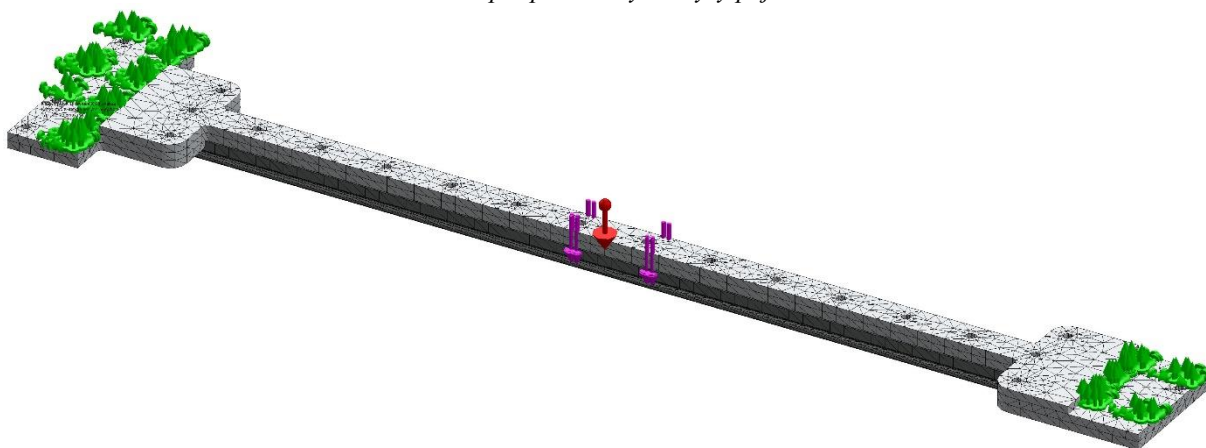
$$F_{th} = m_{th} \cdot g = 0,6 \cdot 9,81 = 5,886 \text{ N} \quad (13)$$

Síť modelu pojezdu osy X je tvořena 27 530 elementy a 46 778 uzly. Maximální průhyb vychází přibližně ve středu pojezdu a jeho velikost je  $7,483 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ . Maximální napětí vzniklé působením tiskové hlavy vychází  $3,118 \text{ MPa}$ . Z dosažených výsledků je patrné, že toto navržené konstrukční řešení vyhovuje. Velikost průhybu je v řádech tisícín milimetrů a nemělo by

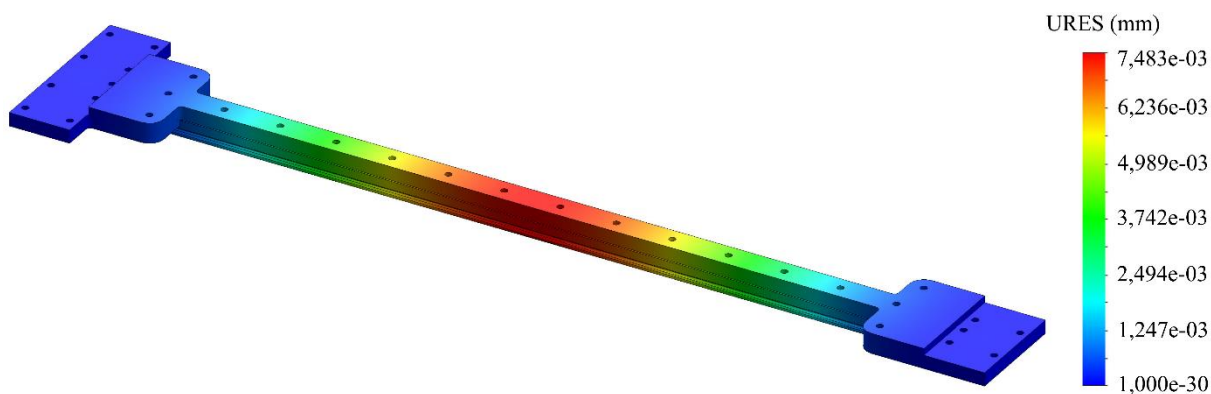
mít zásadní vliv na samotný tisk, jelikož tloušťka tiskové vrstvy se pohybuje v řádech desetin milimetrů. Maximální vzniklé napětí se pohybuje v jednotkách MPa a zdaleka se neblíží smluvní mezi kluzu slitiny hliníku EN AW 5754 H22, která je 130 MPa. [46]

Na obr. 25 je zobrazen model pojezdu osy X se zobrazeným ukotvením v prostoru (zeleně), vlastní tíhou pojezdu (červeně) a nakonec zatížením reprezentující tiskovou hlavu (fialově). Na obr. 26 je zobrazen výsledek maximálního posunutí pojezdu osy X.

Obrázek 25 Vstupní parametry analýzy pojezdu v ose X



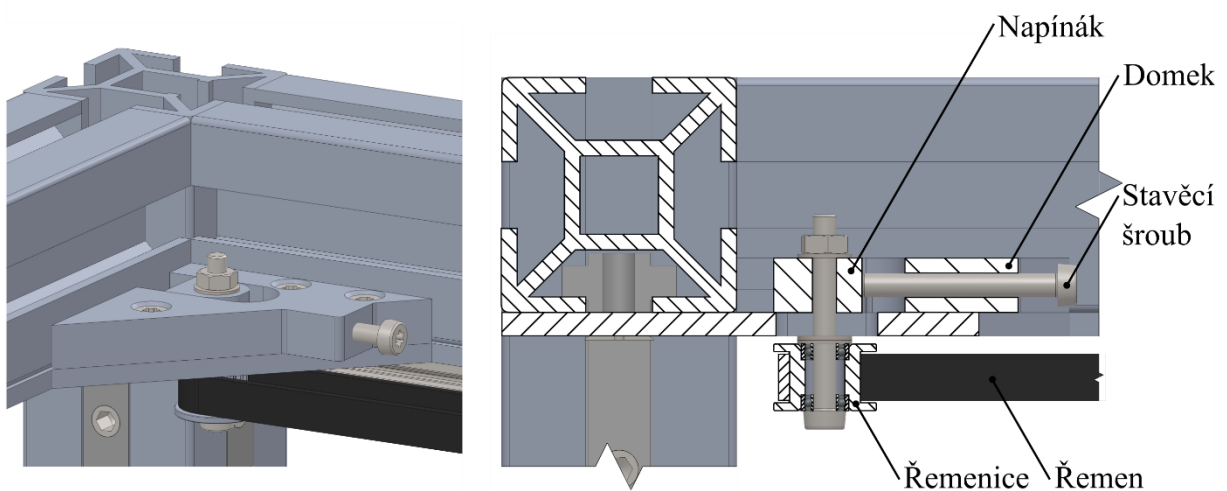
Obrázek 26 Maximální průhyb pojezdu osy X



### Napínací mechanismus řemene

Další důležitou součástí pojezdového systému je napínací mechanismus řemene, který umožňuje jednoduchou a rychlou změnu napnutí řemene. Správné napnutí řemene má přímý vliv na kvalitu tisku. Napínací mechanismus je tvořen z domečku, napínáku, řemenice, šroubového spoje a stavěcího šroubu. Domeček a napínák jsou vyrobeny ze slitiny hliníku EN AW 2007 a přesně obrobena na CNC stroji, který umožňuje složitější geometrii celého mechanismu. Domeček obsahuje drážku, ve které se napínák může pohybovat v jenom směru a jeho poloha je nastavována pomocí stavěcího šroubu. Napínací mechanismus se nachází v levém předním rohu pojezdového systému a je zobrazen na obr. 27.

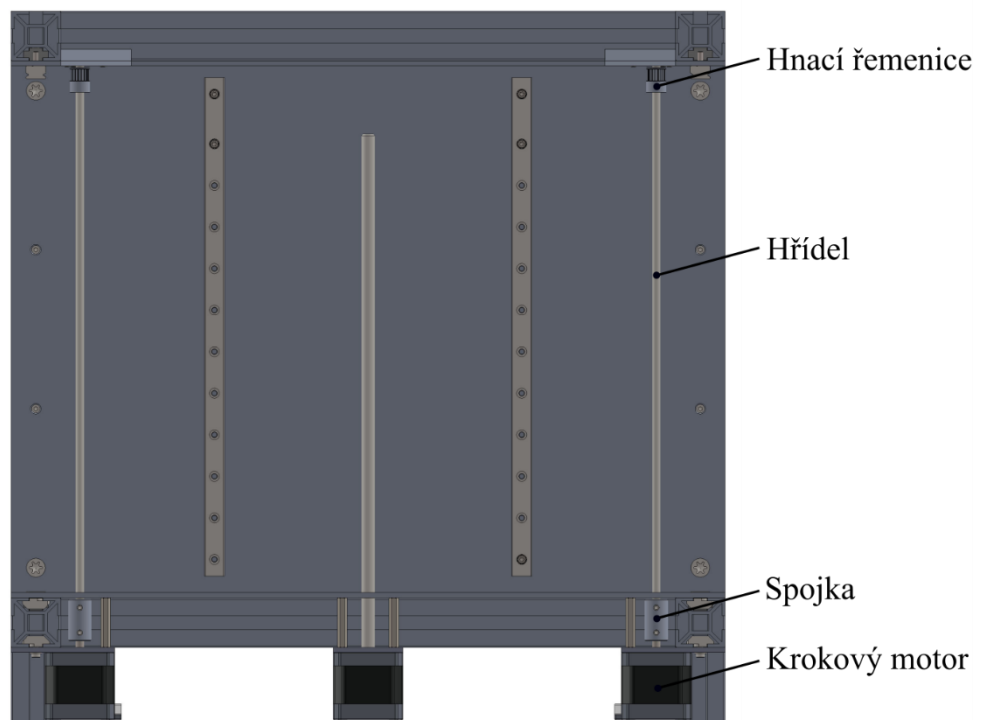
Obrázek 27 Napínací mechanismus řemene (vlevo) řez napínacího mechanismu řemene (vpravo)



## Pohony

Pohon pojezdového systému v ose XY zajišťují dva krokové motory s přírubou NEMA 17, statickým momentem 0,45 Nm a velikost kroku 1,8°. Ty jsou umístěny ve spodní části konstrukce tiskárny a spojeny s řemenicemi umístěnými v horní části tiskárny hřídelů o průměru 5 mm. Krokové motory a hřídele jsou vzájemně spojeny pomocí dvou pružných spojek, které eliminují případnou nesouosost. Hřídele jsou v horní části podepřeny pomocí radiálních kuličkových ložisek řady 625ZZ, která jsou uložena ve speciálních domcích připevněných pevně k rámu. Pohon pojezdového systému jsou zobrazeny na obr. 28.

