

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE**

**Fakulta strojní**



**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**3D Tisk**

Bakalářská práce

**Autor:** Vojtěch Pohanka

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Pelikán

**Studijní program:** B 2342 Teoretický Základ Strojního Inženýrství

---

Praha 2021

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pohanka** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **466415**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Možnosti úprav FDM 3D tiskáren**

Název bakalářské práce anglicky:

**FDM 3D Printers Modification**

Pokyny pro vypracování:

1. Popis aditivních technologií.
2. Konstrukce dostupných FDM 3D tiskáren.
3. Možnosti úprav těchto tiskáren, návrh instalace vybrané úpravy.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

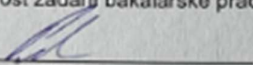
**Ing. Lukáš Pelikán, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

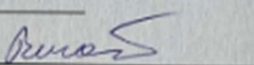
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

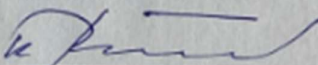
Datum zadání bakalářské práce: **30.10.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.01.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Lukáš Pelikán  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.10.2020  
Datum převzetí zadání

Pohanka  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů dle §60 zákona č. 121/2000 Sb. souvisejícím s autorskými právy a zákona č. 111/1998 o vysokých školách.

Datum: .....

.....

Podpis

## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Lukáši Pelikánovi za věcné připomínky a vstupy při vypracovávání této práce. Dále pak můj velký dík patří mé rodině za podporu a pomoc při studiích.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou 3D tisku. V úvodu jsou popsány nejrozšířenější technologie 3D tisku a stručná historie tohoto poměrně moderního odvětví. Následuje popis technologie FDM 3D tisku, která je praktickou částí práce. Detailní popis je věnován používaným filamentům pro FDM 3D tiskárny s popisem jejich klíčových vlastností, a součástí 3D tiskárny FDM technologie. Praktická část popisuje optimalizaci driveru tiskárny Průša I3 MK3s pomocí 8 diodového TL – smootheru. V této části je popisován způsob implementace TL-smootheru do driveru tiskárny v jednotlivých krocích s přidruženými obrázky. V závěru jsou diskutovány předpokládané výstupy pokusu.

## Klíčová slova

FDM technologie, TL-smoother, driver, 3D tisk

## Abstract

This bachelor thesis focuses on 3D printing. Short preface is describing the most popular technologies and its history in additive manufacturing. Then additive manufacturing divides into six categories that are shortly introduced with its pros and cons provided examples from industry. Furthermore, thorough overview of filament's material and its mechanical characteristics are specified. Moreover, specifications of each necessary FDM 3D printer part are included. Practical part of the thesis is concerned about optimization of FDM 3D printer driver using 8 diode's TL – smoother. In addition, thesis contains a Standardize Work Element Sheet, which serves as a guideline to achieve implementation of the chip on your own. Conclusion discusses achieved accomplishments provided visual comparison.

## Key Words

FDM technology, TL-smoother, driver, 3D printing

---

## Obsah

1. Úvod.....	10
2. Historie 3D tisku.....	11
3. Aditivní technologie.....	13
3.1. Rapid prototyping (RP).....	13
3.2. Projekt RepRap .....	14
3.3. Rozdělení aditivních technologií.....	15
3.3.1. Fotopolymerace .....	15
3.3.2. Tryskání materiálu.....	17
3.3.3. Vstřikování pojiva .....	18
3.3.4. Tavení prášku .....	20
3.3.5. Laminování pojivem.....	21
3.3.6. Přímé použití energie.....	22
3.3.7. Extruze materiálu.....	23
4. FDM 3D tiskárny .....	24
4.1. Kinematika pohybu 3D tiskáren.....	24
4.1.1. Kartézská 3D tiskárna.....	25
4.1.2. Delta 3D tiskárna .....	26
4.1.3. SCARA 3D tiskárna (Selective Compliance Assembly Robot Arm).....	27
4.1.4. Polární 3D tiskárna .....	27
4.2. Součásti FDM 3D tiskáren .....	28
4.3. Rám FDM tiskáren .....	29
4.4. Filament.....	29
4.4.1. Poly Actic Acid (PLA) .....	29
4.4.2. Akrylonitril Butadien Styren (ABS).....	30

---

4.4.3.	Poly Ethylen Tereftalát (PET / PETG).....	31
4.4.4.	Polykarbonát (PC) .....	31
4.4.5.	Nylon .....	31
4.4.6.	Termo Plastický Elastomer (TPE).....	32
4.4.7.	High Impact Poly Styren (HIPS).....	32
4.4.8.	Polyvinylalkohol (PVA).....	33
4.5.	Tisková podložka .....	34
4.6.	Extrudér .....	34
4.6.1.	Hotend .....	34
4.6.2.	Chladič.....	35
4.7.	Krokový elektromotor .....	35
4.8.	Driver .....	35
5.	Instalace TL smotheru do driveru 3D tiskárny .....	36
5.1.	Driver .....	36
5.2.	TL Smother .....	37
5.3.	Postup instalace.....	38
5.4.	Výsledky instalace TL Smotheru .....	41
6.	Závěr .....	43
	Seznam použité literatury a zdrojů.....	44

---

## Použité symboly a jednotky

3D	3 dimenzionální
ABS	Akrylonitril Butadien Styren
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
ČVUT	České Vysoké Učení Technické
DED	Direct Energy Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOD	Drop On Demand
EBM	Electron Beam Melting
FFF	Fused Filament Fabrication
FDM	Fused Deposition Modeling
DLP	Digital Light Projector
LOM	Laminated Object Manufacturing
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJ	Material Jetting
NPJ	Nano Particle Jetting
PA	Polyamid
PBF	Powder Bed Fusion
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PS	Polystyreny
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
RP	Rapid Prototyping
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm



SDL	Selective Deposition Lamination
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Tessellation Language
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UV	Ultrafialové světlo
TPE	Termoplastický elastomer

## 1. Úvod

Fenomén 3D tisku se objevil v 70. letech minulého století. Jeho uplatnění je dnes zejména v malosériové výrobě. V dnešní době, která je charakteristická rychlým rozvojem technologií, není překvapivé, že se 3D tisk rychle rozšířil. V posledních letech se významně zlepšila dostupnost této technologie. To rovněž souvisí s uvolněním patentových práv, které brzdily používání nových technologií (např. u technologie FDM skončily patenty až v roce 2007). Stejně tak došlo ke snížení pořizovacích cen tiskáren.

Mnoho firem vidí v této nové technologii potenciál a snaží se ho využít pro svoje specifické potřeby. Často se využívá k otestování malého množství dílů, aby se potvrdila funkčnost prototypu bez potřeby velkých investic. V posledních letech můžeme pozorovat výrazně jednodušší dostupnost technologie. 3D tisk má jednoznačně velký potenciál, ale má samozřejmě svoje omezení ať už z hlediska kvalifikovaného personálu nebo efektivity procesu. Bez ohledu na tyto nevýhody je jasné, že přínosy 3D tisku jsou velké a v budoucnu význam 3D tisku jednoznačně poroste.

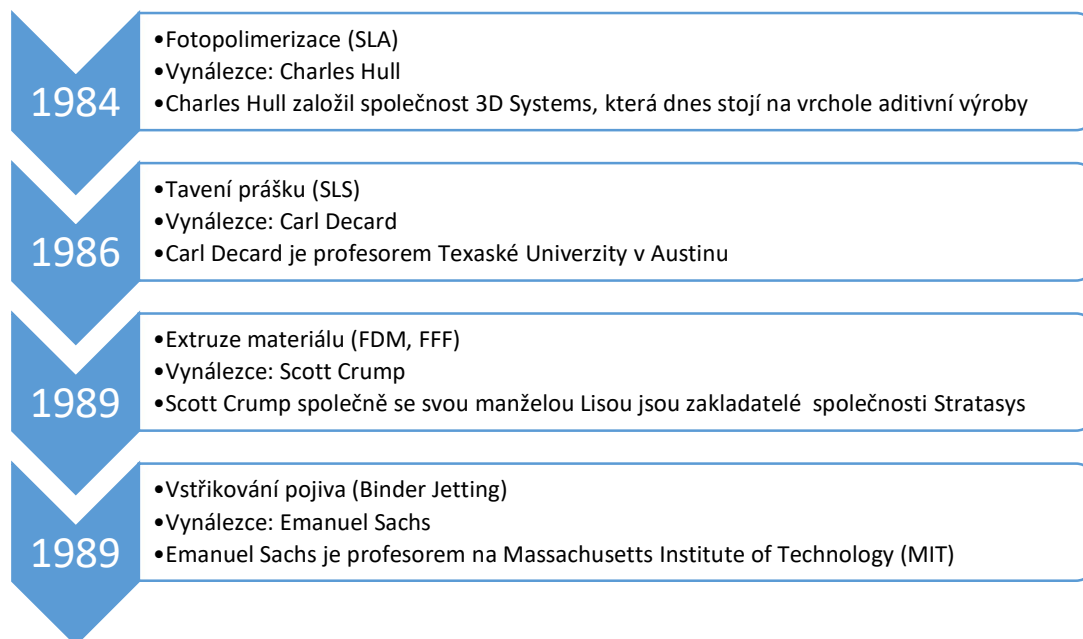
V poslední době se rovněž posouvá výzkum materiálů použitelných pro tisk. Pro tisk se dá použít široký sortiment materiálů. Od plastu, keramiky, kovu nebo dalších. Právě podle vstupního materiálu se definuje používaná metoda tisku. V současnosti je standardem materiálu pro odvětví tzv. filament (plastový drát), kde je k dispozici široké spektrum materiálu a barevných kombinací.

Cílem této práce je přiblížit problematiku technologie FDM 3D tisku. Dále potom objasnit základní rozdělení jednotlivých technologií 3D tisku spolu s jejich stručnou charakteristikou. S úzkým zaměřením na FDM technologii se potom věnuji rozboru jednotlivých součástí tiskáren používajících tuto technologii. Klíčovou částí práce je implementace TL Smoother čipu do šasi 3D tiskárny. TL smoother by měl zamezovat malým defektům, které jsou pozorovatelné okem na oblých plochách výtisků. Experimentální část práce popisuje instalaci čipu a porovnává výsledky výtisků před a po.

## 2. Historie 3D tisku

První zdařilé pokusy o vytvoření 3D objektu s pomocí speciálního softwaru se objevily již v 60. letech v americkém Ohiu a Kalifornii. V 70. letech se potom japonskému vědci a inženýrovi Hideu Kodamovi podařilo uvést první technologii 3D tisku. Tímto se spustila vlna nově přicházejících aditivních technologií ve světě. (1)

Tabulka 1 Patentování technologií aditivní výroby v 80. letech (1)

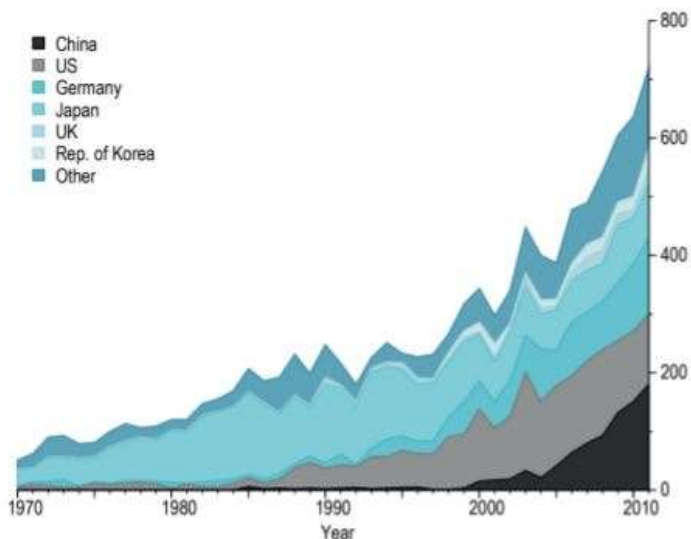


Společnost 3D Systems pod vedením Charlese Hulla uvedla na trh první komerční 3D SLA tiskárnu. Společně s prvenstvím tiskárny přineslo 3D Systems do světa 3D tisku také STL formát souboru, který dodnes slouží jako standardní formát 3D modelu. Jak se široká veřejnost stále více dozvíдалa o možnostech 3D tisku začal se objevovat obor deskového 3D tisku<sup>1</sup>. Snahy univerzit v Bathu, Stanfordu a MIT o šíření 3D kompaktních tiskáren s jednoduchým ovládáním široké veřejnosti vedly ke vzniku open source projektů. Příkladem takových projektů jsou RepRap a FabLab<sup>2</sup>. (1) Kdybychom se podívali na celkové zastoupení patentovaných aditivních technologií ve světě, zjistili bychom, že s 80 % náleží USA, Číně,

<sup>1</sup> Obor deskového 3D tisku umožňuje široké veřejnosti kdekoliv doma provozovat vlastní 3D tiskárnu.

