



# 3D tisk elektronických obvodů

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojní inženýrství

*Autor práce:*

**Jan Znamenáček**

*Vedoucí práce:*

Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace





## Zadání bakalářské práce

# 3D tisk elektronických obvodů

*Jméno a příjmení:* Jan Znamenáček  
*Osobní číslo:* S16000199  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávací katedra:* Katedra výrobních systémů a automatizace  
*Akademický rok:* 2019/2020

### Zásady pro vypracování:

Hlavním cílem této práce je provést rešerši stávajícího stavu uplatnění 3D tisku v oblasti výroby 3D elektronických obvodů. Na základě rešerše navrhnout vhodnou technologii a provést návrh konceptu zařízení pro 3D tisk prostorových elektronických obvodů.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s technologií 3D tisku a zařízeními v laboratořích katedry.
2. Provést analýzu současného stavu využívání 3D tisku pro výrobu elektronických obvodů.
3. Provést studii stavu výzkumu v této oblasti.
4. Na základě analýzy a studie navrhnout vhodnou technologii.
5. Vytvořit koncept zařízení pro realizaci v laboratořích katedry.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby  
40 stran textu včetně příloh  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. Additive manufacturing: innovations, advances, and applications. Boca Raton: Taylor and Francis, 2016. ISBN 9781498714785.
- [2] GEBHARDT, A. Understanding additive manufacturing: rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing. Munich: Hanser Publishers, c2011. ISBN 978-1-56990-507-4.
- [3] CHUA, Ch. K. a K. F. LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fourth edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-40-1.
- [4] Wohlers Report 2016. 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report. Fort Collins: Wohler Associates, 2016. ISBN 978-0-9913332-2-6.

*Vedoucí práce:*

Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
Katedra výrobních systémů a automatizace

*Datum zadání práce:*

20. listopadu 2019

*Předpokládaný termín odevzdání:*

20. května 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

31. prosince 2020

Jan Znamenáček

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Petru Zelenému, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Podstatou této práce je provedení rešerše 3D tisku, v oblasti vytváření elektronických obvodů. V první kapitole jsou uvedeny a popsány všechny základní metody pro vytváření součástí pomocí aditivních technologií. Druhá kapitola se poté zabývá 3D tiskem elektroniky. V první části této kapitoly byla provedena analýza současného stavu využití technologií pro tisk elektroniky a druhá část kapitoly se zabývá studií stavu výzkumu v této oblasti. Na základě této analýzy a studií byla poté navržena vhodná technologie a koncept zařízení, které by bylo možné vytvořit v laboratořích katedry.

## **Klíčová slova**

3D tisk, aditivní technologie, elektronika, tisk elektronických obvodů

## **Abstract**

The essence of this work is to perform a search of 3D printing in the field of creating electronic circuits. The first chapter lists and describes all the basic methods for creating components using additive technologies. The second chapter deals with 3D printing of electronics. In the first part of this chapter was performed an analysis of the current state of use of technologies for printing electronics, and the second part then deals with study of the state of research in this area. Then based on the analysis and studies a suitable technology and concept of a device, which could be created in the laboratories of the department was proposed.

## **Key words**

3D printing, additive manufacturing, electronics, printing of electronic circuits

# OBSAH

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| SEZNAM OBRÁZKŮ .....                                                     | 10 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....                                            | 11 |
| ÚVOD.....                                                                | 12 |
| Cíle bakalářské práce .....                                              | 13 |
| 1    3D TISK .....                                                       | 14 |
| 1.1    Materiály 3D tisku a jejich využití.....                          | 14 |
| 1.2    Základní metody.....                                              | 15 |
| 1.2.1    Material extrusion .....                                        | 16 |
| 1.2.2    Material jetting.....                                           | 17 |
| 1.2.3    Binder jetting .....                                            | 18 |
| 1.2.4    Sheet lamination .....                                          | 19 |
| 1.2.5    Vat Photopolymerization .....                                   | 20 |
| 1.2.6    Powder bed fusion .....                                         | 21 |
| 1.2.7    Direct energy deposition.....                                   | 22 |
| 2    3D TISK ELEKTRONIKY .....                                           | 23 |
| 2.1    Obecné výhody a nevýhody 3D tisku elektroniky .....               | 23 |
| 2.2    Technologie používané pro výrobu elektroniky pomocí 3D tisku..... | 24 |
| 2.2.1    Tiskárna Voxel8.....                                            | 25 |
| 2.2.2    Modifikovaná tiskárna Průša Mendel i2 .....                     | 26 |
| 2.2.3    Tiskárna DragonFly 2020 Pro.....                                | 27 |
| 2.2.4    Technologie tryskání aerosolu .....                             | 28 |
| 2.2.5    Metoda tištění plazmatu.....                                    | 29 |
| 2.3    Výzkum a nové technologie 3D tisku elektroniky .....              | 30 |
| 2.3.1    Hybridní keramický 3D tisk .....                                | 30 |
| 2.3.2    Tisk senzorů pomocí 3D pera .....                               | 31 |

|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 2.3.3 | 3D tisk lithium-iontových baterií.....           | 32 |
| 2.3.4 | 3D tisk polypropylenových ferroelektretů.....    | 33 |
| 2.3.5 | 3D tisk pružného a samoléčícího tenzometru ..... | 34 |
| 3     | POROVNÁNÍ A NÁVRH TECHNOLOGIE .....              | 35 |
| 3.1   | Tabulka porovnání .....                          | 35 |
| 3.2   | Návrh technologie .....                          | 36 |
| 3.2.1 | Modifikace tiskárny Průša.....                   | 37 |
| 4     | NÁVRH ZAŘÍZENÍ .....                             | 38 |
| 4.2   | Postup výroby.....                               | 39 |
| 5     | ZÁVĚR.....                                       | 41 |
|       | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....                    | 42 |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1: Princip technologie tisku ME [20] .....                                                                                                                   | 16 |
| Obrázek 2: Princip technologie tisku MJ [20] .....                                                                                                                   | 17 |
| Obrázek 3: Princip technologie tisku BJ [20] .....                                                                                                                   | 18 |
| Obrázek 4: Princip technologie tisku SL [20] .....                                                                                                                   | 19 |
| Obrázek 5: Princip technologie tisku VP [20] .....                                                                                                                   | 20 |
| Obrázek 6: Princip technologie tisku PBF [20] .....                                                                                                                  | 21 |
| Obrázek 7: Princip technologie tisku DED, vlevo pomocí prášku a vpravo pomocí drátu<br>[19] .....                                                                    | 22 |
| Obrázek 8: Kvadrokoptéra vytvořená pomocí 3D tisku [23] .....                                                                                                        | 25 |
| Obrázek 9: Porovnání vodivosti materiálů na trhu roku 2015 [24] .....                                                                                                | 25 |
| Obrázek 10: Sekundární extruder tiskárny Průša Mendel i2 [26] .....                                                                                                  | 26 |
| Obrázek 11: Modifikovaná tiskárna Průša Mendel i2 [26] .....                                                                                                         | 26 |
| Obrázek 12: Deska s plošnými spoji, vytisknutá tiskárnou DragonFly 2020 Pro [29] ..                                                                                  | 27 |
| Obrázek 13: Deska plošných spojů, vytvořená tiskárnou DragonFly 2020 Pro [28] .....                                                                                  | 27 |
| Obrázek 14: Vlevo popis technologie AJP, vpravo proud aerosolu vystupující z trysky<br>[31] .....                                                                    | 28 |
| Obrázek 15: Tisková hlava metody tištění plazmatu [33] .....                                                                                                         | 29 |
| Obrázek 16: Zařízení pro tištění plazmatu [33] .....                                                                                                                 | 29 |
| Obrázek 17: 3DCERAM tisková hlava .....                                                                                                                              | 30 |
| Obrázek 18: Hliníkový díl se zabudovanou cívkou uvnitř [34] .....                                                                                                    | 30 |
| Obrázek 19: Výroba senzorů pomocí 3D pera [36] .....                                                                                                                 | 31 |
| Obrázek 20: schéma 3D tisku pro přípravu strukturního polovodičového elektrolytu [36]<br>.....                                                                       | 32 |
| Obrázek 21: Vrstvy piezo-polymerového měniče: (a) spodní vrstva, (b) prostřední<br>vrstva s trojúhelníkovým vzorem a (c) horní vrstva, částečně odříznutá [37] ..... | 33 |
| Obrázek 22: Princip roztažnosti a samoléčby materiálu [38] .....                                                                                                     | 34 |
| Obrázek 23: Modifikace tiskárny Průša .....                                                                                                                          | 36 |
| Obrázek 24: Jednodeskový počítač Arduino Uno [39] .....                                                                                                              | 37 |
| Obrázek 25: ICSP port .....                                                                                                                                          | 37 |
| Obrázek 26: Schéma kvadrokoptéry tištěné v laboratořích katedry .....                                                                                                | 38 |
| Obrázek 27: Základy dronu .....                                                                                                                                      | 39 |
| Obrázek 28: Model dronu .....                                                                                                                                        | 40 |

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

|      |                                                              |
|------|--------------------------------------------------------------|
| ABS  | Akrylonitrillbutadienstyren                                  |
| ACMO | N-acryloylmorpholine                                         |
| AJP  | Aerosol Jet Printing                                         |
| AM   | Aditivní výroba – „Additive Manufacturing“                   |
| BJ   | Binder Jetting                                               |
| CAD  | Počítačem podporované projektování – „Computer Aided Design“ |
| CB   | Saze – „Carbon Black“                                        |
| CFD  | Výpočetní dynamika tekutin – „Computational Fluid Dynamics“  |
| CNTs | Uhlíkové nanotrubičky – „Carbon Nanotubes“                   |
| DED  | Direct Energy Deposition                                     |
| DLP  | Digital Light Processing                                     |
| FDM  | Fused Deposition Modeling                                    |
| ICSP | In-Circuit Serial Programming                                |
| LED  | Elektroluminiscenční dioda – „Light-Emitting Diode“          |
| ME   | Material Extrusion                                           |
| MJ   | Material Jetting                                             |
| PBF  | Powder Bed Fusion                                            |
| PC   | Polykarbonát                                                 |
| PE   | Polyethylen                                                  |
| PEEK | Polyetherketonová vlákna – „Polyetheretherketone“            |
| PLA  | Polymléčná kyselina – „Polyactic Acid“                       |
| PMMA | Polymethylmethakrylát                                        |
| PP   | Polypropylen                                                 |
| PPSF | Polyfenylsulfon                                              |
| SL   | Sheet lamination                                             |
| SLA  | Stereolitografie                                             |
| STL  | Standard Tessellation Language                               |
| UAM  | Ultrasonic Additive Manufacturing                            |
| UV   | Ultrafialové – „Ultraviolet“                                 |
| VP   | Vat Photopolymerization                                      |

## ÚVOD

3D tisk je v dnešním světě čím dál více častější téma a i když je teprve na počátku svého vzniku, neustále se vyvíjejí nové metody, jak a kde tisk využít. Existuje obrovské množství způsobů, jak 3D tisk aplikovat. Od nejdražších tiskáren s kvalitními parametry tisku, až po ty nejlevnější na trhu, dostupné každému, ačkoliv s ne tak dobrou výstupní kvalitou, jako na druhé straně.

Materiálů používaných v této oblasti je veliké množství a stále přibývají nové a zdokonalené. Ať už je to tisk plastových prototypů, textilií, kovových výtisků, keramiky, betonových staveb, čokolád a jiných jídel nebo tisk elektroniky, kterému se v této práci věnuji. 3D tisk elektronických obvodů sahá až do let 1998, kde se podařilo vytvořit jednoduché zařízení, pomocí tisknutí vodivého inkoustu do pevného polymerového objektu. Poté se do výzkumu 3D tisku elektroniky, přidaly i firmy jako Nano Dimensions, se svým speciálním nanomateriálem nebo firma Voxel8, která se také začala zabývat vícemateriálovým tiskem, nejen pro účely elektroniky. Dnes se už 3D tisk elektroniky využívá poměrně frekventovaně, ať už v kusové výrobě zařízení se zabudovanou elektronikou nebo v hromadné výrobě různých senzorů a antén. Stále jsou to však nové technologie a procházejí řadou výzkumů a zlepšení.

Oblast výzkumu se zaměřuje například na pružné, nositelné zařízení, které má v sobě zabudované senzory pro monitorování zdraví nebo také pro funkce jako smyslová kůže a umělá inteligence. Velkou překážkou pro tyto zařízení jsou však materiály, které nesplňují požadované vlastnosti pro tisk, v hlavní roli vodivost a pružnost materiálu.

Asi největší výhodou 3D tisku elektroniky, je například možnost vytvoření objektu s libovolnými rozměry. Celé vytisknuté zařízení je tak mnohem jednodušší, lehčí a pevnější díky malému počtu dílů, které součást obsahuje. Výhodou je také rychlost tisku a jednoduchá výroba. Příprava modelu, je už ovšem o něco složitější, jelikož je zapotřebí speciální software, který umí pracovat s elektronikou.

## **Cíle bakalářské práce**

Hlavním úkolem této bakalářské práce, je provedení rešerše aktuálního stavu 3D tisku elektroniky po světě. To zahrnuje analýzu současného stavu využití technologií a provedení studií stavu výzkumu v oblasti 3D tisku pro výrobu elektronických obvodů. Poté se na základě rešerše navrhne vhodná technologie a vytvoří se koncept zařízení, realizovatelné v laboratořích katedry.

# 1 3D TISK

3D tisk je také známý pod názvem aditivní výroba neboli výroba nanášením tenkých vrstev materiálu na sebe. Obecný princip výroby spočívá ve třech základních krocích. Prvním krokem je získání modelu pro tisk. Model se vytvoří v programu pro práci s 3D objekty, jako je např. program CAD. Jiná možnost, jak model získat, je také 3D scan nebo v případě soukromého užívání je přívětivější model stáhnout z internetových zdrojů. Dále je model konvertován nejčastěji do formátu STL – Standard Tessellation Language. Nevýhodou je, že převod do tohoto formátu, mírně poškodí kvalitu modelu. Program pracuje pouze pomocí geometrie trojúhelníků, a proto nedokáže vytvořit perfektní křivky.

