



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODIFIKACE LINEÁRNÍHO VEDENÍ 3D FDM TISKÁRNY PRUSA MINI

MODIFICATION OF THE LINEAR GUIDE OF THE 3D FDM PRINTER PRUSA MINI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Šiška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Radek Šiška**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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:

Modifikace lineárního vedení 3D FDM tiskárny Prusa mini

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor provede rešerši zaměřenou na 3D FDM tisk a používané lineární vedení na jednotlivých řízených osách. Vytypuje u zvolené 3D tiskárny možná slabá místa a navrhne vhodné konstrukční změny. Navržené zařízení vyrobí a otestuje. V závěru pak provede zhodnocení jak z technického, tak ekonomického hlediska vůči původní variantě.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše problematiky 3D FDM tisku se zaměřením na zvolenou tiskárnu
- vytypování nedostatků stávajícího a návrh nového řešení lineárního vedení
- výroba inovované varianty 3D tiskárny
- technicko-ekonomické vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

FOŘT, Petr a KLETEČKA, Jaroslav. Autodesk Inventor: funkční navrhování v průmyslové praxi. 2., aktualiz. vyd. Učebnice (Computer Press). Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien; WYSK, Richard A. a WANG, Hsu-Pin. Computer-aided manufacturing. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2006. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, Chee Kai; LEONG, Kah Fai a LIM, Chu Sing. Rapid prototyping: principles and applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, 2010. ISBN 978-981-277-897-0.

BILÍK, Oldřich a VRABEC, Martin. Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0034-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem modifikace lineárního vedení pro FDM 3D tiskárnu Průša Mini. Práce obsahuje rešerši o 3D tisku s hlavním zaměřením na typ FDM, s popisem používaných materiálů, jednotlivých konstrukcí 3D tiskáren a jejich modifikací se zaměřením na modifikaci lineárního vedení. V praktické části byla navržena modifikace tiskárny Průša Mini pro použití lineárního vedení v podobě kolejnic a vozíků. Pro zvolenou tiskárnu byl navržen dodatečný díl spoje pro zvýšení stability osy Z s osou X. Kvalita tisku navržené modifikace byla porovnána s výtisky tisknutými na původní verzi tiskárny. Na závěr bylo provedeno technickoekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

3D tisk, 3D tiskárna, metoda FDM, aditivní technologie, modifikace, lineární vedení

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the design of a linear guide modification for FDM 3D printer Prusa Mini. The thesis includes a literature review on 3D printing, with a primary focus on the FDM type, describing the commonly used materials, types of FDM 3D printers, and their modifications, with emphasis on the modification of linear guidance systems. In the practical part, a modification of the Prusa Mini printer was designed to use a linear guidance system in the form of rails and carriages. An additional brace component was designed for the selected printer to increase the stability of the Z and X axis. The print quality of the proposed modification was compared to prints made with the original version of the printer. Finally, a technical and economic evaluation was carried out.

Keywords

3D printing, 3D printer, FDM method, additive technology, modification, linear guide

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠIŠKA, Radek. *Modifikace lineárního vedení 3D FDM tiskárny Prusa mini*. Online, bakalářská práce. Oskar ZEMČÍK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162357>.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Modifikace lineárního vedení 3D FDM tiskárny Prusa mini vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Radek Šiška

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčikovi, Ph.D. za trpělivost, cenné rady a připomínky, které mi poskytl během vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu během studia.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	11
2.1 Technologie 3D tisku	11
2.2 Technologie FDM	15
2.2.1 Komponenty FDM tiskáren	16
2.2.2 Typy konstrukcí FDM tiskáren.....	19
2.2.3 Používané tiskové materiály	22
2.3 Modifikace FDM tiskáren	24
2.3.1 Modifikace lineárního vedení	25
3 PRAKTICKÁ ČÁST	26
3.1 Vytipování nedostatků 3D tiskárny	27
3.2 Návrh řešení nedostatků 3D tiskárny	28
3.3 Navržená modifikace.....	29
3.3.1 Úpravy sestavy osy X a pojezdu osy Z.....	30
3.3.2 Úpravy sestavy osy Y	31
3.3.3 Dodatečný spoj tiskárny	32
3.4 Výroba navržené modifikace.....	32
3.5 Testování upravené tiskárny.....	36
3.6 Porovnání kvality tisku na testovacích výtiscích.....	37
3.6.1 3Dbenchy	38
3.6.2 Tenkostěnný kvádr	38
3.6.3 Výtisk testující přesnost tiskárny.....	40
3.7 Testování tuhosti volného konce ramena osy X.....	41
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	43
ZÁVĚR.....	45

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

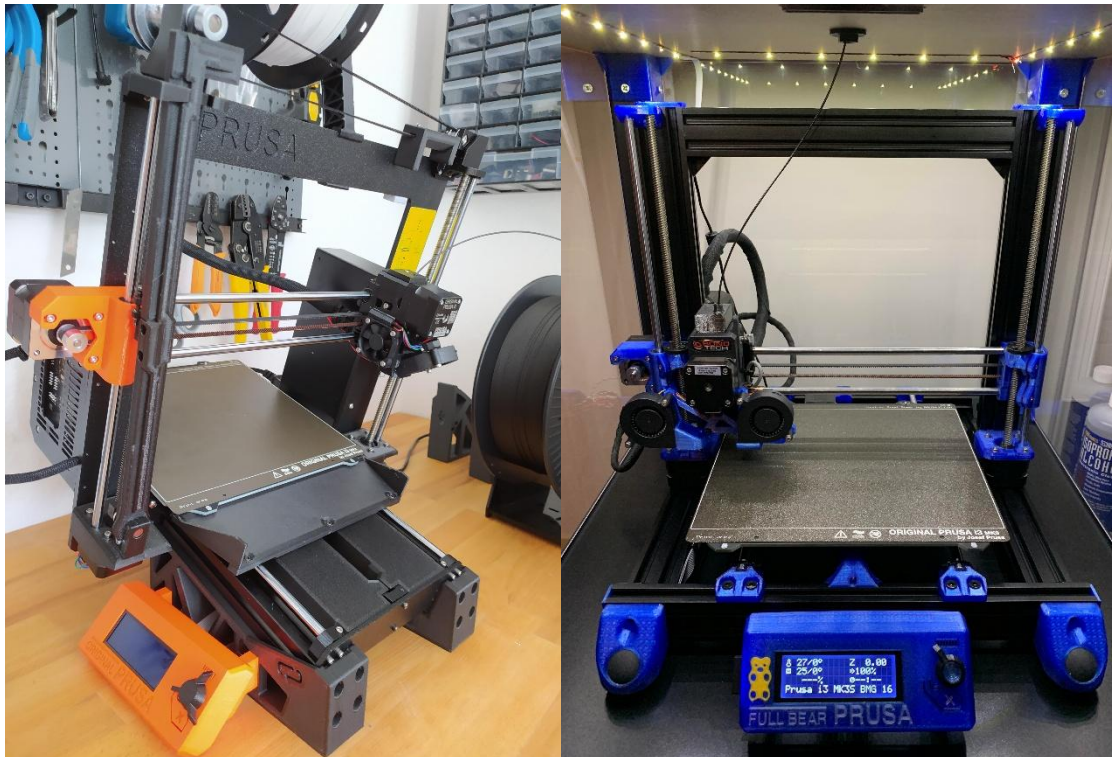
Seznam výkresů

ÚVOD

3D tisk je revoluční aditivní technologií vytváření fyzických objektů vrstvu po vrstvě na základě digitálních modelů. Tato metoda rapid prototyping, neboli rychlého prototypování, přináší zcela nový rozměr vývoje produktů a designu. Pro tuto oblast přináší velkou úlevu z hlediska úspor na výrobu prototypů a nástrojů, které by musely být dělané speciálně a na zakázku. Své uplatnění nachází nejen ve vývoji nových produktů, ale také v průmyslu, stavebnictví, zdravotnictví, gastronomii, výrobě náhradních dílů a mnoha dalších. [1; 2]

Aditivní technologie, které tvoří základ 3D tisku, fungují na principu postupného přidávání materiálu, nejčastěji ve formě drátu, sypkého materiálu (prášku), nebo kapaliny, vrstvu po vrstvě, aby vytvořily požadovaný objekt. Existuje několik typů 3D tisku. Mezi nejrozšířenější lze zařadit například Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS) a Electron Beam Melting (EBM). Každý z těchto typů má své vlastní výhody a vhodnost pro různé aplikace a materiály. [1; 2]

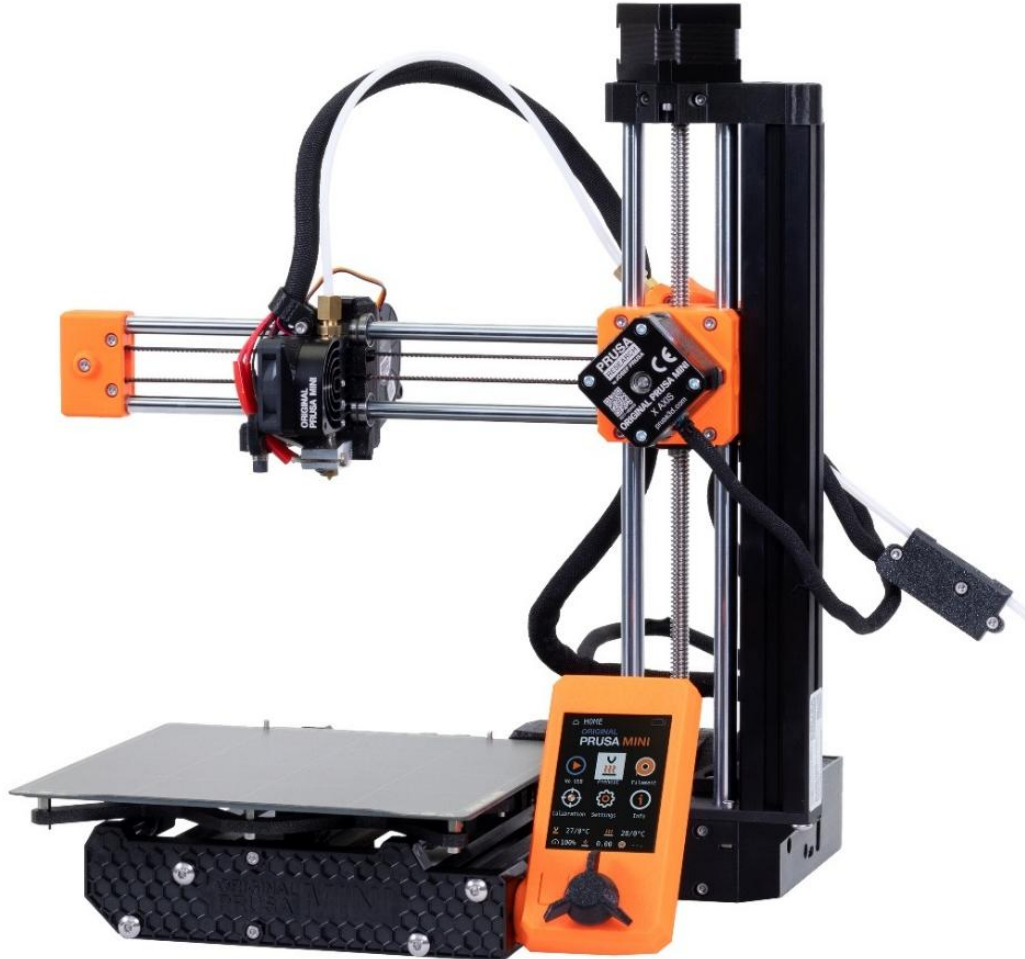
Nejrozšířenější a nejdostupnější je technologie FDM, která v posledních deseti letech zaznamenává obrovský růst zejména na poli domácích uživatelů díky své nízké pořizovací ceně a spoustě dostupným výukovým materiálům na internetu. Díky své dostupnosti a široké základně uživatelů se v poslední době posouvá výrazně kupředu a nabízí čím dál lepší kvalitu tištěných dílů, kratší dobu tisku, jednoduché používání a menší míru poškozených výtisků. Velkému pokroku také vděčí konkurenčnímu boji výrobců 3D tiskáren. Ti přichází s konstrukčními řešeními, která mají vliv zejména na výslednou kvalitu tisku a cenu 3D tiskárny. Jejich nedostatky bývají řešeny uživatelskými modifikacemi pro zlepšení kvality tisku, zvýšení její rychlosti, rozšíření spektra tisknutelných materiálů, zlepšení spolehlivosti nebo přizpůsobení tiskárny svým specifickým potřebám. Příklad uživateli navržených modifikací FDM 3D tiskáren lze vidět na obr. 1.



Obr. 1 Uživatelské modifikace FDM 3D Tiskárny Prusa MK3 [3; 4]

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem této bakalářské práce je navrhnout, vyrobit, otestovat a technicko-ekonomicky zhodnotit modifikaci lineárního vedení FDM 3D tiskárny Průša Mini (obr.2). Upravená verze bude srovnána s původní, přičemž budou provedeny testy na vzorových výtiscích.



Obr. 2 3D tiskárna Průša Mini [5]

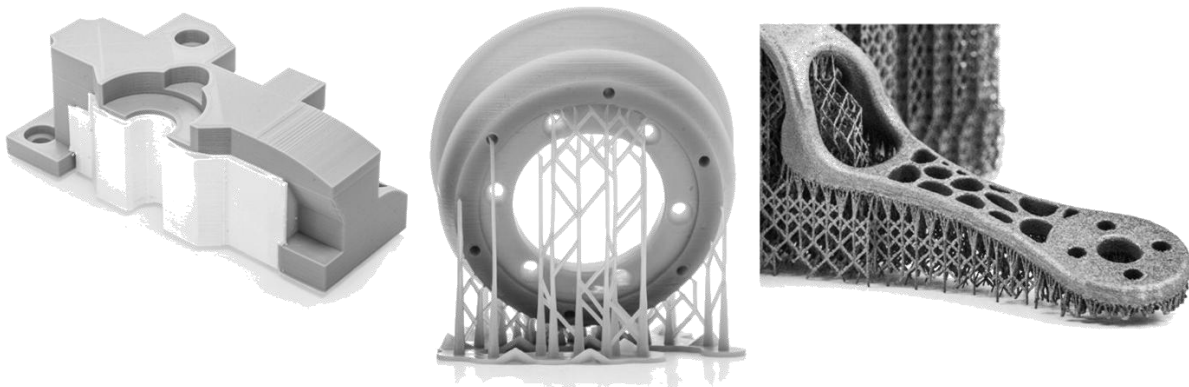
Obsahem této bakalářské práce bude rešerše na téma 3D tisku, s hlavním zaměřením na technologii FDM, přičemž bude obsahovat popis jednotlivých typů FDM tiskáren a nejpoužívanějších tiskových materiálů. Dále budou rozebrána témata spojená s modifikací 3D tiskáren za účelem řešení jejich nedostatků.

Hlavní část bude zaměřena na modifikaci FDM 3D tiskárny Průša Mini a bude obsahovat:

- Vytipování jejích slabých míst
- Návrh upravené FDM 3D Tiskárny řešící její nedostatky
- Výrobu navržené modifikace
- Porovnání kvality tisku s původní verzí na testovacích výtiscích
- Technicko-ekonomické zhodnocení

2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

3D tisk je proces, při kterém se vytváří fyzický model z digitální předlohy. Požadovaného tvaru je dosaženo postupným přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě. Jedná se tedy o opačný postup než u běžných subtraktivních technologií, kde k výrobě požadovaného dílu dochází postupným odebráním materiálu. Oproti nim u aditivních technologií dochází k minimální tvorbě odpadu, který ve většině případů tvoří materiál k tvorbě podpěr (obr. č. 3), které slouží jako pomocná konstrukce, bez které by se požadovaný tvar nevyrobil. [1]



Obr.3 3D tiskové podpěry technologií FDM, SLA a SLM [6]

Zpočátku se 3D tisk označoval pod anglickým názvem Rapid Prototyping (rychlá prototypová výroba) z důvodu použití zejména k výrobě prototypů, které tato technologie na rozdíl od subtraktivních technologií dokáže vyrobit v krátkém čase za minimální náklady.[1]

Další oblastí uplatnění 3D tisku je takzvaný Rapid Tooling (rychlá výroba nástrojů). Rapid Tooling se zabývá oblastí, kde výrobek bude sloužit jako nástroj pro další technologie výroby k výrobě nástrojů, forem, nebo přípravků v automobilu. Tato oblast je v dnešní době úzce spojována především s využitím konformního chlazení, které právě díky 3D tisku lze umístit v blízkosti ploch, které chceme chladit, a které bychom pomocí běžných technologií nevyrobili. [1; 2]

V případě, kde je výtisk již hotový výrobek, se jedná o Rapid Manufacturing. 3D tisk umožňuje rychlou a cenově efektivní výrobu finálních dílů přímo z digitálních modelů. Díky flexibilitě 3D tisku lze snadno vytvářet tvarově složité výrobky jak v kusové, tak i sériové výrobě, kde oproti vstříkování plastů lze bez problému změnit tvar požadovaného výrobku, případně bez časové ztráty přejít z výroby jednoho dílu na druhý. [2]

3D tisk byl zpočátku spíše rozšíření možných technologií výroby, ale v průběhu let se sám stal samostatnou, nenahraditelnou výrobní technologií. Své uplatnění nachází nejen v mnoha oborech, ale také jako učební pomůcka.