Obrázek 28 Pohony pojezdového systému v rovině XY



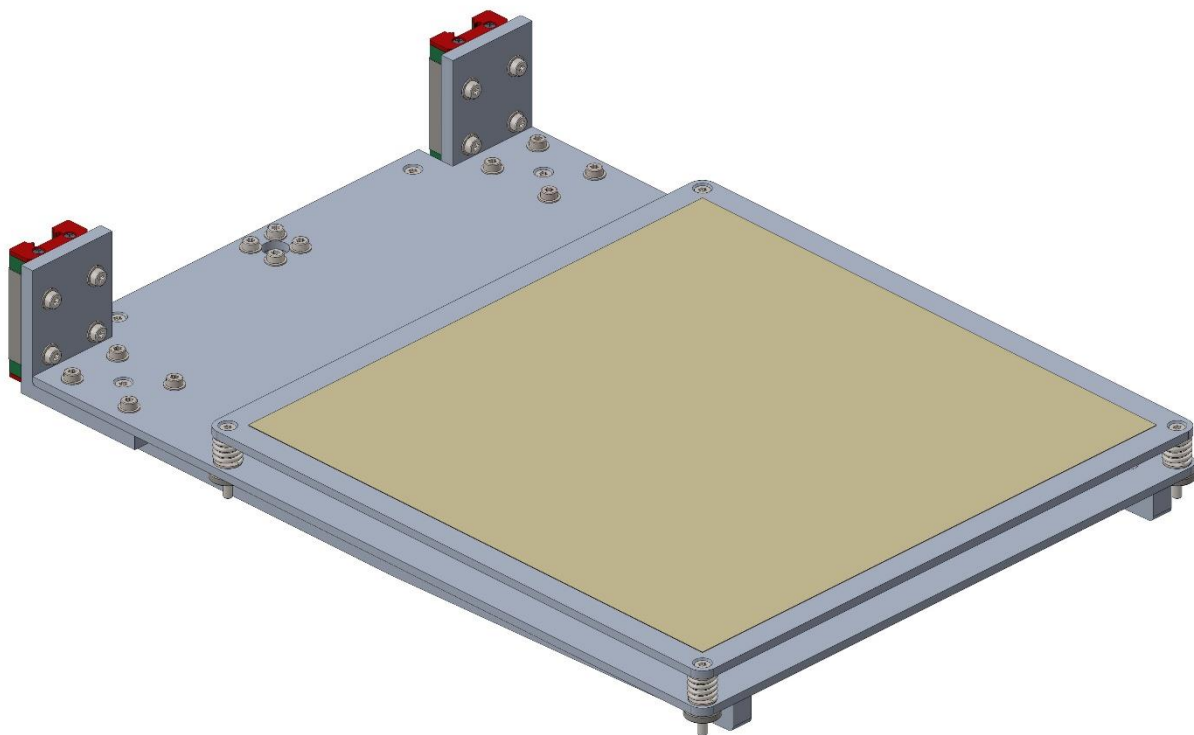
## 5.4 Pojezdový systém v ose Z

Na kvalitu tisku má vliv jednak přesné polohování tiskové hlavy v rovině XY, ale také polohování v ose Z. Zejména první tisková vrstva je kritická a ovlivňuje následný tisk. Je důležité správné přilnutí filamentu k tiskové podložce, aby nedocházelo ke kroucení a deformacím tištěného modelu. Zároveň adheze mezi výtiskem a tiskovou podložkou by neměla být zase příliš velká, aby po dokončení tisku bylo možné vytištěný model jednoduše odebrat.

Pro tuto tiskárnu byla zvolena vyhřívaná tisková podložka MK3, používaná na tiskárnách Prusa. Byla zvolena především pro svojí relativně nízkou cenu, dobré vlastnosti a univerzální rozměr. Jedná se o desku z hliníkové slitiny o celkových rozměrech 215 x 215 mm a tloušťce 3 mm. Vyhřívaná podložka je k pojezdovému systému připevněna pomocí čtyř šroubů M3 v rozteči 209 x 209 mm, které svírají s platformou ocelové pružiny vymezující vůli mezi tiskovou podložkou a platformou. Tento systém fixace slouží pro přesné nastavení tiskové podložky. Na povrch vyhřívané podložky je nalepena PEI folie o rozměrech 200 x 200 mm pro lepší adhezi mezi podložkou a tištěnými součástmi.

Konstrukce pojezdu se skládá z plechového výpalku z hliníkové slitiny EN AW 5754 H22, dvou L profilů z hliníkové slitiny EN AW 6060 pro připevnění pojezdových vozíků lineárního vedení a CNC obrobků z hliníkové slitiny EN AW 2007, které slouží k vyztužení celé konstrukce. Pro polohování v ose Z bylo zvoleno přesné lineární vedení MGN12 a pojezdové vozíky MGN12H. Samotný pohyb pojezdu je prováděn pomocí trapézového šroubu a matice, která je připevněná ke konstrukci pojezdu.

Obrázek 29 Konstrukce pojezdu osy Z



### 5.4.1 Pohon pojezdu v ose Z

Polohování pojezdu v ose Z je prováděno pomocí trapézového šroubu Tr8 se stoupáním 2 mm a samosvorné matice. Matice je ze spodní části pevně připevněna ke konstrukci pojezdu a vůle je vymezována pomocí pružiny. Výhodou samosvorné matice je schopnost udržet pojezd v požadované pozici i při nespustěném krokovém motoru a tím je zabráněno nechtěnému sjetí pojezdu směrem dolů. Pohyb trapézového šroubu zajišťuje krokový motor s přírubou NEMA 17, s točivým momentem o velikosti 0,42 Nm a velikostí kroku 1,8°. Trapézový šroub o délce 300 mm je zabudován přímo na motoru a tvoří jeho rotor. Za použití driveru s mikro-krokováním 1/16 je možné dosáhnout v ose Z minimálního posuvu  $6,25 \cdot 10^{-4}$  mm, což je pro polohování pojezdu dostatečné. Výpočet počtu kroků potřebných k posuvu pojezdu o 1 mm a minimálního posuvu pojezdu v ose Z za použití mikro-krokování jsou znázorněny v rovnicích (14) a (15).

Počet kroků  $Z_k$  potřebný k posuvu o 1 mm, kde  $k$  je počet kroku jedné otáčky motoru,  $k_\mu$  mikro-krokování 1/16 a rozteč  $P$ .

$$Z_k = \frac{k \cdot k_\mu}{P} = \frac{200 \cdot 16}{2} = 1600 \text{ kroků} \quad (14)$$

Minimální posuv  $Z_{min}$  v ose Z za použití mikro-krokování 1/16.

$$Z_{min} = \frac{1}{Z_k} = \frac{1}{1600} = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad (15)$$

### 5.4.2 Ověření zatížení lineárního vedení

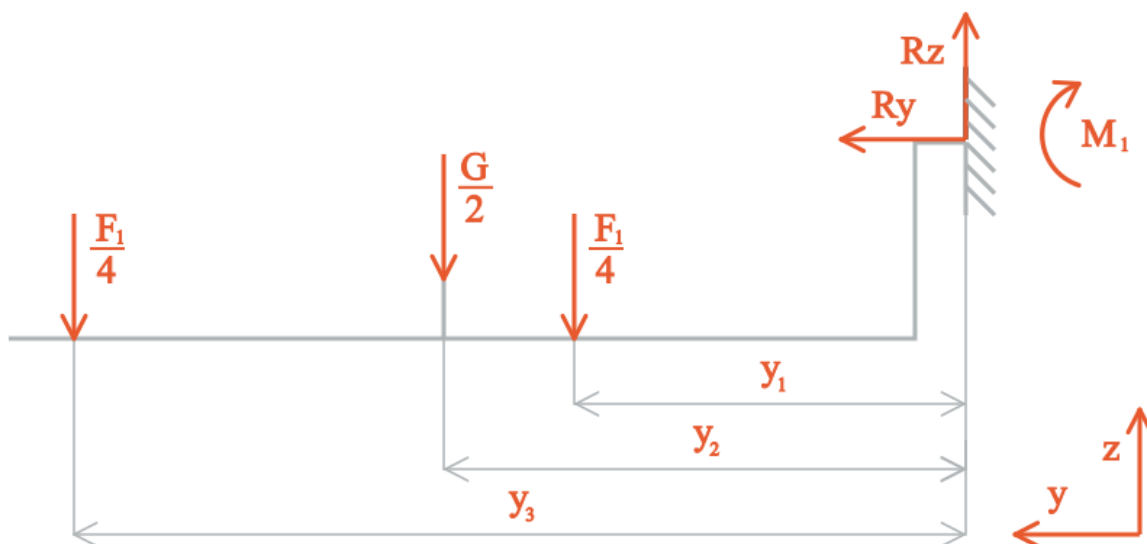
Pojezdový systém v ose Z je veden pomocí lineárního vedení MGN12, připevněného v zadní části tiskárny k rámu, a dvou pojezdových vozíku MGN12H. Jelikož je pojezd veden pouze z jedné strany (zadní), je zapotřebí ověřit, zda toto navržené konstrukční řešení je schopné přenést vzniklý moment v pojezdovém vozíku.

Na pojezd v ose Z působí dva druhy zatížení. Prvním je vlastní tíha pojezdu a druhým je hmotnost vyhřívané podložky a maximální teoretická hmotnost výtisku. Přesnou polohu a velikost vlastní tíhy pojezdu jsme získali z CAD modelu. Hmotnost vyhřívané podložky jsme také získali z CAD modelu. Maximální teoretickou hmotnost výtisku jsme stanovili na 1 kg, jelikož je filament běžně prodáván v baleních této hmotnosti. Jedná se pouze o maximální teoretickou hmotnost a v praxi se nepočítá s tiskem takto velkých součástí. Toto zatížení je na pojezd přenášeno ve čtyřech rozích vyhřívané podložky přes pružiny, jejichž poloha je známá. Pro zjednodušení jsme uvažovali, že maximální teoretický výtisk bude na vyhřívané podložce umístěn těžištěm uprostřed, a tudíž přenášené zatížení na pojezd bude ve všech čtyřech bodech stejně

veliké. Výpočet jednotlivých zatížení je znázorněn v rovnicích (16) a (17) a výpočet vzniklých reakcí a momentu je znázorněn v rovnicích (18) až (20).

Ze samotné konstrukce pojezdu v ose Z je patrné, že největší vzniklý moment bude v rovině YZ, a proto byl výpočet proveden pouze v této rovině. Jelikož je pojezd symetrický, tak oba pojezdové vozíky budou zatíženy stejně. Pro zjednodušení byl proveden výpočet pro jeden pojezdový vozík v rovině YZ. Na obr. 30 je zobrazeno zjednodušené schéma pojezdu.

Obrázek 30 Schéma pojezdu v rovině YZ



Zatížení  $F_1$  reprezentující maximální teoretickou hmotnost výtisku  $m_{vt} = 1 \text{ kg}$  a hmotnost vyhřívané podložky  $m_{hb} = 0,388 \text{ kg}$ .

$$F_1 = (m_{vt} + m_{hb}) \cdot g = (1 + 0,388) \cdot 9,81 = 13,616 \text{ N} \quad (16)$$

Zatížení  $G$  reprezentující tíhu pojezdu v ose Z o hmotnosti  $m_p = 0,855 \text{ kg}$ .

$$G = m_p \cdot g = 0,855 \cdot 9,81 = 8,388 \text{ N} \quad (17)$$

Silové účinky v ose Y.

$$\sum F_y = R_y = 0 \text{ N} \quad (18)$$

Silové účinky v ose Z.

$$\sum F_z = -\frac{F_1}{4} - \frac{G}{2} - \frac{F_1}{4} + R_z = 0 \text{ N} \quad (19)$$



Momentová rovnice, kde je rozměr  $y_1 = 0,0855 \text{ m}$ , rozměr  $y_2 = 0,124 \text{ m}$  a rozměr  $y_3 = 0,294 \text{ m}$ .

$$\Sigma M = -\frac{F_1}{4} \cdot y_1 - \frac{G}{2} \cdot y_2 - \frac{F_1}{4} \cdot y_3 + M_1 = 0 \text{ Nm} \quad (20)$$

$$M_1 = \frac{13,616}{4} \cdot (0,0855 + 0,295) + \frac{8,388}{2} \cdot 0,124 = 1,815 \text{ Nm}$$

Vypočtený moment v rovině YZ, který působí na jeden pojezdový vozík MGN12H je tedy  $M_1 = 1,815 \text{ Nm}$ . Výrobce předepsaný maximální moment, který je schopný pojezdový vozík MGN12H přenést v příslušné rovině je 38,22 Nm. Z vypočtených výsledků je patrné, že navržené řešení vyhovuje a hodnota vypočteného momentu je o řád menší než maximální přípustná hodnota stanovená výrobcem. [47]