Ve druhém kroku se soubor odešle do stroje pro aditivní výrobu, kde se model rozdělí do určitého počtu vrstev. Také se nastavuje velikost, natočení a pozice tištěného objektu. Nakonec se spustí samotný proces tisku, ve kterém se na sebe vrství materiál až do finální podoby [1].

## 1.1 Materiály 3D tisku a jejich využití

Materiály používané pro aditivní výrobu jsou různé. Všechny však musí splňovat určité požadavky na určitý typ zařízení a tím zajistit správný proces tisku. Materiály, které jsou významné v oblasti 3D tisku, jsou plasty, kovy, keramika, kompozitní materiály a v neposlední řadě speciální materiály, jako např. jídlo a textilie.

Plast, jako materiál pro tisk, však tvoří největší podíl z této skupiny. Vytvářejí se z něj prototypy k testování, ale například i různé součástky se složitou geometrií. Každý plast má jinou teplotu tavení a kvůli tomu se mění i jeho využití a cena. Materiály s menší teplotou tavení nebo materiály tekuté, mají větší využití než materiály s vysokou teplotou tavení. To je způsobeno nízkou hmotností, cenou a dobrou pružností materiálu. Patří sem termoplasty, jako Akrylonitrilbutadienstyren (ABS), Polypropylen (PP), Polyamid (PLA) a Polyethylen (PE). Na druhé straně jsou materiály s vyšší teplotou tavení, jako je Polyetheretherketone (PEEK) a Polymethylmethakrylát (PMMA).

Kovové materiály výtisků se nejvíce využívají v automobilové a letecké výrobě, zpracovatelském průmyslu a lékařství. Díky výborným fyzikálním vlastnostem kovů, je škála jeho využití velmi velká, ať už v kosmonautice, kde se obvykle objevují slitiny niklu, nebo při vytváření specifických, umělých částí těla, které by bylo složité a drahé vyrobit

konvenčními metodami. Zde se jako materiály k tisku využívají slitiny hliníku a kobaltu. Jiné použitelné kovové materiály jsou například slitiny titanu a nerezové oceli.

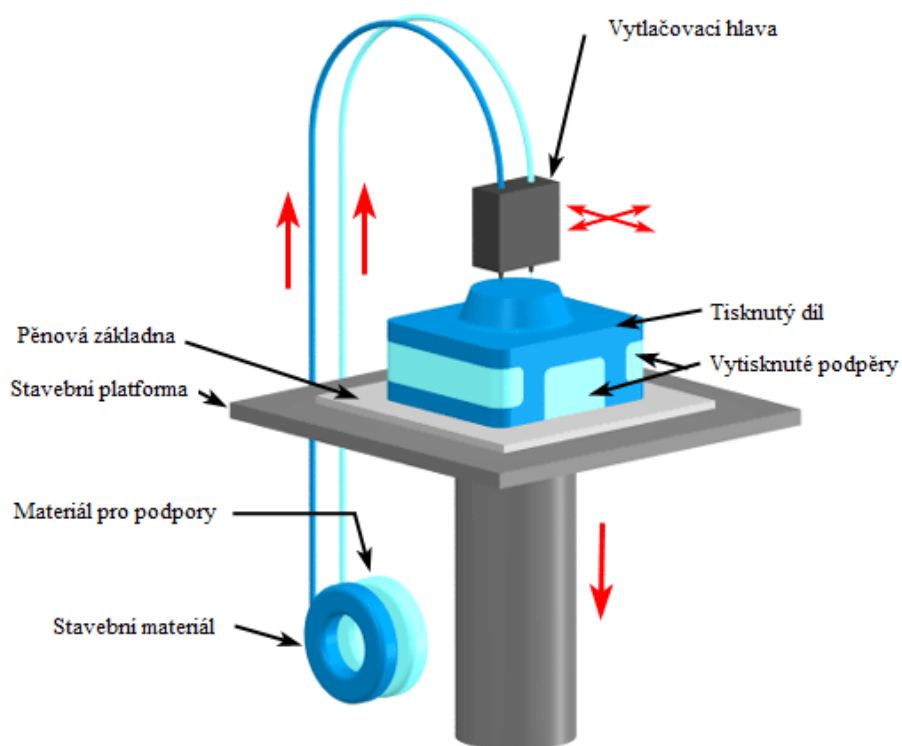
Další materiál, který je v oblasti 3D tisku známý je keramika a to především díky její tvrdosti, odolnosti proti vysokým teplotám a chemickým vlivům. Ohled se však musí brát na křehkost a malou pružnost materiálu. Značnou výhodou tvoří fakt, že se keramika nachází v tekutém stavu, a proto se dá aplikovat na jakkoliv složitý tvar modelu. Jako příklad tohoto materiálu je nejčastěji oxid hlinitý ve formě prášku, který se využívá například jako katalyzátor a absorbent. Dalšími materiály jsou bioaktivní sklo a zirkon. Mezi kompozitní materiály, které jsou známé kvůli nízké hmotnosti a vysoké pevnosti patří karbonové a skleněné vláknové kompozity. Pro metody aditivních technologií se však využívají vláknové kompozity skleněné, jelikož se v procesu vytvrzování nenapalují. Jsou levné a zároveň mají dobré vlastnosti, jako vysokou tepelnou vodivost s nízkou teplotní roztažností [2, 3].

## **1.2 Základní metody**

Aditivní technologie ve světě uspěly hlavně díky Rapid Prototyping, v překladu výroba prototypů. Důvodem je schopnost vytvořit podstatně složitější struktury v dobré kvalitě za krátkou dobu a lze je okamžitě použít na další zpracování a testování. Aby se docílilo požadované kvality, je nutno uvažovat nad způsobem, kterým bude výtisk vytvořen. Dělení procesů a metod aditivní výroby může být matoucí. Důvodem je, že firmy, které se zabývají technologií 3D tisku, vytvořily své vlastní metody, se svým originálním jménem a používaným materiálem, aby se odlišily od konkurence. Byly však vytvořeny kategorie procesů, do kterých dané technologie a metody spadají dle normy ISO/ASTM 52900:2015 [4]. Mezi sedm základních procesů 3D tisku tedy patří, material extrusion (vytlačování materiálu), material jetting (nanášení tryskáním) a binder jetting (tryskání pojiva), který pracuje na principu spojování prášku, dále sheet lamination (laminace plátů) je proces, při kterém se spojují pláty materiálu, ať photopolymerization (fotopolymerizace), powder bed fusion a direct energy deposition. Tyto metody budou stručně vysvětleny v následujících kapitolách.

### 1.2.1 Material extrusion

Metoda material extrusion (ME) spočívá v postupném nanášení vrstev, nejčastěji nataveného termoplastu ve formě drátu. Byla vynalezena společností Stratasys, Inc. v roce 1988, patentována však byla až v roce 1992, jako metoda FDM (fused deposition modeling) [5]. Tenký drát, který je namotán na cívce, se vymotává pomocí podavačů do tiskové hlavy, kde je nahříván na teplotu o 1° vyšší, než teplota tavení materiálu. Tím se zajistí správná „tekutost“ materiálu k tištění. Zároveň díky tomu, natavený drát při styku se stavebním podkladem okamžitě tuhne a tím tak lze vytvořit malou vrstvu. Tato metoda je ve světě jedna z nejpoužívanějších a to díky její praktičnosti a cenové dostupnosti. Filament ve formě namotaného drátu na cívce je možno získat z materiálů jako ABS, PC, PPSF a mimo plastů také vosk, kovy a keramika. U modelů, které výrazně přecházejí vůči svým základům, je třeba vytvořit podporu z lepenky nebo polystyrenu. Nové stroje používané k metodě FDM mají zabudovanou druhou trysku, která slouží k tisku podpěr dané součásti. Materiál podpěr bývá levnější a snadno oddělitelný od původního materiálu, aby nedošlo k narušení povrchu výtisku [6].

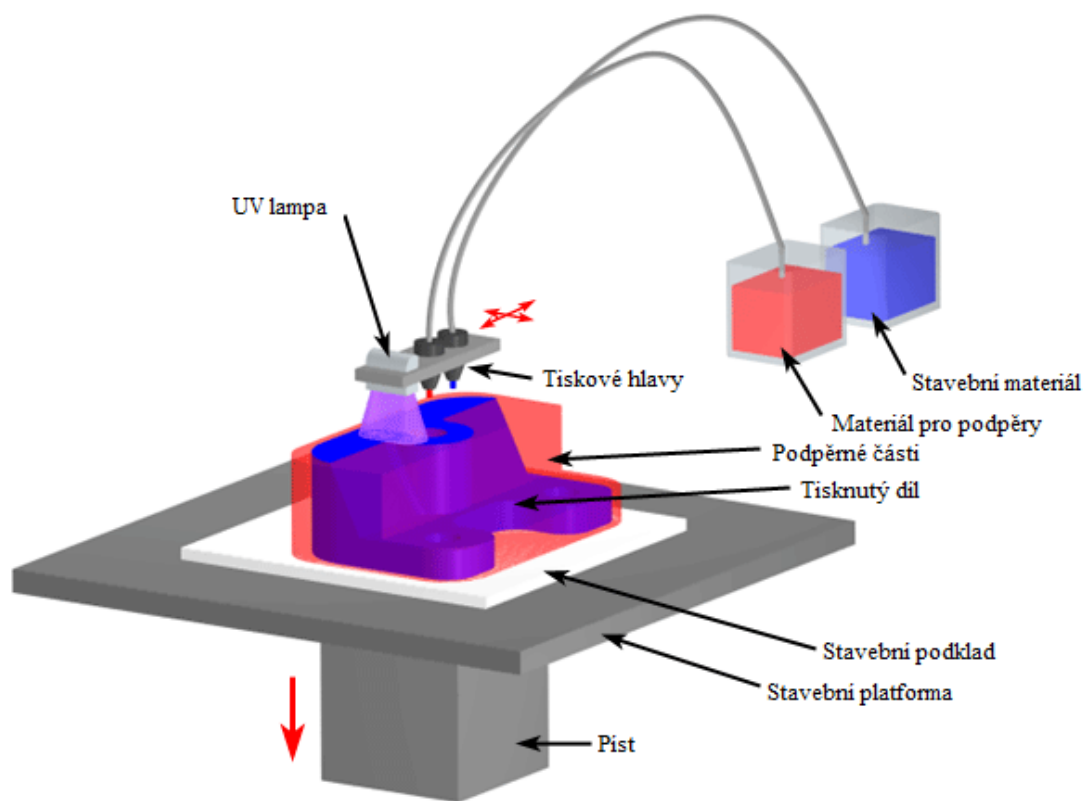


Obrázek 1: Princip technologie tisku ME [20]

### 1.2.2 Material jetting

Material jetting (MJ) [7] je proces podobný procesu klasického inkoustového tisku. Používají se inkoustové tiskové hlavy, ze kterých vytékají kapky materiálu typicky tvořeny z fotopolymerů. Ty následně tvrdnou pod účinkem ultrafialového záření a tím tvoří vrstvy součástí. Při tomto procesu se většinou využívají tiskové hlavy s více tryskami. Může se tak tisknout z více materiálů a to vede k celkovému zrychlení procesu. Materiály je možno kombinovat a tím vytvořit tzv. digitální materiál s určitými požadovanými fyzikálními vlastnostmi a barvou.

MJ se dnes považuje za jednu z nejpresnějších technologií v oblasti aditivní výroby. Výška jedné vrstvy se pohybuje v rozmezí 16 – 32 mikrometrů. Je možné vytvořit materiály, které jsou elektricky vodivé i nevodivé. Tato technologie, známá jako „direct-write“ technologie, atomizuje nanočástice tištěného materiálu a spojuje je s inertním nosným plynem. Aerosol, který spojením vznikne je nanášen na povrch ve formě tenké, přesné čáry. Proto je tímto procesem možné vytvářet elektronické obvodové desky. Tuto technologii využívá například tiskárna Dragonfly 2020 Pro, o které je v této práci samostatná kapitola, viz str. 27 [8].

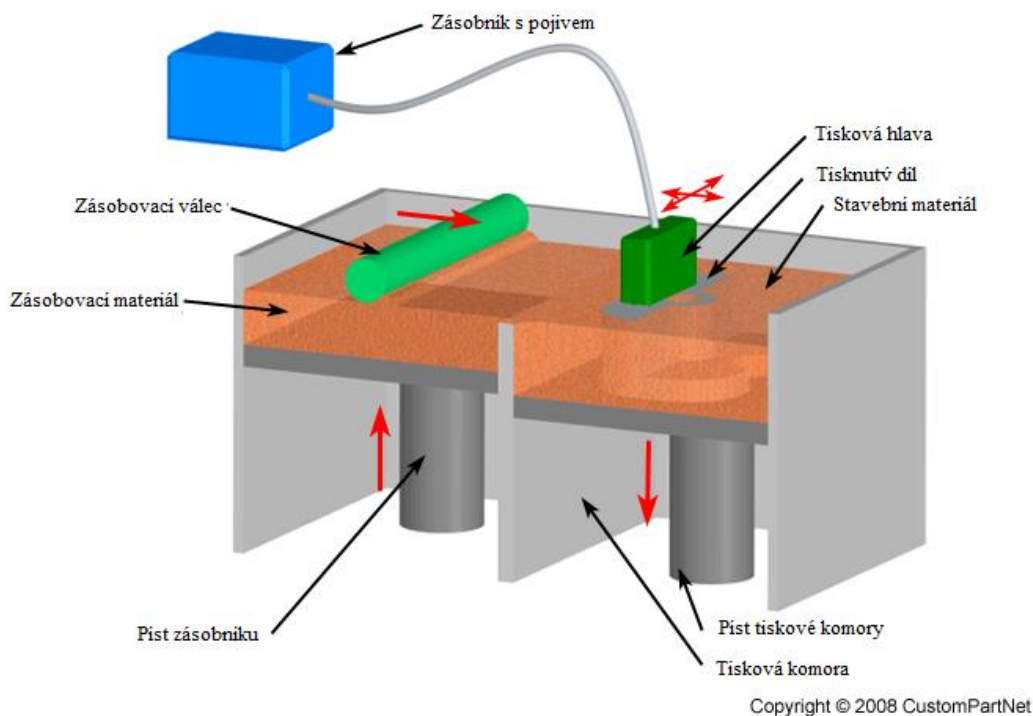


Copyright © 2008 CustomPartNet

Obrázek 2: Princip technologie tisku MJ [20]

### 1.2.3 Binder jetting

Binder jetting (BJ) [9] je proces, který využívá velmi podobný způsob tryskání materiálu jako u metod MJ. Avšak rozdílem je, že u BJ je tisknutý materiál pojivem, nikoliv stavitelným materiálem. Toto pojivo je ve formě tekutiny, která spojuje prášek do vrstev dané součásti. Vrstvy prášku jsou postupně nanášeny pomocí válečku.