2.1 Technologie 3D tisku

Všechny technologie 3D tisku jsou založeny na stejném principu, který spočívá v postupném nanášení vrstev na sebe. V současné době neexistuje technologie 3D tisku která by byla univerzální a vhodná pro všechny použití. Každá má své specifické vlastnosti a použití. Nejznámější technologie je možné rozdělit do tří kategorií podle toho, jakou podobu má tiskový materiál, a jakým způsobem je zpracováván [2]:

- Materiál, nejčastěji v podobě tiskové struny je extrudovaný (vytlačovaný) tiskovou hlavou skrz rozehrátou trysku. Příkladem je technologie FDM (fused deposition modeling), známá také pod zkratkou FFF (fused filament fabrication). [2]

- Tekutý materiál je vytvářen v rámci vrstvy na definovaných oblastech. Mezi nejrozšířenější zástupce této technologie patří SLA (Stereolitografie), DLP (digital light processing) a MSLA (Mask stereolitography). Materiál je vytvářen světelným paprskem (UV laser, DLP projektor, nebo LCD displej). [2]
- Materiál v podobě jemného prášku je sinterován (spékán) laserem. Mezi představitele této technologie patří SLS (Selective laser sintering), laser powder bed fusion (LBPF) a EBM (electron beam melting). [2]

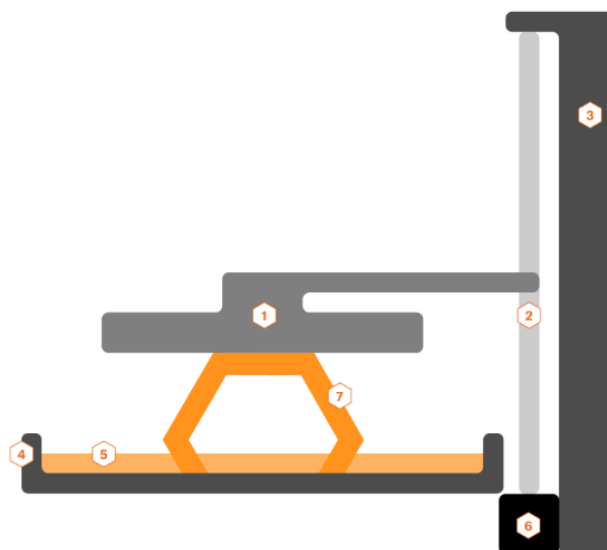
Technologie FDM

Jedná se o nejrozšířenější a nejdostupnější technologii 3D tisku. Je vhodná pro tisk funkčních modelů a prototypů. Stavebním materiálem je primárně roztavený plast. Ten je postupně nanášen na sebe vrstvu po vrstvě. Tiskovým materiálem je tisková struna (filament) nejčastěji o průměru 1,75 mm, který nahradil dříve více používaný filament o průměru 2,85 mm z důvodu větší přesnosti dávkování. Oproti pryskyřici či jemnému prášku, které se využívají v dalších technologiích, je práce s filamentem jednoduchá a bezpečná. Na výtiscích této technologie jsou patrné tiskové vrstvy, které lze upravit a udělat méně viditelnými dalším zpracováním výtisku, během jeho postprocesu. Jejich výška se při použití nejběžnější trysky o průměru 0,4 mm pohybuje přibližně v rozsahu od 0,05 mm do 0,3 mm. [2]

Tato technologie vzhledem k zaměření bakalářské práce bude hlouběji popsána v následující kapitole.

Technologie SLA, DLP a MSLA

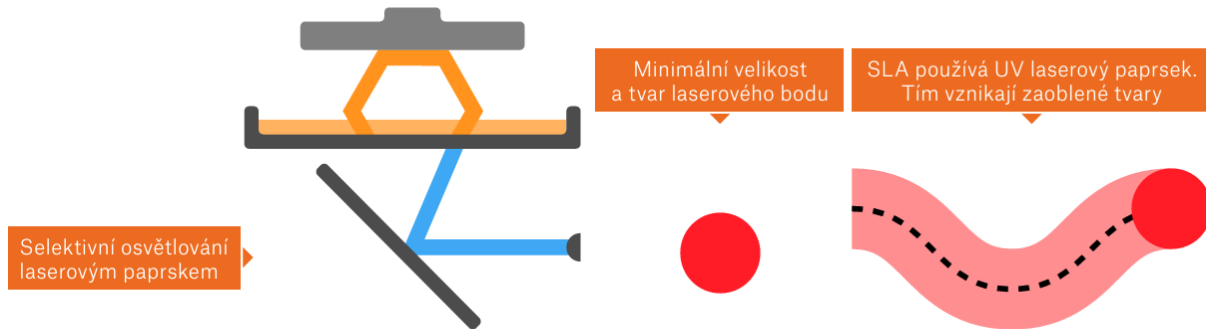
Jsou založeny na principu vytváření světlocitlivé pryskyřice, přesněji fotopolymeru, nebo také resinu pomocí světla. Schéma konstrukce fotopolymerové tiskárny je vyobrazeno na obrázku č. 4. Jediným rozdílem u těchto technologií je způsob osvětlení vrstvy tisku. Podložka se při každé vrstvě posune a proběhne vytváření fotopolymeru na požadovaných místech. Tisk je v porovnání s technologií FDM detailnější, ale zpravidla trvá déle a tisková plocha je menší. Fotopolymerové tiskárny si najdou uplatnění především v medicíně a šperkařství. Tisk je takřka ideálně hladký, detailní a nejsou na něm tak patrné vrstvy materiálu. Nevýhodou této technologie může být menší tisková plocha fotopolymerových tiskáren oproti běžným FDM tiskárnám, a především toxicita pryskyřice. Při práci s Fotopolymerovými tiskárnami je potřeba se vyvarovat kontaktu pryskyřice s pokožkou a dýchání výparů během tisku. [2; 8]



1-Tisková plocha 2-Trapézová tyč 3-Osa Z 4-Vanička 5-Fotopolymer
6-Krokový motor 7-Tištěný objekt

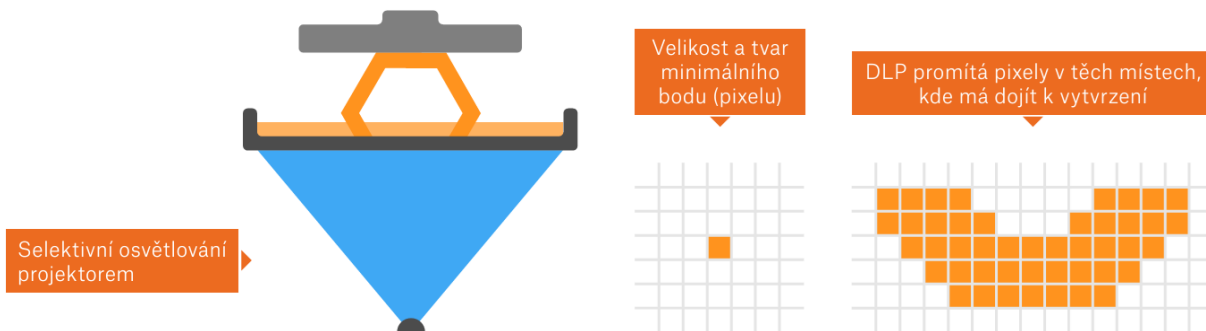
Obr. 4 Schéma konstrukce fotopolymerové tiskárny během tisku [2]

V případě technologie SLA probíhá osvit pomocí UV laserového paprsku (obr. 5), kdy je paprsek směřován zrcadlem na tiskovou plochu a postupně vykresluje tiskovou vrstvu. Doba tisku jedné vrstvy je závislá na ploše, která se v dané vrstvě vytvrzuje. [2]



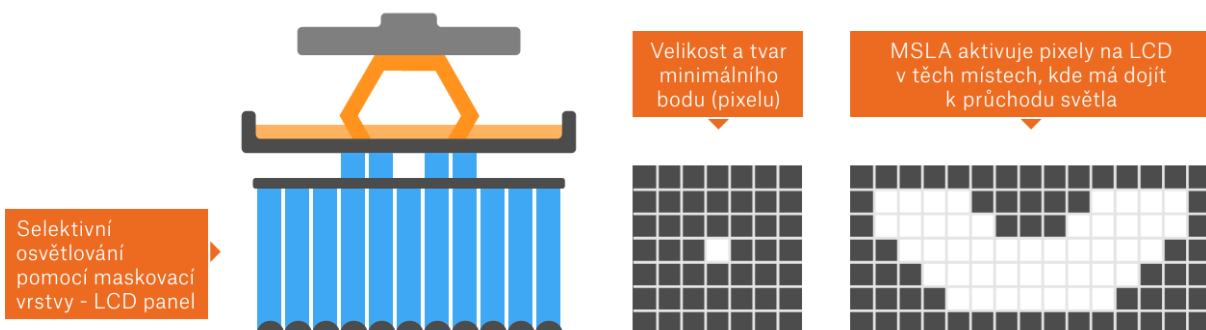
Obr.5 Princip osvětlení technologie SLA [2]

U technologie DLP (obr.6) probíhá osvit celé tiskové vrstvy najednou pomocí digitálního projektoru. V místech osvitů dochází k vytvrzení. Výhodou této technologie je nezávislost doby tisku jedné vrstvy na počtu tištěných objektů a jejich ploše v dané vrstvě. Tiskový čas jedné vrstvy je u této technologie fixní. Doba tisku více objektů tak trvá stejně dlouho, jako objektu jednoho. [2]



Obr.6 Princip technologie DLP [2]

Poslední z dominujících technologií fotopolymerních tiskáren je MSLA, u které probíhá osvit pomocí UV LED světla, které stíní zhasnuté body LCD displeje (obr.7). K vytvrzení dojde jen v místech, kde UV světlo projde jeho aktivovanými pixely. Kvalita jedné vrstvy je tak dána jeho rozlišením. Stejně jako u předchozí zmíněné technologie, je i u této čas jedné vrstvy fixní, a tak u ní také nezáleží doba tisku na zaplnění tiskové plochy, ale na počtu vrstev. [2]

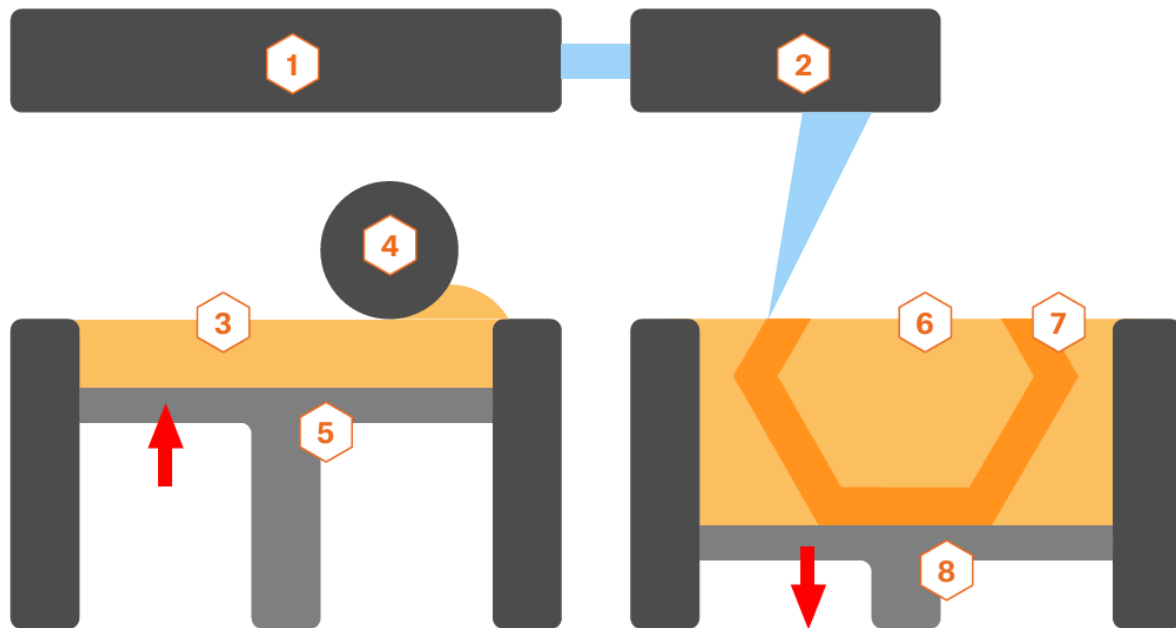


Obr.7 Schéma principu technologie MSLA [2]

Technologie SLS a DMLS

Mezi další technologie 3D tisku patří SLS a DMLS. Obě pracují na stejném principu. Během tisku nové vrstvy vždy válec nanese vrstvu jemného prášku a ten se laserem sinteruje (spéká) v místech, která mají být součástí konečného výtisku (obr. 8). Tisk končí tak, že je celý model

zasypaný v tiskovém materiálu. Proto je třeba při tvorbě dutého modelu vytvořit otvory umožňující vysypání nevytvrzeného materiálu, který lze použít při dalším tisku. Odpad tiskového materiálu je u této technologie minimální. Výhodou je málo výrazné vrstvení materiálu a vysoká rozměrová přesnost výtisků. Díly vyrobené těmito technologiemi mají výborné mechanické vlastnosti srovnatelné s díly vyrobenými technologií vstřikování plastů, případně obráběnými součástmi. SLS a DMLS tiskárny jsou na rozdíl od 3D tiskáren předchozích zmíněných technologií mnohem více finančně nákladné. Jejich cena se pohybuje v řádech statisíců korun českých, a tak se s nimi lze setkat převážně v průmyslových podnicích. [2; 8]



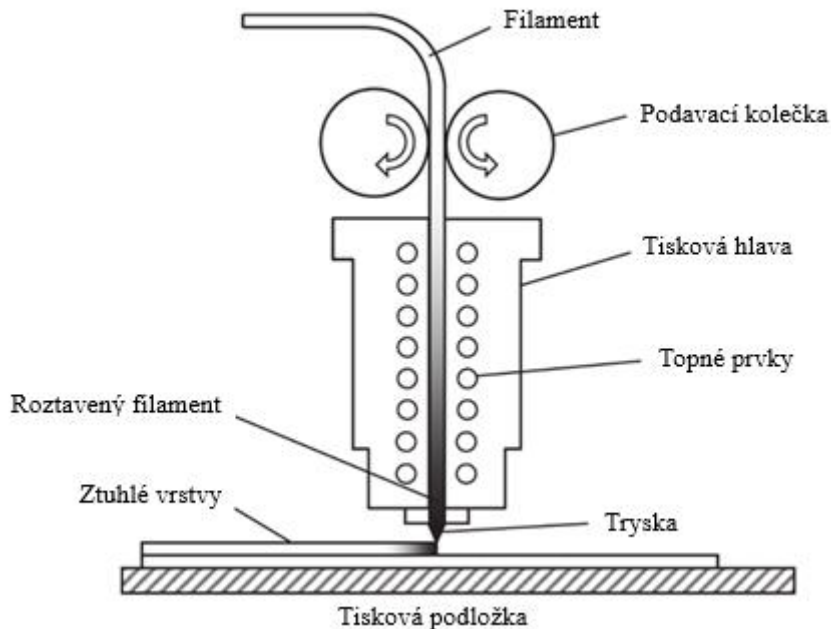
Obr.8 Schéma principu 3D tiskáren technologií SLS a DMLS [2]

V případě technologie SLS lze tisknout z termoplastů. Nejpoužívanější tiskový materiál je nylon, konkrétně PA6 a PA12. Novinkou technologie SLS je možný tisk součástí z kovů, které je ale potřeba dále zpracovávat. Tato technologie se nazývá Cold Metal Fusion, známá také pod zkratkou CMF. SLS tiskárna vytiskne objekt z prášku, který je tvořen ze směsi prášku kovu a plastu. Díl drží pohromadě díky slinutí plastové složky směsi prášku. Díly vyrobené touto technologií je potřeba dále spékat v sintrovacích pecích, kde všechny plast obsažený ve výtisku shoří a jeho kovová složka díky procesu sintrování sline v jeden celek. [2; 8; 9]

Technologie přímého laserového spékání kovů (DMLS, z anglického názvu direct metal laser sintering) je metoda 3D tisku, která vytváří kovové díly spékáním jemného kovového prášku pomocí vysoce výkonného laseru. Na rozdíl od 3D tisku kovů pomocí technologie SLS, výtisky vyrobené pomocí této technologie není potřeba díky vyhřivanému tiskovému prostoru dále sintrovat. Tento proces umožňuje výrobu složitých a přesných kovových komponent bez potřeby tradičních forem nebo nástrojů. DMLS nachází uplatnění v různých průmyslových odvětvích, jako je letectví, automobilový průmysl a medicína, zejména díky schopnosti rychle produkovat funkční kovové díly s vysokou pevností a přesností. [2; 8]

2.2 Technologie FDM

Spočívá v extrudování materiálu nejčastěji v podobě tiskové struny (filamentu), případně pelet tiskovou hlavou 3D tiskárny, která nanáší extrudovaný materiál na sebe vrstvu po vrstvě (obr. 9). První vrstva je nanášena na tiskovou plochu 3D tiskárny, která bývá často vyhřívána pro lepší přilnavost materiálu. Zároveň slouží jako prevence proti smrštění vrstev vlivem ochlazení extrudovaného materiálu. [1; 2; 7]



Obr. 9 Schéma technologie FDM [10]

Ve strojírenství je nejrozšířenější typ tiskárny tisknoucí z termoplastů, případně kompozitních materiálů. Existují také FDM tiskárny, které jsou přizpůsobeny tisku jiných materiálů, než je termoplast. Příkladem může být 3D tisk betonu, 3D tisk v potravinářství, například v cukrářství, a také bio 3D tisk, který také spadá pod metodu FDM, díky extrudování materiálu a nanášení tryskou na její tiskovou plochu. [2; 8]

U tiskáren tisknoucích z termoplastů je materiál nejčastěji v podobě filamentu protlačován nahřátou tryskou, jejíž teplota se liší v závislosti na tisknutém materiálu. Zpravidla tisk odolnějších materiálů bývá obtížnější, zároveň probíhá za vyšších teplot. Ty se pohybují zhruba od 190 °C do 270 °C. Vyhřívání tiskové podložky se od jejího uvedení na trh stala zavedeným standardem. Důvodem, proč je vyhřívána je udržení teploty prvních vrstev filamentu v co největším kontaktu s podložkou, zároveň zamezuje kroucení. Její teploty se pohybují v rozmezí od 50 °C do 110 °C. V případě potřeby ji lze také vypnout. [2;8]

Tiskový materiál nemusí být jen v podobě filamentu, ale může být také v podobě pelet. Výhodou a důvodem, proč je častěji používán filament je jeho snadné a přesné dávkování a možnost zpětného chodu, který zmenší tlak v trysce. Materiál tak během přejíždění nad objektem v průběhu tisku neuniká a nenarušuje kvalitu tisknutého objektu. Pelety bývají používány u větších tiskáren, kde není potřeba zvýšených nároků na přesnost a kvalitu tisku. Také mohou snížit náklady tisku, vzhledem k nižší ceně oproti filamentu. [2]

Moderní tiskárny často bývají zakrytované pro zmenšení úniku tepla a zamezení kroucení tiskových vrstev během tisku obtížněji tisknutelných materiálů. Zároveň bývají často vyhřívány pro udržení konstantní teploty pro bezproblémový tisk daného materiálu. Dále zamezují šíření škodlivých látek do vzduchu během tisku například materiálu ASA, jehož výpary jsou zdraví škodlivé. [2]

2.2.1 Komponenty FDM tiskáren

Mezi klíčové komponenty tohoto typu 3D tiskáren patří rám, který zajišťuje stabilitu konstrukce, extruder a tisková hlava pro dávkování a nanášení materiálu, tisková podložka, na které vzniká výsledný objekt, a pohonné systémy (motory, které pohybují pohyblivými částmi pomocí řemenů, nebo trapézových tyčí) umožňující přesný pohyb ve všech osách. Důležitou roli hrají také elektronické součásti, jako je řídicí deska, senzory a napájecí zdroj, které společně řídí chod tiskárny. Každá z těchto částí musí být přesně sladěna, aby tisk probíhal hladce a výsledný výrobek odpovídal zadaným parametrům.