### 5.4.3 Ověření průhybu pojezdu v ose Z

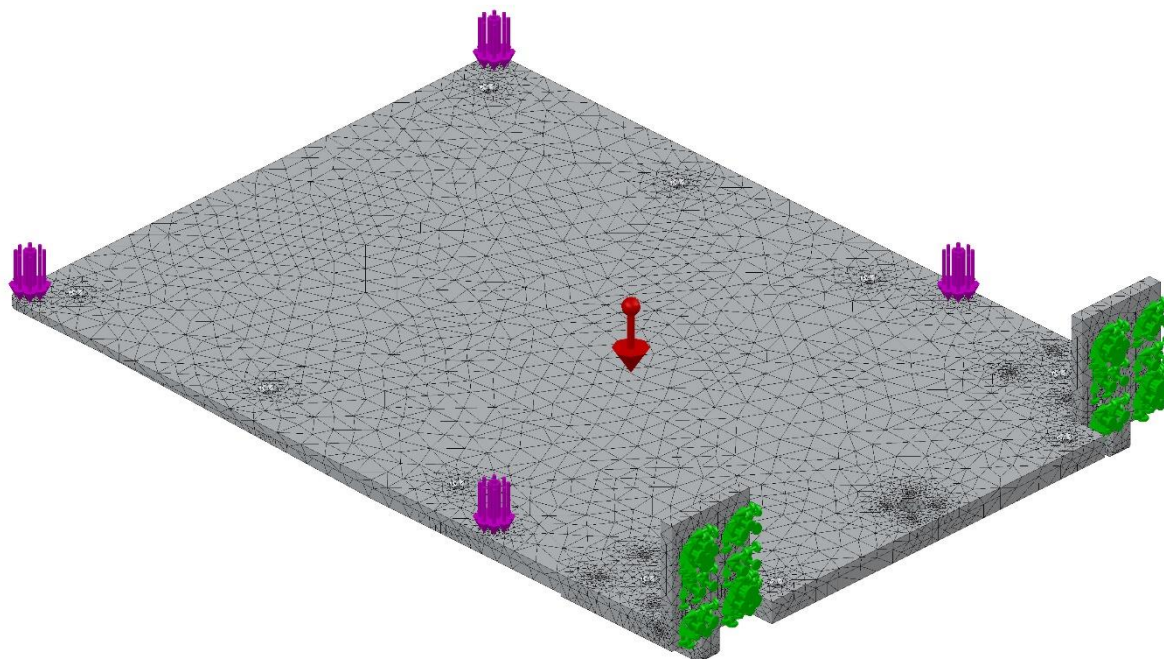
Dalším důležitým krokem je ověření průhybu konstrukčního řešení pojezdu v ose Z. Pro tento účel byla provedena statická analýza zjišťující maximální průhyb konstrukce pojezdu a maximální vzniklé napětí. Pro výpočet byl opět použit software SOLIDWORKS Simulation.

Pojezd byl v prostoru uchycen přes plochy na L profilech reprezentující stykové plochy s pojezdovými vozíky. Na konstrukci pojezdu působí dva druhy zatížení. Prvním je vlastní tíha celého pojezdu, její velikost a přesnou hodnotu vypočte software sám. Druhým druhem zatížení je hmotnost vyhřívané podložky a maximální teoretická hmotnost výtisku, jeho velikost a poloha je stejná jako v kapitole 5.4.2. Toto zatížení je na konstrukci pojezdu přenášeno přes plochy reprezentující podložky, které vytvářejí spoj s konstrukcí pojezdu a vyhřívanou podložkou.

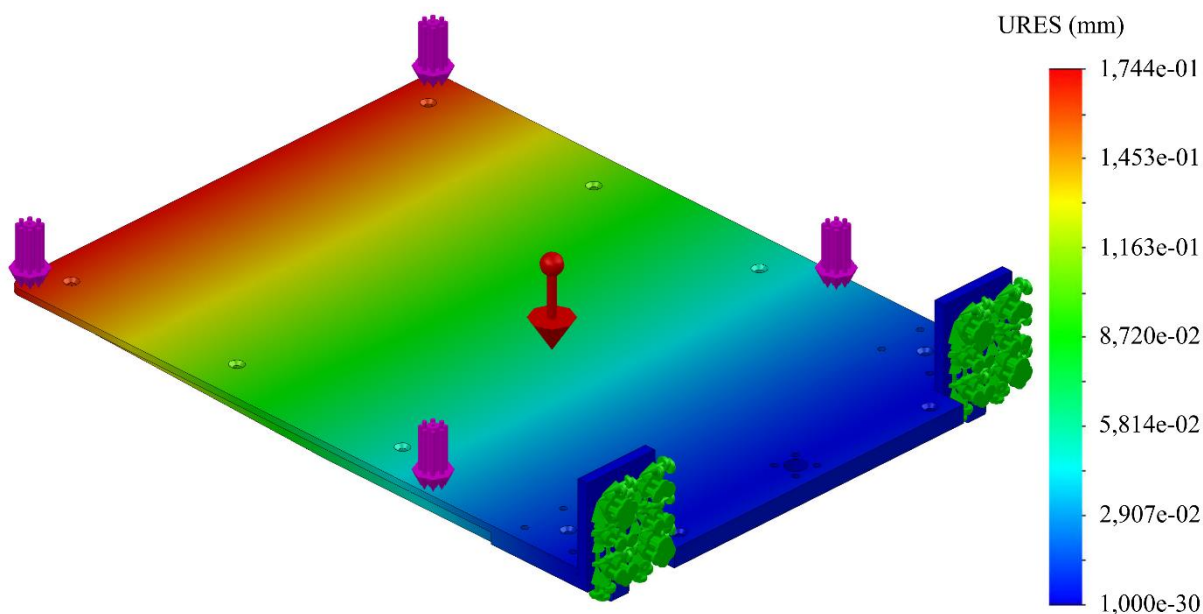
Sít modelu pojezdu osy Z je tvořena 75 071 elementy a 121 253 uzly. Maximální průhyb konstrukce pojezdu v ose Z vychází v její přední části a má velikost 0,174 mm. Dosažená hodnota posunutí odpovídá přibližně výšce jedné tiskové vrstvy při nastavení velmi jemného tisku. Maximální dosažené napětí vychází 16,22 MPa. Získané maximální napětí se pohybuje v řádech desítek MPa a neblíží se smluvní mezi kluzu použitých materiálům pro konstrukci pojezdu po ose Z. Z výsledků je patrné, že toto řešení vyhovuje, ale není vhodné pro výtisky vyšší hmotnosti, na které tato tiskárna není ani dimenzována.

Na obr. 31 je zobrazen model pojezdu osy Z se zobrazeným ukotvením v prostoru (zeleně), vlastní tíhou pojezdu (červeně) a nakonec zatížením reprezentující vyhřívanou podložku s výtiskem (fialově). Na obr. 32 je zobrazen výsledek maximálního posunutí pojezdu osy Z.

Obrázek 31 Vstupní parametry analýzy konstrukce pojezdu Z



Obrázek 32 Maximální průhyb konstrukce pojezdu osy Z

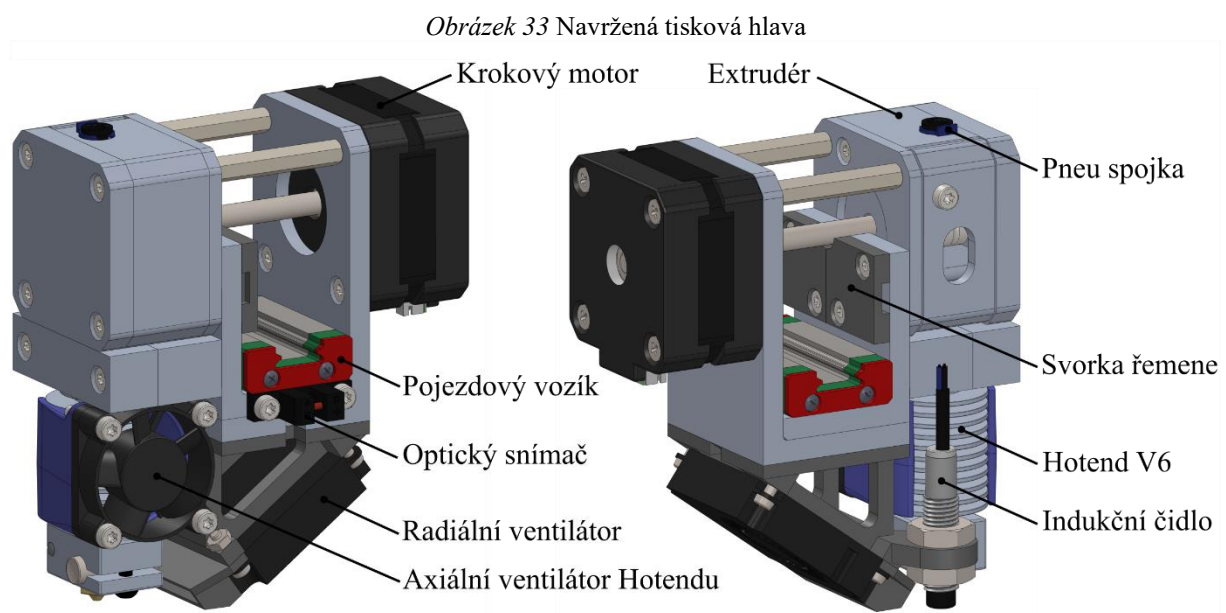


## 5.5 Tisková hlava

Tisková hlava je navržena tak, aby umožňovala přímou i nepřímou extruzi, a aby samotná změna způsobu extruze byla jednoduchá a nevyžadovala složitou a komplikovanou montáž. Tisková hlava se skládá z nosné platformy, pojezdového vozíku MGN12H, HotEndu V6 od společnosti E3D, optického koncového spínače, indukčního čidla a radiálního ventilátoru.

Nosná platforma je složená ze dvou L profilů z hliníkové slitiny EN AW 6060, které tvoří tuhou konstrukci tiskové hlavy. Lineární vedení zajišťuje pojezdový vozík MGN12H. HotEnd V6 je připevněn k nosné platformě pomocí dvoudílného držáku vyrobeného z hliníkové slitiny EN AW 2007. Samotný HotEnd je sevřen ve dvoudílném držáku a jeho polohu zajišťuje

profilová drážka na chladiči. Pro přesné polohování tiskové podložky bylo zvoleno indukční čidlo P.I.N.D.A s detekční vzdáleností 2 mm, které se používá na tiskárnách Prusa i3 Mk3. Výhodou tohoto čidla jsou jeho malé rozměry a zabudovaný termistor, který umožňuje korekci vzdálenosti v závislosti na teplotě. K ochlazování tištěné součásti slouží radiální ventilátor o rozměrech 40 x 40 x 10 mm s difuzorem, který optimálně usměrňuje proud vzduchu. Jelikož se poloha tiskové hlavy v rovině XY odměřuje inkrementálně, je zapotřebí počáteční pozice reprezentující nulové souřadnice. K vytvoření souřadnic počátku slouží koncové snímače. V tomto případě jsou použity optické snímače pro osu X a Y. Výhodou optických snímačů je, že při spínání nedochází k mechanickému opotřebení. Pro získání počáteční pozice na ose X slouží optický snímač, který je součástí tiskové hlavy a je přímo spojen s nosnou platformou. Optický snímač v ose Y je připevněn k rámu viz. obrázek 25. Ozubený řemen je z obou stran k tiskové hlavě připevněn pomocí speciálních svorek. Sestava tiskové hlavy s přímou extruzí je zobrazena na obr. 33.



