



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH 3D TISKÁRNY S DVOJICÍ TISKOVÝCH HLAV

DESIGN OF 3D PRINTERS WITH A PAIR OF PRINTHEADS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Halamíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Lukáš Halamíček
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

Návrh 3D tiskárny s dvojicí tiskových hlav

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte řešení 3D tiskárny pro technologii FDM osazenou dvojicí tiskových hlav. Tiskový materiál (PLA, ABS, PVA, atd.). Pracovní prostor zařízení min. 200x200x200 mm.

Cíle diplomové práce:

1. Důkladná analýza problematiky.
2. Návrh variant řešení.
3. Konstrukční návrh vybrané varianty – 3D model.
4. Výpočtová dokumentace včetně dimenzování hlavních částí.
5. Výkresová dokumentace vybraných uzlů.

Seznam doporučené literatury:

PRŮŠA, Josef. Základy 3D tisku [online]. 1. Praha: Pusa Research s.r.o., 2014 [cit. 2016-09-30]. Dostupné z: <http://www.pusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>

SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE a Richard BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. Brno: Naladatelství VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem FDM 3D tiskárny s možností tisku více materiálů. V první části práce je popsána současná situace na trhu a možné principy více materiálového tisku. V další části jsou navrženy možné varianty jednotlivých konstrukčních uzlů a poté je vybraná varianta zpracována do konstrukčního řešení. Přínosem práce je návrh řešení automatické výměny tiskových hlav, kterou se výrobci tiskáren prakticky nevěnují.

ABSTRACT

The master thesis deals with design of multi material FDM 3D printer. In the first part, current market situation and possible principles of multi material printing are described. Possible variants of individual construction nodes are described in the next part and then the selected variant is processed into a design solution. The benefit of this thesis is a proposal of solution for the automatic printing head exchange, which is practically not concerned by printer manufacturers.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, FDM, více materiálový tisk, automatická výměna tiskových hlav, Rapid Prototyping

KEYWORDS

3D Printing, FDM, multi material printing, automatic printing head exchange, Rapid Prototyping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HALAMÍČEK, L. *Návrh 3D tiskárny s dvojicí tiskových hlav*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2017, 116 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Pavlíkovi Ph.D. za cenné rady, strávený čas a ochotu při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině a přítelkyni za trvalou podporu během studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Pavlíka Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22.5.2017

.....

Halamiček Lukáš

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	TEORIE 3D TISKU	17
2.1	Technologie 3D tisku.....	18
2.1.1	Stereolitografie (SLA)	18
2.1.2	Selective laser melting (SLM).....	19
2.1.3	Binder jetting.....	21
2.1.4	MultiJet Modeling (MJM).....	22
2.1.5	Fused deposition modeling (FDM).....	24
2.2	Materiály pro tisk technologií FDM	26
2.2.1	Standartní tiskové materiály.....	26
2.2.2	Materiály pro tisk podpěr.....	29
2.2.3	Pružné materiály	30
3	SOUČÁSTI TISKÁRNY TYPU FDM.....	31
3.1	Polohování tiskové hlavy	32
3.1.1	Polohování hlavy XY, podložka Z	32
3.1.2	Polohování hlavy v XZ, podložky v Y	33
3.1.3	Polohování hlavy v XYZ	34
3.2	Rám.....	34
3.3	Hot end.....	36
3.4	Extrudér.....	38
3.5	Vyhřívaná podložka.....	40
4	TISK VÍCE MATERIÁLŮ	43
4.1	Jediná tisková hlava.....	44
4.1.1	Samostatné trysky.....	44
4.1.2	Jedna společná tryska.....	46
4.2	Více tiskových hlav	47
4.2.1	Výměna tiskových hlav.....	48
5	PŘEHLED 3D TISKÁREN NA TRHU.....	53
5.1	BCN3D Sigma.....	53
5.1.1	Sériová kinematika	54
5.1.2	Zdvih osy Z	55
5.1.3	Doprava struny	56
5.1.4	Rám.....	56
5.2	Ultimaker 2+.....	57
5.2.1	Kinematika Ultimaker.....	57
5.2.2	Osa Z.....	59
5.2.3	Podávání filamentu	60
5.2.4	Rám.....	61
5.3	CraftBot Plus	62
5.3.1	Paralelní kinematika – CoreXY	62
5.3.2	Osa Z.....	63
5.3.3	Podávání struny	63
5.3.4	Rám.....	63
5.4	MakerBot Replicator+	64
5.4.1	Paralelní kinematika – HBot	64

5.4.2	Osa Z.....	65
5.4.3	Extrudér tiskárny	65
5.4.4	Rám.....	65
5.5	Porovnání vlastností tiskáren.....	66
6	NÁVRH TISKÁRNY	67
6.1	Mechanismus polohování osy X, Y.....	68
6.1.1	Vedení os.....	69
6.1.2	Pohon osy	70
6.2	Zdvih osy Z.....	70
6.3	Řešení tiskové hlavy	71
6.3.1	Návrh varianty s permanentními magnety	73
6.4	Nakupované komponenty.....	75
6.4.1	Hot End	75
6.4.2	Extrudér.....	75
6.4.3	Vyhřívaná podložka.....	76
6.4.4	Řídící elektronika.....	76
7	ŘEŠENÍ KONSTRUKČNÍCH UZLŮ	77
7.1	Polohovací mechanismus osy X, Y	77
7.1.1	Konstrukce osy	77
7.1.2	Dimenzování pohonů	79
7.2	Polohování osy Z	85
7.2.1	Návrh platformy.....	85
7.2.2	Návrh pohonů	88
7.3	Výměna tiskových hlav.....	93
7.3.1	Návrh permanentních magnetů.....	93
7.3.2	Upínání hlavy	96
7.3.3	Konstrukce hlavy	97
7.3.4	Extrudér.....	97
7.4	Návrh rámu.....	98
7.5	Krytování.....	98
8	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	101
8.1	Shrnutí konstrukční části.....	101
8.2	Ekonomické zhodnocení konstrukce	102
9	ZÁVĚR.....	103
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	105
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	109
11.1	Seznam tabulek.....	109
11.2	Seznam obrázků.....	109
12	SEZNAM PŘÍLOH	115

1 ÚVOD

3D tiskárna je zařízení sloužící k výrobě dílů některou z metod aditivní výroby. Součást je vytvářena postupně po malých částech a výhodou je minimální množství odpadu. Tyto technologie již 30 let pronikají do průmyslové výroby a našli si místo i v domácnostech. Pro jistou náročnost obsluhy, jsou nicméně pořád ještě parketou spíše nadšenců a modelářů.

Technologií 3D tisku je mnoho a mohou být založené na různých fyzikálních principech. Některé využívají spékání prášků, vytvrzování světlo citlivých kapalin nebo tavení plastů. Proto je také možné využít velkou škálu materiálů pro tvorbu součástí – kovové prášky, keramiku, plasty, čokoládu a jiné.

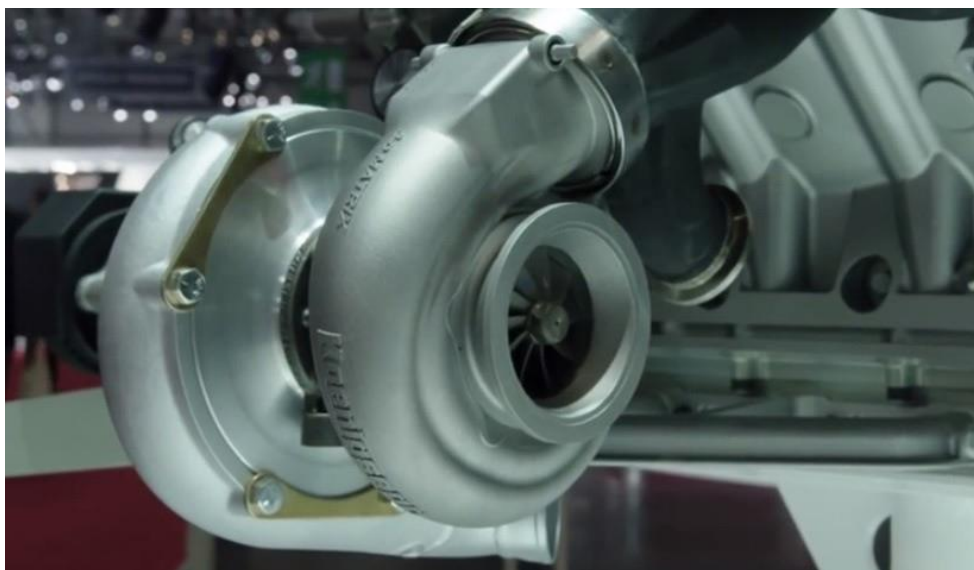
V práci bude vytvořen návrh 3D tiskárny s technologií FDM, která součásti vytváří tavením plastového vlákna, nanášením taveniny po definované trase na podložku a tím vytvoří vrstvu součástí. Hotový výrobek se skládá z několika desítek i stovek takových vrstev. Je možné tisknout i více barevné modely, nebo výrobky složené z několika druhů plastů.

Výrobci tiskáren postupně doplňují své modely o další trysky pro umožnění barevných výtisků, nicméně většina variant zvyšuje hmotnost tiskové hlavy, což je příčinou snížení maximální rychlosti tisku. Dalším problémem je plýtvání materiálem na různé podpůrné a ochranné konstrukce pro kvalitní více materiálový výtisk. To je jednak neekonomické a neekologické, ale především to zvyšuje tiskový čas.

Cílem této práce je vytvoření návrhu 3D tiskárny pro technologie FDM s možností tisku více materiálů. Tiskárna by měla splňovat standardní kvalitativní parametry jako obdobné výrobky na trhu a měla by mít přidanou hodnotu v podobě rychlého tisku s 2 nebo více materiály.

2 TEORIE 3D TISKU

Technologie 3D tisku je poměrně nová metoda výroby součástí, kdy je vstupní materiál přeměňován na hotový produkt, za pomoci různých fyzikálních principů, téměř bez odpadního materiálu. V závislosti na konkrétní technologii je možno vyrábět součásti neobvyklých tvarů s různorodou vnitřní strukturou, kterou není možné vyrobít jinými konvenčními metodami. Nevýhodou je obecně především vysoká cena a relativně dlouhé výrobní časy. Tyto vlastnosti určují hlavní využití 3D tisku v současnosti, a to především výrobu prototypů, designérských modelů, součástí se složitými vnitřními strukturami, využití pro tisk součástí „na míru“ (zejména v lékařských aplikacích) a mnohé další způsoby využití (příklad využití na obrázku 1).



Obr. 1) Turbodmychadlo firmy Koenigsegg vytištěné na 3D tiskárně [5]

Historie 3D tisku se začala psát v 80. letech 20. století, kdy nejprve japonský tým okolo Hideo Kodami položil základy pro Rapid Prototyping¹ technologie a následně v roce 1986 byl v USA udělen patent na první 3D tiskárnu typu SLA Charlesi Hullovi. V následujících 30 letech se rozvinula řada technologií tisku a dnes je již možné koupit si tiskárnu i se softwarem pro domácí použití. Nicméně využití doma ještě naráží na řadu překážek a je vhodná spíše pro technicky nadanou obsluhu.

Tvorba 3D výtisku sestává ze dvou fází. Nejprve je potřeba připravit 3D model na počítači a ve speciálním softwaru jej nachystat pro použití v tiskárně. Poté následuje samotný tisk, kdy u některých metod ještě následují dokončovací operace (např. čištění výrobku, povrchová úprava). Tisknout je možné velkou škálu materiálů jako jsou plasty, kovy, keramika, písky, dokonce i jídlo a neustále se objevující nové materiály využitelné v 3D tisku. Záleží pouze na použité technologii [1], [5].

¹ Rapid Prototyping – volně přeloženo jako Rychlý návrh prototypů, je označení souboru technologií sloužícímu k rychlému vytvoření modelů a funkčních prototypů. Zahrnuje odvětví jako 3D tisk, 3D skenování objektů a jiné. [2]

2.1 Technologie 3D tisku

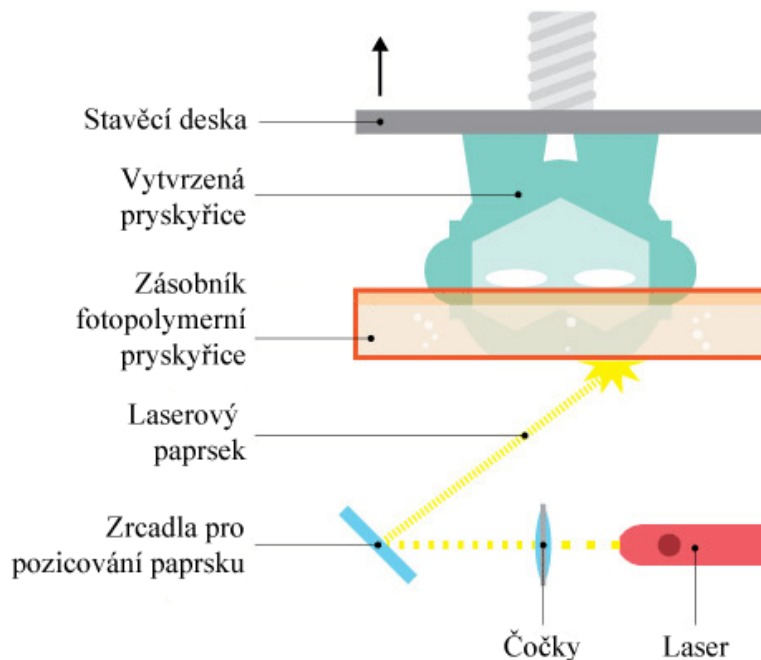
3D tisk je možné charakterizovat jako postup výroby, kdy součást vzniká postupným nanášením vrstev materiálu a jejich spojováním za působení fyzikální či chemické interakce (např., působením tepla, nanášením lepidla, vytvrzováním UV světlem, atd.). Technologie je možno podle principu výroby dílu rozdělit do 7 kategorií²:

- Vat photopolymerization (Vytvrzování fotopolymery)
- Material extrusion (Vytlačování materiálu)
- Material jetting (Tryskání materiálu)
- Binder jetting (Tryskání plnidla)
- Powder bed fusion (Tavení prášku)
- Direct energy deposition (Přímé působení energie)
- Sheet lamination (Laminování listů)

V následujících odstavcích jsou stručně popsány zástupci některých technologií. V celé kapitole 2.1 bylo čerpáno ze zdrojů [1], [5].

2.1.1 Stereolitografie (SLA)

Jde o nejstarší technologii výroby 3D tisku. Využívá se zde principu vytvrzování fotopolymerní pryskyřice pomocí laserového paprsku. Stavba modelu začíná na stavěcí desce, která je ponořena do pryskyřice. Pomocí laseru je vytvrzena první vrstva součásti a následně se deska posune ve směru osy Z o tloušťku vrstvy. Tento postup se opakuje až do vytvrzení celého modelu (obrázek 2).



Obr. 2) Schéma SLA technologie [5]

² Vzhledem ke skutečnosti, že je 3D tisk poměrně moderní a většina pojmů nemá český ekvivalent, je ponechán původní anglický název technologie s uvedením volného překladu (platí obecně pro celou práci).

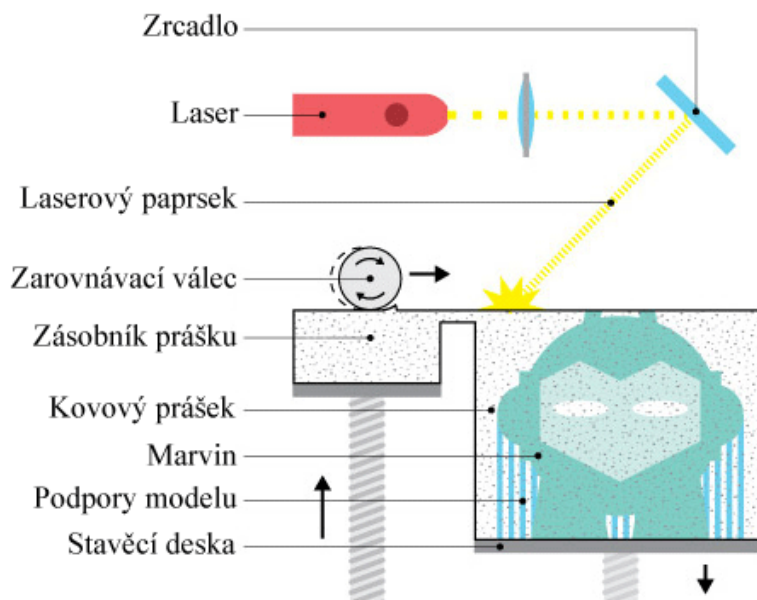
Metoda SLA je považována za jednu z nejpřesnějších metod 3D tisku s dobrou kvalitou povrchu. Vzhledem k ceně pryskyřice a dlouhé době vytváření modelu je vhodná spíše pro tisk menších součástí a prototypů (obrázek 3) [1], [5].



Obr. 3) Ukázka tisku SLA technologií [5] a) šperkařský průmysl, b) tisk funkční planetové převodovky

2.1.2 Selective laser melting (SLM)

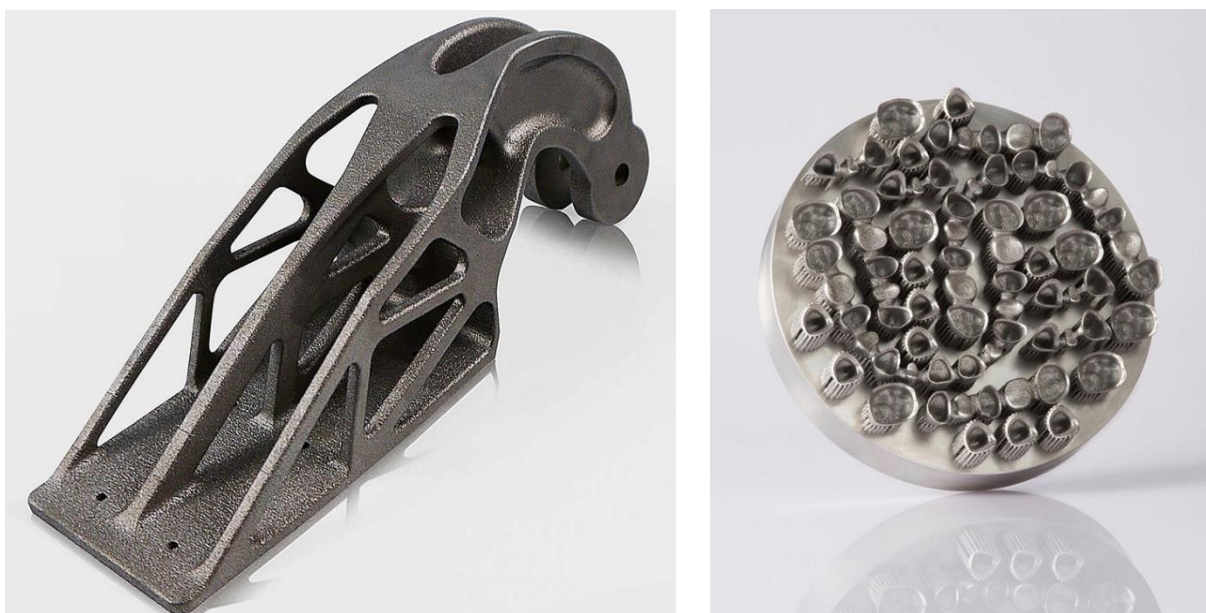
Princip metody spočívá v nanesení vrstvy prášku na podkladovou desku a následném vytavení pomocí paprsku. Následně deska sjede o tloušťku vrstvy níže a na hotovou vrstvu je válcem zarovnána nová vrstva kovového prášku (na obrázku 4). Zařízení je uzavřeno v komoře, kde se udržuje teplota potřebná ke správnému a rychlému tavení a spékání prášku.



Obr. 4) Schéma SLM technologie [5]

Principiálně stejnou technologií je i SLS – Selective laser sintering, která však neslouží k tavení kovových prášků, ale využívá plasty (především nylon). Rozdíl je hlavně ve využití méně výkonného laseru a nižší teploty ve vyhřívané komoře.

Technologie spékání kovových prášků laserem je jednou z nejpoužívanějších (spolu s EBM³) metod pro tvorbu kovových součástí (obrázek 5). Využívá se nejčastěji v leteckém, automobilním průmyslu a také ve zdravotnictví. Součásti vytvořené touto metodou jsou porovnatelné s díly vytvořeným konvenčními metodami, a to především po stránce mikrostruktury a mechanických vlastností.

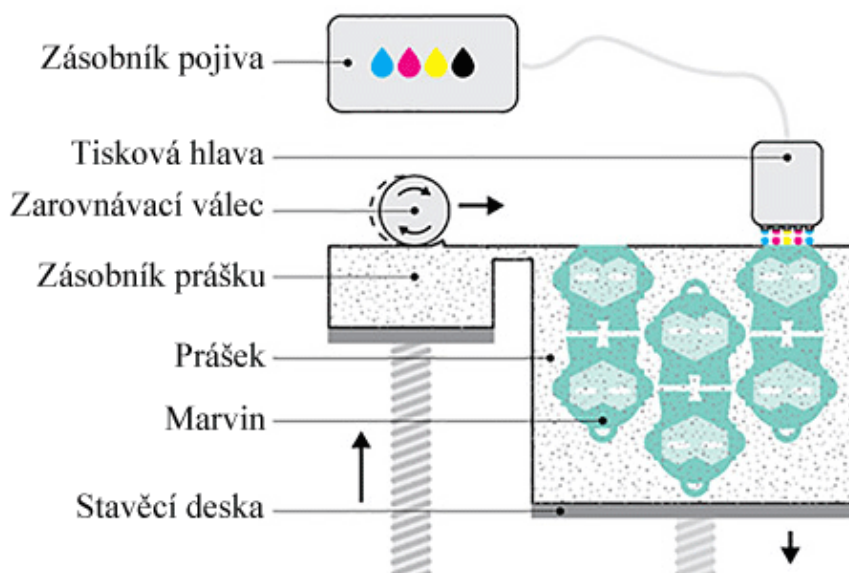


Obr. 5) Ukázky součástí zhotovených SLM metodou [5] a) odlehčená konzole kabiny Airbusu A380 b) zubní korunky a můstky vyrobené na míru pacientům z kobalt – chromové slitiny

³ Electron Beam Melting (Tavení proudem elektronů) – metoda je totožná s SLM, pouze pro tavení prášku namísto laseru využívá proud elektronů.

2.1.3 Binder jetting

Technologie Binder jetting, neboli tryskání pojiva, je v mnoha ohledech stejná jako metoda SLS. Při tisku se také využívá vrstva prášku, ta však není vytvrzována pomocí tepla, ale za použití pojiva, nanášeného tryskou (obrázek 6). Základním materiálem jsou často různé druhy písků, ale je možnost použít i plasty a keramiku. Možnou variantou tisku je také tisk s barevným pojivem, díky kterému je možné dosahovat barevně i detailně fotorealistických modelů.



Obr. 6) Schéma technologie Binder jetting [5]

Uplatnění metoda nachází uplatnění hlavně při tvorbě designových prototypů, architektonických modelů (obrázek 7) a také při vytváření odlévacích forem (obrázek 8). Většinou však bývá nutné pro zlepšení mechanických vlastností, vytisknuté objekty dále zpracovávat, např. spékat.



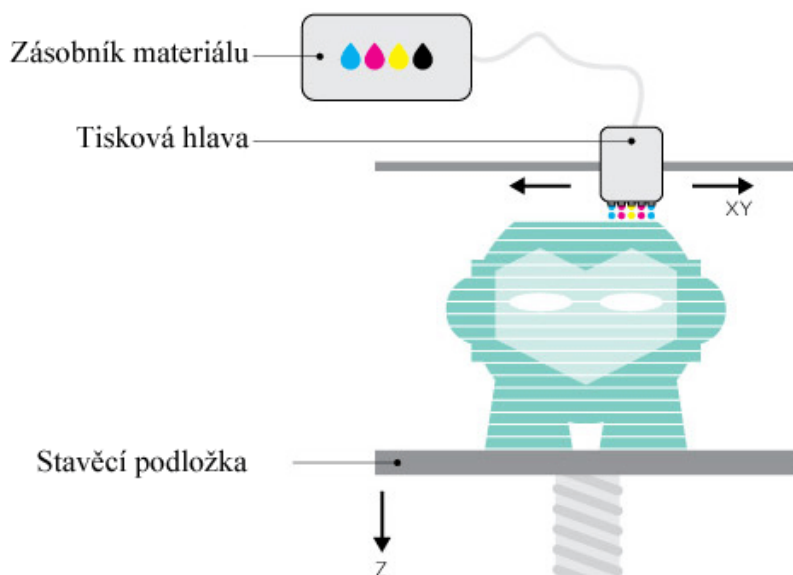
Obr. 7) Barevný model domu [5]



Obr. 8) Tiskárna Voxjet VX4000 pro vytváření pískových forem na odlévání [6]

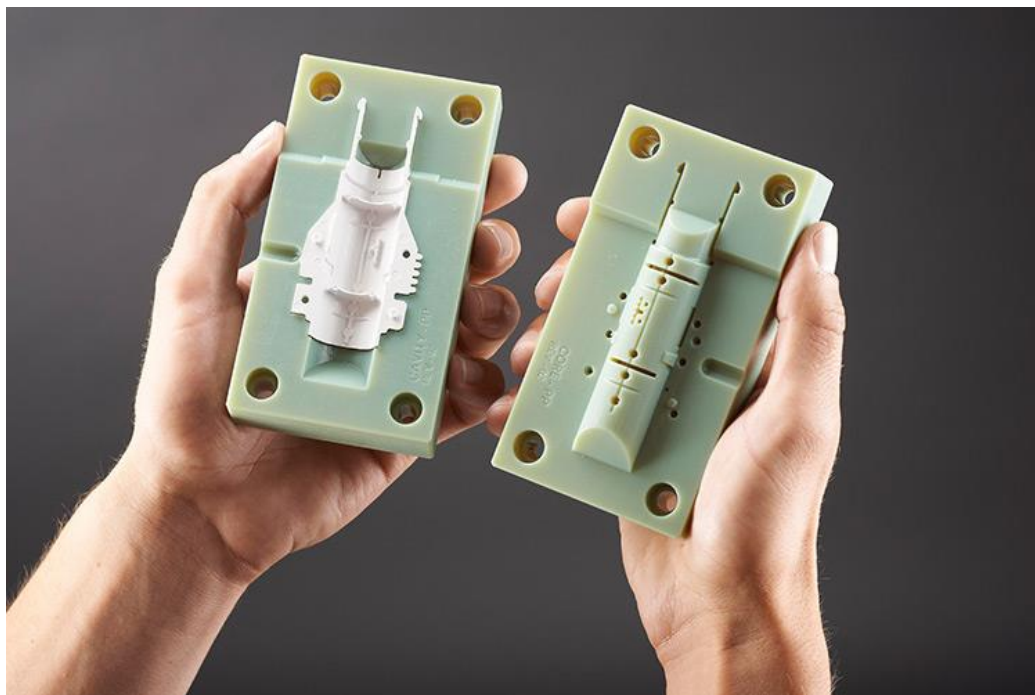
2.1.4 MultiJet Modeling (MJM)

Modelování probíhá podobným principem jako u inkoustové tiskárny – tiskovou hlavou jsou distribuovány kapičky fotonepolymerního materiálu, které jsou po dopadu na podložku osvětleny UV lampou a tím vytvrzeny (obrázek 9). Použití více trysek v jedné hlavě přináší především časovou úsporu, ale je možné i tisknout modely z více materiálů či více barev.



Obr. 9) Schéma MultiJet modeling [5]

Tiskárny MJM jsou často využívány v průmyslu, především k tvorbě velmi přesných modelů (obrázek 10). Vzhledem k možnosti použití více materiálů na jedné součásti je umožněno tisknout komplexní a funkční prototypy (obrázek 11).



Obr. 10) Přesná forma pro vstříkovací lis na 10-100 použití [5]



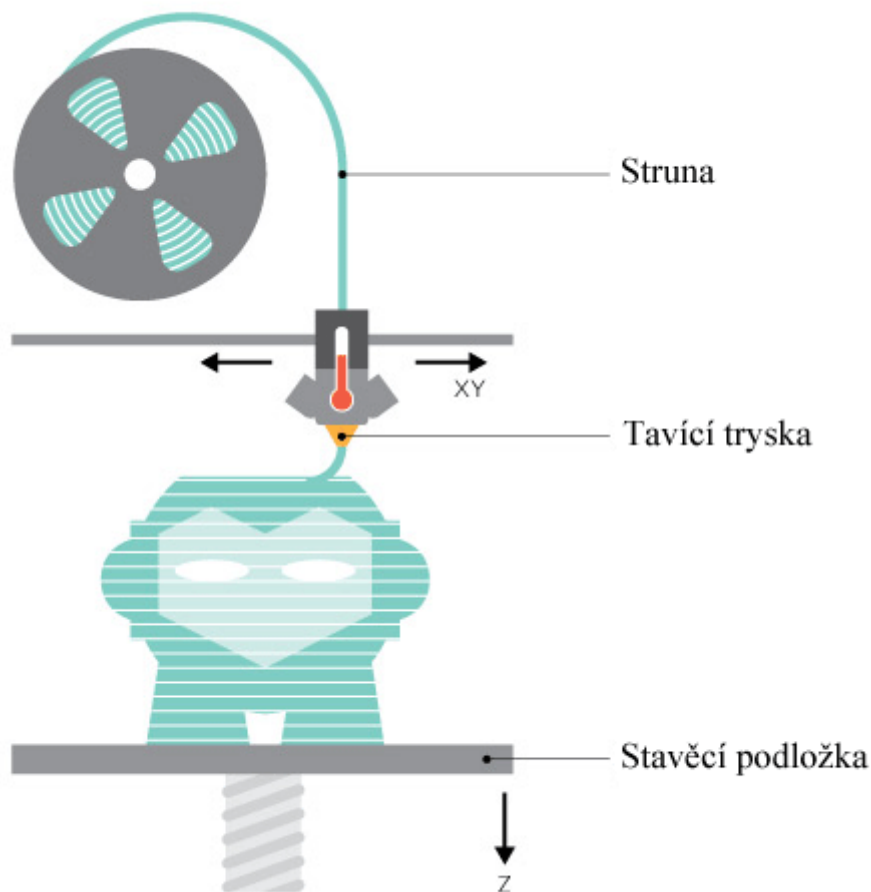
Obr. 11) Prototyp zubního kartáčku s vytištěnými štětínami [5]

2.1.5 Fused deposition modeling (FDM)

FDM neboli také FFF (Fused filament fabrication)⁴ je nejrozšířenější technologií 3D tisku. Především díky projektu RepRap⁵ se tiskárny rozšířili i mezi hobby uživatele. Na trhu jsou tiskárny pro profesionální použití v řádu desetitisíců korun i levné tiskárny s cenou pod 10 000 Kč. Rozdíly jsou především v přesnosti, rychlosti tisku a hlavně v softwarové výbavě a technické podpoře.

V první řadě je potřeba vytvořit 3D model tisknuté součástky, který je posléze v speciálním softwaru rozřezán na jednotlivé vrstvy. Z vrstev je vytvořen G-kód, který se nahraje do tiskárny a stará se o ovládání pohybů a teplot.

Tisk začíná v kotouči s tiskovou strunou, která je pomocí extrudéru natlačena do tavné komory. Materiál se při průchodu komorou roztaví a poté prochází skrz trysku na stavěcí podložku, kde se podle předem definované trasy vytváří jednotlivé vrstvy součásti (obrázek 12).



Obr. 12) Princip FDM technologie [5]

⁴ Jedná se o stejné technologie, FDM je obchodní značkou firmy Stratasys, proto vznikl další neutrální název FFF. V práci bude využíván pojem FDM. [7]

⁵ RepRap je název pro projekt open-source 3D tiskáren, které jsou schopné vytisknout si část dílů sami pro sebe. [8]

Kvalita modelů je obecně horší než u jiných technologií, nicméně při pečlivém nastavování tiskových podmínek mohou být výtisky dostatečně kvalitní. Vzhledem k pořizovací ceně strojů i materiálů, jde o levnější metodu vhodnou pro tisk méně náročných dílů (obrázek 13), ať již po stránce mechanické či kvality povrchu. (obrázek 14).



Obr. 13) Krabička na Raspberry Pi [5]



Obr. 14) Busta vytisknutá technologií FDM a vpravo po zpracování k docílení lesklého povrchu [5]

2.2 Materiály pro tisk technologií FDM

Volba tiskového materiálu je ovlivněna několika parametry. Záleží, zda má vytisknutý díl plnit především vzhledovou funkci nebo má jít o funkční součástku namáhanou zatížením. Můžeme volit barvu i strukturu materiálu (např. filament plněný dřevěnými vlákny, materiály na bázi gumy atd.), v případě potřeby hladkých, dobře vypadajících povrchů je možno volit materiály, které jdou snadno po tisku upravovat (např. brousit, leptat, aj.). Při výběru struny především záleží na trysce a vyhřívané podložce, kterými je tiskárna osazena, a to z důvodu rozdílných teplot tavení a tuhnutí tiskových materiálů [12].

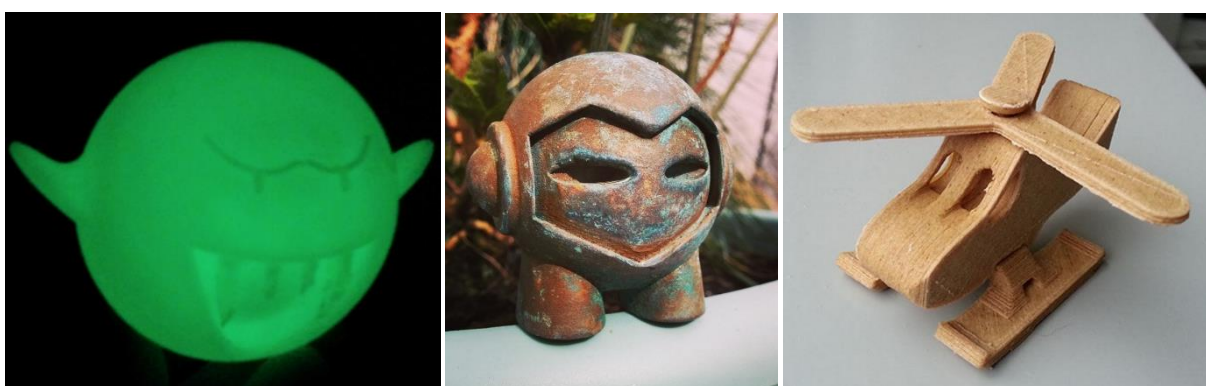
Struna má kruhový průřez o jmenovitém průměru buď 1,75 mm nebo 3 mm a dodávají se namotané v kotoučích zpravidla o hmotnosti 0,5 kg a 1 kg. Většina materiálů se dodává v mnoha různých barevných odstínech.

Plastů vhodných pro tisk je velká řada, proto byly vybrány materiály, které se běžně používají a jsou dostupné v českých obchodech (zdroje pro kapitoly 2.2.1 až 2.2.2 jsou: [12], [14], [17], [18]).

2.2.1 Standartní tiskové materiály

PLA

Termoplast PLA (Polyactic Acid – kyselina polymléčná) je jedním z nejrozšířenějších plastů pro použití v 3D tiskárnách. Je biologicky rozložitelný, jelikož se vyrábí ze škrobů (kukuřičný, bramborový), rozpustný ve vodě a snadno pohlcuje vzdušnou vlhkost, proto je nutné zásobníky s materiálem vhodně skladovat. Jeho nízké nároky na teplotu trysky a možnost tisku bez vyhřívané podložky z něj udělali oblíbený tiskový materiál. Kvůli nižší smrštitivosti není tolik náchylný na vady výtisků způsobených rychlým chladnutím jako třeba warping (odloupnutí rohů modelu od podložky, viz obrázek 17). Pevnost materiálu⁶ je nižší než například u ABS či PET. Další vývoj PLA vedl ke vzniku kompozitních materiálů, které umožňují zvýšení pevnosti nebo navození vzhledu kovových či dřevěných materiálů. Příklady na obrázku 15.