Rám

Tvoří základní nosnou konstrukci 3D tiskárny. Jeho tuhost a přesnost zpracování určují, jak efektivně dokáže tiskárna odolávat vibracím a mechanickým silám vznikajícím během tisku. Kvalitní rám, vyrobený z robustních materiálů, jako je hliník nebo ocel, minimalizuje deformace a zajišťuje konzistentní polohování pohyblivých částí 3D tiskárny. Díky tomu lze dosáhnout nejen vyšší rychlosti tisku, ale i přesnějších detailů a lepší kvality povrchu výsledných objektů. Naopak nedostatečně pevný rám může způsobit nepřesnosti, artefakty na tištěném modelu a celkově nižší spolehlivost tiskárny. Rámy domácích FDM tiskáren jsou vidět na obr. 10. [2; 7]



Obr. 10 Rámy FDM 3D tiskáren Průša MK3 a Bambu Lab X1C [2; 11]

Extruder

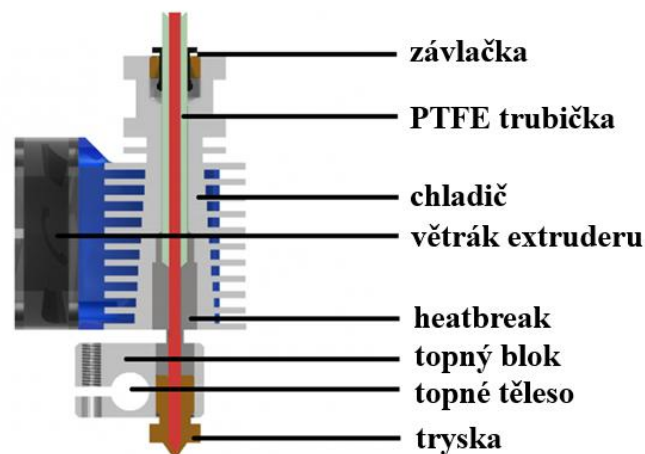
Známý také jako osa E. Je klíčovou součástí 3D tiskárny, která zajišťuje podávání filamentu do tiskové hlavy. Funguje na principu pohonu motorem, který pohání systém ozubených koleček, která uchopí filament a přesně jej posouvají až do trysky. Extruder musí pracovat velmi přesně, a to dodávat správné množství filamentu při odpovídající rychlosti, aby byl zajištěn hladký průběh tisku a výsledný model odpovídal požadované kvalitě. Rozlišujeme dva hlavní typy extruderů: [7; 12]

- Extrudery se systémem přímého podávání filamentu jsou přímo připojené k tiskové hlavě. To znamená, že filament po opuštění extruderu okamžitě vstupuje do hotendu, kde se roztaví a následně je vytlačován tryskou. Tento typ podávání materiálu je velmi přesný a dobře si poradí i s pružnými filamenti, jako je TPU. Nevýhodou je však vyšší hmotnost a objem, které přidávají na pohyblivou osu tiskárny, což může ovlivnit rychlost a stabilitu pohybu. [12; 13]

- Extrudery s nepřímým podáváním jsou od hotendu odděleny a propojeny dutou flexibilní trubicí, známou jako Bowdenová trubice. Filament je po opuštění extruderu veden touto trubicí až k hotendu. Tento systém snižuje váhu a zátěž na pohyblivou část tiskárny, což umožňuje rychlejší a plynulejší pohyby. Na druhou stranu jsou Bowden extrudery méně přesné, zejména při práci s pružnými filamenti, a mohou být náchylnější k problémům, jako je zaseknutí filamentu. Nižší přesnost vzniká v důsledku mezi Bowdenovou trubicí a filamentem, proto tiskárny s tímto systémem potřebují delší vzdálenosti retrakce (zpětný pohyb materiálu) pro zmenšení tlaku v trysce. [12; 13]

Tisková hlava

Slouží jak k tavení, tak i chlazení tiskového materiálu a nanášení jednotlivých tiskových vrstev. Tiskový materiál jí prochází nejdříve přes chladič, který má za cíl odvést teplo, které se šíří přes heat break a co nejvíce zmenšit oblast mezi pevným a roztaveným filamentem. Pro vyšší účinnost na něm v téměř všech případech bývá namontován ventilátor. Heat break slouží jako tepelný izolátor, který je mezi hotendem, takzvaným horkým koncem a chladičem pro co nejmenší přenos tepla mezi nimi. K tavení dochází v poslední její části, takzvaném hotendu, česky horkém konci. Ten se skládá z topného bloku, který bývá nejčastěji z hliníku, protože dobře vede teplo. V něm je umístěné tepelné těleso a termistor pro řízení teploty tavení materiálu. Na jeho úrovni je již materiál roztavený a je vytlačován přes trysku ven. Sestava tiskové hlavy s popsanými komponentami je vidět na obr. 11. [2]



Obr.11 Sestava tiskové hlavy E3D v.6 [7]

Tisková hlava 3D tiskárny obsahuje také další různé senzory, které zajišťují přesnost a spolehlivost tisku. Patří sem senzor filamentu, který detekuje jeho vyčerpání a pozastaví tisk, a senzory pro kalibraci tiskové podložky, jako jsou indukční, kapacitní, optická a mechanická čidla. Dále se často používá akcelerometr, který měří vibrace a zrychlení pohybu tiskové hlavy, což pomáhá eliminovat rezonance a zlepšuje kvalitu tisku. Tyto senzory spolupracují na optimalizaci tisku a zajištění přesnosti a stability během celého procesu.

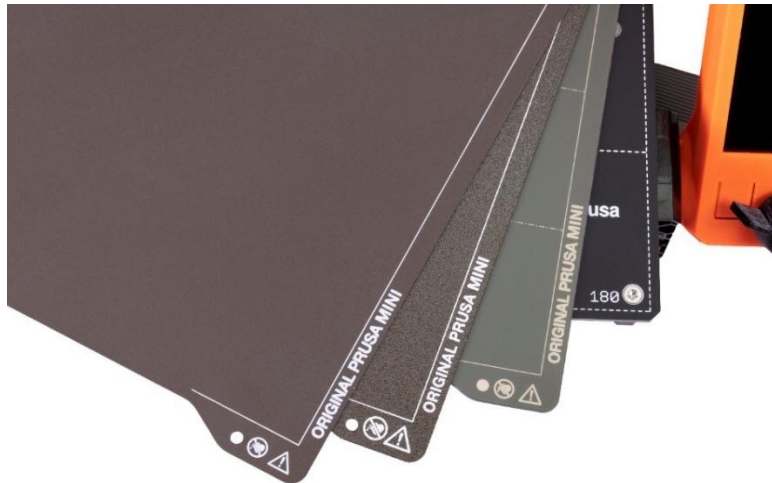
Tisková podložka

Vyhřívaná podložka je klíčovou součástí moderních 3D tiskáren, zejména pokud je potřeba tisknout z materiálů, které mají výraznou tepelnou roztažnost, jako jsou PETG, ABS, ASA, nebo nylon. Její hlavní funkcí je udržovat optimální teplotu tiskového povrchu, která zlepšuje přilnavost první vrstvy a zabraňuje deformacím, které vedou ke kroucení, nebo odlepení modelu během tisku. Stabilní teplota podložky snižuje teplotní rozdíly mezi vrstvami, což je častou příčinou prasklin a deformací. Vyhřívané podložky navíc zvyšují univerzálnost

tiskárny, protože umožňují tisknout z širokého spektra materiálů, od snadno tisknutelných PLA až po pokročilé technické plasty vyžadující vyšší teploty a lepší tepelnou stabilitu.

Vyhřívaná tisková podložka je výsledkem vývoje tiskových ploch. Zpočátku se tisklo téměř na cokoli, na co se tiskový materiál dokázal přichytit. Nejvíce používanou tiskovou podložkou před nástupem vyhřívaných tiskových ploch bylo sklo, na které se případně nanese lepidlo, lak na vlasy, nebo papírová lepicí páska, jako prevence proti kroucení a odlepení výtisku od podložky. [2; 7]

Moderní a aktuálně nejpoužívanější vyhřívaná tisková podložka je v podobě PCB desky, která má na vrchní straně pod vrstvou barvy po celé ploše elektrický obvod, napájený nejčastěji 12, nebo 24V, který vlivem zvýšeného odporu zvyšuje svou teplotu. Na její spodní straně je umístěný termistor připojený k řídicí desce tiskárny, která určuje kdy má podložku nahřívat a kdy ne. Na její spodní straně jsou v otvorech přilepené neodymové magnety s vysokou curieovou teplotou pro přichycení tiskového plátu z pružinové oceli pro snadné odstranění výtisku díky možnému prohnutí tohoto plátu s odlišnými povrchy pro různé materiály a případy použití. Tisková podložka s vyměnitelnými tiskovými pláty je vidět na obr. 12.



Obr.12 Vyměnitelné tiskové pláty a vyhřívaná podložka 3D tiskárny Prusa mini [14]

Krokové motory

Zajišťují přesné a spolehlivé mechanické pohyby v celém tiskovém procesu. Starají se o pohyb pohyblivých částí tiskárny v závislosti na typu konstrukce – buď tiskové hlavy, nebo tiskové podložky, anebo obou, čímž umožňují tisk komplexních 3D modelů. Samostatný motor také zajišťuje přesné podávání tiskového materiálu do extruderu. Hlavní výhodou krokových motorů je jejich schopnost pohybovat se o přesně definované kroky, což zaručuje vysokou opakovatelnost a přesnost. Díky tomu je možné tisknout detailní modely s vysokým rozlišením. Navíc jsou krokové motory relativně jednoduché, cenově dostupné a spolehlivé, což z nich činí ideální volbu pro většinu 3D tiskáren. K přenosu pohybu z krokových motorů na pohyblivé části 3D tiskárny nejčastěji slouží ozubené řemeny, nebo závitové tyče, nejčastěji s trapézovým závitem. [2; 7]

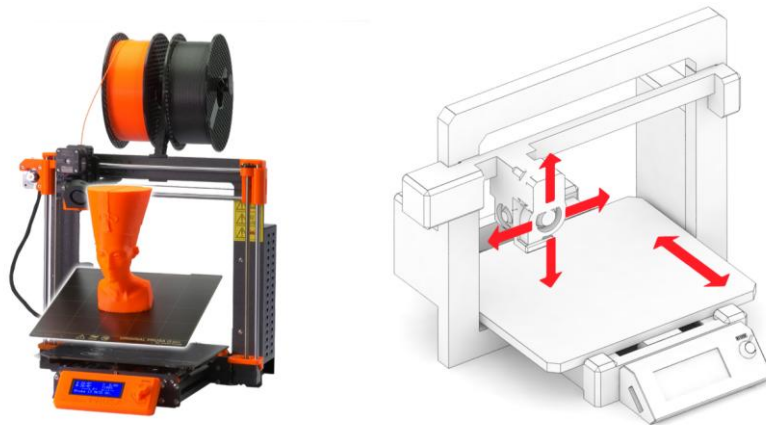
Řídicí deska

Stará se o chod celé tiskárny. Její primární funkcí je čtení a zpracovávání vstupního textového souboru, takzvaného g kódu, připraveného na počítači v CAM programu. Podle něho se řídí pohyby jednotlivých krokových motorů. Zároveň ovládá nahřívání podložky a trysky. Jednou z dalších jejích funkcí je kalibrace a otestování všech svých komponent. Moderní tiskárny si tak díky svým pokročilým řídicím deskám a sensorům dokážou zkalibrovat a otestovat chod celé tiskárny. V případě nalezení chyby tak dokážou přesně určit původ problému. [2; 14]

2.2.2 Typy konstrukcí FDM tiskáren

Existuje mnoho typů konstrukcí FDM tiskáren. Téměř všechny typy tiskáren pracují s kartézským souřadnicovým systémem, až na jedinou výjimku, kterou tvoří tiskárny typu Polar, pracující s polárním souřadnicovým systémem. Rozdíly v jednotlivých typech tiskáren spočívají v tom, jak se pohybuje extruder a tisková platforma, aby vytvořily model.

Do skupiny kartézských tiskáren spadají tiskárny, které jsou založeny na principu pohybu alespoň třemi motory po třech lineárních osách X, Y a Z, přičemž tisková hlava se ve většině případů pohybuje ve dvou osách a podložka po ose zbylé. Ukázkovým příkladem tohoto typu tiskáren je tiskárna Průša i3, jejíž obrázek a schéma pohybu jednotlivých os lze vidět na obrázku č. 13. [2; 7; 15]



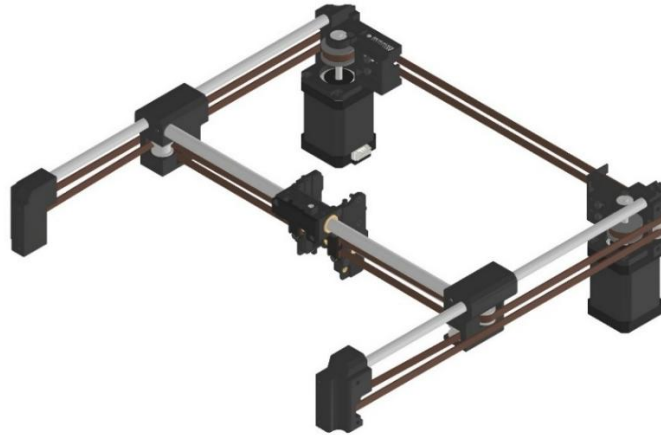
Obr.13 Průša i3 s kartézskou souřadnicovou soustavou [2]

Kartézský typ tiskárny však nemusí vypadat vždy jako tiskárna Prusa i3, ale může být i v podobě kostky, kde se tisková hlava hýbe buď ve všech osách, nebo v pracovní rovině a tisková podložka v ose Z. Příkladem může být 3D tiskárna Ender 5 (obr. 14).