<sup>2</sup> Fabrication Laboratory je projekt profesora Neila Gershenfelda z MIT založený v roce 2001. Smyslem projektu je zakládat open source laboratoře za nízkou cenu a šířit tak technologie aditivní výroby bez vlastnictví předražených patentových práv. (1)

Německu a Japonsku. Zjevný náskok měly Spojené státy, ale v poslední době velice rychle narůstá trend vlastnictví patentů na technologie aditivní výroby především v Číně. (1)



Obrázek 1 Vlastnictví patentů napříč průmyslovými velmocemi v letech 1970–2010 (1)

Od poloviny 80. let byl rozvoj 3D tisku značně omezován rychle narůstajícím počtem patentových práv. Jednotliví vynálezci si patentováním práv pro technologie rychle zajistili místo na trhu. Příkladem jsou společnosti 3D Systems (SLA technologie) a Stratasys (FDM technologie). Společnosti, které zároveň vlastnily patentová práva, se rychle umístily na vrcholu průmyslu aditivní výroby a zůstávají tam dodnes. Smutnou skutečností bylo, že patentová práva do jisté míry omezovala také výzkum na poli univerzit, které chtěly zdokonalovat patentové technologie. Po roce 2004 však vypršelo patentové právo na SLA technologii, čímž se umožnilo prorazit na trh jak menším podnikům, tak výzkumníkům univerzit. Dalším milníkem byla expirace patentu na FDM technologii v roce 2007<sup>3</sup>. Pojďme se tedy s jednotlivými technologiemi seznámit. (1)

---

<sup>3</sup> V roce 2004 Adrian Bowyer zahájil open source projekt RepRap jako profesor z univerzity v Bath na strojní fakultě. Mimo jiné používal ještě platně licencovanou technologii FDM tisku, Dnes mnoho RepRap tiskáren pracuje na základě zdrojového kódu, který byl do roku 2007 patentován firmě Stratasys. Aby menší firmy mohly volně prodávat RepRap tiskárny změnili název používané technologie na Fused Filament Fabrication (FFF). Proto naleznete název této technologie ve dvou různých označení. (1)

### 3. Aditivní technologie

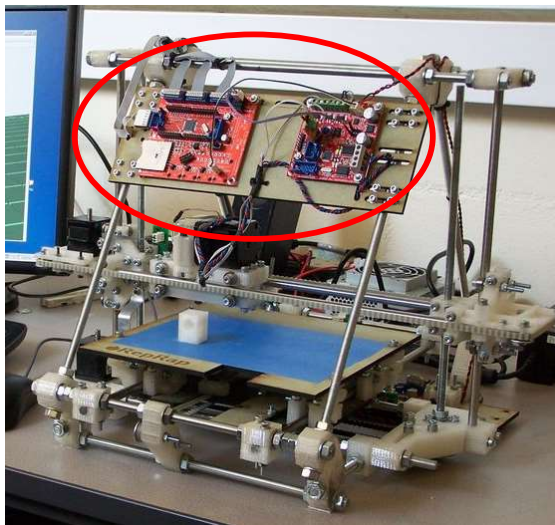
Pod pojmem aditivní technologie si lze představit, jak už pojem aditivní trefně uvádí, přidávání materiálu v jednotlivých vrstvách. Tyto vrstvy jsou definovány pomocí CAM softwarem (např.: Slicer) vytvořeného G kódu. CAM software slouží především k tvorbě kódu pro popsání dráhy tisku, software potom vychází z 3D modelu CAD souboru. Pod skupiny aditivních technologií se řadí celá řada podskupin, jakou je mimo jiné i FDM technologie. (2)

#### 3.1. Rapid prototyping (RP)

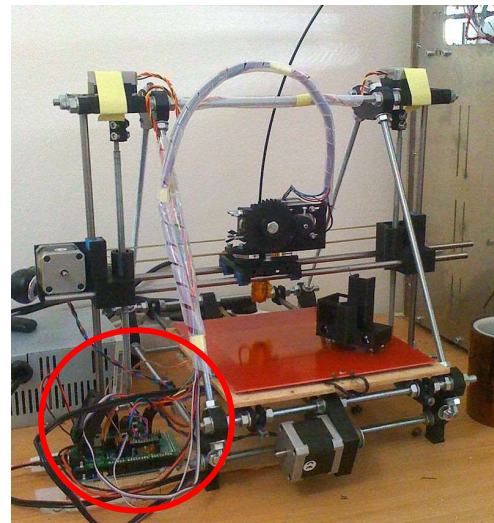
Rapid prototyping spočívá ve výrobě prototypů, které vychází ze 3D modelu vytvořeného vhodným CAD softwarem, který je schopen uložit model ve formátu stl. Dále se stl. model převede do G kódu, který řídicí jednotka tiskárny už převede do formy příkazů, aby z nich byla schopna vytvořit dráhy pro obkreslení tvaru objektu. Jak už název napovídá výhodou je především rychlost výroby modelu. Rapid prototyping je vhodný především pro výrobu modelů, které se podrobněji testují na skutečné chování v praxi, funkčnost dílů. Výrobky technologie Rapid Prototyping nelze používat jako funkční díly v průmyslu, protože by bylo nutné je post procesově upravovat, aby vyhověly technickým parametrům. Rapid Prototyping je skvělým nástrojem pro inženýry v oboru testování designových řešení v oborech letectví, automobilový průmysl nebo kosmonautika. Například na německé univerzitě v Cáchách byli schopni za 12 měsíců díky technologií rapid prototyping sestrojít a otestovat jednotlivé díly pro nový elektromobil. (3) (4) (1)

### 3.2. Projekt RepRap

Replicating Rapid Prototyper (RepRap) je název mezinárodního projektu s účelem vytvořit tiskárny, které jsou schopny samy sebe replikovat. Jinými slovy jsou to tiskárny, které jsou schopny si vytisknout většinu ze svých konstrukčních dílů. První myšlenku sdílení tiskárny, která se dokáže replikovat, uvedl profesor Adrian Bowyer ze strojní fakulty britské univerzity v Bathu. Profesor Bowyer si byl vědom toho, že tiskárna potřebuje vylepšení, a tak celý projekt zveřejnil na webových stránkách<sup>4</sup> volně přístupných veřejnosti s žádostí o vylepšení. Čímž se spustil projekt RepRap. Samozřejmě, že všechny části replikované tiskárny se nedají vytisknout. Pro zajištění pevnosti rámu musí být přítomné i díly z kovu, které se dají ovšem sehnat ve kterémkoli modelářském obchodě. Dále se dokoupily trysky a krokové elektromotory. V roce 2010 se českému vývojáři Josefu Průšovi podařilo sestavit tiskárnu Prusa Mendel, která zdokonalila původní konstrukci Bowyerovi tiskárny Mendel. Vylepšená verze Prusa Mendel měla jednodušší konstrukci rámu, ložiska byla nahrazena tištěnými jezdcí, které se dali dotisknout, a z obrázku patrné zlepšení bylo v umístění driveru. (2)



Obrázek 2 Tiskárna Mendel



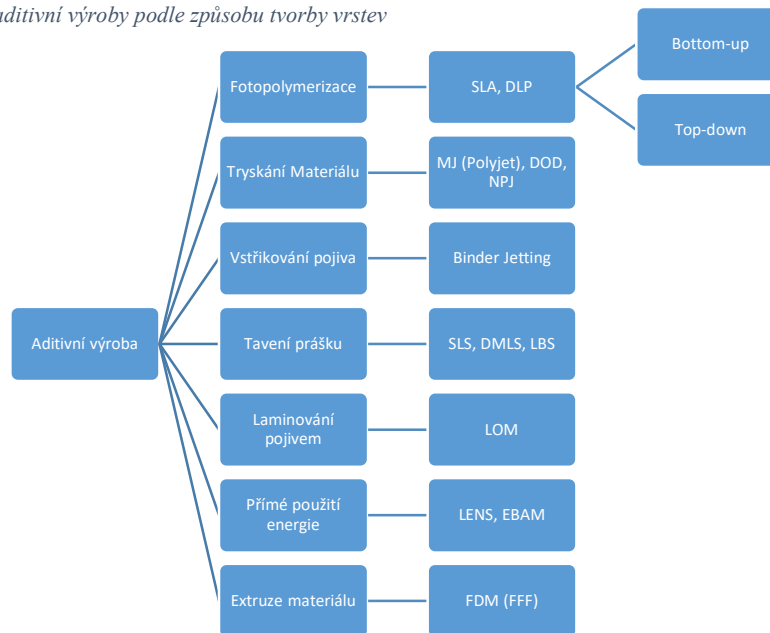
Obrázek 3 Vylepšená verze Prusa Mendel

<sup>4</sup> Adrian Bowyer vytvořil open source, tedy umožnil komukoliv upravovat a zpřístupňovat data.

### 3.3. Rozdělení aditivních technologií

Jednou z největších překážek na poli průmyslové výroby je vhodně aplikovat technologií a správný materiál, aby výroba byla co nejlevnější a zároveň dosahovala dostatečné kvalitativní nároky. Pro účely lepší orientace v jednotlivých technologiích jsem rozdělil aditivní výrobu do sedmi kategorií, popisujících způsob, jakým se tvoří jednotlivé vrstvy výrobku<sup>5</sup>.

Tabulka 2 Rozdělení aditivní výroby podle způsobu tvorby vrstev



#### 3.3.1. Fotopolymerace<sup>6</sup>

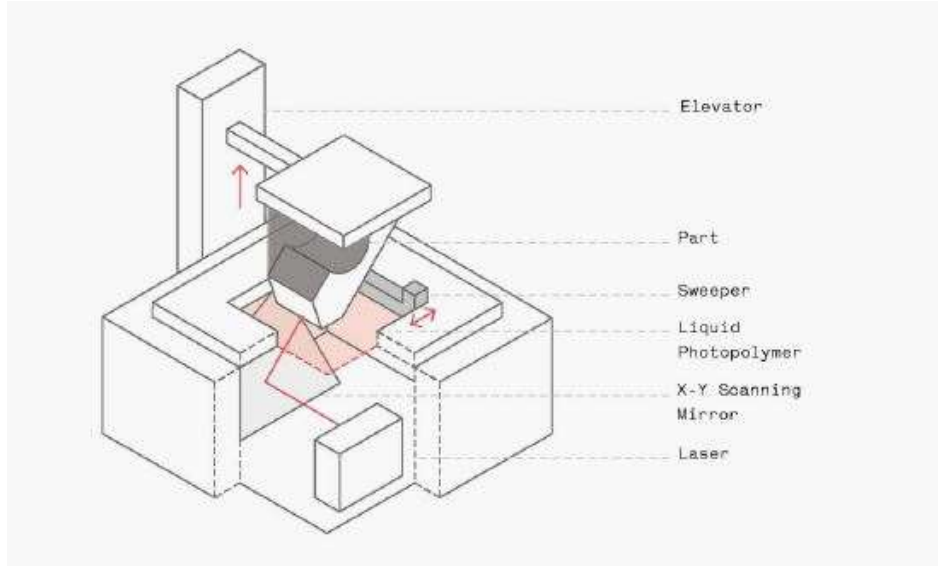
Fotopolymerace používá k nanášení materiálu laser nebo projektor, kterým vytvrzuje resin<sup>7</sup> v nádobě, kam prosvítají paprsky záření. Jak se postupně vytahuje podložka z tekutého resinu, světelný zdroj po vrstvách vytvrzuje objekt do podoby modelu. V této kategorii aditivní výroby byste našli technologie:

- SLA (Stereolitografie) - laser
- DLP (Digital Light Projector) – projektor. (5)

<sup>5</sup> Stejný způsob rozdělení udává také norma ISO/ASTM 52900, která vznikla za účelem sjednocení pojmů aditivní výroby. (30)

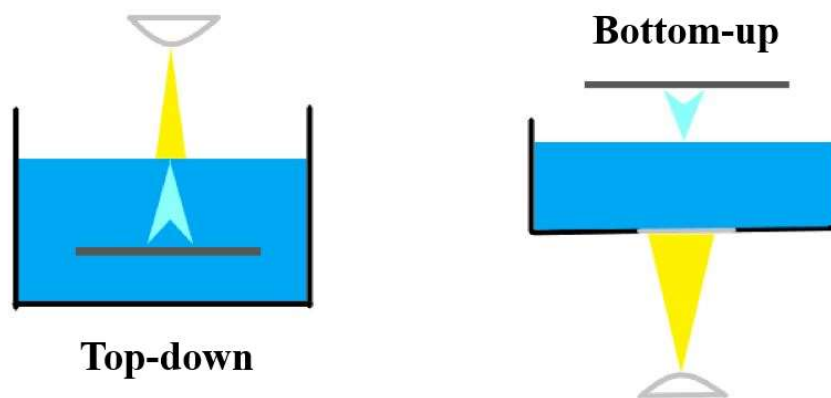
<sup>6</sup> V anglické literatuře se setkáte s pojmem VAT Photopolymerization. VAT v překladu kád', míněno velká nádoba s resinem.

<sup>7</sup> Tekutý materiál na bázi pryskyřice, který po kontaktu se záření tvrdne.



Obrázek 4 Schéma tiskárny využívající technologii stereolitografie (6)

V porovnání s FDM technologií jsou parametry tisku neměnné (např.: intenzita laseru). Většina tiskáren používajících fotopolymeraci tvoří vrstvy 25–100  $\mu\text{m}$  tlusté. Silnou stránkou této technologie je tvorba výrobků s hladkými povrchy a vysokou přesností  $\pm 0,15\text{ mm}$ . Zajímavostí fotopolymerace je možnost tisknout ve dvou směrech zdola nahoru (označovanou jako bottom-up) a seshora dolů (označovanou jako top-down). Zdola nahoru verze fotopolymerace umísťuje zdroj záření pod nádobu s resinem. Kdežto seshora dolů verze má zdroj záření nad nádobou resinu.



