



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY S ROZŠÍŘENOU FUNKCIONALITOU

3D PRINTER DESIGN WITH ADDITIONAL FUNCTIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Čechman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Miškařík

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **David Čechman**
Studijní program: Strojnířství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Miškařík**
Akademický rok: 2015/16

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 bakalářské práce:

Návrh konstrukce 3D tiskárny s rozšířenou funkcionalitou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Daná bakalářská práce se bude zabývat konstrukčním návrhem pokročilé 3D tiskárny pro materiály ABS/PLA. Dále pak návrhem výměny tiskové hlavy s možností upnutí gravírovacího nástroje nebo laserové popisovací hlavy.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Konstrukční návrh pokročilé 3D tiskárny s přídatnou osou rotace, včetně návrhu pohonů.
- 2) Konstrukčně vyřešit výměnu hlavy a způsob upnutí gravírovacího nástroje nebo vypalovacího laseru
- 3) Výkresová dokumentace vhodná pro výrobu

Seznam literatury:

MAREK.J a kolektiv: Konstrukce CNC obráběcích strojů, MM publishing s.r.o. 2010, 420s,
978-80-254-7980-3

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 30. 11. 2015



Ing. Jan Roupec, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem práce je konstrukční návrh pokročilé 3D tiskárny s přídatnou osou rotace včetně návrhu pohonů a kompletní výrobní dokumentace. V první části práce je popsán vznik a vývoj 3D tisku a jeho nejznámější metody. Ve druhé části je řešena samotná konstrukce a technické řešení 3D tiskárny s rozšířenou funkcionalitou.

ABSTRACT

The goal of this thesis is to design advanced 3D printer with its additional axis of rotation including drive design and complete production documentation. Origin of the 3D printing and the most common types of printing are described in the first part of the thesis. The second part is focused on the design, construction and technical solution of the 3D printer with its additional functionality.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, gravírování, Rapid Prototyping

KEYWORDS

3D print, engraving, Rapid Prototyping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČECHMAN, D. *Návrh konstrukce 3D tiskárny s rozšířenou funkcionalitou*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 47 s., Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Miškařík.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Kamilu Miškaříkovi za věcné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji mé rodině za podporu při studiu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25.5.2016.

.....

Čechman David

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ABSTRAKT | 5 |
| BIBLIOGRAFICKÁ CITACE | 7 |
| PODĚKOVÁNÍ | 9 |
| ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ | 11 |
| OBSAH | 13 |
| 1 ÚVOD | 15 |
| 2 RAPID PROTOTYPING | 17 |
| 2.1 Vznik a vývoj | 17 |
| 2.2 Zásady pro tvorbu výrobku | 17 |
| 2.3 Metody Rapid Prototyping | 18 |
| 2.3.1 Stereolitografie - SLA | 18 |
| 2.3.2 Selective Laser Sintering – SLS | 19 |
| 2.3.3 Laminated Object Manufacturing - LOM | 19 |
| 2.3.4 Multi Jet Modeling - MJM | 20 |
| 3 FUSED DEPOSITION MODELING – FDM | 21 |
| 4 PŘEHLED KOMPONENT NEZBYTNÝCH PRO KONSTRUKCI 3D TISKÁRNY | 23 |
| 4.1 Rám | 23 |
| 4.2 Lineární vedení posuvných soustav | 24 |
| 4.3 Posuvné mechanismy | 25 |
| 4.4 Motory | 26 |
| 4.5 Extruder | 27 |
| 4.6 Nosná deska | 27 |
| 5 KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY S ROZŠÍŘENOU FUNKCIONALITOU | 29 |
| 5.1 Rám | 29 |
| 5.2 Lineární vedení posuvných soustav | 29 |
| 5.3 Pohybové šrouby | 30 |
| 5.4 Krokový motor | 31 |
| 5.5 Extruder | 32 |
| 5.6 Nosná deska s přídatnými osami rotace | 33 |
| 5.7 Frézovací vřeteno | 34 |
| 5.8 Výměna extruderu a upnutí frézovacího vřetena | 35 |
| 6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE | 36 |
| 7 ZÁVĚR | 39 |
| 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 41 |
| 9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK | 43 |
| 10 SEZNAM PŘÍLOH | 47 |

1 ÚVOD

V dnešní době jsou ve strojírenském a stavebním průmyslu kladeny vysoké nároky na rychlost a kvalitu zpracování projektů. Inženýři, projektanti a designéři jsou nuceni pracovat rychleji, precizněji a také levněji.

Pomocí 3D tisku lze rychle a za relativně vysoké přesnosti vyrábět prototypy komponentů a jejich testování. Tato technologie umožňuje vyrábět funkční pohyblivé vzorky, což ocení i zákazník, který má jasnou představu o tom, jak bude finální produkt vypadat dříve, než začne samotná výroba.

V dnešní době jsou nejpoužívanější jednocelové 3-osé tiskárny. Tyto stroje k tisku využívají pouze 3 osy, což vede k tvorbě podpěrných konstrukcí, které se po vytištění modelu odstraní. Tyto podpěrné konstrukce jsou mnohdy objemnější a dražší, než samotný model. Tomuto lze alespoň částečně předejít doplněním dalších dvou os.

Cílem bakalářské práce tedy je navrhnout 3D tiskárnu s rozšířenou funkcionalitou, která dokáže pracovat s 5-ti osami. Další požadavek je přizpůsobit upnutí extruderu a jeho náhrada frézovacím vřetenem, které dokáže gravírovat plasty, případně obrábět vytištěný model.



Obr. 1) Profesionální 3D tiskárna MakerBot Replicator [4]

2 RAPID PROTOTYPING

Rapid prototyping je technologický proces, jehož cílem je návrh a výroba nového výrobku rychleji, než je možno běžnými technologiemi. Tímto se výrazně zkracuje čas potřebný na tvorbu výrobku a tím i jeho cena. Technologie umožňuje kontrolu a testování již v rané fázi vývoje, ale také výrobu složitých, běžnými technologiemi nevyrobitelných součástí (výrobky s dutinami) [1,2].

2.1 Vznik a vývoj

Rapid prototyping (RP) je relativně mladá technologie, jejíž historie sahá do 80. let minulého století, kdy byla vyvinuta technika stereolitografie. Vývoj RP je úzce spjat s vývojem aplikací a snižováním cen osobních počítačů, jak můžeme vidět v tab. 1, kde je zobrazen historický vývoj technologií souvisejících s RP [1,2,4].

Tab 1) Historický vývoj RP a souvisejících technologií

| Rok vzniku | Technologie |
|------------|--|
| 1770 | Mechanizace |
| 1946 | První počítač |
| 1952 | První číslicově řízený (NC) obráběcí stroj |
| 1960 | První komerční laser |
| 1961 | První komerční robot |
| 1963 | První interaktivní grafický systém |
| 1988 | První komerční RP systém |

2.2 Zásady pro tvorbu výrobku

Výrobek je vymodelován v libovolném CAD systému, který umožňuje vytvářet virtuální 3D modely. Model je zdrojem dat pro 3D tisk. Pro tvorbu modelu je možno využít jakéhokoliv modeláře. Existuje pouze jediná podmínka: povrchy virtuálního modelu musí být uzavřené [1,4].

V dalším kroku je model z CAD systému exportován nejčastěji do formátu *.stl (stereolitography). V souboru ve formátu *.stl jsou povrchy modelu aproximovány na trojúhelníky [4].

2.3 Metody Rapid Prototyping

V průběhu let se objevovaly a vyvíjely různé metody technologie RP. Přehled komerčně dostupných technologií RP je znázorněn v tab. 2. Některé z nich jsou detailněji popsány v následujících kapitolách.

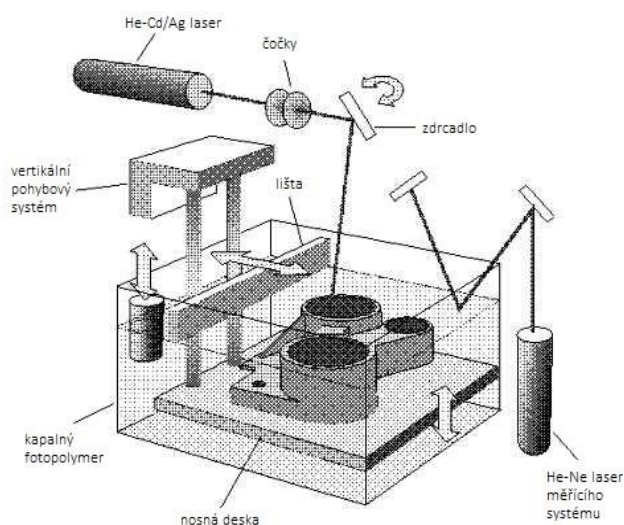
Tab 2) Porovnání technologií rapid prototyping [1]

| Základní technologie RP | Zkratka | Materiál modelu |
|--------------------------------|---------|--------------------------------------|
| Stereolitografie | SLA, SL | Fotopolymer |
| Solid Ground Sintering | SGC | Fotopolymer, nylon |
| Selective Laser Sintering | SLS | Polyamid, nylon, vosk, kovové prášky |
| Direct Metal Laser Sintering | DMLS | Kovové prášky |
| Laminated Object Manufacturing | LOM | Papír s jednostranným pojivem |
| Fused Deposition Modeling | FDM | ABS, vosk, polykarbonát |
| Multi Jet Modeling | MJM | Termopolymer, akrylátový fotopolymer |

2.3.1 Stereolitografie - SLA

Stereolitografie obr. 2 je nejstarší a nejpřesnější metoda výroby modelů pomocí technologie RP. Tato metoda byla vyvinuta společností 3D Systems, Inc., a roku 1987 uvedena na trh. Její přesnost se pohybuje kolem 0,05 až 0,2 mm na 100 mm délky modelu, a proto je vhodné ji používat při výrobě forem, výrobků s přesným detaily, atd. [1].