Obr. 14 3D tiskárna Creality Ender 5 Pro [16]

Dalším typem konstrukcí FDM tiskáren je Core XY, u kterého je na rozdíl od kartézských tiskáren pohyb os X a Y na sobě navzájem závislý, což je dáno velmi specifickým designem řemenů. U tohoto typu FDM tiskáren dochází k pohybu tiskové hlavy složitějším mechanismem dvou řemenů a kladek pro zmenšení zatížení na jednotlivé motory potřebné k pohybu tiskové hlavy v jedné ose. Při pohybu po jedné ose tak nezabírá motor jeden, ale dva. Tyto typy tiskáren umožňují vysoce přesný a rychlý pohyb tiskovou hlavou v pracovní rovině tiskárny, zároveň jsou ale složitější na seřízení a údržbu oproti obyčejným kartézským tiskárnám. Konstrukce kinematiky Core XY tiskárny je vidět na obr. 15. [7; 15]



Obr. 15 Konstrukce kinematiky Core XY tiskárny Creality K1 zajišťující pohyb tiskové hlavy v tiskové rovině [17]

Dalším typem FDM tiskáren je typ Delta (obrázek č. 16). Využívá zavěšeného extruderu na třech ramenech, která jsou spolu spojená v místě extruderu. Výhodou jsou rychlé pohyby tiskové hlavy a velký tiskový prostor především v ose Z. Tento typ tiskáren vyžaduje vysokou přesnost při stavbě a následné kalibraci. Stejně jako kartézské tiskárny, pracují Delta tiskárny s kartézským souřadnicovým systémem. Jejich tisková plocha je kvůli limitům pohybu tiskové hlavy kruhového, případně n úhelníkového tvaru. Na rozdíl kartézských tiskáren mají mnohem složitější ovládání motorů. Tiskárna k téměř všem svým pohybům v tiskové rovině potřebuje pohyb všech motorů pohybujících s tiskovou hlavou, oproti dvěma, které potřebuje kartézský typ tiskárny. [2; 7; 15]



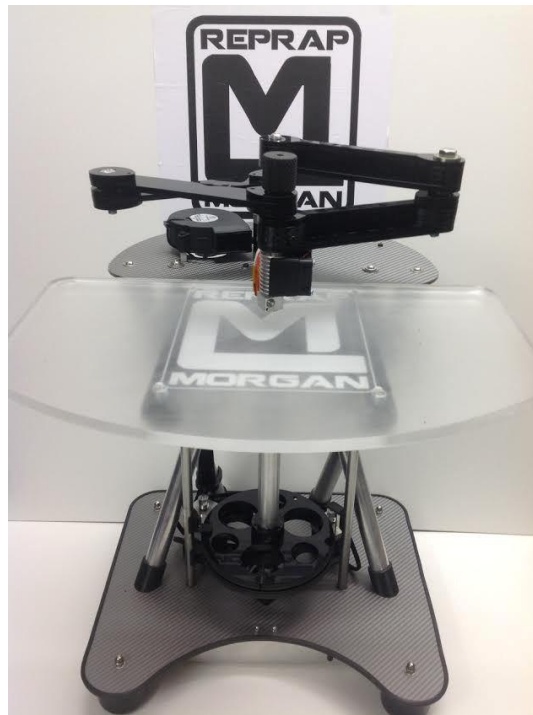
Obr. 16 FDM tiskárna typu Delta značky Trilab model DeltiQ [18]

Dalším, oproti ostatním diametrálně odlišným typům FDM tiskáren je typ Polar (obr. 17). Tiskárny tohoto typu jako jediné pracují s polárním souřadnicovým systémem, od kterého mají také svůj název. Tisková plocha se u těchto tiskáren pohybuje nejen po jedné ose, ale také se otáčí, což umožňuje extruderu pohybovat se pouze v ose Z. Stejně jako tiskárny typu Delta, mají tiskárny typu Polar kruhovou tiskovou podložku. Jedná se o méně rozšířený typ FDM tiskáren. [2; 15]



Obr.17 FDM 3D tiskárna typu Polar [2]

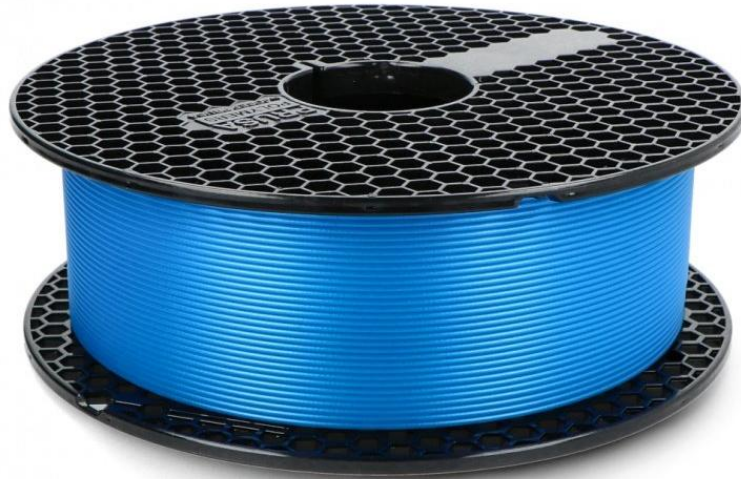
Posledním, jedním z nejméně rozšířených typů FDM tiskáren je Scara (obr. 18), z anglického názvu selective compliance assembly robot arm. Tento typ tiskáren pracuje s kartézským souřadnicovým systémem. 3D tiskárny konstrukce Scara mají tiskovou hlavu připevněnou ke konci robotického ramena poháněného dvěma motory. [7; 15]



Obr. 18 FDM 3D tiskárna typu Scara Reprap Morgan Pro [19]

2.2.3 Používané tiskové materiály

Konstrukčním materiálem polymerových FDM tiskáren je primárně termoplast, nejčastěji v podobě struny navinuté na cívce pro snadnou manipulaci, známý také jako filament (obr. 19). Standardem pro malé až střední FDM tiskárny se stal filament o průměru 1,75 mm, který nahradil dříve více používaný filament o průměru 2,85 mm z důvodu přesnějšího dávkování. [7; 8]



Obr.19 Filament PLA modré barvy

Zároveň se stoupající dostupností a oblibou FDM 3D tisku se na trhu objevuje čím dál více nových materiálů specifických vlastností a různých barev. Spektrum dostupných materiálů je velmi široké. Mezi nejpoužívanější materiály patří snadno tisknutelné PLA, univerzální PETG vhodné pro tisk mechanicky namáhaných výtisků, velmi pevný a teplotně odolný materiál ASA, který nahradil trochu lepšími vlastnostmi velmi podobný materiál ABS, dále materiál s vlastnostmi gumy Flex a v poslední době čím dál více rozšířené kompozitní materiály s příměsí prachu dřeva, nebo kovů pro imitaci povrchů těchto materiálů. V poslední době se na trhu objevuje čím dál více materiálů s příměsí vláken (karbonových, skelných, nebo kevlarových) pro zlepšení mechanických vlastností výtisků. Pro tisk takových materiálů je potřeba použít tvrzenou trysku kvůli vysoké míře jejich abrazivity. [2]

Každý tiskový materiál má své specifické nastavení tisku. Stejný typ materiálu od různých výrobců může mít odlišné tiskové vlastnosti. Rozdíly v tisku mohou nastat i u odlišných barev jednoho typu materiálu od stejného výrobce. Pro větší porozumění této problematice technologie FDM 3D tisku z hlediska modifikace FDM tiskáren si v následujících pár krátkých odstavcích shrneme nejběžnější a nejvíce používané tiskové materiály pro výrobu funkčních dílů 3D tiskáren. [2]

PLA

Je jedním z nejběžnějších a nejdostupnějších materiálů, nejen díky své nízké ceně. Jeho název pochází z anglického názvu Polylactic Acid, česky kyselina polylaktónová. PLA je biologicky rozložitelný (k jeho rozpadu však nestačí kompost) a bioaktivní termoplast vyrobený z přírodních produktů, jako je kukuřičný škrob, nebo cukrová třtina. [1]

Tisk tohoto materiálu je velmi snadný, protože probíhá za nižších teplot, konkrétně mezi 200 a 220 °C. Výtisky z tohoto materiálu mají hezký povrch, a to i v místech, kde jsou velké převisy, nebo použité podpěry. Během jeho tisku nedochází k žádným větším problémům, ani škodlivému zápachu. Ve srovnání s ostatními materiály má malou teplotní roztažnost. Proto se

během tisku nedeformuje a nemá tendenci se odlepovat od podložky, či prskat. Ze všech tiskových materiálů je dostupný v nejširším barevném spektru. Díky snadnému tisku je momentálně prvním tiskovým materiálem drtivě většiny nových 3D tiskařů. [1; 2]

PLA je tvrdý, ale zároveň křehký materiál. Při mechanickém namáhání se neohne, ale praskne. Nevýhodou je jeho nízká teplotní odolnost. Měkne již při teplotě cca 60 °C, zároveň má špatnou odolnost proti UV záření. Například pro vytištění dílů, které budou dlouhodobě venku na přímém světle nebo držáku mobilního telefonu do auta proto není vhodnou volbou. Je ideální pro vizuální díly, hračky, rychlé prototypy a díly, které budou ideálně v pokojové teplotě. [2]

PETG

Jedná se o termoplast ze skupiny polyesterů, konkrétně o Polyethylentereftalát glykol. PET je kombinován ze dvou monomerů a široce se používá téměř pro všechny plastové výrobky od lahví až po oblečení. Oproti obyčejnému PET obsahuje PETG glykol pro zvýšení pevnosti a trvanlivosti výrobků. Zároveň s PLA tvoří dvojici nejzákladnějších materiálů, které se snadno tisknou a pokryjí širokou škálu aplikací. Oproti PLA je PETG vhodnější pro tisk funkčních součástí. [1; 2]

PETG se oproti ostatním materiálům tiskne snadno, ale ne tak snadno jako PLA. Tiskové teploty tohoto materiálu se pohybují mezi 225 a 250 °C. Oproti PLA se více krouží a může dojít k jeho odlepení od podložky. Velkým problémem může být také jeho vlhkost, která má velký vliv na kvalitu a vzhled výtisku. Proto se vyplatí tyto materiály držet v suchu, případně před tiskem vysušit v sušičce filamentů. Typickým aspektem je lesklý povrch perimetrů (stěn) výtisků z tohoto materiálu. [1; 2; 7]

ABS

Tento materiál byl původně vyvinutý pro technologii vstřikování plástů. Zároveň byl jedním z prvních konstrukčních materiálů FDM tiskáren pro výrobu mechanicky namáhaných dílů. Oproti materiálům PLA a PETG má ABS výrazně vyšší teplotní odolnost. Pro spoustu aplikací technologie FDM je tak vhodnějším tiskovým materiálem. [2; 7]

Nevýhodou ABS je jeho problematictější tisk z důvodu velké teplotní roztažnosti. Při tisku na tiskárně, která není v uzavřené komoře se výtisky krouží a odlepují od podložky. Tomu lze u menších dílů zamezit použitím límce první vrstvy tisku, případně přidání koleček do rohů první vrstvy výtisku pro zvětšení plochy v kontaktu s tiskovou podložkou. Větší díly z tohoto materiálu je pak ideální tisknout ve vyhříváné uzavřené komoře. Díly tištěné z tohoto materiálu je potřeba roztáhnout, přibližně o 0,5 % v tiskové rovině kvůli jejich smrštění po ochlazení výtisku. Součásti vytisknuté z tohoto materiálu lze vyhladit a lepit pomocí acetonu. [2; 7]

ASA

Byl navržený k nahrazení materiálu ABS, se kterým má velice podobné vlastnosti. Oproti ABS se díky menší tepelné roztažnosti lépe tiskne a má lepší UV odolnost. Díly z tohoto materiálu tak vydrží nepřetržitě ve venkovním prostředí bez větších deformací. Stejně jako ABS lze výtisky z tohoto materiálu vyhladit pomocí acetonu. [1; 2]

Flex

Do této kategorie patří všechny flexibilní materiály pro tisk. Jsou vyrobeny z termoplastických elastomerů a uretanů a měkkých materiálů na bázi gumy. Tištěné objekty z těchto materiálů mají velkou pružnost, tudíž se po deformaci vrátí do své původní podoby. Tyto tiskové materiály se vyrábějí v několika tvrdostech, zhruba od 70 po 100 A, a od 20 po 60 D Shoreových jednotek tvrdosti. [2; 20]

2.3 Modifikace FDM tiskáren

Uživatelských modifikací je celá řada a k jejich vzniku může vést téměř cokoli. Mezi hlavní důvody ke vzniku modifikace patří řešení nedostatků majících vliv na kvalitu tisku, a tím i na spolehlivost tiskárny, přidání dalších funkcí rozšiřující jejich možnosti, ale i třeba změna jejich designu. Účelem modifikace je navržení užitečné a funkční inovace, díky níž se dosáhne zlepšení konkrétní vlastnosti tiskárny. Mezi uživateli jsou značně rozšířené a bývají sdíleny na webech s 3D modely pro tisk, jako jsou Thingiverse, Printables a Makerworld.

Ve většině případů jsou modifikace vyráběné za účelem přidání dodatečné funkce. Mezi takovéto modifikace lze zařadit multimateriálovou jednotku, známou také pod zkratkou MMU (z anglického multi material unit), která slouží pro výměnu materiálu v jednotlivých vrstvách během tisku. Lze s ní tak tisknout vícebarevné objekty, ale i různé části tisku jinými materiály, například podpěry materiálem pro jejich snadné odstranění od výtisku. V poslední době ji výrobci tiskáren nabízejí, jako rozšiřující vylepšení jejich tiskáren. Další takovou modifikací může být úprava tiskárny za účelem nepřetržitého tisku, kdy tiskárna po výtisku chvíli počká na ochlazení výtisku, poté sjede osou X v ose Z dolů a naražením o výtisk jej oddělí od podložky. Na rozdíl od ostatních typů modifikací je tento typ mnohem komplexnější a vyžaduje znalosti v úpravě firmwaru tiskárny, případně vyžaduje návrh vlastního přímo pro danou úpravu. [21]

Dalším typem je modifikace za účelem odstranění nedostatků, které mají vliv na kvalitu tisku, které mohou nastat ať už z tlaku výrobců, na co nejnižší náklady na výrobu dané tiskárny, nebo přichází s lepším řešením, než s kterým přišel výrobce. Jak již bylo zmíněno, takovéto úpravy jsou často sdíleny mezi tiskaři, díky jejich výrobě přímo na dané tiskárně a jejich snadné úpravě. Výhodou těchto modifikací je, že nepotřebují úpravu firmwaru. Vzhledem k zaměření této bakalářské práce si zmíníme a popíšeme nejčastější uživatelské modifikace a vady a neduhy tisku, které opravují.

Úprava chlazení tisku

Provádí se za účelem lepšího chlazení tištěného materiálu. Díky upravenému dílu směřující vzduch foukaný tiskovým ventilátorem na tištěný materiál tiskárna dokáže lépe vytisknout mosty a převisy na výtiscích. Zároveň může zlepšit celkové chlazení tiskárny a lze tak díky němu zvýšit tiskové rychlosti. Úpravou může být i přidání druhého ventilátoru, díky kterému lze posunout limit tiskové rychlosti z hlediska chlazení ještě výše. Tato úprava však nemá vliv na tisk materiálů, které je potřeba tisknout s vypnutým tiskovým ventilátorem, například materiálů ASA a ABS. [21]

Úprava konstrukce tiskárny

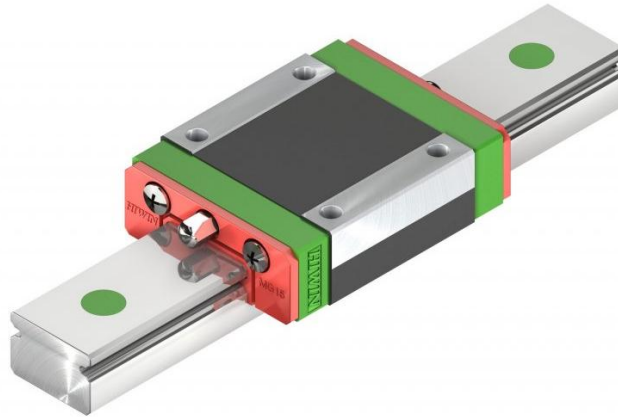
Touto úpravou lze zvýšit celkovou stabilitu a pevnost rámu tiskárny. Během tisku tak nedochází k vychýlení pohyblivých částí, které mají vliv na kvalitu stěn výtisku a celkovou přesnost výtisku. Zároveň může zvýšit přesnost tisku tiskárny jejím přesnějším sestavením, díky kterému jsou osy na sebe přesně kolmé. [21]

Modifikace lineárního vedení

Nejčastěji bývá upraveno na nejlepší a nejpřesnější typ lineárního vedení, kterým je lineární vedení v podobě kolejnic a vozíků, které nabízí mnohem větší stabilitu během tisku vyšší nosností a možným zatížením během tisku. Toto řešení nabízí také mnohem větší životnost lineárního vedení tiskárny oproti ostatním používaným typům. Vzhledem k zaměření bakalářské práce na tuto modifikaci si ji podrobněji probereme v následující podkapitole. [21]

2.3.1 Modifikace lineárního vedení

Lineární vedení slouží k přesnému a hladkému vedení pohyblivých částí tiskárny. Existuje mnoho typů lineárních vedení, z nichž nejlepší, díky své vysoké nosnosti a přesnosti je v podobě kolejnic a vozíků (lineárních ložisek, která se pohybují po přesných broušených drážkách po kolejnicích). Právě na tento typ lineárního vedení jsou tiskárny modifikovány, především za účelem zvýšení rychlosti a přesnosti tisku. [22]



Obr. 20 Kolejnice lineárního vedení s vozíkem značky Hiwin [23]

Lineární vedení FDM tiskáren v podobě kolejnic a vozíků má mnohem větší tuhost, což vede ke zmírnění vibrací a méně výrazným artefaktům viditelných na stěnách výtisků. Oproti ostatním typům lineárních vedení je mnohem kompaktnější, zároveň stačí na rozdíl od lineárního vedení v podobě tyčí a lineárních ložisek použít jen jedno, protože jedna kolejnice a vozík sami o sobě odebírají 5 stupňů volnosti pohybu v prostoru. Další jeho výhodou je větší přesnost, protože je vyráběno ve výrazně menších tolerancích oproti ostatním typům lineárních vedení. Zároveň je mnohem přesnější jeho montáž, díky montážním otvorům, které jsou pravidelně rozmístěné po celé jeho délce. Oproti kruhovým ocelovým tyčím, které se mohou po nějaké době opotřebovat (obr. 21) mají kolejnice s vozíky mnohem delší životnost.

