

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
KEV – Katedra výkonové elektroniky a strojů

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Zhodnocení současných technologických možností 3D tisku a  
kalibrace vícemateriálového 3D tisku

Autor práce: **Ondřej Hazuka**  
Vedoucí práce: **Ing. Radek Čermák**

---

2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2021/2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej HAZUKA**  
Osobní číslo: **E19B0009P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Zhodnocení současných technologických možností 3D tisku a kalibrace vícemateriálového 3D tisku**  
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

### Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši na současné technologie a materiály 3D tisku.
2. Zkalibrujte předložené 3D tiskárny a přístroj Mosaic Palette. Na základě rešerše navrhnete a vytisknete několik zkušebních modelů.
3. Zhodnotte vytištěné 3D modely a vytvořte návod na použití zkalibrovaných sestav.

Rozsah bakalářské práce: **30-40**  
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
2. Joan Horvath. 2014. *Mastering 3D Printing* (1st. ed.). Apress, USA.
3. Veřejně dostupné informační zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radek Čermák**  
Research and Innovation Centre for Electrical  
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
  
**Prof. Ing. Václav Kús, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

## **Abstrakt**

Cílem této práce je prozkoumat současné technologie 3D tisku, výhody a nevýhody společně s jejich možnostmi využití prostřednictvím rešerše. Současně práce zmiňuje historii této technologie a potenciální budoucí využití například v podobě rozmáhajícího se tisku domů.

Dále se práce zaměřuje na materiály používané v 3D tisku, které ve velké míře určují výsledné vlastnosti výrobku a tím jeho uplatnění například pro tvorbu prototypů, automobilový dílů, součástek pro letectví a mnoho dalšího. Tyto díly mají zpravidla velkou výhodu v podobě tisku složitých dílů, které by jinak musely být tvořeny z více kusů. Takto se šetří nejen materiál a váha, ale také se zlepšují mechanické vlastnosti těchto dílů z jednoho kusu.

Práce popisuje také princip funkce vícebarevného/vícemateriálového tisku v případě FDM technologie, jeho výhody a nevýhody, případné problémy, které se u konkrétního přiděleného zařízení vyskytly.

## **Klíčová slova**

3D tisk, 3D technologie, možnosti 3D tisku, materiály pro 3D tisk, vícemateriálový tisk, konstrukce 3D tiskárny, FDM, SLA, SLS

## **Abstract**

The aim of this study is to explore the current 3D printing technologies, their advantages and disadvantages along with their possible applications via research. At the same time, the study mentions the history of this technology and potential future applications such as the proliferation of house printing.

The study also focuses on the materials used in 3D printing, which largely determine the final properties of the product and thus its application, for example, for the creation of prototypes, automotive parts, components for aviation and much more. These parts usually have the great advantage of printing complex parts that would otherwise have to be created from multiple pieces. This not only saves material and weight, but also improves the mechanical properties of these one-piece parts.

The study also describes the principle of multi-colour/multi-material printing in the case of FDM technology, its advantages and disadvantages, and potential problems encountered with the particular equipment allocated.

## **Key Words**

3D printing, 3D technology, 3D printing capabilities, materials for 3D printing, multi-material printing, construction of 3D printer, FDM, SLA, SLS

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Radku Čermákovi za trpělivost a podnětné návrhy, připomínky k práci a pomoc s přípravou modelů. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Bedřichu Bednářovi, Ph.D., za tisk modelu na SLA 3D tiskárně.

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Co je to 3D tisk.....	- 5 -
1.1 Historie.....	- 5 -
1.2 Současnost a využití.....	- 6 -
1.2.1 Letecký průmysl.....	- 6 -
1.2.2 Automobilový průmysl.....	- 7 -
1.2.3 Zdravotnictví.....	- 7 -
1.2.4 Gastronomie.....	- 8 -
1.3 Budoucí využití.....	- 10 -
1.3.1 Zdravotnictví.....	- 10 -
1.3.2 Automobilový průmysl.....	- 11 -
1.3.3 Stavebnictví.....	- 12 -
2 Technologie.....	- 15 -
2.1 FDM (Fused Deposition Modeling).....	- 15 -
2.1.1 Konstrukce FDM tiskáren.....	- 16 -
2.1.2 Materiály pro tisk technologií FDM.....	- 18 -
2.1.3 Zástupci FDM technologie.....	- 20 -
2.1.4 Vícemateriálový a vícebarevný tisk.....	- 21 -
2.2 SLA (Stereolithography).....	- 31 -
2.2.1 Konstrukce SLA tiskáren.....	- 32 -
2.2.2 Materiály pro tisk technologií SLA.....	- 33 -
2.2.3 Zástupci SLA technologie.....	- 35 -
2.3 SLS (Selective Laser Sintering).....	- 37 -
2.3.1 Konstrukce SLS tiskáren.....	- 38 -
2.3.2 Materiály pro tisk technologií SLS.....	- 39 -
2.3.3 Zástupci SLS technologie.....	- 40 -
2.4 Ostatní technologie.....	- 41 -
2.5 Porovnání technologií.....	- 45 -
2.5.1 Porovnání FDM, SLA a SLS technologie na vlastním modelu.....	- 48 -

3 Závěr.....	- 51 -
Zdroje.....	- 53 -
Seznam příloh .....	- 57 -



## Úvod

3D technologie vznikla v 80. letech minulého století za účelem rychlého prototypování, neboli *Rapid Prototyping*. Od té doby se tato technologie silně rozšířila do zdravotnictví, stavebnictví, letectví, automobilového průmyslu, umělecké tvorby, ale také do domácího prostředí a má do budoucna velký potenciál.