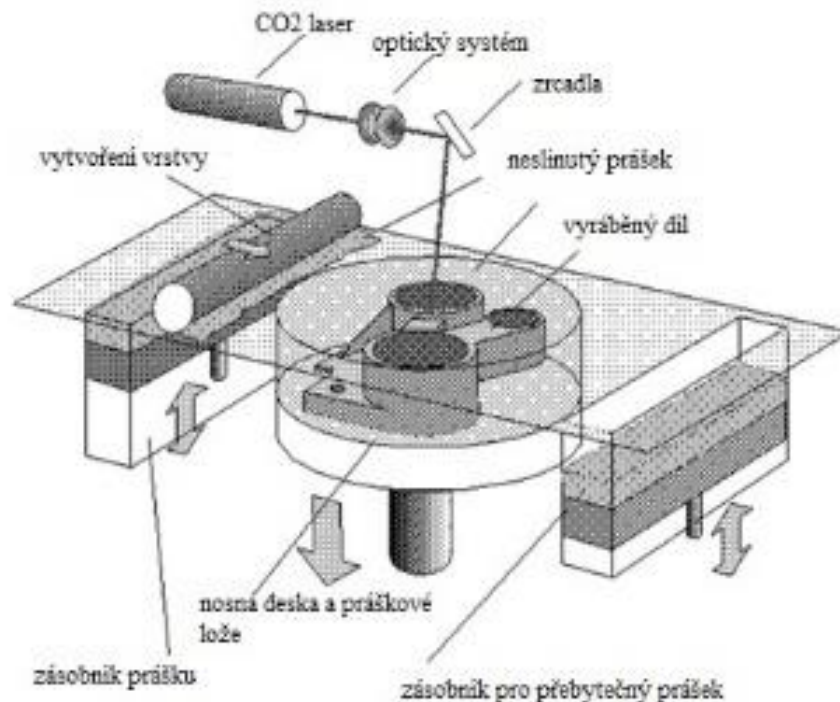
Výrobek je vytvářen vytvrzováním polymeru, pomocí UV laseru. UV laser je ve spolupráci se složitou optikou zaměřován na hladinu polymeru, čímž jej vytvrzuje. Součást je vytvářena na nosné desce, která je těsně pod hladinou polymeru. Po vytvrzení jedné vrstvy se posune o výšku vrstvy do lázně a proběhne vytvrzení další vrstvy, dokud se nevytvoří požadovaný výrobek. Výška vytvrzení jedné vrstvy se pohybuje od 0,05 do 0,15 mm [1,4].



Obr. 2) Princip metody SLA [1]

2.3.2 Selective Laser Sintering – SLS

Metoda SLS obr. 3 funguje na obdobném principu jako předchozí metoda. Materiál je vytvářen v tenkých vrstvách, dokud není zhotoven celý model. Na nosnou desku se nanese první vrstva prášku a paprskem CO₂ laseru se vytvrdí. Poté se nosná deska posune do nádoby o výšku jedné vrstvy a nanese se další vrstva. Okolní nevytvrzený prášek slouží jako podpora pro model a po dokončení tisku je odstraněn. Materiál ve formě prášku může být použit jakýkoliv, který se působením tepla taví, nebo měkne. Pomocí SLS lze vytvářet součásti z pryže, plastů, kovů, keramiky. Součásti vyrobené touto metodou jsou velmi pevné a přesné [1,4].

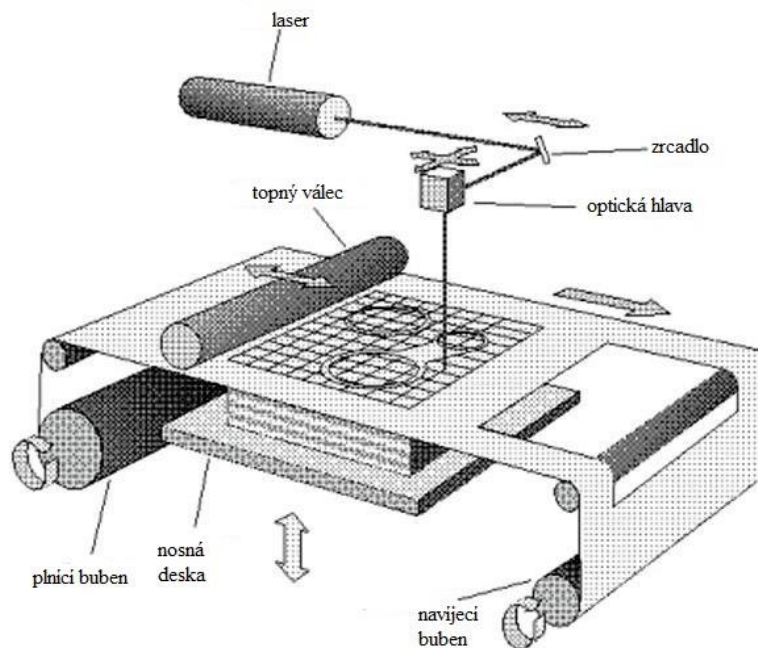


Obr. 3) Princip metody SLS [1]

2.3.3 Laminated Object Manufacturing - LOM

Metoda LOM obr. 4 je založena na vrstvení velkého množství fólií. Jednotlivé fólie jsou na jedné straně opatřeny přilnavým nátěrem, kterým jsou přilepeny k předcházející vrstvě [1]. Laserem se vyřeže požadovaný tvar aktuální vrstvy a přebytečný materiál se rozřeže na čtverce, které se po dokončení modelu odstraní. Fólie jsou vytvořeny z papíru, plastů nebo keramiky [1,5].

Model je tvořen na nosné desce, která se pohybuje ve svislém směru. Na nosnou desku se nanese vrstva fólie a zahřátými válci se zahřeje na přibližně 330°C. Zahřátím se aktivuje lepidlo a fólie se přilepí. Poté se laserem vyřízne obrys dané vrstvy a přebytečný materiál se rozřeže na čtverce. Nosná deska se posune o výšku jedné vrstvy směrem dolů a nanese se další vrstva. Takto se pokračuje, dokud není model hotov. Po vytvoření modelu se odstraní přebytečný materiál a provedou dodatečné úpravy povrchu [1,5].

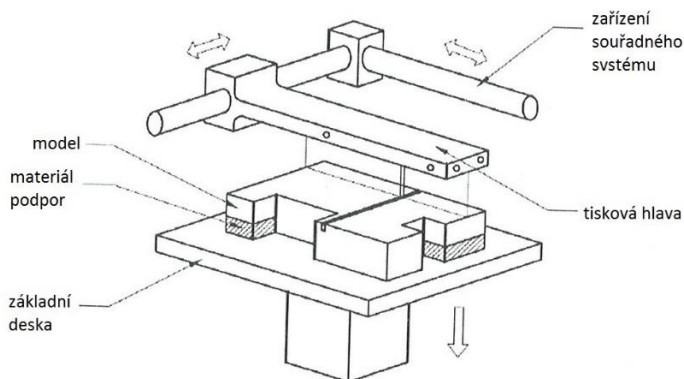


Obr. 4) Princip metody LOM [1]

2.3.4 Multi Jet Modeling - MJM

Princip metody MJM obr. 5 spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolymeru pomocí speciální tiskové hlavy, která má 352 trysek (starší zařízení obsahovala pouze 92 trysek). Trysky jsou na zařízení rozmístěny v těsné blízkosti na jedné ose. Obslužný program řídí každou trysku zvlášť, čímž určuje jak velká vrstva má být nanášena a další důležité atributy tisku [1].

Materiál se nanáší na nosnou desku, která se pohybuje pouze svisle. Tisková hlava koná pohyb ve směru osy X a Y. Princip tvorby modelu je obdobný jako u předchozích metod. Na nosnou desku se nanese vrstva termopolymeru, která téměř okamžitě tuhne. Deska se posune o výšku nanášené vrstvy a proces se opakuje, dokud se nevytvoří požadovaný model. Výhoda této metody spočívá v rychlém a rovnoměrném nanášení vrstev, byť za cenu malé přesnosti [1,5].