Obr. 15) Výtisky PLA [12] a) fluorescenční materiál b) PLA s výplní bronzovými částicemi c) a výplní dřevěnými vlákny

⁶ Pevnost materiálů je obtížné vyhodnocovat, protože výsledná pevnost součástí je velmi ovlivněna strukturou, teplotami rychlostí tisku a chladnutím. Proto je tento nutno pojem brát obecně.

ABS

Dalším velmi rozšířeným termoplastickým materiálem je ABS (Akrylonitrilbutadienstyren). Je vhodný pro stavbu robustních dílů pro jeho vyšší mechanickou, teplotní i chemickou odolnost vůči PLA (spolu s ním byli mezi prvními používanými plasty pro FDM technologii). Vyšší teplota tavení i tuhnutí materiálu, spolu s poměrně velkou smrštivostí kladou vyšší nároky na vyhřívanou podložku, která musí být často doplněna ještě další vrstvou pro zvýšení adheze (kaptonová páska, lepidlo, a jiné), aby se zabránilo vznikům vad na modelu. ABS je rozpustné v acetonu a toho lze využít při lepení dílů k sobě nebo dotváření lesklého povrchu naleptáním (obrázek 16). Při tisku unikající výpary způsobují zápach a v delším časovém horizontu mohou být i zdravotně závadné.



Obr. 16) ABS vyleptaný vs. nevyleptaný [12]



Obr. 17) Warping – odloupenutí rohu při chladnutí [12]

PET

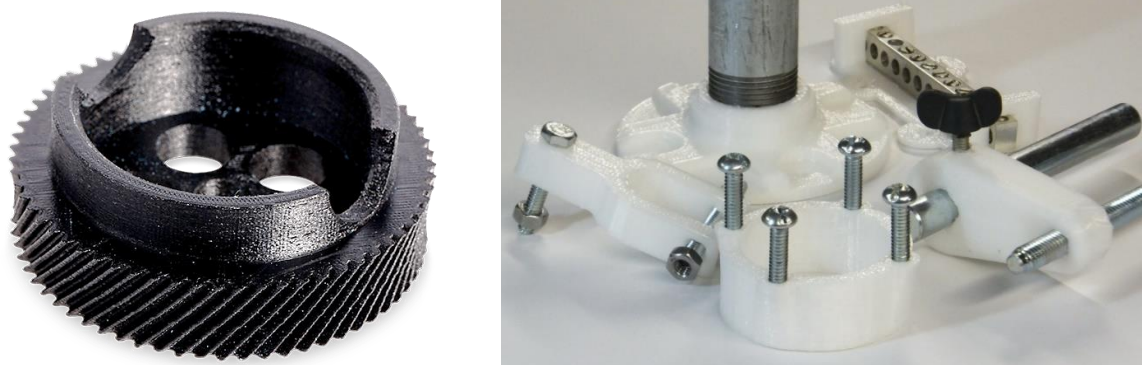
Polyethylentereftalát – materiál známý především z potravinových obalů – si také našel místo mezi plasty vhodnými pro 3D tisk. Většinou se nejedná o čistý PET, ale o některý z kopolymerů PETT či PETG. Obecně mají vyšší pevnost, nízkou smrštitivost a v nárocích na tisk jsou podobné PLA. Při tisku nevzniká zápach jako u ABS. Ukázky výtisků na obrázku (obrázek 18).



Obr. 18) PET modely [12] a) prodloužení háku na dveře b) průhledný výtisk

Nylon

Nylon neboli polyamid je univerzální materiál dosahující vysokých pevností. Má vyšší požadavky na ohřev trysky a je náchylný na vlhkost. Pro dobré tiskové výsledky je nutné jej vhodně skladovat. Využívá se především pro tisk mechanických komponent (obrázek 19).



Obr. 19) Výtisky z nylonu a) ozubené kolo [10], b) ukázka tisku mech. komponent [12]

2.2.2 Materiály pro tisk podpěr

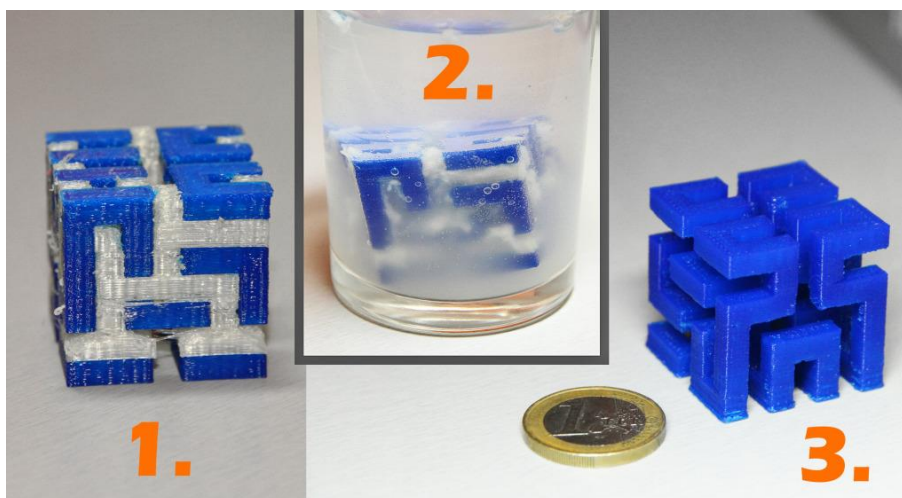
Někdy je požadavek na tisk součásti, která má menší základnu než horní část modelu, případně z modelu vystupují převisy nebo chceme tisknout součást uvnitř jiné součásti (obrázek 20). V těchto případech je výhodné použít podpurné materiály, které jsou snadno odstranitelné od skutečného modelu.



Obr. 20) Funkční ložisko vytištěné jako jeden kus [12]

PVA

Polyvinyl acetát je běžně využívaný podporový materiál. Je rozpustný ve vodě, což z něj činí lehce dostupný a použitelný plast. Využívá se především s PLA (obrázek 21).



Obr. 21) Tisk s podporou PVA [12]

HIPS

HIPS (houževnatý polystyrén) je materiál využívaný především pro tisk s ABS. Má s ním podobnou strukturu, a proto na sobě lépe drží. Jeho nevýhodou je nutnost rozpouštění v chemické sloučenině Limonenu, která je dráždivá a hořlavá. Ukázka na obrázku 20.

2.2.3 Pružné materiály

Pružné materiály jsou poddajné a měkké, podobné gumě. Kvůli tomu, je obtížné nastavit tiskárnu ke kvalitním výsledkům. Extruder musí být dobře navržený, aby zvládl do trysky dodávat potřebné množství materiálu, a tryska zase musí umožnit bezproblémový průchod. Využívají se pro tisk ohebných a poddajných dílů.

TPE

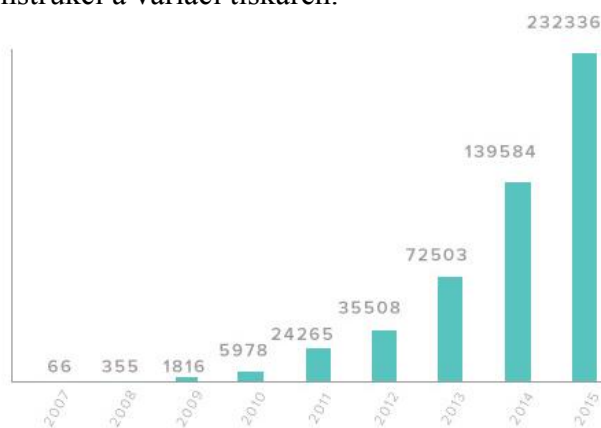
Termoplastický elastomer je velmi měkký a poddajný plast. Vzhledem k tomu je možné tisknout jen velmi pomalými rychlostmi obrázek 22.



Obr. 22) Pružný výtisk TPE [12]

3 SOUČÁSTI TISKÁRNY TYPU FDM

Technologii tisku FDM si nechala v roce 1990 patentovat firma Stratasys, která tak v podstatě zabránila dalšímu vývoji na tomto poli a tiskárny se omezili na profesionální využití. Po roce 2009, kdy patent vypršel, se tiskárny postupně začaly rozšiřovat a cena začala klesat. Tento trend z části způsobil také projekt RepRap, díky kterému bylo možné některé díly na tiskárny levněji kopírovat a rozšířit stroje mezi více uživatelů (obrázek 23). Postupem času začali tiskárny vyrábět také komerční výrobci, kteří nabízí profesionální řešení i s technickou podporou. Díky různorodosti výrobců, a především velké komunitě hobby uživatelů, vznikla celá řada různorodých konstrukcí a variací tiskáren.



Obr. 23) Odhadované prodeje 3D tiskáren v letech 2007–2015 [4]

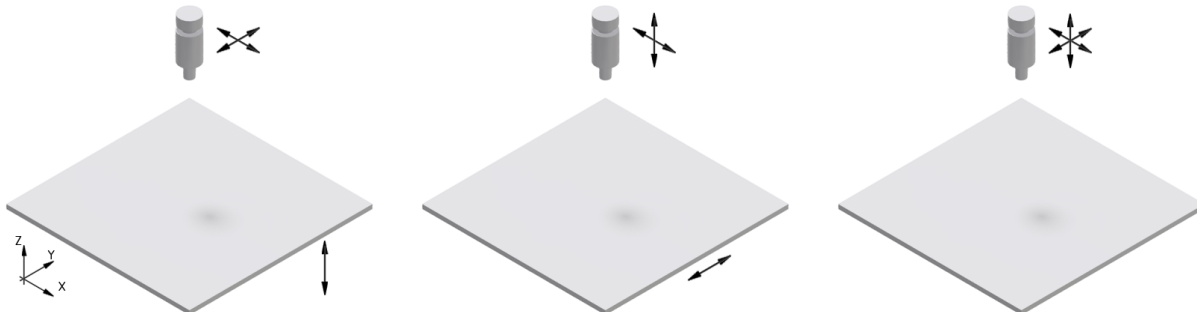
Základní součástí každé tiskárny musí být rám, pohybová soustava (jak samotné trysky či modelu, tak i posuv struny), tisková hlava s extrudérem a stavěcí podložka (obrázek 24).



Obr. 24) Základní části tiskárny – Prusa i3 MK2 [16]

3.1 Polohování tiskové hlavy

Tiskárna typu FDM z principu fungování musí umět polohovat trysku vůči modelu ve 3 osách⁷. Využívá se různých způsobů, jak tohoto dosáhnout. Tiskárny dostupné na trhu využívají nejčastěji 3 varianty znázorněné na obrázku 25. Přesnost a rychlost polohování je pro kvalitní tisk nejdůležitější. Pro pohon os se nejčastěji využívá krokových motorů.



Obr. 25) Možnosti polohování tiskové hlavy a) hlava XY, podložka Z, b) hlava XZ, podložka Y, c) hlava XYZ, podložka 0

3.1.1 Polohování hlavy XY, podložka Z

První variantou je možnost posuvu hlavy v osách XY a podložky v ose Z (souřadný systém je zvolen podle standardního označování v oblasti FDM tiskáren, viz obrázek 25 a). Model se při tisku pohybuje pouze po malých krocích v ose Z, tudíž jeho hmotnost a proporce neovlivňují rychlost pohybu tiskové hlavy. Další výhodou je dobře ohraničený pracovní prostor, což umožňuje tiskárnu snadno zakrytovat⁸. Nevýhodou je poměrně náročnější a větší konstrukce rámu a polohového systému.

Tiskárny dostupné na trhu využívají pro polohování sériovou i paralelní kinematiku⁹. Při využití sériové kinematiky je zpravidla konstrukce tiskárny jednodušší, nicméně může dosahovat menších rychlostí a zrychlení tiskové hlavy, způsobené větší zatížením jedné osy (většinou bývá pohon osy X umístěn na ose Y). Výhodou je jasně dané chování změny polohy os a z toho vyplývající nižší nároky na výpočetní výkon řídicího prvku.

⁷ 3 osy jsou minimální počet pro vytvoření výtisku. U několika projektů se objevilo experimentování za použití více os. Např. student university v Oslu Øyvind Kallevik Grutle vytvořil tiskárnu schopnou tisknout za použití 2 přídavných os, což mu umožňuje model vůči trysce naklápět a tisknout zkosené a zaoblené tvary daleko přesněji a s mnohem lepší kvalitou povrchu než u standardních tiskáren. Také je mu umožněno za vhodných tiskových podmínek tisknout a bez podpor a tisknout tvary jinak jen těžce dosahované. [9]

⁸ Zakrytování tiskárny poskytuje výhodu ve stabilnějším tiskovém prostředí, kdy je chladnutí modelu postupné a není narušené okolními vlivy (např. průvanem).

⁹ Sériová kinematika – každá osa má svůj vlastní pohon a jedna osa je umístěna na druhé, paralelní kinematika – pohyb ose v rovině nebo prostoru je docílen pomocí kombinace řady pohonů.

Polohovací systém využívající paralelní kinematiky může dosahovat vyšších zrychlení, především kvůli umístění obou motorů na rámu stroje – snížení polohované hmotnosti. Bohužel nevýhodou je náročnější řízení, kdy je kvůli potřebě výpočtu každé nové polohy větší vytížení řídicí jednotky. Příklady takových tiskáren jsou např. Ultimaker (sériová kinematika) a Airwolf3D (paralelní kinematika), obojí na obrázku 26.



Obr. 26) Tiskárny a) Ultimaker 2 Go [10] a b) Airwolf3D AXIOM [11]

3.1.2 Polohování hlavy v XZ, podložky v Y

Druhý způsob využívá pohybu podložky pod modelem v ose Y a tiskovou hlavu pohybující se v osách X a Z obrázku 25 b. Tento způsob se objevil u prvních repropových tiskáren, především kvůli nižší náročnosti na stavbu a malému počtu potřebných dílů.

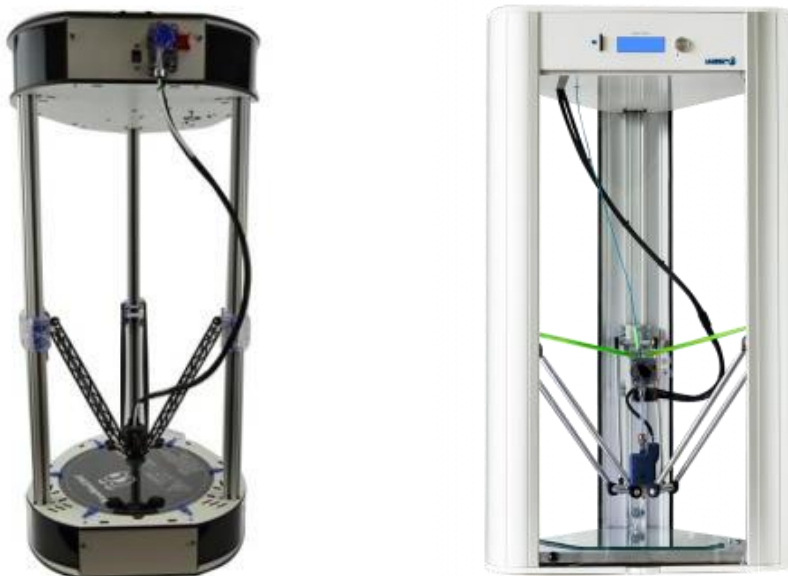
Model pohybující se s osou Y způsobuje velké setrvačné síly a tím i vyšší nároky na pohon. Zpravidla je tak potřeba snížit rychlost tisku. Liší se i konstrukce rámců, kdy je většinou využito co nejméně materiálu (např. tiskárna Průša i3), a proto rámy nedosahují takové tuhosti jako rámy kvádrového tvaru. Příklady tiskáren na obrázku 27.



Obr. 27) a) Prusa i3 MK2 [16], b) LulzBot TAZ 6 [3]

3.1.3 Polohování hlavy v XYZ

Při tomto způsobu je podložka napevno spojena s rámem a nepohybuje se schéma na obrázku 25 c Pohyb tiskové hlavy zpravidla využívá paralelní kinematiky a tiskárny mají věžovitý vzhled. Tato konstrukce se nazývá delta. Zástupci této kategorie jsou na obrázku 28.



Obr. 28) Tiskárny delta a) Rostock MAX [3] a b) Delta WASP [3]

3.2 Rám

Rám ovlivňuje výsledný tisk svojí tuhostí. Pokud rám není dostatečně robustní, aby utlumil vibrace způsobené rychlou změnou směru pohybu tiskové hlavy, budou na výtisku vznikat vady.

Samotná konstrukce rámu vychází ze zvoleného způsobu polohování tiskové hlavy. Může se jednat o plně zakrytované rámy kvádrového tvaru, minimalistické rámy tiskáren typu Průša, věžovité rámy delta tiskáren apod.

Výhodou rámu kvádrového tvaru je celkově vyšší tuhost rámu a možnost tiskárnu snadno zakrytovat. Nevýhodou může být větší náročnost na konstrukci i výrobu a tím i vyšší cena. Pro stavbu se využívá jak stavebnicových hliníkových profilů (obrázek 30), tak i ve většině případů rámu z ohýbaných plechů (obrázek 29), kdy je při větších počtech vyráběných kusů rentabilní a je možné jej lépe přizpůsobit potřebám tiskárny. Kovové materiály mohou být doplněny i plastovými součástkami.



Obr. 29) CEL roboX – uzavřený rám s pohyblivou podložkou v ose Y [3]

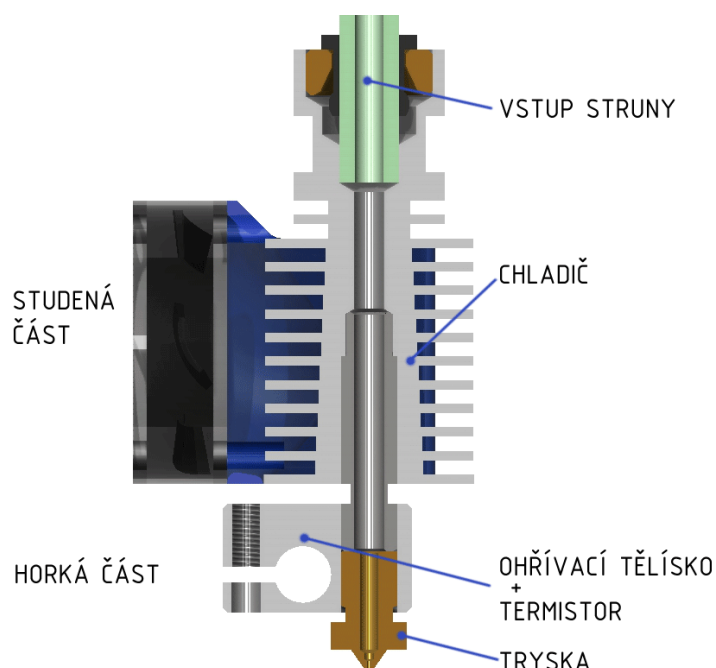
Minimalistické rámy nedisponují takovou celkovou tuhostí rámu, ale pro konkrétní aplikaci může být dostačující. Rámy často bývají tvořeny jen několika plechovými výpalky spojenými k sobě. Je možnost využít i stavebnicové profily. Výhodou je menší spotřeba materiálu a nižší cena (ukázky na obrázku 27).



Obr. 30) Rám průmyslové tiskárny AON-M z hliníkových profilů [3]

3.3 Hot end

Hot end je součástí tiskové hlavy¹⁰ a ovlivňuje kvalitu a rychlost tisku spolu s počtem tisknutelných materiálů (schéma na obrázku 31). V kapitole jsou použity zdroje [8] a [19].



Obr. 31) Schéma kovového hot endu 3D tiskárny [19]

¹⁰ Tisková hlava je součástí tiskárny obsahující hot end a pohybující se v tiskové rovině. Její součástí může být i extrudér.

Hlavní funkcí hot endu je roztavení tiskové struny a zmenšení jejího průřezu. To se děje ve výstupní trysce, která je umístěna v horké části hot endu. Tryska bývá většinou vyrobena z mosazi, a je umístěna v ocelovém bloku spolu s ohřívacím tělískem a termistorem, pro sledování teploty.

Nad touto částí se nachází tepelně oddělená studená část hot endu. Ta má pouze za úkol vedení struny do trysky a je důležité, aby tato část byla dobře chlazená. V opačném případě by struna vlivem tepla změkla a zasekávala by se.

Hot endů se vyskytuje celá řada a v dnešní době již většina odpovídá schématu výše (obrázek 31). Dříve byli oblíbené ještě tzv. PEEK nebo PTFE hot endy, které místo kovového chladiče pro oddělení studené a horké části využívali tyto dva teplotně odolné plasty. Nicméně v průběhu času s potřebou tisku různorodějších materiálů při vyšších teplotách, které tyto hot endy nebyli schopné vydržet, se jejich podíl zmenšil (obrázek 32) [20].



Obr. 32) PEEK hot end [20]

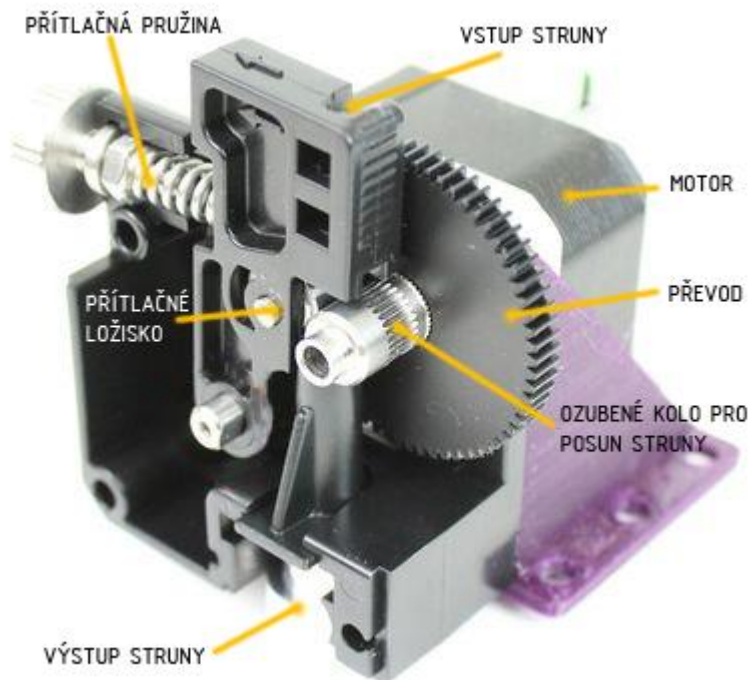
V dnešní době, kdy jsou populární vícebarevné a více materiálové tisky, jsou k dostání i hot endy s více tryskami spojenými do jednoho bloku (viz obrázek 33). Výhodou takových řešení je snadné zarovnání trysek do roviny a je i možné míchat barvy z různých strun dohromady.



Obr. 33) a) vícenásobný hot end Chimera (E3D) a b) vícebarevný výtisk [19]

3.4 Extrudér

Extrudér je součástí tiskárny sloužící k posunu struny od zásobníku do hot endu. Může a nemusí být součástí tiskové hlavy. Hlavní součásti extrudéru jsou zobrazeny na obrázku 34. Pohyb struny zajišťuje ozubené kolo, které se zařizne do materiálu a tlačí jej dále skrz extrudér. Přítlak kola se zajišťuje pomocí pružiny a ložiska, které tlačí na strunu z opačné strany. Pohon je zajištěn krokovým motorem a mezi motor a kolo je možné dát převod pro zvýšení krouticího momentu pro posun drátu.

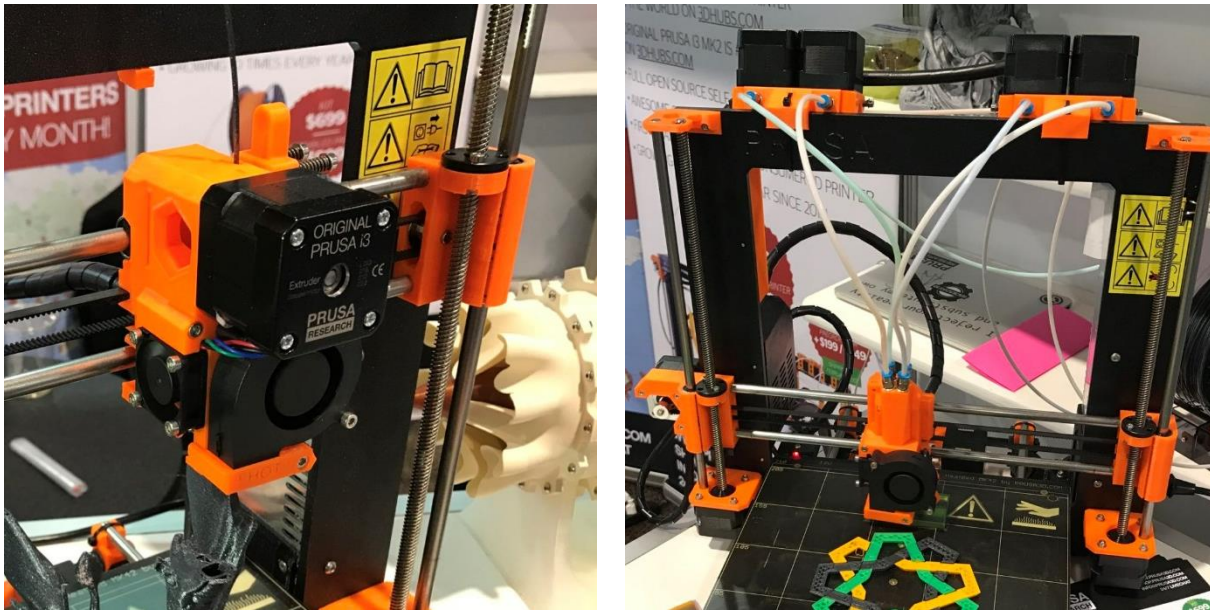


Obr. 34) Hlavní součásti extrudéru [19]

Extrudér může buď přímo ústít do hot endu, pak se jedná o tzv. direct extruder. Tento způsob zatěžuje pohon osy X, resp. Y hmotností motoru a extrudéru. Výhodou ovšem je poměrně přesnější dávkování materiálu, protože je velmi krátká vzdálenost mezi posuvovým kolem a tryskou.

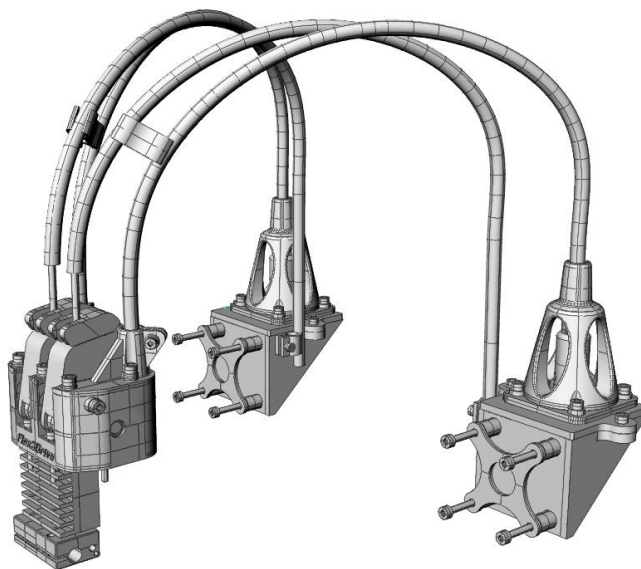
Další způsob dopravy struny je bowden extruder¹¹, kdy mezi extrudérem a hot endem je větší vzdálenost a struna je dopravována uvnitř trubičky (zpravidla teflonové, kvůli menšímu tření). Výhodou je nižší zatížení osy X či Y, ale dávkování materiálu nemusí být tak přesné a můžou se vyskytovat vady tisku, kdy např. není struna při přejezdu hlavy dostatečně zatlačena zpět a materiál samovolně vytéká (ukázky na obrázku 35).

¹¹ V tomto případě slovo bowden, neznamená kabel pro přenos mechanické energie, ale obecné označení pro dopravu struny do hot endu na delší vzdálenost trubičkou.



Obr. 35) Tiskárna Prusa i3 [16] a) direct extruder b) bowden extruder

Výrobce Flex3Drive nabízí řešení, které kombinuje výše uvedené způsoby, a to tak že motor je umístěn na rámu stroje jako u bowdenu, ale samotný extrudér je umístěn na hot endu. Krouticí moment je přenášen pomocí rotujícího ohebného hřídele (obrázek 36). Výhodou je snížená hmotnost hot endu a přesné dávkování materiálu, nevýhodou je vyšší pořizovací cena sady [21].

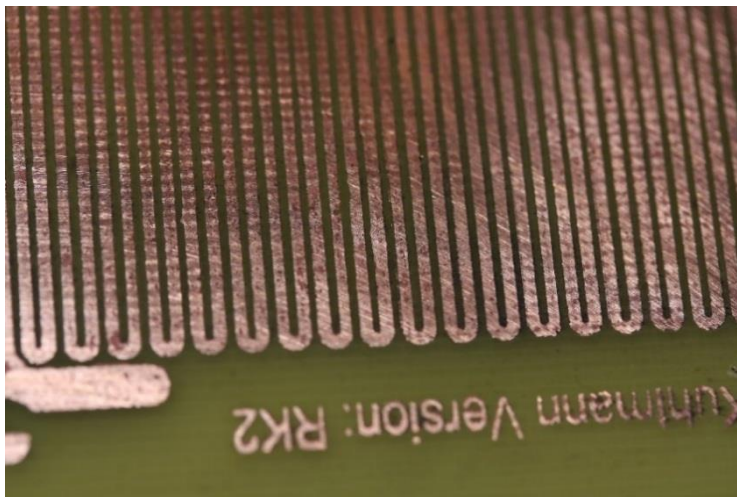


Obr. 36) Schéma Flex3Drive pro 2 hot endy [21]

3.5 Vyhřívaná podložka

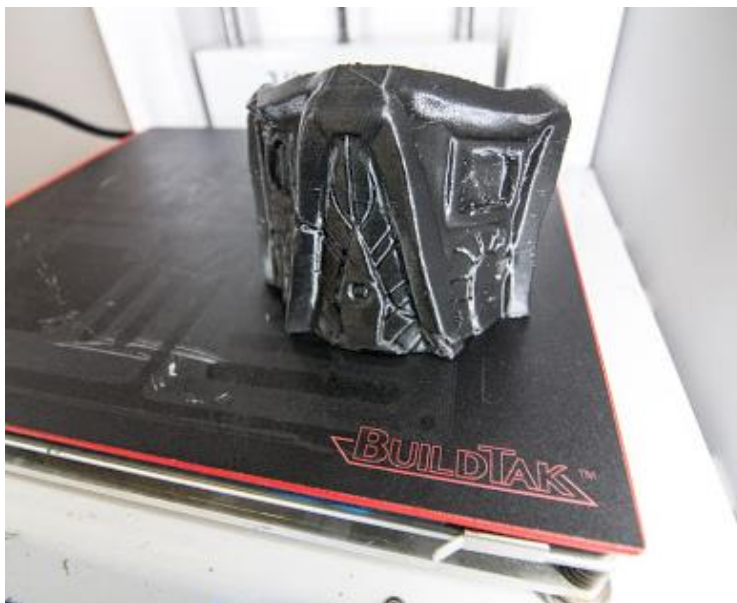
Materiály pro 3D tisk jsou náchylné na smršťování při chladnutí. Tato změna rozměrů způsobuje různé vady na výtisku (warping, odloupení modelu z podložky atd.). Vyhřívaná podložka (anglicky heated bed) udržuje model ohřátý a chladnutí modelu probíhá až po ukončení tisku v celém objemu najednou. Kvůli tomu je výtisk méně náchylný na popraskání a jiné vady [8].

Většina tiskáren, které mají vyhřívanou podložku, používá PCB heated bed. Jedná se o plošný spoj, kdy je deska zahřívána průchodem proudu skrz měděnou cestu (obrázek 37) pod povrchem podložky [8].



Obr. 37) Detail PCB podložky [8]

Povrch podložky je nutné opatřit adhezí vrstvou, pro dobré uchycení první vrstvy modelu na desku. Využívají se různé materiály – modrá malířská páska, kaptonová páska, tuhé bílé lepidlo na papír, ABS džus, lak na vlasy a speciální povrchy vyvinuté přímo pro 3D tisk jako např. fólie BuildTak (obrázek 38). Volba povrchu závisí na použitém tiskovém materiálu [8], [15].



Obr. 38) Podložka BuildTak [15]

Některé tiskárny používají pouze speciální vrstvu na podložce bez možnosti vyhřívání, ale za cenu omezeného množství tiskových materiálů (ukázka na obrázku 39) [3].



Obr. 39) Granolite jako podklad pod model z nylonu [15]

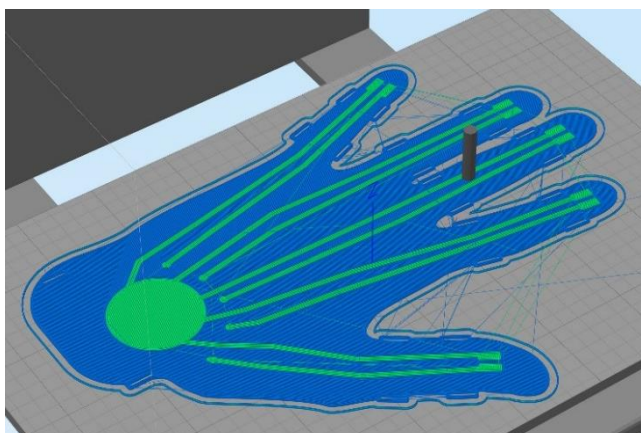
4 TISK VÍCE MATERIÁLŮ

Tisknutí dvěma i více hlavami, přináší především možnost stavit vícebarevné výtisky a vytvářet složité modely za pomoci podpurného materiálu, který může být např. rozpustný ve vodě. Dále je teoretická možnost tisknout tryskami s různými průměry a vytvořit hrubý model s detailními prvky za kratší čas, než kdyby byl celý tisknut menší tryskou [27].

Na obrázku 40 je výtisk vytvořený použitím 2 barev stejného materiálu. Návlek na ruku – vytisknutý z kombinace pružného materiálu a filamentu, který je elektricky vodivý – umožňuje vytvoření funkčního elektrického zařízení (obrázky 41 a 42).