Příkladem jsou tištěné domy, které vznikají po celém světě. U těchto domů se rapidně snižuje doba “výstavby“ až do řádů desítek hodin a je možné u menších domů mít hrubou stavbu hotovou již za 24 hodin. Rychlost procesu a menší nároky na personál také do budoucna sníží cenu poté, co se tento druh staveb více rozšíří, ale již dnes existují firmy u kterých je možné si takovýto dům objednat. [1]



Obr. 1.: První vytištěný dům v Německu firmou Gira (převzato z [1])

Vzhledem k tomu, že 3D tisk není odkázán pouze na plastové materiály, nachází uplatnění i v automobilovém a leteckém průmyslu, kde představuje velmi výhodnou technologii, se kterou je možné efektivně a s minimálním odpadem vyrábět složité díly, které by byli jinak extrémně náročné na výrobu. Na tyto díly se spotřebuje méně materiálu, jsou silnější a odolnější nebo také mohou představovat více dílů jako jediný kus, který by jinak nebylo možné vyrobit, a tím zvyšují i svou spolehlivost. Ve spojení s umělou inteligencí (AI) využívající strojové učení (počítačový systém se umí sám učit), a při spárování s linkou průmyslových 3D tiskáren, automatických manipulátorů a dalších, je možné realizovat komplexní, plně automatické prototypování od návrhu až k prvnímu prototypu bez zásahu

člověka. Důkazem tohoto je automobil Czinger 21C, který byl celý navrhnut umělou inteligencí a sestaven přidruženou automatizovanou linkou 3D tiskáren. Automobil dosahuje velmi působivých čísel, jako například zrychlení z 0 na 100 km/h za 1,9 vteřiny, ale také široce využívá přírodních designů připomínajících list, kost nebo například lidské ucho. [2]



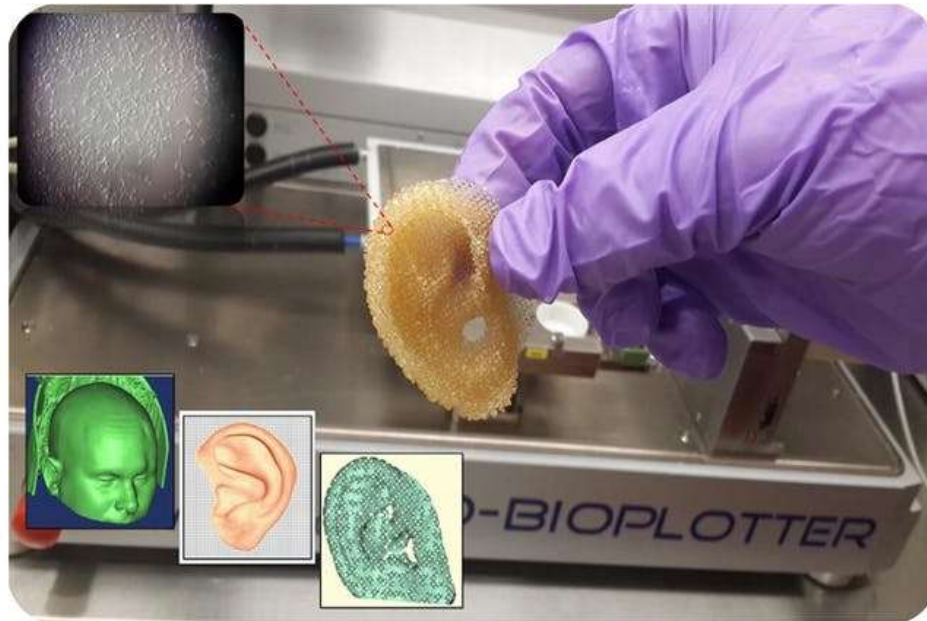
Obr. 2.: Czinger 21C, auto navržené AI a vytištěné 3D technologií (převzato z [2])



Obr. 3.: Rameno zavěšení automobilu Czinger 21C inspirované přírodním designem (převzato z [2])