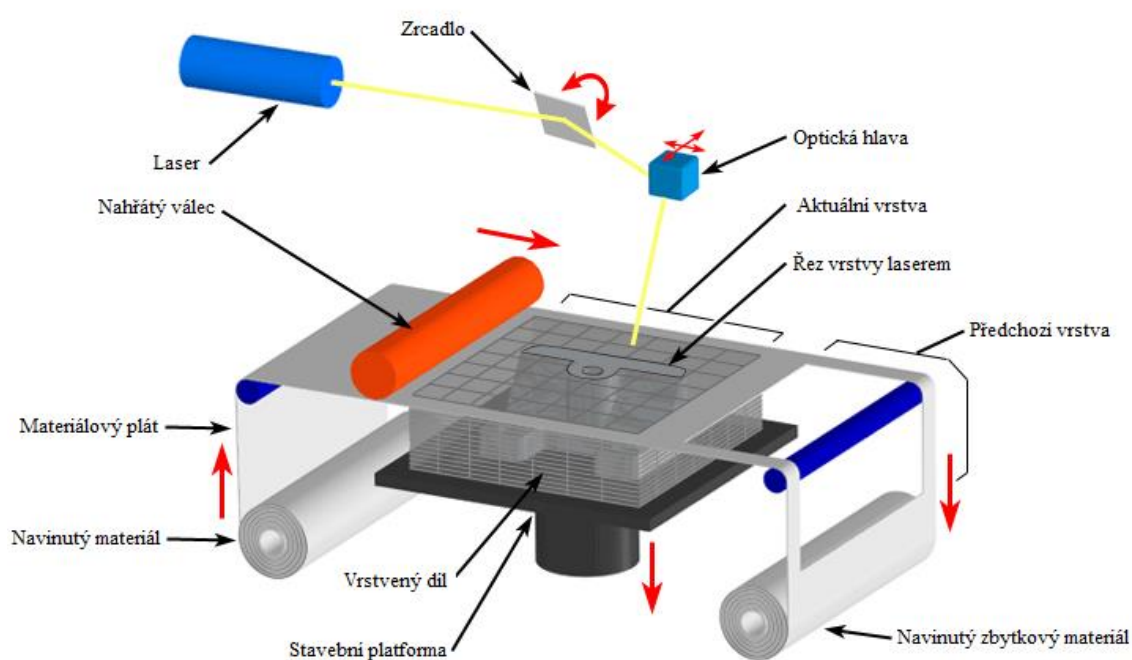
Obrázek 3: Princip technologie tisku BJ [20]

Touto technologií je možné vytvářet kovy a slitiny na bázi hliníku, mědi, železa, niklu a kobaltu. Mimo jiné je možné vytvářet také z keramiky, skla, písku, grafitu atd. V podstatě je tato technologie schopna pracovat s materiály, které existují i ve formě prášku. K vytvoření součástí, je nutné provést dodatečné operace. Mezi ně patří vytvrzování, odprášení, slinování, infiltrace, žíhání a finišování. Tyto operace se provádí v peci s vysokou teplotou, a pokud je součást kovová, dochází k výraznému smrštění. Aby se omezilo velkému smrštění, provádí se tzv. infiltrace. Do kovového prášku, nejčastěji z nerezové oceli, se přidá prášek jiného kovu, např. bronz. Samotný proces tisku trvá kratší dobu než dodatečné operace a díky tomu jsou součástky vytvořené touto technologií drahé. Na druhou stranu, výhodou této metody je, že k vytvoření modelu není potřeba podpůrných částí, jelikož tvořený model přímo leží ve volném neslepeném prášku. To umožňuje tisknout více součástí na sebe s minimální mezerou o velikosti pár vrstev prášku [8, 10].

### 1.2.4 Sheet lamination

Princip metod sheet lamination (SL) spočívá ve spojování tenkých plátů z různých materiálů. Příkladem mohou být papíry potahované lepidlem, které po laminaci tvoří objekty podobné překližce. Součásti však mohou být vytvářeny i z kovových materiálů ve formě pásek a fólií [11].

První objekty tvořené technologií SL, byly z nebělených sulfátových papírů, vyráběné firmou Helisys. Pláty papíru byly navinuty mezi dvěma kotouči, které se postupně odvíjely. Dále se pomocí laseru vyřezávala daná vrstva, která byla následně spojována s předchozí. K laminaci jednotlivých vrstev se využíval nahřátý válec. Další technologií využívající metodu SL je ultrazvuková aditivní výroba, anglicky ultrasonic additive manufacturing (UAM), vynalezena firmou Fabrisonic. Využívá se zejména pro výrobu kovových objektů díky ultrazvukovému svařování jednotlivých vrstev. Tento proces umožňuje spojovat odlišné kovy a také vkládat elektroniku do tvořených součástek [8].



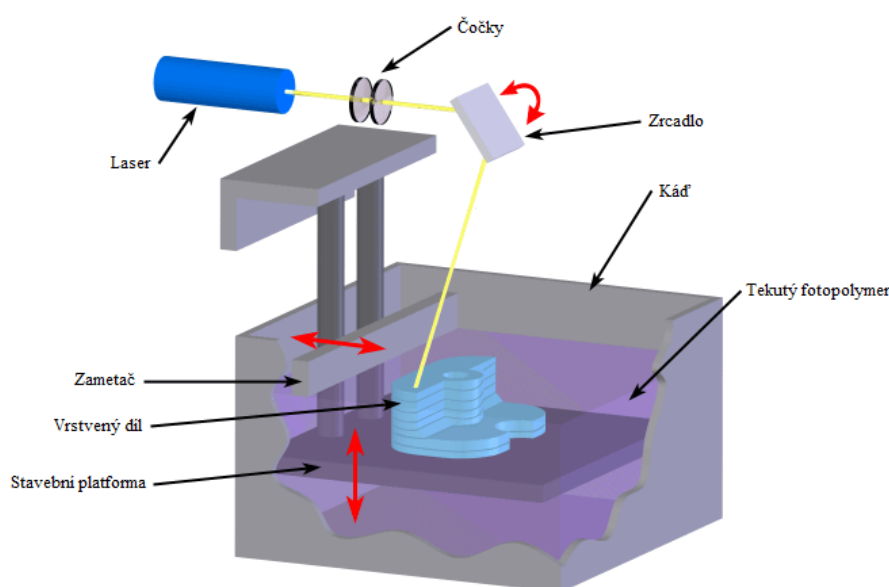
Copyright © 2008 CustomPartNet

Obrázek 4: Princip technologie tisku SL [20]

### 1.2.5 Vat Photopolymerization

Vat Photopolymerization (VP) [12] je proces, který pracuje na bázi fotopolymeru, uloženého v nádrži. Fotopolymer tvrdne za účinku vysoce intenzivního světla, typicky UV záření, vyzařovaného z laseru. Tato technologie využívá platformu, ponořenou v nádrži s fotopolymerem. Na platformě postupně tvrdnou místa ozářená světlem, a jakmile je vrstva hotová, celá platforma se ponoří níže nebo výše do nádrže o velikost jedné vrstvy a celý proces se opakuje. K finálnímu produktu je potřeba udělat pár dokončovacích metod. Mezi tyto dokončení patří odstranění podpůrných částí a čištění, například alkoholem. Finální úpravou je vytvrzování součástí. To se provádí v UV komorách sloužících ke zpevnění a dokončení polymerizace ve vrstvách. Technologie VP je známá spíše pod názvem Stereolitografie (SLA) a je první patentovanou výrobou nanášením vrstev. Také se jedná o nejpřesnější metodu 3D tisku vůbec. Výška jedné vrstvy bývá okolo 10 mikrometrů. Například firma Nanoscribe dokáže tisknout miniaturní součástky v mikroskopickém měřítku pomocí tzv. dvoufotonové fotopolymerizace [13].

Nové technologie využívající metodu VP, používají jako zdroj záření LED, spolu s technologií DLP (digitální zpracování světla). Jednotka DLP je složená z miniaturních zrcadel, které vyzařují obraz na vršek nebo spodek nádrže. Tento způsob tak dokáže vytvořit celou vrstvu najednou a je tak rychlejší, než postupné vytvrzování po bodech laserem. Avšak tato technologie je drahá a nedokáže dobře zvětšovat obraz vrstev na velké rozměry. Mezi levnější systémy technologie VP patří B9 Creator, MiiCraft, Pegasus Touch, Prusa SL1 a ProJet 1200 [8, 14].



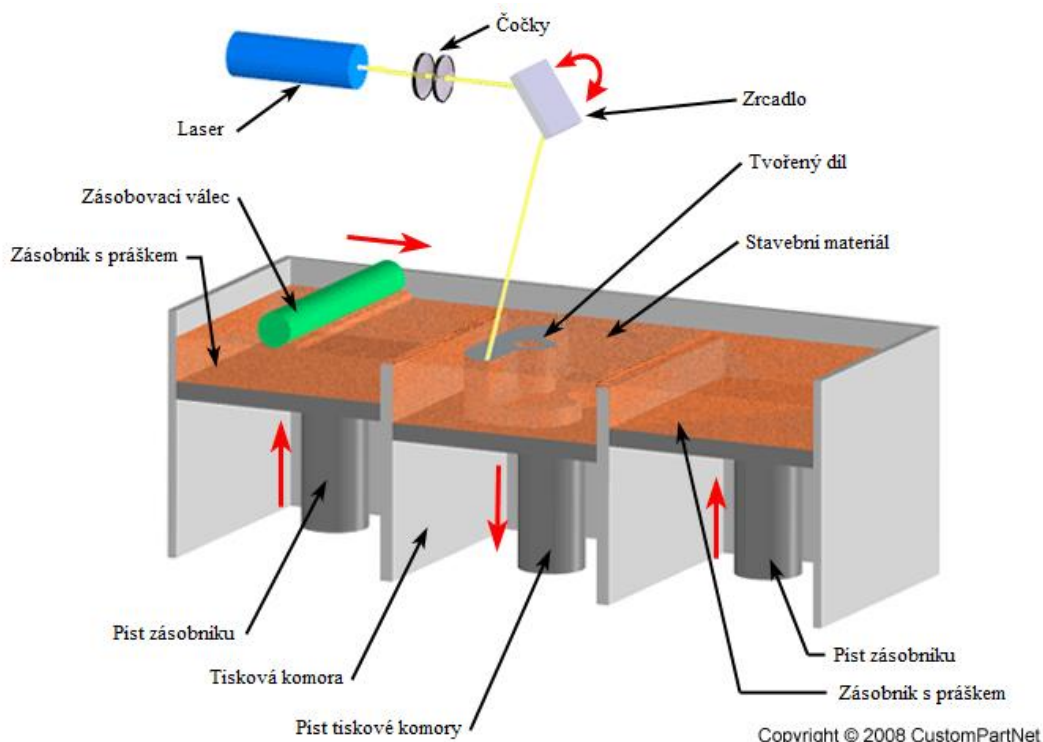
Copyright © 2008 CustomPartNet

Obrázek 5: Princip technologie tisku VP [20]

### 1.2.6 Powder bed fusion

Powder bed fusion (PBF) je proces, který využívá tepelnou energii ke spékání a spojování materiálu ve formě prášku. Prášek je uložen ve dvou zásobnících, pracovním a dodávacím. Vysokou teplotou se prášek roztaví, spojí a zpětným ochlazením ze sebe tvoří pevnou vrstvu. Když je vrstva vytvořena, prášek se z dodávacího zásobníku přemístí na pracovní plochu, která se sníží o velikost jedné vrstvy. K postupnému ohřívání prášku na konkrétních místech je používán laser nebo elektronový paprsek.

Bayerisches Laser Zentrum v Německu [15] vyvinulo dvoupaprskový systém pro spékání prášku laserem. Využití přídavného paprsku je, že předechřívá okolní materiál z důvodu snížení vnitřních napětí, která jsou způsobená dynamickou změnou teploty. Vzhledem k tomu, že se vytvářením zahřívá okolní materiál a tím i celá komora, nevyužitý prášek degraduje a lze ho použít jen pro určitý počet opakování. Proto se materiál musí hlídat a postupně vyměňovat s novým. Výhodou tvoří fakt, že součást nepotřebuje podpory právě díky okolnímu materiálu, ve kterém je uložena. Toto však neplatí v případě tvorby kovových částí. Důvodem je zmíněná vysoká teplota v komoře, kvůli které se součást může deformovat. Další výhodou metod PBF je velká škála materiálů, avšak oproti ostatním technologiím 3D tisku je drahá. Obzvlášť u strojů pro vytváření kovových výtisků. Do celkové ceny metody také spadá poptávka po inertním plynu, cena materiálu, bezpečnost a problémy s recyklací hlavně při práci s polymery [8, 16].