Obr. 40) Dvoubarevný výtisk



Obr. 41) Rukavice v řezacím softwaru [26]

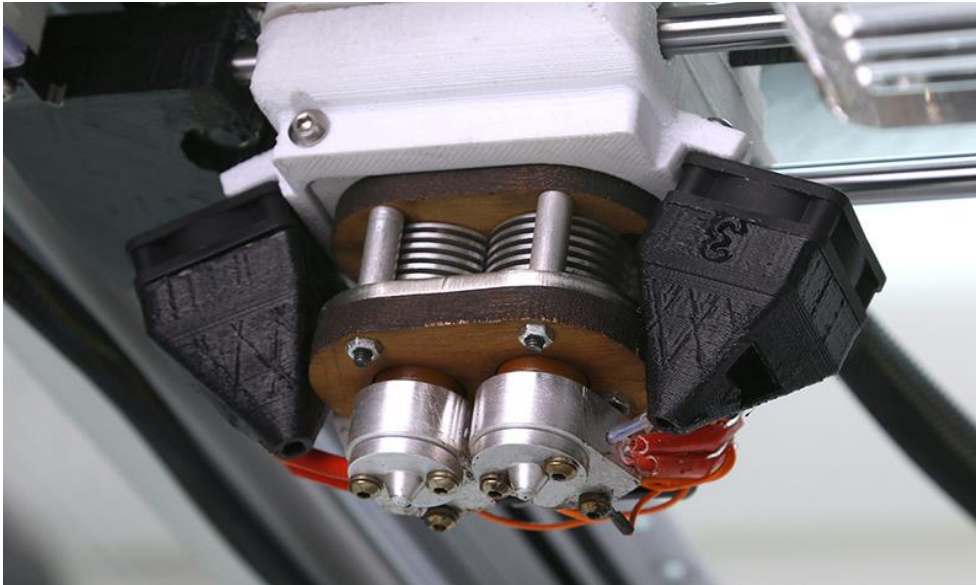


Obr. 42) Vytisknutý model se zapojenými LED diodami [26]

4.1 Jediná tisková hlava

4.1.1 Samostatné trysky

Nejvyužívanější možností pro vícenásobný tisk je použití jedné tiskové hlavy, na které je umístěno více trysek (obrázek 43). To přináší výhodu především v rychlém střídání jednotlivých trysek.



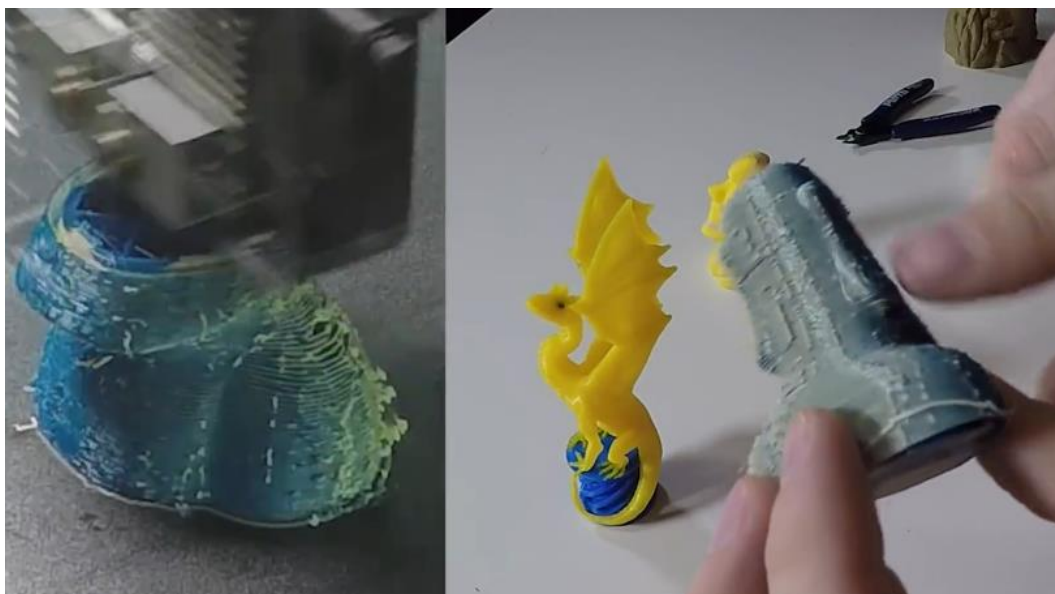
Obr. 43) Tisková hlava na Axiom Dual 3D tiskárně [11]

Obtížemi při tisku jsou především vytékající filament z neaktivní trysky, který se většinou musí řešit snížením teploty pod teplotu tavení. S tím souvisí prodloužení doby tvoření modelu, jelikož je nutné, při každé výměně, čekat na dosažení vhodné teploty. Jelikož se struna musí při čekání zasunout hlouběji do trysky (opět kvůli zabránění vytékání materiálu na model), při návratu hot endu k tisku toto způsobuje zpoždění při tisku. Vedle modelu proto bývá přítomna pomocná kostka (na obrázku 44), kde se s výměnou trysky vytiskne určitá část filamentu a poté na modelu již hot end tiskne bezproblémově.



Obr. 44) Ukázka z tisku dvoubarevného modelu, v zadní části je pomocná kostka [28]

Další možností pro zabránění znehodnocení modelu vytékajícím filamentem je použití tzv. ooze shield¹² - štít okolo modelu, který zabraňuje vytékajícími filamentu kontakt s modelem.



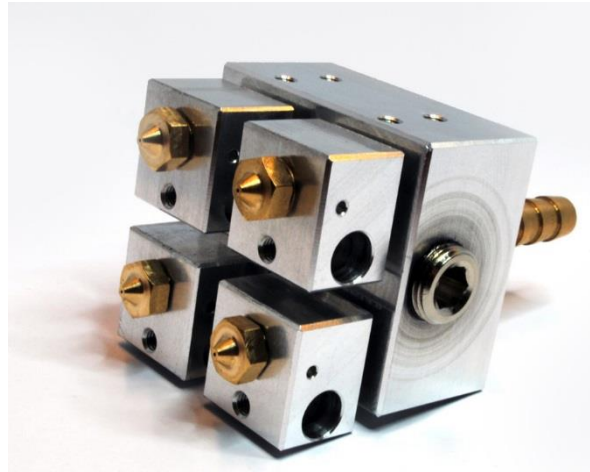
Obr. 45) a) tisk součásti s ooze shield, b) štít na hotové součásti, obojí [29]



Obr. 46) Součást po odstranění štítu [29]

¹² Ooze (angl. vytékat, téci) – výraz používaný pro vytékající filament z trysky

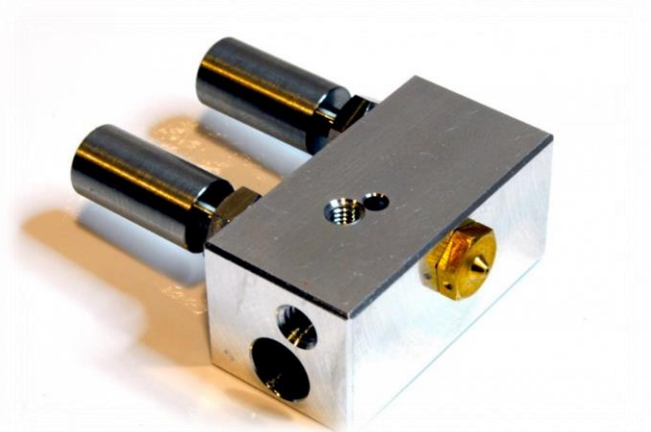
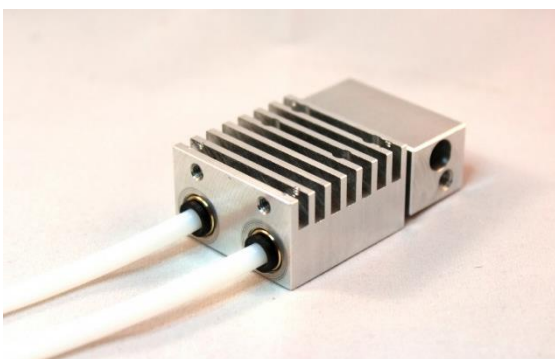
3D tisk může probíhat za účasti více než 2 trysek, nicméně tato možnost není v podstatě využívána a objevuje se především u hobby projektů. Firma E3D nabízí k prodeji hot end Kraken (obrázek 47), který nabízí 4 trysky vměstnané do 1 hlavy. Zajímavostí je, využití vodního chlazení pro odvod tepla [19].



Obr. 47) 4násobný hot end Kraken [19]

4.1.2 Jedna společná tryska

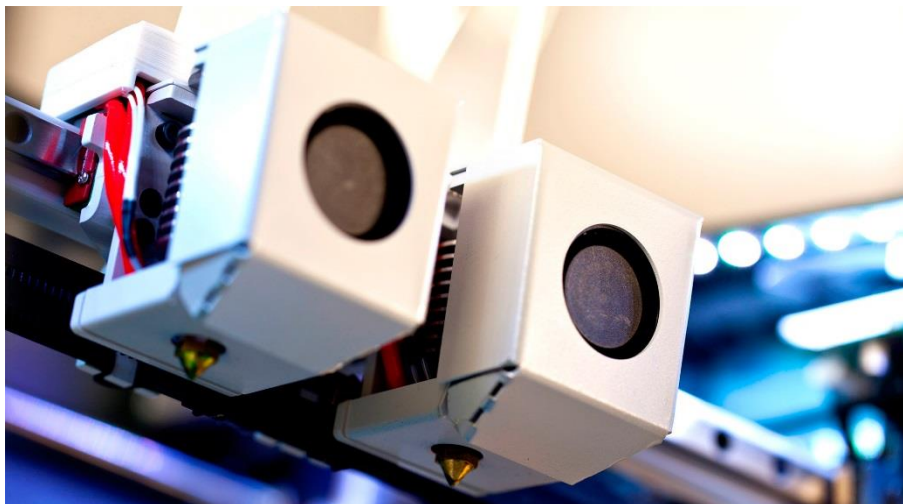
Spojením více přívodů struny do bloku s jedinou tryskou, získáme další možnost, jak tisknout více materiálové modely. Touto konfigurací odpadají problémy s vytékajícím filamentem, jelikož je vždy vytažen do studené zóny, aby uvolnil místo aktuálně tisknutému materiálu. Řešení využívá například upgrade tiskárny Prusa i3 (obrázek 35 b) nebo jej nabízí firma E3D v hot endu Chimera.



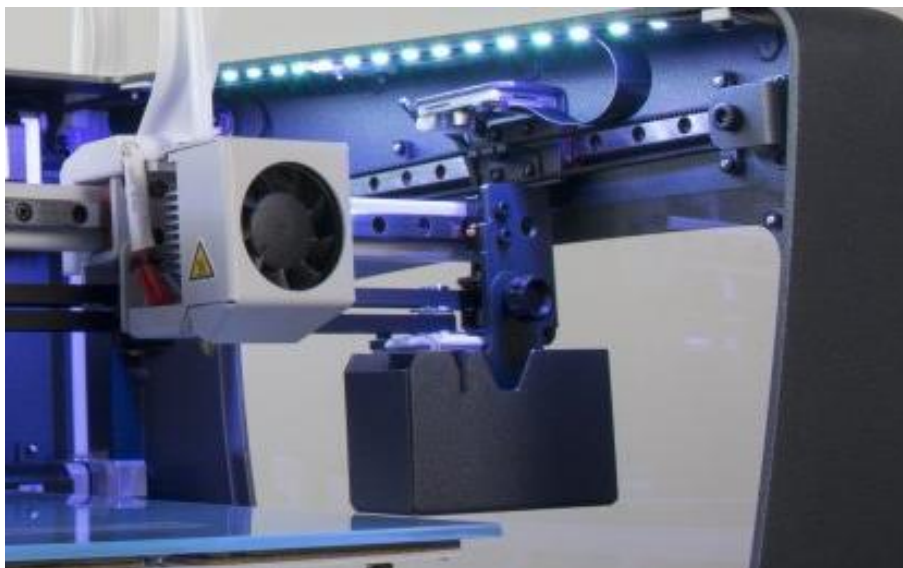
Obr. 48) Hot end Chimera [19]

4.2 Více tiskových hlav

Variantou pro tisk mnoha filamentů, je i použití více tiskových hlav s jednou tryskou. Řešení využívá např. tiskárna BNC3D (obrázek 49). Tiskne vždy jen jedna hlava, druhá je zaparkovaná na straně tiskárny, kde je umístěna nádržka na odtékající filament (na obrázku 50). Velkou výhodou je tedy nulové ovlivnění výtisků druhou tryskou a možnost přichystání hlavy (zahřátí na teplotu, nechat odvinout část struny atd.) vždy dopředu před tiskem a ušetření výrobního času. Na druhou stranu je toto řešení vhodné pouze pro některé kinematiky a přináší zvýšení nákladů v podobě samotné konstrukce druhé hlavy a jejího pohonu.



Obr. 49) Dvojice samostatných tiskových hlav, BCN3D Sigma [22]



Obr. 50) Parkovací pozice s nádržkou [22]

4.2.1 Výměna tiskových hlav

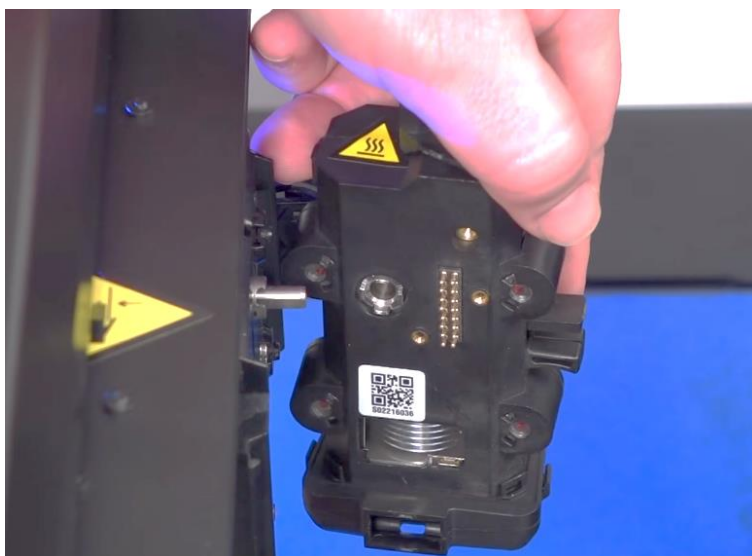
Automatická výměna tiskových hlav (AVTH), může být řešením pro spoustu problémů souvisejících s více materiálovým tiskem. Odpadají problémy s vytékající strunou, tisková hlava s jednou tryskou je lehčí, může dosahovat vyšších zrychlení a tím snížit čas tisku. Nicméně řešení AVTH nepoužívá žádná rozšířená komerční tiskárna (dle 3D Hubs [4]). Nejspíše je to způsobené komplikacemi, kdy je potřeba vyřešit rychlou výměnu hlav, spolehlivé propojení hlavy s pojezdem a zajistit odpovídací elektrické hardwarové a softwarové vybavení pro efektivní výměnu.

MakerBot Smart Extruder

Jediným komerčním konceptem podobným AVTH je ruční výměna extrudéru s tryskou od firmy MakerBot, která je používá na svých tiskárnách [25]. V tomto případě ovšem nelze mluvit o využití pro plnohodnotný tisk více materiálů, pouze o urychlení a usnadnění výměny tiskové hlavy mezi tisky. Hlavy v sobě obsahuje trysku s extrudérem, jehož pohon je umístěn na pojezdu osy a k extrudéru se připojuje pomocí tvarové spojky [30]. Spojení mezi extrudérem a tiskárnou je realizováno pomocí 4 permanentních magnetů a tvarovými prvky (obrázky 51 a 52).



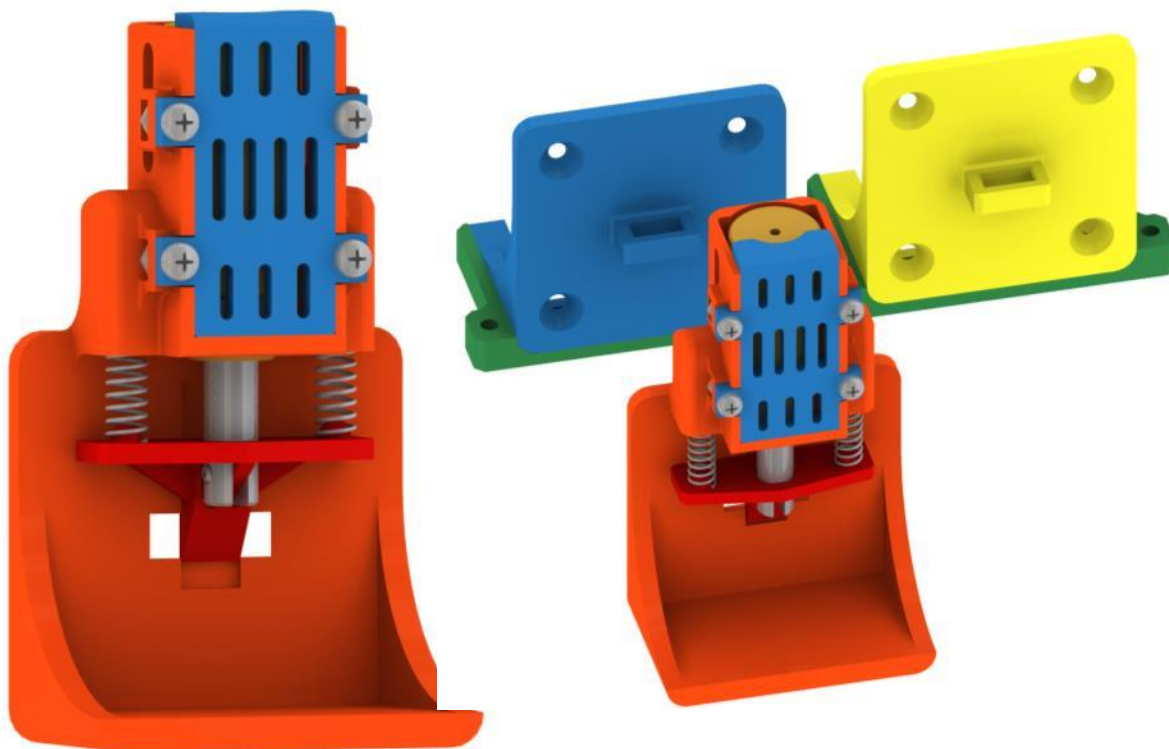
Obr. 51) Smart Extruder od firmy MakerBot [30]



Obr. 52) Připojení Smart Extruderu k tiskárně [30]

Návrh AVTH podle Bc. Pavlíka

V bakalářské práci Rozšíření 3D tiskárny o výměnu tiskových hlav od Bc. Pavlíka [31] je navrženo řešení automatické výměny hlav pomocí příruby s upínacím kuželem (obrázek 53 a), ovládaným elektromagnetem. Přidržovací sílu vyvozují pružiny a magnet se spíná pouze při výměně hlav. Příruba je umístěna na pojezdu tiskárny a protikus s hot endem je připevněn v držáku na straně tiskárny (obrázek 53 b).



Obr. 53) a) detail upínače, b) výměna hlav [31]

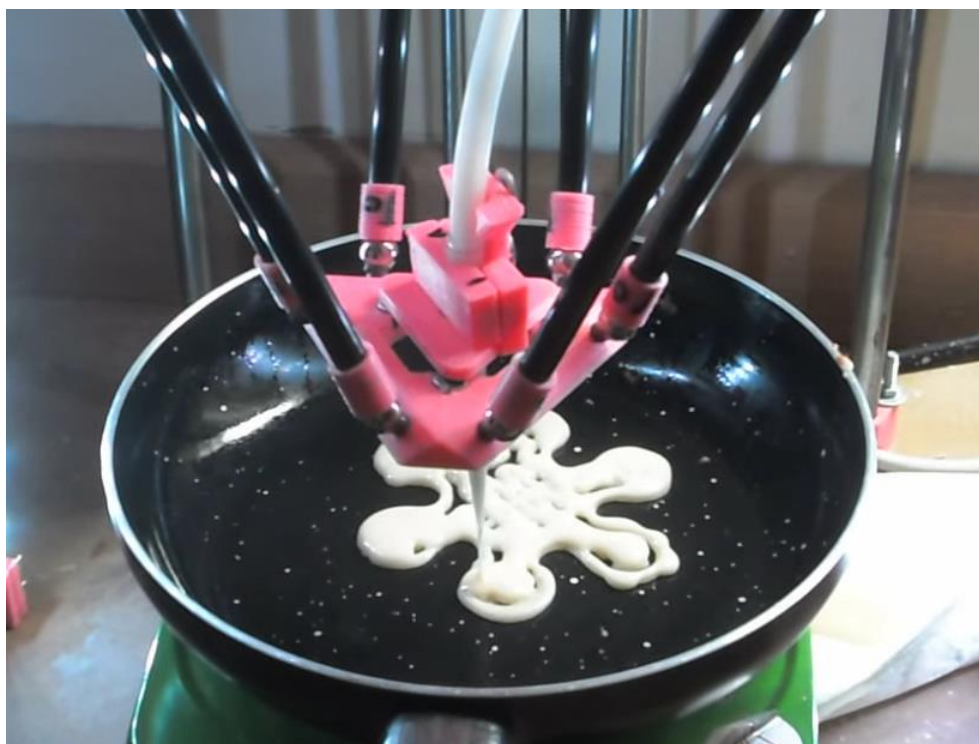
Řešení je zajímavé, bylo by potřeba jej prakticky otestovat a vyhodnotit spolehlivost upnutí a rychlost výměny.

Projekt AVHL na delta tiskárně

Mezi uživatelskými projekty zveřejněnými na internetu je možno najít další 2 zajímavé systémy AVTH. Prvním z nich je výměna hlav na tiskárně typu delta, sloužící k tisku potravin (především různých čokolád, těsta apod.) Autor (Luis Rodríguez) pro zajištění polohy využívá pouze 3 permanentní magnety. Vzhledem k aplikaci, kdy se nejedná o rozměrově přesné výrobky, je to zřejmě dostačující (ukázky na obrázcích 54 a 55) [32], [33].



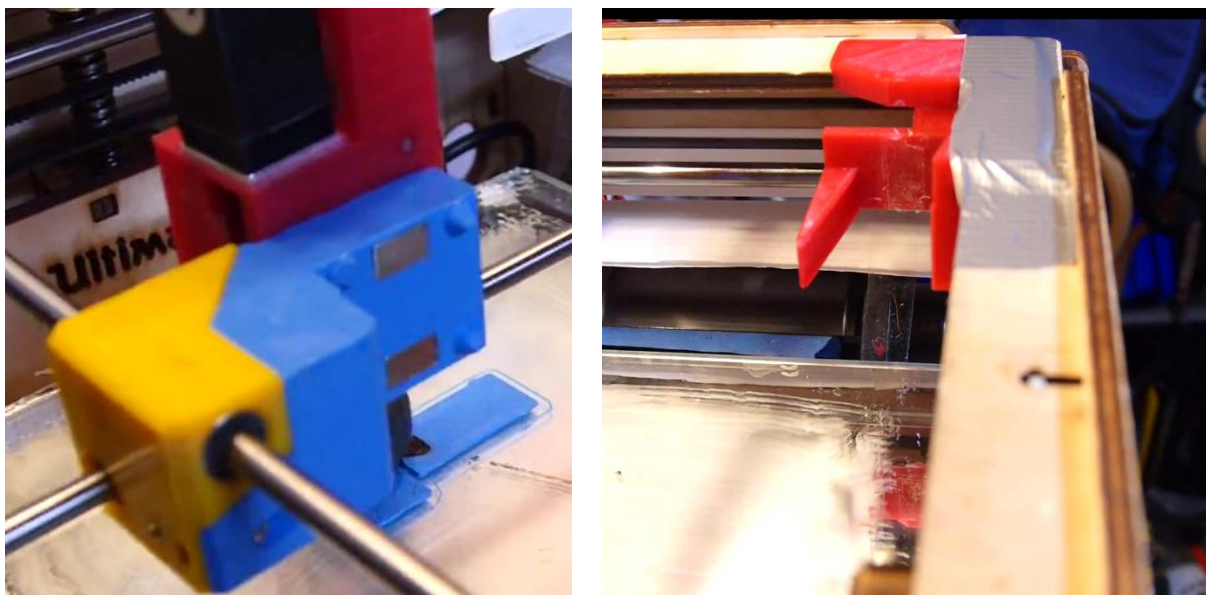
Obr. 54) AVTH na tiskárně typu Delta, nahoře vpravo a vlevo jsou zásobníky na hlavy [32]



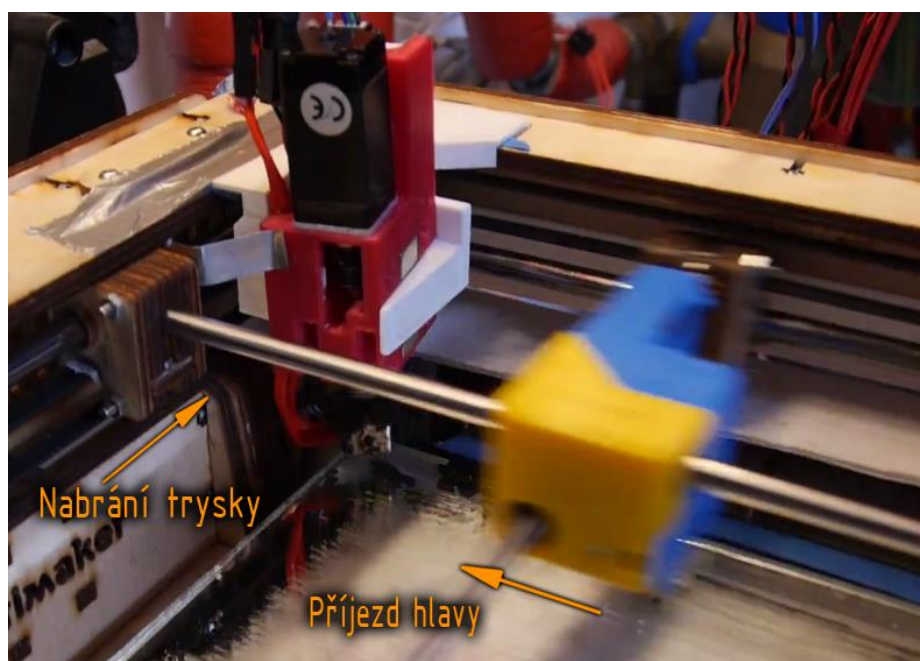
Obr. 55) Výměnná hlava využitá pro tisk palačinky přímo na ohřátou pánev [33]

Výměna hlav na tiskárně Ultimaker

Druhým zajímavým projektem je AVTH od uživatele „foehnsturm“ z Ultimaker diskuzního fóra. Výměna hlav je přizpůsobená speciálně na tiskárnu Ultimaker a opět využívá permanentní elektromagnety. Hlavy jsou při nečinnosti zaparkované v rohu tiskárny, kde je při aktivaci nabere tisková hlava. Při nabírání je využito tvarových výstupků pro správnou pozici a magnetů pro vytvoření silového styku. Sundávání je vyřešeno elegantním způsobem, kdy hlava najede ve směru osy X do parkovací pozice a pohybem ve směru osy Y dojde k přerušení kontaktu mezi magnety a tím i odpojení hlavy (obrázky 56 a 57).

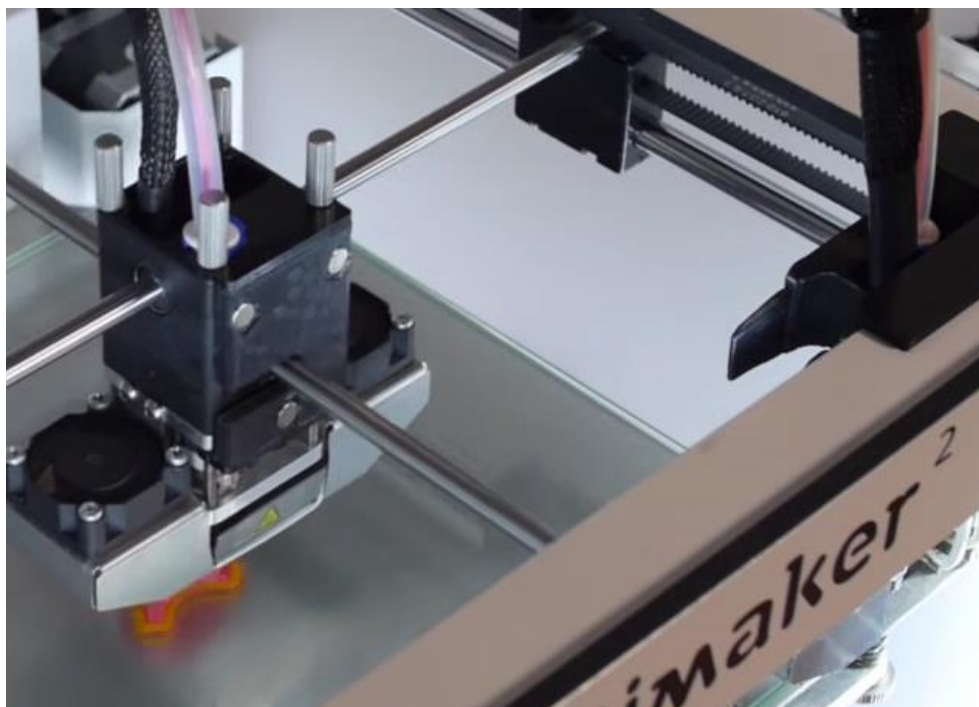


Obr. 56) AVHL na Ultimaker 1 a) tisková hlava, b) parkovací pozice [34]

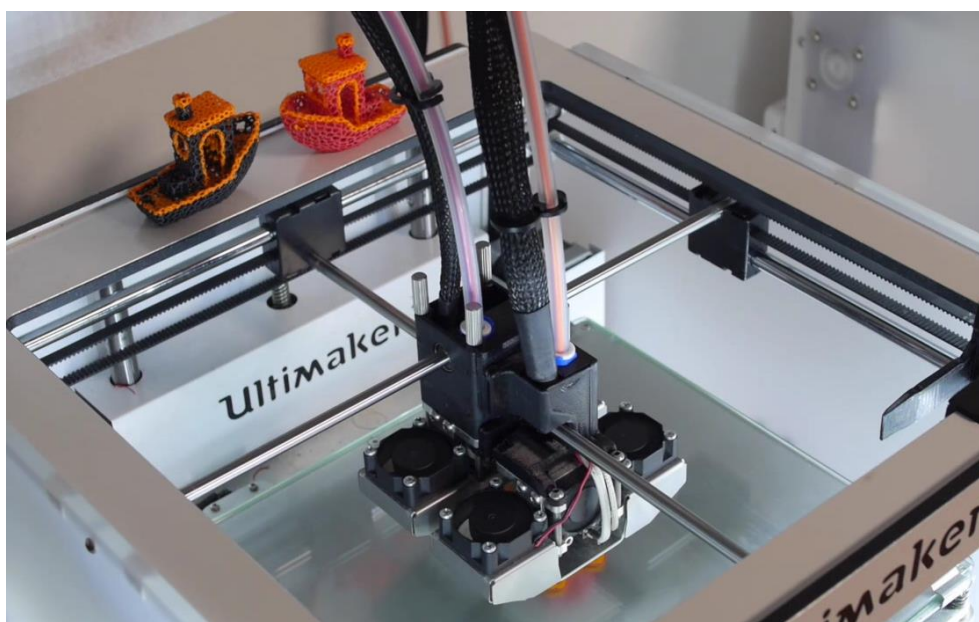


Obr. 57) Příjezd hlavy k parkovací pozici [34]

Tvůrce tento koncept nadále vylepšoval a vytvořil i verzi pro tiskárnu Ultimaker 2 [35]. Tato varianta už úplně nesplňuje funkci automatické výměny, protože jedna hlava je napevno připevněná k pojezdu a pouze nabírá hlavu druhou. Opět je využito podobných parkovacích pozic a připevnění pomocí magnetů (obrázky 58 a 59).



Obr. 58) Detail hlavy s magnety, vpravo je zaparkovaná druhá hlava [35]



Obr. 59) Připojená sekundární hlava [35]

Celkově tento systém působí dobrým dojmem, i co se týče rychlosti výměny, a je možné z něj vycházet při návrhu dalších řešení.

5 PŘEHLED 3D TISKÁREN NA TRHU

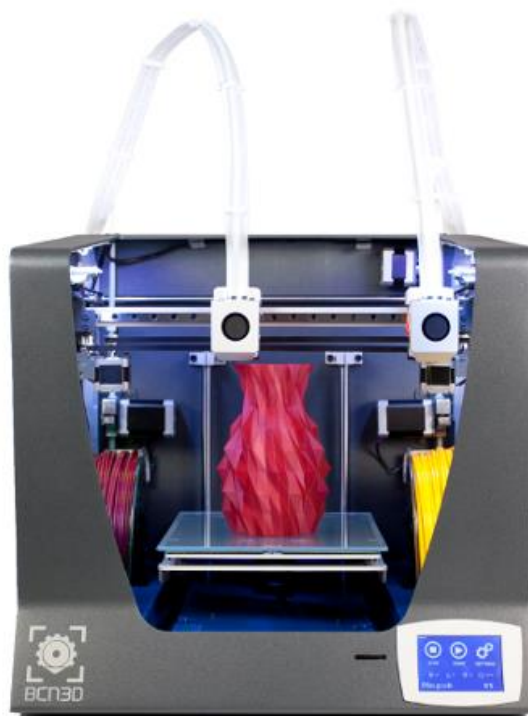
V předchozí kapitole byly představeny základní části 3D tiskárny. Jelikož je na trhu velké množství výrobců, existuje i spousta různých modifikací jednotlivých komponent a mechanismů. V následující kapitolách budou rozebrány různé mechanismy vybraných komerčně úspěšných (podle 3D Hubs [4]) tiskáren. Pro porovnání byli vybrány tyto modely:

- BCN3D Sigma
- Ultimaker 2+
- CraftBot Plus
- MakerBot Replicator+

Tyto tiskárny mají tiskovou hlavu polohovatelnou v ose X a Y a podložka se pohybuje v ose Z. Některé z nich mají možnost tisku 2 materiálů.

5.1 BCN3D Sigma

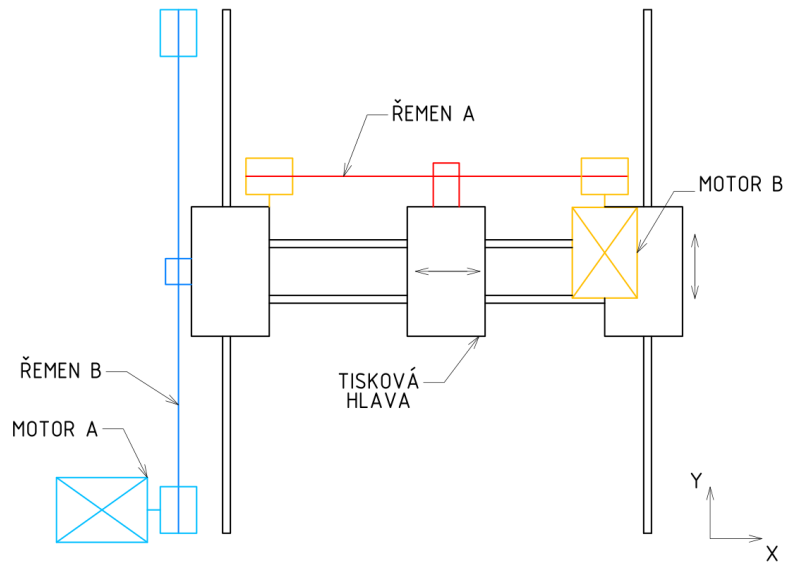
Tiskárna Sigma (na obrázku 60) od španělského výrobce BCN3D, je zástupce strojů se sériovou kinematikou polohování hlavy. Dvě nezávisle polohovatelné tiskové hlavy jsou určeny pro tvorbu vícebarevných modelů či tisk podpurných materiálů. Hot end při přestávce v tisku zajíždí do parkovací polohy, takže nedochází k poškození modelu vytékajícím filamentem. V kapitole je čerpano z webových stránek výrobce [22].