Obrázek 5 Schéma tisku seshora dolů (vlevo) zdola nahoru (vpravo)

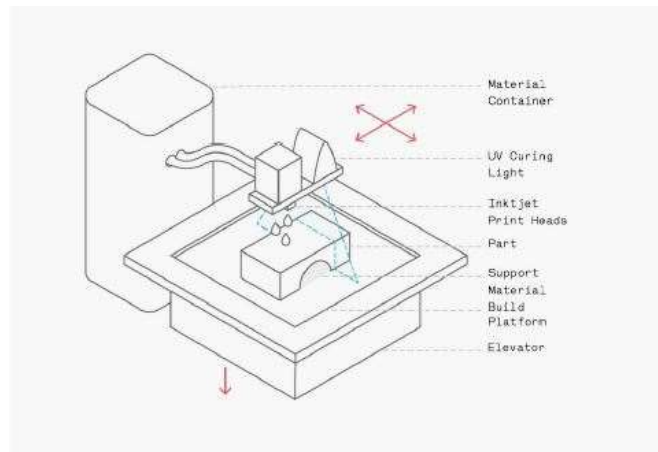


Nevýhody fotopolymerace se liší podle toho, jakým směrem je předmět tištěn. Pokud tisknete zdola nahoru může se snadno vlivem vlastní tíhy dílu stát, že se díl odlepi během tisku. Při tištění seshora dolů se budete nejspíše potýkat s většími prostorovými a materiálovými nároky tiskárny. Problém u tisku seshora dolů může nastat, pokud není zaručena dostatečně tlustá vrstva resinu pro další vrstvu. Valná většina technologie fotopolymerace se uplatňuje v malosériových výrobach nebo slouží k výrobě prototypů pro zdravotnictví. (6)

### 3.3.2. Tryskání materiálu

Tato kategorie zahrnuje oblast technologií, které se principem blíže podobají 2D tiskárnám. Spočívá v tryskání vrstev foto reaktivního materiálu v podobě kapek, které jsou následně vytvrzovány UV zářením. Používá se polymerový, kovový nebo voskový prášek. Z nichž nejpoužívanější je vosk a používá se především pro tvorbu forem například ve šperkařství<sup>8</sup>. Rozlišujeme podle toho v zásadě 3 druhy:

- Materiálové tryskání (MJ), Polyjet – polymer
- DROP-ON-DEMAND<sup>9</sup> (DOD) – vosk, resin
- Tryskání nano-částic (NPJ) – kovový prášek



Obrázek 6 Tryskání materiálu (6)

<sup>8</sup> Tuto metodu, známou také jako ztracený vosk, používají klenotníci na odlévání šperků. Při odlévání roztaveného kovu se vosková forma roztaví a zůstane pouze šperk.

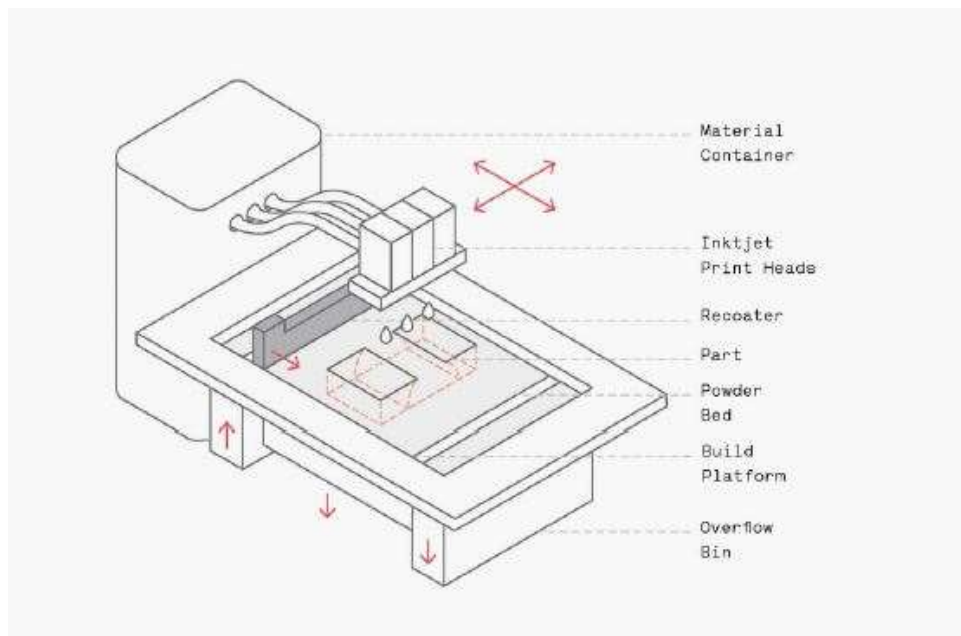
<sup>9</sup> DROP ON DEMAND což z anglického překladu znamená TRYSKÁNÍ-NA-PŘÍKAZ znamená, že materiál se tryská z tiskařské hlavy na podložku dle příkazů kódu z CAM softwaru tekutý vosk. Ten je ve formě malých kapiček pomocí UV záření vytvrzován.

Tyto technologie dokážou vytvářet velmi přesné a hladké kvalitativně náročné výrobky. Typická tloušťka jedné vrstvy se pohybuje řádově pár desítek  $\mu m$ . Nevýhodou však je dlouhá doba tisku, vysoká pořizovací cena jak tiskárny, tak materiálů. Zastoupení technologie vstřikování materiálů má široké uplatnění především v průmyslu pro výrobu prototypů. Pro běžného spotřebitele nebo malosériovou výrobu se tato technologie nevyužívá. (5)

### 3.3.3. Vstřikování pojiva

V anglické literatuře se můžete setkat s pojmem Binder Jetting. Technologie vstřikování pojiva je samostatnou kategorií a je velice specifická konstrukčním provedením tiskáren, ale princip zůstává stejný. Základní součástí je zásobník s granulátem<sup>10</sup>, který je přiváděn do komory po jednotlivých tenkých vrstvách. V této komoře po položení první vrstvy přejíždí naprogramovanou oblast tryska nanášející pojivo<sup>11</sup>.

- Binder Jetting

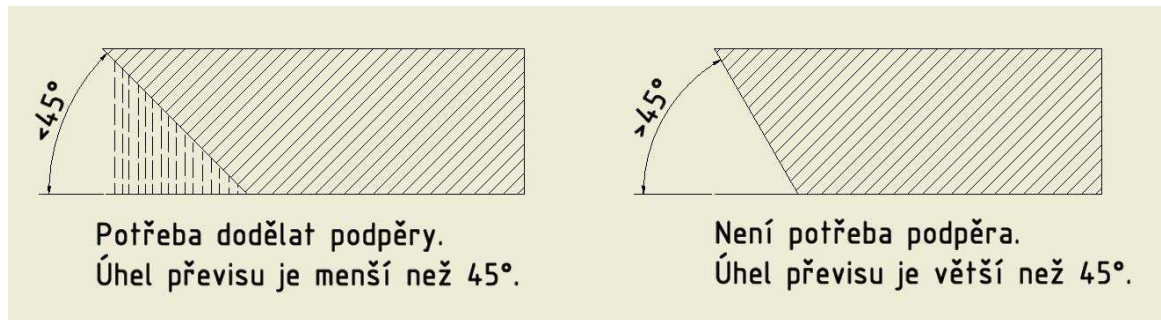


Obrázek 7 Schéma vstřikování pojiva (6)

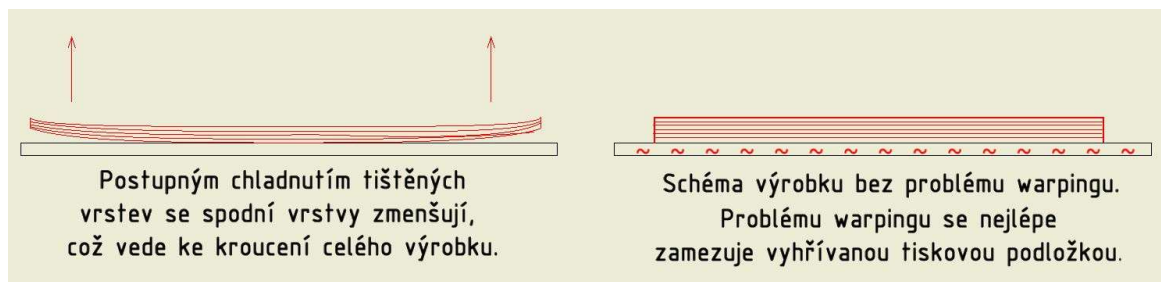
<sup>10</sup> Granulát pro technologii vstřikování pojiva – může to být kovový, keramický prášek nebo písek.

<sup>11</sup> Pojivem bývá tekutina na bázi lepidla.

Důležité je si v této části uvědomit, že k procesu vytvrzování mezi pojivem a granulátem dochází za pokojové teploty čímž se eliminuje problém warpingu<sup>12</sup> na tištěném objektu. A tak se proces opakuje, dokud se nevytvoří tištěný objekt. U většiny tiskáren se setkáte s tloušťkou vrstev 50–350  $\mu\text{m}$ . Tloušťka má velký interval, aby se dal celkový proces zrychlit, pokud se tisknou například formy na odlitky jednodušších dílů, kde se nekladou velké nároky na finální drsnost povrchu. Typicky se drsnost výsledného výrobku v rovině XY pohybuje 20–65  $\mu\text{m}$ . (7) Cena tisku je přibližně 2,2 \$ za  $\text{cm}^3$ . (8) Díky třetinové ceně tisku v porovnání s technologií tavení prášku, schopnosti tisknout bez účasti velkých tepelných rozdílů v místě tisku, a tudíž obecně dosahování lepších mechanických vlastností výrobku než materiálové tryskání, je tato technologie vhodná pro těžký průmysl. Výhodou této technologie je možnost tisknout velké objekty, v mnoha barevných kombinacích, a především možnost tisknout bez podpor.<sup>13</sup> Touto technologií možno vyrábět například formy z písku. (2) (5)



Obrázek 8 Specifikace případů použití podpor (6)



Obrázek 9 Schéma defektu warpingu při tištění výrobku

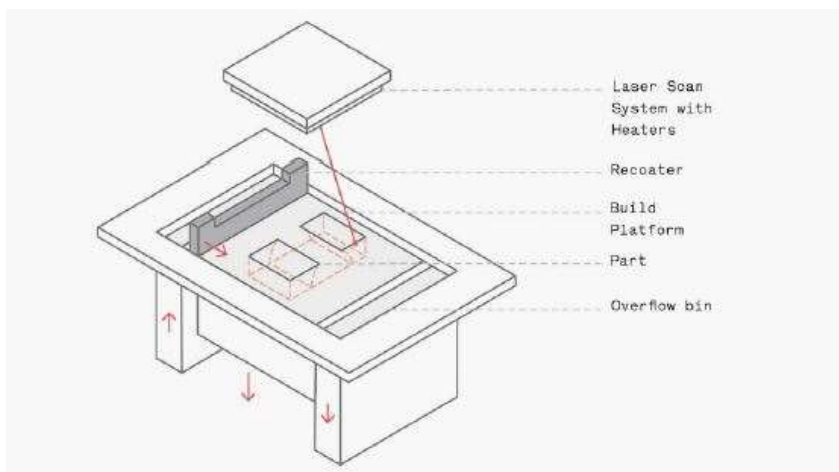
<sup>12</sup> Warming je deformace tištěného objektu vlivem rychlé změny teploty v oblasti tisku.

<sup>13</sup> Podpory jsou pouze pomocné součásti vytištěného výrobku, které se po tisku odstraňují. Většina podpor se vyrábí z polymerů (např.: HIPS nebo PVA), které se dají rozpustit rozpouštědly jako (např.: limonen). Nutnost tisknout s podporami je podmíněna sklonem nadcházející vrstvy, která by přesahovala 45°. Pokud však zpracováváte 3D model v Sliceru, program vám v případě nutnosti sám podpory vygeneruje.

### 3.3.4. Tavení prášku

Tavení prášku neboli Powder Bed Fusion (PBF), je technologie, kdy je prášek taven pomocí laseru. Ze zásobníku většinou vedle podložky je prášek přiveden ve formě tenké vrstvy na podložku pomocí valečku nebo jiného mechanismu, který zajistí rovnoměrné nanesení vrstvy prášku 20-100  $\mu\text{m}$ . Mechanismus plní také funkci zahřívání vrstvy na teplotu tání materiálu. Následně dochází ke spékání jednotlivých zrn prášku pomocí laserového paprsku. Vrstva se pak postupně chlazením pojí dohromady, jak v úrovni horizontální, tak vertikální. S přibývajícemi vrstvami se podložka s vytaveným modelem postupně posouvá ve směru vertikální osy Z dolů. Tavení prášku zahrnuje technologie:

- SLS (Selective Laser Sintering) – granulát na bázi polymeru
- DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – granulát na bázi kovu
- EBM (Electron Beam Melting) – granulát na bázi kovu



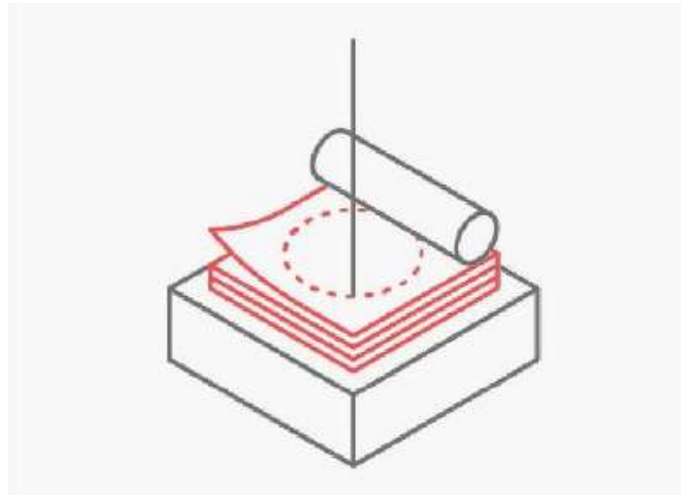
Obrázek 10 Schéma tavení prášku (6)

K výhodám patří velmi dobré mechanické vlastnosti dílů. U technologií tavení prášku není potřeba vytvářet podpory. Silnou stránkou této technologie je také recyklovatelnost nevyužitého materiálu. Nevýhodou je tepelně ovlivněná oblast, ve které se koncentruje napětí, která se řeší dlouhým vychlazením výrobku na okolní teplotu. Z důvodu velkých rozdílů teplot v oblasti tisku se mohou vyskytnout defekty ve formě warpingu. Drsnost povrchu výsledného výrobku v rovině XY se pohybuje 20–200  $\mu\text{m}$ . (7) Odchylka, s jakou tiskárny technologie tavení prášku tisknou je  $\pm 0,3 \text{ mm}$ . Cena tisku je ve srovnání se vstřikováním pojiva až desetkrát větší a může se vyšplhat až na 6 \$ za  $\text{cm}^3$ . Uplatnění těchto technologií nacházíme v leteckém průmyslu pro tisk například vstřikovací trysky paliva motoru, nebo v medicíně pro tisk kostních implantátů. (5) (2) (6) (9)