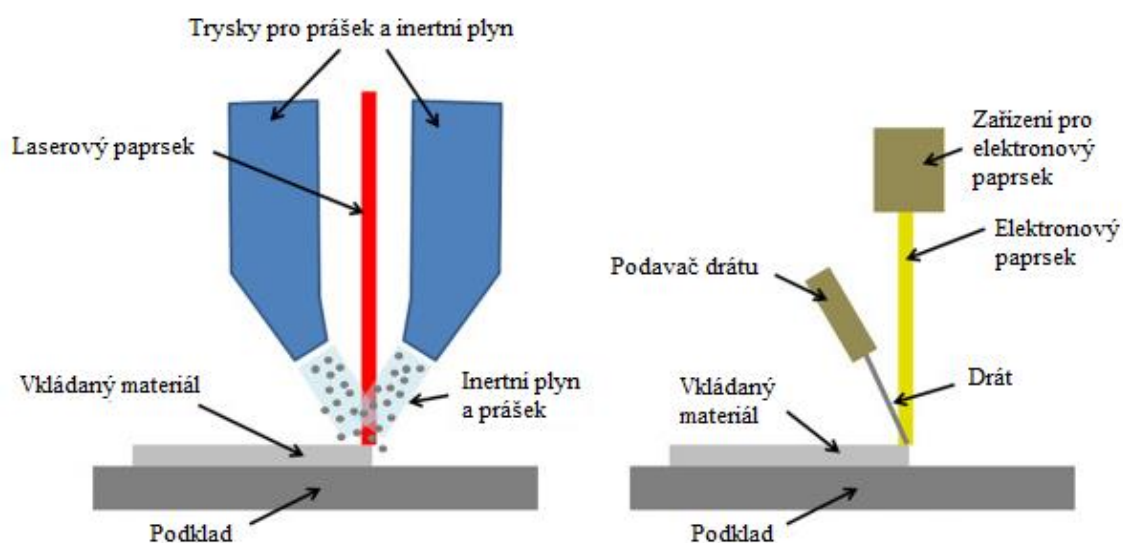


Obrázek 6: Princip technologie tisku PBF [20]

### 1.2.7 Direct energy deposition

Proces direct energy deposition (DED) [17] je podobný procesu PBF, materiál se také spojuje pomocí tepelné energie s využitím laseru nebo elektronového paprsku. Ovšem u procesu DED se materiál přímo dodává do míst roztavené lázně. Ve své podstatě je to metoda 3D tisku svařováním. Tento proces také využívá materiály ve formě prášku jako u PBF, obvykle kovových, ale mohou být i ve formě drátu. Touto technologií je možné dodávat více různých materiálů zároveň a tím vytvořit díly s plynulým přechodem materiálu.

Většina DED strojů využívá 4- nebo 5-osý pohyb hlavy. To umožňuje přidávat vrstvy v každém směru a výroba tak není vázána pouze na horizontální tvorbu vrstev. Proto se tato technologie využívá pro opravy dílů nebo přidávání různých částí na výrobek, kde je potřeba se k součásti dostat z různých stran. K vytvoření objemnějších vrstev v řádu milimetrů se využívá CO<sub>2</sub> laser. Naopak pro dosažení tenkých vrstev může být použit Nd-YAG laser [18] s dobrou přesností, až v desetinách milimetrů [19].



Obrázek 7: Princip technologie tisku DED, vlevo pomocí prášku a vpravo pomocí drátu [19]

## 2 3D TISK ELEKTRONIKY

Tato kapitola se zabývá 3D tiskem elektroniky a používanými technologiemi aditivní výroby v současnosti, ale také se zabývá výzkumem a vývojem v této oblasti. Typické stroje k výrobě tištěné elektroniky, je tisk ze dvou materiálů. Základní, nevodivý materiál, ze kterého je součást vytvořena a vodivý pro tisk obvodů. Tím, že proces využívá tyto dva materiály, je možné vytvořit elektronický objekt jako celek, který potřebuje jen malou, nebo žádnou montáž.

Výroba elektroniky 3D tiskem se rozděluje do dvou kategorií. Prvním způsobem výroby je tisk elektroniky odděleně od součásti a druhým je tisk elektroniky přímo při procesu tisku součásti. V prvním způsobu se elektronická součástka vytiskne samostatně a poté se vkládá do výrobku. Výrobek přitom může být vytvářen aditivními technologiemi nebo klasickými konvenčními metodami. Ačkoliv je tento způsob jednodušší, než tisk elektroniky přímo při procesu tisku, je nutná následná operace montáže. Například firma Optomec využívá technologii tryskání aerosolu [21], viz str. 28. Takto se mohou tisknout senzory, antény a jiná funkční elektronika, určená pro plastové, skleněné, ale i keramické komponenty.

Druhý způsob k tisku využívá dvě vytlačovací trysky. První tryskou se tisknou základy součásti z požadovaného materiálu. V momentě kdy je vše připraveno na tisk elektronických prvků, na řadu přichází druhá tryska využívající vodivý materiál. Poté se trysky znovu vystřídají a tisk se dokončuje ze stavitelného materiálu. Tato technologie tak může tisknout bez zastavení a k dokončení nejsou třeba žádné další operace.

### 2.1 Obecné výhody a nevýhody 3D tisku elektroniky

Asi největší výhodou použití 3D tisku k výrobě elektroniky je velké přizpůsobení výsledného tvaru objektu. Proto lze vytvářet tvary odlišné geometrie a velikosti elektroniky přímo určené pro konkrétní díly nebo rovnou celé konstrukce. S tím souvisí další výhoda, malé plýtvání a nízká hmotnost součásti. Na rozdíl od konvenčních metod, kde materiál odebíráme, u aditivních technologií materiál nanášíme přesně tam, kam je potřeba. Malá hmotnost součásti je zapříčiněna absencí kabelů, drátů a obvodových desek. Za zmínku také stojí, že u klasické výroby elektroniky se využívá proces leptání, ke kterému je po-

třeba použití škodlivých chemikálií. Tento proces leptání při 3D tisku odpadá. Další výhodou 3D tisku elektroniky je zvýšená ochrana proti poškození díky jednolitému tvaru s vestavěnou elektronikou uvnitř, provázená jednoduchou, nebo žádnou montáží.

Jako každá jiná technologie, tak i tisk elektroniky má své nevýhody a překážky, které je nutno akceptovat. Například programy pro design 3D modelů musejí umět pracovat s elektronikou. To je v dnešní době teprve v rané fázi, ale v následujících letech se jistě objeví programy přímo určené pro aditivní výrobu elektroniky. Některé společnosti, například firma Voxel8 však dodávají k tiskárně vlastní software, kde lze tyto funkce nalézt. Nevýhodou také je, že elektronické čipy, které se dnes využívají v elektronice, tzv. IC (Integrated circuit) čipy, jsou velikostně v řádech nanometrů. Nynější systémy aditivní výroby jsou však schopny tisknout pouze v měřítku mikrometrů, proto se zatím mikroelektronikou, v oblasti aditivní výroby, nelze zabývat. Také je nutno brát v potaz, že u některých technologií je vodivým materiálem kov, u kterého je potřeba provést dodatečnou operaci vytvrzování. Tomu se dosáhne zahřátím výsledné součásti na teplotu 100°C a více. Proto je třeba zvolit správný stavěcí materiál, který takovéto teploty snese. Vlastnost, kterou také musí oba materiály splňovat je vzájemná adheze, tzn. přilnavost mezi vodičem a stavitelným materiálem. Musí se tedy hledět na texturu a chemické vlastnosti materiálů. A v neposlední řadě zde hraje svou roli i celková cena této výroby, kde záleží na způsobu vytváření a volbě materiálu [22].

Aby se výroba elektroniky dostala do běžné produkce, je třeba tyto zápory vyřešit. V následujících kapitolách jsou popsány metody a systémy, které už dokážou elektroniku tisknout.

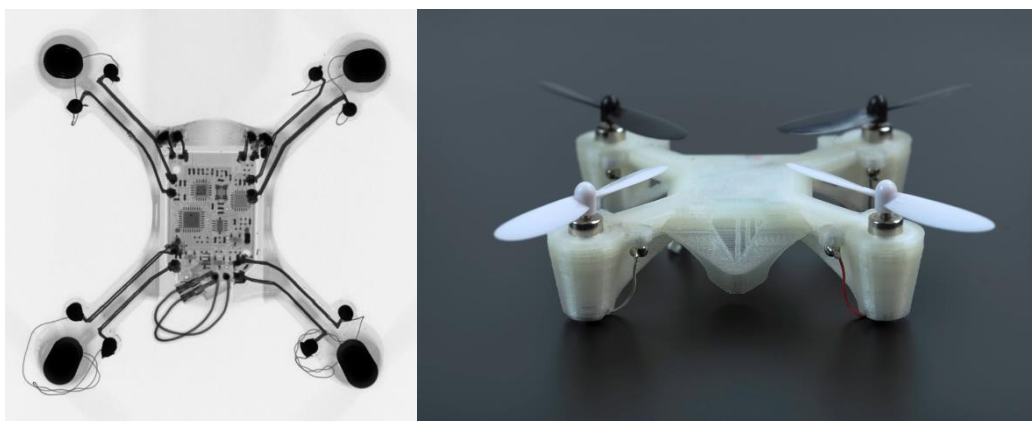
## **2.2 Technologie používané pro výrobu elektroniky pomocí 3D tisku**

První záznamy a pokusy 3D tisku elektroniky spadají až do roku 1998, kde proces tisknutí vodivého inkoustu do pevného strukturovaného materiálu představili Jeremy Palmer a Francisco Medina. Demonstrovali malé funkční elektronické obvody vytvořené technologií SLA, s pomocí přidané vytlačovací hlavy. Dnes už existují 3D tiskárny přímo určené k tisku elektroniky. Například tiskárna Voxel8, viz str. 25, dokáže tisknout jak ze stavitelného materiálu (v tomto případě z plastu), tak ze stříbrného vodivého inkoustu.

Následující texty se zabývají způsoby výroby a materiály, používaných pro výrobu elektroniky pomocí 3D tisku. Jsou zde popsány metody, které jsou na trhu k dostání a každodenně se využívají i v hromadné produkci.

### 2.2.1 Tiskárna Voxel8

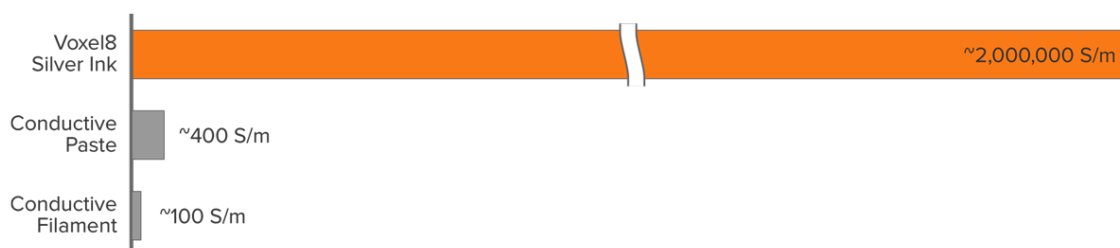
Tiskárna Voxel8 je prvním zařízením uvedeným na světovém veletrhu spotřební elektroniky CES roku 2015, které je navrženo přímo pro tisk elektroniky. Jak již bylo zmíněno, tiskárna může tisknout jak materiály plastové z PLA, tak i vodivý stříbrný inkoust pomocí druhé vytlačovací trysky. Tato tiskárna je také schopna přerušit tisk a umožňuje tak případné vyjmutí modelu pro vložení součástek, například čipů, rezistorů a LED, a dále pokračovat v tisku. Touto převratnou technologií dokázala firma Voxel8 na CES předvést model bezpilotní kvadrokoptéry (vrtulník se čtyřmi rotory) vytvořené pouze z několika částí. Tělo modelu je tvořeno z termoplastu a obvodová deska, motory a diody LED jsou spojeny pomocí stříbrného inkoustu. To vše vytisknuto a spojeno za pomoci jednoho stolního zařízení, jehož cena se pohybuje okolo 200 000,- Kč [23].



Obrázek 8: Kvadrokoptéra vytvořená pomocí 3D tisku [23]

Firma Voxel8 spolupracuje se společností Autodesk, tudíž součástí této tiskárny je software ProjectWire, do kterého se dají nahrát CAD modely a do nich virtuálně přidávat elektroniku a vodivý inkoust. Na základě toho, kde se elektronické součásti nachází, se tiskárna zastaví pro jejich vložení a následně pokračuje v tisku.

Voxel8 nebyla v té době jediným průzkumníkem této oblasti 3D tisku. Roku 2013 univerzita Warwick vyvinula vodivý materiál CarboMorph, ale kromě nich se i spousta dalších snažili vytvořit elektricky vodivý filament pro 3D tisk. Ovšem firma Voxel8 se svým stříbrným inkoustem exceluje ve vodivosti tohoto materiálu, viz obrázek 9 [24].



Obrázek 9: Porovnání vodivosti materiálů na trhu roku 2015 [24]

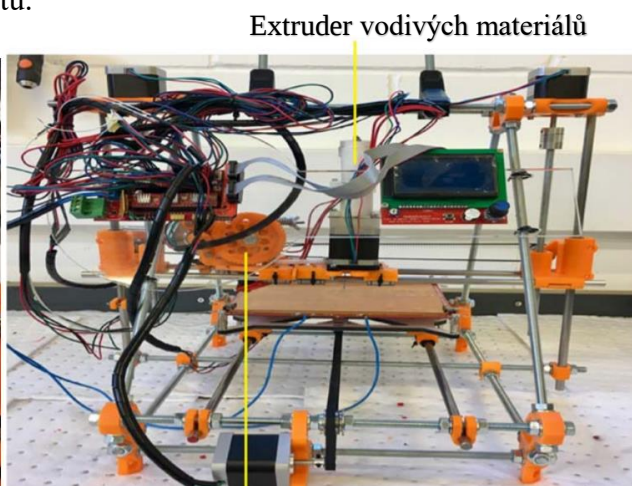
### 2.2.2 Modifikovaná tiskárna Průša Mendel i2

Česká společnost Prusa Research byla založena roku 2012 Josefem Průšou a nyní je jedna z nejznámějších společností v oblasti 3D tisku. Měsíčně do celého světa putuje přes 9000 tiskáren [25]. Konkrétně tiskárna Průša Mendel i2 byla experimentálně modifikována k účelům tisku elektronických obvodů. Na tiskovou hlavu byl přiveden sekundární extruder pro vytlačování vodivého materiálu. Systém tak může pracovat se dvěma extrudery zároveň a tím zajistit rychlost a účinnost tisku. Komunikaci mezi extrudery zajišťuje tzv. In-Chip Serial Programming (ICSP) port, který je přiveden na jednodeskový počítač Arduino Uno. Před samotným tiskem je zapotřebí stanovit optimální podmínky pro správné fungování tisku pomocí analýzy CFD.