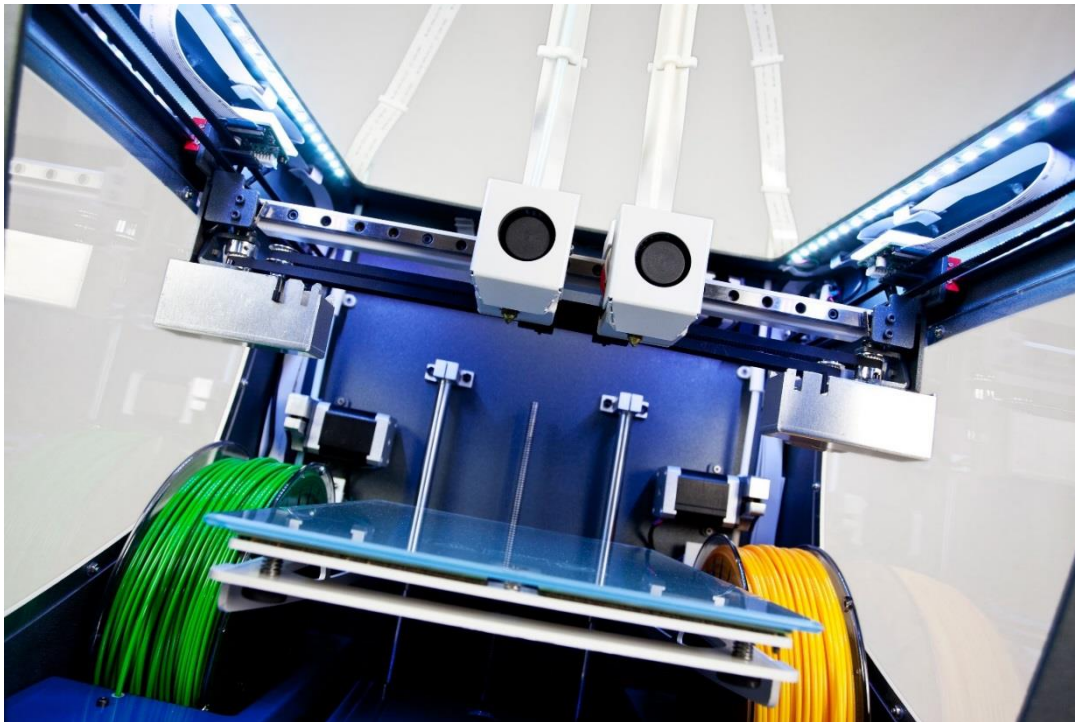
Obr. 60) Tiskárna Sigma od výrobce BCN3D [22]

5.1.1 Sériová kinematika

Tiskárna dosahuje požadované polohy hlavy pomocí sériové kinematiky, jejíž princip je zjednodušeně znázorněn na obrázku 61. Vedení os je realizováno pomocí lineárních vozíků a profilových kolejnič. O pohon se starají krokové motory spolu s ozubeným řemenem.

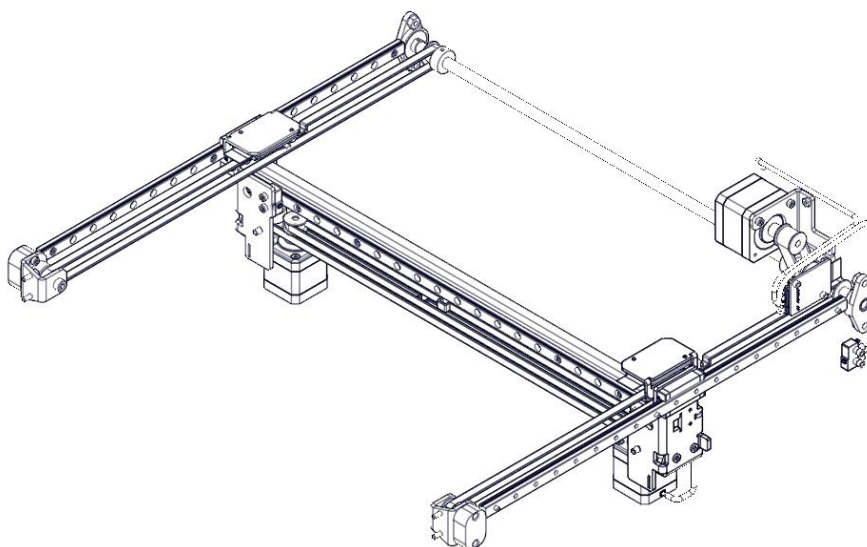


Obr. 61) Schéma standartní sériové struktury



Obr. 62) Pohled do tiskárny Sigma [22]

Jak je patrné z obrázků 62 a 63 je řemen pro pohon osy Y umístěn na obou stranách a od jednoho krokového motoru je krouticí moment rozváděn přes spojovací hřídel.



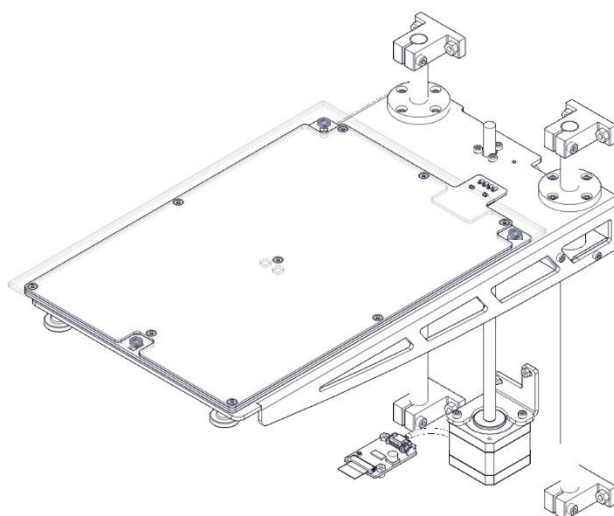
Obr. 63) Schéma polohování os [22]

Hmotnost osy X je kvůli použití 2 hlav s pohony vyšší než u jiných řešení. Pravděpodobně z tohoto důvodu byla volena koncepce, kdy je osa Y poháněna oboustranně ozubeným řemen, který je od motoru poháněn přes spojovací hřídel. Lineární vedení a motory jsou přišroubovány k rámu stroje.

Použití sériové kinematiky přináší výhody v jednodušším řízení, chování systému je dané (je přesně určené o kolik se v ose pohnu, pokud otočím motorem), ale je vykoupeno vyšší hmotností pohybované osy X a z toho vyplývající především horší dynamika pohonu.

5.1.2 Zdvih osy Z

Zvedání podložky je řešeno pomocí vedení z vodících tyčí a pohon je realizován přes trapézový šroub s krokovým motorem.



Obr. 64) Schéma zdvihu osy Z tiskárny Sigma [22]

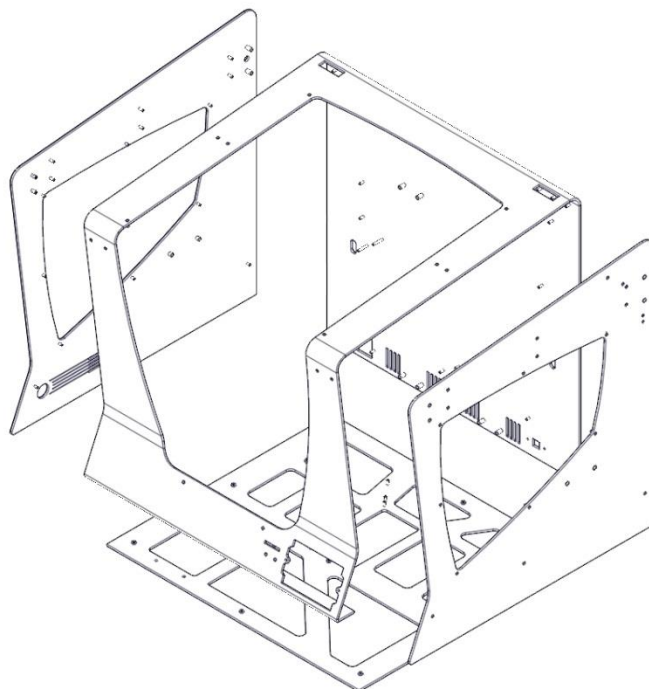
Vodící tyče mají průměr 12 mm a trapézový šroub je rotor krokového motoru, což má dle výrobce zajistit pevné spojení a přesné polohování. Platforma pod vyhřívanou podložkou je výpalek z hliníkového plechu pro snížení hmotnosti. Celá konstrukce je upevněna přímo na samonosném rámu stroje obrázku 64.

5.1.3 Doprava struny

Vzhledem k vyšší váze osy X, již pravděpodobně výrobce nechtěl osu Y zatěžovat ještě více a zvolil hot end s bowden extrudérem. Samotné extrudéry jsou umístěny na zadní straně rámu a trubičky jsou poté vedeny k tiskové hlavě – vše jde vidět na obrázku 62.

5.1.4 Rám

Rám stroje je tvořen několika hliníkovými plechy s vypálenými otvory a maticemi pro uchycování vnitřních komponent (obrázek 65).

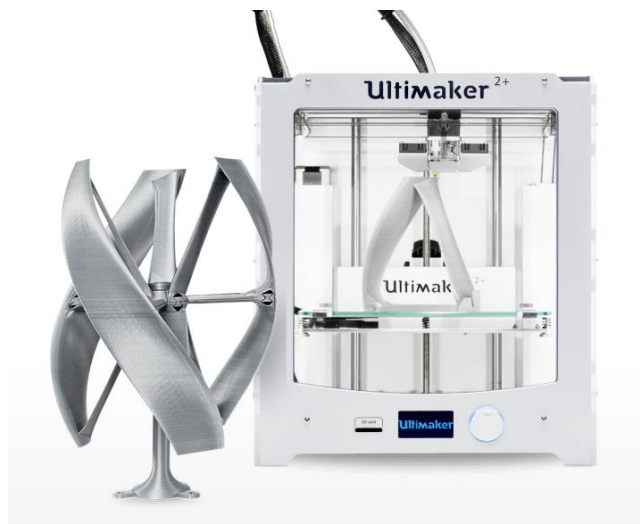


Obr. 65) Rám stroje Sigma [22]

Tiskárna Sigma stojí dle stránek výrobce 2295 €, což při kurzu 1 € = 27 Kč (únor 2017) odpovídá přibližně 62 000 Kč.

5.2 Ultimaker 2+

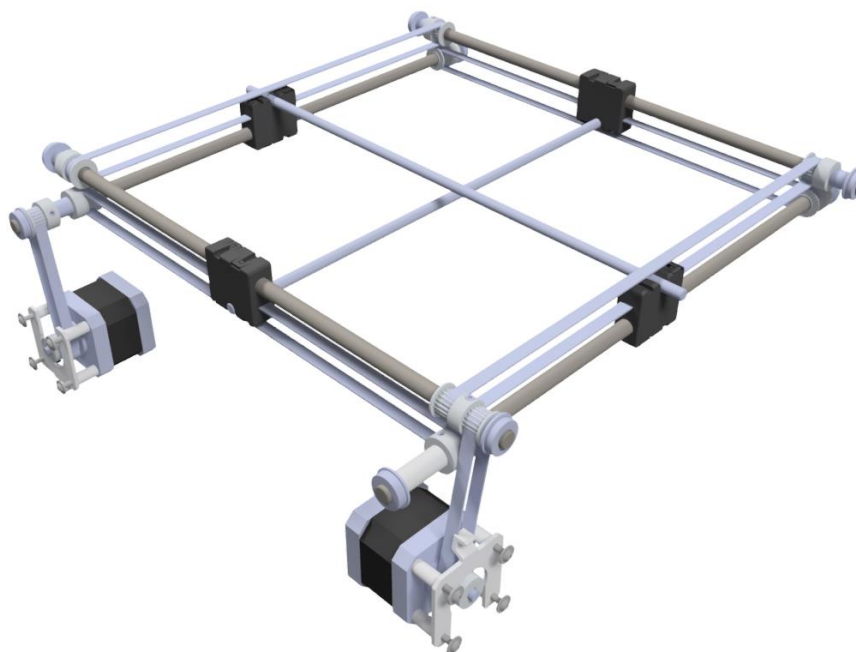
Tiskárna Ultimaker 2+ od holandské společnosti Ultimaker je populární a zároveň jednou z nejrozšířenějších 3D tiskáren na trhu (podle 3D Hubs [3]). Tiskárna má 1 tiskovou hlavu a nabízí tisk několika základních materiálů. V kapitole je čerpáno z webu Ultimaker¹³ [10].



Obr. 66) Tiskárna Ultimaker 2+ [10].

5.2.1 Kinematika Ultimaker

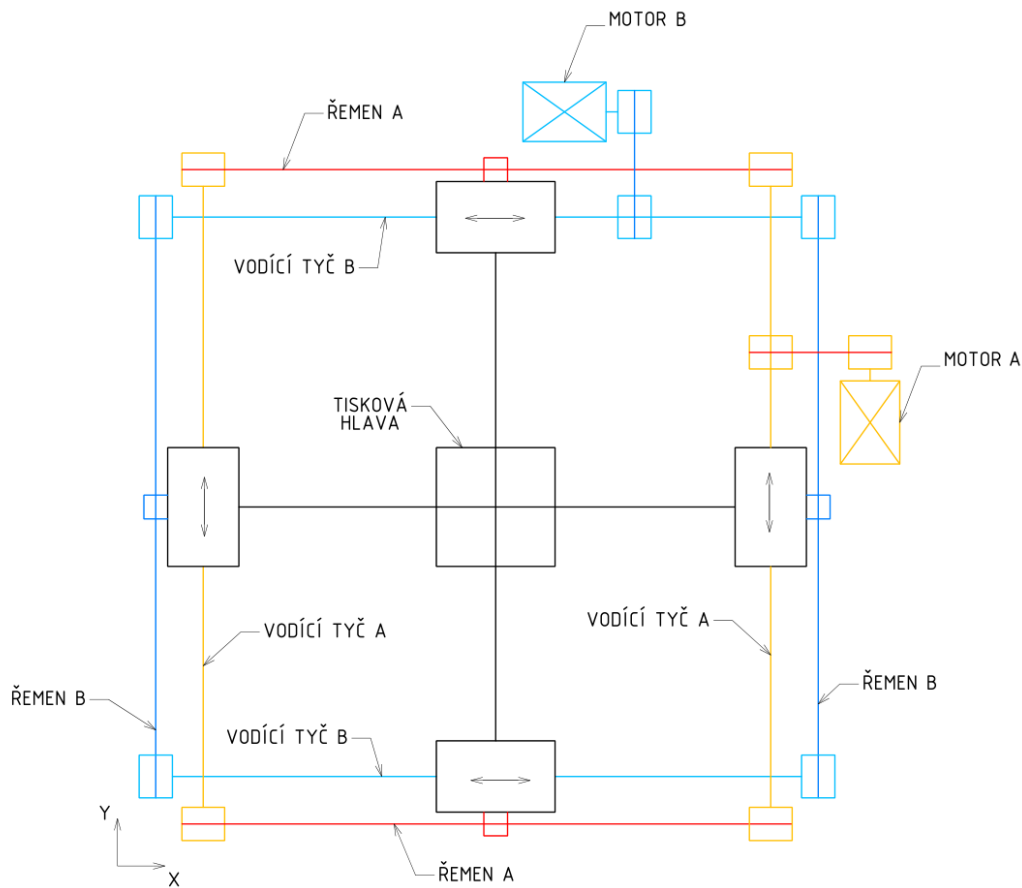
Tisková hlava je polohována speciální kinematikou, která kombinuje výhody a nevýhody paralelní a sériové kinematiky. Systém využívá vodící tyče a pohon řemeny (obrázek 67).



Obr. 67) Polohovací systém Ultimaker2+ [23]

¹³ Firma Ultimaker zpřístupnila všechny data o tiskárně na servu GitHub [23], pod hlavičkou projektu Open Source (volně přípustné zdrojové kódy). Vyrenderované modely jsou odtud převzaty

Každá osa je vedena pomocí 2 tyčí, které rotují a tím zároveň slouží i pro přenos kroučícího momentu pro pohon druhé osy. Tedy (podle schématu na obrázku 68), pokud je potřeba se pohybovat v ose X, je zapnut motor A, přes řemen je přenesena rotace na vodící tyč A, která má na obou koncích řemenice, pohánějící ozubený řemen A spojený s vozíkem osy X a ten vykoná lineární pohyb.

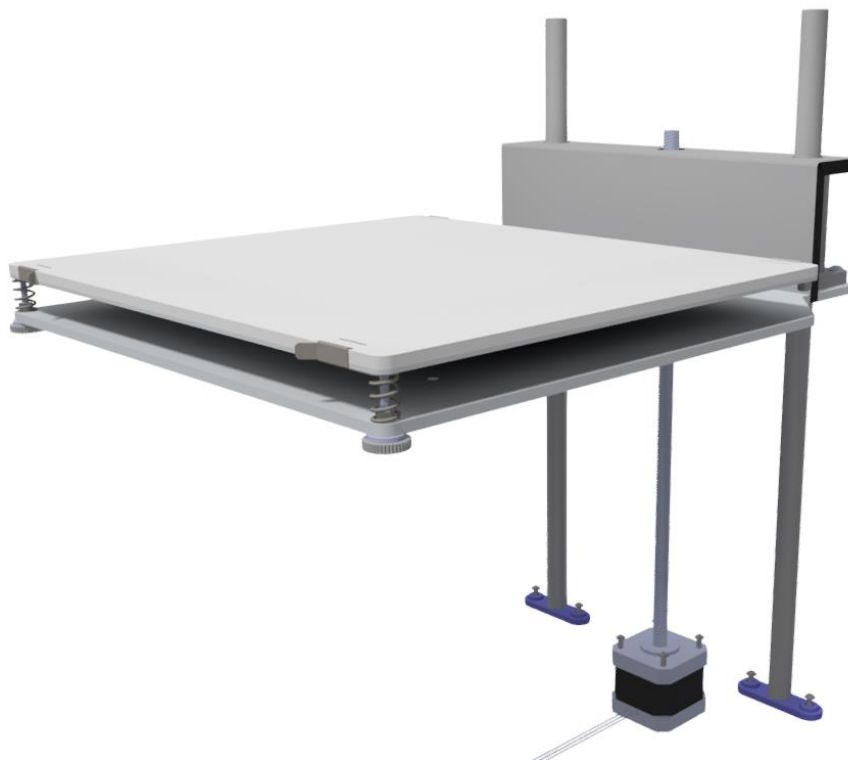


Obr. 68) Schéma Ultimaker kinematiky

Výhodami takového systému je jednoduché řízení a nízká hmotnost tiskové hlavy. Nevýhodami je komplikovanost systému, kdy je nutné zajistit rovnoběžnosti a kolmosti vodicích tyčí a nutnost hlídat zatížení tiskové hlavy, kvůli průhybu vodicích tyčí.

5.2.2 Osa Z

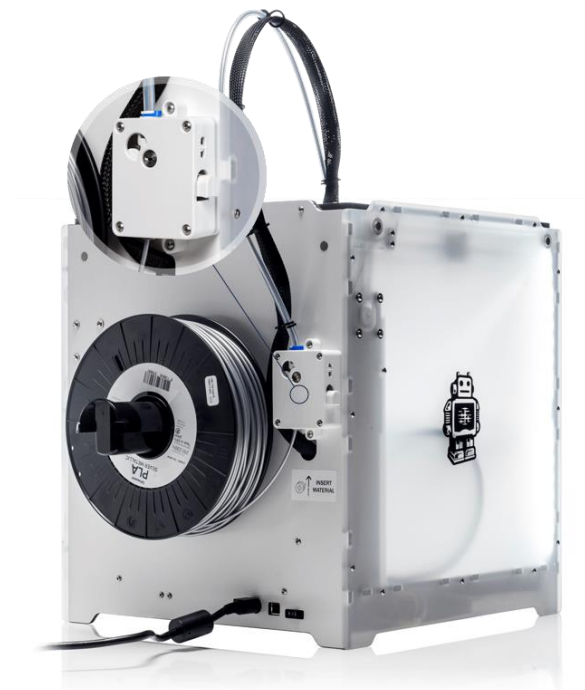
Zdvih podložky v ose Z je realizován pomocí krokového motoru s trapézovým šroubem (závit Tr 8×2) a vedení je provedeno pomocí vodících tyčí o průměru 12 mm. Vyhřívaná podložka je výškově nastavitelná pomocí 3 šroubů (obrázek 69).



Obr. 69) Zdvih podložky Ultimaker2+ [23]

5.2.3 Podávání filamentu

Ultimaker 2+ má 1 tiskovou hlavu s jednou tryskou a podávání filamentu je řešeno pomocí bowdenu. Extrudér je umístěn na zadní straně tiskárny, kde se nachází i zásobník se strunou. (viz obrázek 70). V nové verzi tiskárny Ultimaker 3, je k dispozici tisková hlava se dvěma hot endy a je možné tisknout vícebarevné modely nebo tisk podpůrných materiálů (na obrázku 71).



Obr. 70) Extrudér umístěný na zadní straně tiskárny [10]



Obr. 71) Tiskárna Ultimaker 3 s 2 hot endy [10]

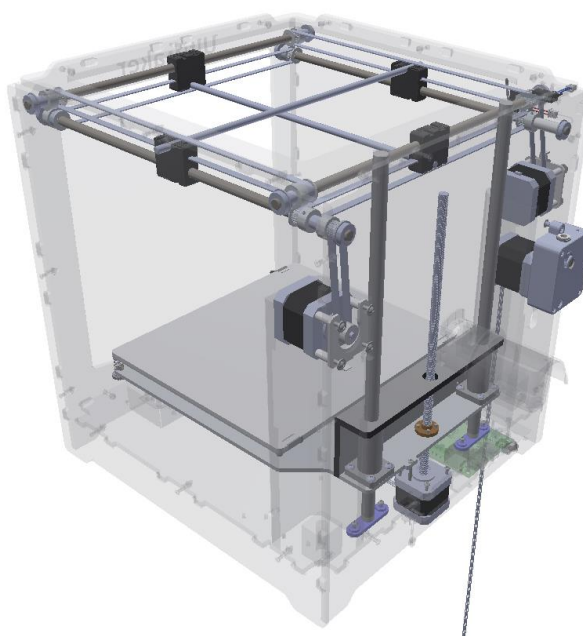
5.2.4 Rám

Rám stroje je poskládán z 6mm hliníkových plechů a všechny komponenty se uchycují přímo na něj. Plechy jsou k sobě připevněny pomocí šroubů (obrázek 72). Tiskárna je ze 3 stran zakrytovaná a je i možnost dokoupit dvířka na přední stranu.



Obr. 72) Rám tiskárny Ultimaker 2+ [23]

Tiskárna Ultimaker 2+ stojí podle stránek výrobce 1895 €, odpovídající cca 52000 Kč (řez tiskárnou na obrázku 73).



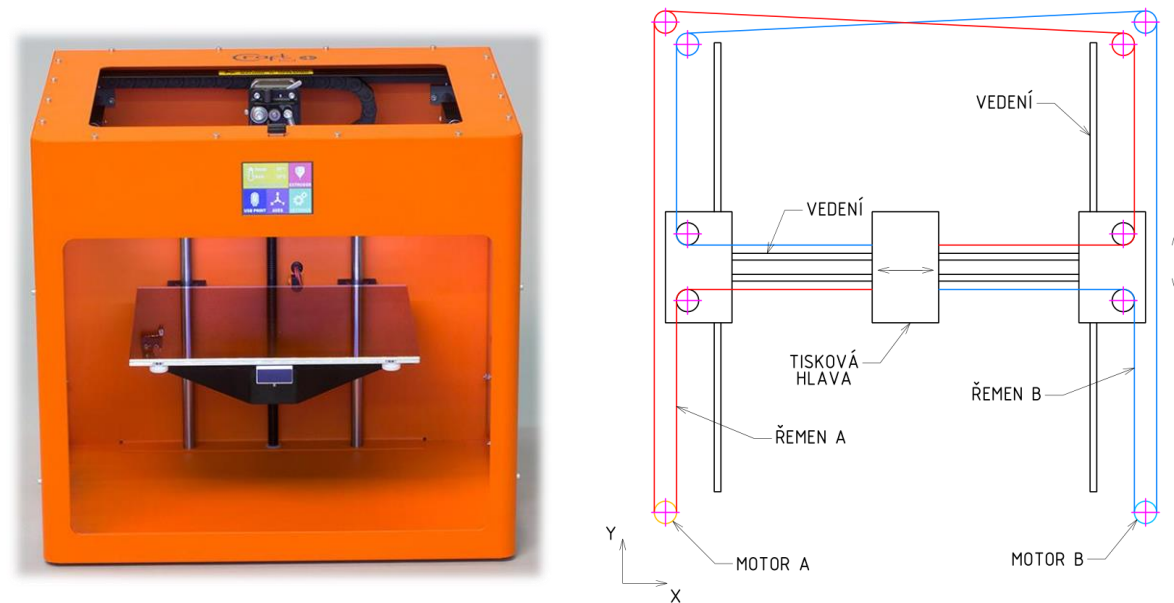
Obr. 73) Ultimaker 2+ [23]

5.3 CraftBot Plus

Maďarská společnost CraftUnique se zabývá konstrukcí 3D tiskáren a vývojem řezacího softwaru pro tvorbu G-kódu (CraftWare). CraftBot Plus (obrázek 74) obsahuje jednu tiskovou hlavu, polohovanou paralelní kinematikou a má polouzavřený plechový rám. V kapitole je čerpáno ze stránek výrobce [24].

5.3.1 Paralelní kinematika – CoreXY

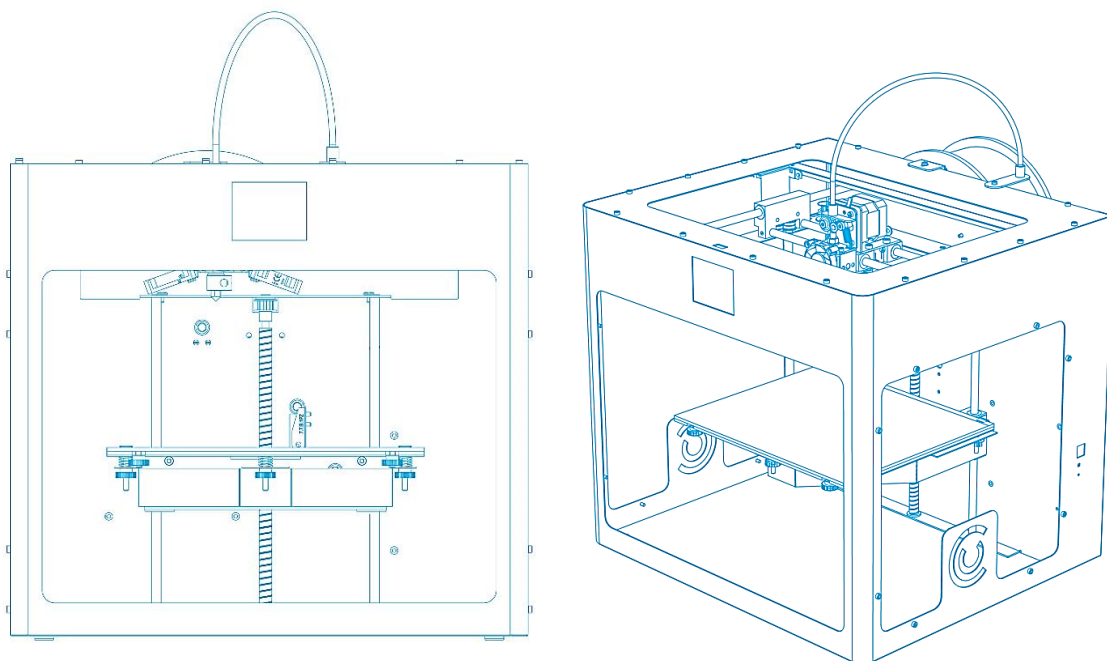
Pohyb tiskové hlavy je zajištěn 2 motory, které pracují v paralelním uspořádání. Pohyb od motorů je přenášen 2 ozubenými řemeny, které jsou oba vedeny pomocí kladek a ukotveny na tiskové hlavě. Požadovaný pohyb v ose X a Y je docílen kombinací rotací obou motorů, například za rotace motoru A i B po směru hodinových ručiček, se hlava pohybuje ve směru osy X atd. Tato mechanika se nazývá CoreXY. Pro vedení jsou využity vodící tyče s valivými lineárními ložisky (obrázek 74).



Obr. 74) a) CraftBot Plus [24], b) kinematika CoreXY

5.3.2 Osa Z

Vyhřívaná podložka je zvedána pomocí krokového motoru s trapézovým šroubem a vedení obstarávají 12 mm vodící tyče s valivými pouzdry. Krokový motor je umístěn za zadní stěnou tiskárny a s šroubem je spojen pomocí převodu ozubeným řemenem. Podložka je na platformě ručně stavitelná pomocí 3 šroubů.



Obr. 75) a) Zdvih vyhřívané podložky, b) tiskárna CraftBot+[24]

5.3.3 Podávání struny

Stroj má podávání materiálu do struny řešeno pomocí direct extrudéru, který je umístěn na vozíku osy X. Struna je podávána z exteriéru tiskárny přes trubičku (obrázek 75).

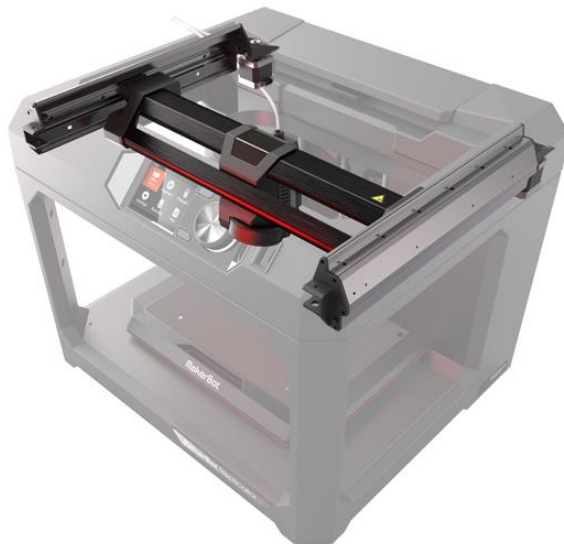
5.3.4 Rám

CraftBot Plus má šasi tvořeno několika ohýbanými a sešroubovanými ocelovými plechy. Je otevřené z přední a horní strany, boční strany tiskárny jsou průhledné z plexiskla (obrázek 75).

CraftBot Plus se prodává za 1035 €, v přepočtu zhruba 28 000 Kč.

5.4 MakerBot Replicator+

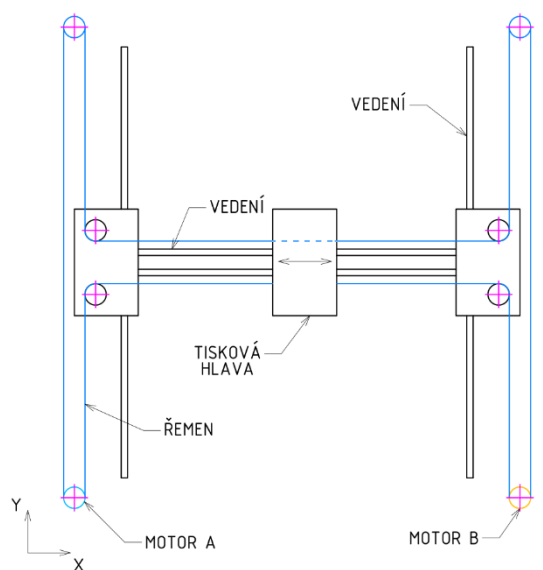
Tiskárna Replicator+ (na obrázku 76) od americké společnosti MakerBot, založené v roce 2009, patří mezi nejrozšířenější tiskárny na světě. Tiskárna umožňuje tisk s jednou tiskovou hlavou, která má možnost rychlé ruční výměny za jinou. V kapitole je čerpáno z firemní webové prezentace [25].



Obr. 76) Tiskárna Replicator + [25]

5.4.1 Paralelní kinematika – HBot

Replicator+ patří k 5. generaci tiskáren MakerBotu, u kterých došlo ke změně používané mechaniky – předchozí stroje používali standartní sériovou kinematiku (jako např. u tiskárny Sigma v kapitole 5.1). V nové generaci je využita paralelní kinematika – konkrétně s komunitním označením HBot (schéma na obrázku 77). Tisková hlava je polohována pomocí dvou napevno umístěných motorů a ozubeným řemenem. Výsledný pohyb v ose X a Y se skládá z natočení jednotlivých motorů, podobně jako u CoreXY. Tiskárna Replicator+ využívá pro vedení os X i Y lineární kolejnice s vozíky.



Obr. 77) Schéma Hbot

5.4.2 Osa Z

Zvedání podložky je zajištěno pomocí krokového motoru, trapézového šroubu a vedeno pomocí vodících tyčí s pouzdry.

Podložka tiskárny není vyhřívána¹⁴, ale je opatřena speciálním povrchem, který umožňuje dobré přilnutí modelu a zároveň jeho snadné odstranění po ukončení tisku. K tomu také pomáhá flexibilita podložky.

5.4.3 Extrudér tiskárny

Tiskárna využívá pro tisk jednu tiskovou hlavu s jednou tryskou. Tato hlava je vytvořena jako kompaktní modul, který je možno ručně vyměnit a tím docílit např. rychlé změny průměru trysky. Celý modul je upevněn pomocí magnetů na pojezdu osy X, kde je zároveň osazen i motor pro pohon extrudéru. Výměnná hlava tedy v sobě nemá motor. Struna je k extrudéru dopravována ze zásobníku v zadní části tiskárny (obrázek 78).



Obr. 78) a) MakerBot Smart Extruder [25], b) vytažený zásobník filamentu [25]

5.4.4 Rám

Rám tiskárny je otevřený ze 3 stran. Výrobce udává ve specifikacích, že materiál pro rám je plast PC + ABS, vyztužený ocelovými prvky.

Cena tiskárny MakerBot Replicator+ je 2499 \$, v přepočtu tedy zhruba 65000 Kč.

¹⁴ MakerBot používá u většiny tiskáren pouze materiál upravený PLA, který samo dodává, proto není potřeba vyhřívání podložky

5.5 Porovnání vlastností tiskáren

Parametry jsou převzaty ze stránek výrobců ([22], [10], [24], [25]), proto je nutné brát především hodnoty přesností polohování a rychlostí s rezervou.

Tab 1) Parametry tiskáren

	BNC3D Sigma	Ultimaker 2+	CraftBot Plus	MakerBot Replicator+
Tiskový prostor [mm]	210×297×210	223×223×205	250×200×200	295×195×165
Rozlišení vrstvy [mm]	0,05-0,5	0,02-0,6	min 0,1	min 0,1
Přesnost poloh. X, Y [μm]	12,5	12,5	4	11
Přesnost poloh. Z [μm]	1	5	2	2,5
Rychlost max.[mm/s]	-	300	200	-
Počet trysek	2	1	1	1 - výměnná
Doporučené materiály	PLA, ABS, PVA, TUP, Nylon, HIPS	PLA, ABS, CPE, CPE+, Nylon, TPU 95A	-	MakerBot PLA
Cena	2295 €	1895 €	1035 €	2499 €

6 NÁVRH TISKÁRNY

V následujících odstavcích budou zvoleny hlavní uzly a komponenty tiskárny. Výběr je přizpůsoben především nízké ceně tiskárny, jednoduchostí konstrukce, použití min. 2 materiálů pro tisk a rychlosti tisku. Ještě před samotným výběrem variant je nutno shrnout požadavky, kladené na konstrukci tiskárny v této práci.

Technologie FDM už z principu nemůže dosahovat velkých rychlostí tvoření výtisku, jelikož je omezena tavením a protlačováním plastu skrz trysku. Nicméně rychlost tisku, lze pozitivně ovlivnit především lehkou tiskovou hlavou, která bude mít dobré dynamické vlastnosti a umožní přiblížení se k hranici tiskových možností technologie.