### 3.3.5. Laminování pojivem

Jedná se o aditivní technologii, při které se používá materiál ve formě folie. Folie materiálu se navrství a pomocí válečku, který je rozehrátý na teplotu 60–80°C<sup>14</sup> se na sebe pojí jednotlivé vrstvy. Na povrchu folie nebo laminovaného materiálu bývá lepidlo, nebo jiná adhezivní vrstva. Vrstvy folie jsou postupně odřezávány za pomoci laseru nebo ultrazvuku do podoby 3D modelu. Jako materiály folií se používají plasty, papíry, nebo plechy, z nichž nejpoužívanější je papír. (6) (10)

- LOM – Laminated Object Manufacturing
- UAM – Ultrasonic Additive Manufacturing



Obrázek 11 Schéma technologie laminace pojivem (6)

Z důvodu silné anizotropie dominující v rovině XY, tj. v rovině tisku se obecně používá především pro tisk jednodušších součástí. Dosahovaná kvalita tisku ve směru osy Z je úzce svázána s tloušťkou laminovací folie, která dosahuje hodnot 190–200  $\mu\text{m}$ . Drsnost povrchu ve směru osy tisku se pohybuje v rozmezí 2–60  $\mu\text{m}$ . Zjevnou nevýhodou laminování pojivem je množství zbytkového materiálu, který není možno znovu použít. (10)

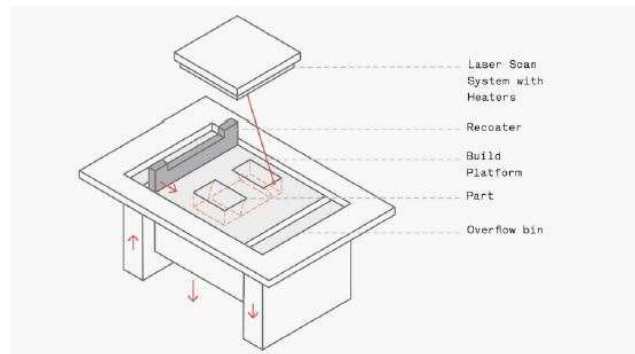
---

<sup>14</sup> Hodnoty se vztahují na laminování plastových materiálů.

### 3.3.6. Přímé použití energie

V anglické literatuře se setkáte s názvem Direct Energy Deposition (DED). U přímého použití energie se používá k pojení jednotlivých vrstev elektrického oblouku, plasmu, nebo elektronového paprsku. Neopomenutelnou součástí tisku přímého použití energie jsou prvky, které zajišťují ochranu okolí tisku před oxidací. Po tyto účely se nejčastěji používají inertní plyn, tlaková komora s vakuem. Podle druhu použité energie rozlišujeme:

- LENS – Laser Engineering Net Shape – kovový prášek
- EBAM – Electron Beam Additive Manufacturing – kovový drát



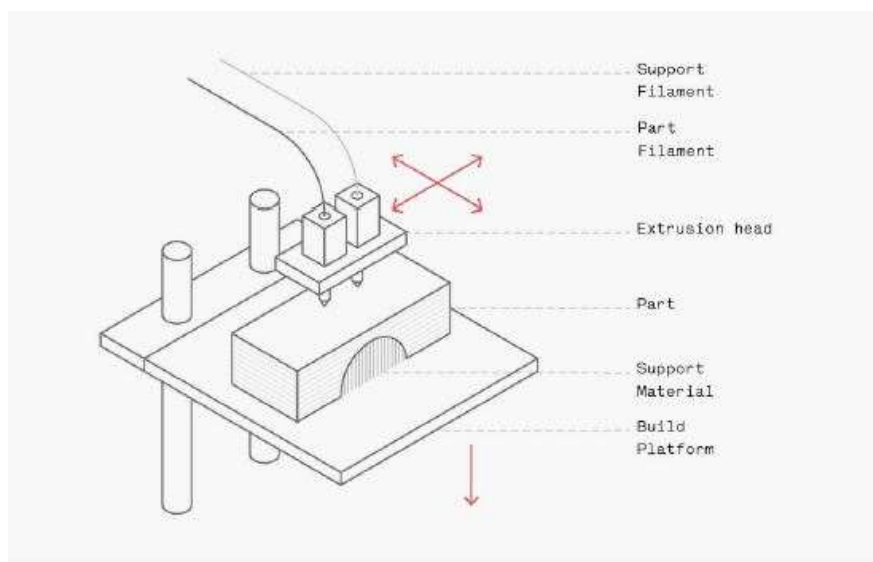
Obrázek 12 Schéma technologie použití přímé energie (6)

Používanými materiály jsou cívky drátu nebo kovový prášek. Výtisky z prášku vykazují lepší povrchové vlastnosti výrobku s drsnostmi 100–1000  $\mu\text{m}$ . Naproti tomu výtisky z drátu mají drsnost v rovině XY v intervalu 2 000 - 50 000  $\mu\text{m}$ . (7) V porovnání s kategorií tavení prášku a vstřikování pojiva, má přímé použití energie daleko nejhorší dosahovanou výslednou povrchovou drsnost výrobku, je však daleko levnější a rychlejší. Cena tisku se pohybuje kolem 2,5 \$ za  $\text{cm}^3$ . Nevýhodou stejně jako u tavení prášku je zbytkové napětí v tepelně ovlivněné oblasti. Díky nebezpečí pronikavosti prášku přes póry lidské kůže je velmi limitována i manipulace s materiálem a tiskárny využívající tyto technologie bývají prostorově náročné. (8) S touto technologií se můžete setkat také na půdě Českého Vysokého Učení Technického (ČVUT), které ve spolupráci se společností Kovosvit MAS, a.s. vyvinuli hybridní stroj WeldPrint 5AX. Kromě technologie přímého použití energie používá také subtraktivní procesy k post procesovému obrobení. Příkladem výrobků jsou například vidlice křížového kloubu<sup>15</sup>. (11)

<sup>15</sup> V praxi se můžete setkat s názvem kardanový kloub.

### 3.3.7. Extruze materiálu

Do této kategorie spadá FDM technologie. S touto technologií se nejčastěji setkáte ve spotřebitelské třídě. Řadí se také k nejrozšířenější a nejdostupnější technologii aditivní výroby na trhu. Princip této metody je založený na nanášení jednotlivých vrstev tekutého polymeru do tvaru výrobku. FDM technologie se zařazuje mezi tzv. termální procesy. Takže proces tisku probíhá za stabilizovaných teplotních podmínek. Samotný proces probíhá postupným natavováním plastového filamentu, který je mechanicky posouván do tiskové hlavy. V extrudéru, který je součástí tiskové hlavy, se polymer nataví dosažením teploty tání materiálu. Následně z extrudéru vychází poddajná hmota, která je pokládána na podložku. Postupným chlazením polymeru ulpívá extrudovaný materiál k ostatním vrstvám výtisku. (2)



Obrázek 13 Schéma FDM technologie (6)

Výhodou FDM tištěných výrobků je jejich výsledná pevnost. Dalším plusem je poměr cena / výkon, což je ideální kombinace pro klasického spotřebitele. Dále se vyhotovené výtisky mohou mechanicky nebo galvanicky upravovat.

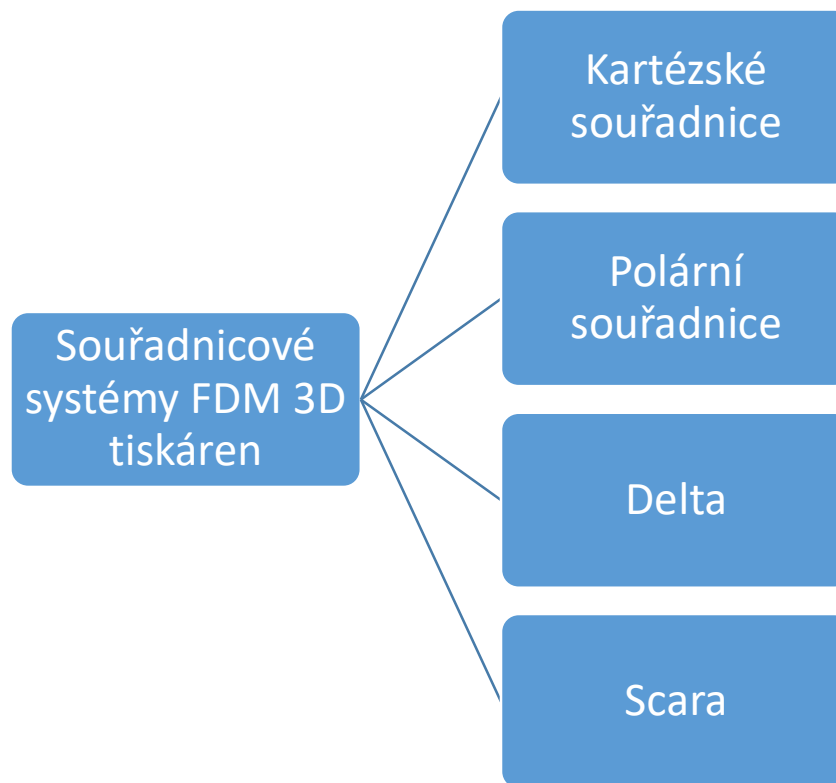
Nevýhodou mohou být patrné vady ve formě žebrování při horizontální extruzi. Velkým limitujícím faktorem je také prostor, ve kterém může tiskárna tisknout, respektive jak velké mohou být výrobky.

## 4. FDM 3D tiskárny

### 4.1. Kinematika pohybu 3D tiskáren

O dělení FDM 3D tiskáren rozhoduje způsob, jakým má software tiskárny definované souřadnice extrudéru vůči tiskové desce. V praxi se můžete setkat se čtyřmi druhy FDM tiskáren, a to konvenční kartézskou, delta, scara a souřadnicově polární tiskárnou.

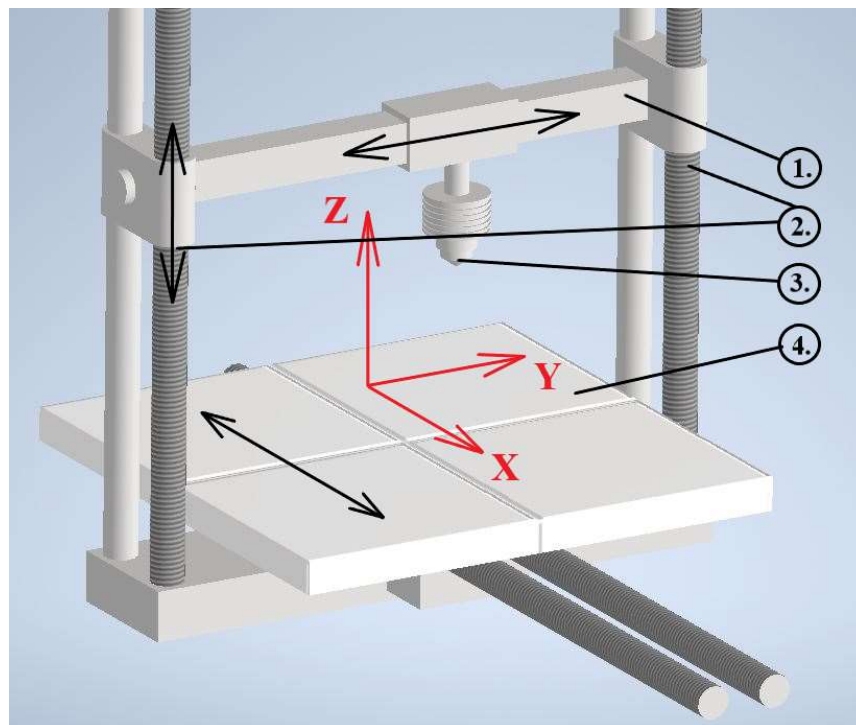
Tabulka 3 Schéma rozdělení FDM 3D tiskáren dle používaného souřadnicového systému





### 4.1.1. Kartézská 3D tiskárna

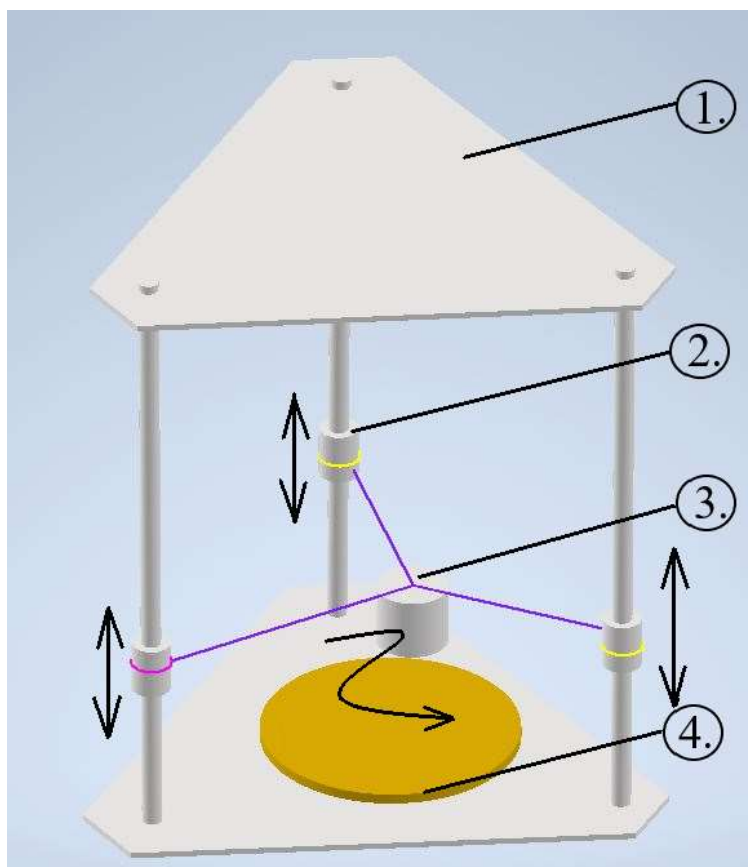
Konvenční kartézská 3D tiskárna se, jak název napovídá, v prostoru orientuje pomocí kartézských os X, Y a Z. Nevýhoda kartézských 3D tiskáren je limitující pracovní prostor (např.: Průša I3 MK3S 250x210x210 mm) a rychlost tisku (např.: Průša I3 MK3S 200 mm/s). (12) Na druhou stranu velkou výhodou je jednoduchá konstrukce a řízení pohybů. Poloha extrudéru, který uvolňuje roztavený filament na podložku v jednotlivých vrstvách je řízena v rovině os X a Y. Přechod do jednotlivých hladin výrobku může být řízen vícero způsoby. Na obrázku 14 je zobrazena možnost posouvat deskou ve směru osy X, kdežto extrudér vykonává pohyb ve směru os Y a Z. Ceny takovýchto tiskáren začínají v jednotkách tisíců korun, čímž jsou velice dostupné veřejnosti.