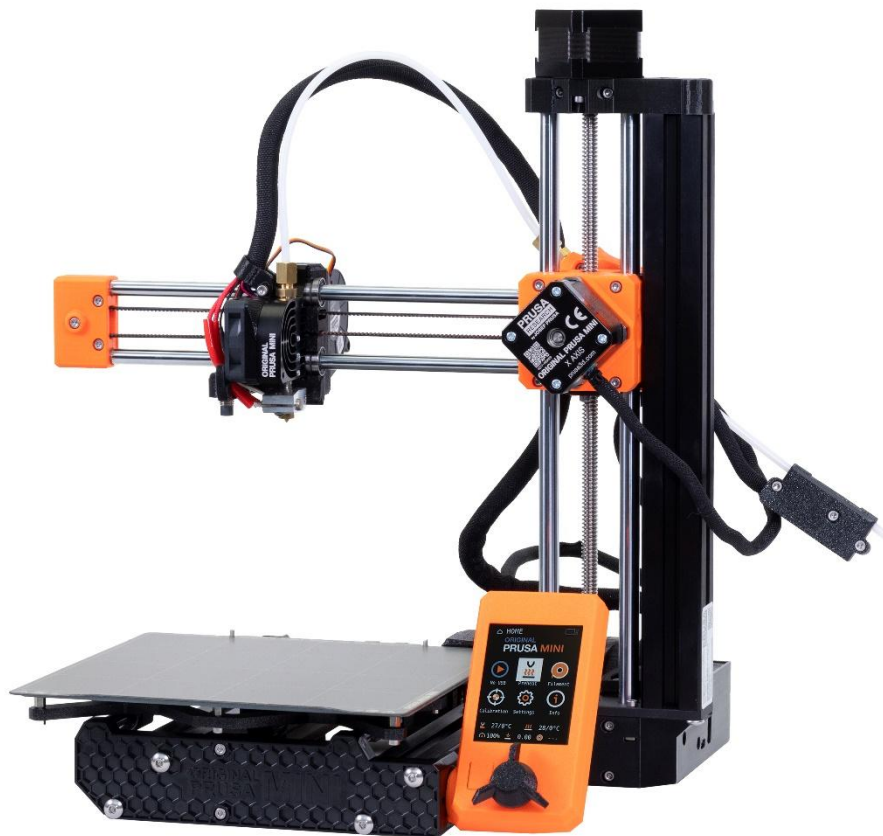


Obr. 21 Opotřebovaná ocelová tyč lineárního vedení 3D tiskárny Prusa Mini

Nevýhodou tohoto typu lineárního vedení je ve srovnání s ostatními typy mnohonásobně vyšší pořizovací cena. Ta je důsledkem použitých výrobních technologií k jeho výrobě, které zajišťují požadovanou vysokou přesnost a použitým materiálům na jeho výrobu. Někteří výrobci tento problém řeší jejich selektivní montáží, která umožňuje dosáhnout požadované přesnosti za nižší cenu, nebo jej vyrábějí z levnějších materiálů, například ocelí méně odolných vůči korozi.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Modifikovanou 3D tiskárnou je Průša mini. Jedná se o nejmenší, nejlevnější a nejstarší z aktuálně vyráběných 3D FDM tiskáren portfolia firmy Prusa Research. Během jejího vývoje byl kladen důraz na snížení finální ceny 3D tiskárny, za účelem její větší dostupnosti pro širokou veřejnost. Tiskárna je tak ochuzená o jeden motor osy Z a má několik konstrukčních prvků v co nejméně nákladném provedení. I tak si ale zachovává kvality dražších tiskáren firmy Prusa Research.



Obr. 22 FDM 3D tiskárna Průša Mini

Oproti vlajkovým modelům firmy Prusa Research, jako jsou MK3 a MK4 a Core One má Průša Mini menší tiskový prostor 180x180x180 mm. Maximální teplota trysky je 280 °C a podložky 100 °C. Zvládá tak tisk širokého spektra dostupných materiálů, jako jsou PLA, PETG, Flex, PVB a kompozitních materiálů. Pro bezproblémový tisk materiálů, jako jsou ASA, ABS, PC a Nylon je potřeba tiskárnu umístit do uzavřené komory.

Jedná se o 3D tiskárnu s kartézskou souřadnicovou soustavou, která ke svému pohybu v ose Y hýbe tiskovou podložkou, v angličtině často nazývána bed slinger. V tomto případě, kde tiskárna má pouze jednu podporu osy X (pojezd osy Z) jde zároveň o tiskárnu konstrukce Cantilever, v češtině pod pojmem konzole. Rám tiskárny je složen ze tří hliníkových profilů o průřezu 30 x 30 mm, frézovaného hliníkového spoje osy Y a Z a několika tištěných dílů. Tiskárna má jako lineární vedení na všech osách použity hlazené ocelové tyče po kterých se pohybují valivá kuličková pouzdra. Na osách X a Y má tiskárna tyče o průměru 8 mm. Na ose Z má pro větší tuhost a její namáhání od osy X použity tyče o průměru 10 mm.

Tiskárna má z důvodu použití pouze jednoho motoru osy Z extruder s bowdenovým systémem, který je přišroubovaný k dílu pojezdu osy Z. Toto řešení má z důvodu snížení hmotnosti tiskové hlavy pozitivní vliv na kvalitu tisku. Díky němu není díl osy Z namáhán tolik, jako by byl při

použití přímého podávání filamentu. Nevýhodou použití extruderu s bowdenovým systémem je pomalejší doba odezvy při retrakci z důvodu zvýšeného tření v bowdenové trubici, které vede ke zvýšení reakční doby. Retrakce musí být při použití tohoto systému také delší, protože je mezi filamentem a trubicí extruderu vůle. Při nastavení kratší vzdálenosti retrakce by se tak filament vůči hotendu vůbec neposunul. Z důvodu zvýšeného tření tento bowdenový systém vyžaduje vyšší nároky na potřebnou sílu extruderu. Extruder je tak zpřevodovaný v poměru 3:1, díky čemuž má podávání filamentu větší sílu a přesnost.

Průša Mini je sice tiskárna s malým tiskovým objemem, ale v případě domácího použití je ve většině případů naprosto dostačující. Díky malým rozměrům a možnému rozložení na dvě části – oddělení ramene (osy X a Z) s elektronikou od osy Y je dobře skladovatelná. Díky její spolehlivosti a snadné obsluze bývá také často používána ve školách, nebo například kutilských komunitních centrech.

Mezi její největší výhody patří snadná příprava dílů pro tisk v CAM programu pro přípravu výtisků 3D tiskáren, sliceru firmy Prusa Research pod názvem PrusaSlicer, který je založený na open-source projektu Slic3r. V tomto programu je přímo pro tuto tiskárnu mnoho odladěných přednastavení (Pro různé výšky vrstvy a rychlost tisku), které jednou za čas dostanou aktualizaci s opravenými nedostatky, případně novými funkcemi. Dále k této tiskárně má firma Prusa Research dostupný online kurz, po kterém i začátečník dokáže bez problému připravit soubor pro tisk. Díky široké základně uživatelů a komunitnímu blogu firmy Prusa Research lze v případě chyby najít na tomto blogu řešení. Její další výhodou je snadná práce s 3D tiskárnou, díky jejímu lcd displeji a přehlednému menu.

3.1 Vytipování nedostatků 3D tiskárny

Jak již bylo zmíněno, při jejím vývoji byl kladen důraz na snížení její výsledné ceny. Kvalita jejího tisku je tak částečně ovlivněna jejími konstrukčními řešeními, i použitými součástkami. Díky možnostem této technologie rapidního prototypování lze tyto nedostatky opravit upravením (modifikováním) dílů její konstrukce pro zlepšení kvality tisku.

Asi největším nedostatkem 3D tiskárny Prusa mini je poměrně nízká míra stability volného konce osy X a osy Z vzhledem k ne příliš vhodnému spojení osy Y a Z, které jsou spolu spojené frézovaným hliníkovým dílem. Tento nedostatek si často majitelé této tiskárny řeší vytisknutím dodatečného spoje těchto dvou celků, který zvýší stabilitu osy Z a ramena osy X.

Mezi nedostatky řešené 3D tiskárnou lze také zařadit její použité lineární vedení. Tiskárna má lineární vedení v podobě hlazených ocelových tyčí, které oproti nejvhodnějšímu typu lineárního vedení používaném na 3D tiskárnách – kolejnicím s vozíky má výrazně menší tuhost a přesnost, z důvodu vůle, která je mezi lineárním ložiskem a ocelovou tyčí. Kolejnice také umožňují zvýšení tiskových rychlostí, díky své větší nosnosti a přesnosti. Další nevýhodou použitého typu lineárního vedení je jeho poměrně nízká životnost. Jako příklad lze uvést opotřebenou hlazenou ocelovou tyč 3D tiskárny Průša MK4, kterou lze vidět na obr. 23.



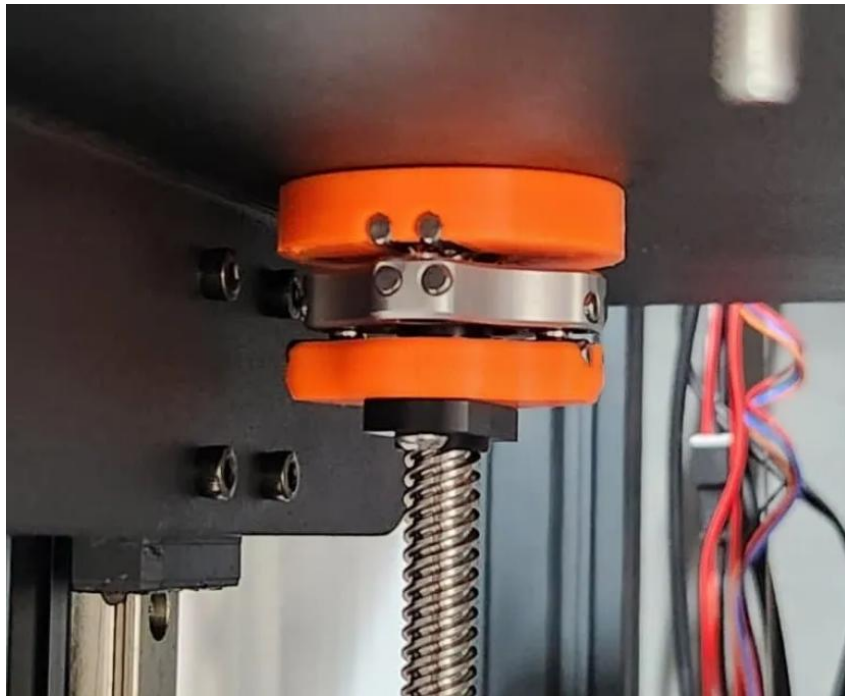
Obr. 23 Opotřebená hlazená ocelová tyč 3D tiskárny Průša MK4

3.2 Návrh řešení nedostatků 3D tiskárny

Pro opravení nedostatků spojených s použitým lineárním bude navržena modifikace tiskárny pro použití lineárního vedení v podobě kolejnic a vozíků v tiskové rovině XY. To zahrnuje návrh nových tištěných dílů konstrukce pro použití zvoleného typu lineárního vedení.

Pro zvýšení stability konstrukce zvolené tiskárny si navrhne dodatečný díl, který zlepší spojení mezi konstrukcí rámu osy Y a osy Z s ramenem osy X.

Vzhledem k návrhu nových tištěných dílů spojených s modifikací lineárního vedení na jiný typ, lze na tiskárně aplikovat i další dodatečné modifikace. Pro zmírnění nepřesnosti trapézového závitu přenášejícího pohyb v ose Z bude na tiskárně aplikováno zařízení pro možnost pohybu trapézové matice v rovině. Na výtiscích tak nemusí být znatelné vady od křivého trapézového šroubu osy Z.

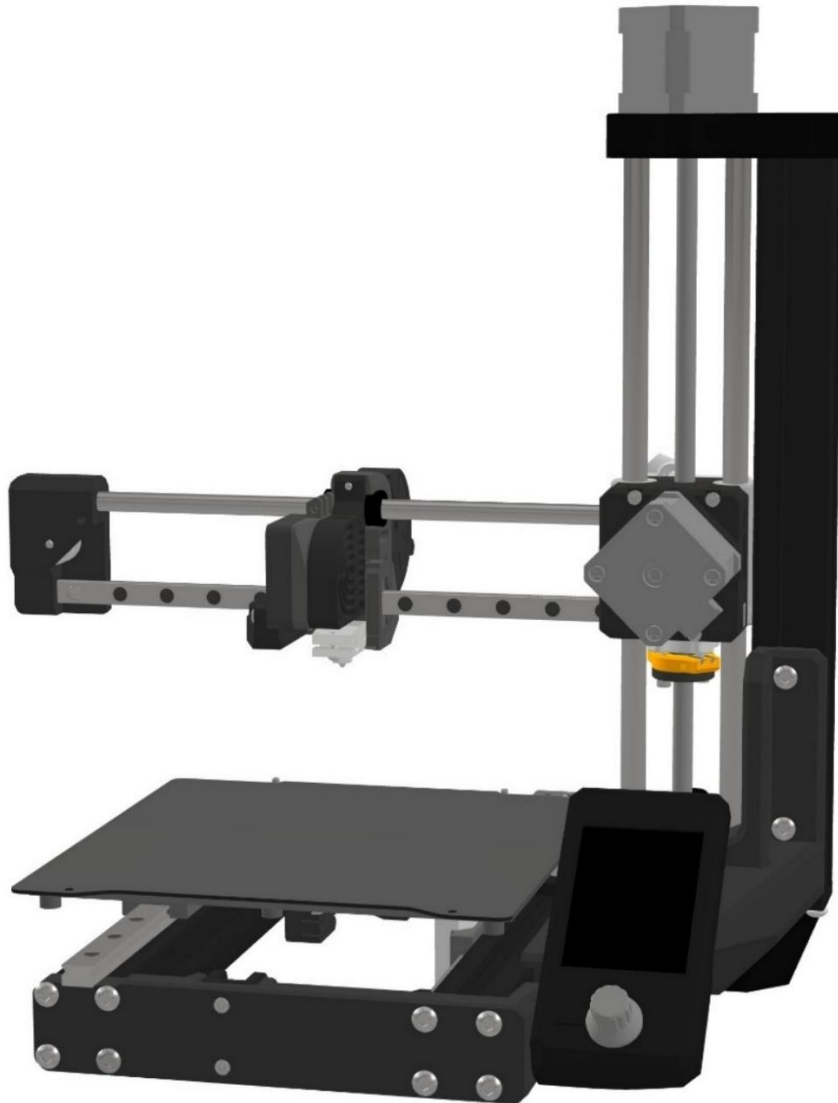


Obr. 24 Zařízení pro zmírnění nepřesností od křivého trapézového šroubu osy Z – WobbleX [24]

Pro návrh modifikace je nezbytné mít původní verzi 3D tiskárny v kterémkoliv CAD programu, aby byly dodrženy vzdálenosti jednotlivých os tiskárny, bez kterých tiskárna neprojde selftestem. Díky open source politice firmy Prusa Research, která sdílela s uživateli svých tiskáren na internetu modely jednotlivých dílů 3D tiskárny Průša Mini, lze na internetu najít sestavu celé jejich 3D tiskárny. Díky této sestavě budou dodrženy maximální vzdálenosti jednotlivých os modifikované 3D tiskárny.

3.3 Navržená modifikace

Pro úpravu a návrh dodatečných dílů byl zvolen CAD program Autodesk Inventor. V něm byly navrženy veškeré díly nezbytné k použití zvoleného typu lineárního vedení a dodatečný spoj rámu konstrukce osy Y a Z. Hotová sestava modifikované tiskárny je na obr. 25.



Obr.25 Sestava navržená modifikace 3D tiskárny Průša Mini

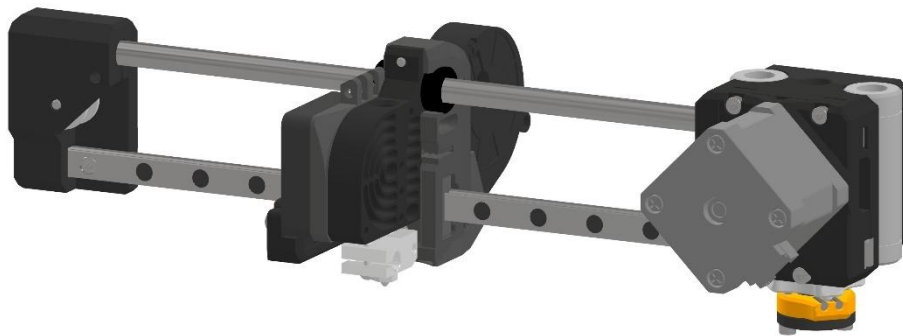
Pro spojení upravených dílů budou použity stejně jako na původní verzi šrouby M3. Namísto čtvercových závitových matek budou použity mosazné závitové vložky ve 2 délkách 5,7 a 3 mm výrobce CNC kitchen. Ty budou zataveny pomocí elektrická pájky do tištěných dílů. Díry pro závitové vložky byly pro jejich použití upraveny podle obrázku jejich výrobce, který lze vidět na obr. č. X.

Pro úpravu tiskárny bylo potřeba upravit veškeré díly spojené s konstrukcí osy X a osy Y. V následujících podkapitolách si popíšeme, co všechno a za jakým důvodem bylo potřeba předělat. Dále budou popsány komplexněji předělané díly.