3D tiskárna navržená v této práci by měla mít možnost tisku minimálně 2 materiálů. Na základě rešerše, byla vybrána možnost automatické výměny hlav, a to především z důvodů odlehčení tiskové hlavy (tisknout jde vždy pouze s jednou hlavou) a také odstranění komplikací jako např. vytékající filament z trysky, co právě natiskne apod.

Výměna hlav trvá delší čas než pouhé přepnutí se na druhou trysku umístěnou v jedné hlavě, ale jak je vidět na obrázcích 44 a 45, pro omezení vad způsobených druhou tryskou je relativně vyšší spotřeba tiskového materiálu na pomocné konstrukce, a i stavba těchto konstrukcí nějakou dobu potrvá. Proto je předpokládáno, že čas pro výměnu tiskových hlav bude přibližně buď stejný nebo nižší u varianty dvou trysek na jedné tiskové hlavě.

Konstrukce tiskárny tedy bude přizpůsobena automatické výměně hlav a rychlému tisku s dobrými dynamickými vlastnostmi. Přesností by tiskárna měla odpovídat popisovaným komerčním tiskárnám z kapitoly 5, tabulka 1, kde jsou ovšem pravděpodobně uvedeny hodnoty teoretické, jelikož často odpovídají přepočítané přesnosti převodu rotačního pohybu na lineární u krokového motoru a řemenového převodu. Přesnost výsledných výrobků závisí na přesnosti polohování os a na smrštění součástky. Cílem je výsledná přesnost vnějších rozměrů výtisků pohybovat okolo $\pm 0,5$ mm.

Materiály, které tiskárna zvládne vytisknout by měli být běžně dostupné, zmíněné v kapitole 2.2. Běžně dostupné trysky jsou konstruovány pro teploty do 300 °C a tudíž bude toto omezením.

Důležitá je i ekonomická stránka konstrukce a tiskárna by se měla cenově pohybovat okolo 15 000 Kč s daní. Jelikož tato částka není vysoká, bude nutné vyhnout se nákupu drahých součástí a omezit obrábění komponent. Cíle práce jsou shrnuty v tabulce 2.

Tab 2) Parametry navrhované 3D tiskárny.

Rychlost tisku	200 mm/s
Rozlišení vrstvy	min. 0,1mm
Rozměrová přesnost výtisků	±0,5 mm
Tiskové materiály	Běžně dostupné, s teplotou tavení do 300 °C
Více materiálový tisk	Automatická výměna tiskových hlav
Další parametry	Zakrytování tiskárny
Přibližná cena	15 000 Kč

6.1 Mechanismus polohování osy X, Y

V kapitole 5 jsou představeni 4 zástupci komerčně dostupných a úspěšných tiskáren. Každá představuje jednoho zástupce nejpoužívanějších kinematik pro polohování tiskové hlavy. Na výběr tedy jsou tyto možnosti:

- Standartní sériová kinematika (kapitola 5.1.1)
- Ultimaker kinematika (kapitola 5.2.1)
- CoreXY (kapitola 5.3.1)
- HBot (kapitola 5.4.1)

Parametry pro porovnání jsou:

- Cena (váha 3) – brán v potaz počet komponent a potřeba obrábění více součástí
- Rychlost (váha 2) – především v souvislosti s pohybovanou hmotou, a tudíž ovlivnění zrychlení
- Komplikovanost (váha 1) – z hlediska zakomponování do rámu
- Řízení (váha 1) – jak náročný je systém na výpočty (rozdíl mezi sériovou a paralelní kinematikou) a
- Výměna hlav (váha 2) - vhodnost pro systém automatické výměny hlav.

Hodnocení je na stupnici od 1 do 4, s tím že 1 je nejlepší.

Tab 3) Rozhodovací matice kinematiky polohování

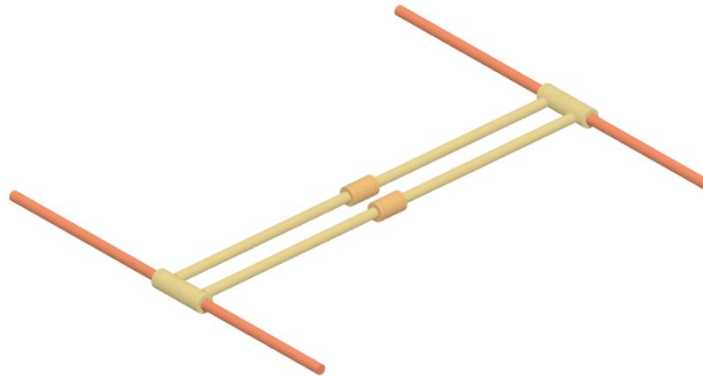
	Cena (3×)	Rychlost (2×)	Konstrukce (1×)	Řízení (1×)	Výměna hlav (2×)	Výsledek
Sériová kin.	2	3	1	1	1	16
Ultimaker	4	1	3	1	2	22
CoreXY	3	1	2	3	1	18
HBot	2	1	1	3	1	14

Nejhůře vychází kinematika Ultimaker, a to především z důvodu velkého počtu dílů a nutnosti velmi přesně ustavit jednotlivé vodící tyče vůči sobě. Poté je to kinematika CoreXY, kde je opět použit vyšší počet dílů, především řemenic a dlouhých řemenů a také potřeba výkonnější elektroniky. Sériová kinematika má nedostatek především ve vyšší hmotnosti pohybovaných částí a s tím související horší dynamické vlastnosti. Hbot kinematika nemá kromě požadavku na náročnější řízení, žádné výrazné vady.

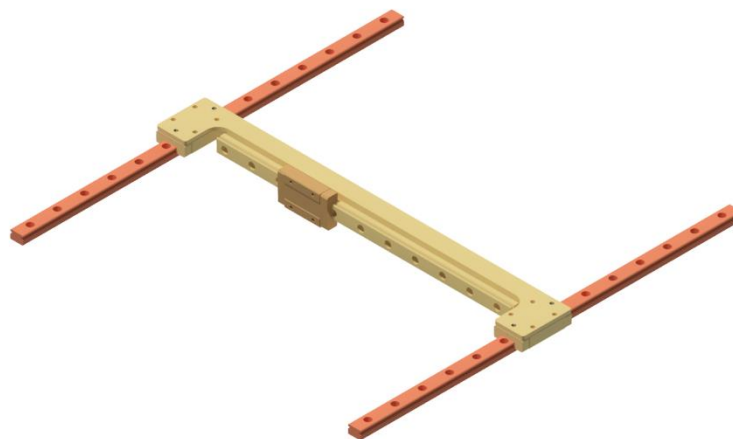
Rozdíl skóre mezi všemi kinematikami je malý a pro konstrukci tiskárny se hodí všechny. V této práci bude zpracován návrh s kinematikou HBot. Oproti ostatním uvedeným možnostem, má nejmenší pohybovanou hmotu, tudíž lze předpokládat dobré dynamické vlastnosti. Dále je také pozitivem jednoduchá konstrukce, nicméně vzhledem k nerovnoměrnému přenášení zatížení na vedení, bude nutné vytvořit tužší rám než u ostatních typů kinematik.

6.1.1 Vedení os

Pro vedení os se u srovnávaných (a také u většiny tiskáren na trhu) využívá buďto vodících tyčí s lineárními ložiskovými pouzdry (obrázek 79), případně kluznými pouzdry nebo se používá profilové kolejnicové vedení (obrázek 80)¹⁵. Obecně lze říci, že vodící tyče nabízí lepší cenu, nicméně tuhost vedení je zpravidla nižší, protože tyče nebývají podepřené a mohou se prohýbat. Profilové vedení nabízí větší tuhost, ale je dražší. Pro kinematiku HBot je vzhledem k vyšším požadavkům na tuhost vedení vhodnější profilové vedení s vozíky. U této varianty je nutné myslet na přesné rovnoběžné ustavení vedení vůči sobě, jinak může docházet k drhnutí vedení a zamezení funkce nebo předčasného opotřebování.



Obr. 79) Vedení pomocí tyčí a valivých pouzder



Obr. 80) Vedení lineárními vozíčky s kolejnicemi

¹⁵ Obecně vzato je možno využít ještě spoustu jiných vedení (např. kluzné, rolničkové, ...), ale z praktických důvodů, a především ekonomických je uvažováno pouze s variantami používanými u 3D tiskáren a uživateli ověřenými.

6.1.2 Pohon osy

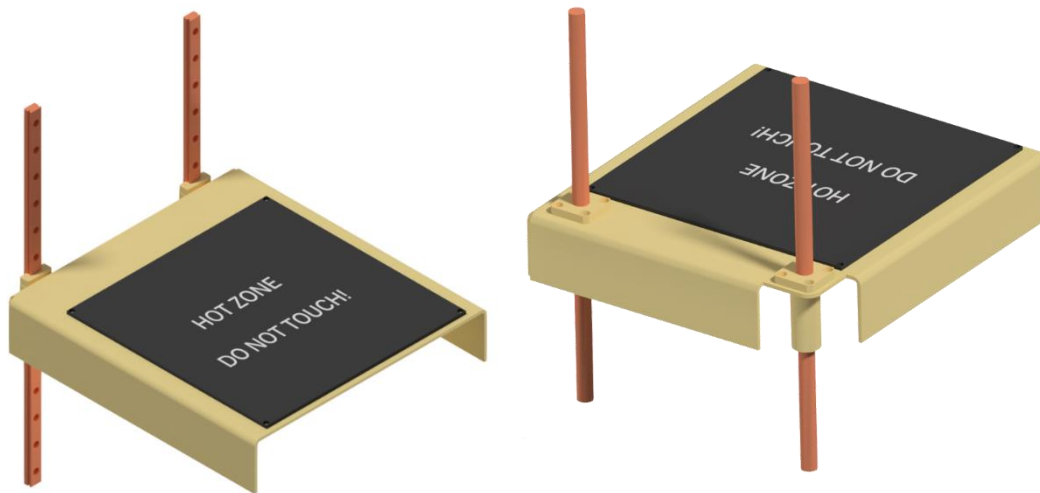
Pro pohon se výhradně používají krokové motory s ozubeným řemenem pro vyvození lineárního posuvu. Toto uspořádání je relativně jednoduché a levné, a především existující řídicí desky pro tiskárny, umí jednoduše ovládat krokové motory. Namísto řemenů by byla možnost použití např. kuličkových šroubů, ale toto řešení by bylo příliš nákladné a při požadavku na vysoké rychlosti a dynamiku pohonu, ztrácí smysl, jelikož by přineslo výrazné zvýšení pohybovaných hmot.

Profil ozubeného řemenu je zvolen HTD s roztečí zubů 3 mm. Profil HTD je vhodný pro vyšší rychlosti a lépe vymezuje vůli než řemeny s lichoběžníkovým profilem zubové mezery [36]. Dalším důvodem je dobrá dostupnost řemenů a řemenic na českém trhu.

6.2 Zdvih osy Z

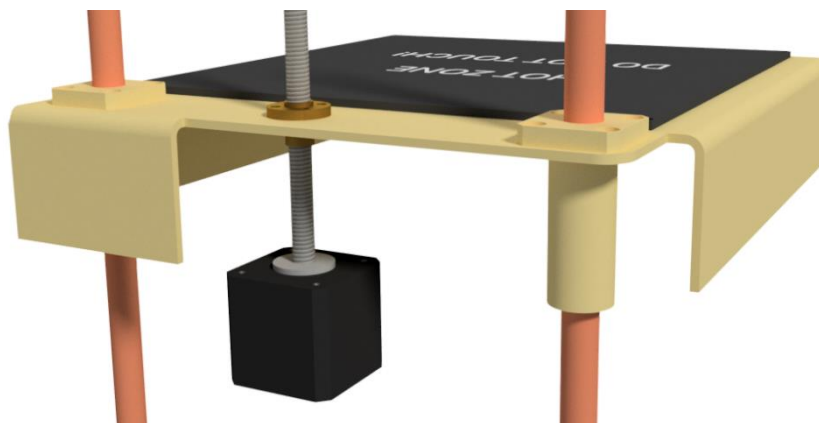
Vyhřívaná podložka se bude pohybovat v ose Z a z principu funkce se pohybuje pouze po malých krocích daným výškou vrstvy výtisku. Zpravidla v rozmezí 0,1 - 0,5 mm je proto nutné zajistit přesné polohování osy, dostatečně tuhé vedení a platformu pod vyhřívanou podložkou.

Nabízí se opět stejné možnosti použití vedení, jako u polohování osy XY. Prakticky všichni výrobci tiskáren se vydali směrem za použití 2 vodících tyčí s pouzdry a uložení desky letmo. To přináší problém s tuhostí desky, kdy musí být řádně dimenzována. Při této konfiguraci je dobrý přístup do pracovního prostoru a je i jednodušší následné seřizování vodících tyčí (je jednodušší seřizovat 2 tyče, než 3 nebo 4 tyče při použití podpor na více stranách). Namísto vodících tyčí je možné použít lineární prizmatické vedení s kolejkami, ale z důvodu nižší ceny je použito vedení s kuličkovými pouzdry (obrázek 81).



Obr. 81) a) vedení platformy pomocí valivých vozíčků a kolejnic, b) vodící tyče a lineární valivé pouzdro

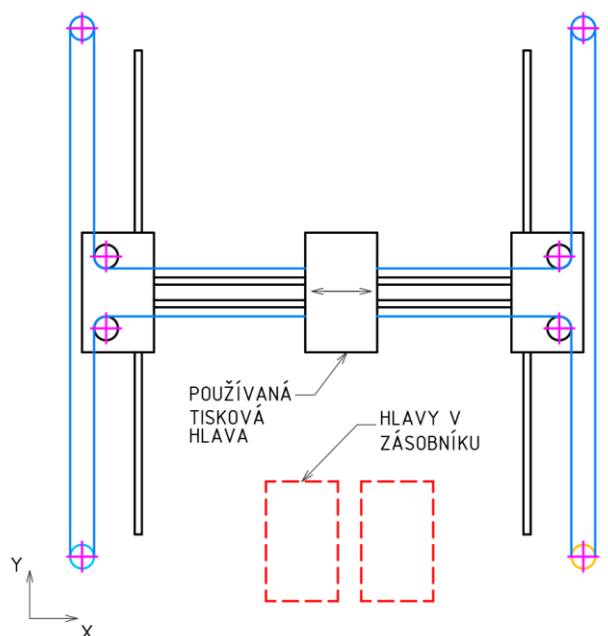
Pro pohon osy je možné využít řemenový pohon, případně trapézový šroub. Při použití řemene je jednoduché vymezení vůlí, ale problémem je, že při výpadku proudu by deska spadla. Vhodnější je varianta s trapézovým šroubem (obrázek 82), kdy jednak nehrozí tvrdý pád podložky (pokud by se podložka nezastavila samosvorností, pohyb dolů by byl výrazně brzděn třením) a řešení nabízí jednodušší napojení na rám tiskárny než pohon ozubeným řemenem. Nicméně musí být zajištěna správná poloha šroubu vůči vedením, a proto je nutné mít všechny prvky seřizovatelné.



Obr. 82) Pohon osy Z krokovým motorem a trapézovým šroubem

6.3 Řešení tiskové hlavy

Automatickou výměnu tiskových hlav nenabízí žádný výrobce 3D tiskáren, pouze se objevují nějaké projekty od uživatelů (viz kapitola 4.2.1). Proto je potřeba navrhnout vhodné řešení, které splní požadavky na rychlou výměnu a přesné ustavení hlavy na pojezd osy. Extrudér pro posuv drátu do trysky bude umístěn na rámu stroje a pro dopravu struny bude použita teflonová hadička.



Obr. 83) Schéma umístění zásobníku hlav

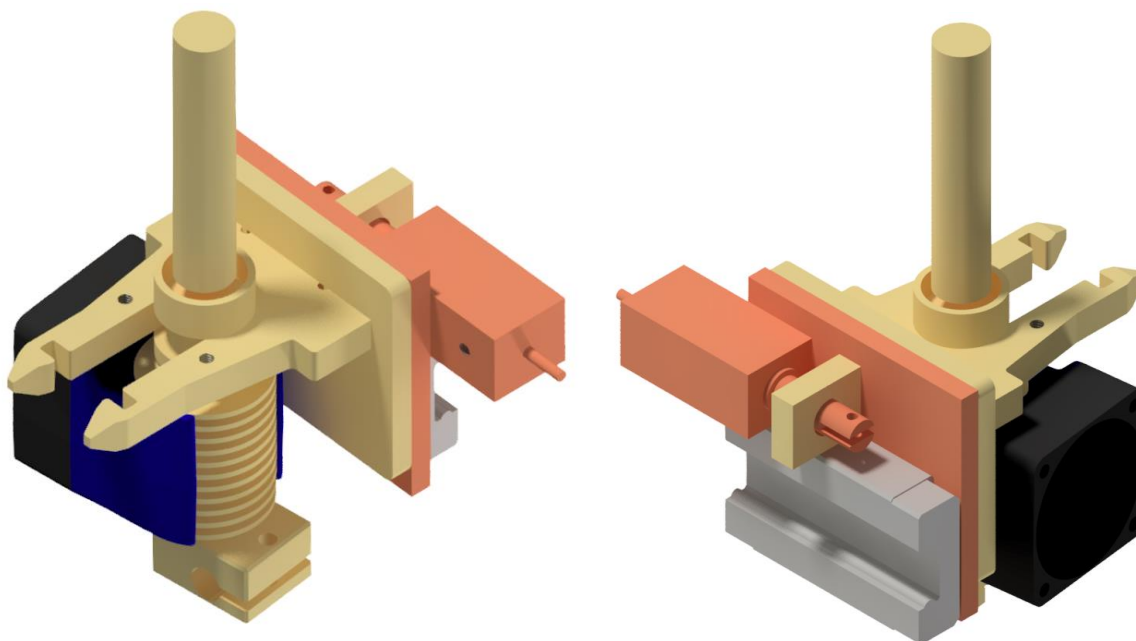
Konstrukčně je vybraná kinematika HBot (a také většina jiných kinematik) vhodná pouze pro umístění zásobníku hlav ve směru osy X, mimo tiskovou plochu (obrázek 83). Jedině tak je možné vyhnout se kolizím příčnicku s zásobníkem hlav.

Nabízí se varianta použití manipulátoru pro podávání hlav do pojezdového prostoru os, ale vzhledem k omezení ceny tiskárny by takové řešení bylo příliš nákladné a není zpracováváno.

Ve dvou projektech, zmíněných v kapitole 4.2.1), se objevil zajímavý nápad využití permanentních magnetů, jehož výhoda spočívá v jednoduchosti uchycení hlavy na pojezd osy a rychlosti výměny, kdy se nemusí čekat na reakci mechanismu pro uzamykání hlavy. Nevýhodou je zvýšená síla při odpojování hlavy, kdy by při příliš velké přitlačné síle magnetů mohlo dojít třeba i překročení dovoleného momentu na motoru a tím ztrátě kroku a ztracení přesné polohy hlavy. A na druhé straně při příliš nízké přitažlivé síle, může nastat uvolnění hlavy, a tím i možné poškození tiskárny. Tento problém by mohl být vyřešen pečlivou volbou magnetů a zkouškou prototypu s následným laděním velikosti magnetů a rychlostí pojezdu hlavy při výměně.

Odstranění problému s permanentními magnety by mohlo vyřešit použití elektromagnetu, který je ovládán signálem a při výměně může být vypnut. Elektromagnety mají ovšem relativně vysokou spotřebu a tím se i více ohřívají a mohlo by docházet k ovlivňování držáku tiskové hlavy a tím snížení přesnosti. Také by se zvýšila velikost a hmotnost tiskové hlavy.

Další variantou uchycení hlavy na pojezdu, by bylo využití nějakého tvarového spojení. Mohlo by se jednat o zapadání zámku do protikusu, využití principu kleštiny, nicméně všechny tyto varianty sebou přináší nevýhodu potřeby ovládacího prvku (např. elektromagnetu, servomotoru apod.), které především zvyšují vezenou váhu osy. Ačkoliv by se jednalo pouze o několik desítek gramů navíc, bylo by potřeba složitější konstrukce, nutnost přivést napájení k hlavě a zvětšili by se i rozměry tiskové hlavy (obrázek 84).



Obr. 84) Návrh varianty s elektromagnetem a tvarovým kontaktem

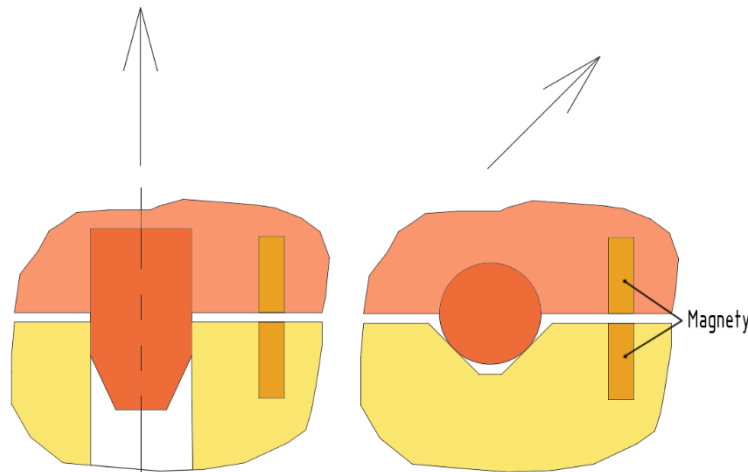
Pro konstrukci tiskárny bude použita varianta s permanentními magnety, jelikož nabízí levné a jednoduché řešení výměny hlav. Na pojezdu osy bude umístěna příruba s magnety a ustavovacími prvky. Hlavy budou umístěny v zásobníku, kde budou na své pozici drženy pomocí mechanismu na principu tvarového styku, ovládaného buď servomotorem nebo elektromagnetem. Spojí se tedy výhody všech variant a odstraní problémy s umístěním složitějších prvků na pojezd tiskárny.

6.3.1 Návrh varianty s permanentními magnety

Použití magnetů je specifické tím, že příruby u sebe drží pouze přitažlivou silou a není tedy mechanicky zabráněno uvolnění. S tím se váže problém především při rychlé změně směru tisku. Je proto nutné správně zvolit velikost magnetů.

Dále je potřeba vyřešit polohování hlavy vůči přírubě. Bylo uvažováno s možností využití naváděcích kolíků. Pro správné fungování by bylo potřeba mít alespoň 2 centrovací čepy nejlépe 3, ale zde již nastává problém s přesností navádění při výměně, kdy by mohlo docházet k drhnutí a zasekávání kolíků. Tento problém by byl způsoben nepřesnou výrobou a uložením kolíků¹⁶.

Lepší možností je vystředění polohy pomocí kulových čepů dosedajících do kuželových děr. I v případě výrobních nepřesností je zajištěna správná poloha, protože kuličky dosednou do zahlobení a tam je drží přitažlivá síla magnetů. Dalším pozitivem toho řešení je možnost odjíždění od zásobníku ve směru 45° (záleží na vrcholovém úhlu zahlobení) a tím snížit velikost síly potřebné k odtržení magnetů – magnetická síla působí především ve směru osy magnetů, ve střížném směru se síla rychle snižuje (obrázek 85).

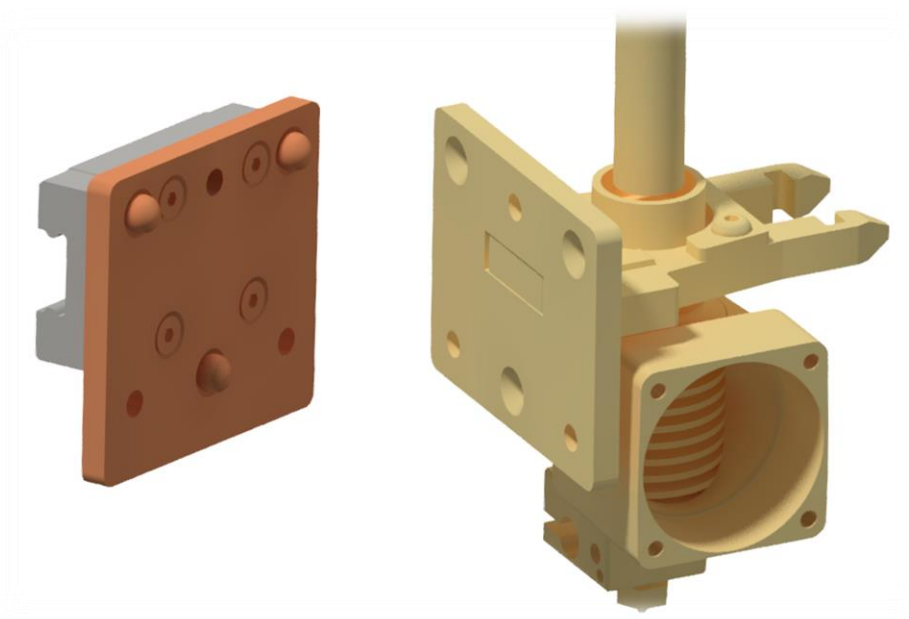


Obr. 85) Odpojování tiskové hlavy od pojezdu (kolmý a šikmý směr odjezdu při použití rozdílných pozicovacích prvků)

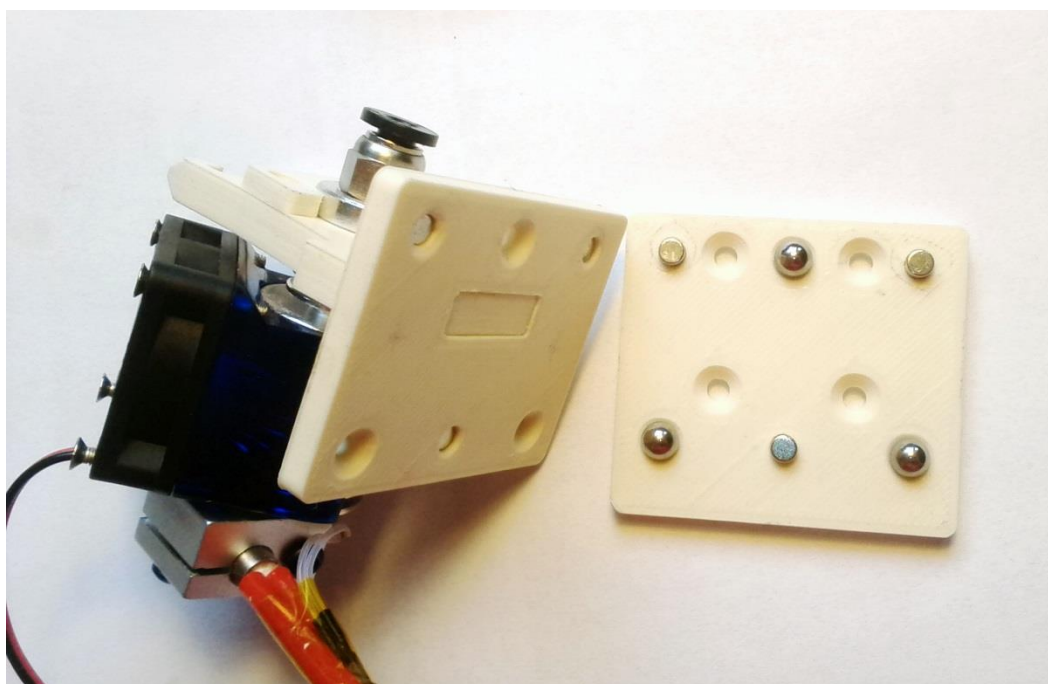
U řešení tedy budou použity 3 centrovací kuličky a 3 magnety. Pro ověření, zda tato metoda je vůbec použitelná byl vyroben prototyp dle modelu na obrázku 86.

¹⁶ Požadavek na cenu tiskárny, omezuje možnost využití přesného obrábění, a proto je část řešení přizpůsobena levnějším metodám výroby, a především použití nakupovaných dílů.

Prototyp (obrázek 87) byl vytištěn na 3D tiskárně, a funkčně splnil očekávání. Kuličky a magnety dokáží zajistit polohu a udržet ji. Reálné použití půjde otestovat až na 3D tiskárně, ale dá se říct, že kromě problémů s velikostí magnetů by tento princip mohl fungovat dobře.



Obr. 86) Návrh uchycení hlavy permanentními magnety



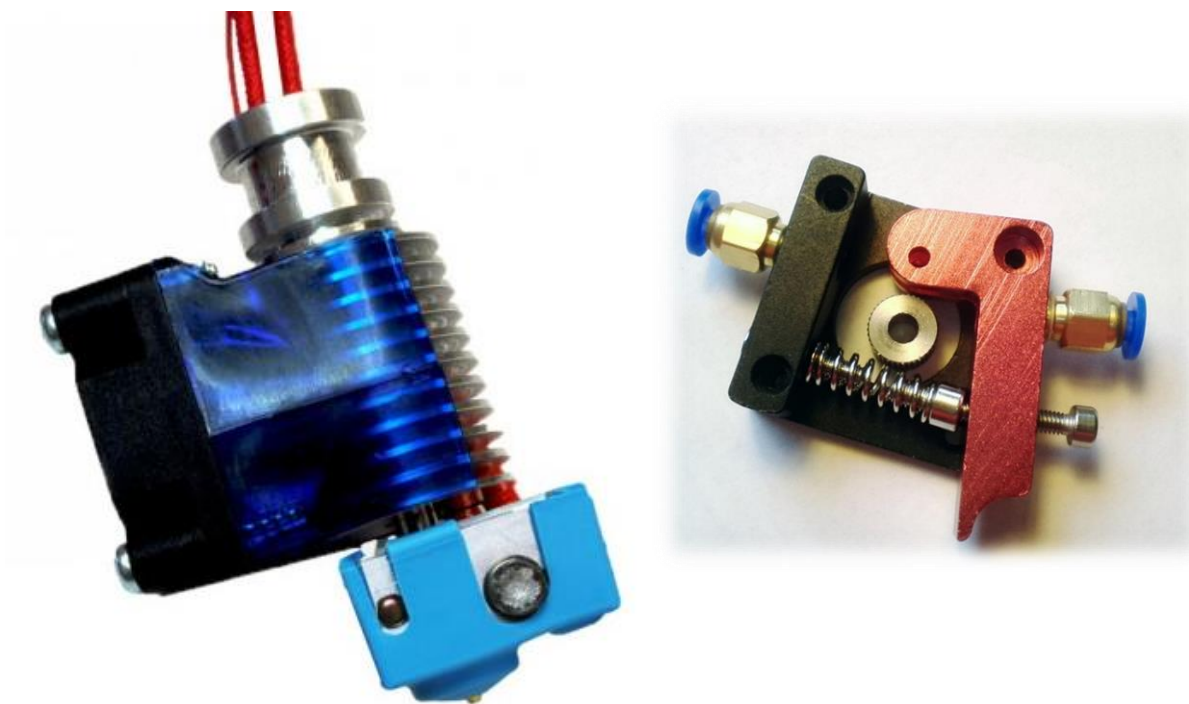
Obr. 87) Fotka vytištěného prototypu konstrukce výměny hlav

6.4 Nakupované komponenty

V této kapitole budou stručně představeny vybrané nakupované součásti 3D tiskárny.

6.4.1 Hot End

Hot End vybraný pro tiskárnu je od britské firmy E3D. Jedná se o model E3D v6 pro 3mm strunu a bowden extruder. Tento produkt je vhodný pro většinu používaných tiskových materiálů a je použitelný do teploty 300 °C. Tuto hranici je možno posunout na 400 °C záměnou termistoru pro snímání teploty trysky za termočlánek (obrázek 88 a).



Obr. 88) a) Hot End E3Dv6 [19] a b) celokovový extrudér (rozmontovaný)

6.4.2 Extrudér

Použitý extrudér je celokovový, bez vloženého převodu. Pro jeho pohon je použit krokový motor. Extrudér má koncovky pro připojení PTFE hadičky (obrázek 88 b).

6.4.3 Vyhřívání podložka

Vyhřívání podložka je zvolena MK3 o rozměrech 200×200 mm. Jedná se o PCB typ s 3mm hliníkovou deskou a je vhodná pro napájení 12 i 24 V. Na její povrch bude připevněno 3mm sklo (obrázek 89).



Obr. 89) Vyhřívání podložka MK3 [37]

6.4.4 Řídící elektronika

Elektronika je – vzhledem k použité paralelní kinematice (je náročnější na výpočty dráhy více než sériová) – volena s 32 bitovým procesorem, který je výkonnější než běžně používané 8 bitové. Dále je potřeba, aby na desku šli připojit minimálně 2 další extrudéry. Vzhledem k těmto požadavkům, byla zvolena deska RADDs v1.5, která funguje jako nástavba pro vývojovou desku Arduino Due. Spolu tedy splňují požadavky. Jedinou nevýhodou je oproti základním deskám vysoká cena.

Zdroj je volen 24V, protože krokové motory s vyšším napájecím napětím, potřebují pro dosažení určitého kroutícího momentu nižší proud a tím pádem méně se zahřívají.

7 ŘEŠENÍ KONSTRUKČNÍCH UZLŮ

V předchozí kapitole jsou vybrány komponenty a mechanismy jednotlivých uzlů 3D tiskárny. Následující odstavce popisují jejich konstrukci a potřebné výpočty.

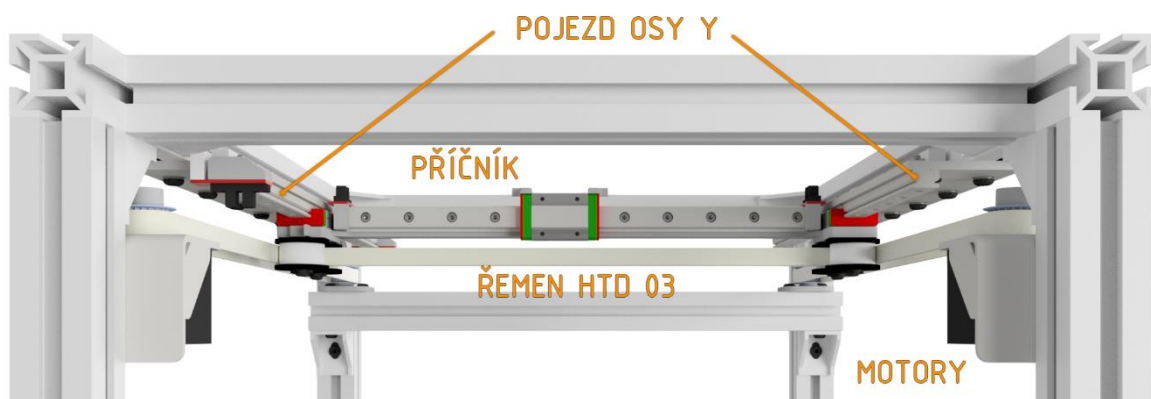
7.1 Polohovací mechanismus osy X, Y

Pro polohování osy XY je zvolena paralelní kinematika HBot, která by v principu měla mít nízkou hmotnost a tím způsobenou vyšší dynamiku pohybů. Tento předpoklad je nutno zohlednit v konstrukci mechanismu polohování.

7.1.1 Konstrukce osy

Pro vedení os je vybráno lineární kolejnicové vedení s vozíčky, které má předpoklad dobré tuhosti v poměru na svou hmotnost. Je nutné jej pevně připevnit k rámu a zároveň ponechat možnost ustavení polohy vedení. Protože kinematika HBot je paralelní a není jednoduché odhadnout, natož vypočítat síly působící na vedení, je vedení zvoleno s velikostní rezervou. Bude použito vedení s označením MGN12H, které bude dodáno od výrobce z Číny. Jedná se o miniaturní vedení s šířkou kolejnice 12 mm. Vozíčky jsou dodávány s velmi lehkým předepnutím, a tedy nulovou vůlí. Pro lepší zachycení namáhání jsou zvoleny prodloužené vozíčky, které jsou oproti základní variantě o 11 mm delší.