Obrázek 14 Schéma kartézské FDM 3D tiskárny s vyznačenými osami X Y Z (1. rám tiskárny 2. pohyblivé části napájeny krokovými elektromotory 3. extrudér 4. tisková podložka)

### 4.1.2. Delta<sup>16</sup> 3D tiskárna

Velkou výhodou delta tiskáren je především větší pracovní objem až o 70% větší než u kartézských tiskáren. Konstrukce tiskárny je však komplikovanější. Z obrázku 15 můžete vidět, že se delta tiskárna skládá ze 3 sloupků, na kterých jsou připevněna pohyblivá vedení, která regulují polohu extrudéru v prostoru. Stejně jako kartézská tiskárna využívá kartézského souřadnicového systému X, Y a Z. Jednotlivé změny poloh vedení v ose Z umožňují pohyb extrudéru v dané hladině. Nevýhodou tohoto druhu tiskáren bývá nižší kvalita výrobků a vyšší nároky na elektronickou vybavenost, která dokáže přepočítávat polohy extrudéru. Výhodou je především rychlejší tisk. Řádově dokáže delta tiskárna ušetřit až 30 % z celkové doby tisku ve srovnání z konvenční kartézskou 3D tiskárnou. (13)



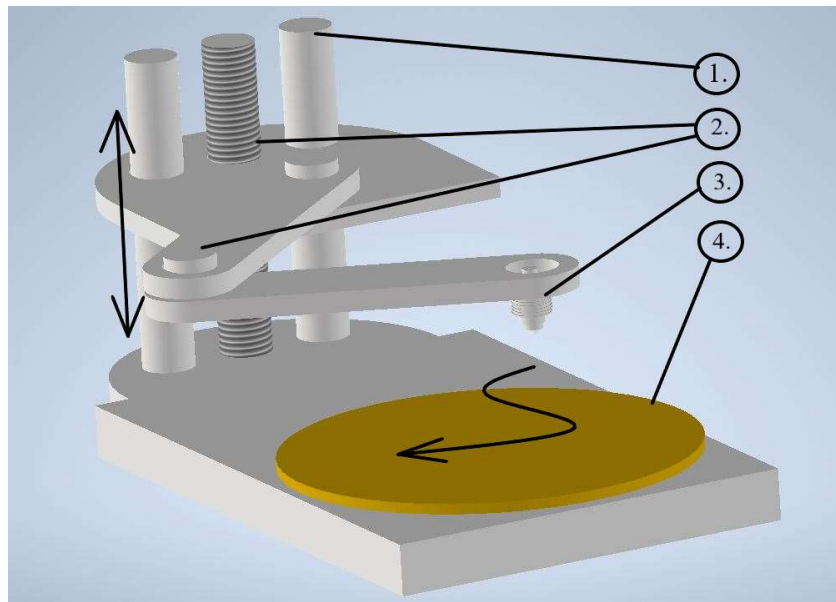
Obrázek 15 Schéma delta 3D tiskárny (1. rám tiskárny 2. pohyblivé části napájeny krokovými elektromotory 3. extrudér 4. tisková podložka)

---

<sup>16</sup> Název delta je odvozen od tvaru rovnostranného trojúhelníku, který vytváří tři ramena, která slouží jako vedení pro posuv na ose z.

### 4.1.3. SCARA 3D tiskárna (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

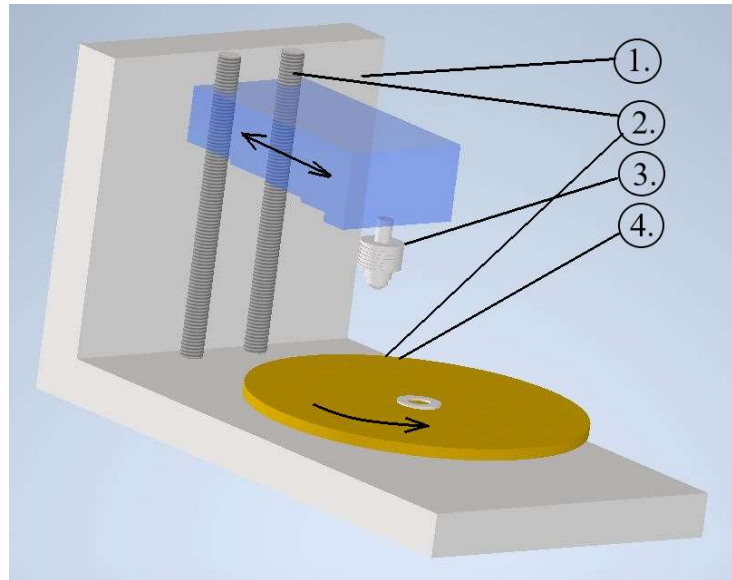
Už samotná zkratka SCARA vám napoví, že konstrukce a uspořádání připomíná montážní roboty na výrobních linkách. Ve své jednoduchosti je to robotická ruka schopna pohybovat se ve 4 různých možných nezávislých pohybech. Scara tiskárny bývají napájeny 4 krokovými elektromotory, které zajišťují jednotlivé pohyby. Velkou výhodou tiskáren je polohová dostupnost robotické ruky s extrudérem. Vhodná je především na tisk dutých rotačních součástí.



Obrázek 16 Schéma SCARA FDM 3D tiskárny (1. rám tiskárny 2. pohyblivé části napájeny krokovými elektromotory 3. extrudér 4. tisková podložka)

### 4.1.4. Polární 3D tiskárna

Tento druh tiskáren je řízen pomocí ramene, na jehož konci se nachází extrudér. Rameno navíc obstarává polohu hladiny, v jaké extrudér tiskne. Pohyb extrudéru zde však není dostatečný, protože by rameno s extrudérem nebylo schopno dosáhnout na všechny body na tiskové podložce. Proto se musí pohybovat také tisková podložka. Pohyb tiskové podložky je rotační. Výhodou je jednoduchá konstrukce tiskárny. Nevýhodou jsou potom komplikovanější softwarová, popřípadě hardwarová řešení na převod polárních souřadnic.

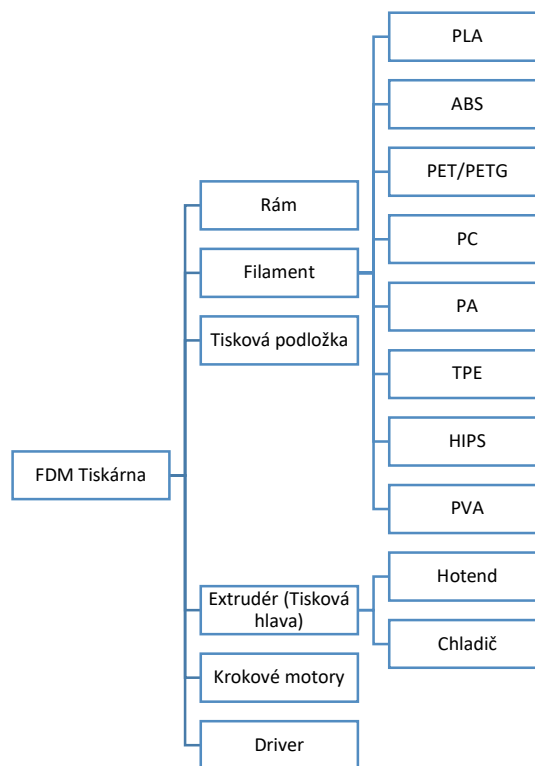


Obrázek 17 Schéma polární FDM 3D tiskárna (1. rám tiskárny 2. pohyblivé části napájeny krokovými elektromotory 3. extrudér 4. tisková podložka)

## 4.2. Součásti FDM 3D tiskáren

Použité součásti jednotlivých typů tiskáren se liší konstrukčním uspořádáním. Každá tiskárna obsahuje základový tuhý rám, na němž jsou všechny prvky tiskárny připevněny.

Tabulka 4 Rozdělní součástí FDM tiskáren



### 4.3. Rám FDM tiskáren

Výrobci tiskáren volí pro rám většinou tuhé a pevné materiály, aby vydržely namáhání v průběhu tisku a výrobky nebyly znehodnoceny kvůli vibracím. Zdrojem napětí a nežádoucích otřesů v rámech jsou především pohybové komponenty tiskárny tedy krokové motory případně jejich převodované části. V zásadě se setkáte především s kovy (např.: hliník, modelářská ocel), ale jsou dostupné také z překližky.

### 4.4. Filament

Filamenty je možné dostat ve formě kotouče namotaného materiálu. Jejich cena se může lišit, ale pokud nejste vázání značkou dodavatele<sup>17</sup>, tak to nejsou velké částky (řádově pár set korun za jeden kotouč). Pro správný výběr materiálu filamentu je dobré si uvědomit, k čemu budou výtisky sloužit. Je důležité dbát na parametry typu tvrdost, houževnatost, pevnost a další mechanické vlastnosti, které by mohly hrát roli v součástech dynamicky namáhaných. Portfolio materiálů, ze kterých lze tisknout, je velké. A můžete na ně narazit v mnoha barevných provedeních. Filamenty se vyrábějí pouze v několika standartních rozměrech, většinou narazíte na tloušťku 1,75 mm nebo 3 mm. Je třeba však dát pozor na uskladnění, některé materiály mohou vlivem UV záření degradovat a křehnout, nebo jsou jinak náchylné na okolní prostředí. (např.: ABS) (14)

#### 4.4.1. Poly Actic Acid (PLA)

Tento termoplast je derivátem sloučenin z obnovitelných zdrojů, takže můžete tisknout s vědomím, že pomáháte životnímu prostředí. Vlastnosti tohoto materiálu jsou pro tisk velice příhodné, protože teplota tavení PLA se pohybuje kolem 215°C. Je to materiál velice pevný a tvrdý, ale záleží, v jakých podmínkách s ním pracujete. Za zvýšených teplot (např.: přímé sluneční paprsky 40°C) ztrácí své mechanické vlastnosti a může se trhat, protože má nízkou teplotu tání 180°C. Obvykle není potřeba mít ani vyhřívanou podložku. Stačí polepit povrch desky malířskou páskou. Pokud ale máte 3D tiskárnu s vyhřívanou teplotou, vhodná teplota desky je 50 °C. Výtisk potom snadno můžete odejmout. Pořizovací cena jedné cívky PLA je pár set korun. PLA je ideálním materiálem pro tisk velkých produktů. Kvůli velké stabilitě a

---

<sup>17</sup> Společnosti, které se dnes zabývají výrobou FDM 3D tiskáren, se zároveň zabývají vyráběním svých vlastních filamentů. Skvělými příklady jsou firmy jako Stratasys, 3D Systems nebo tuzemský Prusament a.s.

tvrdosti PLA je zapotřebí pro konečné úpravy použít silná rozpouštědla, která mohou být velmi toxická. Proto je vhodné používat gumové rukavice a ochranné brýle příp. respirátor. (15) (16)



Obrázek 18 Příklad výtisku PLA filamentu

#### 4.4.2. Akrylonitril Butadien Styren (ABS)

Jedná se o jeden z nejdostupnějších materiálů vhodných pro 3D tisk FDM technologie. Je velmi odolný vůči vnějším vlivům, odolává vysokým teplotám. K jeho nevýhodám patří špatná teplotní roztažnost, která je navíc při vyšších teplotách doprovázena unikem toxických plynů do okolí. ABS má tavicí teplotu, která se pohybuje kolem 255 °C. ABS má vyšší tavicí teplotou, která ve výsledku zlepšuje výchozí parametry výtisků. Se 40–60 % příměsí syntetického kaučuku je materiál houževnatější. (17) Nepříznivě interaguje s UV zářením, takže vyhotovené výrobky stejně jako filamenty není vhodné nechávat na slunečním světle. Pro dokončování<sup>18</sup> povrchu výrobků je možno použít rozpouštědlo (např.: aceton). ABS reaguje na organická rozpouštědla. Za zmínku určitě stojí jeho vlastnost roztavení a následné krystalizace do původního materiálu. Jinými slovy můžete ho recyklovat. (15)

---

<sup>18</sup> Dokončování povrchů jsou úkony technologické úkony, kterými se zlepšují povrchové vlastnosti výrobku. Dokončování nebo také finišování se provádí post procesově. Řadí se sem různé broušení (např.: brusným papírem), odstraňování podpor nebo pokovování. (12)

#### 4.4.3. Poly Ethylen Tereftalát (PET / PETG)

PET je velmi pevný a houževnatý materiál. Jelikož dobře snáší vysoké napětí, je vhodný na tisk mechanických součástí a držáků. Je velice stálý a není náročný na skladování. Další výhodou jsou malé deformace během tištění vlivem odvodu tepla. Teplota extrudéru pro tisk z PET je 240°C. Pokud používáte přehřev podložky, abyste předešli deformacím na výrobku, doporučují se teploty 80-100°C. (15; 18)