Aktuálně se ve zdravotnictví můžeme setkat se zdravotnickými pomůckami tištěnými z biokompatibilní pryskyřice nebo přímo potřeb, které je možné snadno a rychle sterilizovat a využívat v operačních sálech. Mnohem zajímavější je ovšem téma transplantací, respektive tisk orgánů určených pro transplantace. Aktuálně stále není možné tisknout celé orgány jako stálou náhradu za poškozené, ale jsou ve vývoji tak zvané “dočasné orgány“, neboli *scaffolds*, které mohou pomoci s rychlejší regenerací orgánů, případně pomoci během čekání na dárce. Velkou obtíž představuje náročnosti tisku, kdy se často stávalo, že se scaffold pod svou vahou zhroutil. Průlom v tisku těchto dočasných orgánů znamenal systém FRESH, se kterým přišel tým z americké Carnegie Mellon University vedený Adamem Freinbergem,

jenž tiskne lidské buňky v roztoku kolagenu. Kolagen následně utuhne a tím zabrání zhroucení. V budoucnu by tedy mohl 3D tisk úplně odstranit potřebu dárců orgánů a kompletně tím přeměnit zdravotnictví. [3] [4]



Obr. 4.: Lidské ucho vytištěné z organického materiálu (převzato z [3])

Kromě 3D vytištěného automobilu se světu v roce 2020 na výstavě v Genoa (Itálie) představila první vytištěná loď. Jedná se o loď „MAMBO“ tištěnou speciální technologií, při které se pomocí robotického ramene postupně nanáší vrstvy sklolaminátu. „MAMBO“ byla tištěná z několika menších dílů, které byli následně spojeny a tvoří tak jeden kus. Výsledkem je loď ve tvaru invertovaného trojúhelníku s délkou 6,5 metru, šířkou 2,5 metru a celkovou hmotností 800 kilogramů včetně pohonu a lodního navigačního systému. [5]



Obr. 5.: 3D vytištěná loď „MAMBO“ (převzato z [5])

Cílem práce je prostudovat současné možnosti 3D tisku a jejich využití. Dále také předloženou 3D tiskárnu zkalibrovat, odzkoušet a provést zkušební tisk vlastních 3D modelů. S tímto se pojí i kalibrace vícemateriálového tisku a sepsání příručky pro používání celé této zkalibrované soustavy.

# 1 Co je to 3D tisk

3D tisk je aditivní, neboli přírůstkovou, technologií pro vytváření třídimenzionálních pevných objektů. Aditivní technologie znamená, že na rozdíl od běžných stylů výroby, jako je třeba frézování, kde materiál ubíráme, materiál přidáváme. 3D tisk je sice časově náročnější, ale odpadá potřeba příprav, například odlévání forem, před zahájením výroby. Navíc také není zapotřebí nákladného zázemí v podobě obráběcích strojů, odborného personálu a odpadají i přípravy před zahájením výroby jako například vytváření forem pro odlévání. [6]

## 1.1 Historie

První zmínky o 3D technologii jsou z roku 1981, kdy v Japonsku Hideo Kodama, jenž je považován za zakladatele a vynálezce 3D tisku, přichází s aditivní technologií nanášení vrstvy po vrstvě fotocitlivé pryskyřice pro rychlé vytváření prototypů. Další zmínka přichází o několik let později z Francie, kde se trio vědců pokouší o vytváření kapalných polymerů pomocí laserů. Avšak technologii 3D tisku si v roce 1986 nechal patentovat Američan Chuck Hull, zakladatel společnosti 3D Systems, která jako první, 2 roky od získání patentu, začala prodávat komerční 3D tiskárny s aditivní technologií SLA (*Stereolithography* – technologie, kdy vytváříme tekutý kompozit pomocí laserového paprsku). [7] [8]



Obr. 6.: První 3D tiskárna "Apparatus" od společnosti 3D Systems z roku 1992 (převzato z [7])

Další zkoumanou technologií, kromě SLA, je SLS (*Selective Laser Sintering* – technologie zapékání práškového materiálu pomocí laserového paprsku. Je možné aplikovat na plasty, kovy, speciální písek či keramiku). Tu si v roce 1988 patentoval Carl Deckard.

V tomto roce byla patentována také technologie FDM (*Fused Deposition Modeling* – technologie, kdy se natahuje roztavený materiál v tenkých vrstvách), se kterou se setkáváme dodnes. Obě tyto technologie výrazně urychlili vývoj aditivních technologií. [7] [8]

## 1.2 Současnost a využití

V současné době 3D tiskárny zažívají velký rozmach ať už v průmyslu, tak, i vzhledem ke snižujícím se pořizovacím cenám, které se pohybují na cenách lehce pod 5000,- Kč, v domácnostech. V případě těchto tiskáren pro domácí použití se jedná o tisk převážně plastových materiálů, jako je například PLA, ABS<sup>1</sup> a další. Těchto materiálů je využíváno u nenáročných aplikací jako jsou například ozdoby, menší modely a podobné.