Sestava navržené modifikace ve formátu step, jednoduchý výkres sestavy a výkres s kolejnicemi, které jsou nezbytné k výrobě navržené modifikace jsou v příloze 1. 3D tiskárna je vyrobitelná ze všech dostupných dílů v sestavě. K rozměrově přesnému tisku postačí roztáhnout tištěné díly v tiskové tovině XY, podle použitého typu materiálu.

3.3.1 Úpravy sestavy osy X a pojezdu osy Z

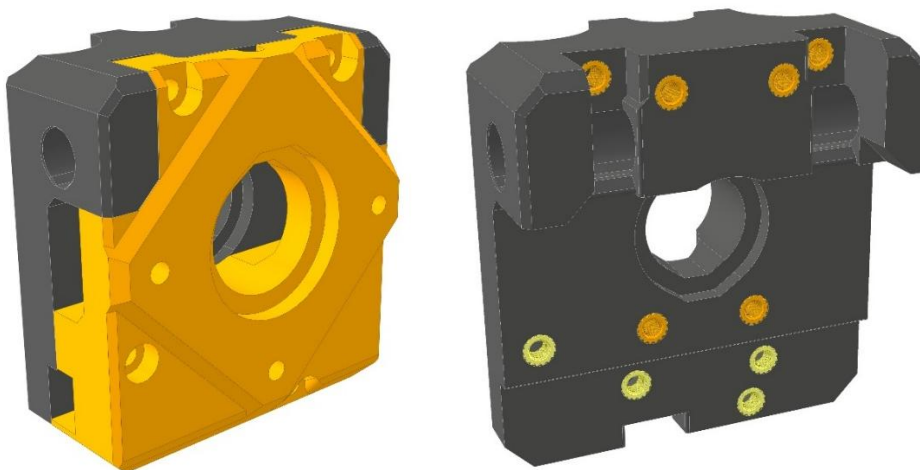
Kompaktní konstrukce tiskové hlavy neumožňuje bez jejího komplexního předělání použít kolejnici o šířce 12 mm. Z toho důvodu bude použita kolejnice MGNR o šířce 9 mm. Díky téměř žádnému omezení z levé strany tiskové hlavy lze použít delší vozík MGN9H. Z důvodu větší stability volného konce bude ponechána horní ocelová tyč původního lineárního vedení, která však nebude sloužit jako lineární vedení, ale pouze ke stabilizaci volného konce osy X. Namísto lineárního ložiska bude na tiskové hlavě použitý díl pouze pro vyplnění prostoru po lineárním ložisku, který se nebude dotýkat hlazené ocelové tyče. Vzhledem k úpravě všech dílů pojezdů osy Z byly tyto díly také upraveny pro použití koupeného zařízení WobbleX WS8. Sestavu všech dílů osy X s pojezdem osy Z lze vidět na obr. č. 26.



Obr. 26 sestava osy X s pojezdem osy Z.

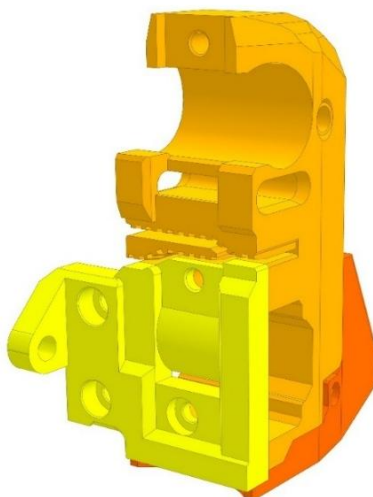
Pro použití kolejnice o šířce 9 mm na ose X bylo potřeba posunout tiskovou hlavu o 2 mm směrem dopředu. Z toho důvodu bylo potřeba posunout i dorazy osy Y, aby vzdálenost dorazů osy Y a tisková hlava zůstaly vůči sobě nezměněné.

Pro použití kolejnice bylo k jejímu připevnění k pojezdu osy Z, zároveň držáku motoru osy X potřeba rozdělit tento díl na dvě části. (obr. 27) Díky tomuto rozdělení lze demontovat, případně opravit cokoliv na tiskové hlavě bez potřeby demontování pojezdu osy Z, stačí pouze odmontovat přední díl, ke kterému je připojený motor osy X.



Obr. 27 sestava upraveného dílu pojezdu osy Z rozděleného na 2 díly
Vpravo zadní díl se závitovými vložkami pro spojení s přední částí, zadním dílem pojezdu a kolejnicí lineárního vedení

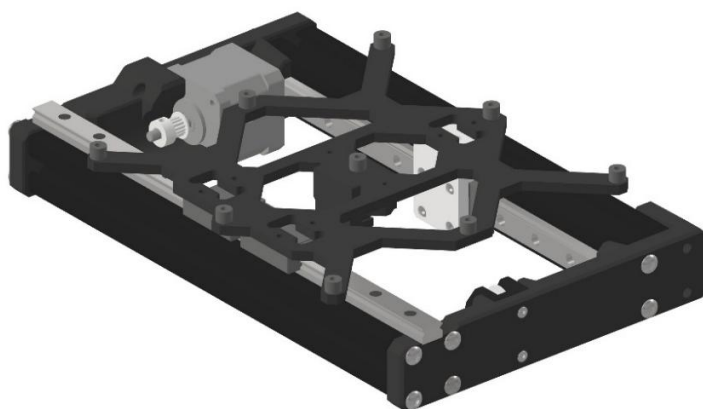
Pro připevnění vozíku lineárního vedení bylo potřeba rozdělit díl pojezdu osy X na 3 části. Pojezd osy X (obr. 28) se tak sestává z části, ke které bude spojen šrouby vozík, dále zadního dílu, ke kterému bude připojen tiskový ventilátor a v poslední řadě dílu, který bude směřovat vzduch z ventilátoru na výtisk. Výhodou takto rozděleného dílu ofuku je jeho snadná úprava, případně vylepšení směřující ofuk lépe pod trysku. Navržený díl směřuje ofuk stejně jako původní verze. Případné vylepšení tohoto dílu lze snadno vyměnit, díky zasouvacímu mechanismu, zároveň není potřeba demontovat žádné jiné části tiskárny.



Obr. 28 sestava upraveného dílu pojezdu osy X

3.3.2 Úpravy sestavy osy Y

Pro osu Y byly zvoleny lineární kolejničky o šířce 12 mm, které budou přišroubovány k hliníkovým profilům konstrukce rámu osy Y. Hliníkový profil na levé straně byl pro použití této kolejničky posunut o 20,925 mm směrem od druhé, aby bylo možné spojit rám tiskové podložky s vozíky lineárního vedení. Druhá kolejnička osy Y bude přidělána k boční straně hliníkového profilu, protože spoj konstrukce rámu osy Y s rámem osy Z neumožňuje její použití na jeho horní straně. Ke spojení vozíku této druhé kolejničky s rámem tiskové podložky byl navrhnout dodatečný díl. Vzhledem k potřebě prostoru vozíku a dílu pojezdu během tisku bylo potřeba posunout motor osy Y o 6,75 mm směrem od pravého hliníkového profilu. Pro levou stranu vzhledem k prostorovému omezení budou použity kratší vozíky MGN12C a pro pravou stranu bude použit jeden vozík MGN12H. Pro použití zvoleného typu lineárního vedení tak bylo potřeba upravit veškeré díly sestavy rámu konstrukce osy Y. Sestava konstrukce osy Y je vidět na obr. 29.



Obr. 29 sestava osy Y navržené modifikace

3.3.3 Dodatečný spoj tiskárny

Pro zvýšení stability osy Z s ramenem osy X byl navrhnout dodatečný spojový díl (obr.30). Navržený díl bude celkem čtyřmi šrouby M5 spojen s rámem konstrukce osy Y a osy Z. Pro co největší pevnost tohoto dílu byly během jeho návrhu přidány uvnitř dílu prázdná místa o šířce 0,1 mm tak, aby byly uvnitř dílu tištěny perimetry.



Obr. 30 Dodatečný spoj pro zvýšení tuhosti tiskárny

3.4 Výroba navržené modifikace

Pro výrobu navržené modifikace bylo potřeba pořídit:

- Lineární kolejnice s vozíky
- Zařízení pro pohyb trapézové matky v rovině WobbleX WS8
- Materiál pro FDM tisk
- Spojovací materiál

Z důvodu experimentálního a domácího použití tiskárny bylo pro tiskárnu pořízeno lineární vedení z internetového obchodu Aliexpress. Stejně tak i zařízení WobbleX, hlavně za účelem snížení nákladů na navrženou modifikaci.

Vzhledem k tomu, že v průběhu vývoje navržené modifikace nebyly známy přesné délky jednotlivých lineárních kolejnic, byly pořízeny delší, které byly následně zakráčeny na požadovanou délku kotoučovou bruskou. Díky možnostem technologie FDM byly vyrobeny přípravky pro zakráčení kolejnic na požadovanou délku, i vůči otvorům. Kolejnice v přípravcích pro zakráčení na přesnou délku lze vidět na obr. 31. Zakráčené kolejnice s vozíky lze vidět na obr. 32.



Obr. 31 Kolejnice v přípravcích pro přesné dělení a upevnění do svěráku



Obr. 32 Zakrácené kolejnice na požadované délky s vozíky

Veškeré navržené tištěné díly byly, vzhledem k tomu, že byla modifikovaná tiskárna rozebrána, a některé díly teprve navrhovány, byly tisknuté na jiné dostupné tiskárně, a to na FDM tiskárně Průša MK4. Tiskové soubory byly připraveny v programu Prusaslicer. Díly, které jsou v bezprostřední blízkosti extruderu a tiskové podložky byly tištěny z materiálu ASA, ostatní z materiálu PETG. Vzhledem k tomu, že nebyla tiskárna, na které byly tištěny díly z materiálu ASA zakrytována, byl během tisku těchto dílů po celou jeho dobu vypnut tiskový ventilátor.

Shrnutí upravovaných tiskových parametrů a přednastavení:

- Velikost trysky 0,4 mm
- Nastavení tisku – strukturální, výška vrstvy 0,2 mm
- 3 perimetry
- Výplň vzoru pláštěv, hustota 30%
- Díly tištěné z materiálu ASA byly roztaženy v tiskové rovině XY o 0,5%
- Díly z PETG o 0,35%
- Přednastavení tiskových teplot podle výrobce a typu materiálu

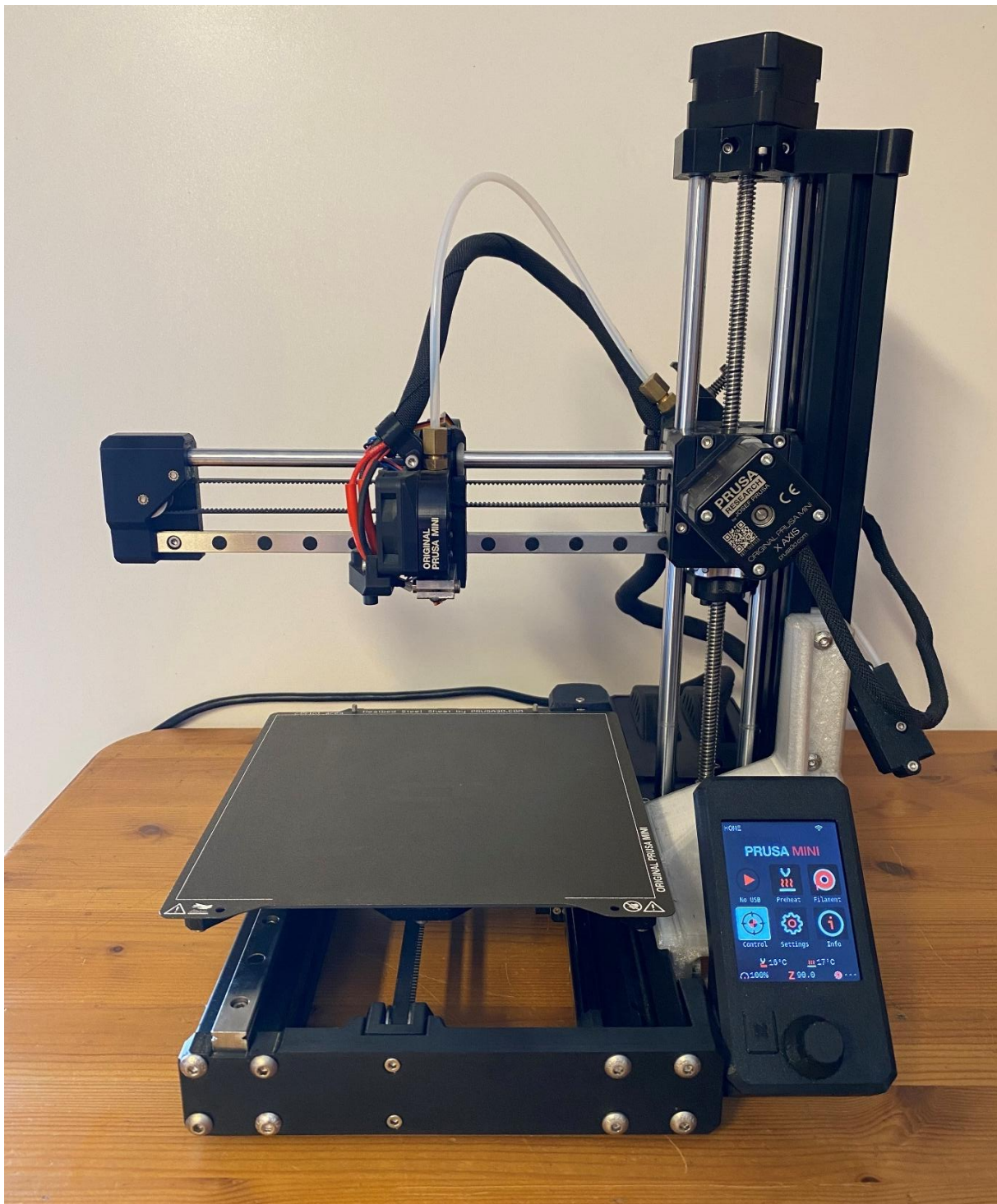
Tištěné díly byly tisknuty z dostupných materiálů. K výrobě navržené modifikace byly použity celkem 3 typy materiálu, a to černé a průhledné PETG a ASA černé barvy. Celková hmotnost všech tištěných dílů činí 532 g, z toho bylo 472 g z materiálu PETG a 60 g z materiálu ASA. Pro spojení tištěných dílů a kolejnic k hliníkovým profilům bylo potřeba více druhů a délek šroubů M3 a M5. Celý seznam a počty jednotlivých šroubů k modifikaci tiskárny:

- 13 ks M3x6
- 5 ks M3x8
- 7 ks M3x10
- 19 ks M3x12
- 3 ks M3x16
- 8 ks M3x20
- 3 ks M3x25
- 5 ks M5x16
- 8 ks M5x20

Namísto vkládání čtvercových matic do připravených otvorů bylo potřeba zatavit závitové vložky do výtisků pomocí hrotové pájky s nástavci. K tomu byly použity závitové vložky výrobce CNC Kitchen velikostí M3 a M5. Celkový počet a délky potřebných závitových vložek potřebných pro modifikaci:

- 19 ks závitových vložek M3 o délce 10 mm
- 16 ks závitových vložek M3 o délce 5 mm
- 4 ks závitové vložky M5 o délce 4 mm

Popisovat sestavení celé tiskárny by bylo příliš zdlouhavé, zároveň se ne příliš liší od sestavení původní verze tiskárny. Tiskárna s použitým lineárním vedením v podobě kolejnic a vozíků potřebuje mít vyrovnané lineární vedení v celé své délce. Namísto přípravků pro jejich vyrovnaní na hliníkových profilech byly na tištěných dílech konstrukce osy Y připraveny prvky pro jejich vystředění. Sestavenou tiskárnu lze vidět na obr. 33.



Obr. 33 Sestavená modifikace FDM 3D tiskárny Průša Mini

3.5 Testování upravené tiskárny

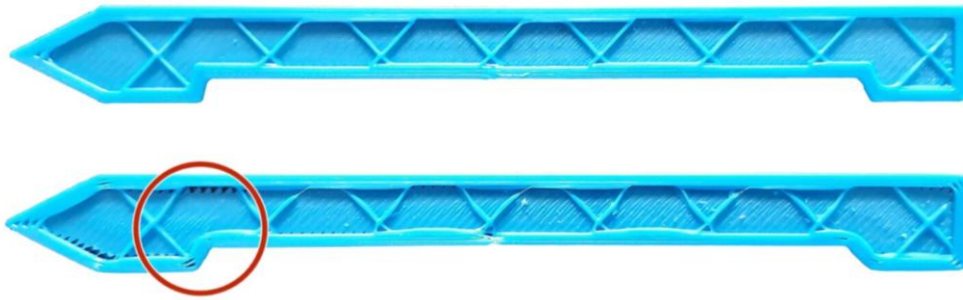
Sestavená tiskárna bez problému projde selftestem, bez kterého by nemohla tisknout. Nejdůležitější je bezproblémový test os X, Y a Z, protože na každé byla provedena nějaká úprava. Výsledek selftestu modifikované tiskárny lze vidět na obr. 34.



Obr. 34 displej tiskárny s pozitivními výsledky testů jednotlivých komponent

Dalším krokem bude otestovat přesnost tisku na testovacích výtiscích, které budou porovnány vůči výtiskům tisknutých na původní verzi tiskárny. Dále bude modifikovaná tiskárna oproti původní verzi srovnána z hlediska stability a tuhosti volného konce osy X pod různým zatížením.