#### 4.4.4. Polykarbonát (PC)

Jedná se o materiál, který vykazuje výborné vlastnosti při dynamickém namáhání, tudíž je vhodné jej použít pro namáhané součásti. Je transparentní a dobře se ohýbá. Nevýhodou je mírná toxicita. Dále špatně snáší vlhkost, proto se doporučuje ho skladovat v suchých prostorech. Při tisku uvolňuje do ovzduší škodlivé látky. Vyžaduje vyšší tavicí teplotu 270-280°C. (14)

#### 4.4.5. Nylon

Nylon je velice pružný a pevný, ale má bohužel negativní vlastnost snadno vázat vodu. Stěžejní pro kvalitní výrobky je tedy mimo jiné, hlavně skladování nylonu v prostorech s nízkou relativní vlhkostí vzduchu. Svými mechanickými vlastnostmi se hodí pro tisk namáhaných dílů. Tisknutí z nylonu probíhá při relativně vysoké teplotě 235 – 260°C. Výsledný produkt se postupným chladnutím snadno může pokroutit nebo jinak zdeformovat. Proto se doporučuje tisknout z tohoto materiálu na tiskárně s vyhřívanou podložkou, jejíž teplota by se měla pohybovat mezi 100 – 130 °C. Skvělé uplatnění nylon nachází v automobilovém průmyslu. (14) (19)

#### 4.4.6. Termo Plastický Elastomer (TPE)

Velkou předností TPE je jeho ohebnost a elasticita a vysoká odolnost proti abrazi. Výsledné výtisky TPE můžete deformovat takřka jako gumu. Navíc TPE odolává vysokým teplotám ve srovnání s ABS a PLA. Tiskne se při teplotě 225-235°C. To je všechno hezké, ale práce s tímto materiálem není vůbec jednoduchá. Vyžaduje velké zkušenosti, protože díky vysoké elasticitě si roztavený materiál dělá, co chce (může se zasekávat v extrudérech). Nicméně výtisky z TPE mají velké využití od obalů na telefony, přes protiskluzové podložky ve vaně. Jsou velmi oblíbené i v domácnosti i v průmyslové výrobě nicméně v porovnání s ABS či PLA mají takřka dvojnásobnou cenu. (14)

#### 4.4.7. High Impact Poly Styren (HIPS)

Tento materiál je velmi specifický svým použitím. Používá se především kvůli jeho schopnosti je rozpouštět v louhu případně limonenu<sup>19</sup>. Jinak má vlastně identické vlastnosti jako ABS. HIPS se používá pro tisk podpor, na špatně přístupných místech. Stačí ponořit celý výtisk do rozpouštědla, podpory se rozpustí a výsledný produkt z jiného odolnějšího materiálu vám zůstane. Svým způsobem se používá jako pomocný filament pro tisk přesnějších soustav, které vyžadují podpory. Problémy mohou nastat s vyšší teplotou tisku 210–230°C. Pro tyto účely je potřeba vlastnit také tiskárnu s vyhřívanou deskou. Je vhodné ho používat v kombinaci s ABS, PETG, PA nebo TPE. (14)

---

<sup>19</sup> Limonen je netoxický uhlovodík, který můžete získat z kůry citrusů. Velké uplatnění nachází právě jako organické rozpouštědlo podpor z HIPSu nebo PVA.



#### 4.4.8. Polyvinylalkohol (PVA)

Pokud tisknete z PLA materiálu a váš model vyžaduje podpory, bude vhodnější použít PVA. PLA může při kontaktu s limonenem reagovat a poškodit tak výrobek. Naproti tomu PVA je rozpustné v horké vodě<sup>20</sup>, která PLA nepoškodí. Zvláštní pozornost vyžaduje tento materiál především kvůli skladovatelnosti, jelikož je hygroskopický snadno se ve vlhkém prostředí zničí. Teplota, při které se doporučuje z PVA tisknout, je v rozmezí 185 – 215 °C. Nevýhodou PVA filamentu je vysoká cena, která se pohybuje 1500 Kč za kg. (20)

Tabulka 5 Přehled materiálů a jejich vlastností pro FDM 3D tisk (20)

Materiál	Teplota tavení filamentu [°C]	Toxicita	Pevnost [MPa]	Teplota vyhřívání podložky [°C]	Cena [Kč/Kg]
<b>ABS</b>	215	<b>Ano</b>	40	95-110	600
<b>HIPS</b>	210-230	<b>Ne</b>	32	100-115	400
<b>PA</b>	170	<b>Ne</b>	40-85	70-90	800
<b>PC</b>	270-280	<b>Ano</b>	72	80-120	800–1100
<b>PET/PETG</b>	240	<b>Ne</b>	53	75-90	600
<b>PLA</b>	255	<b>Ne</b>	65	45-60	400–600
<b>PVA</b>	185-200	<b>Ne</b>	78	45-60	1000-1800
<b>TPE</b>	225-235	<b>Ano</b>	26-43	45-60	800–1400

<sup>20</sup> Voda, ve které se PVA mění na strukturu gelu, by měla být zahřátá na teplotu maximálně 90 °C. Voda při teplotě varu by proces rozpouštění sice urychlila, nicméně riskovali bychom zničení výrobku.

## 4.5. Tisková podložka

Tisková podložka plní u tiskárny více funkcí. Kromě ohraničení pracovní plochy tisku a plochy pro vytištěný výrobek, ovlivňuje také kvalitu tisku. Různé materiály mohou reagovat na teplotu tiskové podložky negativně a mohou se při kontaktu s podložkou deformovat. Proto jsou některé tiskárny vybaveny vyhřívanou podložkou, aby se defektům tisku předešlo. Další důležitou vlastností podložky je přilnavost, která je daná hlavně materiálem, ze kterého je podložka vyrobena. Používá se obvykle teflon, sklo, nebo nějaký tvrdý plast<sup>21</sup>. Při odjímání výrobků se někdy využívá papírová páska, která se nalepí na povrch desky a výrobek se snáze odejímá. Poslední klíčovou vlastnost, kterou musí podložka splňovat je rovnoběžnost s rovinou pohybu extrudéru. Rovnoběžnost s rovinou tisku je podmínkou pro korektní kalibraci, která se provádí pomocí sondy na extrudéru před začátkem tisku. (2)

## 4.6. Extrudér

Extrudér neboli tisková hlava je multifunkční součást, která se skládá z krokového motoru, chladiče, hotendu, vedení filamentu. Hlavním úkolem extrudéru je přivádět filament do hotendu, a vytlačovat roztavený materiál tryskou. Dávkování filamentu do hotendu probíhá přes poháněný mechanismus. Mechanismus je obvykle složený ze dvou otáčejících se koleček, mezi nimiž se nachází filament. Regulace rychlosti vstupujícího filamentu je řízena elektromotorem. (4) (21)

### 4.6.1. Hotend

Hotend je součást, která řídí tavení vstupujícího filamentu na požadovanou teplotu a je opatřena teplotním senzorem pro udržování konstantní teploty. Dále se v hotendu hromadí materiál určený k extruzi. Konec hotendu je opatřen tryskou, která reguluje tok vycházejícího materiálu. Trysky 3D tiskáren se mohou často ucpávat a jsou proto často měněným dílem. Materiál trysek je obvykle mosaz<sup>22</sup>. Průměr vstupních otvorů trysek se pohybuje v rozmezí od

---

<sup>21</sup> Teflon, sklo, termoplast TPE mají výborné nepřilnavé schopnosti za zvýšených teplot, proto se k nim roztavený plast nepřítaví.

<sup>22</sup> V praxi se můžete setkat také s materiály hotendu jako například nerezová ocel, měď, zinek nebo tvrzená ocel.

0,25 – 1 [mm]. Se stoupajícím průměrem otvorů klesá přesnost výrobku, ale zároveň také klesá pravděpodobnost ucpání. (4) (21) (22)

#### 4.6.2. Chladič

Dále je soustava extrudéru opatřena chladičem, který plní funkci regulaci teploty finálního stavu materiálu a zároveň může sloužit k odvodu tepla vzniklého při tavení filamentu v extrudéru.

#### 4.7. Krokový elektromotor

Krokové elektromotory zajišťují korektní pohyb jednotlivých součástí tiskárny. Jsou řízené pomocí signálů z driveru, který bývá vhodně umístěn poblíž tiskárny tak, aby nepřekážel pohybu jednotlivých částí tiskárny. Předností těchto typů elektromotorů je schopnost zastavit se v určitém bodě s jistou přesností po vyslání signálu. Jako běžný elektromotor se skládá ze statoru a rotoru. Rotor je tvořen páry permanentních magnetů. Stator je pak tvořen elektromagnetem, tedy cívkou s jádrem z magneticky měkké oceli. Princip přeměny elektrické energie na mechanickou spočívá ve střídavém přivádění proudu do cívky elektromagnetu, která způsobuje rotaci kolem permanentních magnetů. Krokové elektromotory vyžadují ke svému nepřerušovanému chodu konstantní signál, který by se měl držet nad hraniční hodnotou danou výrobcem. Jak budeme podrobně dále rozebírat v praktické části, podmínka konstantního signálu není vždy splněna, a vede tak k nepatrným defektům na povrchu výrobku. (23) (24) (5)

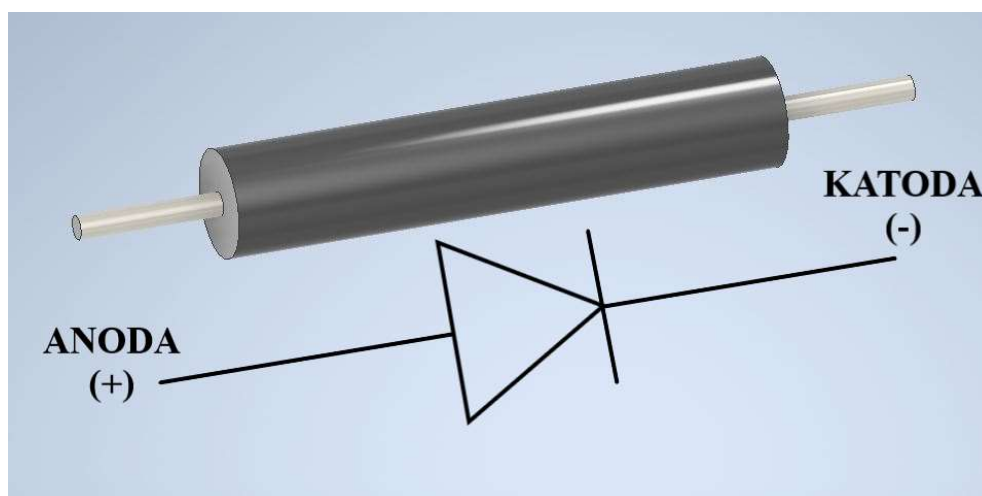
#### 4.8. Driver

Zásadní role driveru je, přiváděný signál z počítače nebo zdroje stl. připraveného souboru ve formě G kódu převést do sekvence navazujících pohybů. Informace ze signálu umístí elektromotorem napájenou součást do potřebné polohy. Finální podoba naprogramovaného 3D modelu je potom výsledkem všech pohybů, které posouvají extrudér v dané hladině. Driver je velmi důležitou součástí tiskáren, skládá se z integrovaného obvodu, který vytváří signály pro krokování elektromotorů tiskárny. (22).

## 5. Instalace TL smotheru do driveru 3D tiskárny

### 5.1. Driver

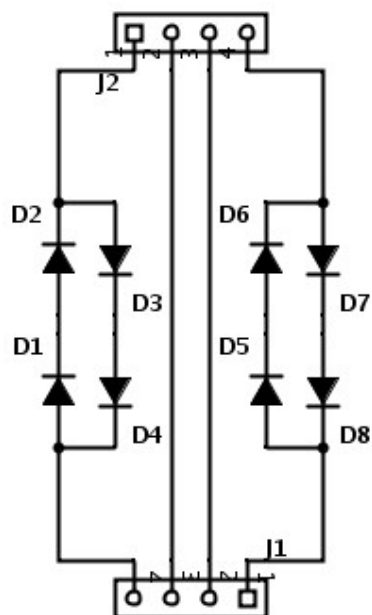
Pro opravení salmon skin problému se musíme soustředit na vyhlazení přicházející skokových signálů z driveru. Driver je zařízení, které ovládá celý chod tiskárny, tudíž všech krokových motorů. Problémem driverů je, že pod 10 % hodnotou napájecího napětí nejsou drivery schopny adekvátně reagovat. Proto pokud máte tiskárnu zapojenou v síti 12 V, driver je schopen disponovat impulzy pouze při napájení maximálně do 1,32 V. Když se krokový motor napájený driverem dostane do situace, kdy musí fungovat pod hranicí 10 % napájecího napětí, začne sebou šukat. Driver není schopen otočit krokovým motorem hladce, protože mu to krokový motor neumožní. (24) (16)



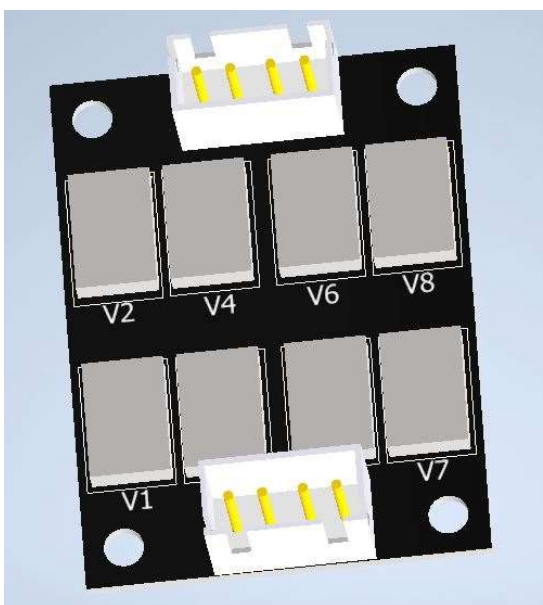
Obrázek 19 Polovodičová dioda (24)