Obr. 5) Princip metody MJM [1]

3 FUSED DEPOSITION MODELING – FDM

Princip metody FDM obr. 6 spočívá v natavování termoplastického materiálu navinutého ve formě drátu na cívce, ze které je vtlačován do vyhřívané trysky pomocí kladek a následně nanášen po jednotlivých vrstvách na podložku [1]. Stejně jako u ostatních metod i u FDM je nutné vytváření podpor, kterou lze mechanicky, nebo chemicky odstranit [1,5].

Tisková hlava, která obsahuje trysku s topným tělesem, vykonává pohyby v osách X, Y, Z a nanáší jednotlivé vrstvy materiálu. Poté se posune směrem nahoru o výšku požadované vrstvy a proces opakuje. Topné těleso zahřívá termoplastický materiál na teplotu o několik stupňů vyšší, než je teplota tavení daného materiálu, přičemž materiál po nanesení okamžitě tuhne [1,5].

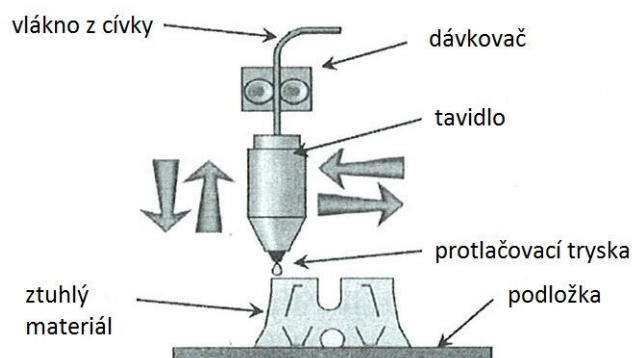
Metodou FDM lze také tisknout pohyblivé modely obr. 7. K tomuto je nutný složitější přístroj, který disponuje dvěma tryskami. Jedna tryska nanáší hlavní materiál, druhá tryska nanáší materiál podpor. Po dokončení modelu se vloží do lázně, která podpory chemicky odstraní. Nejpoužívanější materiály jsou plasty PLA a ABS:

PLA (Polylactic acid)

Je vyroben z obnovitelných zdrojů. Hlavní surovinou pro jeho výrobu je kukuřičný škrob a celulóza. Díky menší teplotě tavení je lépe zpracovatelný než ABS. Je také méně odolný vůči vnějším vlivům a začíná měknout již při 60°C. Díky menší tepelné roztažnosti není při tisku z PLA nutná vyhřívaná podložka [6,7].

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)

Je zdravotně nezávadný amorfnní termoplastický kopolymer. Má dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči nízkým a vysokým teplotám. Kvůli velké tepelné roztažnosti je nutno použít vyhřívanou podložku [7,8].



Obr. 6) Princip metody FDM [1]



Obr. 7) Pohyblivá soustava vytištěná metodou FDM [9]

Díky nízké ceně a dobré dostupnosti se staly 3D tiskárny využívající metody FDM velmi populární a jejich obliba stále roste hlavně u podnikatelů, škol, ale i domácích kutilů, kteří se chtějí přiučit něčemu novému. V České republice je nejpopulárnějším výrobcem 3D tiskáren firma PRUSA RESEARCH s.r.o. obr. 8.



Obr. 8) 3D tiskárna Original Prusa i3 Plus [10]

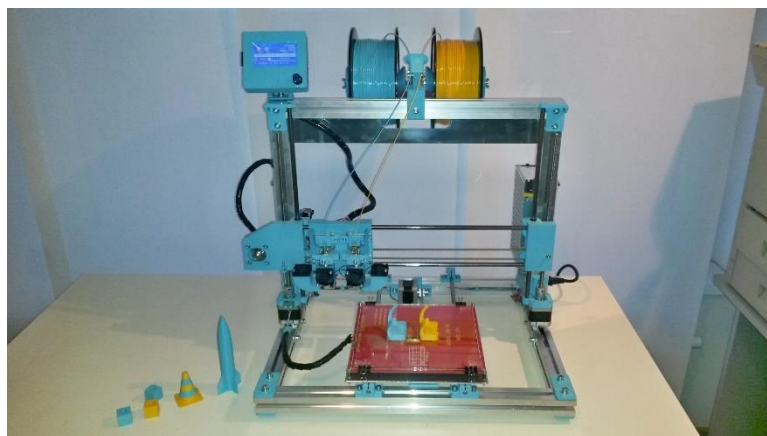
4 PŘEHLED KOMPONENT NEZBYTNÝCH PRO KONSTRUKCI 3D TISKÁRNY

4.1 Rám

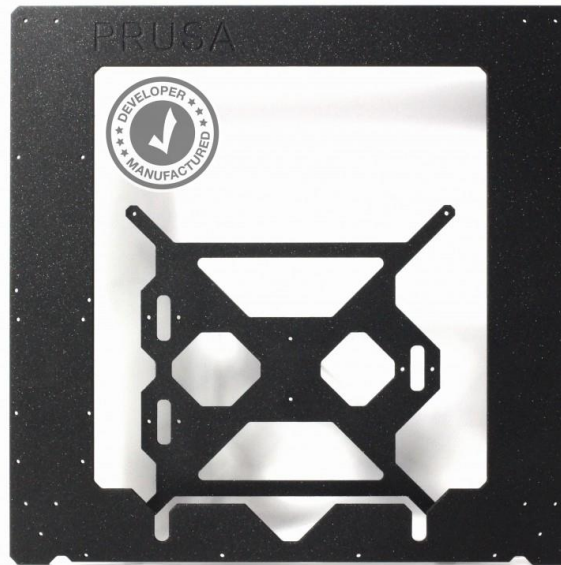
Tak jako u všech obráběcích strojů i u 3D tiskáren jsou kladeny vysoké nároky na konstrukci rámu. Rám musí být tuhý a pevný. První konstrukce rámu, převážně po domácku vyráběných tiskáren byly z překližky obr. 9. Poté se tyto tiskárny staly plně použitelnými a profesionálními stroji, což vedlo tvůrce k použití materiálů pevnějších a odolnějších, zejména hliníku a duralu. Na velmi jednoduché tiskárny se zejména kvůli ceně používají hliníkové profily obr. 10. Pro složitější a kvalitnější stroje se používají rámy frézované z duralových desek apod. obr. 11.



Obr. 9) Rám z překližky na 3D tiskárnu Průša i3 [11]



Obr. 10) Rám 3D tiskárny Poseidon DUO tvořen Al profily [12]



Obr. 11) Rám z frézovaného duralu pro 3D tiskárnu Prusa i3 [13]

4.2 Lineární vedení posuvných soustav

Lineární vedení umožňuje pohyb posuvné soustavy z bodu A do bodu B v jedné ose. Existuje několik základních způsobů, jak lineární vedení vytvořit. [14]

V 3D tisku je nejpoužívanější lineární vedení složené z vodící tyče a kuličkového, nebo kluzného pouzdra obr. 12. Tato varianta je vhodná pro malé zatížení a menší přesnosti. Díky své jednoduchosti, je toto řešení také ekonomicky příznivé. Další varianta se nazývá lineární vedení HIWIN obr. 13, které se skládá ze speciální broušené kolejničky a vozíku, který vykonává pohyb. Tento typ je díky své přesnosti využíván spíše u obráběcích strojů, které podléhají většímu namáhání než 3D tiskárny. Pro účely 3D tisku se spíše nepoužívá.



Obr. 12) Sestava vodící tyče a kuličkového pouzdra v linearsetu [15]



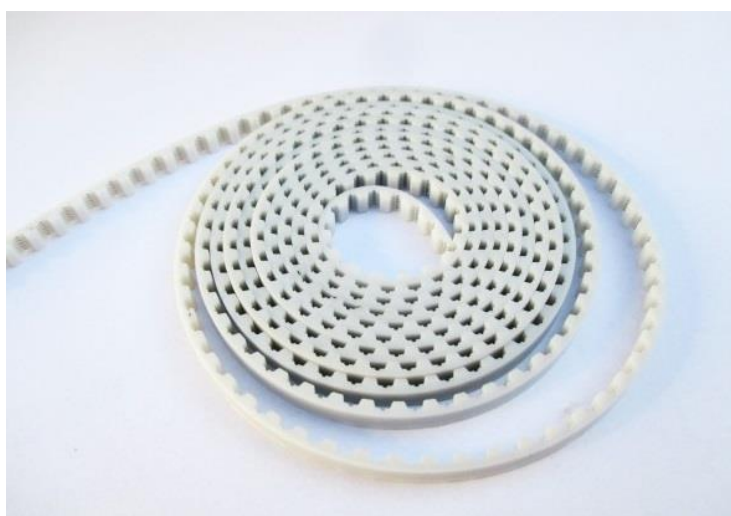
Obr. 13) Lineární vedení HIWIN [16]

4.3 Posuvné mechanismy

Umožňují přenos rotačního pohybu motoru na pohyb přímočarý. Jsou na ně kladeny vysoké nároky, zejména tuhost, přesné polohování, stálost, tichý chod, apod. Nejčastěji používané jsou:

Ozubené řemeny:

Ozubené řemeny obr. 14 se využívají zejména v aplikacích s velkými zrychleními a rychlostmi. Zaručují tichý chod, vysoký výkon, ale také menší tuhost a přesnost. Jsou vhodné pouze pro malé zatížení. Díky své jednoduchosti jsou také nejlevnější volba.