Pro využití v průmyslu se hojně využívá 3D tisk k tvorbě prototypů případných budoucích výrobků a jejich částí, avšak k sériové výrobě stále není technologie příliš výhodná vzhledem k její časové náročnosti, kdy tisk jednoho předmětu o rozměrech 120x120x48 mm může trvat přibližně 20 hodin. Tuto nevýhodu částečně dokáží potlačit větší, průmyslové tiskárny, se kterými se můžeme setkat v automobilovém nebo leteckém průmyslu. Své uplatnění zde našli zejména díky možnosti tisku nejen z plastu, ale také z kovů nebo karbonového vlákna. [9] [10]

### 1.2.1 Letecký průmysl

Zejména z kovů pak těžší letecký průmysl, který 3D tisk využívá pro interiéry osobních letadel. Jako konkrétní příklad můžeme uvést firmu Airbus, která této technologii využívá právě k výrobě interiérů s cílem efektivnějšího využití materiálů, ušetřením váhy a snížením emisí CO<sub>2</sub> během výroby. Kromě interiérů firma Airbus, konkrétně pro model A350, tiskne i mechanismy zámků dveří u kterých uvádí, v porovnání s mechanismy vyrobenými standartními technologiemi, 45% snížení váhy a snížení ceny výroby o 25% v důsledku ušetření materiálu. Pozoruhodné je také snížení počtu dílů zámků z 10 kusů na pouhý 1, neboť pomocí 3D tisku bylo možné díl vyrobit již kompletní díky čemuž se navýšila i jeho spolehlivost. [11]

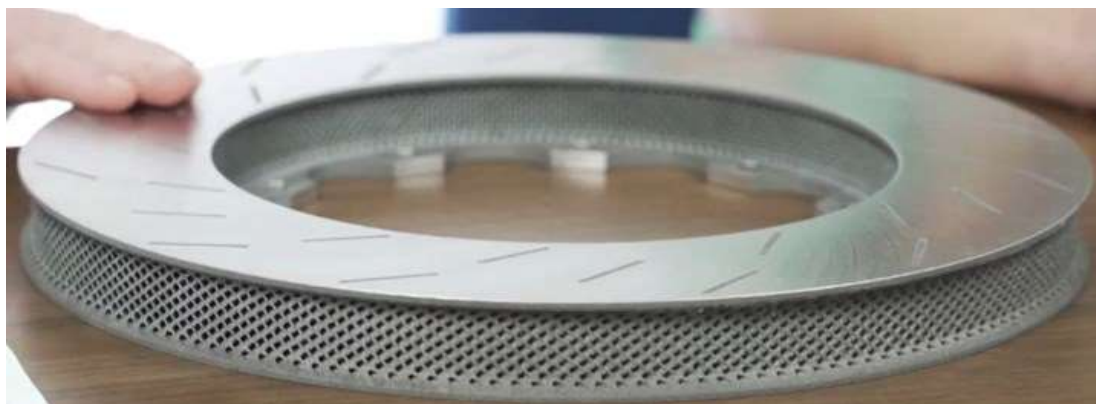
---

<sup>1</sup> Téma materiálů se více věnuje kapitola 2. Technologie.

### 1.2.2 Automobilový průmysl

V automobilovém průmyslu je využíváno 3D tisku k výrobě prototypů, avšak ještě donedávna byla výroba dílů nevýhodná, neboť výrobky byli slabé a měli krátkou životnost. V současné době má 3D tisk velký potenciál a mohl by i nahradit, již tradiční, CNC obrábění. Zde je ve výhodě tisk plastových částí, protože lze snadno vytvořit složité tvary, jejichž výroba vychází výrazně levněji. Další velkou výhodou je pružnost změny výroby ať sériové nebo při vývoji prototypu. Kromě této pružnosti s sebou 3D tisk také přináší výhodu do nejmenších detailů tisknout zmenšené modely budoucích automobilů a optimalizaci designu. Konkrétním příkladem je firma Bentley Motors, která využívá této techniky pro zrychlení vývoje nových modelů. Značná výhoda je také ve výrobě interiérů na přání, případně u interiérů automobilů v nízké sériových výrobcích, kdy výroba běžnými technologiemi je finančně náročná.

Současně se v sériové výrobě 3D tisk téměř neuplatňuje, pouze v pár případech jako je tisk úchytek (Cadillac), držáků spínačů (Aston Martin) a uchycení ruční brzdy (Shelby). Ze složitějších dílů jsou to pak radarové antény jízdních asistentů nebo vysokovýkonnostních rotorů brzd z hliníko-keramického kompozitu. [12] [13]



Obr. 7.: Rotor brzd z hliníko-keramického kompozitu vyrobený technologií 3D tisku (převzato z [13])

### 1.2.3 Zdravotnictví

Ve zdravotnictví se v současné době můžeme setkat s 3D tištěnými chirurgickými nástroji nebo velmi přesnými, na míru vyráběnými zdravotními pomůckami z biokompatibilního materiálu. To znamená, že tyto pomůcky, jako jsou například zubní protézy, jsou zdravotně nezávadné a můžeme je dlouhodobě používat.