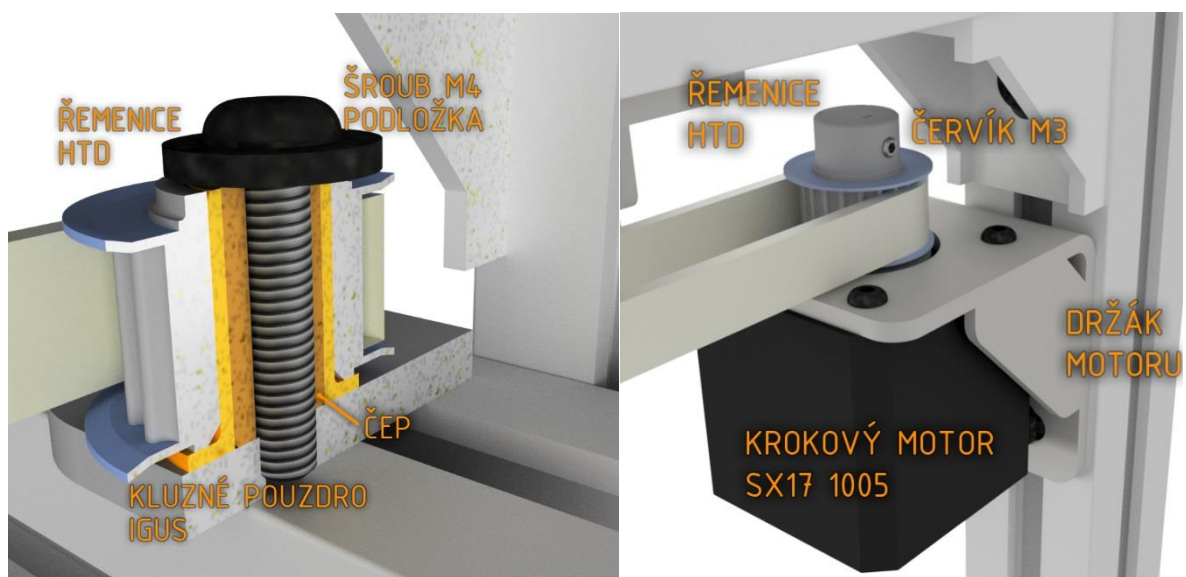
Uchycení vedení osy Y na rám je provedeno pomocí 4mm ocelové upínací desky, která bude mít možnost natáčení pro nastavení rovnoběžnosti vedení. Celý mechanismus je z prostorových důvodů připevněn do horní části rámu ze spodní strany (obrázek 90).



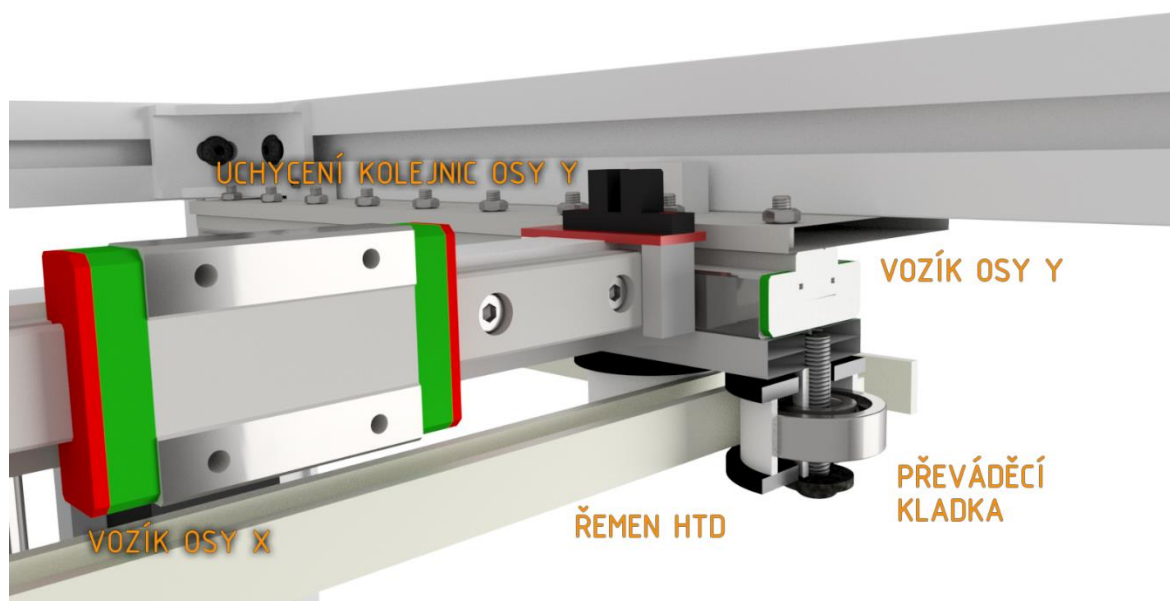
Obr. 90) Vedení osy X a Y

Příčník neboli osa X, je vytvořen hliníkovým plechem o tloušťce 3 mm, který spojuje vozíky osy Y. Pro zjednodušení konstrukce příruby tiskové hlavy, je pojezd osy X otočen o 90° a kolejnice je uchycena na hliníkovém 4 hraném dutém profilu, který je ke spodnímu plechu přišroubován. Celá tato konstrukce je upevněna do rámu z hliníkových stavebnicových profilů 30×30 mm.

Hnací řemenice je uchycena přímo na motoru (obrázek 91 b), který je na rám připevněn držákem z ohnutého plechu. Napínání řemene zajišťuje volná řemenice (obrázek 91 a), která má možnost posuvu v ose Y o 6 mm. Nastavení délky řemene probíhá na přírubě tiskové hlavy, kde je řemen uchycen. Převáděcí kladky jsou uchycené na příčníku (obrázek 92).



Obr. 91) a) napínací řemenice, b) uchycení motoru

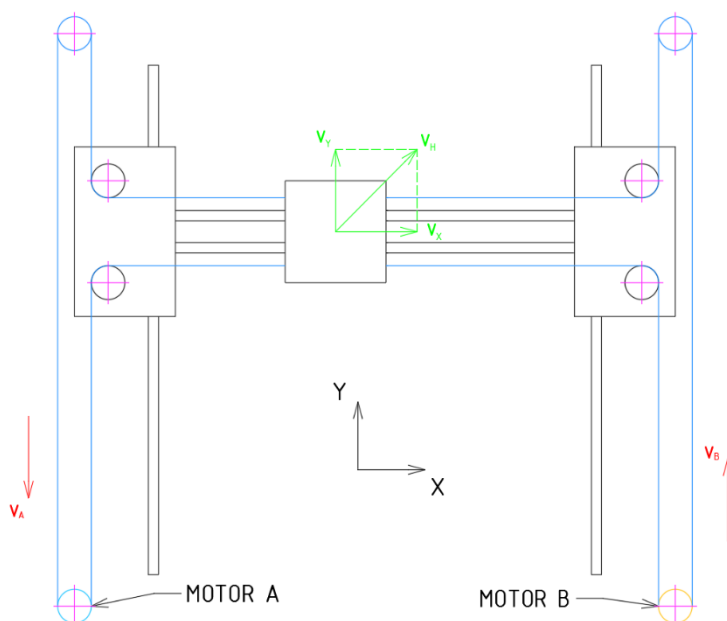


Obr. 92) Náhled osy X a Y

7.1.2 Dimenzování pohonů

Pro pohon os XY je využito 2 krokových motorů a ozubeného řemene HTD. Rozložení motorů a řemenic je na schématu 77. Motory jsou zvoleny od českého výrobce Microcon SX17-1005LQCEF, které sám výrobce označuje jako vhodné pro 3D tiskárny. Na základě jejich údajů je zkontrolováno zatížení motorů a ověření, zda nedojde k překročení dovoleného momentu motorů, které by mělo za následek ztrátu kroků a bylo by ztraceno odměřování.

Nejdříve je potřeba určit nejhorší možný způsob zatížení pohonu. Vzhledem k použité paralelní kinematice, bude nastávat případ, kdy zabírá pouze jeden motor a hlava se pohybuje ve směru 45° od osy X. Jelikož má být dodržen požadavek na rychlost pohybu hlavy v_H 0,2 m/s, je nutné, aby motor měl dostatečný výkon pro zrychlení na tuto rychlost i při šikmém pohybu, kde se kvůli součtu rychlostí v obou osách, zvyšuje požadavek na rychlost pohybu řemene nad tuto hodnotu. Maximální zrychlení a_H je zvoleno, tak aby pohon rychlostí 0,2 mm/s dosáhl za čas t_H 0,1 s, odpovídající 2 m/s^2 .



Obr. 93) Schéma rychlostí řemenů a tiskové hlavy

Schéma zobrazuje rychlosti řemene u motoru A a B, a rozložení rychlosti hlavy v_H na složky v_x a v_y . V případě se šikmým pohybem je rychlost v_B nulová (motor B se neotáčí). Pro další výpočet je potřebné určit velikost rychlosti a zrychlení řemene u motoru A.

Vztahy mezi posuny řemene u příslušného motoru a posuvem hlavy v osách X a Y¹⁷:

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y \quad (1)$$

$$\Delta B = \Delta X - \Delta Y \quad (2)$$

$$\Delta X = \frac{\Delta A + \Delta B}{2} \quad (3)$$

$$\Delta Y = \frac{\Delta A - \Delta B}{2} \quad (4)$$

¹⁷ Vztahy 1-4 jsou převzaty z CoreXY [38]

Vydělením rovnic 3 a 4 časem získáme rychlostní závislost:

$$v_x = \frac{v_a + v_b}{2} \quad (5)$$

$$v_y = \frac{v_a - v_b}{2} \quad (6)$$

Ze schématu Obrázek 93) plyne:

$$v_H^2 = v_x^2 + v_y^2 \quad (7)$$

Po dosazení $v_b = 0$ a vyjádření:

$$v_H = \sqrt{\frac{v_a^2}{4} + \frac{v_a^2}{4}} \quad (8)$$

$$v_a = \sqrt{2}v_H \quad (9)$$

$$v_a = \sqrt{2} \times 0,2 = 0,283 \text{ m/s}$$

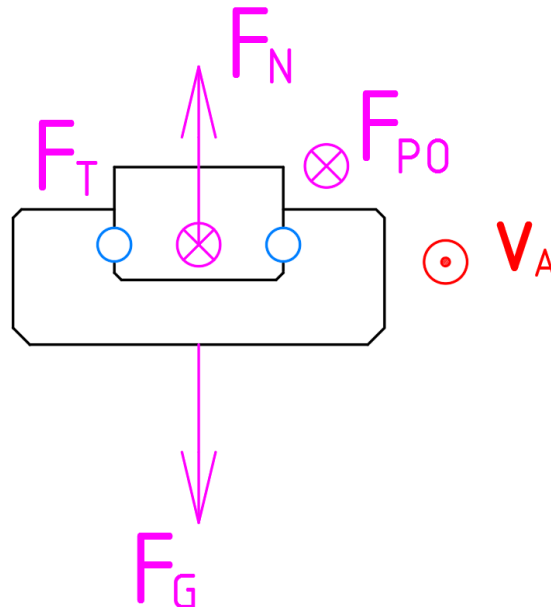
$$a_a = \frac{v_a}{t_H} \quad (10)$$

$$a_a = \frac{0,283}{0,1} = 2,83 \text{ m/s}^2$$

Kde:

a_a	[mm/s ²]	zrychlení řemene u motoru A	v_a	[mm/s]	rychlost řemene u motoru A
ΔA	[mm]	posuv řemene u motoru A	v_b	[mm/s]	rychlost řemene u motoru B
ΔB	[mm]	posuv řemene u motoru B	v_H	[mm/s]	rychlost hlavy
ΔX	[mm]	posuv hlavy v ose X	v_x	[mm/s]	rychlost hlavy v ose X
ΔY	[mm]	posuv hlavy v ose Y	v_y	[mm/s]	rychlost hlavy v ose Y
t_H	[s]	čas pro dosažení max. rychlosti			

Dalším krokem je určení zátěžného momentu na motor. Tento krok jde rozdělit na 2 operace, a to spočítání momentu od pasivních odporů způsobený gravitační silou a momentu dynamického, který je potřebný pro urychlení hlavy na požadovanou rychlost v požadovaném čase. Síly působící na vozík jsou znázorněny na obrázku 94. Normálová síla (F_N) se v tomto případě rovná gravitační (F_G) a výpočet je rozdělen pro osy X a osu Y.



Obr. 94) Schéma působících sil na vozík

Výpočet momentu pasivních odporů:

Určení pasivních odporů působících na vozík:

$m_x = 0,1 \text{ kg}$ – určeno podle CAD modelu

$m_y = 0,6 \text{ kg}$ – určeno podle CAD modelu

$$F_{Nx} = m_x \times g \quad (11)$$

$$F_{Nx} = 0,1 \times 9,81 = 0,98 \text{ N}$$

$$F_{Ny} = (m_x + m_y) \times g \quad (12)$$

$$F_{Ny} = (0,1 + 0,6) \times 9,81 = 6,87 \text{ N}$$

$\xi = 0,000005 \text{ m}$ – dle Strojnických tabulek [39]

$R_K = 0,0012 \text{ m}$ – dle CAD modelu

$$F_{Tx} = \frac{F_{Nx} \times \xi}{R_K} \quad (13)$$

$$F_{Tx} = \frac{0,98 \times 0,000005}{0,0012} = 4,1 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{Ty} = \frac{F_{Ny} \times \xi}{R_K} \quad (14)$$

$$F_{Ty} = \frac{6,87 \times 0,000005}{0,0012} = 28,6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Přepočet pasivních odporů na moment motoru:

$$F_{PO} = 0,54 \text{ N}^{18}$$

$$z_r = 20$$

$$p_r = 3 \text{ mm}$$

$$\eta_V = 0,98 \text{ – dle Marka [40]}$$

$$\eta_P = 0,90 \text{ – hodnota dle Marka [40] snížena, protože se jedná o nestandardní případ}$$

$$R_r = \frac{z_r \times p_r}{2 \times \pi \times 1000} \quad (15)$$

$$R_r = \frac{20 \times 3}{2 \times \pi \times 1000} = 0,00955 \text{ m}$$

$$M_P = \frac{(F_{Tx} + F_{Ty} + 2 \times F_{PO}) \times R_r}{\eta_V \times \eta_P} \quad (16)$$

$$M_P = \frac{[(4,1 + 28,6) \times 10^{-3} + 2 \times 0,54] \times 0,00955}{0,98 \times 0,90} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ Nm}$$

Kde:

F_{Nx}	[N]	normálová síla pojezdu osy X	m_y	[g]	pohybovaná hmotnost v ose Y
F_{Ny}	[N]	normálová síla pojezdu osy Y	p_r	[mm]	rozteč zubů řemenice
F_{PO}	[N]	síla pasivních odporů vozíku	R_K	[mm]	poloměr kuličky ve vozíku
F_{Tx}	[N]	třecí síla působící na vozík v ose X	R_r	[mm]	poloměr roztečné kružnice řemenice
F_{Ty}	[N]	třecí síla působící na vozík v ose Y	z_r	[-]	počet zubů řemenice
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení	η_P	[-]	účinnost řemenového převodu
M_P	[Nm]	moment pasivních odporů	η_V	[-]	účinnost valivého vedení
m_x	[g]	pohybovaná hmotnost v ose X	ξ	[mm]	rameno valivého odporu

Výpočet pasivních odporů je převzat z Konstrukce CNC obráběcích strojů [40].

¹⁸ Síla působení pasivních odporů (od stěračů, těsnění vedení apod.) je pouze odhadnuta – vozíček při vertikální postavení vedení ve většině pokusů sám sjede dolů a proto nemůže být odpor větší než tíhová síla vozíčku (hmotnost vozíku MGN12H je 54g).

Výpočet dynamického zatěžovacího momentu:

$$J_M = 5,4 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2 \text{ – dle katalogu výrobce [41]}$$

$$J_R = 1,4 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2 \text{ – určeno podle CAD modelu}$$

$$J_K = 1,8 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2 \text{ – určeno podle CAD modelu}$$

$$R_{KL} = 0,0125 \text{ m – určeno podle CAD modelu}$$

$$\alpha_M = \frac{a_a}{R_r} \tag{17}$$

$$\alpha_M = \frac{2,83}{0,00955} = 296,2 \text{ s}^{-2}$$

$$J_{RHM} = (m_x + m_y) \times R_r^2 + m_x \times R_r^2 + J_M + 2 \times J_R + 4 \times J_K \times \left(\frac{R_r}{R_{KL}} \right)^2 \tag{18}$$

$$J_{RHM} = (0,1 + 0,6) \times 0,00955^2 + 0,1 \times 0,00955^2 + 5,4 \times 10^{-6} + 2 \times 1,4 \times 10^{-7} + 4 \times 1,8 \times 10^{-6} \times \left(\frac{0,00955}{0,0125} \right)^2$$

$$J_{RHM} = 8,29 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

$$M_D = \frac{\alpha_M \times J_{RHM}}{\eta_P} \tag{19}$$

$$M_D = \frac{296,2 \times 8,29 \times 10^{-5}}{0,90} = 0,027 \text{ Nm}$$

Výpočet max. otáček motoru:

$$\omega = 2\pi \times n \tag{20}$$

$$\omega = \frac{v_O}{R_R} \tag{21}$$

Po úpravě a dosazení v_a za v_O :

$$n = \frac{v_a}{R_R \times 2\pi} \tag{22}$$

$$n = \frac{0,283}{0,00955 \times 2\pi} = 4,71 \text{ s}^{-1}$$

Kde:

α_M	[1/s ²]	úhlové zrychlení motoru	M_D	[Nm]	moment dynamický
J_K	[kgm ²]	moment setrvačnosti kladky	n	[1/s]	otáčky motoru
J_M	[kgm ²]	moment setrvačnosti motoru	v_O	[m/s]	obvodová rychlost
J_R	[kgm ²]	moment setrvačnosti řemenice	ω	[1/s]	úhlová rychlost
J_{RHM}	[kgm ²]	moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru			

Výpočet dynamického momentu je převzat z Konstrukce CNC obráběcích strojů [40].

Určení výsledného momentu a bezpečnosti:

$$M_M = M_D + M_P \quad (23)$$

$$M_M = 0,027 + 0,012 = 0,039 \text{ Nm}$$

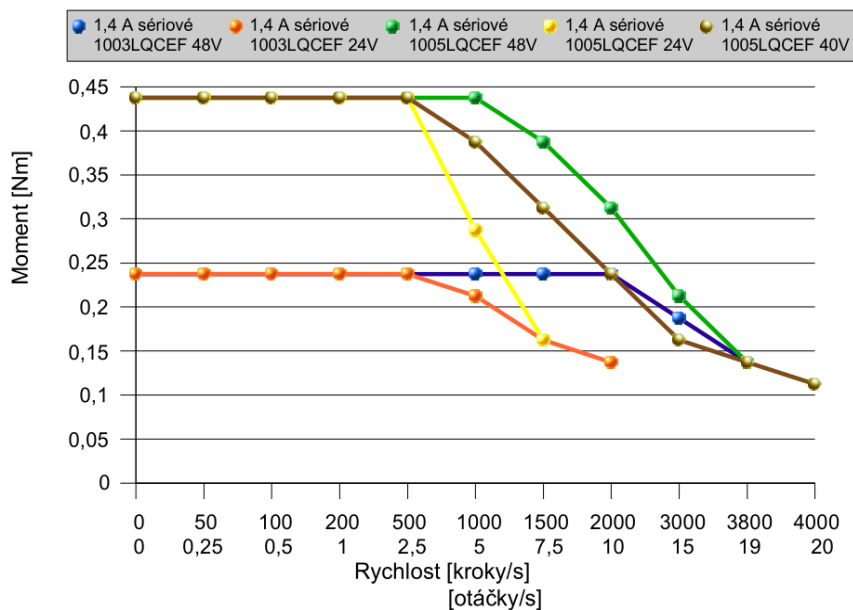
$$M_{MD} = 0,3 \text{ Nm} - \text{pro otáčky } 4,71\text{s}^{-1} \text{ z Obrázek 95)}$$

$$k = \frac{M_{MD}}{M_M} \quad (24)$$

$$k = \frac{0,3}{0,039} = 7,7$$

Kde:

k	[-]	bezpečnost pohonu
M_M	[Nm]	celkový zátěžný moment motoru
M_{MD}	[Nm]	dovolený moment na motoru



Obr. 95) Momentová charakteristika motoru SX17-1005 pro 24 V (žlutá křivka) [41]

Bezpečnost pohonu dosahuje při maximálním zatížení hodnoty 7,7. Byla by možnost použít méně výkonný motor, nicméně výpočet nezahrnuje všechny proměnné (např. vliv výrobních nepřesností, zvýšení tření ve vedení vlivem nesymetrického zatížení apod.), a motory jsou pouze o 30 Kč dražší než méně výkonné motory, a proto budou pro pohon využity tyto motory.

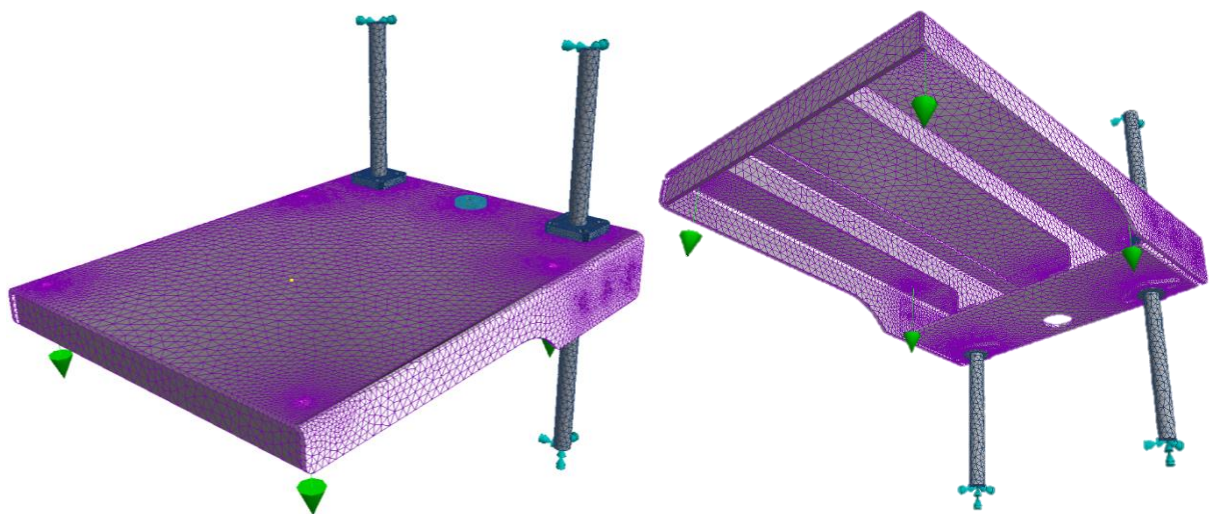
7.2 Polohování osy Z

Polohování vyhřívané podložky je provedeno pomocí zvedané platformy uchycené na 2 lineárních valivých pouzdech a vodících tyčích. Pohon je realizován pomocí krokového motoru a trapézového šroubu s bronzovou maticí.

7.2.1 Návrh platformy

Platforma pod vyhřívanou podložku ji musí dostatečně podepřít, aby se podložka neprohýbala a nedeformovala výtisk. Zároveň je vhodné, aby byla omezena její hmotnost, pro snížení zatížení na motor. V plechu podložky jsou zároveň vyrobeny otvory pro lineární ložiska vedení a matici. To zajistí správnou polohu těchto prvků vůči sobě.

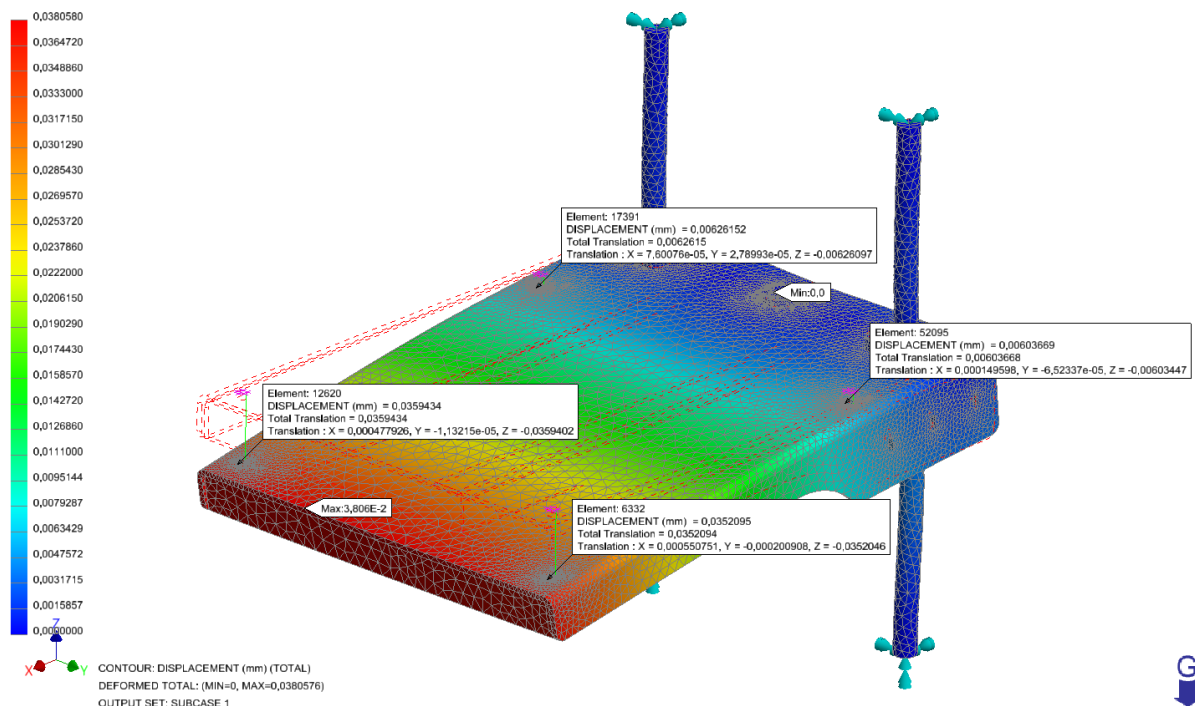
Hlavní část platformy je volena jako ohýbaný výpalek z hliníkové slitiny, který bude podélně vyztužen dodatečnými žebry. Ze spodní části je ohnutý plech, na který je přichycena spodní část lineárního ložiska, pro lepší rozložení zatížení. Tento tvar podložky vyplynul z několika simulací v softwaru Autodesk Nastran In-CAD, který je nadstavbovým modulem do modelovacího programu Autodesk Inventor. Cílem těchto výpočtů bylo snížit největší průhyb desky pod hodnotu 0,05 mm, která odpovídá polovině minimální tloušťky vrstvy. Jelikož nebylo možné věrohodně nastavit deformaci ložiska, není výpočet zcela přesný. Tato nepřesnost je snížena zatížením, kdy byla zvolena hmotnost výtisku na 1,5 kg a k tomu přičtená hmotnost vyhřívané podložky se sklem na 0,5 kg. Do výpočtu byla zahrnuta i vlastní hmotnost podložky. Hmotnost výtisku je zvolena velmi vysoká, většina součástí váží desítky max. jednotky stovek gramů. Toto předdimenzování zatížení z části kompenzuje nepřesnost u ložisek.



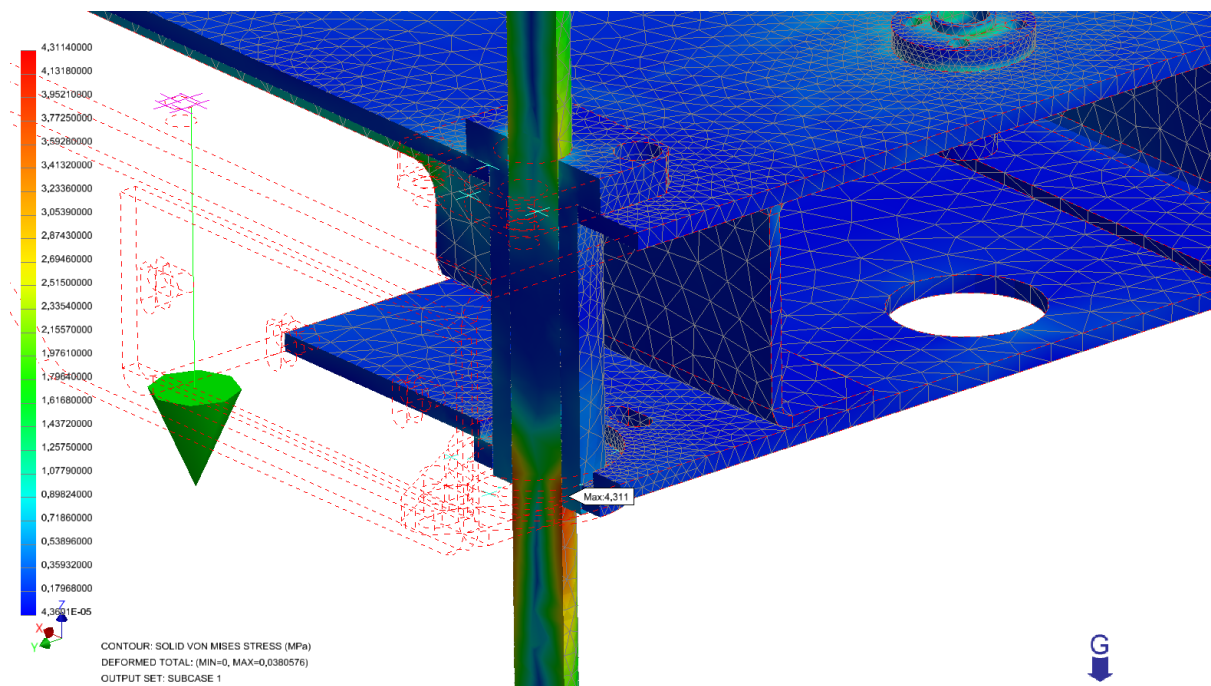
Obr. 96) Vysíťovaný model s okrajovými podmínkami

Okrajové podmínky jsou zvoleny tak, že zatížení je rovnoměrně rozloženo na 4 díry pro šrouby, na kterých je uchycena vyhřívaná podložka. Na vnitřním průměru matice je pevná vazba, stejně jako na koncích vodících tyčí. Všechny spoje mezi součástmi jsou zvoleny jako tzv. bonded (vázané), a to z důvodů náročnosti výpočtu, kdy při vhodnějším typu kontaktu (Sliding/No separation – kluzný bez oddělení) program nedokázal výpočet provést z nedostatku paměti. Nicméně chyba u těchto kontaktů je zanedbatelná, spoje jsou buď šroubové nebo nýtované, a to zajišťuje velmi tuhé spojení. Výjimkou je kontakt mezi ložiskem a vodící tyčí, kde je použit kluzný kontakt.

Po několika výpočtech s různými tloušťkami plechů byla zvolena varianta, kde je použit 3mm plech s 2mm žebry z U-profilu. Výsledky výpočtu této varianty jsou zde. Na obrázku 97 je výsledek analýzy deformace podložky. Největší celková deformace (vektor posunutí prvku ve všech osách, největší váhu posunutí v ose Z) je 0,038 mm. Tato hodnota splňuje zadaný cíl. Napětí v podložce dosahuje celkově nízkých hodnot, největší velikosti dosahuje styku vodící tyče a lineárního ložiska. Redukované napětí HMH dosahuje maximálních hodnot 4,3 MPa (obrázek 98).



Obr. 97) Celkové posunutí

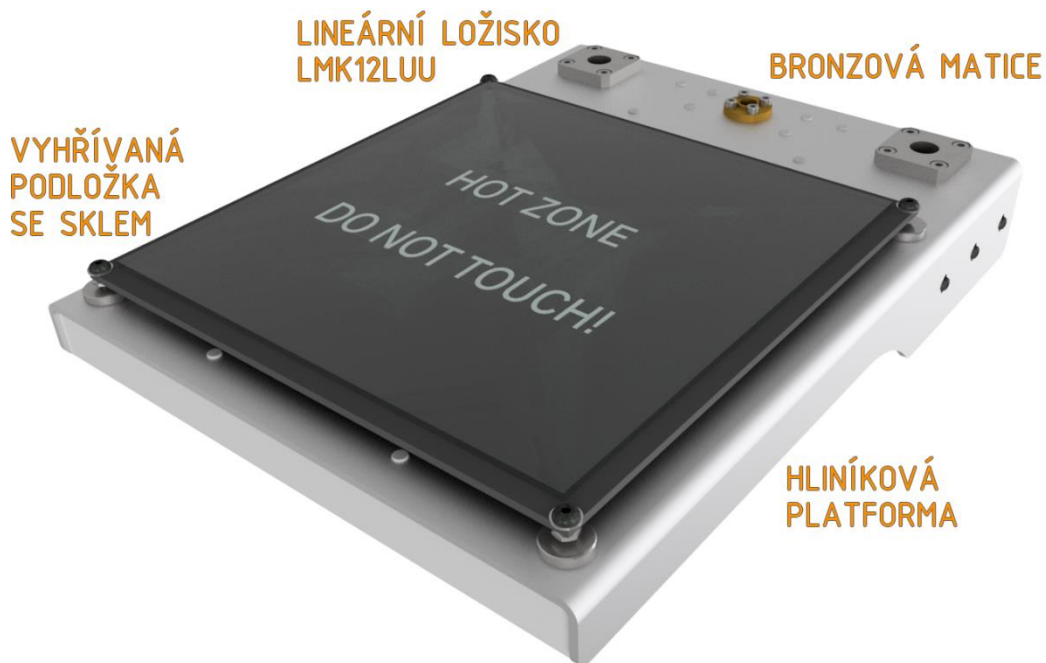


Obr. 98) Redukované napětí HMH

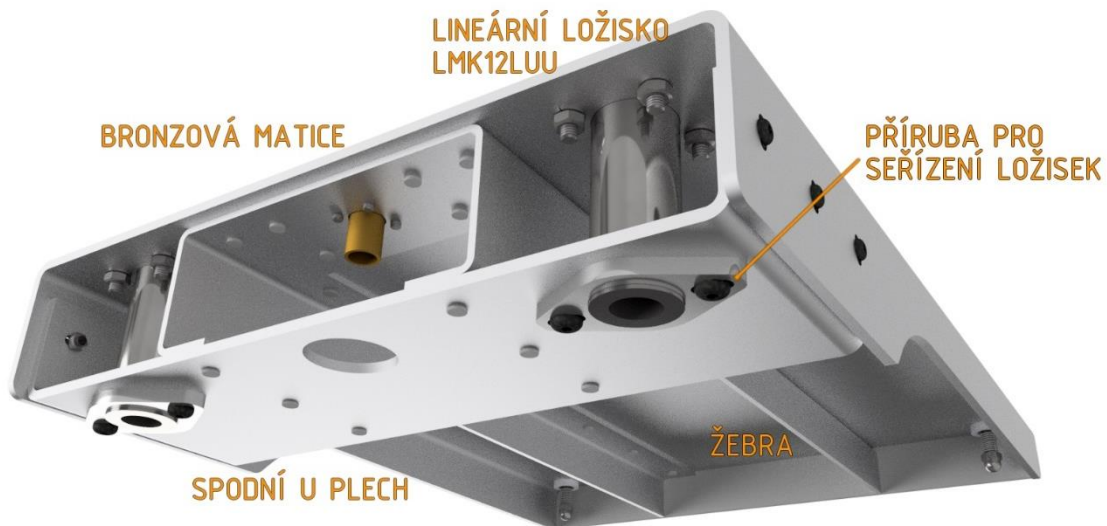
Vyhřívanou podložku je nutné ustavit rovnoběžně s rovinou X a Y a proto je vhodné mít možnost nastavení výšky (obrázek 99) podložky vůči platformě. Pro toto je použita matice s vroubkováním, která posouvá šroub držící vyhřívanou podložku. Pružina umístěna zespodu má za úkol vymezit vůli v závitu. Výsledek analýzy a konstrukce platformy je na obrázcích 100 a 101.