Obr. 14) Ozubený řemen [17]

Trapézové šrouby:

Trapézové šrouby obr. 15 jsou pevnější a přesnější než ozubené řemeny. Jsou namáhány na tlak v závitech a při nesprávném návrhu náchylné k zadírání. Při konstrukci je nutno počítat s větší přesností uložení šroubu. Matice se vyrábějí ocelové, bronzové, nebo ze speciálních samomazných plastů. Trapézové šrouby splňují veškeré požadavky 3D tiskáren a malých frézek. Jsou přesně, pevné a zároveň cenově příznivé.



Obr. 15) Hřídele s trapézovým závitem a bronzovými maticemi od firmy Valenta [18]

4.4 Motory

U 3D tiskáren se používají výhradně elektromotory, které mění vstupní elektrickou energii na rotační pohyb. Nejčastěji se používají krokové motory obr. 16a, ale lze také použít servomotory obr. 16b. U elektromotorů se požaduje hlavně plynulá změna rychlosti, zrychlení a přesné polohování [19].

Krokový motor:

Krokový motor je napájen stejnosměrným proudem a je velmi levný, bezúdržbový a lehce říditelný ze všech digitálních systémů. V 3D tiskárnách se nejčastěji používají motory se základním krokem o velikosti $1,8^\circ$. Krokový motor také dokáže vykonávat mikrokroky v závislosti na tom, jak jsou napájeny jednotlivé pólové dvojice. Nevýhodou je jeho extrémní citlivost a neschopnost bez napájení udržet stanovenou polohu a nutnost před každým tisknutím polohovat. [20]

Servomotor:

Servomotory jsou v dnešní době řešeny jako asynchronní motory s třífázovým vinutím, u kterých lze nastavit přesnou polohu natočení osy. Jejich řízení je složité a je nutné použití frekvenčního měniče, což jejich použití značně prodražuje. Servomotory se používají na dynamické úlohy, kde je nutno využít vysokých otáček a přesné pozice hřídele motoru. Používají se u velkých CNC strojů, robotů, atd. [19,21].

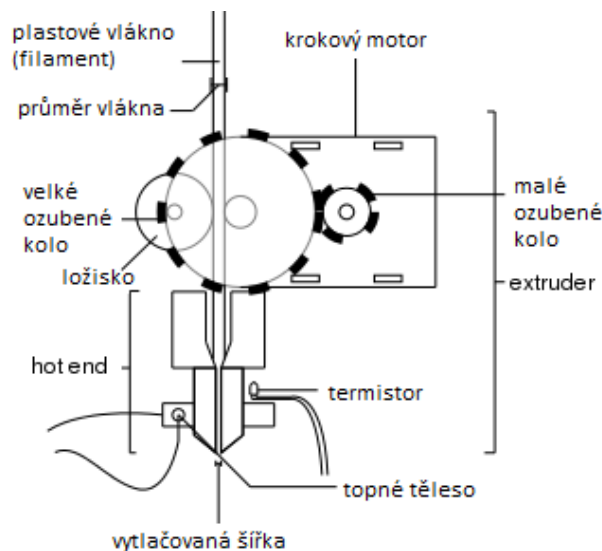


a) Krokový motor b) Servomotor

Obr. 16) Možnosti pohonů [22]

4.5 Extruder

Extruder obr. 17 je zařízení, které zprostředkovává ohřev a dávkování stavebního materiálu. Nejčastěji ABS a PLA. Skládá se z krokového motoru a převodu, který tlačí plastové vlákno (filament) do hot-endu, kde se plast topným tělesem zahřívá a tryskou vychází ven na nosnou desku.



Obr. 17) Schéma a popis extruderu [23]

4.6 Nosná deska

Nosná deska je specifická pro každou metodu 3D tisku. U nejpoužívanější FDM metody je velmi často vyhřívána, díky čemuž model při chladnutí lépe zachovává rozměry a tvar.

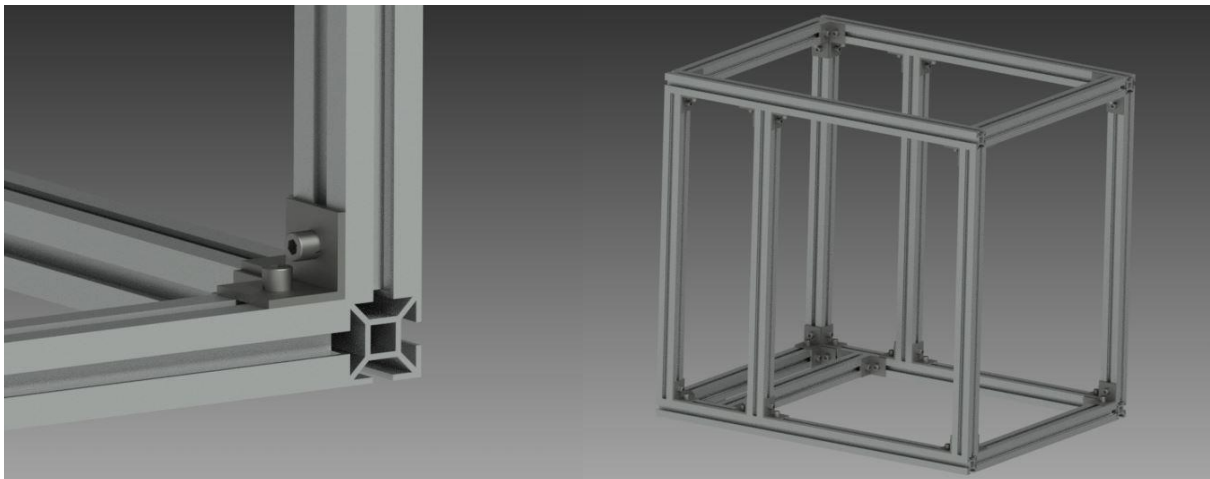
5 KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY S ROZŠÍŘENOU FUNKCIONALITOU

Při konstrukci 3D tiskárny s rozšířenou funkcionalitou bylo hlavním cílem vytvořit stroj s jednoduchou konstrukcí, tuhostí, přesností a v neposlední řadě také s ohledem na pořizovací náklady daných komponent.

5.1 Rám

S ohledem na pevnost, tuhost, cenu a jednoduchou montáž byl zvolen stavebnicový systém Kombi od společnosti ehlinik.cz. Z tohoto systému byly použity pouze Kombi stojky. Spojení stojek je realizováno pomocí nerezových L profilů obr. 18a o rozměrech 30x30x3 mm.

Rám obr. 18b byl zkonstruován do tvaru kvádru. Tímto byl vytvořen dostatečný prostor a úchyty pro elektroniku, případné krycí kapotáže atd. Rozměr rámu byl zvolen na 585 mm délky, 460 mm šířky a 560 mm výšky.

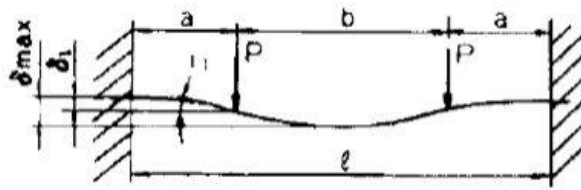


a) Spojení stojek nerezovým L-profilem b) Rám ze stavebnicového systému Kombi

Obr. 18) Vizualizace rámu

5.2 Lineární vedení posuvných soustav

Lineární vedení zprostředkovávají indukčně kalené vodící tyče s kuličkovými pouzdry. Průměr vodící tyče byl zvolen 20 mm v ose X a 10 mm v osách Y a Z. U vodící tyče v ose X byla provedena kontrola na průhyb podle rovnice (1) a schématu obr. 19 uvedené v katalogu společnosti T.E.A. TECHNIK s.r.o.



Obr. 19) Schéma uložení a zatížení vodící tyče [24]

$$\delta_1 = \frac{Pa^3}{6EI} \left(2 - \frac{3a}{l}\right) C = 8Pa^3 \left(2 - \frac{3a}{l}\right) C \quad (1)$$

kde: δ_1 [mm]-průhyb v místě působení zatížení

P [kg]- bodové zatížení

a [mm]-vzdálenost zatížení od vetknutí

EI [kg.mm⁻²]-moment elasticity

l [mm]-délka tyče

C [kg⁻¹.mm⁻²]-1/48EI

Pro tyč průměru 20 mm platí hodnota $C = 1,26 \times 10^{-10}$.

Hmotnost stolu s nosnou deskou je přibližně 9 kg => P = 2,25 kg.