Řešení tiskové hlavy s přímou extruzí, je navrženo tak, aby těžiště celé tiskové hlavy bylo co nejbližší ose lineárního vedení. Proto je HotEnd a ostatní součásti spolu s extrudérem v přední části a krokový motor, který má velkou hmotnost, je umístěn v zadní části. Pro pohon extrudéru je použit krokový motor s přírubou NEMA 17, který disponuje statickým momentem 0,16 Nm a velikostí kroku 1,8°. Pro potřeby tohoto konstrukčního řešení byl rotor standardní délky 25 mm nahrazen rotorem o délce 85 mm, který je v extrudéru uložen v radiálním kuličkovém ložisku řady 625ZZ.

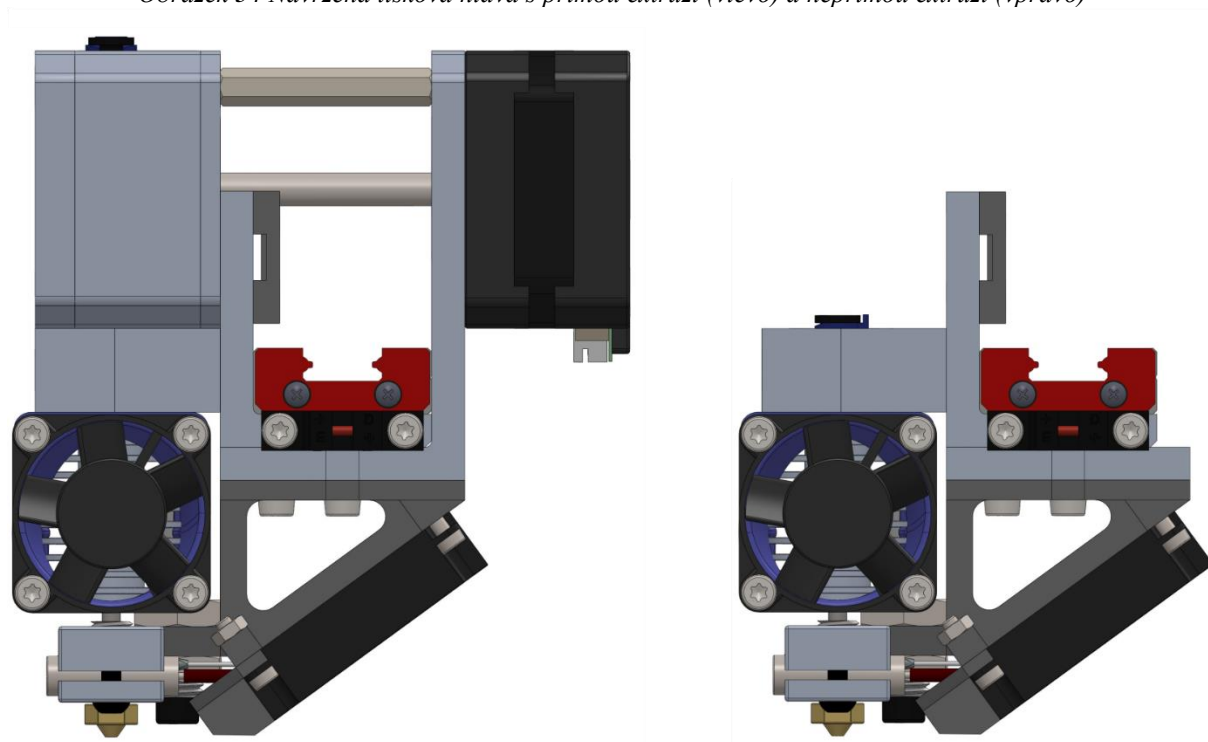
Samotné konstrukční řešení změny způsobu extruze je závislé na uspořádání L profilů. U nepřímé extruze je zapotřebí pouze přední L profil, který je spojen s vozíkem lineárního vedení pomocí 4 šroubů. Toto řešení má nižší hmotnost a lepší dynamické vlastnosti tiskové hlavy, které umožní vyšší tiskovou rychlost. Nevýhodou je především velmi obtížný, až nemožný tisk flexibilních materiálů.

Konstrukční řešení s přímou extruzí vyžaduje vyjmutí dvou šroubů, které spojují přední L profil a vozík lineárního vedení, zbylé dva šrouby se zápusťnou hlavou zajišťují jejich spojení.

Následně je přiložen zadní L profil a pomocí dvou delších šroubů se spojí oba profily a vozík lineárního vedení. Pro větší zajištění zadního profilu, jsou oba profily spojeny dalšími dvěma šrouby. Krokový motor je k zadnímu L profilu ve spodní části připevněn dvěma šrouby a v horní části pomocí distančních sloupků. Ty slouží jako opora pro extrudér. Ten je připevněn k přednímu profilu dvěma dlouhými šrouby, které procházejí extrudérem. V horní části je extrudér obdobně připevněn dvěma šrouby, které jsou uchyceny v distančních sloupcích. Tisková hlava s přímou extruzí umožňuje tisk všech druhů filamentů, ale zvyšuje hmotnost tiskové hlavy a negativně ovlivňuje její dynamické vlastnosti.

Porovnání navrženého konstrukčního řešení mezi tiskovou hlavou s přímou a nepřímou extruzí je zobrazeno na obr. 34.

*Obrázek 34 Navržená tisková hlava s přímou extruzí (vlevo) a nepřímou extruzí (vpravo)*

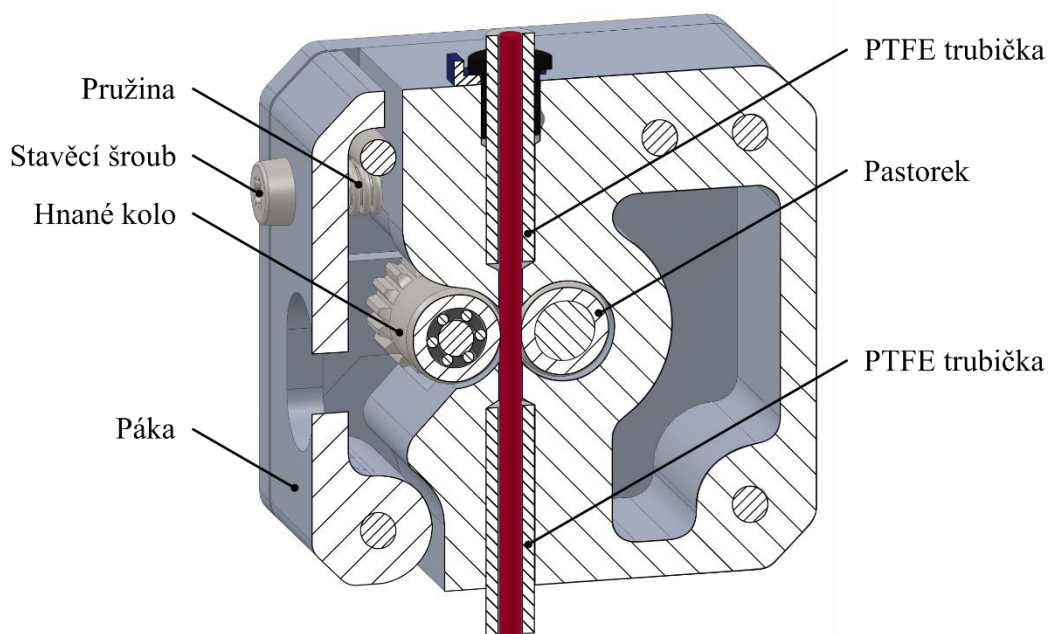


## 5.6 Extrudér

Pro potřeby tiskárny byl navržen extrudér vycházející z ověřených principů. Samotná konstrukce se skládá ze čtyř hlavních částí, těmi jsou dvě víčka, páka a středová část. Tyto části jsou vyrobeny na CNC frézce z hliníkové slitiny EN AW 2007. Celkové rozměry extrudéru jsou navrženy tak, aby při nepřímé extruzi kopírovaly tvar krokového motoru NEMA 17. Zadní víčko, které je při přímé extruzi ve styku s krokovým motorem, má v sobě vybrání pro přírubu motoru. Dávkování filamentu zajišťují dvě podávací kola s přímým ozubením od společnosti Bondtech, která se nacházejí ve střední části extrudéru. První kolo, pastorek, je pevně

přípevněno k vývodovému hřídeli krokového motoru. Druhé kolo je hnané a je umístěno na otočné páce, která slouží k nastavení přítlaku kol proti filamentu. Přítlak páky je nastavován pomocí stavěcího šroubu, vůli páky vymezuje pružina. Páka má drážku, která při ucpání trysky, nebo Hotendu umožní nouzový odvod filamentu, dokud není zastaveno jeho podávání. Prodloužený hřídel krokového motoru je v předním víčku podepřen radiálním kuličkovým ložiskem řady 625ZZ. Extrudér je k nosné platformě tiskové hlavy, nebo krokovému motoru připevněn pomocí čtyř šroubů procházejících všemi částmi v rozích konstrukce. Jeden spodní šroub slouží zároveň jako čep, kolem kterého se otáčí přítlačná páka. Vstupní a výstupní otvor pro filament umožňují připojení pneu-spojky, které slouží k napojení teflonové hadičky pro vedení filamentu. Toto řešení je použito při nepřímé extruzi. Navržený extrudér je zobrazen na obr. 35.

Obrázek 35 Řez navrženým extrudérem



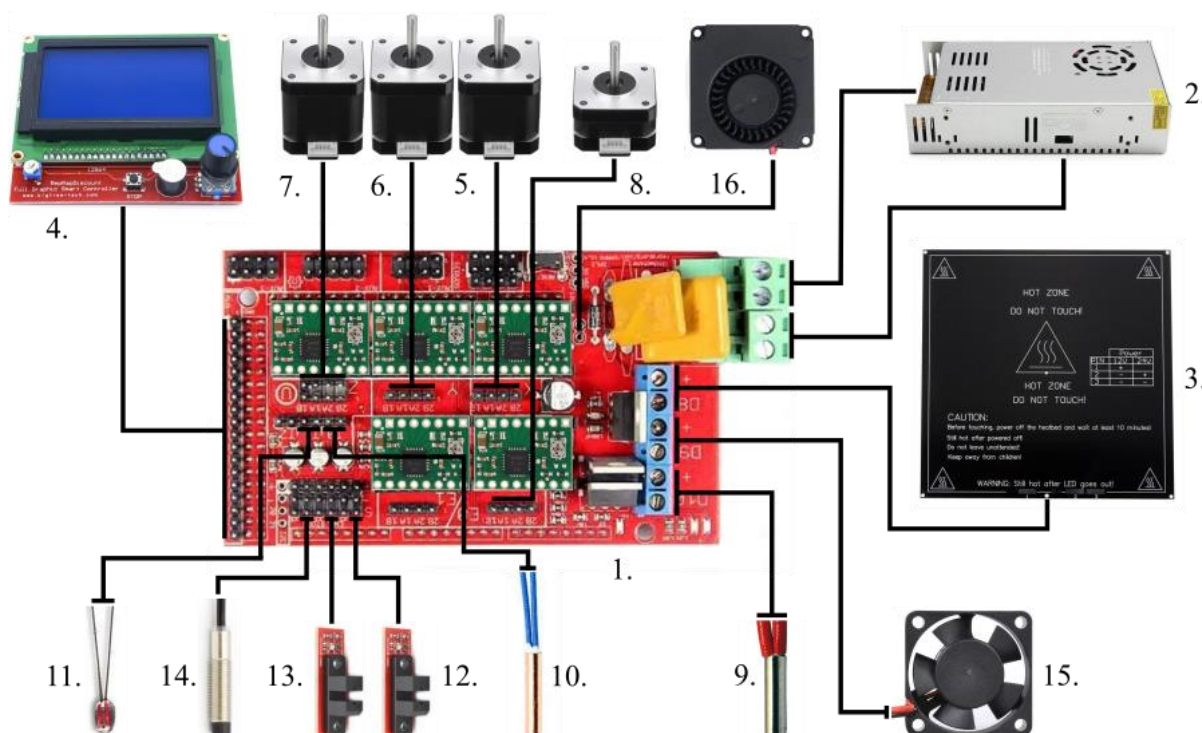
## 5.7 Elektronika

Pro napájení navržené 3D tiskárny byl zvolen 12 V průmyslový zdroj o výkonu 350 W, který je dostačuje pro napájení krokových motorů, HotEndu, vyhřívané podložky a ostatních elektronických součástí. Samotný zdroj je umístěn ve spodní části tiskárny, kde je bezpečně oddělen od tiskového prostoru a není nijak teplotně ovlivňován. Pro řízení 3D tiskárny je použita řídicí jednotka MEGA 2560 a nadstavbou RAMPS 1.4 a drivery A4988. Jedná se o nepřilíš vhodnou volbu, samotná řídicí deska je zastaralá a použitý procesor řídicí desky pracuje pouze s maximální frekvencí 16 MHz.