Obr. 99) Nastavování výšky podložky



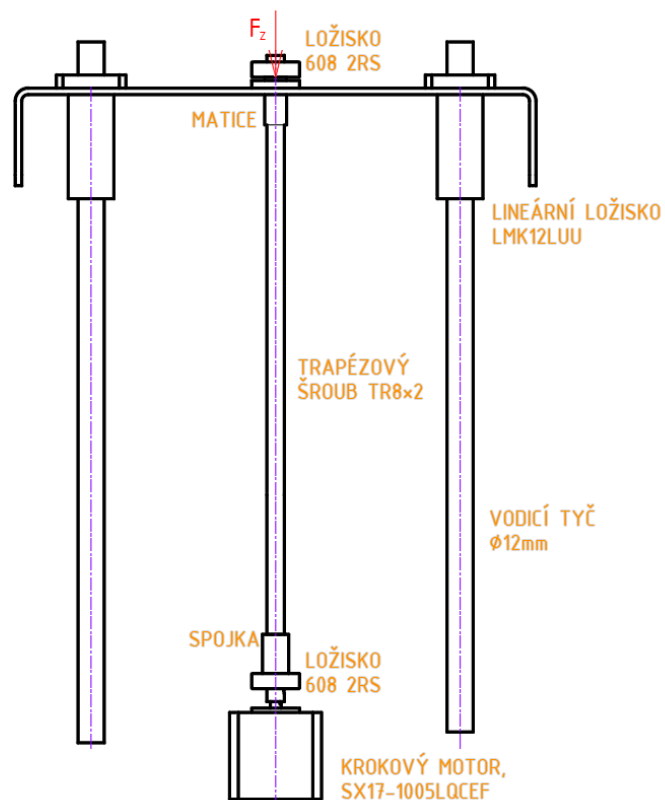
Obr. 100) Platforma pod vyhřívanou podložku



Obr. 101) Platforma pod vyhřívanou podložku

7.2.2 Návrh pohonů

Podložka se pohybuje v ose Z standardně po malých krocích, určených tloušťkou vrstvy a to pouze s relativně velkou prodlevou mezi pohyby. Pouze na začátku a konci tisku se může pohybovat delší dobu v kuse, podle potřeby dojet na horní či spodní pozici. V případě využití kompenzací rovinnosti vůči osám X a Y, se platforma pohybuje po celou dobu tisku a opět jenom malými rychlostmi a zrychleními.



Obr. 102) Schéma pohonu osy Z

Pohon je proto zatížen především staticky, od hmotnosti platformy a výtisku. Dynamická působení je ve výpočtu zanedbáno. Krokový motor je použit stejný jako u pohonu osy X a Y, ve výpočtu je pouze kontrolován. Schéma pohonu je na obrázku 102.

Návrh pohonu osy Z:

$$d = 8 \text{ mm}^{19}$$

$$d_2 = 7 \text{ mm}$$

$$d_3 = 5,5 \text{ mm}$$

$$D_1 = 6 \text{ mm}$$

$$P_H = 2 \text{ mm}$$

$$\alpha_Z = \pi/6$$

$$l_M = 11 \text{ mm} - \text{dle CAD modelu}$$

$$l_\xi = 230 \text{ mm} - \text{dle CAD modelu}$$

$$m_V = 1,5 \text{ kg} - \text{zvoleno}$$

$$m_Z = 2 \text{ kg} - \text{dle CAD modelu}$$

$$E = 2,1 \times 10^5 \text{ MPa} - \text{pro ocel dle Strojnických tabulek [39]}$$

$$p_D = 17 \text{ MPa} - \text{bronz, nízká rychlost, dle Shigley [42]}$$

$$f_{OB} = 0,15$$

$$M_D = 440 \text{ Nmm} - \text{dle obrázku 95}$$

Statický moment zvedání/spouštění:

$$F_Z = (m_Z + m_V) \times g \quad (25)$$

$$F_Z = (2 + 1,5) \times 9,81 = 34,3 \text{ N}$$

$$M_{ZV} = \frac{F_Z \times d_2}{2} \times \left[\frac{P_H \times \cos\left(\frac{\alpha_Z}{2}\right) + \pi \times f_{OB} \times d_2}{\pi \times d_2 \times \cos\left(\frac{\alpha_Z}{2}\right) - f_{OB} \times P_H} \right] \quad (26)$$

$$M_{ZV} = \frac{34,3 \times 7}{2} \times \left[\frac{2 \times \cos\left(\frac{\pi}{12}\right) + \pi \times 0,15 \times 7}{\pi \times 7 \times \cos\left(\frac{\pi}{12}\right) - 0,15 \times 2} \right] = 30,01 \text{ Nmm}$$

$$M_{SP} = \frac{F_Z \times d_2}{2} \times \left[\frac{\pi \times f_{OB} \times d_2 - P_H \times \cos\left(\frac{\alpha_Z}{2}\right)}{\pi \times d_2 \times \cos\left(\frac{\alpha_Z}{2}\right) + f_{OB} \times P_H} \right] \quad (27)$$

$$M_{ZV} = \frac{34,3 \times 7}{2} \times \left[\frac{\pi \times 0,15 \times 7 - 2 \times \cos\left(\frac{\pi}{12}\right)}{\pi \times 7 \times \cos\left(\frac{\pi}{12}\right) + 0,15 \times 2} \right] = 7,62 \text{ Nmm}$$

¹⁹ Pokud není uvedeno jinak jsou hodnoty převzaty ze Strojnických tabulek [39], průměry šroubů a matic jsou pro závit Tr8×2

$$k_M = \frac{M_D}{M_{ZV}} \quad (28)$$

$$k_M = \frac{440}{30,01} = 14,7$$

Kontrola závitu na otláčení:

$$H_1 = d - D_1 \quad (29)$$

$$H_1 = 8 - 6 = 2 \text{ mm}$$

$$n_Z = \frac{l_M}{P_h} \quad (30)$$

$$n_Z = \frac{11}{2} = 5,5$$

$$p_z = \frac{F_Z}{\pi \times d_2 \times n_Z \times H_1} \quad (31)$$

$$p_z = \frac{34,3}{\pi \times 7 \times 5,5 \times 2} = 0,14 \text{ MPa}$$

$$k_p = \frac{p_D}{p_z} \quad (32)$$

$$(33)$$

$$k_p = \frac{17}{0,14} = 121,4$$

Kontrola šroubu na vzpěr

$$I = \frac{\pi \times d_3^4}{64} \quad (34)$$

$$I = \frac{\pi \times 5,5^4}{64} = 44,9 \text{ mm}^4$$

$$F_{KR} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{l_s^2} \quad (35)$$

$$F_{KR} = \frac{\pi^2 \times 2,1 \times 10^5 \times 44,9}{230^2} = 1759,9 \text{ N}$$

$$k_V = \frac{F_{KR}}{F_Z} \quad (36)$$

$$k_V = \frac{1759,9}{34,3} = 51,3$$

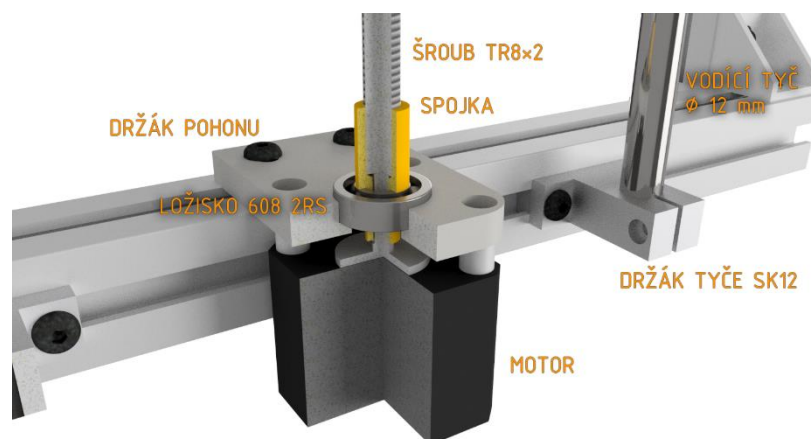
Kde:

α_Z	[-]	vrcholový úhel závitu	k_p	[-]	bezpečnost na otláčení
d	[mm]	velký průměr šroubu	k_V	[-]	bezpečnost na vzpěr
D_1	[mm]	velký průměr matice	l_M	[mm]	délka matice zatížená
d_2	[mm]	střední průměr šroubu	l_ξ	[mm]	délka šroubu zatížená
d_3	[mm]	malý průměr šroubu	M_D	[Nm]	dovolený moment na motoru
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu	M_{SP}	[Nm]	moment matice při spouštění
f_{OB}	[-]	koeficient tření ocel/bronz	M_{ZV}	[Nm]	moment matice při zvedání
F_{KR}	[N]	kritická síla	m_V	[kg]	hmotnost výtisku
F_Z	[N]	zatěžující síla v ose Z	m_Z	[kg]	hmotnost platformy osy Z
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení	n_Z	[-]	počet nosných závitů
H_1	[mm]	nosná výška závitu matice	p_D	[MPa]	dovolený tlak v závitech
I	[mm ⁴]	kvadratický modul kruhového průřezu	p_Z	[MPa]	tlak v závitech
k_M	[-]	bezpečnost momentu na motoru	P_H	[mm]	stoupání šroubu

Vzorce pro výpočet momentu zvedání a spouštění podložky jsou převzaty ze Konstruování strojů [42], stejně jako výpočet otláčení závitu šroubu. Kontrola šroubu na vzpěr je převzata ze Strojnických tabulek [39].

Ve výpočtu pohonu osy byl zjištěn moment potřebný pro zvedání podložky i s nákladem a porovnáním s dovoleným momentem motoru byla určena bezpečnost. Ta nabývá hodnoty 14,7, což pokrývá různé nepřesnosti výpočtu. Dále byl zvolený závit zkontrolován na otláčení a šroub na vzpěr, ale vzhledem k relativně nízkému zatížení obojí vyhovuje s dostatečnou rezervou.

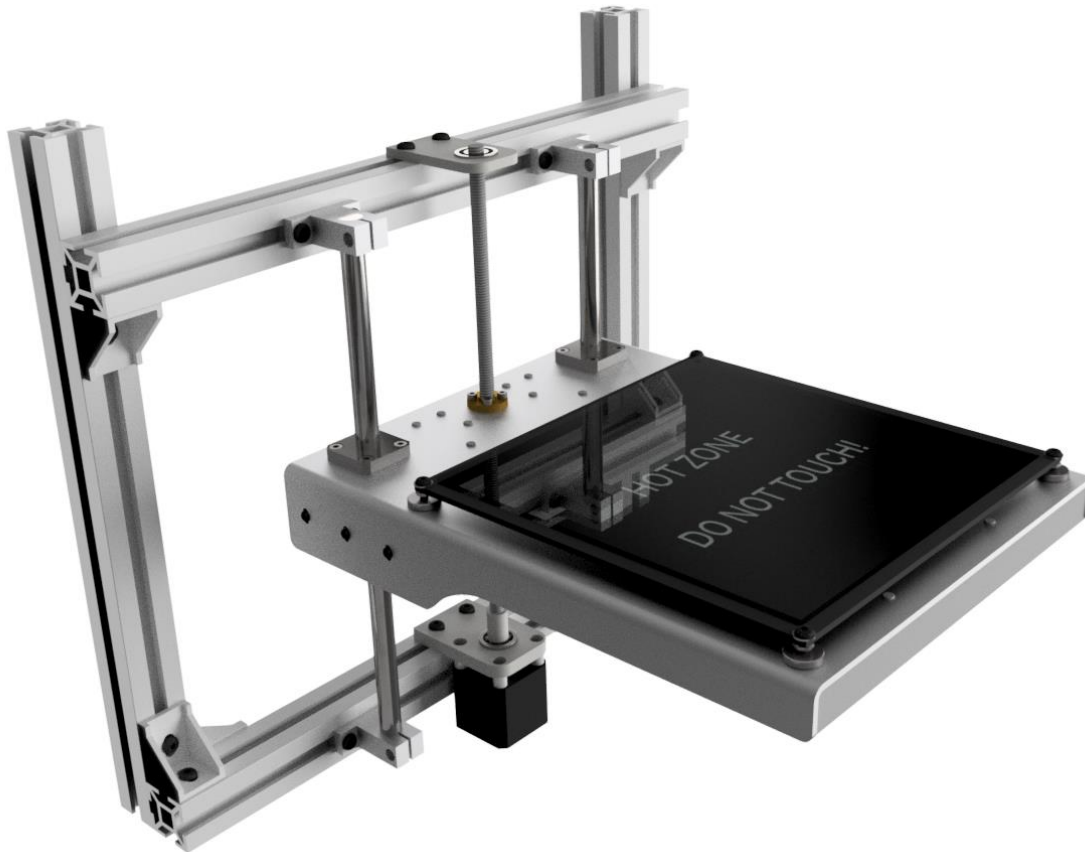
Ložiska použitá pro uchycení trapézového šroubu, kontrolována nejsou, jelikož šroub se pohybuje po malých krocích, takže jsou zatížena především staticky a hodnota statická únosnosti ložiska je o 2 řády vyšší než působící zatížení a ložiska jsou tedy předimenzované²⁰.



Obr. 103) Pohled na uchycení motoru a šroubu

²⁰ Ložisko ZKL 608 2RS – únosnost statická $C_{or} = 1\,356\text{ N}$ [43], zatížení $F_z = 34,3\text{ N}$

Uchycení komponent do rámu je ukázáno na obrázcích 103 a 104. Tyče jsou uchyceny pomocí držáků SK12 a šroub s ložisky je umístěn na desku z plechu. Vše je přišroubováno k rámu. Motor je uchycen na plechu se spodním ložiskem a je tedy zajištěna souosost těchto prvků. Šroub s hřídelí motoru jsou spojeny spojkou, kde je využito lepeného spoje. Většina prvků má možnost nastavení ve dvou osách pro vymezení výrobních a montážních nepřesností.



Obr. 104) Platforma pod vyhřívanou podložku

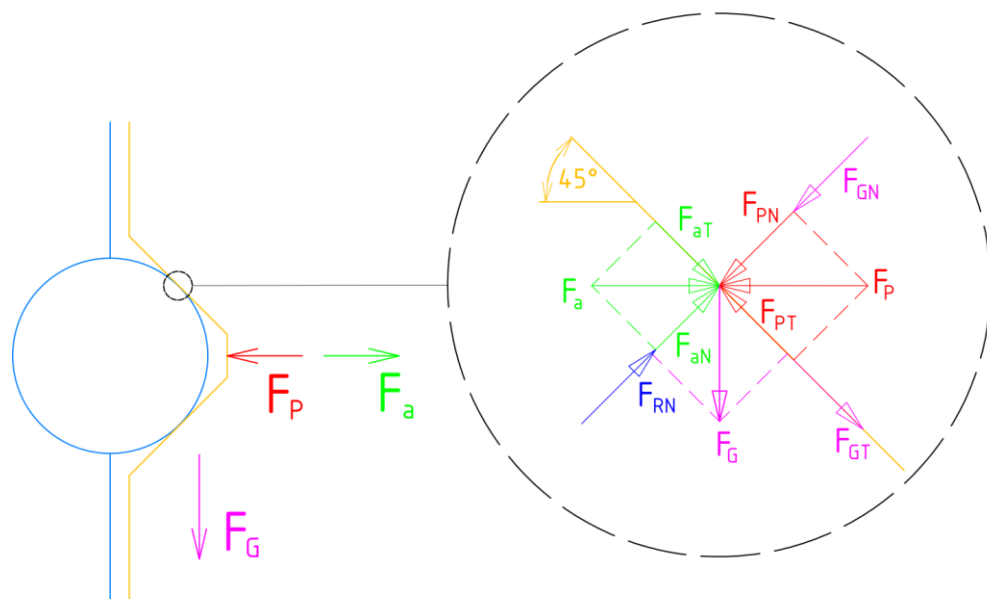
7.3 Výměna tiskových hlav

Automatická výměna hlav je realizována pomocí modulů s tryskou, která je uchycena k přírubě osy X pomocí permanentních magnetů. Střídání hlav probíhá v předním prostoru tiskárny, kde je umístěn zásobník hlav spolu s odkapávačem přebytečného materiálu. Hlavy jsou drženy v pozici čepem elektromagnetu. Podávání struny je realizováno extrudéry umístěnými na zadní straně tiskárny a doprava struny k trysce probíhá vnitřkem teflonové hadičky.

Je nutné zvolit správnou velikost permanentních magnetů, aby při nabírání hlavy nebyl překročen maximální moment na motoru a zároveň, aby nedošlo samovolnému oddělení hlavy při tisku.

7.3.1 Návrh permanentních magnetů

Výpočet optimální magnetické síly je relativně jednoduchý, bohužel velmi nepřesný, jelikož reálně není určení magnetické síly úplně jednoznačné. Výrobci udávají přibližnou sílu magnetů, ale ta platí za ideálních podmínek, kterých není snadné dosáhnout – především nulová vzdálenost magnetů od protikusu, působení zatížení pouze v ose magnetu apod. Také je pouze omezená řada velikostí magnetů a tím i použitelné přitažlivé síly (F_P - obrázek 105). Proto je výpočet pouze orientační a bude potřeba magnety vyzkoušet prakticky a případně jejich velikost upravit.



Obr. 105) Síly působící na upínač a rozklad sil do normálového a tečného směru

Následující výpočet je vybrán pro situaci, kdy hlavu kromě tíhové síly (F_G) zatěžuje i setrvačná síla (F_a) způsobená zrychlením hlavy. Cílem je určit minimální sílu potřebnou k udržení hlavy na přírubě.

$$\gamma = 45^\circ$$

$$F_a = m_X \times a_H \quad (37)$$

$$F_a = 0,1 \times 2 = 0,2 \text{ N}$$

$$F_G = m_X \times g \quad (38)$$

$$F_G = 0,1 \times 9,81 = 0,98 \text{ N}$$

Rovnice silové rovnováhy pro normálový a tečný směr:

$$N: F_{GN} + F_{PN} - F_{aN} - F_{RN} = 0 \quad (39)$$

$$T: F_{aT} + F_{GT} - F_{PT} = 0 \quad (40)$$

$$(41)$$

Dosazení velikostí normálových a tečných složek²¹:

$$N: \frac{\sqrt{2}}{2} F_G + \frac{\sqrt{2}}{2} F_P - \frac{\sqrt{2}}{2} F_a - F_{RN} = 0 \quad (42)$$

$$T: \frac{\sqrt{2}}{2} F_a + \frac{\sqrt{2}}{2} F_G - \frac{\sqrt{2}}{2} F_P = 0 \quad (43)$$

Úprava rovnic a dosazení:

$$T: F_P = F_a + F_G \quad (44)$$

$$N: F_{RN} = \frac{\sqrt{2}}{2} F_G + \frac{\sqrt{2}}{2} F_P - \frac{\sqrt{2}}{2} F_a \quad (45)$$

$$N: F_{RN} = \sqrt{2} F_G \quad (46)$$

Dosazení

$$F_P = 0,2 + 0,98 = 1,2 \text{ N}$$

Kde:

F_a	[N]	setrvačná síla od zrychlení hlavy	F_P	[N]	přitažlivá síla
F_{aN}	[N]	normálová složka setrvačné síly	F_{PN}	[N]	normálová složka přitažlivé síly
F_{aT}	[N]	tečná složka setrvačné síly	F_{PT}	[N]	tečná složka přitažlivé síly
F_G	[N]	tíhová síla	F_{RN}	[N]	Reakční síla od dotyku
F_{GN}	[N]	normálová složka tíhové síly	γ	[°]	úhel zkosení
F_{GT}	[N]	tečná složka tíhové síly			

²¹ Při úhlu zkosení $\gamma = 45^\circ$ mají normálové i tečné složky zatěžujících sil stejnou velikost, která vychází z velikosti sinu a kosinu úhlu γ .

Vypočtená minimální síla pro udržení hlavy při požadovaném zrychlení je 1,2 N. Jelikož jsou použity 3 upínací body, tak se ještě zmenšuje potřebná síla na jeden magnetický pár na 0,4 N, odpovídající 40 g (výrobci magnetů udávají dovolené zatížení v gramech).

Konstrukční provedení s kuličkou dosedající do drážky, kde je umístěn magnet, neodpovídá ideálnímu použití magnetů (kulový tvar přitahované plochy a vzdálenost mezi magnetem a kuličkou), proto bude použit magnet s vyšší hodnotou přitažlivé síly. Byl vybrán tyčový magnet o průměru 3 mm a délce 6 mm s přitažlivou silou přibližně 750 g od výrobce Unimagnet [45]. Konstrukčně je zde ještě prostor pro použití slabšího magnetu, nebo naopak umístění dalšího magnetu za kuličku a tím zvýšení magnetické síly.

Při odepínání hlavy od příruby působí na pohon navíc přitažlivá síla magnetů. Je nutno zkontrolovat, zda nedojde k překročení dovoleného momentu. K rovnici 23 je připočten moment potřebný k překročení přitažlivé síly magnetů zvolených výše. Jejich celková teoretická magnetická síla je 22,5 N²². Z důvodů uvedených výše je předpokládána přitažlivá síla, snižena na polovinu (opět není možné určit reálnou hodnotu, proto je hodnota z důvodu bezpečnosti vyšší).

Kontrola momentu na motoru – výpočet navazuje na kapitolu 7.1.2:

$$F_{PZ} = 11,25 \text{ N}$$

$$M_{Mm} = M_M + \frac{F_{PZ} \times R_r}{\eta_v \times \eta_p} \quad (47)$$

$$M_{Mm} = 0,039 + \frac{11,25 \times 0,00955}{0,98 \times 0,90} = 0,16 \text{ Nm}$$

$$k_m = \frac{M_{MD}}{M_{Mm}} \quad (48)$$

$$k_m = \frac{0,3}{0,16} = 1,88$$

Kde:

F_{PZ}	[N]	přitažlivá síla – zvolená
k_m	[-]	bezpečnost momentu motoru
M_{Mm}	[Nm]	moment na motoru s působením magnetů

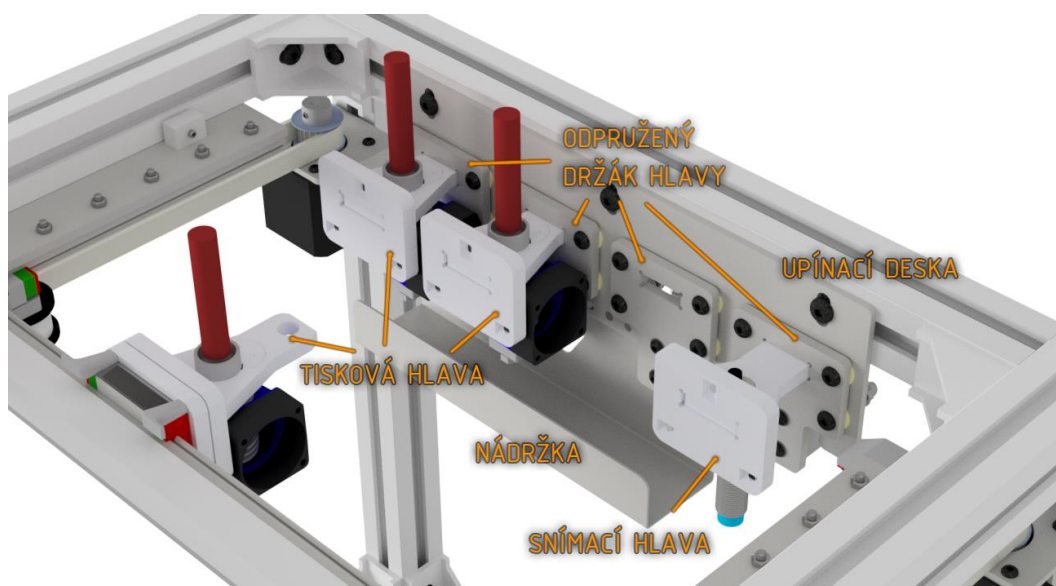
Hodnota bezpečnosti momentu na motoru klesla na hodnotu 1,88. To by stále mělo vyhovovat, nicméně pokud by skutečně byl překročen dovolený moment na motoru, je zde stále rezerva ve snížení rychlosti při odpojování a tím dojde ke zvýšení dovoleného momentu motoru. Také odpojování bude probíhat v šikmém směru, tudíž bude i přitažlivá síla o nějakou část nižší než uvedená ve výpočtu.

²² Magnety průměr 3 mm délky 6 mm, přitažlivá síla 750 g, odpovídající 7,5 N a jsou použity 3 kusy.

7.3.2 Upínání hlavy

Tiskové hlavy jsou při nečinnosti skladovány v zásobníku, pod kterým je nádržka na přebytečný materiál, který vzniká při nečinnosti trysky a při přípravě k tisku. Uchyceny v pozici jsou pomocí elektromagnetu, jehož čep zapadá do otvoru v hlavě. Při sepnutí magnetu je čep zatažen dolů a hlava je uvolněna. Držáky hlav jsou odpružené, aby při nabírání a odkládání hlav byly sníženy rázy způsobené náhlým zvětšením přitažlivé síly při přiblížení na určitou vzdálenost.

V zásobníku (obrázky 106 a 107) je prostor pro 4 hlavy, z čehož jedna hlava obsahuje snímač na měření vzdálenosti k tiskové podložce – slouží ke kalibraci tiskárny před tiskem. Jedna pozice je rezervní a může být využita pro doplnění další hlavy – v tiskárně bohužel není prostor pro 3 cívky materiálu, proto by musela být cívka umístěna externě.



Obr. 106) Zásobník hlav

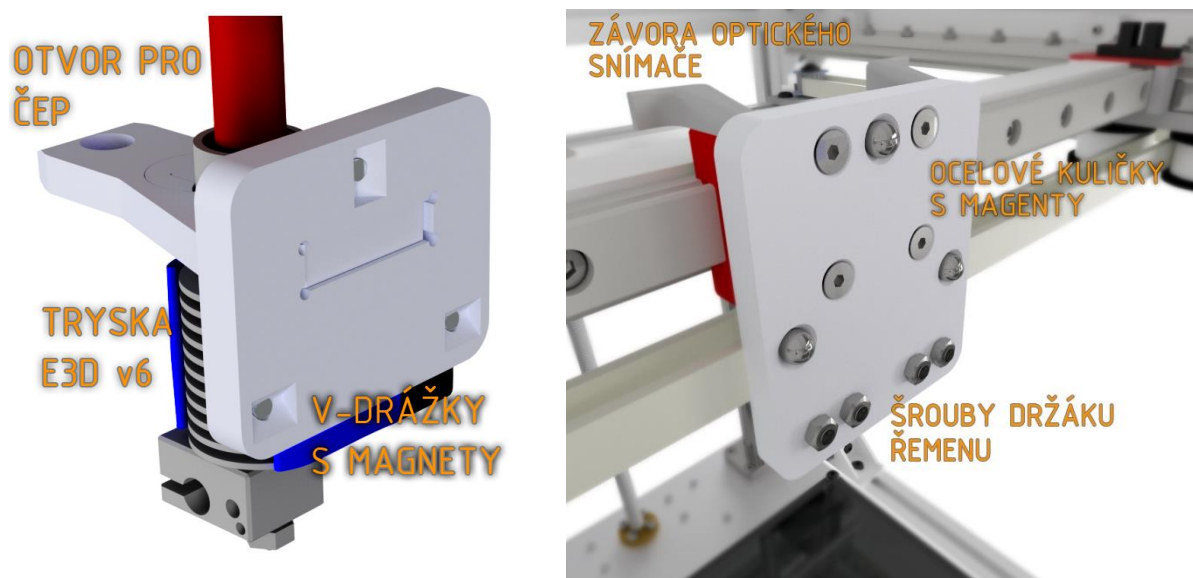


Obr. 107) Zadní strana zásobníku

7.3.3 Konstrukce hlavy

Tisková hlava měla být původně vyrobena z hliníkových výpalků, ale po vytvoření prvního prototypu na 3D tiskárně bylo zvoleno, že hlava bude 3D výtisk. Důvodem je dostačující přesnost, nízká hmotnost a jednoduchá výroba.

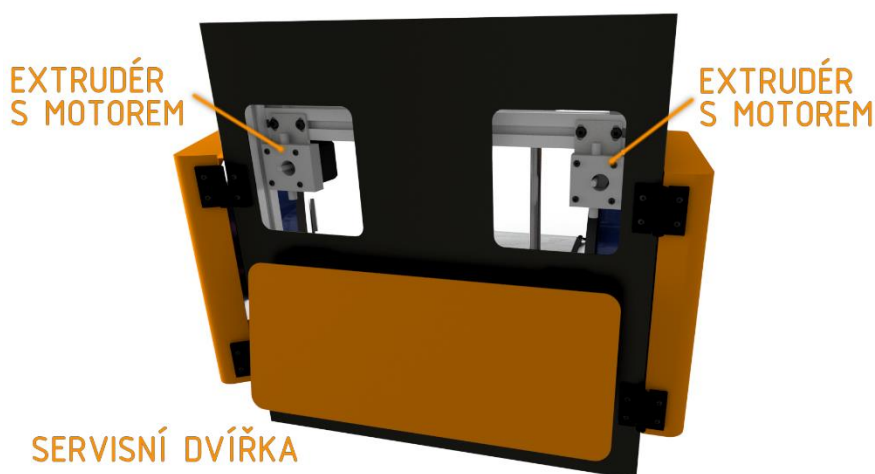
V původním návrhu byli dosedací plochy pod kuličkami kuželové zahlobení. Tato varianta byla původně zvolena kvůli jednoduché výrobě, nicméně není staticky určitá. Nové řešení obsahuje 3 drážky, které zaručí statickou určitost upínání. Pod drážkami mohou být umístěny magnety. Kolmo na zadní desku je umístěn držák hlavy, která je uchycena pomocí tvarového spojení a zajištěna jazýčkem. Deska má v přední části otvor pro čep elektromagnetu a zkosení pro usnadnění najíždění do otvoru zásobníku (obrázek 108).



Obr. 108) Tisková hlava a příruby osy XY

7.3.4 Extrudér

Umístění extrudéru je zvoleno v zadní části tiskárny (obrázek 109) a je uchycen spolu s krokovým motorem přes desku na rám. Dopravu struny k trysce zajišťuje PTFE hadička.

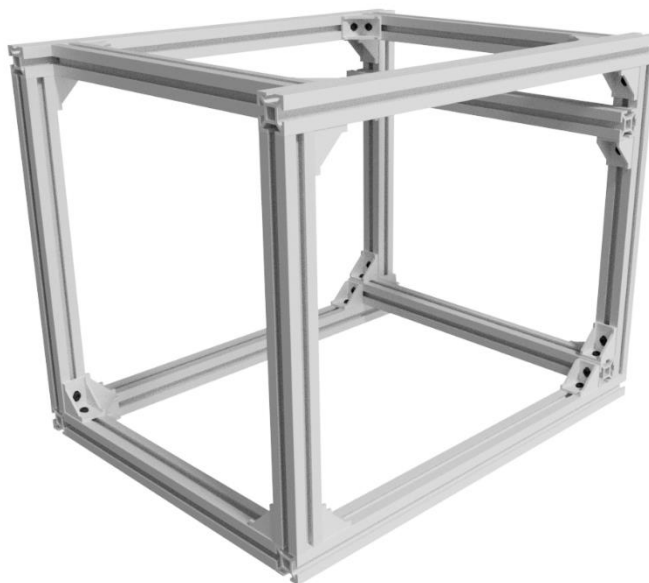


Obr. 109) Umístění extrudérů v zadní části tiskárny.

7.4 Návrh rámu

Rám je vytvořen z hliníkových stavebnicových profilů, které jdou lehce sestavit do požadované konstrukce a je snadné k nim připojovat další komponenty. Profil rámu je zvolen o vnějších rozměrech 30 × 30 mm a výrobcem je společnost Alupa. Tento profil by měl být pro tiskárnu dostatečně tuhý, jelikož zatížení od pohybu os není příliš velké.

Profily v rámu jsou umístěny s ohledem na požadavky tiskárny a jsou proto některé profily posunuty oproti ideální poloze (ideální poloha jsou hrany kvádrů). Spojování rámu zajišťují rohové hliníkové spojky a pro připojování dalších částí tiskárny jsou využity profilové matice (obrázek 110).



Obr. 110) Rám 3D tiskárny

7.5 Krytování

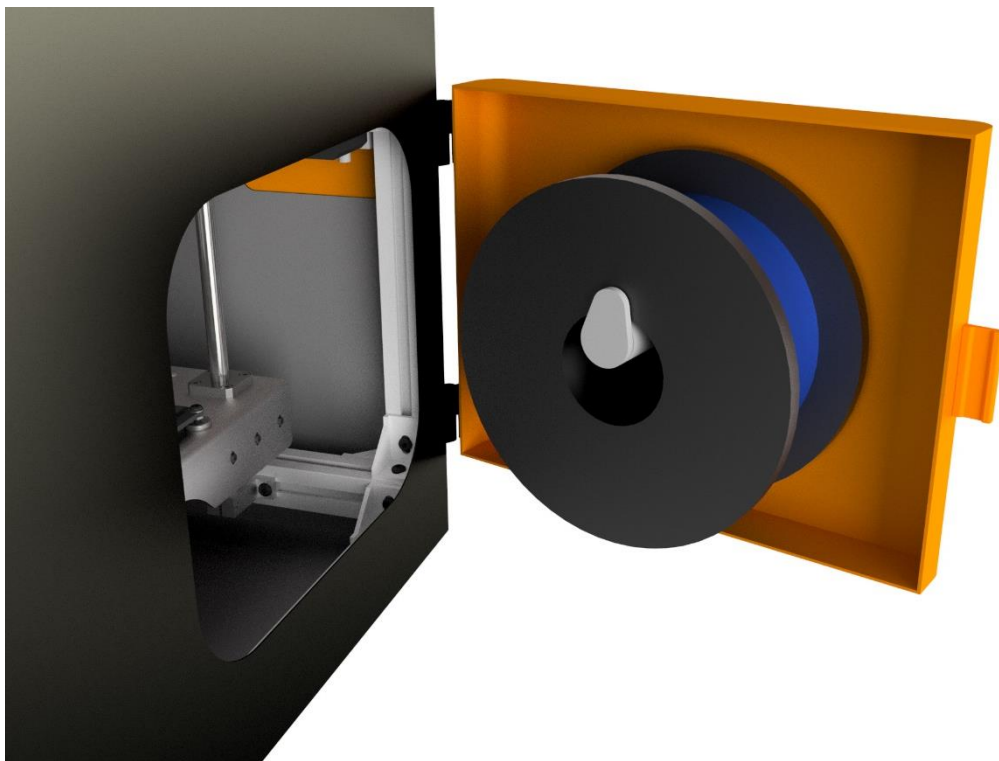
Krytování tiskárny by mělo přinést stabilnější tiskové prostředí, jelikož by teplota trysky a výtisku nebyla ovlivněna okolním prostředím (průvan apod.) Nezanedbatelnou vlastností krytů je také ochrana uživatelů před úrazy a estetická stránka.

Oplechování je provedeno z ocelového plechu o tloušťce 1 mm. Kvůli údržbě musel být zachován dobrý přístup k tiskové podložce a extrudérům. V přední části jsou dvířka z plexiskla pro možnost vizuální kontroly tisku. V zadní části jsou dvířka pro údržbu extrudérů. Dvířka jsou uchyceny na pantech a drženy pomocí magnetů.