Obrovský úspěch přinesl v roce 2008 projekt, jehož výsledkem byla první protéza končetiny, konkrétně nohy, kdy protéza byla tvořena jedním kusem. Díky tomu není potřeba protézu skládat, ale také je výrazně lehčí, přičemž neztrácí na pevnosti. Velký příspěvek

později přineslo 3D skenování, díky kterému se snadněji, rychleji a levněji mohou vyrábět protézy pacientům na míru. V současné době představují tyto tištěné protézy vcelku dostupnou alternativu k těm klasickým, které známe. [14]



Obr. 8.: 3D vytištěná protéza tvořená jedním kusem (převzato z [14])

Velkou výhodou 3D tisk přináší pro studenty medicíny, ale také pro pacienty, kterým lékaři mohou pomoci vytištěných modelů, získaných například pomocí rentgenů, v případě specifických problémů, popsat problém a proceduru léčení čímž mohou výrazně zlepšit jejich psychický stav. [15]

Vzhledem k vysokým nárokům je 3D technologie ve zdravotnictví stále velmi omezena, ale do budoucna od ní můžeme očekávat velké příležitosti.

#### 1.2.4 Gastronomie

Již dnes existují restaurace zaměřené pouze na servírování jídel připravených pomocí 3D tisku. Aktuálně je možné pořídit si vlastní 3D tiskárnu pro tisk potravin a tisknout si potraviny doma, ale možnosti jsou značně omezené. Jednou z možností je tiskárna od firmy Mmuse, která dokáže tisknout čokoládu. Takováto tiskárna vyjde na 6000 amerických dolarů, v přepočtu přibližně na 140 tisíc korun. Druhou možností je 3D tiskárna Foodini, pomocí které je možné si vytisknout i hamburger. [16] [17]





Obr. 9.: 3D tiskárna od firmy Mmuse pro tisk čokolády (převzato z [16])

Prvním takto připraveným jídlem byla již v roce 2015 obyčejná pizza, kdy bylo v rámci jediného zařízení “natištěné” těsto, přidané ingredience a celá pizza dopravena do pece. Tento proces bychom mohli nazvat prvním primitivním 3D tiskem jídla, ačkoliv se samotnou technologií neměl příliš společného. [17]



Obr. 10.: Primitivně 3D tištěná pizza (převzato z [17])

Současné tištění potravin spoléhá více na tisk FDM<sup>2</sup> technologií, kdy je syrový materiál vrstvu po vrstvě nanášen a ihned připraven ke konzumaci, případně k uvaření například v peci nebo na grilu. Samotná 3D tiskárna však nedokáže, alespoň současně, jídlo uvařit,

---

<sup>2</sup> FDM technologii popisuje kapitola 2. Technologie

pouze připravit. V tento moment stále na 3D tištěná jídla narazíme velmi vzácně a převážně v gurmánském stolování. [17]

### **1.3 Budoucí využití**

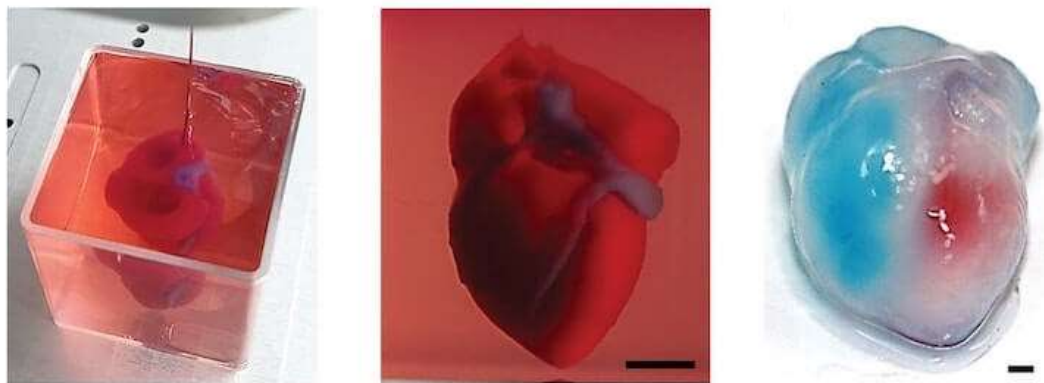
Technologie 3D tisku má v budoucnu velký potenciál transformovat většinu odvětví mezi které můžeme řadit především pak zdravotnictví nebo automobilový a stavební průmysl. Touto transformací rozumíme především zvýšení efektivity, pružnosti výroby, snížení odpadů z výroby a v případě zdravotnictví možnosti náhrady poškozených orgánů.