Po dosazení do rovnice (1) dostáváme:

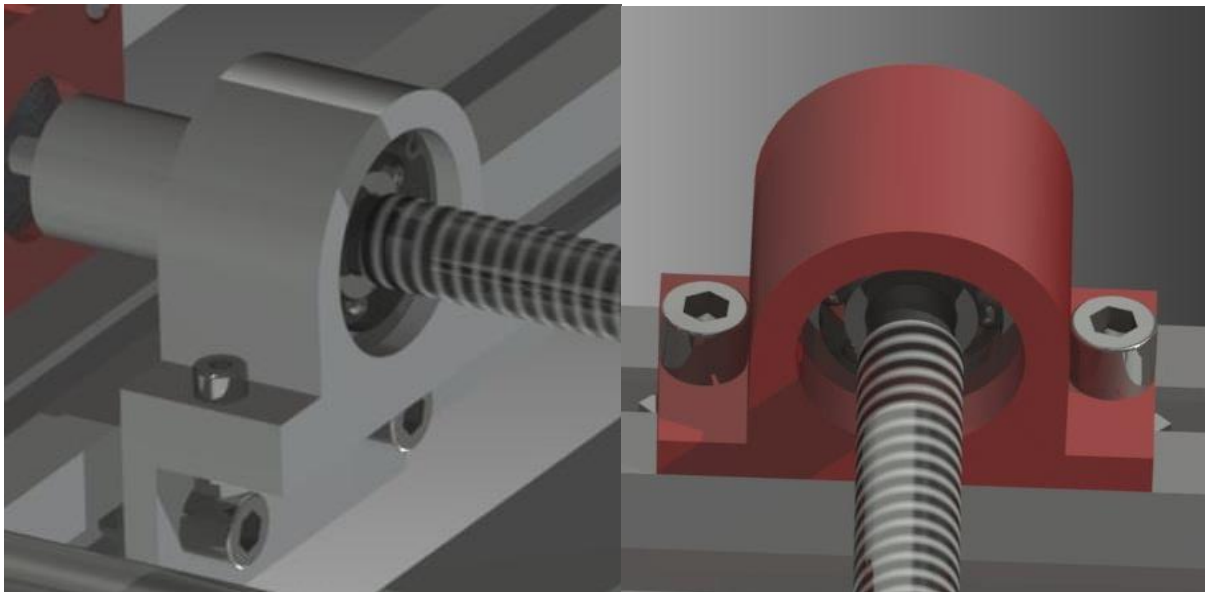
$$\delta_1 = 8 \cdot 2,25 \cdot 122^3 \left(2 - \frac{3 \cdot 122}{525}\right) 1,26 \cdot 10^{-10} = 0,00536 \text{ mm}$$

Maximální průhyb v místě zatížení je $\delta_1 = 0,00536$ mm, což je pro 3D tisk i gravírování dostatečně malá odchylka. Zvolený průměr vodící tyče vyhovuje požadavkům na konstruovaný stroj.

5.3 Pohybové šrouby

Pohybové šrouby zprostředkovávají přenos rotačního pohybu motoru na přímočarý pohyb posuvných soustav.

Pro 3D tiskárny a malé frézky je plně dostačující jednoduchý trapézový šroub s plastovou maticí. Matice je vyrobena z plastu, který je vysoce odolný vůči otěru a je také samomazný [25]. V osách X a Y byl zvolen šroub Tr 12x3. Pro osu Z byl z důvodů uložení a rozměrů matice zvolen šroub Tr 10x3. Trapézové šrouby jsou uloženy na jedné straně pevným uložení obr. 20a v hliníkovém domku a ložisku s kosoúhlým stykem. Na straně druhé je uložení volné v plastovém domku a radiálním kuličkovém ložisku obr. 20b. Všechna ložiska jsou vybavena těsněním vůči nečistotám.



- a) Pevné uložení v domku s ložiskem s kosoúhlým stykem, ložisko je zajištěno pojistnými kroužky tepelných dilatací
- b) Volné uložení v domku s radiálním ložiskem bez zajištění pro vyrovnání

Obr. 20) Uložení trapézové závitové tyče

5.4 Krokový motor

Jako pohon byly zvoleny krokové motory, protože se jednoduše ovládají, jsou levné a spolehlivé. Motory byly navrženy dle rovnice (2).

$$M_k = \frac{FP_1}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (2)$$

kde: M_k [Nm]-krouticí moment motoru

F [N]- axiální síla působící na matici

P_1 [mm]-stoupání závitu

η [-]-účinnost (uvažujeme $\eta = 0,2$)

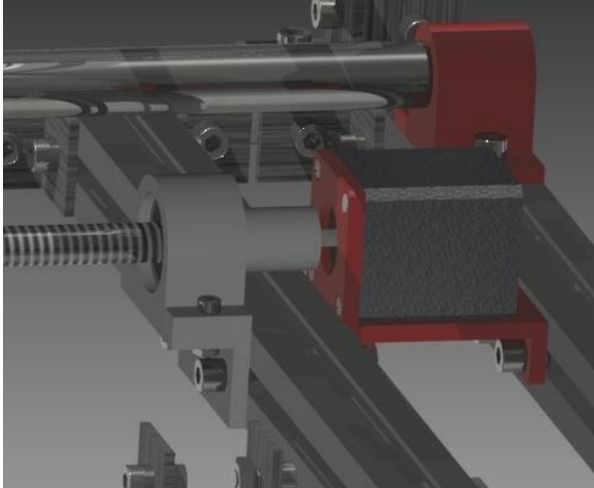
Při teoretické hmotnosti nosné desky 9 kg bude axiální síla $F = 160$ N. Stoupání závitu $P_1 = 3$ mm.

Po dosazení do rovnice (2) dostáváme:

$$M_{kt} = \frac{160 \cdot 3}{2000 \cdot \pi \cdot 0,2} = 0,38 \text{ Nm}$$

Vypočtená hodnota je pouze teoretická a nebere v potaz další pohyblivé součásti, a proto je nutno provést navýšení o cca 50 %. Po navýšení je krouticí moment $M_k = 0,76$ Nm. Z důvodu bezpečnosti a delší životnosti byl zvolen krokový motor dosahující krouticího momentu 2,7 Nm.

Krokové motory jsou k rámu uloženy pomocí plastových tištěných držáků obr. 21a. Spojení pohybového šroubu a hřídele motoru je realizováno ocelovou pružnou spojkou obr. 21b.



a) Uložení krokového motoru v plastovém držáku b) pružná ocelová spojka [26]

Obr. 21) Uložení krokového motoru k rámu včetně spojení se závitovou tyčí

5.5 Extruder

Extruder obr. 22 byl použit z čínského e-shopu AliExpress. Jedná se o extruder s tryskou o průměru 0,4 mm vhodnou pro tisk materiálu ABS a PLA průměru 1,75 mm. Extruder se skládá výhradně z kovových a hliníkových součástí a je kompletně sestaven a připraven k použití.

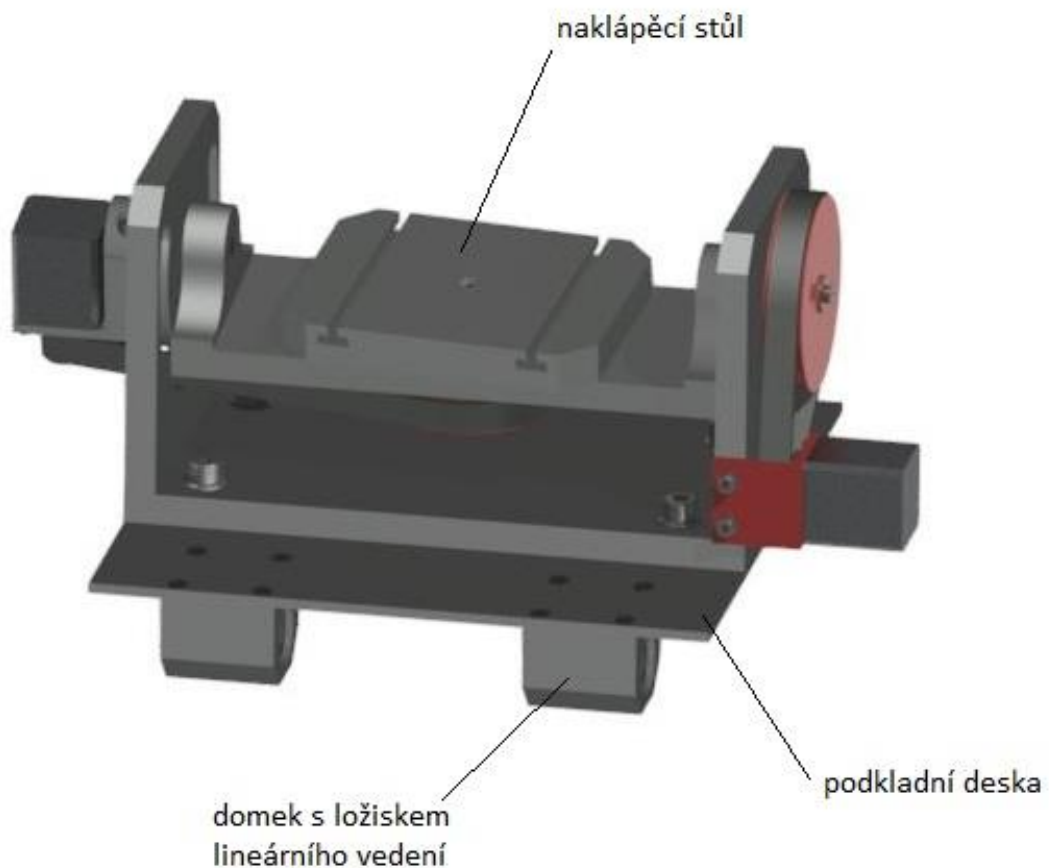


Obr. 22) Extruder s tryskou průměru 0,4 mm [27]