Po stranách jsou umístěny zásobníky pro cívky. Existuje značný počet výrobců strun a každý používá cívky o jiných rozměrech.²³ Z důvodu kompatibility je prostor pro cívku větší a přesahuje ven z tiskárny – bylo by zbytečné jenom kvůli zásobníku zvětšovat rozměr rámu a všech komponent uvnitř (obrázek 111).

²³ Možnost převíjení cívek na vlastní by přinesla sice úsporu místa, ale zbytečné komplikace při převíjení, kdy by bylo nejlepší mít k dispozici další zařízení pro převíjení, což by zase zvýšilo cenu.

Původně bylo zamýšleno i nad záměrem tiskárnu uzavřít celou a vycházející vzduch filtrovat, kvůli zamezení šíření různých pachů a uvolněných mikročástic při tisku, které mohou mít negativní vliv na lidské zdraví [44]. Vzhledem k rozsáhlosti této problematiky, nakonec není filtrace obsáhnuta v této práci.



Obr. 111) Držák cívky na bočních dvířkách

Další obrázky tiskárny, výkresy vybraných uzlů včetně hlavní sestavy a 3D modelu jsou přiloženy k práci.

8 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

8.1 Shrnutí konstrukční části

Na počátku konstrukční fáze byli stanoveny požadavky kladené na tiskárnu – především vyšší rychlost tisku a možnost tisku více materiálů. Pro splnění těchto požadavků bylo nutné vybrat vhodnou kinematiku polohování tiskové hlavy a zvolit řešení tiskových hlav, které by příliš nezvyšovalo hmotnost tiskové hlavy.

Z rešerše komerčně úspěšných tiskáren byla vybrána paralelní kinematika polohování Hbot, pro její relativně jednoduchou a lehkou konstrukci. Oba pohonné motory jsou umístěny na rámu, a proto nezvyšují hmotnost polohované osy. Krokové motory, zvolené pro pohon především z důvodů nízké ceny a možnosti odměřování bez dalších komponent, jsou při předpokládaných rychlostech a zrychleních tisku dostatečné – potřebný výkon dosahuje přibližně 13 % dovoleného. Jelikož výpočet nezahrnuje všechny proměnné (například vliv momentu působícího na vedení apod.) a motory méně výkonné stojí podobně, je předdimenzování opodstatněné. Obdobných výsledků dosahuje i motor pro pohon osy Z.

Polohování v osách X a Y je realizováno jediným ozubeným řemenem HTD, který spojuje oba motory s tiskovou hlavou. Pro vedení osy X a Y je vybráno lineární prizmatické vedení s velikostí kolejničky 12 mm. Dodávka je kvůli nižší ceně realizována od dodavatele z Číny. Platforma vyhřívané podložky je zvedána trapézovým šroubem. Pro zvedání podložky je použito vodicích tyčí o průměru 12 mm a lineárních valivých ložisek.

Při řešení více materiálového tisku byla vybrána varianta s automatickou výměnou tiskových hlav, která přináší úsporu hmotnosti, vůči variantě, kdy je více trysek umístěno na jedné hlavě. Kvůli jednoduché konstrukci a snadné výměně hlav byla vypracována varianta s upínáním pomocí permanentních magnetů a kuliček pro přesné polohování hlavy při výměně. Ačkoliv byla velikost magnetů odhadnuta pomocí výpočtu, je potřeba výměnu vyzkoušet na prototypu, a ověřit že přítlačná síla vyvinutá magnety je dostatečná pro udržení hlavy při tisku a nepřilíš vysoká, jelikož by způsobila přetížení motoru, vedoucímu ke ztrátě kroků a tím i polohy.

Zásobník hlav je umístěn na přední straně tiskárny, z hlediska pohybů hlavy jej ani jinam jednoduše umístit nelze. Hlavy jsou v parkovací pozici drženy pomocí čepu elektromagnetu, který se v případě potřeby sepne a čep uvolní. Pod hlavami je umístěn zásobník na odkapávání přebytečného materiálu, vzniklého při čištění trysky před tiskem.

Rám tiskárny je postaven z hliníkových stavebnicových profilů, pro možnost snadné úpravy pozice ostatních komponent. Možnost postavit rám např. z ocelových výpalků se hodí spíše pro sériovou výrobu, kdy by se na několika vzorcích odladil výrobní proces a rozměrové tolerance.

8.2 Ekonomické zhodnocení konstrukce

Jedním ze zvolených parametrů tiskárny byla cena tiskárny okolo 15 000 Kč. Částka je to nízká a bylo nutné přizpůsobit výrobní technologii a omezit obrábění součástí, které je obecně drahé. Ve velké míře jsou použity laserové výpalky, jelikož s přesností $\pm 0,1$ mm je to technologie dostatečně přesná pro většinu součástí a součásti takto vyráběné jsou relativně levné. Dalším kompromisem bylo zvolení části komponent od výrobců z Číny, kde je také dosaženo výrazné finanční úspory. Jedná se o vedení všech os a veškerou elektroniku. Přesto se po hrubém určení ceny pod částku 15 000 Kč dostat nepodařilo a jelikož už se konstrukce prakticky nedá udělat levnější bez výraznějších kvalitativních kompromisů, lze říci, že tento požadavek nelze splnit. Cena 3D tiskárny se vyšplhala na 20 500 Kč. Rozpis jednotlivých kategorií je v tabulce 4 a v tabulce 5.

Tab 4) Cena položek tiskárny

Obráběné díly	1 800 Kč
Výpalky	4 500 Kč
3D výtisky	400 Kč
Nakupované díly	13 500 Kč
Spojovací materiál	300 Kč
Celkem	20 500 Kč

Tab 5) Nejdražší položky 3D tiskárny

Lineární vedení	2 100 Kč
Hot End E3D v6	2 000 Kč
Elektronika RADDs 1.5 + Arduino DUE	2 000 Kč
5× Křakový motor SX17-1005	1 600 Kč
Zdroj 24 V 400 W	1 000 Kč

Ceny obráběných součástí jsou odhadnuty z ceny materiálu a náročnosti výroby. Laserové výpalky jsou odhadnuty podle cenové nabídky na 5 plechů. Součásti vytvořené na 3D tiskárně jsou určeny podle ceny materiálu, která je zvýšena o náklady na práci.

Konstrukce jde výrazněji slevit pouze použitím levnějších trysek a elektroniky, kde není zaručeno, že by byl splněn cíl rychlého tisku. Dále by bylo možno vynechat krytování a tiskárnu provozovat v holém stavu, což by mělo mít pouze menší vliv na kvalitu výtisků. Ale z hlediska bezpečnosti by tato možnost nebyla optimální. Při těchto úpravách by bylo možné cenu tiskárny snížit o zhruba 4 500 Kč a přiblížit se původně stanovené částce.

9 ZÁVĚR

Práce se zabývá návrhem 3D tiskárny s technologií FDM, která má možnost tisknutí více materiálů. V úvodu je popsána teorie 3D tisku – popis technologií, popis tiskárny FDM a principy tisku více materiálů. V další části jsou vybrány úspěšné komerční tiskárny a popsány jejich vlastnosti a principy. Poté následuje shrnutí požadavků na tiskárnu a návrh variant možných řešení hlavních konstrukčních uzlů.

Pro polohování tiskové hlavy byla zvolena paralelní kinematika, která přinesla úsporu hmotnosti a tím i zvýšení tiskových rychlostí. Pohon obstarávají 2 krokové motory, upevněné na rámu stroje a pro vedení jsou využity lineární profilové kolejničky s vozíčky. Tisková podložka je zvedána pomocí trapézového šroubu a vedena lineárními ložisky na vodících tyčích.

Výměna tiskových hlav je realizována pomocí modulů s tryskou, který je k přírubě polohovacího příčnicku uchycen pomocí permanentních magnetů. Toto řešení bylo zvoleno pro rychlost výměny. V zásobníku, umístěném na přední straně tiskárny, jsou hlavy drženy pomocí čepu, který je možno zasunout solenoidem.

Pro korektní vyzkoušení celé tiskárny by bylo vhodné postavit prototyp. Bohužel do odevzdání práce nebyli k dispozici všechny potřebné komponenty. Nicméně i tak byli všechny cíle práce splněny.

Tiskárna byla navržena s požadavkem na celkovou cenu 15 000 Kč, který ovlivnil použité výrobní technologie a také byla část dílů použita od výrobců z Číny. I přesto se odhadovaná částka na stavbu tiskárny vyšplhala na 20 500 Kč a bylo by možné ji snížit pouze kompromisem ve výběru použité elektroniky, trysky a odstranění krytování.

Zadané cíle práce – rešerše současného stavu poznání, návrh variant řešení, konstrukce a výpočty tiskárny a tvorba modelu a částí výkresové dokumentace – byly splněny.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] The Free Beginner's Guide. *3D Printing Industry* [online]. ©2016 [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>
- [2] Rapid Prototyping. *Evektor* [online]. ©1999-2016 [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/cz/rapid-prototyping>
- [3] 3D Hubs [online]. ©2016 [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com>
- [4] 3D Printing Trends Q1-2017. *3D Hubs* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/trends>
- [5] What is 3D Printing? The definitive guide. *3D Hubs* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>
- [6] Large-format 3D printer VX4000. *Voxeljet SYSTEMS* [online]. [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: <http://www.voxeljet.de/en/systems/vx4000/>
- [7] Legal Information. *Stratasys* [online]. ©2016 [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/legal/legal-information>
- [8] RepRap. *RepRapWiki* [online]. 2016 [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: <http://reprap.org/>
- [9] GRUTLE, Øyvind Kallevik. *5-axis 3D Printer*. Oslo, 2015. Master's thesis. University of Oslo.
- [10] *Ultimaker: 3D Printers* [online]. ©2017 [cit. 2017-01-21]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en>
- [11] *Airwolf 3D: High Performance 3D printers* [online]. ©2017 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://airwolf3d.com>
- [12] 3D Printing Filament Guide: ABS vs PLA vs many materials. *Nick Lievendag* [online]. ©2016 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <http://nicklievendag.com/filament-guide/>
- [13] *MatterHackers: 3D Printers & Filament* [online]. ©2017 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/>
- [14] 3D Printer Filament Comparison. *MatterHackers* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>
- [15] Choosing the Best 3D Printing Bed Surface. *MatterHackers* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.matterhackers.com/news/choosing-the-right-3d-print-bed-surface>
- [16] *PRUSA RESEARCH* [online]. 2016 © [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz>
- [17] Tiskové struny. *Prusa Research* [online]. ©2015 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://shop.prusa3d.com/cs/16-tiskove-struny>
- [18] *Svět 3D tisku* [online]. 2017 © [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <https://eshop.svet-3d-tisku.cz>
- [19] *E3D Online* [online]. ©2014 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://e3d-online.com/>
- [20] *GEEETECH 3D printers* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <https://www.geeetech.com>
- [21] *Flex3Drive* [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <https://flex3drive.com/>
- [22] *Home - BCN3D Technologies* [online]. ©2017 [cit. 2017-01-21]. Dostupné z: <https://www.bcn3dtechnologies.com/en/>

- [23] *GitHub – Ultimaker/Ultimaker2Plus* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: <https://github.com/Ultimaker/Ultimaker2Plus>
- [24] *CraftUnique* [online]. ©2008-2017 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <https://craftunique.com/>
- [25] *MakerBot* [online]. 2017 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/>
- [26] 3D Printed Flexible LED Glove with Conductive Filament. *Adafruit Learning System* [online]. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/3d-printed-flexible-conductive-filament-led-glove?embeds=allow>
- [27] 35 Challenging Dual Extruder 3D Printer Models. *All3DP* [online]. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/colorful-dual-extruder-3d-printer-models/>
- [28] Ultimaker 2 Dual extrusion first test print. *YouTube* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=_94FOGtK8fU
- [29] 3D Printing 101: What Is An Ooze Shield? *YouTube* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yhWhaGc5P6U>
- [30] MakerBot Support | Swapping the MakerBot Replicator Smart Extruder. *YouTube* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=2NQkr8igDrg>
- [31] PAVLÍK, M. Rozšíření 3D tiskárny o výměnu tiskových hlav. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Bradáč, Ph.D
- [32] Swapping heads delta printer. *YouTube* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=f60YuBrHRCA>
- [33] Pancakes: My 1st digital recipe. *YouTube* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=t3O19n_JqXU
- [34] Ultimaker tool changer dual extrusion 3. *YouTube* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=zmDU-qqHGRs>
- [35] Ultimaker – Magnetic tool changer - principle. *YouTube* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=viX_WLRqxYM
- [36] Principles for Pulley Tooth Profile Selection in a Synchronous Belt Drive System. *MISUMI USA Blog* [online]. 2015 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://blog.misumiusa.com/which-pulley-tooth-profile/>
- [37] *Vše pro 3D tisk - eshop* [online]. ©2016-2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/>
- [38] CoreXY: Cartesian Motion Platform. *CoreXY* [online]. ©2012 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://corexy.com/theory.html>
- [39] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [40] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [41] Microcon. *Microcon* [online]. ©2017 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://microcon.cz/>
- [42] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

- [43] 680. *ZKL Group* [online]. ©2012 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z:
<http://www.zkl.cz/cs/cat/2013/srbb/608>
- [44] Gaseous pollutant filtration. *RepRap* [online]. 2016 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z:
http://reprap.org/wiki/Gaseous_pollutant_filtration
- [45] Neodymové magnety. *Unimagnet* [online]. 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z:
<https://www.unimagnet.cz/>

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam tabulek

TAB 1) PARAMETRY TISKÁREN	66
TAB 2) PARAMETRY NAVRHOVANÉ 3D TISKÁRNY.	68
TAB 3) ROZHODOVACÍ MATICE KINEMATIKY POLOHOVÁNÍ.....	68
TAB 4) CENA POLOŽEK TISKÁRNY	102
TAB 5) NEJDRAŽŠÍ POLOŽKY 3D TISKÁRNY.....	102

11.2 Seznam obrázků

OBR. 1)TURBODMYCHADLO FIRMY KOENIGSEGG VYTIŠTĚNÉ NA 3D TISKÁRNĚ [5].....	17
OBR. 2)SCHÉMA SLA TECHNOLOGIE [5].....	18
OBR. 3)UKÁZKA TISKU SLA TECHNOLOGIÍ [5] A) ŠPERKAŘSKÝ PRŮMYSL, B) TISK FUNKČNÍ PLANETOVÉ PŘEVODOVKY	19
OBR. 4)SCHÉMA SLM TECHNOLOGIE [5].....	19
OBR. 5)UKÁZKY SOUČÁSTÍ ZHOTOVENÝCH SLM METODOU [5] A) ODLEHČENÁ KONZOLE KABINY AIRBUSU A380 B) ZUBNÍ KORUNKY A MŮSTKY VYROBENÉ NA MÍRU PACIENTŮM Z KOBALT – CHROMOVÉ SLITINY.....	20
OBR. 6)SCHÉMA TECHNOLOGIE BINDER JETTING [5].....	21
OBR. 7)BAREVNÝ MODEL DOMU [5].....	21
OBR. 8)TISKÁRNA VOXELJET VX4000 PRO VYTVÁŘENÍ PÍSKOVÝCH FOREM NA ODLÉVÁNÍ [6]	22
OBR. 9)SCHÉMA MULTIJET MODELING [5].....	22
OBR. 10) PŘESNÁ FORMA PRO VSTŘIKOVACÍ LIS NA 10-100 POUŽITÍ [5] 23	
OBR. 11) PROTOTYP ZUBNÍHO KARTÁČKU S VYTIŠTĚNÝMI ŠTĚTINAMI [5]23	
OBR. 12) PRINCIP FDM TECHNOLOGIE [5]	24
OBR. 13) KRABIČKA NA RASPBERRY PI [5]	25
OBR. 14) BUSTA VYTISKNUTÁ TECHNOLOGIÍ FDM A VPRAVO PO ZPRACOVÁNÍ K DOCÍLENÍ LESKLÉHO POVRCHU [5].....	25
OBR. 15) VÝTISKY PLA [12] A) FLUORESCENČNÍ MATERIÁL B) PLA S VÝPLNÍ BRONZOVÝMI ČÁSTICEMI C) A VÝPLNÍ DŘEVĚNÝMI VLÁKNY	26
OBR. 16) ABS VYLEPTANÝ VS. NEVYLEPTANÝ [12]	27
OBR. 17) WARPING – ODLoupnutí rohu při chlazení [12]	27

OBR. 18) PET MODELY [12] A) PRODLOUŽENÍ HÁKU NA DVEŘE B) PRŮHLEDNÝ VÝTISK	28
OBR. 19) VÝTISKY Z NYLONU A) OZUBENÉ KOLO [10], B) UKÁZKA TISKU MECH. KOMPONENT [12]	28
OBR. 20) FUNKČNÍ LOŽISKO VYTIŠTĚNÉ JAKO JEDEN KUS [12].....	29
OBR. 21) TISK S PODPOROU PVA [12]	29
OBR. 22) PRUŽNÝ VÝTISK TPE [12]	30
OBR. 23) ODHADOVANÉ PRODEJE 3D TISKÁREN V LETECH 2007–2015 [4]31	
OBR. 24) ZÁKLADNÍ ČÁSTI TISKÁRNY – PRUSA I3 MK2 [16].....	31
OBR. 25) MOŽNOSTI POLOHOVÁNÍ TISKOVÉ HLAVY A) HLAVA XY, PODLOŽKA Z, B) HLAVA XZ, PODLOŽKA Y, C) HLAVA XYZ, PODLOŽKA 0	32
OBR. 26) TISKÁRNY A) ULTIMAKER 2 GO [10] A B) AIRWOLF3D AXIOM [11]	33
OBR. 27) A) PRUSA I3 MK2 [16], B) LULZBOT TAZ 6 [3]	33
OBR. 28) TISKÁRNY DELTA A) ROSTOCK MAX [3] A B) DELTA WASP [3].34	
OBR. 29) CEL ROBOX – UZAVŘENÝ RÁM S POHYBLIVOU PODLOŽKOU V OSE Y [3].....	34
OBR. 30) RÁM PRŮMYSLOVÉ TISKÁRNY AON-M Z HLINÍKOVÝCH PROFILŮ [3]	35
OBR. 31) SCHÉMA KOVOVÉHO HOT ENDU 3D TISKÁRNY [19]	35
OBR. 32) PEEK HOT END [20]	36
OBR. 33) A) VÍCENÁSOBNÝ HOT END CHIMERA (E3D) A B) VÍCEBAREVNÝ VÝTISK [19].....	36
OBR. 34) HLAVNÍ SOUČÁSTI EXTRUDÉRU [19]	37
OBR. 35) TISKÁRNA PRUSA I3 [16] A) DIRECT EXTRUDER B) BOWDEN EXTRUDER.....	38
OBR. 36) SCHÉMA FLEX3DRIVE PRO 2 HOT ENDY [21]	38
OBR. 37) DETAIL PCB PODLOŽKY [8]	39
OBR. 38) PODLOŽKA BUILDTAK [15]	39
OBR. 39) GRANOLITE JAKO PODKLAD POD MODEL Z NYLONU [15]	40
OBR. 40) DVOUBAREVNÝ VÝTISK	41
OBR. 41) RUKAVICE V ŘEZACÍM SOFTWARE [26]	41
OBR. 42) VYTIŠTĚNÝ MODEL SE ZAPOJENÝMI LED DIODAMI [26]	41
OBR. 43) TISKOVÁ HLAVA NA AXIOM DUAL 3D TISKÁRNĚ [11]	42
OBR. 44) UKÁZKA Z TISKU DVOUBAREVNÉHO MODELU, V ZADNÍ ČÁSTI JE POMOCNÁ KOSTKA [28]	42

OBR. 45) A) TISK SOUČÁSTI S OOOZE SHIELD, B) ŠTÍT NA HOTOVÉ SOUČÁSTI, OBOJÍ [29]	43
OBR. 46) SOUČÁST PO ODSTRANĚNÍ ŠTÍTU [29]	43
OBR. 47) 4NÁSOBNÝ HOT END KRAKEN [19]	44
OBR. 48) HOT END CHIMERA [19]	44
OBR. 49) DVOJICE SAMOSTATNÝCH TISKOVÝCH HLAV, BCN3D SIGMA [22] 45	
OBR. 50) PARKOVACÍ POZICE S NÁDRŽKOU [22]	45
OBR. 51) SMART EXTRUDER OD FIRMY MAKERBOT [30]	46
OBR. 52) PŘIPOJENÍ SMART EXTRUDERU K TISKÁRNĚ [30]	46
OBR. 53) A) DETAIL UPÍNAČE, B) VÝMĚNA HLAV [31]	47
OBR. 54) AVTH NA TISKÁRNĚ TYPU DELTA, NAHOŘE VPRAVO A VLEVO JSOU ZÁSOBNÍKY NA HLAVY [32]	48
OBR. 55) VÝMĚNNÁ HLAVA VYUŽITÁ PRO TISK PALAČINKY PŘÍMO NA OHŘÁTOU PÁNEV [33]	48
OBR. 56) AVHL NA ULTIMAKER 1 A) TISKOVÁ HLAVA, B) PARKOVACÍ POZICE [34]	49
OBR. 57) PŘÍJEZD HLAVY K PARKOVACÍ POZICI [34]	49
OBR. 58) DETAIL HLAVY S MAGNETY, VPRAVO JE ZAPARKOVANÁ DRUHÁ HLAVA [35].....	50
OBR. 59) PŘIPOJENÁ SEKUNDÁRNÍ HLAVA [35]	50
OBR. 60) TISKÁRNA SIGMA OD VÝROBCE BCN3D [22].....	51
OBR. 61) SCHÉMA STANDARTNÍ SÉRIOVÉ STRUKTURY	52
OBR. 62) POHLED DO TISKÁRNY SIGMA [22]	52
OBR. 63) SCHÉMA POLOHOVÁNÍ OS [22]	53
OBR. 64) SCHÉMA ZDVIHU OSY Z TISKÁRNY SIGMA [22]	53
OBR. 65) RÁM STROJE SIGMA [22].....	54
OBR. 66) TISKÁRNA ULTIMAKER 2+ [10].	55
OBR. 67) POLOHOVACÍ SYSTÉM ULTIMAKER2+ [23]	55
OBR. 68) SCHÉMA ULTIMAKER KINEMATIKY	56
OBR. 69) ZDVIH PODLOŽKY ULTIMAKER2+ [23]	57
OBR. 70) EXTRUDÉR UMÍSTĚNÝ NA ZADNÍ STRANĚ TISKÁRNY [10].....	58
OBR. 71) TISKÁRNA ULTIMAKER 3 S 2 HOT ENDY [10].....	58
OBR. 72) RÁM TISKÁRNY ULTIMAKER 2+ [23].....	59
OBR. 73) ULTIMAKER 2+ [23]	59
OBR. 74) A) CRAFTBOT PLUS [24], B) KINEMATIKA COREXY	60

OBR. 75) A) ZDVIH VYHŘÍVANÉ PODLOŽKY, B) TISKÁRNA CRAFTBOT+[24].....	61
OBR. 76) TISKÁRNA REPLICATOR + [25]	62
OBR. 77) SCHÉMA HBOT	62
OBR. 78) A) MAKERBOT SMART EXTRUDER [25], B) VYTAŽENÝ ZÁSOBNÍK FILAMENTU [25].....	63
OBR. 79) VEDENÍ POMOCÍ TYČÍ A VALIVÝCH POUZDER	67
OBR. 80) VEDENÍ LINEÁRNÍMI VOZÍČKY S KOLEJNICEMI.....	67
OBR. 81) A) VEDENÍ PLATFORMY POMOCÍ VALIVÝCH VOZÍČKŮ A KOLEJNIC, B) VODÍCÍ TYČE A LINEÁRNÍ VALIVÉ POUZDRO.....	68
OBR. 82) POHON OSY Z KROKOVÝM MOTOREM A TRAPÉZOVÝM ŠROUBEM.....	69
OBR. 83) SCHÉMA UMÍSTĚNÍ ZÁSOBNÍKU HLAV.....	69
OBR. 84) NÁVRH VARIANTY S ELEKTROMAGNETEM A TVAROVÝM KONTAKTEM	70
OBR. 85) ODPOJOVÁNÍ TISKOVÉ HLAVY OD POJEZDU (KOLMÝ A ŠIKMÝ SMĚR ODJEZDU PŘI POUŽITÍ ROZDÍLNÝCH POZICOVACÍCH PRVKŮ)	71
OBR. 86) NÁVRH UCHYCENÍ HLAVY PERMANENTNÍMI MAGNETY.....	72
OBR. 87) FOTKA VYTIŠTĚNÉHO PROTOTYPU KONSTRUKCE VÝMĚNY HLAV	72
OBR. 88) A) HOT END E3DV6 [19] A B) CELOKOVOVÝ EXTRUDÉR (ROZMONTOVANÝ).....	73
OBR. 89) VYHŘÍVANÁ PODLOŽKA MK3 [37].....	74
OBR. 90) VEDENÍ OSY X A Y	75
OBR. 91) A) NAPÍNACÍ ŘEMENICE, B) UCHYCENÍ MOTORU	76
OBR. 92) NÁHLED OSY X A Y	76
OBR. 93) SCHÉMA RYCHLOSTÍ ŘEMENŮ A TISKOVÉ HLAVY	77
OBR. 94) SCHÉMA PŮSOBÍCÍCH SIL NA VOZÍK	79
OBR. 95) MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA MOTORU SX17-1005 PRO 24 V (ŽLUTÁ KŘIVKA) [41]	82
OBR. 96) VYSÍŤOVANÝ MODEL S OKRAJOVÝMI PODMÍNKAMI	83
OBR. 97) CELKOVÉ POSUNUTÍ	84
OBR. 98) REDUKOVANÉ NAPĚTÍ HMH.....	84
OBR. 99) NASTAVOVÁNÍ VÝŠKY PODLOŽKY	85
OBR. 100) PLATFORMA POD VYHŘÍVANOU PODLOŽKU.....	85
OBR. 101) PLATFORMA POD VYHŘÍVANOU PODLOŽKU.....	86
OBR. 102) SCHÉMA POHONU OSY Z.....	86

OBR. 103) POHLED NA UCHYCENÍ MOTORU A ŠROUBU	89
OBR. 104) PLATFORMA POD VYHŘÍVANOU PODLOŽKU	90
OBR. 105) SÍLY PŮSOBÍCÍ NA UPÍNAČ A ROZKLAD SIL DO NORMÁLOVÉHO A TEČNÉHO SMĚRU	91
OBR. 106) ZÁSOBNÍK HLAV	94
OBR. 107) ZADNÍ STRANA ZÁSOBNÍKU	94
OBR. 108) TISKOVÁ HLAVA A PŘÍRUBY OSY XY	95
OBR. 109) UMÍSTĚNÍ EXTRUDÉRŮ V ZADNÍ ČÁSTI TISKÁRNY	95
OBR. 110) RÁM 3D TISKÁRNY	96
OBR. 111) DRŽÁK CÍVKY NA BOČNÍCH DVÍŘKÁCH	97
OBR. P1) 3D TISKÁRNA BEZ KRYTŮ	115
OBR. P2) 3D TISKÁRNA BEZ KRYTŮ	115
OBR. P3) ZAKRYTOVANÁ 3D TISKÁRNA	116
OBR. P4) ZAKRYTOVANÁ 3D TISKÁRNA	116

12 SEZNAM PŘÍLOH

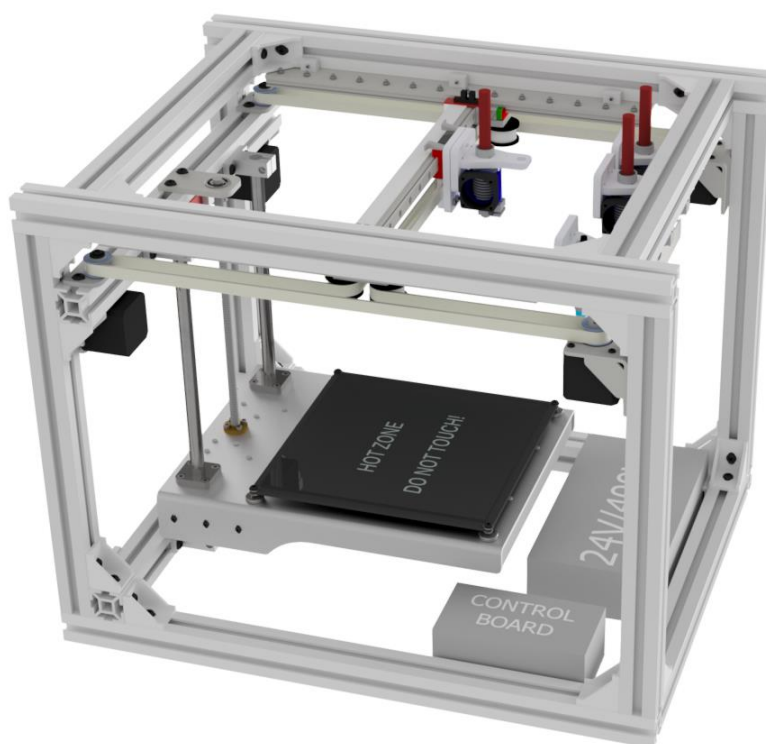
Obrázky tiskárny

CD

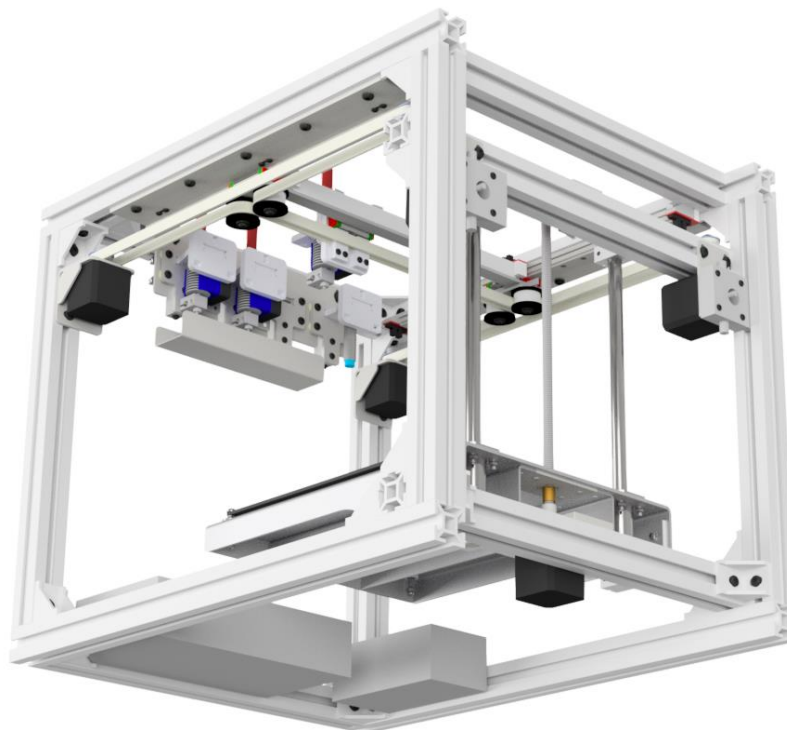
3D model tiskárny

Výkresová dokumentace vybraných uzlů

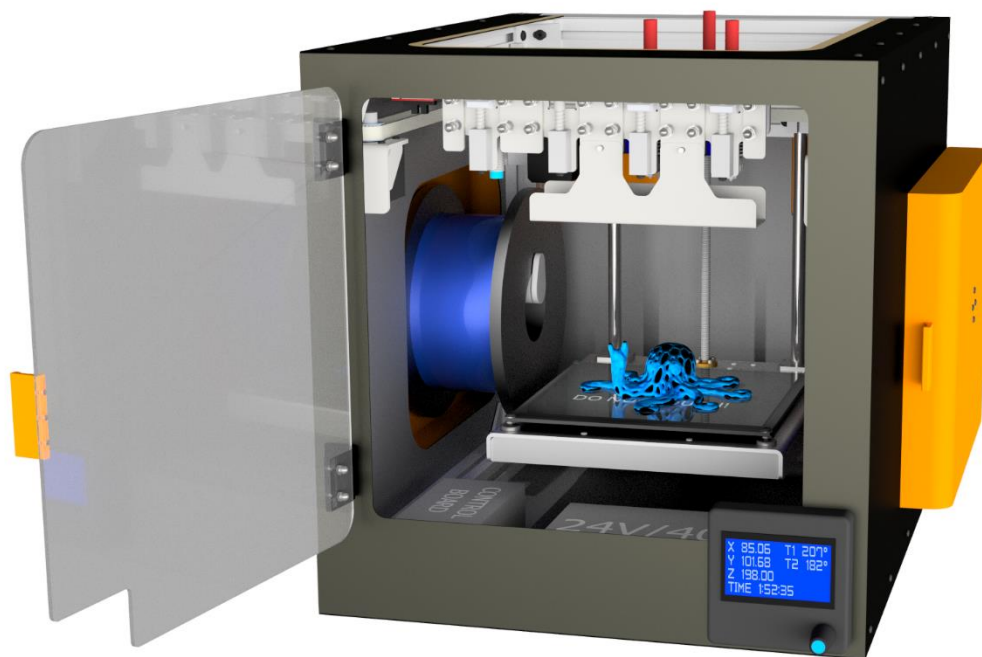
PŘÍLOHY



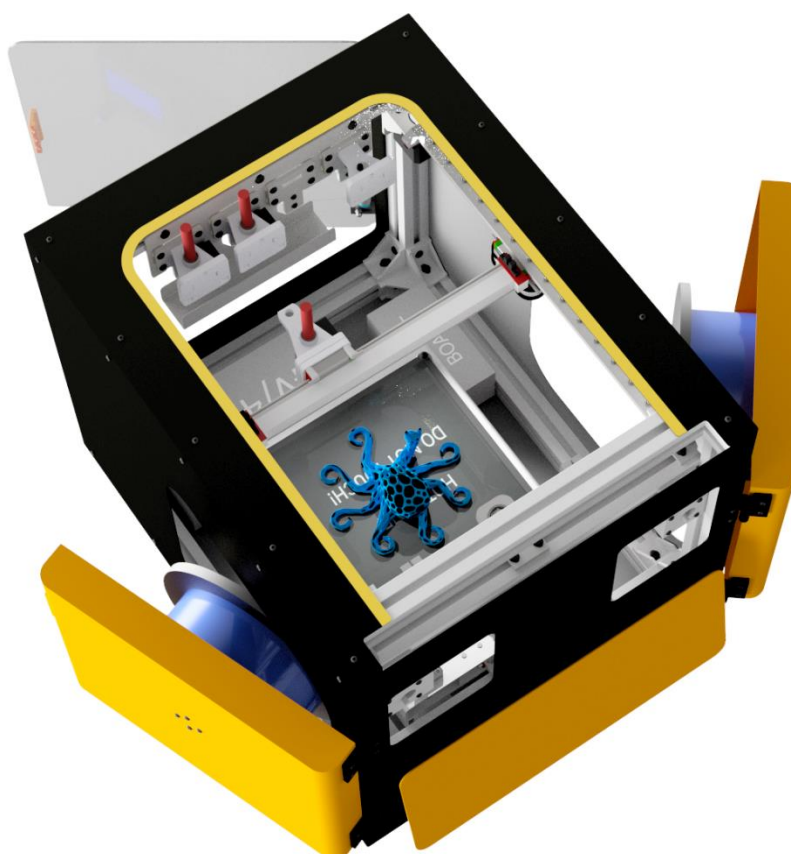
Obr. P1) 3D tiskárna bez krytů



Obr. P2) 3D tiskárna bez krytů



Obr. P3) Zakrytovaná 3D tiskárna



Obr. P4) Zakrytovaná 3D tiskárna