## 5.2. TL Smoother

Zařízení, kterým se tento problém řeší, se nazývá TL smoother. TL smoother je série několika párů polovodičových diod. Úkolem těchto diod je schopnost napájet krokový motor dostatečným množstvím napětí v době, kdy driver neposkytuje dostatek napětí. Polovodičová dioda dokáže propouštět proud pouze v jednom směru. A díky P-N přechodu v okamžiku snížení elektrického proudu začne v diodě vznikat úbytek napětí. Po průchodu proudů právě dvěma diodami se napájecí napětí může dostat až na 0 V a jsme tedy schopni ovládat krokový motor hladce. (24) (16)



Obrázek 20 Schéma TL Smootheru (24)



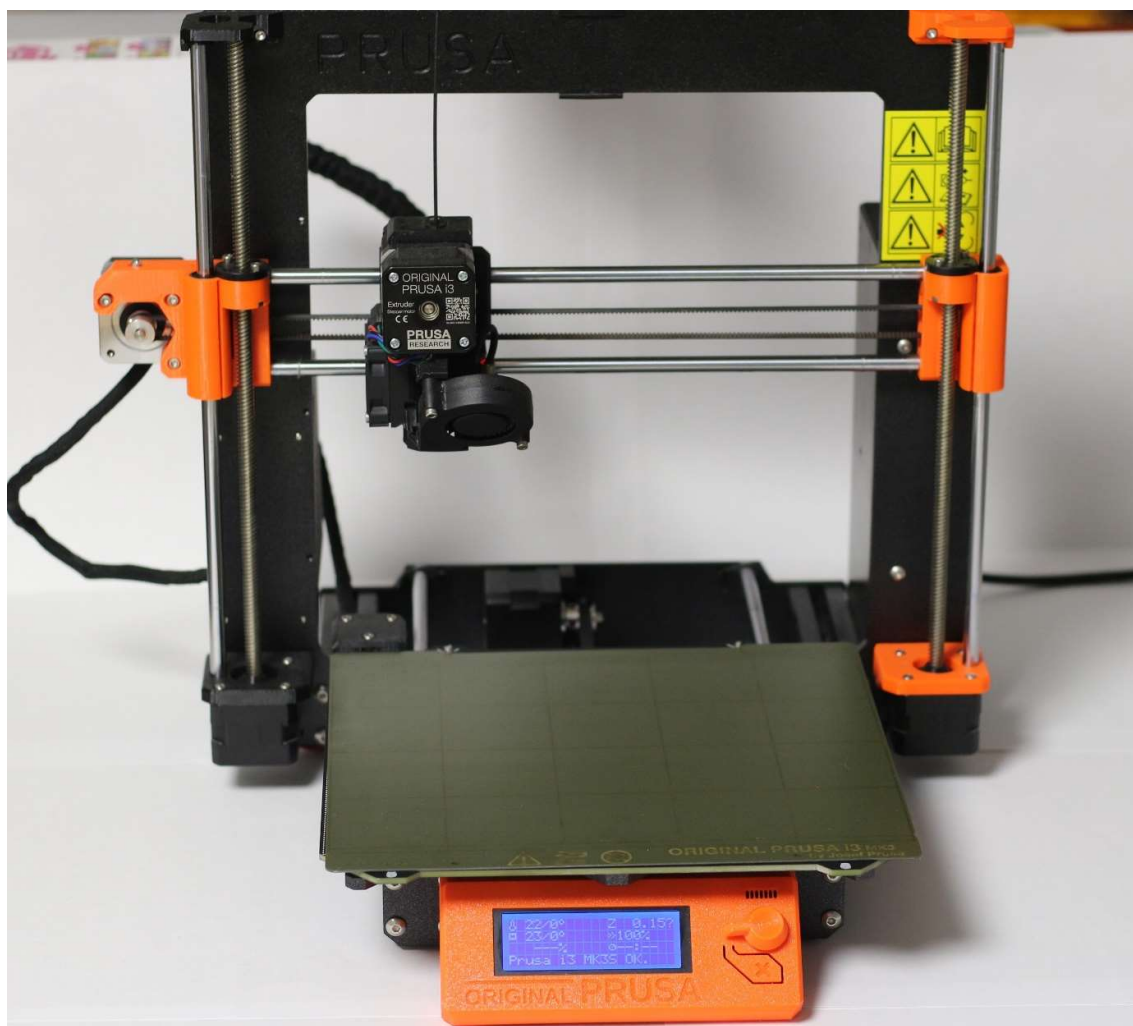
Obrázek 21 TL Smoother čip

TL smoothers můžete koupit v mnoha provedeních, ale většinou je najdete v počtech po 4, 6 anebo 8. Krokové motory 3D tiskáren mají většinou 2 vinutí, tudíž na každou cívku připadají alespoň 2 diody, kde jedna dioda je schopna snížit napětí o 0,7V. Takže 4 diody mohou být pro některé drivery málo, protože drivery jsou schopny fungovat do napájecího napětí 1,32 V. Proto se většinou s 8 diodami dosáhne lepších výsledků.

Instalace TL smootheru do driveru 3D tiskárny není nějak manuálně složitá, nicméně mohou se vyskytnout problémy. Může se stát, že driver bude tak přeplněný elektronikou, že už tam nebude místo. Takže se podívejte, zda má vůbec cenu kupovat TL smoothery, když je nebude kam nainstalovat.

### 5.3. Postup instalace

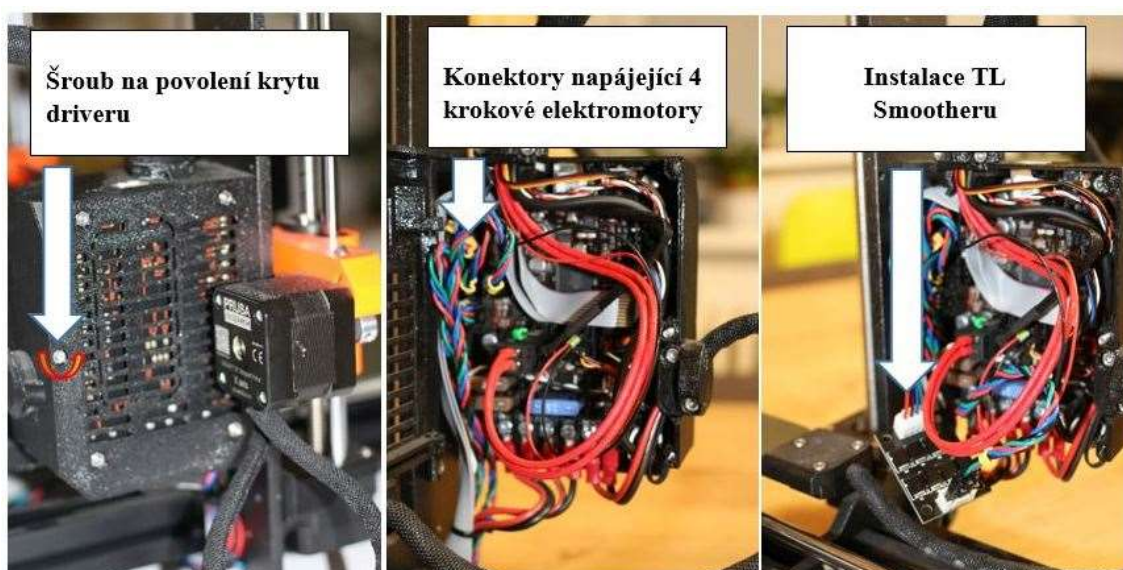
Instalaci TL Smootheru jsem prováděl na tiskárně od společnosti Průša Research 3D a.s. Konkrétně se jednalo o model Original Prusa i3 MK3S+ (viz obrázek 22).



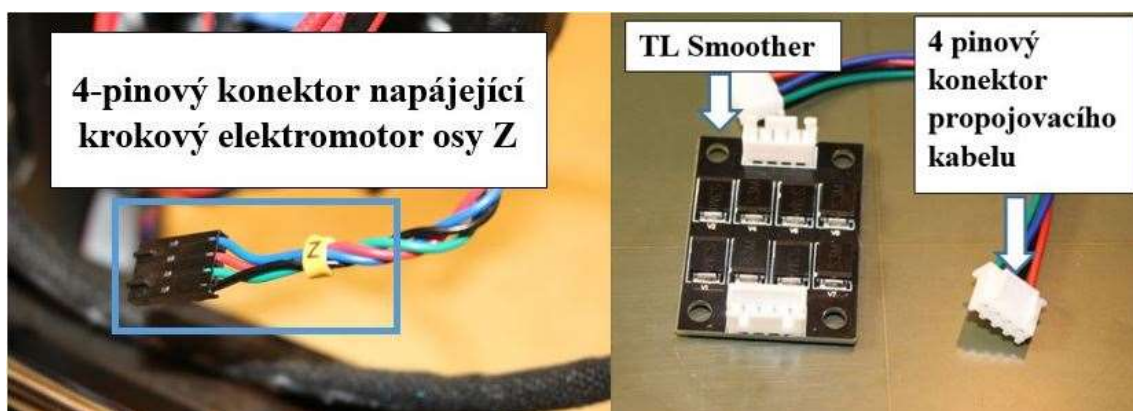
Obrázek 22 FDM 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+

## Postup instalace:

- Odpojte tiskárnu ze sítě. Abyste předešli zásahu elektrickým proudem a nezničili nastavení tiskárny.
- Sejměte kryt driveru, který se nachází na boku rámu. Ten je uzavřen pomocí jednoho šroubku s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M3 x 40 ČSN EN ISO 4762–12.9.
- Dále odmontujte dvířka Driveru. Dvířka jsou uchycena pomocí dvou pantů. Stačí vyšroubovat pouze jeden šroubek s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem držící spodní pant a dvířka vyjmout tahem dolů.

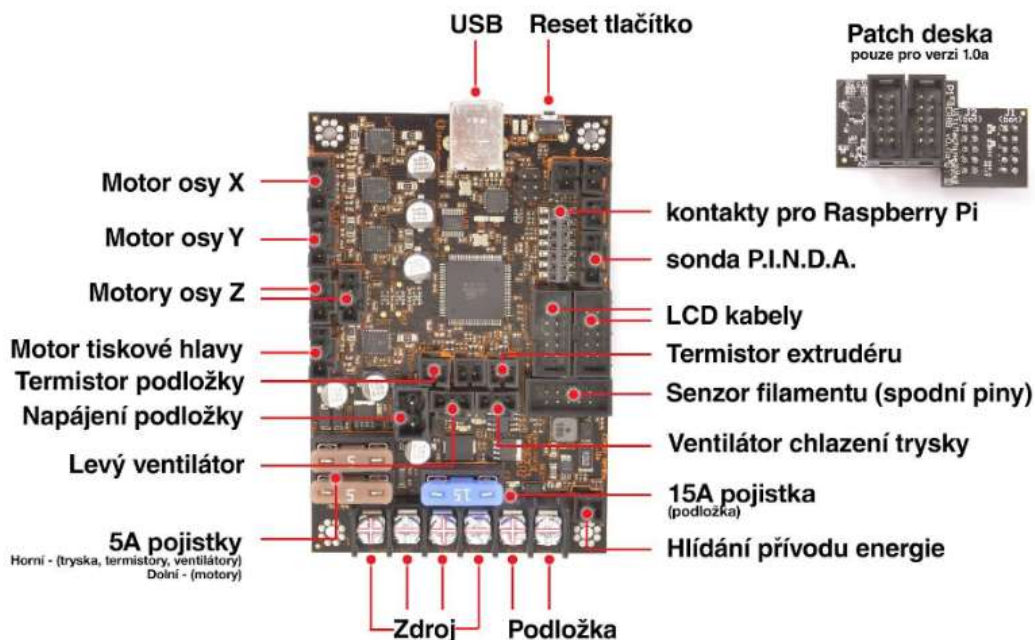


Obrázek 23 Postup pro odmontování krytu Driveru (vlevo), konektory napájejícího krokového elektromotory (uprostřed), instalace TL Smootheru (vpravo)



Obrázek 24 Tvar 4 pinového konektoru tiskárny Průša 13 MK3S (vlevo), TL Smoother s 4 pinovým propojovacím kabelem (vpravo)

- Dále najdete konektory, které napájejí krokové motory souřadnicových os. Viz obrázek 23 “Motor osy X“, “Motor osy Y“, “Motor osy Z“ a “Motor tiskové hlavy“. Pro toto schéma je potřeba 5 TL Smootherů (viz obrázek 25).

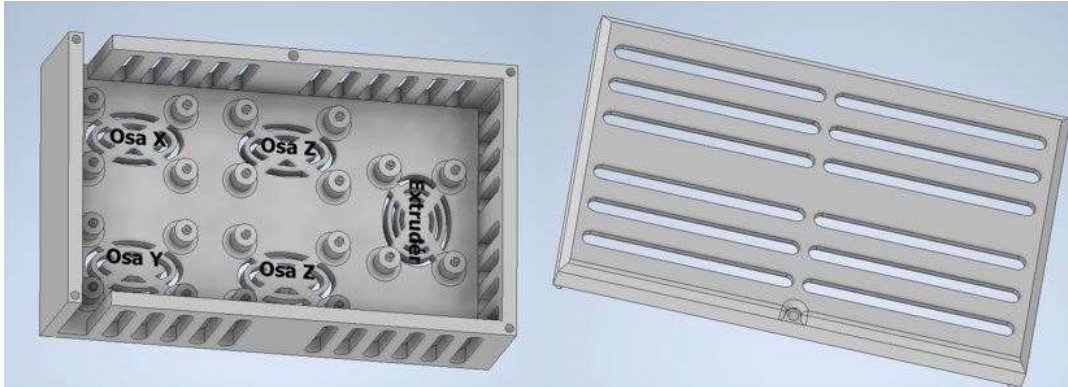


Obrázek 25 Podrobnější schéma driveru Original Prusa I3 MK3S (25)

- Dále zapojíme TL Smoothery přes konektory, které napájejí jednotlivé krokové motory. Při odpojování kabelů z driveru netahejte za kabely. Zatačte nehty za konektor, předejte tak poškození kabelu. Poslední dobrá rada je zabalit nebo oblepit každý použitý TL Smoother izolační páskou, abychom předešli případnému zkratu.
- Při montáži objednaného TL Smootheru jsem narazil na překážku. 4 pinový konektor z tiskárny se neshodoval s tvarem konektoru na propojovacím kabelu TL Smootheru s Driverem. Tudíž jsem vytvořil propojovací drát a koupil konektor, který pasoval. Bohužel tato úprava vedla ke špatně upevněnému konektoru do TL Smootheru. Tato úprava je pracná a časově náročná. Doporučuji proto kupovat TL Smoother s konektorem, který se bude shodovat s tiskárnou, vyhnete se tak nepříjemnostem a ušetříte čas.