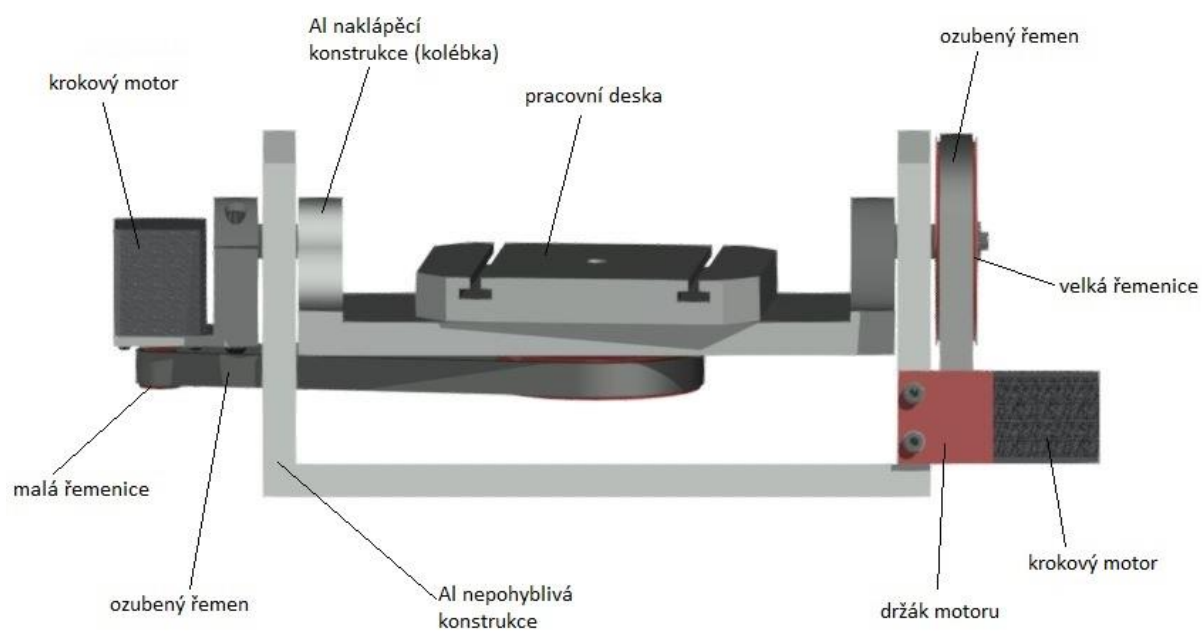
5.6 Nosná deska s přídatnými osami rotace

Při 3D tisku je nutno tvořit podpory, které se následně odstraní. Tyto podpory jsou odpad, prodražují výrobu modelu, a proto je vhodné využít nosné desky s přídatnou osou rotace obr. 23, která dokáže naklápěním a otáčením model umístit do takové polohy, ve které nebude nutno podpěry použít, případně jen v minimálním množství. Desku s přídatnými osami rotace lze použít také pro frézování.

Při konstrukci byly hlavní kritéria jednoduchost, přesnost a spolehlivost. Pro naklápění a otáčení nosné desky byly použity krokové motory s krouticím momentem 2,7 Nm. Nosná deska se skládá z podkladní desky, domků s ložisky lineárního vedení, domku s maticí pohybového šroubu a z naklápěcího stůlu obr. 24, který lze v případě potřeby demontovat a po jednoduchých úpravách tisknout pouze na podkladní desku. Přenos rotačního pohybu motorů na kolébku, případně pracovní desku je realizován pomocí ozubených řemenů, kdy řemenice jsou tištěné z ABS. Převodový poměr mezi řemenicemi je $i=0,16$, což zajišťuje přesné polohování modelu s malým krokem.



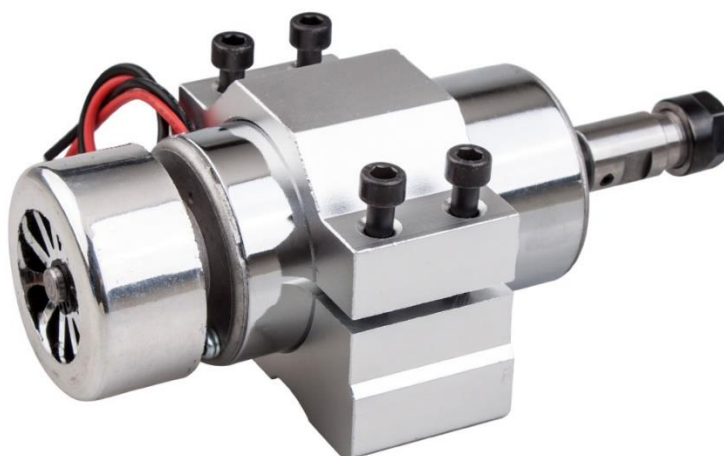
Obr. 23) Vizualizace a popis nosné desky s přídatnými osami rotace



Obr. 24) Vizualizace a popis naklápěcího a otočného stolu

5.7 Frézovací vřeteno

Vřeteno obr. 25 bylo použito z e-shopu Ebay. Maximální průměr stopky frézy činí 3,175 mm. Vřeteno má nastavitelné otáčky v rozsahu 3000-12000 ot/min. Výkon 300 W [28]. Svými parametry je vřeteno vhodné pro gravírování měkkých plastů.



Obr. 25) Frézovací vřeteno [28]

5.8 Výměna extruderu a upnutí frézovacího vřetena

Extruder, případně vřeteno, je upevněno na robustním posuvném portálu obr. 26, který se pohybuje v osách Y a Z. S portálem lze v ose Y pohybovat a umístit do vhodné výšky v závislosti na tom, jestli je použit naklápěcí stůl, nebo ne. Při konstrukci portálu byla brána v potaz hmotnost vřetena a možnost výměny vřetena za větší a výkonnější, čímž by se výrazně zvýšily schopnosti tohoto stroje. Díky použité konstrukci je maximální posuv v ose Z pouze 110 mm, což je u frézek hodnota dostačující, ale u 3D tiskáren se tato hodnota pohybuje kolem 200 mm v závislosti na velikosti stroje.

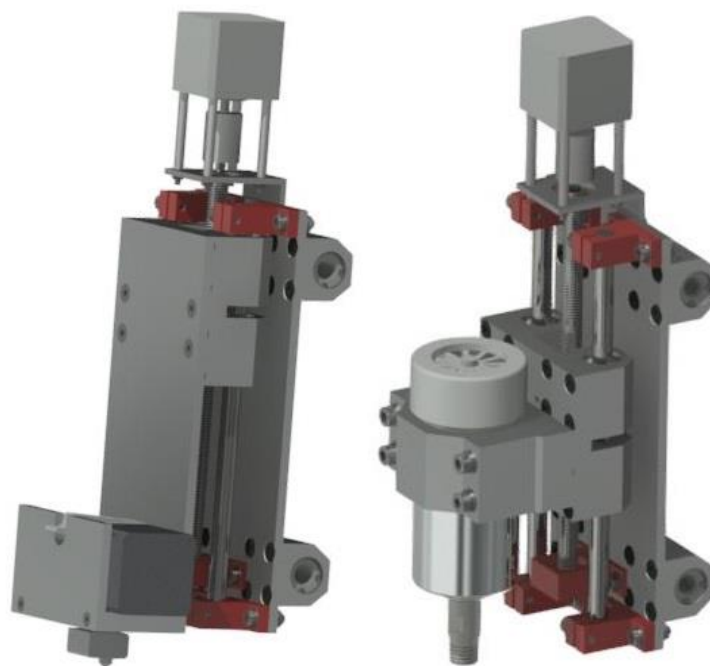
Extruder je uložen v držáku sestaveném z plochých hliníkových profilů obr. 27a, což zaručuje stabilní a pevné uložení. Výhoda tohoto konstrukčního řešení je rychlá demontáž a možnost úprav pro další vývoj.

Frézovací vřeteno je uloženo v hliníkové objímce obr. 27b, která se po utažení šroubů sevře a vřeteno zaaretuje. Objímka je metrickými šrouby upevněna k portálu.

Toto konstrukční řešení umožňuje rychlou výměnu extruderu za vřeteno a naopak. V dalším vývoji lze k portálu připevnit prakticky jakýkoliv nástroj, laser, atd.