#### **1.3.1 Zdravotnictví**

V budoucnu můžeme očekávat jednorázové chirurgické nástroje z důvodu nákladní sterilizace, kdy chirurg musí dát celou sadu sterilizovat i při použití nebo upuštění jen jednoho nástroje. To také kromě vyšších nákladů sťažuje proces operace. Tyto problémy 3D vytištěné nástroje, vzhledem k potenciálně nízké ceně a efektivitě výroby, odstraňují a mohli by se v budoucnu stát dominantními. [15]

V případě hospitalizace by 3D technologie mohla pomoci při přísných dietách. Konkrétně s pomocí 3D tiskáren tisknoucí potraviny je možné přesné dávkování vitamínů, kalorií a živin v každém jídle podle potřeb pacienta. [17]

Největším téma je tisk z organické hmoty, s pomocí kterého by bylo možné nahradit orgány, které byli poškozeny nebo selhali. Největším problémem je trvanlivost orgánů a hlavně, aby je tělo pacienta přijmulo. Proto se experimentuje s alginátem, který lidské tělo neodmítá a mohl by pomoci pacientům čekajícím na dárce. Testy na krysách ukazují pozoruhodné výsledky a možné použití v budoucnu na lidech, především nervů. Velkou nevýhodou tohoto materiálu je extrémně obtížný tisk, v případě větších výtisků téměř nemožný. Velký průlom znamenal tisk zmenšeného lidského srdce se srdečními komorami, buňkami a cévami. [3] [18]



Obr. 11.: Srdce v podpůrné gelové lázni (vlevo a uprostřed) a po vyndání z lázně (vpravo) (převzato z [18])

### 1.3.2 Automobilový průmysl

Pro automobilový průmysl 3D tisk představuje velmi výhodnou technologii, která by mohla snížit emise CO<sub>2</sub> nejen při výrobě, ale i samotném provozu automobilu, který by dosahoval nižších hmotností bez snižování tuhosti karoserie. Samotná spolehlivost by se také teoreticky mohla zvýšit, stejně tak bezpečnost. Dosaženo by tím bylo tiskem vícero dílů jako jediného kusu, čímž by zároveň došlo i ke snížení váhy. Toto již v současnosti demonstruje firma Boeing, která takto vyrábí mechanismy zámků dveří. S podobnými aplikacemi se můžeme již brzy začít setkávat i u automobilů, kde by se tento styl výroby mohl rozšířit i k produkci funkčních dílů, jako je třeba zavěšení náprav. Výhodou této metody by byly úspory materiálu a vysoká flexibilita výroby, kdy v současnosti je nutné přestavět celou linku. Oproti tomu by změna výroby s 3D technologií trvala v řádech hodin. Předpokladem pro implementaci této technologie by ovšem bylo značné zrychlení tisku.

Velkou příležitostí zde představuje také umělá inteligence (*UI*, nebo také *AI – Artificial Intelligence*), která by dokázala pomocí strojového učení dělat zcela samostatně navrhovat, případně při spojení s výrobní linkou i vyrábět, prototypy nových modelů bez lidského zásahu. Při těchto návrzích pomocí AI je hojně využíváno přírodních designů, které ještě více umocňují výhody jako ušetření váhy a další. Příklady těchto designů můžeme vidět na Obr. 12 a 13. Tyto designy ovšem bývají velmi složité a tím i náročné na výrobu běžnými způsoby. Toto by nebyl problém při využití 3D tisku, který s těmito tvary nemá problém. [2] [41]

Celé toto řešení bychom mohli aplikovat i na letecký průmysl, který s těmito designy inspirovanými přírodou a 3D tiskem, ačkoliv prozatím separátně, již pracuje.



Obr. 12.: Mercedes Bionic Concept inspirovaný Havýšem žlutohnědým (převzato z [41])



Obr. 13.: Příklady inspirace přírodou v letectví (převzato z [42])

### 1.3.3 Stavebnictví

Již v současnosti vznikají 3D tištěné domy technologií podobnou FDM<sup>3</sup>, kdy pohyblivá hlava na masivní kovová konstrukci nanáší postupně nanáší vrstvy betonu. Výstavba těchto domů se výrazně urychluje na řády desítek hodin podle rozsáhlosti stavby. V případě menších domů je možné mít hotovou hrubou stavbu, to znamená stěny se střechou, ale bez jakýchkoliv instalací, již v horizontu 24 hodin. Další instalace, jako třeba rozvod vody, elektřiny a další, jsou řešené formou tisku dutých stěn, do kterých je snadné tyto instalace

---

<sup>3</sup> Technologii FDM popisuje kapitola 2.1 FDM (Fused Deposition Modeling)

zavést. Kromě toho také duté stěny představují, společně s relativně těžkým betonem, dobré odhlučnění vnitřních prostor díky vícero přechodům mezi prostředím (okolní prostředí – betonová stěna – prostor mezi stěnami – betonová stěna – vnitřní prostor). [1] [19]

Díky rychlosti procesu a menším nárokům na personál můžeme předpokládat budoucí snižování ceny. S narůstajícím počtem objednávek, a větším rozšířením, by se tento postup stavby mohl v budoucnu stát dominantním, avšak dnes představuje pouze minoritní alternativu. [1]



Obr. 14.: Nanášení vrstev betonu během tisku domu (převzato z [19])

Příkladem může být třetí projekt 3D tištěného domu (na Obr. 15) americké firmy SQ4D. Dům disponuje 140 metry čtverečními obytné plochy, třemi ložnicemi a dvěma koupelnami. Čas tisku tohoto domu byl 48 hodin, přičemž firma uvádí, že doba výstavby domu tohoto rozměru by běžně trvala přibližně 10 týdnů. Co se ceny týče, tisk vychází na 20 tisíc amerických dolarů, tedy přibližně 470.000 korun. Při běžné výstavbě by cena v přepočtu na České koruny vycházela na 3,5 milionu. [20]