Sekundární extruder se skládá z několika plastových dílů, které byly vytištěny tiskárnou, dále krokovým motorem a 10 ml stříkačkou, viz obrázek 10. Krokový motor zajišťuje lineární pohyb pístu stříkačky, který tlačí tekutinu ven. Množství vytlačené tekutiny tak závisí pouze na lineárním pohybu pístu.



Obrázek 10: Sekundární extruder tiskárny Průša Mendel i2 [26]

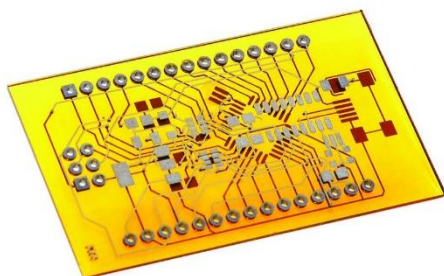


Obrázek 11: Modifikovaná tiskárna Průša Mendel i2 [26]

Jako vodivý materiál (inkoust) pro tisknutí elektroniky modifikovanou tiskárnou Průša Mendel i2, je od firmy Bare Conductive, která se zabývá prodejem těchto inkoustů. Je netoxický, rozpustný ve vodě a vhodný pro tisknutí nízkonapěťové elektroniky. Inkoust lze pokládat na materiály jako plast, sklo a papír. Tento materiál má však velkou viskozitu a je třeba nastavit správné parametry jeho tisku [26].

### 2.2.3 Tiskárna DragonFly 2020 Pro

Společnost Nano Dimension vyvinula 3D tiskárnu DragonFly 2020 Pro, uvedenou v září roku 2017, určenou k výrobě vysoce kvalitní elektroniky [27]. Zaměřuje se především na tisk desek plošných spojů, ale také na tisk strukturovaných objektů se zabudovanými elektronickými obvody. Nano Dimension využívá speciální nanomateriál na bázi vodivého a nevodivého inkoustu. Tiskové hlavy tiskárny DragonFly 2020 Pro mají stovky malých trysek, které doručují materiál vodivého kovu a nevodivého polymeru, jehož vlastnosti se blíží třídě FR-4, po kapkách a velice přesně. Materiál polymeru je transparentní a při tenkých vrstvách i ohebný, což umožňuje vytvořit ohebné a částečně průhledné desky, viz obrázek 12 a 13. Trasy vodivého materiálu dokážou být až 100 mikrometrů tenké. Při tisku se zároveň provádí proces slinování, který vytvrzuje tištěný inkoust. Po dokončení tisku nejsou potřeba žádné další operace. Tiskárna pracuje se softwarem Switch, který konvertuje 2D návrhy formátu Gerber (vektorový formát pro návrh desek plošných spojů) do vrstev pro tisk.



Obrázek 12: Deska s plošnými spoji, vytisknutá tiskárnou DragonFly 2020 Pro [29]



Obrázek 13: Deska plošných spojů, vytvořená tiskárnou DragonFly 2020 Pro [28]

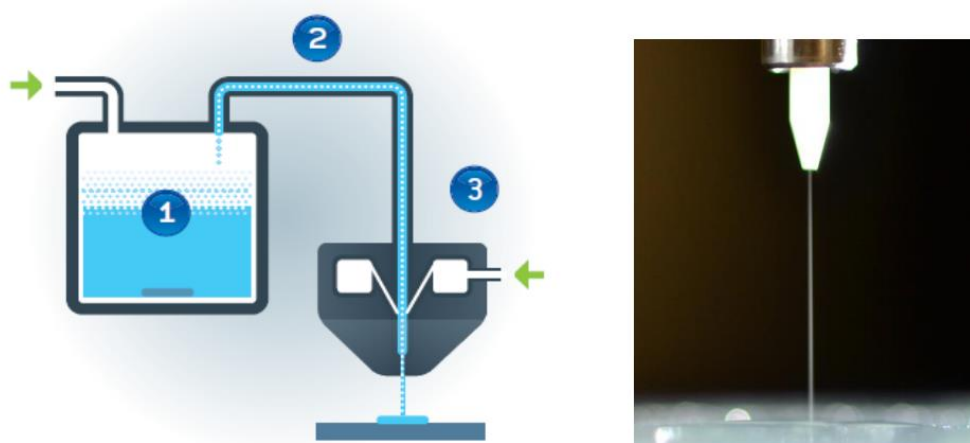
Na rozdíl od konvenčních metod, které vyžadují více strojů a chemických procesů, které trvají týdny, se tisk po navržení nového prototypu provádí v řádu hodin. Je tedy možné prototyp ihned otestovat, opravit případné nedostatky a vytvořit tak finální návrh, který by jinak byl mnohem dražší. S jednoduchostí a rychlostí tisku pomocí tiskárny DragonFly 2020 Pro také přichází vysoká cena zařízení, která je adekvátní možností tisku. Zařízení je určené pro průmyslové využití a jeho cena se pohybuje v rozmezí 2 500 000 – 5 500 000,- Kč [28].

## 2.2.4 Technologie tryskání aerosolu

Další velkou společností zabývající se tisknutím elektroniky je společnost Optomec. Využívá technologii tryskání aerosolu – Aerosol Jet Printing (AJP), která umožňuje vytvoření propojovacích struktur, nanášení nanouhlíkových struktur, bioaktivních látek a vytváření elektronických součástek, například tranzistorů, rezistorů, kondenzátorů, antén a senzorů. Specializuje se na miniaturizaci elektronických systémů a integraci pasivních součástek bez nutnosti přípravy. Technologie pracuje na principu stříbrného inkoustu, ze kterého je pomocí pneumatického nebo ultrazvukového atomizéru (obrázek 14, bod 1) vytvořen inkoustový aerosol, který je následně dusíkem dopravován (obrázek 14, bod 2) a nanášen na substrát pomocí tiskové hlavy (obrázek 14, bod 3), kde je urychlován skrz aerodynamické trysky. Součástí tohoto zařízení je také laser, který selektivně vytvrzuje nanášený inkoust.

V současnosti tuto technologii využívá tchajwanská společnost LITE-ON na hromadnou výrobu spotřební elektroniky. Vzhledem k tomu, že má tato technologie obrovskou flexibilitu, LITE-ON ji využívá na tisk funkčních součástek na plastové komponenty a kryty, ale i na skleněné panely a keramické materiály [21].

Výhodou AJP je schopnost vytvářet velmi detailní struktury se šířkou trasy až 8 mikrometrů a to vede k malé spotřebě výstupního inkoustu. Zařízení také dokáže nanášet materiál na objekty s velkou drsností nebo na strukturované 3D objekty. Model je vytvořen v programu CAD a následně konvertován pomocí programu Optomec VMTools do tiskárny [30].

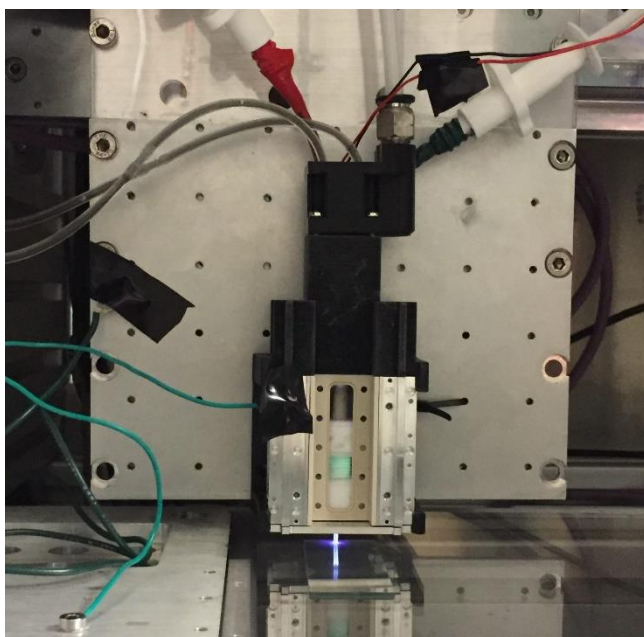


Obrázek 14: Vlevo popis technologie AJP, vpravo proud aerosolu vystupující z trysky [31]

### 2.2.5 Metoda tištění plazmatu

Dalším způsobem, jak docílit tištění vodivých materiálů je tištění plazmatu. Tento proces byl vyvinut společností Space Foundry pro účely NASA. Touto technologií je možné vytvářet elektronické součástky i v podmínkách beztláče [32]. Proto je tištění plazmatu využíváno astronauty pro potřeby vytváření elektronických zařízení ve vesmíru. Více méně se však tato technologie využívá i v průmyslové výrobě pro různé spojení, antény a senzory.

Na rozdíl od většiny metod a tiskáren používaných pro tisk elektroniky, tato metoda nevyžaduje koupi kvalitních a drahých vodivých materiálů. Není potřeba drahých směsí, jelikož se konečné vlastnosti dají změnit a stále tak vytvářet velice kvalitní výtisky s použitím méně kvalitních inkoustů. Princip této technologie spočívá v patentované tiskové hlavě, která má integrovaný systém dodávky tekutin s plazmou, k míchání prekurzorů a směsí plynů při tisku. Díky tomuto systému se dají měnit vlastnosti vodivého materiálu a také není potřeba následný proces vytvrzování jako u jiných metod. Tímto způsobem je možné tisknout vrstvy materiálu tak, že bude mít každá vrstva odlišné elektrické vlastnosti a vytvořit tak dielektrikum, které bude mít proměnnou permitivitu. To umožňuje schopnost vytisknout speciální součást, kterou nelze jinou aditivní technologií vytvořit. Nevýhodou je, že technologie tištění plazmatu je teprve na začátcích svého působení a cena vybavení, potřebného k této metodě, je vysoká. Systémů, které Space Foundry vytvořili pro své zájemce je po celém světě zatím jen hrstka [33].



Obrázek 15: Tisková hlava metody tištění plazmatu [33]



Obrázek 16: Zařízení pro tištění plazmatu [33]

## 2.3 Výzkum a nové technologie 3D tisku elektroniky

Předchozí kapitola se zaměřovala na technologie, které se ve světě denně používají a jsou na trhu běžně dostupné. Tato kapitola se naopak zaměřuje na nejnovější způsoby a výzkum tisku elektronických obvodů. Tyto technologie budou pravděpodobně používány v budoucnosti na denním pořádku. Například elektronika, která se vytváří s využitím 3D pera, k výrobě senzorů. Nově je tu také technologie tisku keramiky se zabudovanou elektronikou nebo tisk pružné, natahovací a nositelné elektroniky.

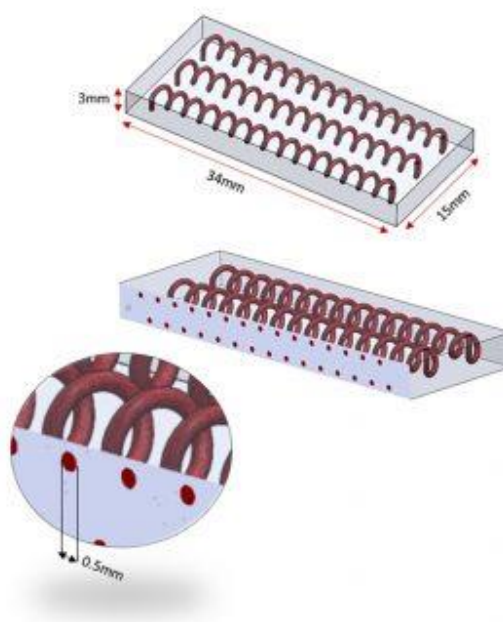
### 2.3.1 Hybridní keramický 3D tisk

Firma 3DCERAM, která sídlí ve městě Limoges ve Francii, nejenže používá 3D tisk k vytvoření multimateriálových dílů, ale nově také vynalezli způsob, kterým lze spojovat různé materiály s keramikou. Zároveň však nevytvořili kompletně nové zařízení, ale pouze přetvořili svou původní verzi tiskárny.

Technologie využívá původní laser k vytvrzování a nový hybridní stěrač. Princip tisku je podobný jako u SLA. Nejprve se rozprostře vrstva keramiky pomocí stěrače a následně je vrstva vytvrzena pomocí UV laseru. Po vytvrzení přichází na řadu proud vzduchu, který je soustředěn na určité místo, ve kterém vznikne mezera. Do mezery se pak pomocí hybridního dávkovače vyplní jiný materiál, který může být také vytvrzen pomocí laseru. Takto se postupuje po vrstvách, až je tak ve výsledku vytvořen díl s různým materiálem uvnitř. Tímto způsobem se do keramiky mohou vkládat i materiály, které jsou vodivé.



Obrázek 17: 3DCERAM tisková hlava



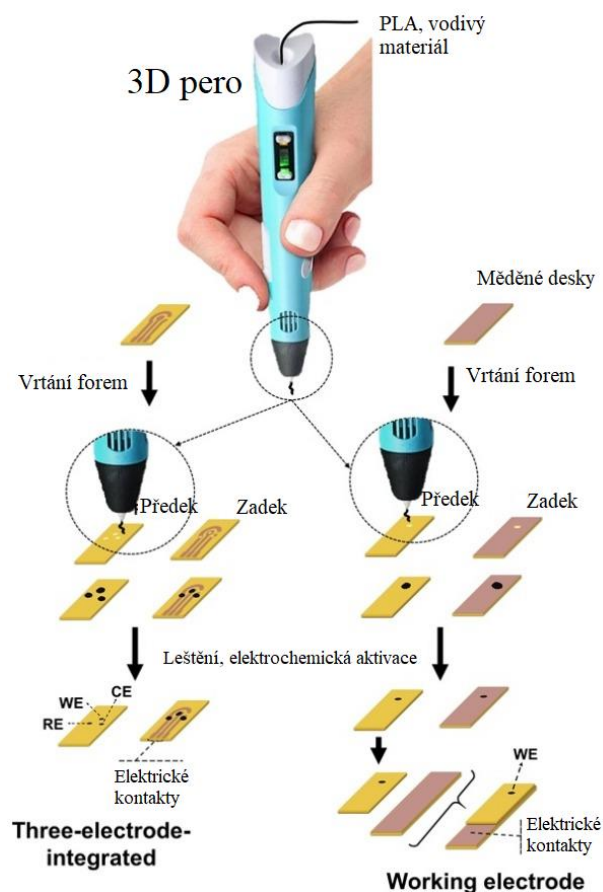
Obrázek 18: Hliníkový díl se zabudovanou cívkou uvnitř [34]

Hybridní 3D tisk je vhodný pro využití elektromagnetizmu. 3DCERAM se podařilo vytvořit hliníkový díl, který v sobě měl zabudované kovové cívky s průměrem drátu až 0,5mm, viz obrázek 18. Tímto zařízením je také možné vytvořit tzv. „bitter elektromagnety“, k vytváření extrémně silných magnetických polí, které jsou běžným způsobem velice obtížně vyrobitelné [34].