Obr. 26) Posuvný portál



a) uložení extruderu b) uložení vřetena

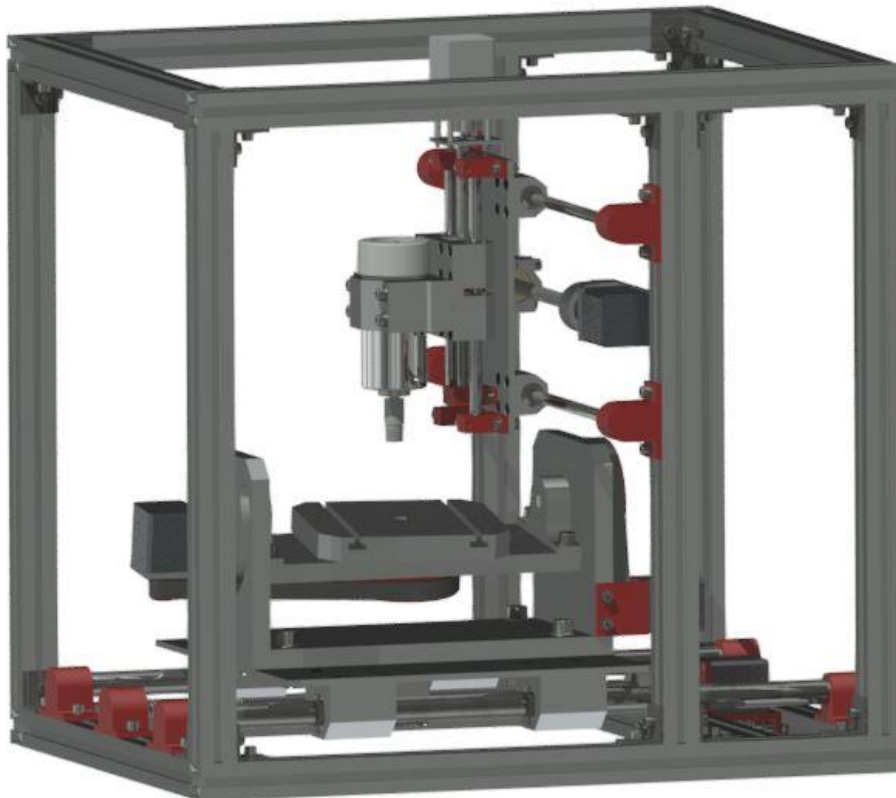
Obr. 27) Posuvný portál s extruderem a vřetenem

6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

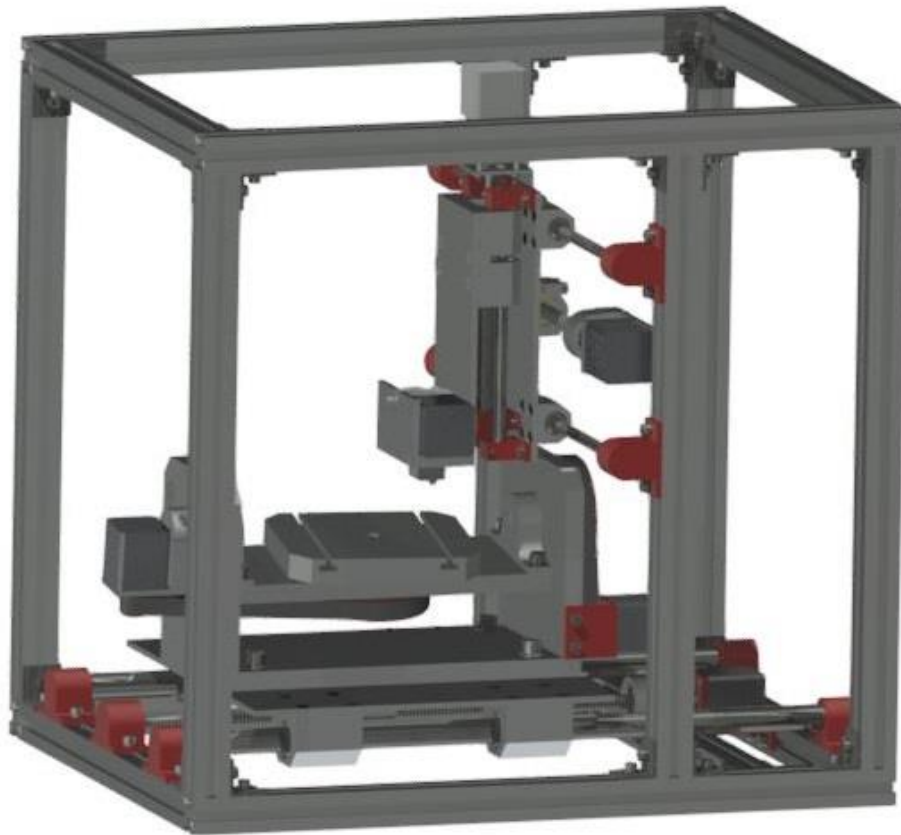
3D tiskárna s rozšířenou funkcionalitou má velký potenciál, protože lze na jednom stroji provádět různé operace (3D tisk, frézování, laser, atd.), což vytváří více možností pro konstruktéry, kteří mohou více a lépe testovat výsledný produkt. Tento typ strojů má ale také své nevýhody, zejména ve své univerzálnosti, což můžeme zpozorovat v kapitole 5.8, kde je řečeno, že maximální posuv v ose Z je 110 mm. Tato hodnota je plně dostačující pro frézování, ale pro 3D tisk by mohla být nedostačující a omezující. Obecně lze říci, že u víceúčelových strojů je nutno brát v potaz technologii, která bude rám a komponenty nejvíce namáhat a za tímto účelem stroj konstruovat.

Konstrukce 3D tiskárny v této bakalářské práci byla optimalizována hlavně pro frézování, které vyžaduje vyšší tuhost, pevnost rámu a uložení posuvných soustav. To by mohlo vést k přesnějšímu a kvalitnějšímu tisku i za cenu zmenšení prostoru pro tisk. Další přidaná hodnota je v možnosti naklápět a otáčet nosný stůl, což umožní tisknout ještě složitější tvary než doposud bez použití podpěr, případně s jejich minimálním množstvím. Vizualizace tiskárny s vřetenem obr. 28 a s extruderem obr. 29.

V dalším vývoji bude nutné zakrytí celého stroje včetně pohyblivých součástí tak, aby při frézování nedošlo k poškození ložisek, nebo matic na posuvném šroubu vlivem odletujících třísek. Rovněž by bylo vhodné upravit konstrukci portálu a vyměnit frézovací vřeteno za výkonnější, které by dokázalo plnohodnotně frézovat ve všech 5-ti osách.



Obr. 28) Vizualizace 3D tiskárny s frézovacím vřetenem



Obr. 29) Vizualizace 3D tiskárny s extruderem

7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla konstrukce 3D tiskárny s rozšířenou funkcionalitou. V první části je vysvětlen princip technologie Rapid prototyping včetně jeho nejpoužívanějších metod. V druhé části jsou popsány komponenty nezbytné pro stavbu a konstrukci 3D tiskárny. Na tuto část navazuje třetí část, kde je popsáno technické řešení 3D tiskárny včetně návrhu pohonů, vodících tyčí a konstrukčního řešení výměny hlavy a způsobu upnutí gravírovacího nástroje. Součástí návrhu je také 3D model v CAD systému včetně kompletní výkresové dokumentace. Dosažené parametry stroje jsou zobrazeny v tab. 3. Navržená tiskárna by při realizaci stála přibližně 19.505,-Kč. K ceně je nutno připočítat elektronické komponenty jako drivery atd.

Tab 3) Dosažené parametry 3D tiskárny s rozšířenou funkcionalitou

| Název parametru | Hodnota |
|-------------------------------|---------------------|
| Pracovní rozsah (x,y,z) | 230, 260, 110 mm |
| Rozměry rámu (x,y,z) | 585, 460, 560 mm |
| Hmotnost | 29 kg |
| Technologie tisku | FDM - jednotrysková |
| Průměr tiskové trysky | 0,4 mm |
| Průměr tiskové struny | 1,75 mm |
| Tisknutelný materiál | PLA, ABS |
| Výkon vřetene | 300 W |
| Otáčky vřetene | 3000-12000 ot/min |
| Maximální průměr stopky frézy | 3,175 mm |

Tab 4) Ekonomické zhodnocení 3D tiskárny

| Název položky | Cena |
|-------------------------------|-----------|
| Krokové motory | 1.700,-Kč |
| Trapézové šrouby včetně matic | 720,-Kč |
| Vodící tyče včetně ložisek | 2.130,-Kč |
| Rám | 1.830,-Kč |
| Hliníkové obráběné součásti | 7.250,-Kč |
| Tištěné součásti | 1.500,-Kč |
| Spojovací materiál | 350,-Kč |
| Vřeteno | 1.600,-Kč |
| Extruder | 975,-Kč |
| Pružné spojky | 100,-Kč |
| Ložiska | 450,-Kč |
| Řemeny | 300,-Kč |

| | |
|--------------------|-------------------|
| Řemenice | 600,-Kč |
| | |
| Cena celkem | 19.505,-Kč |