Důvod volby této řídicí desky je její velmi nízká cena a snadná dostupnost, zároveň je možné ji v budoucnu velmi jednoduše nahradit bez jakýchkoliv konstrukčních úprav tiskárny. Tímto rozhodnutím bylo možné navrhnout konstrukci 3D tiskárny z kvalitnějších a dražších

komponent, které zpětně nepůjdou vyměnit. Budoucí výměna elektroniky umožní např. použití driverů TMC2130, které mají možnost mikro-krokování 1/256, velmi tichý chod, funkci End-stopless Homing, která nahrazuje funkci fyzických koncových spínačů a mnoho dalšího. Dalším budoucím rozšířením může být Raspberry Pi. Jedná se o samostatný počítač, který umožňuje přes aplikaci OctoPrint dálkové ovládní tiskárny, sledování tisku pomocí web kamery apod.

Obrázek 36 Schéma zapojení řídicí desky: 1) Řídicí deska RAMPs 1.4, 2) 12V El. zdroj, 3) Vyhřívaná podložka, 4) Display 5) Motor X, 6) Motor Y, 7) Motor Z, 8) Motor extrudér, 9) 12V topné těleso Hotend, 10) Termistor Hotend, 11) Termistor vyhřívaná podložka, 12) Koncový optický spínač X, 13) Koncový optický spínač Y, 14) Indukční snímač Z, 15) Ventilátor Hotend, 16) Ventilátor tiskového prostoru



## 5.8 Firmware

Zvoleným firmwarem pro řízení navržené FDM 3D tiskárny je poslední 8 – bitová verze Marlin 1.1.9.1 s bugfixem 1.1.x. Firmware Marlin je jeden z nejrozšířenějších open-source firmwarů používaných nejen RepRap komunitou, ale i oficiálními výrobci jako Ultimaker, nebo český Prusa Research. Samotný firmware Marlin je vytvořen pomocí programovacího jazyka C++.

Důvodem zvolení 8 – bitové verze je řídicí deska MEGA 2560 s nadstavbou RAMPS 1.4 a autorovy předchozí zkušenosti. S budoucím nahrazením řídicí desky se počítá i s použitím 32 – bitové verze 2.0.5.1.

Pro správnou funkci tiskárny je nutné provést její konfiguraci podle dané konstrukce. Připravený firmware je následně nahrán do řídicí desky pomocí USB konektoru. [48]

### **Nastavované parametry:**

- Typ konstrukce CoreXY / H-bot
- Použitá řídicí deska
- Počet extrudérů
- Počet kroků na jeden milimetr pro jednotlivé osy X, Y, Z
- Pozice koncových spínačů
- Maximální hodnoty teploty HotEndu a vyhřívané podložky
- Senzory (indukční, osa Z) a jejich nastavení
- LCD display
- Dodatečné komponenty

### **5.9 Zkušební tisk**

Pro ověření funkčnosti navržené 3D tiskárny byl proveden zkušební tisk z několika běžně používaných materiálů. Těmi jsou PLA, PET-G a ASA. Důvod volby těchto specifických materiálů je, že autor předpokládá převážně tisk z těchto materiálů.

Hodnocení kvality výtisku nemá žádné jasné specifikace a záleží především na účelu dané součásti. Ty můžeme zjednodušeně rozdělit na dva typy, funkční součásti a dekorativní součásti. U funkčních součástí je kladen důraz především na rozměrovou přesnost a mechanické vlastnosti. Oproti tomu dekorativní součásti jsou závislé na kvalitě a vzhledu povrchu součásti.

Hodnocení funkčních součástí je mnohem jednodušší z hlediska dat k porovnání, oproti dekorativním součástem. Jelikož se u funkčních součástí měří rozměry, nebo mechanické vlastnosti, tak jsou naměřená data snadno zpracovatelná a porovnatelná. Oproti tomu hodnocení dekorativních součástí je z velké části subjektivní. Nevýhodou zkoušení mechanických vlastností součástí oproti dekorativním součástem je větší množství zkušebních vzorků. S rostoucím množstvím zkušebních vzorků roste vypovídací schopnost naměřených dat.

Hodnocení mechanických vlastností funkčních součástí lze provádět obdobným způsobem jako u součástí vyrobených běžnými konvenčními technologiemi. Mezi nejjednodušší způsoby hodnocení funkčních součástí je jejich rozměrová přesnost. Většina ostatních běžně prováděných mechanických zkoušek vyžaduje specifické zkušební stroje. Mezi základní statické zkoušky patří zkouška tahem, tlakem, krutem, stříhem a ohybem.

Od navržené FDM 3D tiskárny se očekává větší podíl tisku dekorativních součástí než součástí funkčních. Proto bude v hodnocení kladen důraz na celkový vzhled součástí, a především na její povrch.

Kvalita výsledné součásti závisí nejen na konstrukčních vlastnostech samotné tiskárny, ale především na optimálním nastavení jednotlivých parametrů tisku. Pro vygenerování G-kódu byl použit PrusaSlicer 2.2.0. V tabulce 2 jsou rozepsány jednotlivé vstupní parametry zkušebního tisku pro jednotlivé modely.

Pro hodnocení kvality tisku existuje celá řada kalibračních modelů vytvořených komunitou uživatelů 3D tiskáren, které jsou volně ke stažení z internetu. Velmi populární webovou stránkou pro sdílení modelů k 3D tisku je Thingiverse spadající pod společnost Stratasys.

Autorem této práce byly zvoleny tři modely, které jsou velmi populární a velmi dobře demonstrují vlastnosti kvality povrchu složitějších geometrií součástí.

Prvním modelem je *Benchy boat*, jedná se o model malého člunu. Jeho tvar se skládá z velké části z oblých hran a převisů. Proto je tento model dobrým ukazatelem, jak je daná 3D tiskárna schopná vytvářet tento typ složitějších geometrií

Druhým zvoleným modelem je 20 mm kalibrační krychle, která má na třech různých stěnách, v osách X, Y a Z, zahlobení ve tvaru písmena příslušné osy. Výhodou této kalibrační krychle jsou relativně malé rozměry, díky kterým nedochází k zbytečnému plýtvání materiálu a doba tisku je relativně krátká. Tato kalibrační krychle slouží k hodnocení kvality tisku v jednotlivých osách X, Y, Z a k ověření rozměrové přesnosti.

Posledním modelem je zakroucená váza. Tento typ modelu představuje další charakteristickou skupinu součástí. Jedná se o vertikální duté součásti s velmi tenkou stěnou v poměru k celkovým rozměrům. Model této vázy byl vytvořen autorem.

Tabulka 2 Vstupní parametry zkušebního tisku

Model		Člun Benchy boat	Kalibrační krychle	Váza
Materiál	-	PLA	ASA	PET-G
Výška jedné vrstvy	[mm]	0,1	0,1	0,4
Průměr trysky	[mm]	0,25	0,4	0,4
Rychlost pohybu	[mm·s <sup>-1</sup> ]	20 - 130	20 - 130	20 - 130
Teplota trysky	[°C]	200	250	230
Teplota podložky	[°C]	50	90	70
Vnitřní vyplnění	[%]	45	30	100
Celková doba tisku	[min]	283	112	217



## 6 Výsledky „experimentu“ a jejich diskuse

V první části této kapitoly jsou popsány výsledky zkušebního tisku na navržené FDM 3D tiskárně. Vstupní parametry zkušebního tisku jsou v kapitole 5.9.

V druhé části této kapitoly je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení navržené tiskárny, obsahující seznam použitých komponent včetně jejich ceny.

Tato kapitola je zakončena diskuzí, ve které jsou probrány konstrukční poznatky zjištěné během stavby navržené 3D tiskárny a její možné budoucí vylepšení.

### 6.1 Zhodnocení zkušebního tisku

Výsledky kvality tisku prvního modelu, člunu Benchy boat, jsou zobrazeny na obr. 37, z kterého je patrné, že přesnost geometrie modelu a kvalita povrchu je velmi vysoká. Oblouk tvořící příď je bez zřetelných defektů. Převisy tvořící střechu člunu jsou hladké a také bez defektů.

U druhého modelu, kalibrační krychle, byla hodnocena kvalita povrchu v jednotlivých osách X, Y, Z a detaily zahloubení v příslušných osách. Detaily zahloubení jednotlivých písmen a povrchu kalibrační krychle jsou zobrazeny na obr. 38. Z obr. 38 je patrné, že kvalita povrchu je velmi dobrá a nejsou na ní patrné defekty. Jednotlivé vrstvy jsou pouhým okem těžce pozorovatelné. Avšak došlo k malému smrštění ve spodní části kalibrační krychle, která byla ve styku s vyhřívanou podložkou. To bylo pravděpodobně zapříčiněno příliš nízkou teplotou vyhřívané podložky v kombinaci s použitým materiálem ASA, který je náchylný ke smršťování.

Dále byla hodnocena rozměrová přesnost kalibrační krychle. Měření byly vnější rozměry jednotlivých stěn ve dvou směrech (XZ, YZ a XY), podle orientace stěny. Jednotlivé stěny byly označeny čísly 1 až 6. Stěna 1 je přední (písmeno X), stěna 2 (písmeno Y) a 4 jsou boční, stěna 3 je zadní, stěna 5 je spodní a stěna 6 (písmeno Z) je horní. Měření stěny v jednom směru bylo prováděno vždy třikrát. Rozměry  $L_1$  a  $L_3$  jsou u hran stěny, rozměr  $L_2$  je ve středu stěny. Měření rozměrů stěn bylo provedeno pomocí digitálního posuvného měřítka BMI 760200. Naměřené hodnoty rozměrů kalibrační krychle jsou v tabulce 3.