### 2.3.2 Tisk senzorů pomocí 3D pera

3D Pera jsou zjednodušená, přenosná a levnější podoba 3D tiskárny. 3D pera, stejně jako 3D tiskárny, dokážou vytvořit pevný objekt pomocí polymeru vytlačovaného skrze nahřátou vytlačovací hlavu (60-220°C). Princip tisknutí je podobný metodě FDM u 3D tiskáren, avšak tisk perem je složitější, jelikož se tvorba provádí pomocí ruky a nikdy tak není možné vytvořit stejný díl dvakrát. Doposud se 3D pera využívala hlavně u dětí, umělců a fanoušků této technologie.

K 3D tisku senzorů pomocí 3D pera je jako vodivý materiál využita sloučenina CB/PLA, která se vytlačuje do prázdné elektrodové formy, viz obrázek 19. Po leštění a elektrochemické aktivaci v roztoku NaOH, mají senzory srovnatelné elektrochemické odezvy se skelnou uhlíkovou elektrodou, používanou pro modelové analyty. Produkce elektrod s využitím 3D pera je srovnatelná s produkcí elektrod vytvářených na 3D tiskárnách. Vzhledem k tomu, že výroba jednoho zařízení vyžaduje minimální množství vodivého filamentu, tak se cena tohoto zařízení pohybuje velmi nízko (méně než 2,- Kč). Výroba senzorů pomocí 3D pera, je tak díky jeho přenosnosti a nízké ceně (kolem 300,- Kč) velice slibná [35].

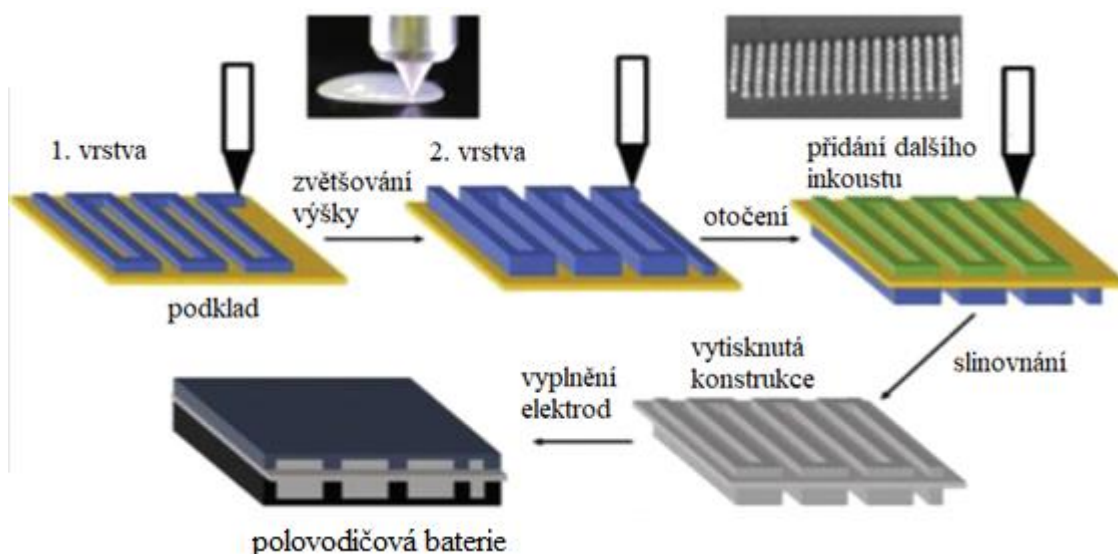


Obrázek 19: Výroba senzorů pomocí 3D pera [36]

### 2.3.3 3D tisk lithium-iontových baterií

Lithium-iontové baterie (LIB) jsou v dnešním světě velice populární a to hlavně díky své vysoké kapacitě, vysoké hustotě energie, ekologii, nízké ceně a díky schopnosti opakovatelnému nabíjení. Výroba konvenčním způsobem se provádí pomocí aktivních, vodivých a spojovacích materiálů, které jsou spojeny a umístěny na proudovém kolektoru (hliníkové nebo měděné fólii). Avšak strukturální zařízení mají mnoho výhod na rozdíl od rovinných, jako snadnější přenos iontů a elektronů a lepší mezifázový kontakt mezi elektrodou a elektrolytem. Ke správnému vytvoření LIB pomocí 3D tisku je potřeba, aby inkoust, kterým jsou tvořeny elektrody, měl nastavitelnou viskozitu a vysokou vodivost iontů a elektronů. Pro tisk elektrolytů je třeba, aby měl inkoust také kontrolovatelnou viskozitu, vysokou vodivost iontů a izolaci vůči elektronům. Také se musí předejít použití hořlavých organických elektrolytů. Jako příklad, byl vytvořen inkoust, který má vysokou koncentraci oxidu grafitu, ke zvýšení vodivosti strukturálních elektrod. Tento inkoust má také vysokou viskozitu a dobré chování při namáhání stříhem. Zároveň zajišťuje efektivní přenos elektronů skrze 3D strukturu elektrod. Přenos hmoty však nezajišťuje pouze materiál vodivého inkoustu, ale také dobře navržená mikrostruktura, což vede k rychlému procesu nabíjení a vybíjení baterií. 3D tisk se však nezabývá pouze lithium-iontovými bateriemi, ale také například superkapacity, Li-S (lithium-sulfur) bateriemi a Li-O<sub>2</sub> (superoxid hlinitý) bateriemi.

Díky velkým hodnotám plošné hustoty energie až 10 J cm<sup>-2</sup>, které strukturální baterie vykazují a velké kapacity kolem 4,5 mAh cm<sup>-2</sup> při hustotě proudu cca 0,15 mA cm<sup>-2</sup>, vypadá výroba LIB pomocí 3D tisku pro budoucí komerční využití velice dobře [36].

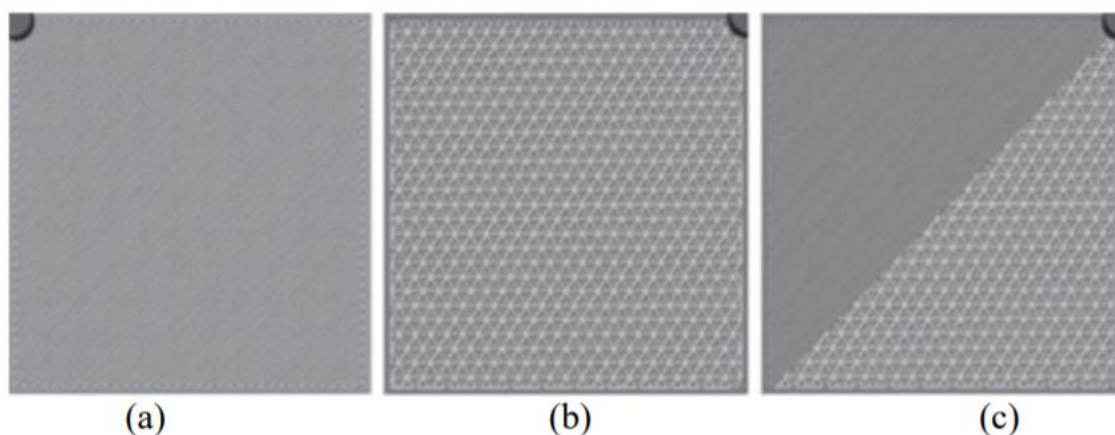


Obrázek 20: schéma 3D tisku pro přípravu strukturálního polovodičového elektrolytu [36]

### 2.3.4 3D tisk polypropylenových ferroelektretů

Polypropylenové ferroelektrety jsou piezo-polymerové měniče. Piezoelektrický jev je schopnost materiálu (krystal, keramika, dřevo a polymery) generovat elektrické napětí při deformaci. Jev funguje i naopak, tzv. inverzní efekt. Při stimulování materiálu elektrickým napětím, lze pozorovat deformace materiálu. Piezoelektrický jev se využívá v řadě aplikací pro tlakové senzory, akustické měniče, hydrofony, ultrazvukové mikroskopie atd.

Nedávno bylo úspěšně demonstrováno vytvoření ferroelektretů s kvalitními dutinami, pomocí 3D tisku ABS polymerových struktur. Princip spočívá v tisknutí dvou tenkých vrstev. První obsahuje malé hřbety kruhových tvarů na rovinné ploše a druhá má pouze čistou rovinnou plochu. Tyto dvě vrstvy jsou spojeny a tvoří tak dvouvrstvou plochu s vnitřními dutinami. Polymer ABS má však nízkou tepelnou stabilitu, a proto se pro vytváření ferroelektretů nehodí. Tento problém byl vyřešen s příchodem PP jako nového plniva. PP je nejvíce využívaný materiál pro vytváření ferroelektretů a jeho piezo-elektrické vlastnosti jsou již dlouho dobře známé. Pro 3D tisk v této oblasti je to však nová věc, a proto je třeba prozkoumat veškeré možnosti tisku z tohoto materiálu. Pro lepší kontrolu dutin byla také přidána třetí vrstva vložená mezi původní dvě, viz obrázek 21b. Velikosti stran těchto vrstev jsou po 40 mm a výška jedné vrstvy je 100  $\mu\text{m}$ . Nevýhodou je, že po 20 dnech měření koeficientu piezoelektrického jevu při atmosférickém tlaku, vykazuje vytisknutý PP ferroelektret 40% pokles původní piezoelektřiny. Dále bylo zjištěno, že vzorky vytvořené z PP ztrácejí svůj náboj při teplotách vyšších 50  $^{\circ}\text{C}$ . Na druhou stranu obrovskou výhodou je, že 3D tisk má neomezenou škálu možných geometrických struktur, které lze vytvořit [37].

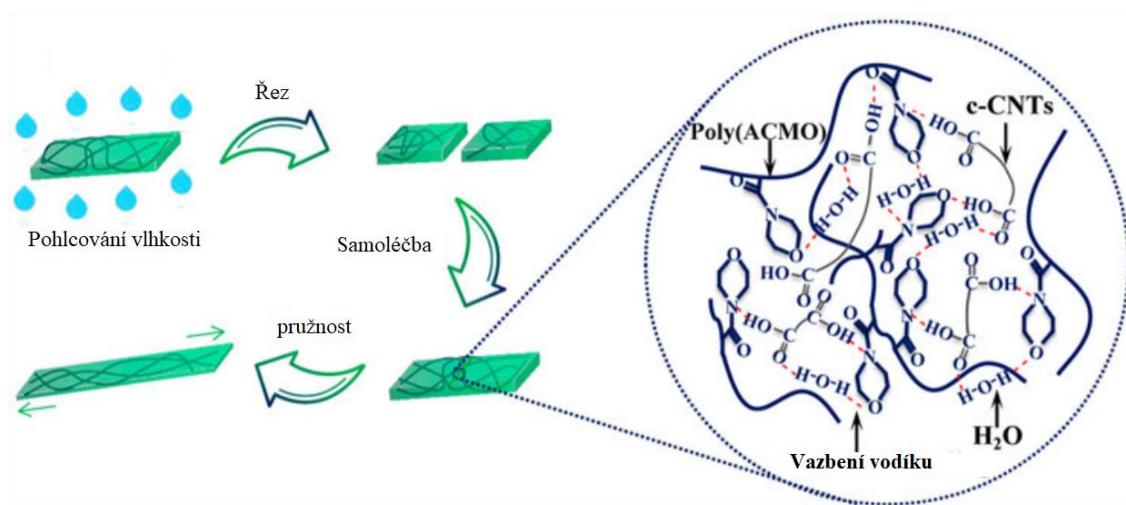


Obrázek 21: Vrstvy piezo-polymerového měniče: (a) spodní vrstva, (b) prostřední vrstva s trojúhelníkovým vzorem a (c) horní vrstva, částečně odříznutá [37]

### 2.3.5 3D tisk pružného a samoléčícího tenzometru

Pružná, natahovací a nositelná elektronická zařízení jsou ve světě úplnou novinkou. Tyto zařízení budou mít mnoho funkcí. Mezi nimi i funkce jako monitorování zdraví, umělá inteligence a smyslová kůže, ke kterým je zapotřebí součástky zvané tenzometr neboli snímač napětí. Tenzometr dokáže detekovat malé změny v deformacích a vnějších silách a generovat elektrický proud, odpor a kapacitu. Konvenční způsoby výroby tenzometrů (např. odstředování, vakuové nanášení a litografie) jsou komplikované, časově náročné a také postrádají důležitou vlastnost pružnosti v oblastech kloubů a ohýbaných částí. Díky těmto důvodům jsou z hlediska sériové výroby nevýhodné. Navíc materiály používané pro tyto zařízení jsou velice snadno vyrobitelné pomocí 3D tisku. Proto byl navržen model tenzometru vyrobený aditivní technologií.