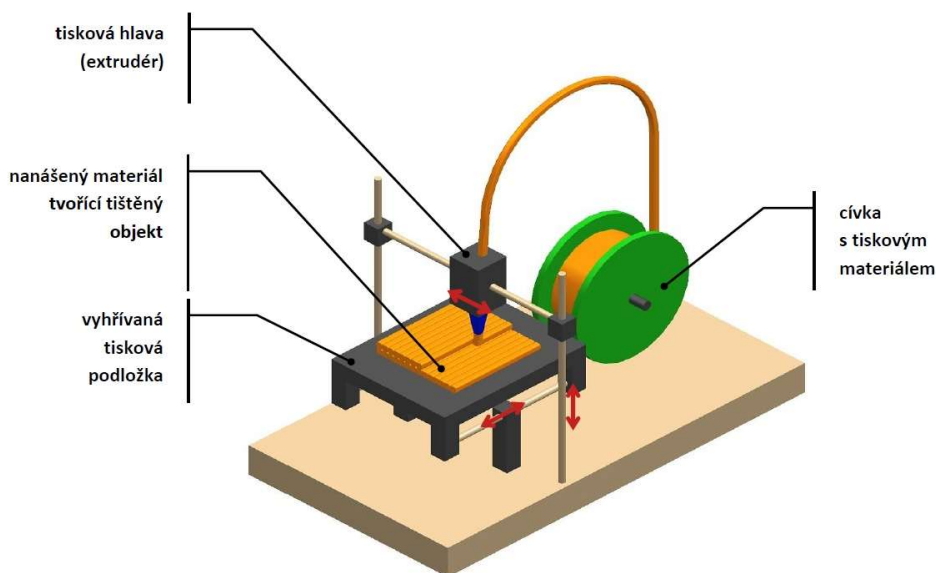
Obr. 15.: 3D vytištěný dům firmou SQ4D (převzato z [20])

## 2 Technologie

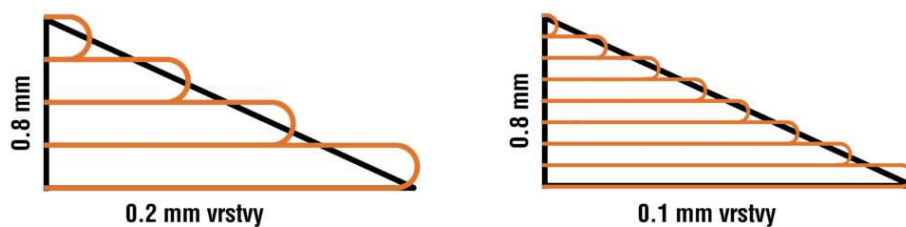
Technologie 3D tisku je založena na jednom ze tří principů, kdy je materiál vytlačován tiskovou hlavou, tekutý materiál je vytvrzován ve vrstvách nebo je spojován na podložce. Ty se liší nejen samotnou konstrukcí tiskárny, ale také materiály, které je možné použít.

### 2.1 FDM (Fused Deposition Modeling)

Technologie *Fused Deposition Modeling* (FDM), označována také jako FFF (*Fused Filament Fabrication*), je jedna z nejjednodušších, a proto i nejpoblárnější, metodou. Její princip spočívá v nanášení tiskového materiálu, ve formě tenkého vlákna (filamentu), ve vrstvách na tiskovou podložku. Ten je vtlačován do tiskové hlavy, kde je roztaven a následně nanášen. Po dokončení vrstvy se o její výšku tisková hlava nebo podložka posune a začne se nanášet další vrstva. Tento proces se opakuje až do úplného dokončení výrobku. Po dokončení není potřeba výsledný produkt dále dotvrzovat. Celý proces je časově náročný, avšak levný, s minimálním odpadem a vyrobený model dosahuje zpravidla dobré pevnosti. Nevýhodou je nutnost tisknout podpěry pro převisy se sklonem větším než přibližně 45°. Tyto podpůrné konstrukce jsou poté odstraněny nebo, v případě použití rozpustného materiálu, rozpuštěny. Další nevýhodou je hrubá konstrukce, která přímo souvisí s velikostí vrstvy. [6] [21]



Obr. 16.: Principiální znázornění FDM technologie (převzato z [6])



Obr. 17.: Závislost hrubosti na výšce vrstvy (převzato z [22])

### 2.1.1 Konstrukce FDM tiskáren

Tiskárna se skládá z 11 částí. Nejdůležitější částí je tisková hlava, další je vyhřívání tiskové hlavy, trysky, termočlánek, nosná deska, krokové motory, závitové tyče s linearsety, řemen, hnací kolo s volnoběžným kolem, napájecí zdroj a samozřejmě rám, ve kterém je celý mechanismus uložen.