- Problém nastává také při volně položených zapojených TL Smootherech, mohou se snadno odpojit. Proto jsem pro účely práce vytvořil model skříně a krytu na všechny potřebné TL Smoothery. Dobrým konstrukčním řešením skříně je umístění ventilačních prostor pro možnost odvádění tepla, které se v čípech během tisku kumuluje (viz obrázek 26).

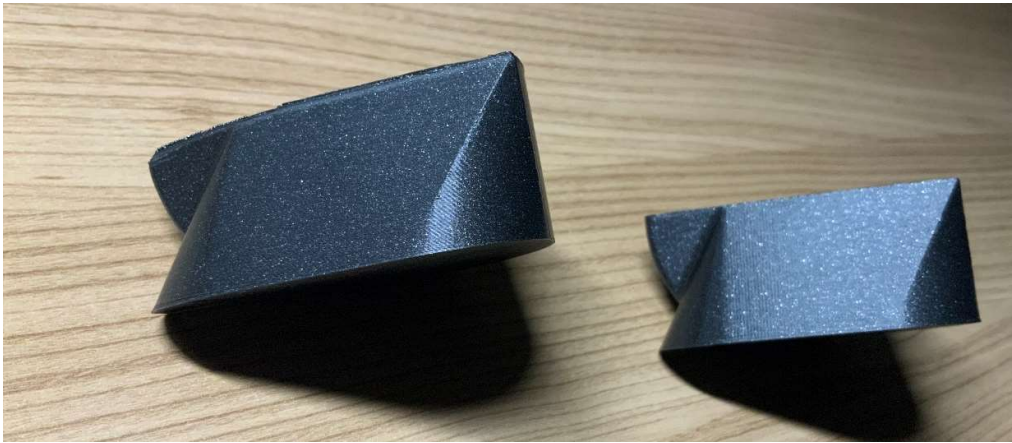


Obrázek 26 Skříň pro TL Smoothery s krytem

- Po zapojení všech TL Smoothersů na každý krokový elektromotor připevníme víko driveru zpět. Buďte opatrní u jednodušších konstrukcí 3D tiskáren, by se mohly některé části driveru anebo skřínky driveru poškodit.

#### 5.4. Výsledky instalace TL Smoothera

Teoreticky měla instalace TL Smoothera vyhladit napájecí signály, což by mělo mít za účinek hladší oblé plochy na výtiscích. Tisk jsem provedl i před i po instalaci čipu TL Smoother. V modelu salmon skin testu jsem se pokusil zahrnout povrchy modelu, kde by byly výsledky vizuálně nejvýraznější. Takže jsem použil zkosenou stěnu, oblou stěnu a kulovou plochu. Výsledkem byl následující předmět. Po vytištění jsem, ale výrazné změny na površích předmětů bohužel nenalezl (viz obrázek 27, 28, 29).



Obrázek 27 Výtisky před (vlevo) a po instalaci (vpravo) čipu TL Smootheru (šikmá stěna)



Obrázek 28 Výtisky před (vlevo) a po instalaci (vpravo) čipu TL Smootheru (kulová plocha)



Obrázek 29 Výtisky před (vlevo) a po instalaci (vpravo) čipu TL Smootheru (oblá stěna)

## 6. Závěr

V úvodu této práce jsem krátce shrnul historii a vývoj 3D tisku. Dále jsem představil hlavní metody 3D tisku se zaměřením na detaily související s plastovým tiskem jako jsou Aдитivní technologie. Jednotlivé typy technologií a jejich výhody a nevýhody jsem shrnul v části, která se týká FDM tiskáren. Další kapitoly se věnovaly podrobnému popisu vlastností filamentů, které připadají v úvahu pro FDM tisk. Kapitola se zabývala jednotlivými typy materiálů s důrazem na jejich silné nebo slabé stránky a případné oblasti využití. Dále jsem popsal jednotlivé součásti FDM 3D tiskáren spolu s možnými uspořádáními konstrukcí 3D tiskáren. Zbývající části hardwaru tiskárny jsou popsány v samostatné kapitole, aby poskytly celkový obrázek o 3D tisku. Poslední část práce se má věnovat praktické úloze, která má vyřešit problém odstranění efektu „lososí kůže“ pomocí aplikace TL Smootheru do Driveru 3D tiskárny. Pro účely práce jsem vytvořil model předmětu, na kterém by se měly projevit výsledky po instalaci čipu. Model jsem vytiskl před a po instalaci a poté vyfotil části, kde jsou rozdíly nejvíce patrné. Jednotlivé kroky pro instalaci čipu jsou okomentovány a zdokumentovány na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+. I přes zprovoznění tiskárny po instalaci čipu a vytištění salmon skin test modelu jsem nebyl vizuálně schopen posoudit změnu povrchu na tištěném předmětu. Domnívám se, že za to může neshoda tvarů konektorů a následné dotváření konektorů. Konektory mohly být chybně připojeny a TL Smoother tedy nemusel pracovat korektně. Při objednávání TL Smootheru při příští implementaci bych ohlídal tvar konektoru, abych předešel nepříjemnostem.

---

## Seznam použité literatury a zdrojů

1. **World Intellectual Property Organization (WIPO).** World Intellectual Property Report. *Breakthrough Innovation and Economic Growth*. Geneva : World Intellectual Property Organization (WIPO), 2015. 978-92-805-2680-6.
2. **Horvath, Joan.** *Mastering 3D Printing*. New York : Apress Media, 2014. str. 193. 978-1-4842-0026-1.
3. **Wyman, Carrie.** Revolutionary New Electric Car Built and Tested in One Year with Objet1000 Multi-material 3D Production System. *Stratasys blog*. [Online] 18. Listopad 2014. [Citace: 14. Červenec 2020.] <http://blog.stratasys.com/2014/11/18/streetscooter-3d-printing/>.
4. **Kaziunas France, Anna.** *Make: 3D Printing* . Sebastopol : Maker Media, Inc., 2013. 978-1-457-18293-8.
5. **Fisher, Gordon.** *Blender 3D Printing Essentials*. Birmingham : Packt Publishing Ltd., 2013. 978-1-78328-459-7.
6. **Redwood, Ben, Schoffer, Fillemon a Garret, Brian.** *The 3D Printing Handbook technologies, design and applications*. Amsterdam : 3D HUBS B.V., 2017. 978-90-827485-0-5.
7. **DigitalAlloys.** Surface Roughness. *DigitalAlloys*. [Online] DigitalAlloys, 5. Září 2019. [Citace: 14. Červenec 2020.] <https://www.digitalalloys.com/blog/surface-roughness/>.
8. **Digital Alloys.** Directed Energy Deposition. *DigitalAlloys*. [Online] DigitalAlloys, 10. Červen 2019. [Citace: 14. Červenec 2020.] <https://www.digitalalloys.com/blog/directed-energy-deposition/>.
9. **Alloys, Digital.** Powder Bed Fusion (PBF). *DigitalAlloys*. [Online] DigitalAlloys, 6. Květen 2019. [Citace: 14. Červenec 2020.] <https://www.digitalalloys.com/blog/powder-bed-fusion/>.
10. **Hagedorn, Y.** Laser additive manufacturing of ceramic components: Materials, processes, and mechanisms. *Science Direct*. [Online] 2017. [Citace: 16. Červenec 2020.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004333000063>.
11. **Infocube s.r.o.** Společnost KOVOSVIT MAS, a.s., představuje nový obráběcí stroj WeldPrint 5AX, umožňující hybridní výrobu kombinující operace obrábění a navařování kovu. *infocube*. [Online] Infocube s.r.o., 2019. [Citace: Červenec. 14 2020.] <https://infocube.cz/cs/spolecnost-kovosvit-mas-a-s-predstavuje-novy-obrabeci-stroj-weldprint-5ax-umoznujici-hybridni-vyrobu-kombinujici-operace-obrabeni-a-navarovani-kovu/>.
12. **PRUSA RESEARCH a.s.** 3D Tiskárny. *PRUSA RESEARCH Official Josef Prusa Shop*. [Online] PRUSA RESEARCH a.s., 2020. [Citace: 15. Červenec 2020.] <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.html#1>.

13. **Schmitt, Betina Madeira, a další.** A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts. *Researchgate*. [Online] 23. Prosince 2017. [Citace: 20. Července 2020.]  
[https://www.researchgate.net/publication/322937955\\_A\\_Comparative\\_Study\\_of\\_Cartesian\\_and\\_Delta\\_3D\\_Printers\\_on\\_Producing\\_PLA\\_Parts](https://www.researchgate.net/publication/322937955_A_Comparative_Study_of_Cartesian_and_Delta_3D_Printers_on_Producing_PLA_Parts).
14. **Prusa Polymers a.s.** Prusament. *Prusament*. [Online] Prusa Polymers a.s., 2020. [Citace: 13. Červenec 2020.] <https://prusament.com/cs/>.
15. **PRŮVODCE MATERIÁLY.** [Online] Prusa Research a.s. [Citace: 1. Březen 2020.] <https://www.prusa3d.cz/materialy/>.
16. **Shanon, Lin.** Using TL Smothers For Better 3D prints. [Online] 16. Říjen 2019. [Citace: 8. Březen 2020.] [https://hackaday.com/2019/10/16/using-tl-smothers-for-better-3d-prints/?fbclid=IwAR34AQnSO\\_eeURCA1rgrltETTBkrRwLK9\\_CZIS0uaJr0-Hg1cNPvy3UGPAg](https://hackaday.com/2019/10/16/using-tl-smothers-for-better-3d-prints/?fbclid=IwAR34AQnSO_eeURCA1rgrltETTBkrRwLK9_CZIS0uaJr0-Hg1cNPvy3UGPAg).
17. **Nguyen, Ngoc. A, a další.** A path for lignin valorization via additive manufacturing of high-performance sustainable composites with enhanced 3D printability. *Science Advances*. [Online] 14. Prosince 2018. [Citace: 20. Července 2020.] [https://advances.sciencemag.org/content/4/12/eaat4967?utm\\_source=TrendMD&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=TrendMD\\_1](https://advances.sciencemag.org/content/4/12/eaat4967?utm_source=TrendMD&utm_medium=cpc&utm_campaign=TrendMD_1).
18. **Barnatt, Christopher.** ExplainingTheFuture.com. *3D printing*. [Online] 10. Listopad 2016. [Citace: 4. Červenec 2020.] <https://www.explainingthefuture.com/3dprinting.html>.
19. **MATERIALPRO 3D. NYLON (PA).** *Materiálový slovník*. [Online] MATERIALPRO 3D. [Citace: 20. Červenec 2020.] <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>.
20. **Symplify 3D. Properties Table.** *Symplify 3D*. [Online] Symplify 3D, 2020. [Citace: 25. Květen 2020.] <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>.
21. **Wallach Kloski, Liza a Kloski, Nick.** *Začínáme s 3D tiskem*. Praha : Computer Press, 2017. 978-80-251-4876-1.
22. **Jonathan Šimon, Robert a Zeman, Martin.** Slovník pojmů. *3Dpedie.cz*. [Online] Processwire, 2020. [Citace: 15. Duben 2020.] <https://www.3dpedie.cz/zaciname-s-3d-tiskem/slovník-pojmu/>.
23. **Prof. Ing. Ivan Uhlíř, DrSc.** *Elektrické stroje a pohony*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. 978-80-01-03730-0.
24. **Kováčik, Miroslav.** TL SMOOTHER, JAK TO FUNGUJE ? *3dfactory.cz malá továrna na velké věci...* [Online] 4. Zář 2018. [Citace: 20. Duben 2020.] <https://3dfactory.cz/2018/09/04/tl-smoother-jak-to-funguje/>.
25. **Prusa Research, s.r.o.** PŘÍRUČKA 3D TISKAŘE. *PŘÍRUČKA 3D TISKAŘE*. Praha : PRŮŠA RESERACH a.s., 20. Zář 2019.

- 
- 26. Manufacturing Processes Explained.** *3D HUBS*. [Online] 2020. [Citace: 4. Červenec 2020.] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/collection/material-processes-explained/>.
- 27. Lipson, Hod a Kurman, Melba.** *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Indianapolis : John Wiley & Son, Inc., 2013. 978-1-118-35063-8.
- 28. Pinches, Samuel.** Install TL-Smoothers to Reduce Salmon Skinning. *The Unofficial JGAURORA wiki*. [Online] 25. Listopad 2018. [Citace: 20. Duben 2020.] <https://jgaurorawiki.com/a5/tlsmoothers>.
- 29. 3D MS Modular Systems.** TL-Smoother for DRV8825 stepper motor. *3D MS Modular Systems*. [Online] 3D MS Modular Systems, 2020. [Citace: 15. Květen 2020.] <http://3dmodularsystems.com/en/electronic-boards/451-tl-smoother-pour-drivers-moteurs-drv8825.html>.
- 30. International Organization for Standardization.** *ISO ASTM 52900 : 2015 ADDITIVE MANUFACTURING - GENERAL PRINCIPLES - TERMINOLOGY*. místo neznámé : International Organization for Standardization, 2015.