Posledním model, který byl hodnocen je model vázy zobrazený na obr. 39. V průběhu tisku se na modelu objevily horizontální praskliny, které jsou viditelné na obr. 39. Jedná se o častý jev u tohoto typu modelů. Horizontální praskliny jsou zapříčiněny nerovnoměrným chladnutím modelu. Horní vrstvy chladnou rychleji než vrstvy spodní, to je způsobeno příliš velkým ochlazením čerstvě vytvořených vrstev a nedostatečným ohřevem těchto vrstev z vyhřívané podložky. Vzniklý teplotní rozdíl je příliš veliký a tím dochází ke smršťování materiálů, které vede ke vzniku horizontálních prasklin. Možným řešením tohoto problému je zakrytí tiskárny, čímž vznikne uzavřený tiskový prostor, který půjde rovnoměrněji vyhřát v celém svém objemu. Dalším řešením je možnost snížení objemu proudícího vzduchu, který ochlazuje čerstvě vytvořené vrstvy a zvýšení teploty trysky v řádu jednotek stupňů.

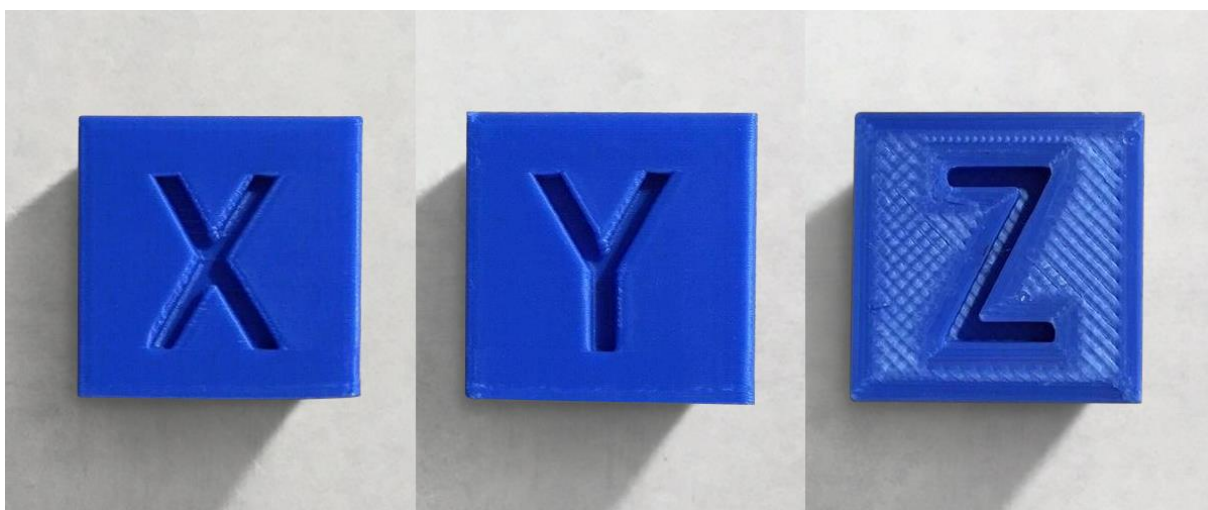
Obrázek 37 Zkušební tisk člun Benchy boat



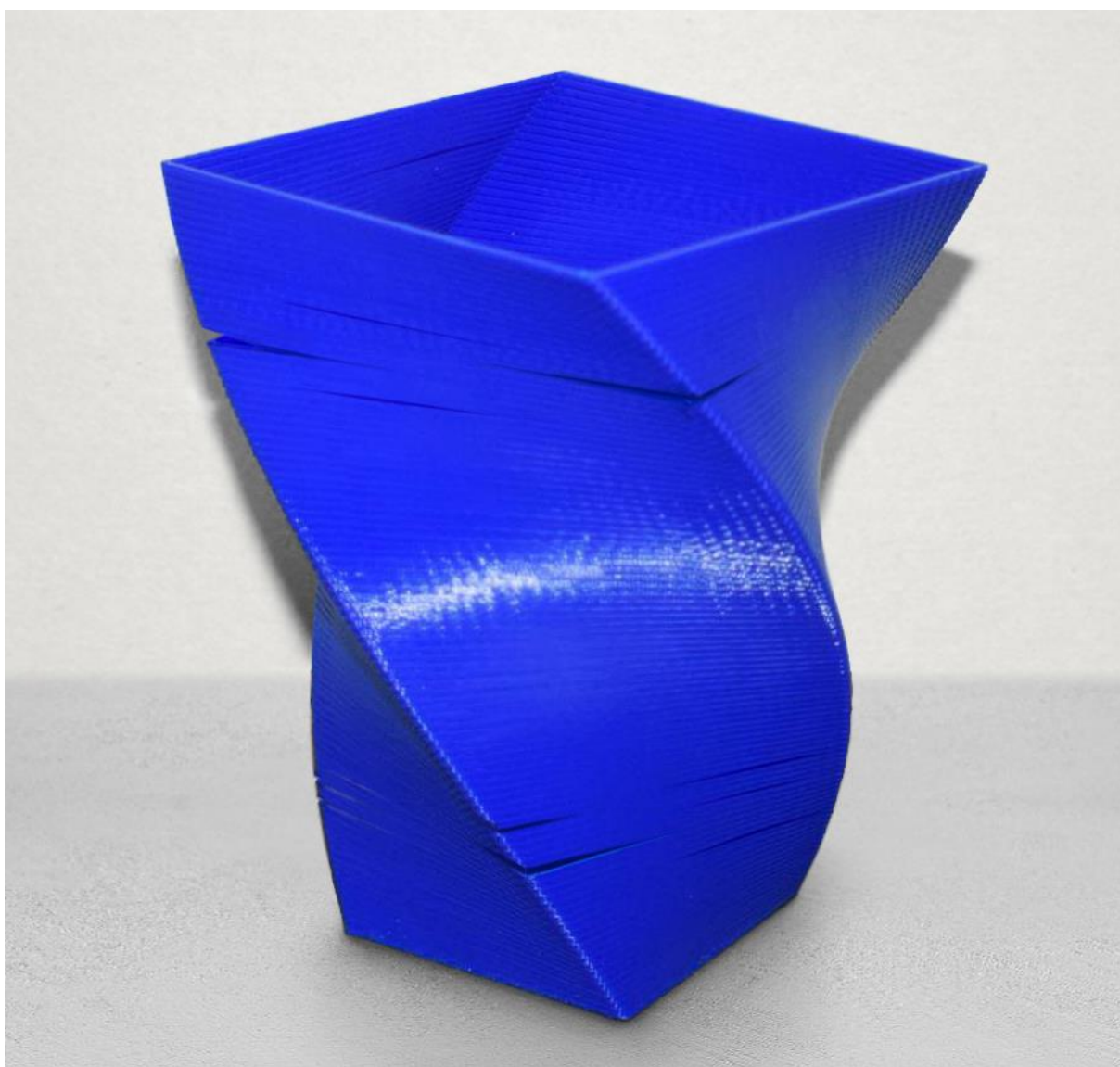
Tabulka 3 Naměřené rozměry kalibrační krychle

Stěna	Směr	L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	L <sub>3</sub> [mm]
1	X	20,15	20,06	20,06
	Z	20,09	19,94	20,10
2	Y	20,12	20,03	20,08
	Z	20,11	19,98	20,00
3	X	21,00	20,02	20,03
	Z	20,54	20,01	20,07
4	Y	20,98	20,12	20,41
	Z	20,34	20,08	20,11
5	X	21,02	20,04	20,07
	Y	20,36	19,94	20,02
6	X	20,03	20,08	20,35
	Y	20,15	20,00	20,17

*Obrázek 38 Zkušební tisk kalibrační krychle 20 x 20 mm*



*Obrázek 39 Zkušební tisk vázy*



## 6.2 Technicko-ekonomické zhodnocení

Jedním z důležitých faktorů, který hodnotí jakýkoliv produkt, či výrobek je jeho cena. V případě domácí stavby navržené FDM 3D tiskárny je započítána pouze cena za nakoupené díly a materiál. Výsledná cena navržené 3D tiskárny je 16 401 Kč.

Do výsledné ceny jednotlivých položek je započítána i cena za dopravu a v případě nákupu ze zahraničí také clo. Celková cena nákladů navržené 3D tiskárny neobsahuje některé drobné součásti jako jsou např. smršťovací bužírka, pájka, spojovací materiál apod., které použil autor z vlastních zásob. Výsledná cena navržené 3D tiskárny by mohla být vyšší za použití součástí lepší kvality, které jsou snadno vyměnitelné. Detailní seznam s cenou jednotlivých součástí je v tabulce 4.

Tabulka 4 Seznam použitých komponent

Položka	Množství [ks]	Specifikace	Cena [Kč]
AL profil kombi 30x30	1	AW EN 6060, 5 795 mm	988
AL profil L 80x80x5	1	AW EN 6060, 500 mm	221
AL výpalky	11	Plech 3 AW EN 5754 H22	1 400
Krokový motor X, Y	2	17HS15-1504S-X1	1 094
Krokový motor Z	1	17LS16-1504E-310J	747
Krokový motor extr.	1	17HS08-1004S	554
Lineární vedení	3	MGN12 400 mm	880
Lineární vedení	2	MGN12 300 mm	990
Pojezdový vozík	5	MGN12H	1 253
HotEnd	1	E3D V6 1,75 mm, universal	2 090
Vyhřívaná podložka	1	Mk3, 215 x 215 mm	519
Řídicí deska + drivery	1	RAMPS 1.4, A4988	199
Elektrický zdroj	1	TLPZ-12-350	880
Podávací kolečka	1	Bondtech klon	312
Řemenice hladká	4	GT2	156
Řemenice ozubená	2	GT2, 16 zubů	120
Řemenice hnací oz.	2	GT2, 16 zubů	102
Trapézová matice	1	Tr8 x 2	79
Indukční senzor	1	P.I.N.D.A v2	339
Radiální ventilátor	1	40 x 40 x 10	149
Koncový spínač	2	Optický	70
Řemen	1	GT2 6 mm, 2 mm	140
AL spojka	2	Ø5 / Ø5	58
Rad. kuličkové ložisko	5	625ZZ	294

PTFE trubička	1	Ø4 / Ø2, 2 m	98
Rohovník vnější	10	3030 T8	379
Rohovník vnitřní	16	3030 T8	494
Hřídel	2	Ø5 mm, 400 mm	44
Napájecí kabel	1	2 m	79
Pružina Heated Bed	4	1,4 x 9,5 x 15 x 6 mm	48
Pružina extrudér	1	0,8 x 4,9 x 15 x 9 mm	35
Distanční sloupek	2	M3 x 35	20
Distanční sloupek	4	M3 x 30	36
Datový kabel, 2 žíly	1	UNITRONIC LIYY, 2 x 0,14 mm <sup>2</sup> , 2 m	45
Datový kabel, 3 žíly	1	UNITRONIC LIYY, 3 x 0,14 mm <sup>2</sup> , 3 m	63
Datový kabel, 4 žíly	1	UNITRONIC LIYY, 4 x 0,14 mm <sup>2</sup> , 6 m	89
Spojovací materiál	-	Nerez A2, M3, M6	1 337
Celkem			16 401

### 6.3 Diskuse

Při stavbě navržené FDM 3D tiskárny bylo zjištěno několik zásadních pozitivních a negativních konstrukčních poznatků.

Mezi pozitivní zjištění patří použití plechových výpalků. Ty disponují velmi dobrou rozměrovou přesností a tvarovou variabilitou v kombinaci s relativně nízkou pořizovací cenou. To umožňuje vytváření tvarově velmi složitých součástí včetně otvorů a drážek bez nutnosti dalších obráběcích operací.

Jako ne příliš vhodné konstrukční řešení se ukázalo použití dlouhých hřídelů k pohonu řemenic. Jedná se o zbytečně komplikované řešení složené z hodně součástí, které by bylo možné nahradit lepším řešením. Tím by mohlo být připevnění krokových motorů k hornímu horizontálnímu plechu z jeho spodní strany. Mezeru pro řemenici mezi plechem a motorem vytvořit pomocí distančních sloupků. V tomto případě by krokové motory přesahovaly v zadní části vnější rozměry konstrukce rámu o 12 mm a zároveň by byly odizolovány od tiskového prostoru.