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [2] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl*. MMspektrum. [online]. 2008, č. 11 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [3] MerketBot. *MarketBot*. [online]. 2009-2016 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.makerbot.com/>
- [4] CHUA, Chee Kai. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, Svazek 1.: World Scientific, 2003. ISBN 9812381171.
- [5] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění 10. díl*. MMspektrum. [online]. 2008, č. 12 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [6] PLA. 3D-tisk.cz ADITIVNÍ VÝROBA A PROTYPING. [online]. 2014 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/pla/>
- [7] *Materiály pro 3D tisk*. FUTUR3D HUMAN AND TECHNOLOGY. [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>
- [8] ABS. 3D-tisk.cz ADITIVNÍ VÝROBA A PROTYPING. [online]. 2014 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/abs/>
- [9] *Mind-Boggling Spherical Gear Made from 3D-Printed Moving Parts*. GIZMODO. [online]. 12.6.2013 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://gizmodo.com/mind-boggling-spherical-gear-made-from-3d-printed-movin-1477318149>
- [10] *3D tiskárna Original Prusa i3 Plus (s LCD)*. PRUSA RESEARCH OFFICIAL JOSEF PRUSA SHOP. [online]. 2015 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/53-3d-tiskarna-original-prusa-i3-plus-s-lcd.html>
- [11] *Rám na 3D tiskárnu Průša i3*. jPrint3D . [online]. 2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.jprint3d.cz/e-shop/dily-reprap-prusa-i3/ram-na-3d-tiskarnu-prusa-i3-klasik-reprap-6mm-preklizka-frezovana?cookies=yes>
- [12] *Rozhovor: O českých 3D tiskárnách Poseidon a Neos, které staví na součástkách z vlastní výroby*. 3D-tisk.cz ADITIVNÍ VÝROBA A PROTYPING. [online]. 11.4.2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/rozhovor-o-ceskych-3d-tiskarnach-poseidon-a-neos-ktere-stavi-na-soucastkach-z-vlastni-vyroby/>
- [13] *Rám 3D tiskárny i3*. PRUSA RESEARCH OFFICIAL JOSEF PRUSA SHOP. [online]. 2015 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://shop.prusa3d.com/cs/dily-pro-3d-tiskarny/24-ram-3d-tiskarny-i3-galaxy-cerna.html?gclid=CjwKEAju3fG4BRDsn9GA7T2zEkSJACNjdjgLmctM-SXwJ-idxkMGMtrd-F6QCIrD8c9t_U4xEAPFhoCOUTw_wcB
- [14] *Lineární vedení*. matis industrial components. [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.matis.cz/cs/kategorie/linearni-vedeni>
- [15] *Lineární technika*. MIDOL. [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.midol.cz/linearni-technika>
- [16] *Lineární vedení*. HIWIN Motions Control and Systems. [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/valeckove-vedeni/39_rgw

- [17] *Ozubený řemen T5*. RepRap Obchod. [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://reppapobchod.cz/index.php?id_product=43&controller=product&id_lang=2
- [18] *Hříděle – trapézové šrouby*. VALENTA závitové tyče. [online]. 2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.valentazt.cz/hridele-s-trapezovym-zavitem.html?mobile=0&lang=1>
- [19] KNAPIL, J. *Konstrukce a výroba CNC frézky pro modelářské účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
- [20] *Princip – Krokový motor*. Pohonnatechnika. [online]. 2007-2016 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [21] *What's The Difference Between DC, Servo & Stepper Motors?*. MODMYPI. [online]. 25.8.2013 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.modmypi.com/blog/whats-the-difference-between-dc-servo-stepper-motors>
- [22] *Katalog produktů*. CNC shop. [online]. 2010 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://cncshop.cz/katalog>
- [23] *Category: Extruders*. RepRap. [online]. 7.9.2015 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://reppap.org/wiki/Category:Extruders>
- [24] *Vodící tyče a kuličková pouzdra*. 2009. Dostupné z: <http://www.teatechnik.cz/katalogy-stazeni/vodici-tyce-kulickova-pouzdra>
- [25] *typ FCS, samomazný plast*. matis industrial components. [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://www.matis.cz/data/pdf/trapezove_srouby/new2/TR_MATICE_PLAST_FCS_MPH_STR.54.pdf
- [26] *Pružná spojka*. LiPa-3D. [online]. 2016 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: http://lipa-3d.com/index.php?route=product/product&product_id=107
- [27] *MK8 Extruder*. AliExpress. [online]. 2010-2015 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.aliexpress.com/item/Upgrade-MK8-Extruder-Nozzle-1-75mm-Latest-Print-Head-for-3D-Printer-Makerbot-Prusa-i3-with/32504035053.html>
- [28] *DC12-48V 300W Engraving Machine Carving Grinding Spindle Motor & Mount Bracket*. ebay. [online]. 30.5.2015 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.ebay.com/itm/DC12-48V-300W-Engraving-Machine-Carving-Grinding-Spindle-Motor-Mount-Bracket-/160953993827>

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam zkratk a symbolů

| Zkratka | Jednotka | Popis |
|-----------------|------------------------|----------------------------------|
| RP | [-] | Rapid prototyping |
| NC | [-] | Numerical control |
| CAD | [-] | Computer aided design |
| *.stl | [-] | Stereolitography |
| SLA | [-] | Stereolitografie |
| SGC | [-] | Solid Ground Sintering |
| SLS | [-] | Selective Laser Sintering |
| DMLS | [-] | Direct Metal Laser Sintering |
| LOM | [-] | Laminated Object Manufacturing |
| FDM | [-] | Fused Deposition Modeling |
| MJM | [-] | Multi Jet Modeling |
| UV | [-] | Ultraviolet |
| CO ₂ | [-] | Oxid uhličitý |
| PLA | [-] | Polylactic acid |
| ABS | [-] | Akrylonitrilbutadienstyren |
| δ_1 | [mm] | Průhyb v místě působení zatížení |
| P | [kg] | Bodové zatížení |
| a | [mm] | Vzdálenost zatížení od vetknutí |
| EI | [kg.mm ⁻²] | Moment elasticity |
| l | [mm] | Délka tyče |
| Tr | [-] | Označení trapézového šroubu |
| M_k | [Nm] | Krouticí moment motoru |
| F | [N] | Axiální síla působící na matici |
| P_1 | [mm] | Stoupání závitu |
| η | [-] | Účinnost |

Seznam obrázků

- Obr. 1) Profesionální 3D tiskárna MakerBot Replicator [4]
- Obr. 2) Princip metody SLA [1]
- Obr. 3) Princip metody SLS [1]
- Obr. 4) Princip metody LOM [1]
- Obr. 5) Princip metody MJM [1]
- Obr. 6) Princip metody FDM [1]
- Obr. 7) Pohyblivá soustava vytištěná metodou FDM [9]
- Obr. 8) 3D tiskárna Original Prusa i3 Plus [10]
- Obr. 9) Rám z překližky na 3D tiskárnu Průša i3 [11]
- Obr. 10) Rám 3D tiskárny Poseidon DUO tvořen Al profily [12]
- Obr. 11) Rám z frézovaného duralu pro 3D tiskárnu Prusa i3 [13]
- Obr. 12) Sestava vodící tyče a kuličkového pouzdra v linearsetu [15]
- Obr. 13) Lineární vedení HIWIN [16]
- Obr. 14) Ozubený řemen [17]
- Obr. 15) Hřídele s trapézovým závitem a bronzovými maticemi od firmy Valenta [18]
- Obr. 16) Možnosti pohonů [22]
- Obr. 17) Schéma a popis extruderu [23]
- Obr. 18) Vizualizace rámu
- Obr. 19) Schéma uložení a zatížení vodící tyče [24]
- Obr. 20) Uložení trapézové závitové tyče
- Obr. 21) Uložení krokového motoru k rámu včetně spojení se závitovou tyčí
- Obr. 22) Extruder s tryskou průměru 0,4 mm [27]
- Obr. 23) Vizualizace a popis nosné desky s přídatnými osami rotace
- Obr. 24) Vizualizace a popis naklápěcího a otočného stolu
- Obr. 25) Frézovací vřeteno [28]
- Obr. 26) Posuvný portál

Obr. 27) Posuvný portál s extruderem a vřetenem

Obr. 28) Vizualizace 3D tiskárny s frézovacím vřetenem

Obr. 29) Vizualizace 3D tiskárny s extruderem

Seznam tabulek

Tab 1) Historický vývoj RP a souvisejících technologií

Tab 2) Porovnání technologií rapid prototyping [1]

Tab 3) Dosažené parametry 3D tiskárny s rozšířenou funkcionalitou

Tab 4) Ekonomické zhodnocení 3D tiskárny

10 SEZNAM PŘÍLOH

CD s elektronickou verzí práce včetně výkresové dokumentace.

Výkresová dokumentace