Pro vytvoření součástí, které mají schopnost se natahovat a samoléčit, byla využita technologie DLP, viz strana 20. Avšak externí samoléčba těchto tištěných materiálů, stále závisí na vnějších podnětech, jako je například teplota. Tento problém se vyřeší s příchodem nových a vyspělejších fotopolymerů. Na druhou stranu vnitřní samoléčba na vnějších podnětech nezávisí a schopnost se léčit mají tyto materiály díky regeneraci dynamických, kovalentních nebo nekovalentních vazeb, i za okolních podmínek. Materiál polymeru je ACO, který je vytvrzován pomocí UV světla a vodičem jsou uhlíkové nanotrubičky (CNTs). Super vysoká roztahovitost a vnitřní samoléčení tenzometru je zapříčiněna procesem absorpce vody. Materiál se dokáže natáhnout až o 1209,2% své původní délky a efektivita samoléčící schopnosti je po desátém rozdělení a spojení 82,6%. Tyto senzory dokázaly reagovat a detekovat lidské pohyby, i po procesu samoléčby [38].



Obrázek 22: Princip roztahnosti a samoléčby materiálu [38]

### 3 POROVNÁNÍ A NÁVRH TECHNOLOGIE

V této kapitole budou porovnány pouze aktuálně používané technologie 3D tisku pro vytváření elektronických součástek, viz str. 24. Nové a zkoumané technologie se zde porovnávat nebudou. Dále je zde navržena technologie, kterou by se mohlo zařízení vytvořit. Pro přehlednost je zde uvedena tabulka. V tabulce jsou vypsány tiskárny Voxel8, modifikovaná tiskárna Průša Mendel i2, DragonFly 2020 Pro, technologie tryskání aerosolu a metoda tištění plazmatu. Pro tyto zařízení a technologie jsou uvedeny výhody a nevýhody z hlediska navržení vhodné technologie a modelu uskutečnitelného v laboratořích katedry.

#### 3.1 Tabulka porovnání

|                    | Výhody                                         | Nevýhody                                                    |
|--------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Voxel8             | Stolní zařízení                                | Méně přesný tisk                                            |
|                    | Software ProjectWire, dodávaný s tiskárnou     | Vyšší cena                                                  |
|                    | Dobře vodivý inkoust                           |                                                             |
| Modifikovaná Prusa | Velmi levné, stolní zařízení                   | nutnost přidání sekundárního extruderu                      |
|                    | Levný inkoust                                  | Malá přesnost tisku                                         |
|                    | Jednoduchost                                   | Nastavení parametrů                                         |
|                    | Vhodné pro experimentování a zkoumání          | Vodivý inkoust, vhodný pouze pro nízkonapěťovou elektroniku |
| DragonFly 2020 Pro | Tisk na vysoké úrovni                          | Cena zařízení                                               |
|                    | Speciální nanomateriál                         | Rozměry zařízení                                            |
|                    | Ohebný a průhledný materiál                    | Průmyslové využití                                          |
|                    | Rychlost tisku                                 |                                                             |
| Tryskání aerosolu  | Schopnost vytvoření velmi detailních struktur  | Cena zařízení                                               |
|                    | Malá spotřeba inkoustu                         | Hromadná výroba                                             |
| Tištění plazmatu   | Kvalitní tisk                                  | Drahé zařízení                                              |
|                    | Není třeba procesu vytvrzování                 | Poměrně nová technologie                                    |
|                    | Levné inkousty, možnost změny jejich parametrů | Pro speciální výtisky                                       |

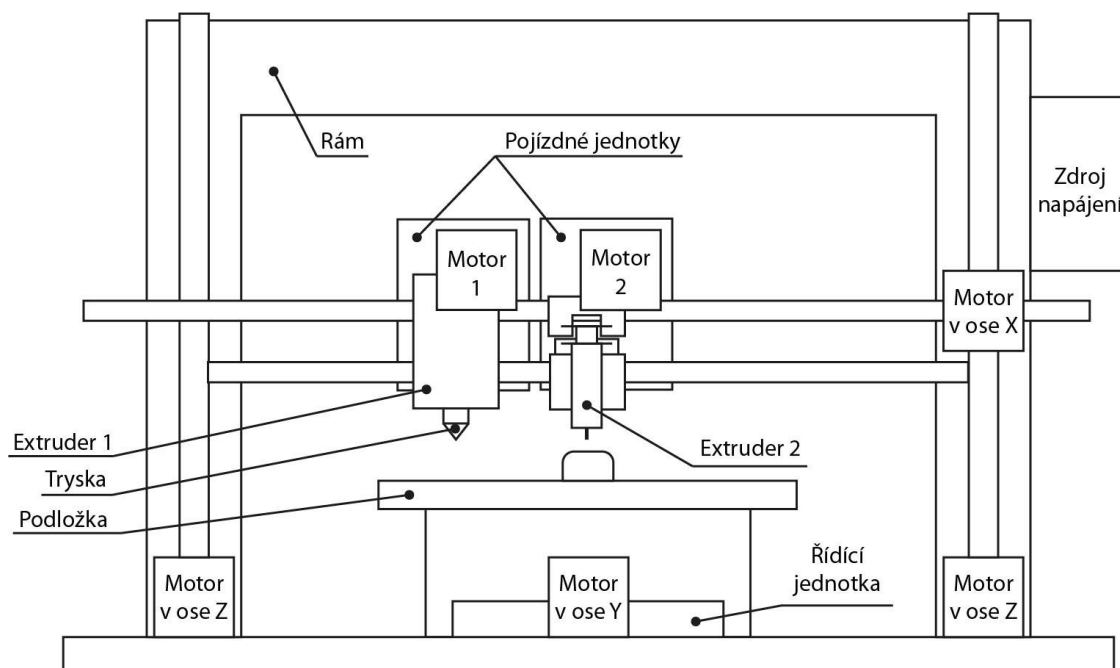
Tabulka 1: Porovnání technologií 3D tisku elektronických obvodů

### 3.2 Návrh technologie

Vzhledem k tomu, že technologie jako tiskění plazmatu a tryskání aerosolu se v laboratořích katedry neprovádí, tak se tyto dvě technologie nebudou uvažovat. Tiskárna Dragon-Fly 2020 Pro, má velké množství výhod, jako speciální nanomateriál, který může být ohebný a průhledný nebo vysoká kvalita a rychlost tisku. Má velké využití nejen pro tisk plošných spojů, ale i pro tisk strukturovaných objektů. Tato tiskárna se však využívá pro hromadnou výrobu a pro účely univerzity je drahá.

Zbývají tu tedy dvě tiskárny, Voxel8 a Průša. Tiskárna Voxel8 je mnohem dostupnější než předešlé technologie. Je přímo určená pro vytlačování dvou různých materiálů, jelikož obsahuje dva extrudery. Jeden pro polymer (nejčastěji PLA) a druhý pro vodivý stříbrný inkoust. Společně s tiskárnou se dodává software od společnosti Autodesk, který je přímo určený pro modelování objektů se zabudovanou elektronikou. Tiskárna má sice nižší kvalitu tisku, než již zmíněné technologie, ale pro účely konstrukce navrženého zařízení pro tuto práci, má kvalitu více než dostačující. Proto se tiskárna Voxel8 jeví jako vhodný kandidát pro navržení zařízení a pro jeho realizování v laboratořích katedry.

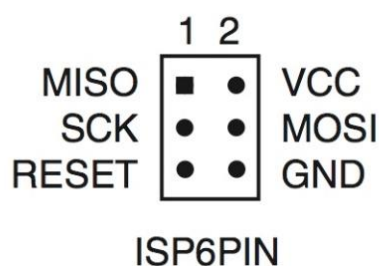
Jako levnější, ale pracnější alternativou, je modifikování tiskárny Průša. To se zajistí přidáním druhého extruderu pro vodivý materiál a zabezpečením komunikace mezi extrudery. Není třeba žádného drahého a složitého vybavení, stačí pouze krokový motor, 10 ml stříkačka a pár plastových dílů, viz obrázek 23.



Obrázek 23: Modifikace tiskárny Průša

### 3.2.1 Modifikace tiskárny Průša

Modifikace se provede přidáním sekundárního extruderu na tiskárnu Průša i3 MK3. Sekundární extruder má podobu plastové stříkačky, jejíž píst bude poháněn krokovým motorem pro přesné dávkování elektrického inkoustu. Stříkačka bude umístěna vedle původního extruderu. Vzdálenost trysky z původního extruderu a extruderu stříkačky bude přesně změřena, aby nedocházelo k nepřesnostem v tisku. Komunikaci mezi původním a novým extruderem bude zajišťovat ICSP port (obrázek 25) tak, aby byl v jedné chvíli činný pouze jeden extruder. ICSP port se nachází na jednodeskovém počítači tiskárny Arduino Uno (obrázek 24). Na obrázku 24 jsou také červeně zakroužkovány kolíky, pro připojení ICSP portu.



Obrázek 25: ICSP port

Obrázek 24: Jednodeskový počítač Arduino Uno [39]

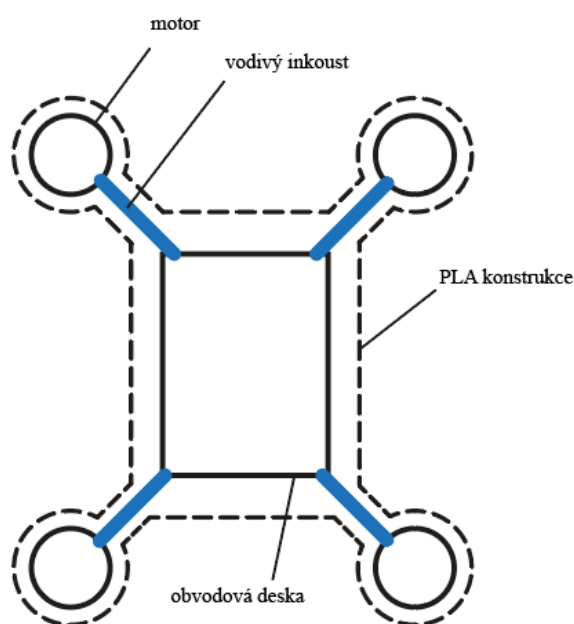
Vodivý materiál, který bude sekundární extruder vytlačovat, je od společnosti Bare Conductive. Tento inkoust je netoxický, schne při pokojové teplotě a je rozpustný ve vodě. Z důvodu větší viskozity tohoto materiálu je třeba provést testy a simulace pomocí CFD analýzy.

## 4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola se zabývá návrhem konceptu zařízení, které by teoreticky bylo možné vytvořit v laboratořích katedry. Jak již bylo zmíněno, nejjednodušším způsobem k tisku jednoduchých zařízení je pomocí tiskárny Voxel8. Bohužel se však tato tiskárna na katedře nenachází a je tedy třeba uvažovat modifikaci tiskárny Průša i3 MK3.

V dnešní době elektroniky jsou velice populární bezpilotní modely kvadrokoptér (tzv. dron). Vznikly jako pomocný nástroj v armádě, ale během chvíle se dostaly na trh pro širokou veřejnost. Drony mají opravdu velké využití, ať už v již zmíněné armádě, policii, u hasičů nebo jednoduše pro zábavu. Také se široce využívají v oblasti sportu, jelikož umožňují mnohem lepší pohled na probíhající akci. Kvadrokoptéry zároveň přinesly nový typ sportu, závodění s drony. Tyto bezpilotní modely na sobě mají zabudované kamery, skrze které mohou závodníci pozorovat trať. Uplatnění kvadrokoptér je opravdu mnoho a do budoucna budou stále přibývat. Jsou to zařízení budoucnosti a z toho důvodu se bude návrh zařízení pro tuto práci zabývat právě jimi.

Model letounu se bude skládat z několika částí: konstrukcí těla, čtyř motorů a obvodové desky. Tyto části budou spojeny pomocí elektricky vodivého inkoustu od firmy Bare Conductive a budou zabudovány uvnitř plastové konstrukce. Materiál konstrukce těla bude termoplast PLA. Před tiskem je však třeba nastavit správné parametry a otestovat vodivost inkoustu. Správné parametry tisku, se zajistí analýzou CFD a následnou simulací proudění vodivého inkoustu z přidaného extruderu.



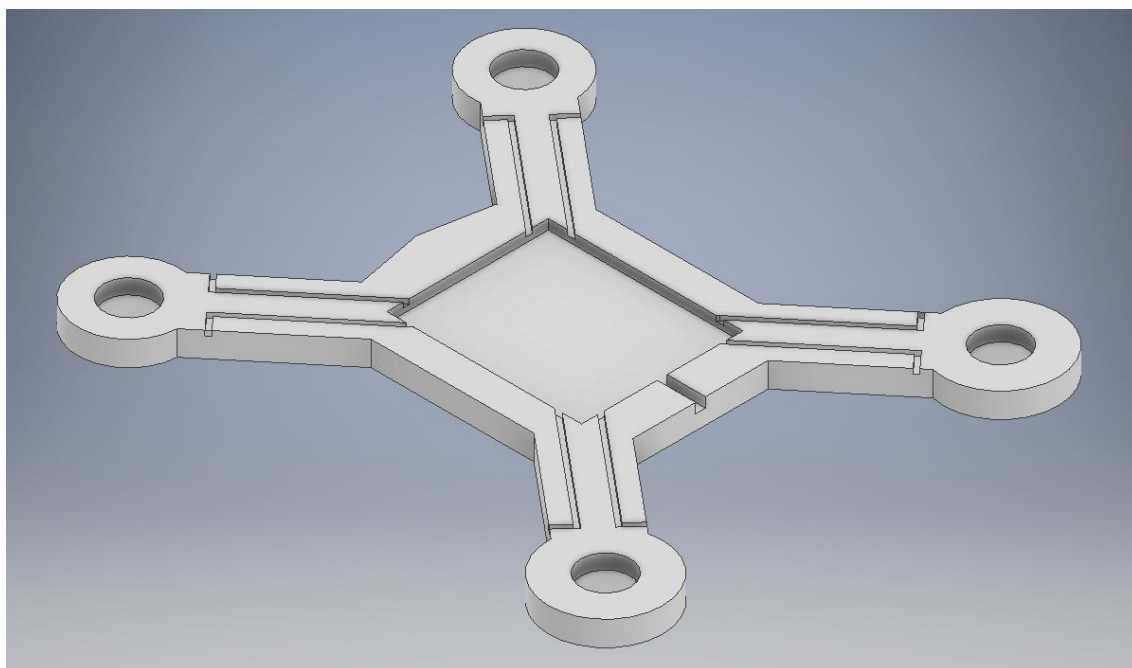
Obrázek 26: Schéma kvadrokoptéry tištěné v laboratořích katedry

## 4.2 Postup výroby

Postup tisku se bude skládat ze tří fází. V první fázi se vytisknou základy modelu z konstrukčního materiálu. V konstrukci se vynechají mezery pro vložení komponentů a vedení vodivého inkoustu. Po dokončení první fáze, se tisk pozastaví, aby bylo možné komponenty do konstrukce vložit.