Další konstrukční řešení, které se během stavby ukázalo jako zbytečná komplikace je spojení vnitřních rohovníků spojujících rám s plechovými výpalky pomocí šroubů M6 se zápusťnou hlavou. Plechové výpalky měly přesnou pozici otvorů pro šrouby, ale vnitřní rohovníky nedisponují příliš přesnými rozměry a při jejich montáži nebylo možné zajistit jejich přesnou polohu vůči otvorům ve výpalcích. Tento problém byl vyřešen vyvrtáním nových otvorů v plechových výpalcích pro jejich fixaci k rámu mimo polohu rohovníků.

Mezi komplikované konstrukční řešení patří i nosná platforma tiskové hlavy složená ze dvou L profilů z hliníkové slitiny nestandardních rozměrů, které byly velmi zdoluhavě a pracně obráběny na frézce. Toto konstrukční řešení funguje, ale je příliš obtížné pro výrobu. Lepší

variantou by mohla být kombinace obrobku a dvou k němu kolmo přišroubovaných plechových výpalků jako je např. na platformě tiskové hlavy pojezdového systému CoreXY od společnosti E3D. Jedná se o hliníkový kvádr, který má stejné, nebo větší vnější rozměry než pojezdový vozík lineárního vedení MGN12H. V horizontálně orientovaném hliníkovém kvádru jsou čtyři svislé otvory pro montáž k pojezdovému vozíku a další horizontální otvory se závitem na delších bočních stěnách kvádru, které slouží k přišroubování plechových výpalků. Výhodou tohoto řešení je obrábění pouze jedné součásti a univerzálnost umožňující připevnění více různých tvarů výpalků podle potřeby. [49]

Během návrhu 3D tiskárny bylo zvoleno několik levnějších variant součástí, které bude možné v budoucnu jednoduše a bez komplikované demontáže vyměnit. Tím je např. lineární vedení vyšší kvality. Nabízí se použití lineárního vedení od společnosti HIWIN, které je špičkou v této oblasti. Avšak pro použití na této tiskárně se jedná o příliš nákladné řešení, které nevyužije svůj plný potenciál. Ideální variantou je možnost použití lineárního vedení od společnosti Zyltech, nebo MiSUMi, které disponují dostatečnou kvalitou a přijatelnou cenou.

Další skupinou komponent, které bude možné jednoduše vyměnit, jsou elektronické součásti. Především řídicí deska a drivery, které mají přímý vliv na vlastnosti tisku. Vhodná by byla 32-bitová řídicí deska s procesorem pracujícím na vyšší frekvenci. Výměna driverů, např. TMC2130, by umožnila výrazně tišší tisk a možnost využití funkce Endstopless Homing, která umožňuje chod tiskárny bez fyzických koncových snímačů. Dalším možným elektronickým rozšířením navržené tiskárny by mohl být počítač Raspberry Pi, který umožňuje bezdrátové ovládání tiskárny skrz webovou aplikaci Octoprint. Poslední elektronickou součástí, kterou by bylo možné nahradit stávající indukční snímač použité v ose Z, je velmi populární mechanický koncový spínač BLTouch od společnosti Antclabs. Výhodou oproti indukčnímu snímači je jeho funkce na jakémkoliv povrchu. Proto je možné použít na vyhřívanou podložku skleněnou desku, kterou není indukční snímač ze své podstaty schopný detekovat.

## 7 Závěr

Tématem této práce bylo navrhnout, vyrobit a zprovoznit FDM 3D tiskárnu a pomocí zkušebnímu tisku ověřit její funkčnost a kvalitu tisku.

V první části práce je stručně popsána historie technologie 3D tisku, její současný stav a pravděpodobné směřování vývoje této technologie. Podrobněji je zde popsáno sedm základních metod technologie 3D tisku a nejpoužívanější polymerní materiály využívané metodou FDM. V závěru teoretické části jsou shrnuty a stručně popsány základní typy konstrukcí a jednotlivých konstrukčních částí FDM 3D tiskáren.

Praktická část této práce je zaměřena na detailní návrh řešení FDM 3D tiskárny. V jednotlivých podkapitolách jsou popsána konstrukční řešení hlavních částí tiskárny a v některých případech jsou doplněna o výpočty a pevnostní analýzy za účelem ověření těchto řešení. Na konci praktické části je vysvětlena metodika zkušebnímu tisku, který byl proveden.

Hodnoceny byly výtisky ze třech odlišných materiálů, kterými byly PLA, ASA a PET-G, a různých vstupních parametrů zkušebnímu tisku. Zhodnocen byl celkový vzhled vytištěných součástí a jejich povrch. Byly zvoleny tři odlišné modely zkušebnímu tisku, které dobře charakterizují jednotlivé skupiny běžně tisknutých součástí, nebo typů geometrií. Zvolenými součástmi byly člun Benchy boat, malá kalibrační krychle a zkroucená váza.

Celková kvalita výtisku člunu Benchy boat dosažená během zkušebnímu tisku je velmi dobrá a neobsahuje žádné zásadní defekty.

Pro ověření rozměrové přesnosti tisku na navržené 3D tiskárně bylo provedeno měření vnějších rozměrů kalibrační krychle. Naměřené rozměry této součásti se od 3D modelu liší pouze v řádech desetin milimetrů.

Během zkušebnímu tisku poslední součásti, zkroucené vázy, došlo ke vzniku horizontálních prasklin, které se u těchto modelů mohou objevovat. Zamezení vzniku takovýchto prasklin by bylo možné vhodným zakrytáváním tiskárny, čímž by se tiskový prostor mohl lépe vyhrát, popřípadě úpravou teploty Hotendu a vyhřívání podložky spolu s optimálním ochlazováním výtisku během tisku.

Zkušební tisk potvrdil dobrou funkčnost a kvalitu navržené tiskárny i přes některá komplikovaná konstrukční řešení, které se během stavby objevila. Vhodným přístupem ke stavbě, nejen 3D tiskáren, je snaha o co největší zjednodušení navrženého řešení, popřípadě nalezení kompromisu mezi požadavky na stroj či zařízení a náročností na jejich výrobu nebo kompletaci.

Dobrým konstrukčním řešením se ukázaly plechové výpalky, které se také stále častěji vyskytují na levných komerčních a domácích tiskárnách. Autor při zpracování práce získal mnoho cenných konstrukčních zkušeností a hlubší porozumění technologii 3D tisku, které bude moci využít v budoucím zaměstnání a při stavbě další 3D tiskárny, kterou do budoucna plánuje.

Výsledná cena navržené tiskárny není příliš vysoká, vyšla na 16 401 Kč. Takovéto ceny se dosáhlo především přístupem k návrhu a stavbě s možností budoucího vylepšování jednoduše

vyměnitelných dílů. Těmito díly jsou především elektronické součásti, lineární vedení, zakrytování a komponenty tiskové hlavy.

V této práci je názorně demonstrováno, že je možné vyrobit kvalitní FDM 3D tiskárnu za použití vhodné konstrukce, volby materiálu a relativně nízké ceny na úkor obětovaného času a energie potřebných k jejímu zprovoznění. U komerčních tiskáren toto dodatečné nastavování není většinou zapotřebí.



## 8 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Our Story / 3D Systems* [online]. 2019 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>
- [2] GRIMM, Todd. *User's Guide to Rapid Prototyping*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers; illustrated edition, 2004. ISBN 0872636976.
- [3] BERMAN, Barry. 3-D printing: The new industrial revolution. *Elsevier Science B.V., Amsterdam*. 2012, **55**(2), 155–162. ISSN 00076813.
- [4] LIGON, Samuel Clark, Robert LISKA, Jürgen STAMPFL, Matthias GURR a Rolf MÜLHAUPT. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*. 2017, **117**(15), 10212–10290.
- [5] SUN, Jian a Fu-Qiang ZHANG. The Application of Rapid Prototyping in Prosthodontics. *Journal of Prosthodontics*. 2012, **21**(8), 641–644. ISSN 1059941X.
- [6] TYLER, Betty, David GULLOTTI, Antonella MANGRAVITI, Tadanobu UTSUKI a Henry BREM. Polylactic acid (PLA) controlled delivery carriers for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2016, **107**, 163–175. ISSN 18728294.
- [7] BANDYOPADHYAY, Amit, Susmita BOSE a Suman DAS. 3D printing of biomaterials. *MRS Bulletin*. 2015, **40**(2), 108–114. ISSN 08837694.
- [8] HAGER, Izabela, Anna GOLONKA a Roman PUTANOWICZ. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? In: *Procedia Engineering*. B.m.: Elsevier Ltd, 2016, s. 292–299. ISSN 18777058.
- [9] JAGODA, Jeneé, Brandy DIGGS-MCGEE, Megan KREIGER a Steven SCHULDT. The Viability and Simplicity of 3D-Printed Construction: A Military Case Study. *Infrastructures*. 2020, **5**(4), 35. ISSN 2412-3811.
- [10] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: Principles and applications: The 5th edition of rapid prototyping: Principles and applications*. 5th Revise. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2017. ISBN 9789813149274.

- [11] SHAH, J., B. SNIDER, T. CLARKE, S. KOZUTSKY, M. LACKI a A. HOSSEINI. Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, **104**(9–12), 3679–3693. ISSN 14333015.
- [12] AZIMI, Parham, Dan ZHAO, Claire POUZET, Neil E. CRAIN a Brent STEPHENS. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. *Environmental Science and Technology*. 2016, **50**(3), 1260–1268. ISSN 15205851.
- [13] CHAN, F. L., R. HOUSE, I. KUDLA, J. C. LIPSZYC, N. RAJARAM a S. M. TARLO. Health survey of employees regularly using 3D printers. *Occupational Medicine*. 2018, **68**(3), 211–214. ISSN 14718405.
- [14] HOROWITZ, Michael C. Coming next in military tech. *Bulletin of the Atomic Scientists*. 2014, **70**(1), 54–62. ISSN 19383282.
- [15] MCCREA, John P., Carl R. HARTSFIELD a Joshua CERRI. Design of a zero-gravity, vacuum-based 3D printer robot for use of in-space satellite assembly. In: *AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018*. B.m.: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2018. ISBN 9781624105241.
- [16] HIRSCH, Michael a Jeremy STRAUB. Development and design evolution of an in-space 3D printer. In: *AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, SPACE 2017*. B.m.: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2017. ISBN 9781624104831.
- [17] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 8021314427.
- [18] MARK E., James. *Physical Properties of Polymers Handbook*. B.m.: Springer New York, 2007. ISBN 978-0-387-69002-5.
- [19] *Materiály - Prusa Research a.s.. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši* [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>

- [20] DUCHÁČEK, Vratislav. *POLYMERY Výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 3. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2011. ISBN 80-7080-617-6.
- [21] WANG, Xin, Man JIANG, Zuowan ZHOU, Jihua GOU a David HUI. *3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective*. B.m.: Elsevier Ltd. 2017. ISSN 13598368
- [22] LIU, Bin, Yuxiang WANG, Ziwei LIN a Tao ZHANG. Creating metal parts by Fused Deposition Modeling and Sintering. *Materials Letters*. 2019. ISSN 18734979.
- [23] SUN, Jie, Weibiao ZHOU, Dejian HUANG a Liangkun YAN. 3D food printing: Perspectives. In: *Polymers for Food Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 725–755. ISBN 9783319946252.
- [24] ČSN EN ISO/ASTM 52900:2015, *Aditivní výroba - Obecné zásady - Terminologie*. 2015
- [25] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. Boston, MA: Springer US, 2010. ISBN 9781441911193.
- [26] ALL3DP. *2019 Types of 3D Printing Technology* [online]. 2019 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [27] *Sheet Lamination | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>
- [28] CARLOTA V. *The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing* [online]. 2019 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
- [29] *History of 3D Printing | Stratasys* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/explore/article/3d-printing-history>
- [30] ROSENBERG, NEIL. *DESIGNING 3D PRINTERS: essential knowledge*. 2019. ISBN 1082381861.