Testovat přesnost lineárního vedení na jednotlivých osách by nebylo přínosné, protože by testy vedly k nic neříkajícím výsledkům. Přesnost tiskárny je ovlivněna více faktory, jako například smrštění výtisku při rychlejším tisku, teplotě okolního vzduchu během tisku a vlhkosti filamentu. Za zmínku také stojí vliv kalibrace. Přesnost výtisků je významně ovlivněna správně zkalibrovanou tiskárnou, zejména zkalibrovanými hodnotami linear advance. Rozdíl mezi zkalibrovanými a nezkalibrovanými hodnotami linear advance lze vidět na obr. 35.



Obr. 35 Výtisky se zkalibrovanými a nezkalibrovanými hodnotami linear advance [25]

3.6 Porovnání kvality tisku na testovacích výtiscích

Pro porovnání kvality a přesnosti tisku byly vytisknuty 3 testovací výtisky. Každý z nich se zaměřuje na jiné aspekty kvality tisku. Všechny testovací výtisky budou tištěny ze stejných souborů, materiálů pro tisk i na stejné hodnoty input shaping a pressure advance. Pro porovnání přesnosti tisku byl zvolen materiál PLA typu blend, na kterém jsou nejvíce vidět nedostatky tisku a artefakty v tiskové rovině XY. Výtisky na původní verzi tiskárny byly tištěny na školní tiskárně (obr. 36) dostupné v učebně s 3D tiskárnami.



Obr.36 3D tiskárna Průša Mini, na které byly tištěny testovací výtisky

3.6.1 3Dbenchy

Prvním testovacím výtiskem je lodička 3Dbenchy, na které jsou jasně vidět nepřesnosti tisku. Nastavení tisku bylo upraveno tak, aby lodička byla vytištěna kvalitně, ale zároveň vcelku rychle. Celková doba tisku jedné lodičky byla 46 minut. Pro tisk lodičky byl zvolen prusament PLA blend barvy Viva la bronze, pro svůj lesklý povrch, na kterém jsou více vidět neduhy tisku. Vytištěné lodičky, jak na původní, tak i upravené verzi tiskárny jsou vidět na obr. 37.



Obr. 37 lodička 3Dbenchy, vlevo tisknuta na původní verzi tiskárny, vpravo na modifikované

Z obou výtisků je na první pohled patrné, který byl tištěn na modifikované verzi tiskárny. Oproti původní verzi tiskárny má bez větších nedostatků vytištěné perimetry na své přídi.

Na stěnách obou lodiček jsou patrné opakující se vlnky, které jsou důsledkem použitých méně přesných krokových motorů, které mají velikost úhlu jednoho kroku $1,8^\circ$. Tento nedostatek výrobci řeší použitím přesnějších motorů s dvakrát menší velikostí úhlu jednoho kroku o velikosti $0,9^\circ$. Tento nedostatek je známý pod zkratkou VFA z anglického názvu vertical fine artifacts.

3.6.2 Tenkostěnný kvádr

Dalším testovacím výtiskem, který otestuje kvalitu stěn výtisku je kvádr, který bude tištěný pouze z 2 perimetrů a otestuje tak kvalitu stěn výtisku v celé délce osy Z. Pro tisk byl zvolen modrý filament, značky Prusament Blend royal blue, jehož výtisky mají stejně jako předchozí filament lesklý povrch. Na rozdíl od lodičky benchy, která byla tištěna při vyšších rychlostech je rychlost tisku tohoto testovacího objektu ovlivněna nastavením chlazení filamentu, který je při tisku zpomalen, pokud je doba tisku jedné vrstvy kratší než 12 sekund. Toto nastavení je možné změnit, ale pro tento experiment bude ponecháno, vzhledem k pouze 2 perimetrům a žádné výplni. Pro stabilitu tohoto výtisku po celou dobu tisku byl přidán k první vrstvě límec o šířce 5 mm a odsazení 0,1 mm od stěny výtisku pro jeho snadné odstranění. Kvádr tištěný jak na původní, tak upravené verzi je vidět na obr. č. 38, s detailnější zobrazením na obr. 39 a 40.



Obr. 38 Tenkostěnné kvádry, vlevo tiště



Obr. 39 Detailní přiblížení výtisku modifikované tiskárny



Obr. 40 Detailní přiblížení výtisku původní tiskárny

Z obou testovacích výtisků je na první pohled patrné, který byl tištěn na upravené tiskárně. Oproti kvádru tisknutém na původní verzi tiskárny má ten, který byl tisknut na upravené hladší perimetry, bez větších artefaktů a rozdílů mezi jednotlivými vrstvami díky zařízení Wobblex. Dále jsou na výtisku modifikované tiskárny více patrné VFA, vzhledem k tomu, že modifikovaná tiskárna lépe zvládá výkyvy během tisku. Viditelnost VFA artefaktů na původní verzi tiskárny je nižší z důvodu menší tuhosti konstrukce osy Z s osou X a větší viditelnosti rozdílů mezi jednotlivými vrstvami.

Na kvádru tisknutém na upravené tiskárně je také vidět čára, která je patrná na několika vrstvách a postupně jde od jedné strany k druhé. Zřejmě se jedná o nedostatek, který zapříčinilo použité levné lineární vedení. Konkrétně vadná kulička na některém z vozíků osy Y. Vzhledem k projevení pouze na tomto testovacím výtisku, nebude potřeba tento nedostatek opravovat. Oprava by mohla být provedena rozebráním vozíku a výměnou vadné kuličky za novou, nebo výměnou celého vozíku.

3.6.3 Výtisk testující přesnost tiskárny

Pro otestování přesnosti tiskárny byl navrhnout díl, na kterém byly vytvořeny vůle mezi válci tištěné v nerozebíratelné sestavě. Velikosti jednotlivých vůlí mezi válečky a tělesem testovacího objektu jsou: 0,4 , 0,3 , 0,2 , 0,15 a 0,1 mm. Stejně jako všechny předchozí výtisky byl i tento tištěn na obou tiskárnách ze stejného materiálu i souboru pro tisk. Výtisky testující přesnost tiskárny lze vidět na obr. 41.



Obr. 41 Nerozebíratelná sestava testující přesnost tiskárny, vlevo díl tisknutý na původní tiskárně, vpravo na upravené verzi tiskárny

Na objektu tištěném na modifikované tiskárně se podařilo rozpohybovat všechny válečky, zatímco na tom, který byl tisknut na původní verzi se nepodařilo rozpohybovat válečky s vůlí o velikosti 0,15 a 0,1 mm. Modifikovaná tiskárna tak dokáže vůči sobě vytisknout objekty s vůlí 0,1 mm bez toho, aby nešly rozebrat, případně do sebe nepasovaly.

3.7 Testování tuhosti volného konce ramene osy X

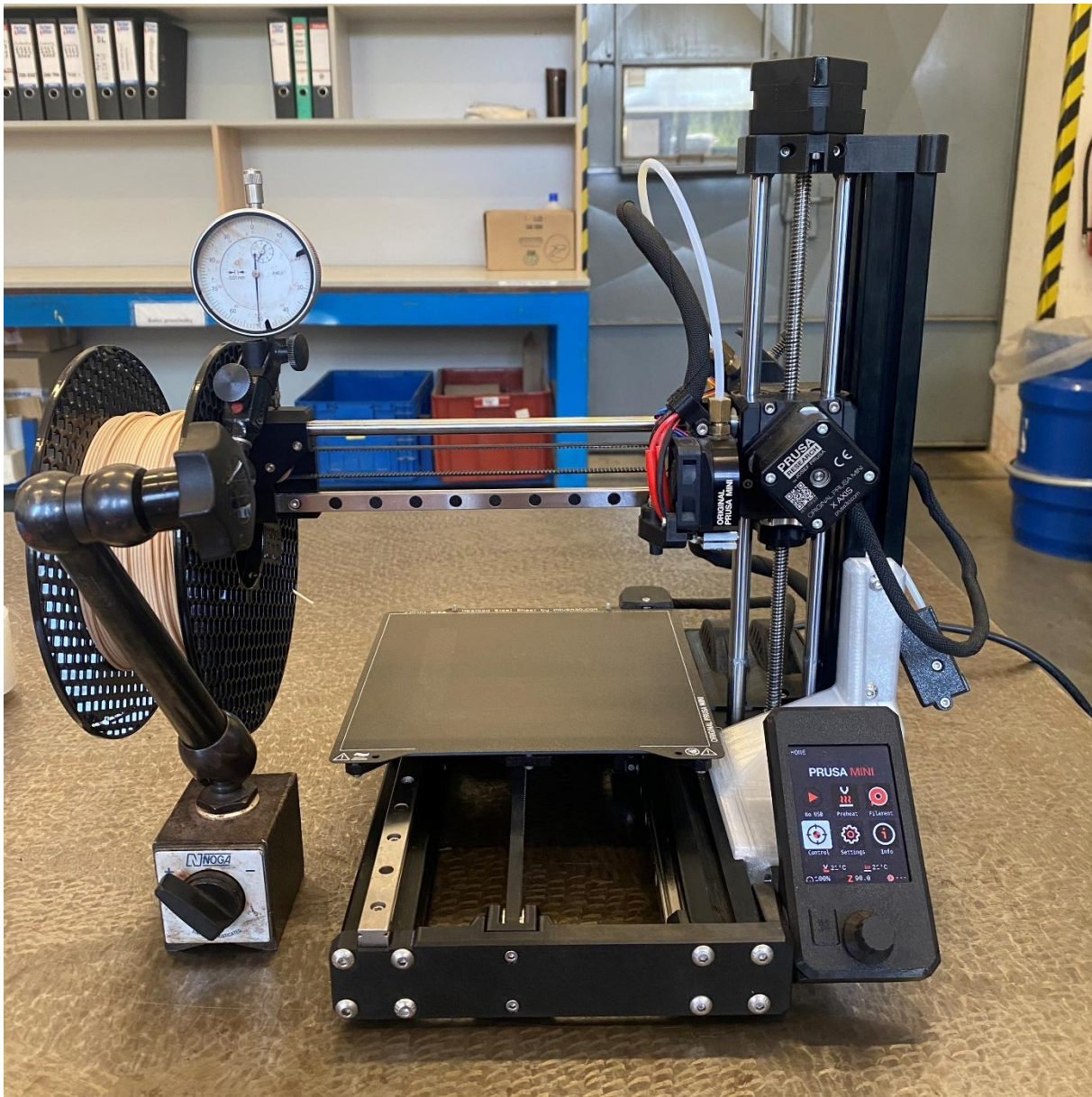
Vzhledem k přidání dodatečného spoje mezi konstrukci rámu osy Y s osou Z, je vhodné otestovat zlepšení stability volného konce osy X, která je závislá od osy Z. Stabilita volného konce osy X bude otestována pod jeho zatížením s použitím dodatečného spoje, i bez něj.

Pro zatížení volného konce ramene osy X byl navržen díl, na který bude položeno závaží o hmotnosti 500 g v podobě cívky s filamentem. Průhyb volného konce bude měřen pomocí úchylkoměru. Dále bude zaznamenána vůle a posunutí volného konce při přemístění tiskové hlavy po ose X z jedné strany na druhou. Při zatížení volného konce bude extruder v pozici co nejbližší k pojezdu osy Z. Veškeré měření budou provedeny ve 3 výškách, a to v 10, 90 a 180 mm. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v následující tabulce č. 1.

Tab. 1 Naměřené hodnoty experimentu

Měření	Pozice tiskové hlavy v ose Z [mm]	Vůle [mm]	Pos. při přemístění tisk. hlavy [mm]	Posunutí při zatížení 500 g [mm]
S dodatečným spojem	10	0,02	0,08	0,4
	90	0,02	0,08	0,4
	180	0,05	0,08	0,4
Bez dodatečného spoje	10	0,05	0,1	0,5
	90	0,05	0,1	0,5
	180	0,1	0,1	0,5

Z naměřených hodnot lze říct, že tiskárna i bez dodatečného spoje dobře odolává zatížení na volném konci ramene osy X, kdy při zatížení v různých výškách jsou naměřené stejné hodnoty. Díky namontovanému dodatečnému spoji byla v každém případě zlepšena vůle i posunutí volného konce osy X při přemístění tiskové hlavy z jedné strany na druhou. Tiskárnu během testování lze vidět na obr. 42.



Obr. 42 Tiskárna v průběhu testování ve výšce 90 mm s cívkou a povoleným dodatečným spojem
Při vypočtení tuhosti z obecného vztahu:

$$K = \frac{F}{\delta},$$

kde: K – tuhost [N/mm],

F – síla zatížení [N],

δ – vzdálenost posunutí [mm].

Tuhost volného konce osy X 3D tiskárny byla zlepšena o 25 % z původních $9,81 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ na $12,26 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$.

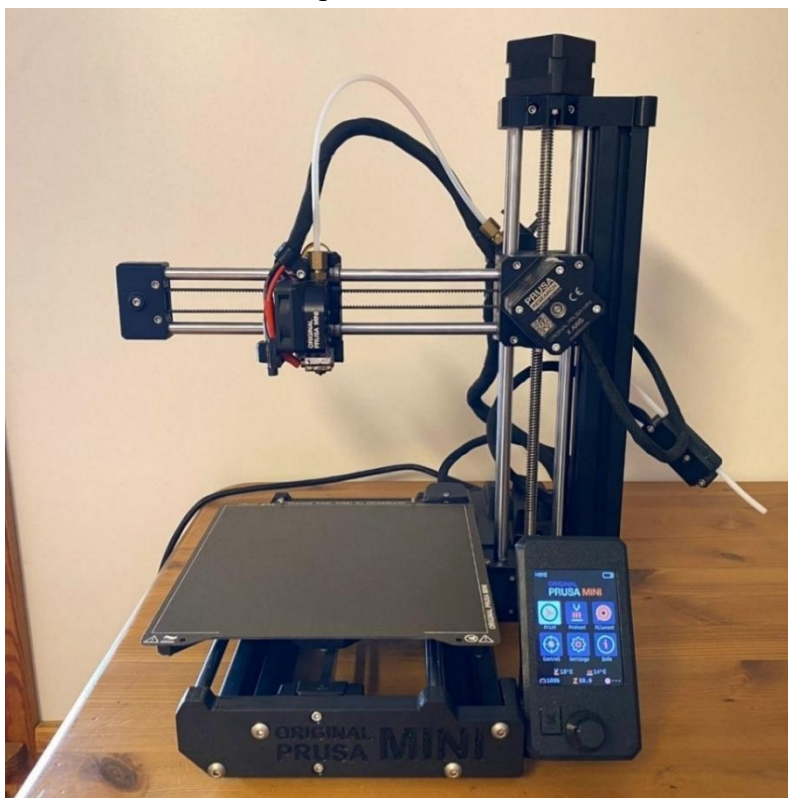
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Z provedených testování lze říct, že veškeré modifikace měly pozitivní vliv na kvalitu a přesnost tisku. V následující tabulce č. 2 jsou shrnuty veškeré náklady na modifikovanou tiskárnu. Pro srovnání celkových nákladů na navrženou modifikaci obsahuje tabulka i cenu nové tiskárny Průša Mini.

Tab. 2 Náklady na jednotlivé komponenty s porovnáním

Komponenta	Náklady
Použitá tiskárna	6 500 Kč
Lineární kolejnice s vozíky	2 100 Kč
Zařízení pro pohyb trapézové matice Wobblex WS8	470 Kč
Závitové vložky	540 Kč
Tiskový materiál	1 300 Kč
Spojovací materiál M3, M5	350 Kč
Součet nákladů na modifikaci	4 760 Kč
Použitá tiskárna	6 500 Kč
Celkové náklady na modifikovanou tiskárnu	11 260 Kč
Náklady na novou tiskárnu Průša Mini	11 539 Kč

Cena použité tiskárny se v době psaní bakalářské práce, květnu roku 2025 pohybuje okolo 5000 Kč. Lze však narazit na levnější, případně dražší podle stavu konkrétní tiskárny, případně dodatečných komponent a tiskových materiálů, které inzerující často nabízejí zároveň s použitou tiskárnou. Tiskárna použitá k modifikaci v rámci této bakalářské práce byla pořízena v září roku 2023 z inzerátu na webovém portálu bazoš.cz za 6500 Kč.



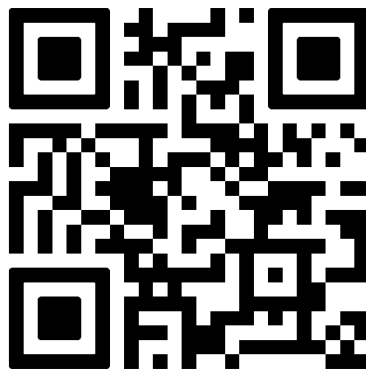
Obr.43 Použitá FDM 3D tiskárna Průša Mini

Náklady na lineární vedení byly výrazně sníženy zvoleným lineárním vedením, které bylo pořízeno na webu Aliexpress od prodejce CNA Mechanical Parts Store, výrobce RDBB z korozivzdorného materiálu, dle americké normy AISI 440C. V případě pořízení lineárního vedení od renomovanějšího výrobce lineárních vedení, jako je například Hiwin, nebo Misumi by náklady na lineární vedení byly násobně vyšší, v řádu vyšších jednotek tisíc korun. Vzhledem k soukromému, domácímu použití upravené 3D tiskárny se však vyplatilo pořídit levnější lineární vedení od čínského výrobce. Vzhledem k tomu, že bylo lineární vedení pořízeno v delších velikostech a následně zakráčeno by náklady byly při opětovném pořízení, díky kratší délce zhruba o 100 Kč nižší.

Náklady na spojovací materiál uvedené v tabulce 1 jsou za přesný počet potřebných šroubů, pořízené u místního prodejce spojovacího materiálu. Cena u jiných prodejců se může mírně lišit. Pořízené šrouby byly z korozivzdorné oceli.