Ve druhé fázi se bude tisknout vodivý materiál do již připravených mezer (obrázek 26), za použití nainstalovaného sekundárního extruderu. Inkoust se nechá ztuhnout, aby bylo možné v tisku pokračovat.

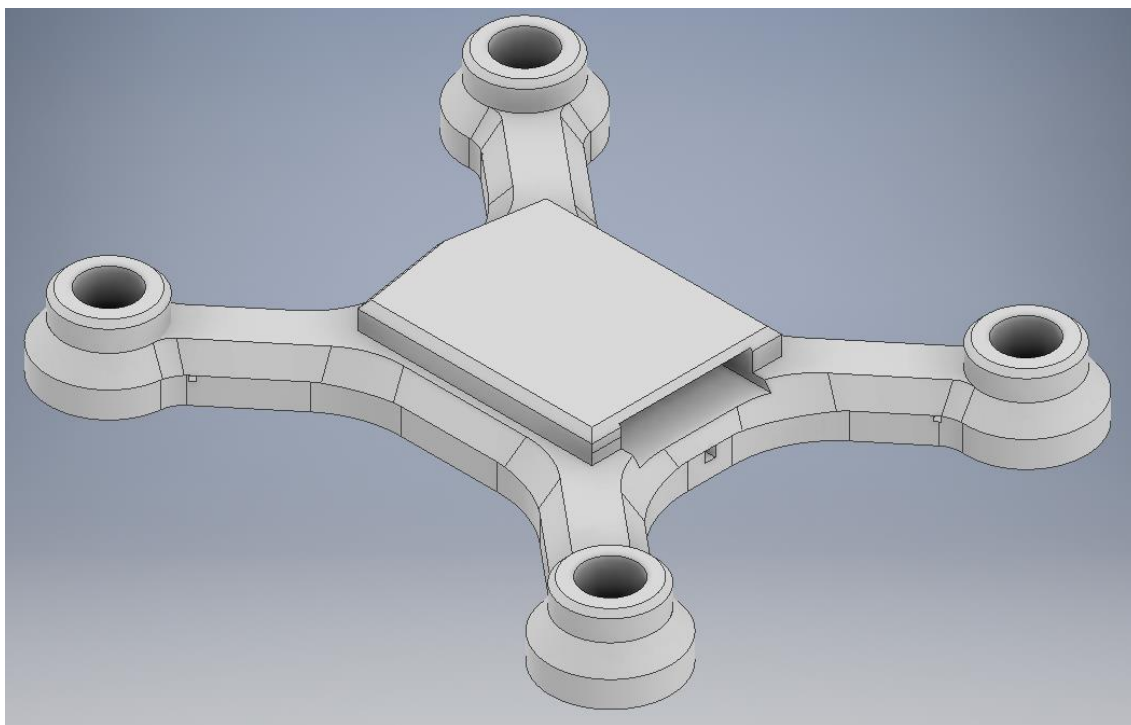
Nakonec se opět tiskne z původního extruderu a konstrukčního materiálu PLA. Znovu se vytvoří mezery, tentokrát pro zdroj napájení, který bude přiveden na obvodovou desku.



*Obrázek 27: Základy dronu*

Na obrázku 27 jsou znázorněny základy modelu. Model byl vytvořen pomocí CAD softwaru Inventor od společnosti Autodesk. Uprostřed modelu je vymezen prostor pro obvodovou desku s otvorem pro vývod drátů, které slouží pro připojení desky ke zdroji. Obvodová deska bude přilepena lepidlem. Na ramenech dronu jsou vytvořeny mezery pro vodivý inkoust a také otvory pro vložení motorů, které budou taktéž přilepeny lepidlem.

Po druhé fázi tisk pokračuje a obvodová deska a vodivé trasy zůstanou zabudovány uvnitř modelu. Pokračuje se v tisku až do finální podoby, viz obrázek 28. V modelu je vytvořen prostor a zároveň kryt pro baterii, která bude připojena na konektory, vedoucí z obvodové desky.



*Obrázek 28: Model dronu*

Způsobů ovládání kvadrokoptér je mnoho. Například se mohou ovládat pomocí dálkového ovladače, který vysílá rádiové frekvence a přijímač tyto frekvence zaznamenává a na obvodové desce dronu je zpracovává. Také je možné připojit dron k mobilnímu telefonu pomocí bluetooth. I když je dnes bluetooth velmi populární, jelikož se dnešní doba vyvíjí směrem k bezdrátové technologii, připojení nezprostředkovává moc velký dosah signálu. Také je potřeba, aby měl telefon určitou aplikaci, pomocí které se bude zařízení ovládat.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce se zaměřuje na rešerši výzkumu a využití 3D tisku elektronických obvodů. V první kapitole jsou stručně popsány používané materiály a základní metody 3D tisku. Metody tisku jsou rozděleny podle normy ISO/ASTM 52900:2015 [4]. Patří sem: material extrusion, material jetting, binder jetting, sheet lamination, vat photopolymerization, powder bed fusion a direct energy deposition.

Druhá kapitola se zabývá 3D tiskem elektronických obvodů. V první části jsou popsány nejpopulárnější technologie a 3D tiskárny, které se v této oblasti už delší dobu pohybují. Například 3D tiskárna DragonFly 2020 Pro, která se dnes používá po celém světě, k vytváření plošných spojů a to hlavně díky možnosti vysoké rychlosti tisku prototypů. Druhá část této kapitoly obsahuje zkoumané a nejnovější technologie pro tisk elektroniky. Například tisk lithium-iontových baterií nebo tisk pružných součástí pro účely nositelné a natahovací elektroniky.

Na základě této rešerše je v závěru práce navržena technologie a koncept zařízení, které by bylo možné realizovat v laboratořích katedry. Pro realizaci zařízení byla vybrána tiskárna Voxel8, zaměřující se na tisk elektroniky, využívající metodu vytlačování materiálu. Univerzita však toto zařízení nevlastní, a proto byla vybrána alternativa, modifikace tiskárny Průša neboli přidání sekundárního extruderu pro vytlačování vodivého materiálu. Poté je v práci uveden koncept zařízení a hrubý postup k jeho vytvoření.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SRIVATSAN, T.S. a T.S. SUDARSHAN, ed. *Additive Manufacturing* [online]. CRC Press, 2015 [cit. 2020-10-07]. ISBN 9780429159152. Dostupné z: doi:10.1201/b19360
- [2] SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing* [online]. 2019, **35**, 1286-1296 [cit. 2020-10-07]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2019.06.089
- [3] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, **143**, 172-196 [cit. 2020-10-07]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [4] *ISO/ASTM 52900:2015(en) Additive manufacturing — General principles — Terminology* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en:term:2.1.2>
- [5] MOHAMED, Omar A., Syed H. MASOOD a Jahar L. BHOWMIK. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing* [online]. 2015, **3**(1), 42-53 [cit. 2020-10-14]. ISSN 2095-3127. Dostupné z: doi:10.1007/s40436-014-0097-7
- [6] *Nekonvenční metody obrábění 10. díl* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [7] *Introduction to material jetting 3D printing* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [8] Wohlers, T. T. (2019). *Wohlers report 2019: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates. ISBN 978-0-9913332-5-7

- [9] GOKULDOSS, Prashanth Konda, Sri KOLLA a Jürgen ECKERT. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials* [online]. 2017, **10**(6) [cit. 2020-10-15]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10060672
- [10] *Introduction to binder jetting 3D printing* [online]. [cit. 2020-10-15]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>
- [11] OBIKAWA, T, M YOSHINO a J SHINOZUKA. Sheet steel lamination for rapid manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1999, **89-90**, 171-176 [cit. 2020-10-15]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(99)00027-8
- [12] Mitsouras D., Liacouras P.C. (2017) 3D Printing Technologies. In: Rybicki F., Grant G. (eds) 3D Printing in Medicine. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61924-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61924-8_2)
- [13] NIESLER, Fabian a Martin HERMATSCHWEILER. Two-Photon Polymerization - A Versatile Microfabrication Tool. *Laser Technik Journal* [online]. 2015, **12**(3), 44-47 [cit. 2020-10-16]. ISSN 16137728. Dostupné z: doi:10.1002/latj.201500019
- [14] *3D tisk fotopolymerizací* [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/151/3d-tisk-fotopolymerizaci>
- [15] KUMAR, S. Selective Laser Sintering/Melting. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 93-134 [cit. 2020-10-16]. ISBN 9780080965338. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01003-7
- [16] *Selective Laser Melting (SLM) – 3D Printing Simply Explained* [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>
- [17] SABOORI, Abdollah, Alberta AVERSA, Giulio MARCHESE, Sara BIAMINO, Mariangela LOMBARDI a Paolo FINO. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Applied Sciences* [online]. 2019, **9**(16) [cit. 2020-10-18]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9163316

- [18] KOSTIĆ, S., Z.Ž. LAZAREVIĆ, V. RADOJEVIĆ, A. MILUTINOVIĆ, M. ROMČEVIĆ, N.Ž. ROMČEVIĆ a A. VALČIĆ. Study of structural and optical properties of YAG and Nd: YAG single crystals. *Materials Research Bulletin* [online]. 2015, **63**, 80-87 [cit. 2020-10-18]. ISSN 00255408. Dostupné z: doi:10.1016/j.materresbull.2014.11.033
- [19] SING, S.L., C.F. TEY, J.H.K. TAN, S. HUANG a Wai Yee YEONG. 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing. *Rapid Prototyping of Biomaterials* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 17-40 [cit. 2020-10-30]. ISBN 9780081026632. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102663-2.00002-2
- [20] *Additive Fabrication* [online]. [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [21] *Optomec 3D Printing Systems Used in Mass Production of Consumer Electronics* [online]. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://optomec.com/optomec-3d-printing-systems-used-in-mass-production-of-consumer-electronics/>
- [22] *3D opportunity for electronics* [online]. [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3837\\_3D-opportunity-for-electronics/DUP\\_3D-Opportunity-Electronics.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3837_3D-opportunity-for-electronics/DUP_3D-Opportunity-Electronics.pdf)
- [23] *Quadcopter* [online]. [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <http://store.voxel8.com/case-studies/2016/4/26/quadcopter>
- [24] *BREAKING: VOXEL8 UNLEASHES THE FIRST ELECTRONICS 3D PRINTER ON CES, WORLD* [online]. [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/voxel8-unleashes-electronics-3d-printer-ces-world-39060/>
- [25] *Prusa Research by Josef Prusa* [online]. [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/o-nas/>
- [26] Butt, J., Onimowo, D.A., Gohrabian, M. *et al.* A desktop 3D printer with dual extruders to produce customised electronic circuitry. *Front. Mech. Eng.* **13**, 528–534 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0502-1>
- [27] *Nano Dimension: DRAGONFLY LDM PRECISION ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEM FOR ELECTRONICS* [online]. [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.nano-di.com/ame-dragonfly-ldm>
- [28] *3D Printing Technologies for Electronics* [online]. [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.11370/isj.56.617>

- [29] *Cadlog to Distribute Nano Dimension's DragonFly 2020 Pro 3D Printer in Italy* [online]. [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/cadlog-distribute-nano-dimensions-dragonfly-2020-pro-3d-printer-italy/>
- [30] *Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [31] *Optomec Engineer Explores Control of Mist Flow in Aerosol Jet Printing* [online]. In: . [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://3dprint.com/236672/optomec-engineer-explores-control-of-mist-flow-aerosol-jet-printing/>
- [32] *Born out of NASA and Stanford, Space Foundry invents plasma-based printers for industrial applications* [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://yourstory.com/2019/09/nasa-startup-space-foundry-tech-plasma-printer-stanford-university>
- [33] *How Space Foundry's plasma-based process will disrupt 3D printed electronics* [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/space-foundry-plasma-3d-printed-electronics/>
- [34] *3DCERAM's hybrid capability for ceramic AM unlocks new electronics applications* [online]. [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/3dceram-hybrid-ceramic-am-electronics-applications/>
- [35] DE OLIVEIRA, Fabiano M., Edmar I. DE MELO a Rodrigo A.B. DA SILVA. 3D Pen: A low-cost and portable tool for manufacture of 3D-printed sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2020, **321** [cit. 2020-12-21]. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2020.128528
- [36] ZENG, L., P. LI, Y. YAO, B. NIU, S. NIU a B. XU. Recent progresses of 3D printing technologies for structural energy storage devices. *Materials Today Nano* [online]. 2020, **12** [cit. 2020-12-23]. ISSN 25888420. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtnano.2020.100094
- [37] ASSAGRA, Yuri A. O., Ruy A. P. ALTAFIM, Joao P. DO CARMO, Ruy A. C. ALTAFIM, Dmitry RYCHKOV, Werner WIRGES a Reimund GERHARD. A new route to piezo-polymer transducers: 3D printing of polypropylene ferroelectrets. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2020, **27**(5), 1668-1674 [cit. 2020-12-23]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2020.008461

- [38] GUO, Binbin, Xinzhu JI, Xiaoteng CHEN, Gang LI, Yongguang LU a Jiaming BAI. A highly stretchable and intrinsically self-healing strain sensor produced by 3D printing. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2020, 15(sup1), 520-531 [cit. 2020-12-26]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2020.1823570
- [39] *Study on the Design of DIY Social Robots* [online]. [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/316107349\\_Study\\_on\\_the\\_Design\\_of\\_DIY\\_Social\\_Robots](https://www.researchgate.net/publication/316107349_Study_on_the_Design_of_DIY_Social_Robots)