- [31] *V6 All-Metal HotEnd / E3D Online* [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/v6-all-metal-hotend>
- [32] LEINVEBER, Jan. a Pavel. VÁVRA. *Strojnické tabulky : pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4. dopl. v. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 9788073610517.
- [33] POLMEAR, Ian, David STJOHN, Jian-Feng NIE a Ma QIAN. Titanium Alloys. In: *Light Alloys*. B.m.: Elsevier, 2017, s. 369–460.
- [34] *Bowden Vs Direct: Quest for the Best 3D Printer Extruder* [online]. [cit. 2020-01-09]. Dostupné z: <https://3dprinterpower.com/bowden-extruder-vs-direct-extruder-showdown/>
- [35] *Heated Bed - RepRap* [online]. [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: [https://reprap.org/wiki/Heated\\_Bed](https://reprap.org/wiki/Heated_Bed)
- [36] PRUSA, Josef. PCB Heatbed. <http://reprap.org> [online]. 2016 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: [https://reprap.org/wiki/PCB\\_Heatbed](https://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed)
- [37] *High Temperature Heated Beds / E3D Online* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/high-temperature-heated-beds>
- [38] SANLADERER, Thomas. *The E3D Factory Tour! - YouTube* [online]. 6. prosinec 2018 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=0QTocb3wa5k>
- [39] JONES, Rhys, Patrick HAUFE, Edward SELLS, Pejman IRAVANI, Vik OLLIVER, Chris PALMER a Adrian BOWYER. Reprap - The replicating rapid prototyper. *Robotica*. 2011, **29**(1 SPEC. ISSUE), 177–191. ISSN 02635747.
- [40] *Darwin - RepRap* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/Darwin>
- [41] *Prusa i3 MK3 MM - PrusaLab* [online]. [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://prusalab.cz/portfolio-item/prusa-i3-mk3-mm/>
- [42] *Ultimaker 3: Complex 3D prints made easy* [online]. [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-3>

- [43] *F370 3D Printer: Making Industrial 3D Printing More Accessible* / *Stratasys* [online]. [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/3d-printers/f370>
- [44] 3MF CONSORTIUM. *Specification - 3MF* [online]. 2018 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://3mf.io/specification/>
- [45] *Support for reverse x-axis direction of H-bot is needed.* · *Issue #2587* · *MarlinFirmware/Marlin* · *GitHub* [online]. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin/issues/2587>
- [46] *ALFUN - hlinik* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/hlinik>
- [47] *Úzký vozík MGN | hiwin.cz* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: [https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/miniaturni-vedeni/236\\_uzky-vozik-mgn](https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/miniaturni-vedeni/236_uzky-vozik-mgn)
- [48] *Configuring Marlin | Marlin Firmware* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://marlinfw.org/docs/configuration/configuration.html>
- [49] *E3D ToolChanger & Motion System | E3D Online* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/e3d-toolchanger-motion-system-full-kit>

## 9 Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Význam
3D	Třídimensionální
3MF	3D Manufacturing Format
ABS	Akrylonitril butadien styren
AM	Additive Manufacturing
ASA	Akrylonitril styren akrylátu
ASTM	American Society for Testing and Materials
C++	Programovací jazyk
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
CoreXY	Pojezdový systém
COVID 19	Coronavirus disease 19
D-bot	Pojezdový systém
DLMS	Direct Laser Metal Sintering
DLP	Digital Light processing
DOD	Drop on Demand
E3D	Název společnosti
EBAN	Electron Beam Additive Manufacturing
EBM	Electron Beam Melting
EN AW	Označení hliníkové slitiny
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
GT2	Označení ozubeného řemene
GT3	Označení ozubeného řemene
H-bot	Pojezdový systém
ISO	International Organization for Standardization
ISS	International Space Station
LCD	Liquid Crystal Display
LDW	Laser Deposition Welding
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MBJ	Metal Binder Jetting
MGN12	Označení lineárního vedení
MGN12H	Označení vozíku lineárního vedení
MJ	Material Jetting

MK3	Mark 3
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NC	Numerical Control
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PCB	Printed Circuit Board
PCL	Polykaprolakton
PEI	Polyeterimid
PET	Polyetyléntereftalát
PET-G	Polyetyléntereftalát glykol
PLA	Polylactic Acid
PVA	Polyvinyl alkohol
RAMPS	Reprap Arduino Mega Pololu Shield
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
RP	Rapid Prototyping
s.r.o.	S ručením omezeným
SBJ	Sandstone Binder Jetting
SCARA	Selective Compliance Assembly Robotic Arm
SLA	Stereolithografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography
T5	Označení ozubeného řemene
T-bot	Pojezdový systém
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultra fialové
V6	Verze 6

Symbol	Jednotka	Popis
$\alpha_k$	[°]	Velikost kroku
$\alpha_{k1,2}$	[°]	Velikost kroku
C	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita
$\Delta x$	[mm]	Přírůstek v ose X
$\Delta y$	[mm]	Přírůstek v ose Y
F <sub>1</sub>	[N]	Zatížení tiskové podložky
F <sub>1xy</sub>	[N]	Síla v jedné ose
F <sub>2xy</sub>	[N]	Síla v jedné ose

$F_{th}$	[N]	Tíha tiskové hlavy
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$G$	[N]	Tíha pojezdu
$k$	[-]	Počet kroků
$k_m$	[-]	Mikro-krokování 1/16
$L_1$	[mm]	Rozměr stěny
$L_{1Mxy}$	[mm]	Minimální posuv v jedné ose s mikro-krokováním
$L_{1xy}$	[mm]	Minimální posuv v jedné ose
$L_2$	[mm]	Rozměr stěny
$L_{2xy}$	[mm]	Minimální posuv v jedné ose
$L_3$	[mm]	Rozměr stěny
$M_1$	[Nm]	Moment v rovině YZ
$m_{hb}$	[kg]	Hmotnost vyhřívané podložky
$M_m$	[N·m ]	Moment motoru
$m_p$	[kg]	Hmotnost pojezdu v ose Z
$m_{th}$	[kg]	Hmotnost tiskové hlavy
$m_{vt}$	[kg]	Maximální teoretická hmotnost výtisku
$P$	[mm]	Rozteč
$\pi$	[-]	Konstanta
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota
$r_{\dot{r}}$	[mm]	Průměr řemenice
$R_y$	[N]	Reakce v ose Y
$R_z$	[N]	Reakce v ose Z
$T_f$	[°C]	Teplota viskózního toku
$T_g$	[°C]	Teplota skelného přechodu
$T_m$	[°C]	Teplota tavení
$X$	[-]	Osa X
$XY$	[-]	Rovina XY
$XZ$	[-]	Rovina XZ
$Y$	[-]	Osa Y
$y_1$	[mm]	Rozměr v ose Y
$y_2$	[mm]	Rozměr v ose Y
$y_3$	[mm]	Rozměr v ose Y
$YZ$	[-]	Rovina YZ
$Z_k$	[-]	Počet kroků
$Z_{min}$	[mm]	Minimální posuv s mikro-krokováním



## 10 Seznam obrázků

Obrázek 1 Průběhy závislosti modulu pružnosti polymerů na teplotě, 1- amorfní, 2- semi-krystalické, 3- síťované .....	6
Obrázek 2 Princip metody Material Extrusion .....	12
Obrázek 3 Princip metody Vat Polymerization .....	13
Obrázek 4 Princip metody Powder Bed Fusion .....	14
Obrázek 5 Princip metody Material Jetting .....	15
Obrázek 6 Princip metody Binder Jetting .....	16
Obrázek 7 Princip metody Sheet Lamination.....	17
Obrázek 8 Princip metody Direct Energy Depositing .....	17
Obrázek 9 Rozložená sestava Hotendu V6 od společnosti E3D .....	19
Obrázek 10 Schéma nepřímé (vlevo) a přímé (vpravo) extruze.....	21
Obrázek 11 Schéma kartézské konstrukce .....	26
Obrázek 12 Schéma Delta konstrukce .....	27
Obrázek 13 Schéma konstrukce Polar (vlevo) a konstrukce SCARA (vpravo) .....	28
Obrázek 14 První exemplář RepRap FDM 3D tiskárny Darwin.....	30
Obrázek 15 FDM 3D tiskárna Prusa i3 MK3 .....	31
Obrázek 16 FDM 3D tiskárna Ultimaker 3 (vlevo) a Stratasys F370 (vpravo) .....	32
Obrázek 17 Schéma jevu „stair stepping“ .....	34
Obrázek 18 Navržená FDM 3D tiskárna .....	35
Obrázek 19 Systémový profil kombi 30 x 30 mm.....	37
Obrázek 20 Rámová konstrukce zepředu (vlevo) zezadu (vpravo).....	38
Obrázek 21 Schéma klasického pojezdového systému v rovině XY .....	39
Obrázek 22 Schéma pojezdového systému H-bot v rovině XY .....	40
Obrázek 23 Pojezdový systém v rovině XY.....	42
Obrázek 24 Pojezd osy X .....	43
Obrázek 25 Vstupní parametry analýzy pojezdu v ose X .....	44
Obrázek 26 Maximální průhyb pojezdu osy X.....	44
Obrázek 27 Napínací mechanismus řemene (vlevo) řez napínacího mechanismu řemene (vpravo).....	45
Obrázek 28 Pohony pojezdového systému v rovině XY .....	45
Obrázek 29 Konstrukce pojezdu osy Z .....	46
Obrázek 30 Schéma pojezdu v rovině YZ.....	48

Obrázek 31 Vstupní parametry analýzy konstrukce pojezdu Z.....	50
Obrázek 32 Maximální průhyb konstrukce pojezdu osy Z .....	50
Obrázek 33 Navržená tisková hlava .....	51
Obrázek 34 Navržená tisková hlava s přímou extruzí (vlevo) a nepřímou extruzí (vpravo) ...	52
Obrázek 35 Řez navrženým extrudérem .....	53
Obrázek 36 Schéma zapojení řídicí desky: 1) Řídicí deska RAMPs 1.4, 2) 12V El. zdroj, 3) Vyhřívaná podložka, 4) Display 5) Motor X, 6) Motor Y, 7) Motor Z, 8) Motor extrudér, 9) 12V topné těleso Hotend, 10) Termistor Hotend, 11) Termistor vyhřívaná podložka, 12) Koncový optický spínač X, 13) Koncový optický spínač Y, 14) Indukční snímač Z, 15) Ventilátor Hotend, 16) Ventilátor tiskového prostoru .....	54
Obrázek 37 Zkušební tisk člun Benchy boat .....	58
Obrázek 38 Zkušební tisk kalibrační krychle 20 x 20 mm.....	59
Obrázek 39 Zkušební tisk vázy .....	59

## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1 Fyzikální vlastnosti kovových materiálů používaných pro výrobu Hotendu.....	20
Tabulka 2 Vstupní parametry zkušebnímu tisku .....	56
Tabulka 3 Naměřené rozměry kalibrační krychle .....	58
Tabulka 4 Seznam použitých komponent.....	60