Uvedené náklady na tiskový materiál jsou za 2 cívky materiálu PETG a ASA o hmotnosti 1 kg, které bohatě postačí na vytisknutí všech tištěných dílů navržené modifikace, zároveň na každé zbudě většina materiálu, podle hustoty výplně a počtu perimetrů tištěných dílů modifikace. Materiál k tisku navržených dílů byl použit z vlastních zdrojů 3D tiskařské dílny. K výrobě navržené modifikace tak nebylo potřeba kupovat žádný další materiál, než který byl k dispozici. Vzhledem k vlastní výrobě modifikace pro vlastní tiskárnu by kalkulace ceny tištěných dílů nebyla přínosná. Navržená modifikace je vhodná především pro hobby tiskaře, kteří si modifikaci vyrobí sami pro sebe. Oproti pořízení tiskárny, která již z výroby má použité lineární vedení v podobě kolejnic a vozíků se tak navržená modifikace spíše nevyplatí, vzhledem k časové náročnosti a své složitosti.

Kompletní model tiskárny ve formátu STL a STEP je veřejně dostupný ke stažení na webovém portálu Printables. Odkaz na webovou stránku se sestavou navržené modifikace je dostupný také pod QR kódem, který je na obr. 44.



Obr. 44 QR kód s odkazem na navrženou modifikaci, nahranou na web Printables

ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byla navržena modifikace lineárního vedení FDM 3D tiskárny Průša Mini, která byla upravena pro použití kolejnic s vozíky, namísto původních ocelových tyčí s lineárními valivými ložisky. Pro použití lineárního vedení v podobě kolejnic a vozíků byly upraveny téměř všechny tištěné díly původní tiskárny, které byly potřebné k jeho použití. Pro osu X byla zvolena kolejnice miniaturního lineárního vedení MGNR9 s delším vozíkem MGN9H, zatímco pro osu Y vzhledem k většímu dostupnému prostoru bylo možné použít kolejnice MGNR12, kde byly na levé straně použity dva kratší vozíky MGN12C a na pravé straně byl použit delší vozík MGN12H. Vzhledem k úpravě dílů pojezdu osy Z byly tyto díly upraveny pro použití zařízení k pohybu trapézové matky v rovině, které zajišťuje hladší pohyb pojezdu osy Z a odstraňuje nepřesnosti tisku pramenící z křivého trapézového šroubu osy Z. Z důvodu nízké tuhosti volného konce osy X původní verze tiskárny byl navržen také dodatečný díl spoje mezi konstrukcí rámu osy Y s osou Z.

Vzhledem k tomu, že byla modifikovaná tiskárna během návrhu nových dílů rozebrána byly tištěné díly konstrukce tisknuty na jiné dostupné FDM 3D tiskárně, a to na Průši MK4. Veškeré díly jsou však tisknutelné i na původní verzi 3D tiskárny Průša Mini. Při úpravě další tiskárny by tak mohly být tištěny na tiskárně určené k modifikaci. Namísto vkládaných čtvercových matic byly nové navržené díly upraveny pro použití závitových vložek M3 a M5, které byly zataveny do tištěných dílů pomocí hrotové pájky.

Pro porovnání kvality tisku původní verze tiskárny s modifikovanou byly zvoleny 3 objekty. Na každém z tištěných objektů bylo na první pohled zřejmé, který byl tištěn na upravené verzi. Modifikovaná tiskárna lépe zvládá rychlejší tisk, zároveň má méně nedostatků na svých výtiscích. Na tenkostěnném kvádru se projeví nedostatky pořízeného levnějšího lineárního vedení od čínského výrobce z důvodu vadné kuličky na jednom z vozíků, konkrétně na ose Y. Tento nedostatek lze snadno opravit rozebráním vozíku a vyměněním vadné kuličky ložiska, vzhledem k projevení pouze na tenkostěnném kvádru není potřeba tento nedostatek opravovat. Dalším krokem bylo testování tuhosti volného konce osy X s osou Z, která byla podle provedených měření posunutí volného konce osy X pod zatížením 500 g dodatečným spojením zlepšena o 25 % z původních 9,81 N/mm na 12,26 N/mm.

Navržená modifikace je vhodná především pro stávající majitele 3D tiskárny Průša Mini, kteří si chtějí upravit svou tiskárnu a zlepšit tak kvalitu jejího tisku při vyšších tiskových rychlostech, který 3D tiskárna zvládá po přidání funkcí pro rychlejší tisk, jako je input shaping a pressure advance.

Celkové náklady na navrženou modifikaci byly při modifikování použité tiskárny a použití levného lineárního vedení nižší, než náklady na novou 3D tiskárnu Průša Mini. I tak je ale navržená modifikace vhodná především pro stávající majitele tiskárny, než pro někoho, kdo chce 3D tiskárnu, která naplno využije lineární vedení v podobě kolejnic a vozíků. V takové případě je výhodnější pořídit novější tiskárnu, která má kolejnice s vozíky již z výroby.

Model sestavy, který je výsledkem této bakalářské práce byl nahrán na komunitní 3Dtiskařský web Printables, kde je zdarma ke stažení. Model si tak může kdokoliv stáhnout, případně upravit podle svých potřeb.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ČVUT FAKULTA STROJNÍ. *3D tisk a jeho možnosti*. Online. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/>. [cit. 2025-05-22].
 2. STRÍTESKÝ, Ondřej; PRŮŠA, Josef a BACH, Martin, 2020. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research. ISBN 9788090779808.
 3. *Loop MK3S+ Mod Update*. Online. In: . Dostupné z: https://www.reddit.com/r/prusa3d/comments/uz11iv/loop_mk3s_mod_update/. [cit. 2025-05-22].
 4. *Bear modification Prusa MK3S*, 2019. Online. In: Reddit. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/prusa3d/comments/bwj72z/ive_reached_the_end_game_with_my_prusa_mk3_s/. [cit. 2025-05-22].
 5. *3D tiskárna Original Prusa MINI+*. Online. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/castecne-sestavena-3d-tiskarna-original-prusa-mini-4/>. [cit. 2025-05-22].
 6. *What are support structures in 3D printing?* Online. In: . Dostupné z: <https://www.3dsculplab.xyz/Blog/post/What-are-support-structures-in-3D-printing>. [cit. 2025-05-22].
 7. *3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?*, 2019. Online. In: Svět Hardware. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>. [cit. 2025-05-22].
 8. SCHWAAR, Carolyn, 28 Aug 2024. *Complete Overview of the Types of 3D Printers*. Online. All3dp. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>. [cit. 2025-05-22].
 9. SCHWAAR, Carolyn, 2 Aug 2024. *The Complete Guide to SLS 3D Printing*. Online. All3DP. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/>. [cit. 2025-05-22].
 10. CHEE KAI CHUA, Chua a KAH FAI LEONG, Leong. *3d Printing And Additive Manufacturing: Principles And Applications - Fifth Edition Of Rapid Prototyping*. 5th edition. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2016. ISBN 9789813146754. Dostupné z: <https://doi.org/10.1142/10200#t=oc>.
 11. *Bambu Lab X1 Series: Welded Steel XY Chassis*, 2025. Online. In: Bambu Lab. Dostupné z: <https://bambulab.com/en/x1>. [cit. 2025-05-22].
 12. *Přímý extruder vs. bowdenový extruder*, b.r.. Online. 3DJake. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/info/poradce-recenze-a-dalsi/primy-extruder-vs-bowdenovy-extruder>. [cit. 2025-05-22].
 13. HULLETTE, Tobias, Apr 2 2024. *Direct Drive vs Bowden Extruder: The Differences*. Online. All3DP. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>. [cit. 2025-05-22].
 14. *Tisková podložka Original Prusa MINI+*, b.r.. Online. In: (C) PRUSA RESEARCH - PRUSA3D.COM. Prusa3D. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/pro-media_987/. [cit. 2025-05-22].
 15. O'CONNELL, Jackson, Jul 8 2023. *The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More*. Online. In: All3DP. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scarab-corexy-polar/>. [cit. 2025-05-22].
 16. *Ender-5 Pro*, b.r.. Online. In: Creality. Dostupné z: <https://www.creality.com/products/ender-5-pro-3d-printer>. [cit. 2025-05-22].
-

-
17. *Creality K1 CoreXY Motion Assembly CAD* [@Henlor], 2024. Online. 12. února 2024. Dostupné z: Printables, <https://www.printables.com/model/612925-creality-k1-corexy-motion-assembly-cad>. [cit. 2025-05-22].
 18. *TRILAB DeltiQ*, b.r.. Online. Trilab3d. Dostupné z: <https://manual.trilab3d.com/dq-cs-02-vase-nova-tiskarna-trilab-deltiq/>. [cit. 2025-05-21].
 19. *RepRap Morgan Pro*, 2015. Online. In: . 28.5.2015. Dostupné z: <https://3dpl.tistory.com/entry/RepRap-Morgan-Pro>. [cit. 2025-05-21].
 20. MATERIALPRO3D, b.r. *FLEXI - filamenty*. Online. MATERIALPRO3D. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/flexibilni-material/>. [cit. 2025-05-21].
 21. GRAMES, Emmett; LIND, Lee a MAGAROTTO, Gloria E., 5 Sep 2024. *30 Best 3D Printer Upgrades & Mods*. Online. In: All3dp. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/best-3d-printer-upgrades-mods/>. [cit. 2025-05-21].
 22. KONDO, Hironori a O'CONNELL, Jackson, 28 Feb 2022. *Linear Rail (3D Printer): Really Better or Just a Hype?* Online. In: All3dp. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/linear-rail-3d-printer-really-better-or-just-a-hype/>. [cit. 2025-05-21].
 23. *Úzký vozík MGN*, b.r.. Online. In: . Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/miniaturni-vedeni/236_uzky-vozik-mgn. [cit. 2025-05-21].
 24. *SP-5 WobbleX WS8 Interface*, 2023. Online. In: Printables. 21. března 2023. Dostupné z: <https://www.printables.com/model/429634-sp-5-wobblex-ws8-interface?lang=cs>. [cit. 2025-05-21].
 25. *Linear Advance*, b.r.. Online. In: Prusa3D. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/linear-advance_2252. [cit. 2025-05-21].
 26. FOŘT, Petr a KLETEČKA, Jaroslav, 2007. *Autodesk Inventor: funkční navrhování v průmyslové praxi*. 2., aktualiz. vyd. Učebnice. Brno: Computer Press, a. s. ISBN 978-80-251-1773-6.
 27. *The 3-D Printer Manufacturer's Guide to High-Performance Linear Motion*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.schneeberger.com/en/us/white-paper-high-performance-linear-motion/>. [cit. 2025-05-22].
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
K	tuhost	[N/mm]
F	síla	[N]
δ	posunutí	[mm]

Zkratky

Označení	Legenda
3D	trojrozměrný
RP	Rapid prototyping
FDM	Fused deposition modeling
FFF	Fused filament fabrication
SLA	Stereolitography
MSLA	Masked stereolitography
SLS	Selective laser sintering
EBM	Electron beam melting
DLP	Direct light processing
LBPF	Laser powder bed fusion
CAM	Computer aided manufacturing
VFA	Vertical fine artifacts

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Sestava navržené modifikace ve formátu step
Příloha 2	Technický list materiálu ASA
Příloha 3	Technický list materiálu PETG

SEZNAM VÝKRESŮ

Název výkresu	označení výkresu
Sestava modifikace L.V. 3D tiskárny Průša Mini	2025-BP-238862-01
Kolejnice pro modifikaci L.V.	2025-BP-238862-02



Technický list

ASA

Použití	Struna pro 3D tisk technologií FDM (FFF).
Materiál	Acrylonitrilstyren acrylate, ropný produkt
Průměr	1,75 mm
Tolerance	± 0,05 mm
Váha	0,75 kg netto ± 5 % / 0,9 kg brutto ± 5 %
Balení	Vakuováno v zipovém sáčku, baleno v papírové krabici chráněno LDPE fólií.
Barva	Viz www.filament-pm.cz
Rozpouštědla	Aceton

Tiskové parametry

Teplota Hotend	240 - 260 °C
Teplota podložky	100 - 110 °C
Podložka	Kapton, Ultem, PET folie, běžně používané pro FDM tisk
Ofuk objektu	Maximálně 30%
Trysky	Všechny průměry
Tiskový prostor	Otevřený / Uzavřený

Parametry materiálu

Teplotní	Teplota měknutí	ISO 306	96 °C
	Teplota měknutí při zátěži	ISO 75	87 °C
Mechanické	Rázová síla	ISO 179	12 kJ/m ²
	Pevnost v ohybu	ISO 178	1 800 MPa
Fyzické	Hustota	ISO 1183/B	1,07 g/cm ³
	Index toku taveniny	ISO 1133	20 g/10 min



Filament PM

Haňovice 18, 783 21 Česká republika

IČ: 00147346

tel. +420 585 100 308

e-mail: info@filament-pm.com

www.filament-pm.cz

Filament

Verze: 1.1
Poslední aktualizace: 16-02-2022

PRUSA
POLYMERS
by JOSEF PRUSA

Technický list

Prusament PETG by Prusa Polymers



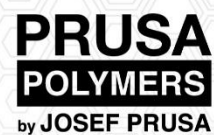
Identifikace

Jméno výrobku	Prusament PETG
Chemický název	Polyethylene Terephthalate Glycol Copolymer
Použití	FDM/FFF 3D tisk
Průměr	1,75 ± 0,02 mm
Výrobce	Prusa Polymers a.s., Prague, Czech Republic

Doporučená tisková nastavení

Teplota trysky [°C]	250 ± 10
Teplota vyhřívané podložky [°C]	80 ± 10
Rychlost tisku [mm/s]	až 200
Rychlost ventilátoru [%]	50
Druh podložky	saténový tiskový plát; práškový tiskový plát; hladký PEI plát*
Dodatečné info	Obecně není vyžadován límec

*) s lepicí tyčinkou



Typické vlastnosti materiálu

	Typická hodnota	Metoda
MFR [g/10 min]	nelze aplikovat	ISO 1133
MVR [cm ³ /10 min]	nelze aplikovat	ISO 1133
Hustota [g/cm ³]	1.27	ISO 1183
Absorpce vlhkosti 24 hodin [%](1)	0.07	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti za 7 dní [%](1)	0.10	Prusa Polymers
Teplota tvarové stálosti (0.45 MPa) [°C]	68	ISO 75
Teplota tvarové stálosti (1.80 MPa) [°C]	68	ISO 75
Mez pevnosti v tahu pro filament [MPa]	46 ± 1	ISO 527
Tvrdost - Shore D	74	Prusa Polymers
Pevnost mezi vrstvami [MPa]	18 ± 4	Prusa Polymers

(1) 24 °C; vlhkost 22 %

Mechanické vlastnosti 3D tištěných zkušebních vzorků(2)

Vlastnosti\směr tisku	Horizontální	Vertikální xz	Metoda
Napětí na mezi kluzu [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1.5 ± 0.1	1.6 ± 0.1	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	5.1 ± 0.1	5.1 ± 0.1	ISO 527-1
Pevnost v ohybu [MPa]	66 ± 2	70 ± 1	ISO 178
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	1.7 ± 0.1	1.6 ± 0.1	ISO 178
Průhyb na pevnosti v ohybu [mm]	9.0 ± 0.1	9.3 ± 0.2	ISO 178
Rázová pevnost Charpy [kJ/m ²](3)	NB*	NB*	ISO 179-1
Rázová pevnost Charpy (vrub) [kJ/m ²](4)	6 ± 1	3 ± 1	ISO 179-1

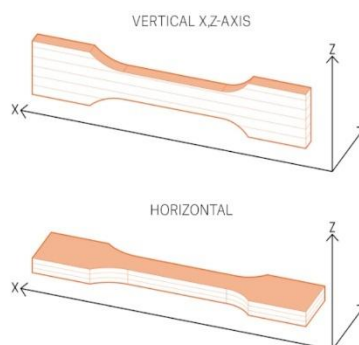
*NB (bez lomu); Zkušební stroj je vybaven kladivem s energií 4 Joule.

**PRUSA
POLYMERS**
by JOSEF PRUSA

(2) K tisku zkušebních vzorků byla použita originální 3D tiskárna Prusa i3 MK3. K vytvoření G-kódu byl použit program Slic3r Prusa Edition 1.40.0 s následujícím nastavením:
Prusament PETG;
Nastavení tisku 0,20 mm FAST (vrstvy 0,20 mm);
Solid Layers Top: 0, Bottom: 0;
Perimeters: 2;
Infill 100% rectilinear;
Print Speed 200 mm/s;
Nozzle Temperature 250 °C all layers;
Bed Temperature 80 °C all layers;
Ostatní parametry jsou nastaveny jako výchozí.

(3) Vrubová houževnatost Charpy, bez vrubu - směr úderu podle ISO 179-1

(4) Zkouška vrubové houževnatosti Charpy - směr úderu podle ISO 179-1



Zřeknutí se odpovědnosti

Výsledky uvedené v tomto datovém listu jsou pouze pro vaši informaci a srovnání. Hodnoty výrazně závisí na nastavení tisku, zkušenostech obsluhy a okolních podmínkách. Je nutné individuálně zhodnotit vhodnost a možné důsledky použití tištěných dílů. Prusa Polymers a.s. nenesou žádnou odpovědnost za zranění nebo ztráty způsobené použitím materiálu Prusa Polymers. Před použitím materiálu od Prusa Polymers si pozorně přečtěte všechny podrobnosti v dostupném bezpečnostním listu (SDS).