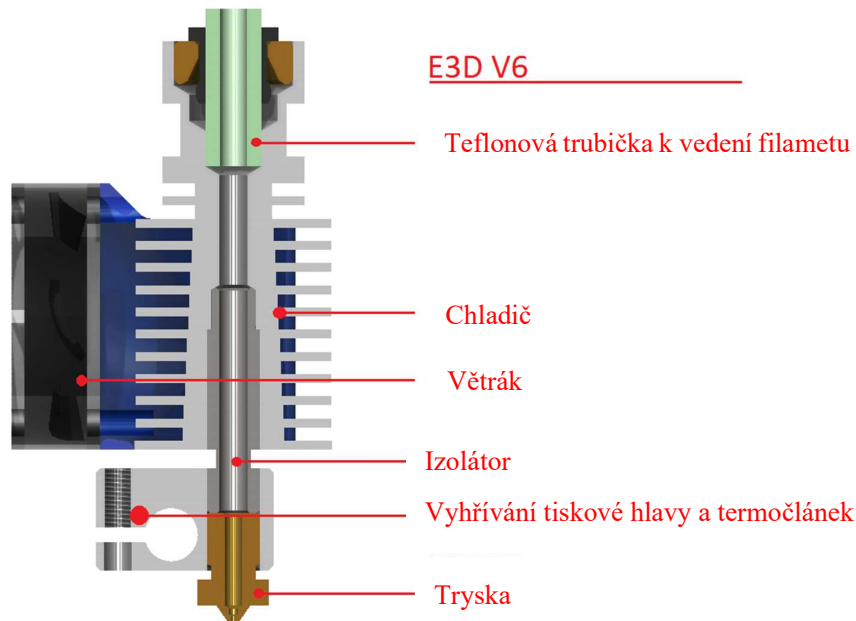
Tisková hlava, nebo také extrudér (z anglického *extruder*), se skládá ze dvou částí: z horkého (*hot end*) a studeného (*cold end*) konce. V hot endu se taví filament a následně nanáší na tisknutý objekt. Cold end se skládá z motoru, který zajišťuje pohyb, ještě tuhého, filamentu. Tyto části propojuje izolátor, který má za úkol co nejvíce tepelně oddělit horký a studený konec hlavy. Tiskovou hlavu se všemi komponenty znázorňuje Obr. 18.



Vyhřívání tiskové hlavy je zpravidla realizováno odporovým tepelným zdrojem, který taví filament. Většinou bývá napájen 12 nebo 24 volty.

Tryska, neboli *nozzle*, je kousek kovu se závitem na jednom konci a malým otvorem na konci druhém. Standartní velikost tohoto otvoru je 0,4 mm, přičemž velikosti jsou zaměnitelné. Menší průměry používáme pro detailnější tisk, větší naopak pro rychlejší tisk.

Termočlánek realizuje snímání teploty hot endu. Často jím je termistor kvůli jeho jednoduchosti a nízké ceně. [23] [24]



Obr. 18.: Tisková hlava se všemi komponenty (převzato z [24])

Na nosnou desku se tiskne výrobek. Typicky je deska skleněná a doplněná o topný element, který je důležitý, aby výsledný produkt nechládl nerovnoměrně. To by mělo za následek zkřivení a vlivem tepelné kontrakce, respektive smrštění ve studenějších částech, nedokonalé spojení vrstev, vytvoření zubů až k popraskání výrobku. Pod topným elementem je izolační vrstva, například z korku nebo bavlny. Naopak nad ním ochranná vrstva s co nejlepší tepelnou vodivostí. Zde se používá například leštěný kov. Velikost desky je dána kinematikou tiskárny. Běžnou velikostí u amatérských tiskáren je 20 x 20 centimetrů. [23] [24]

Krokové motory svým plynulým otáčivým pohybem zajišťují posun tiskové hlavy v ose X, Y a Z. Alternativně posun po ose Z, respektive nahoru a dolů, může vykonávat nosná deska. Díky pohybu v krocích jsou tyto posuny snadno kontrolovatelné a velmi přesné.

Závitové tyče se používají pro pohyb po ose Z. V principu se jedná o dlouhé šrouby uložené v linearsetech. Linearsety mají uvnitř kuličkové pouzdro, které zajišťuje co nejplynulejší a ideálně bezetrátový pohyb vodičích tyčí.

Ozubené řemeny zprostředkovávají spojení motoru a pojezdu, čímž realizují pohyb tiskové hlavy po ose X a Y.

Hnací kolo je poháněným ozubeným kolem, které zajišťuje dodávku filamentu. Proti němu působí volnoběžné kolo na pružině, která určuje kolik filamentu bude dodáváno, respektive jakou rychlostí. [23] [24]



Obr. 19.: FDM tiskárna Prusa i3 MK3S+ (převzato z [25])

### 2.1.2 Materiály pro tisk technologií FDM

Velkou výhodou této technologie je široká škála materiálů. Filamenty jsou navinuty na cívkách. Běžnými průměry těchto drátů je 1,75 a 3 milimetry. Běžně používanými jsou dnes druhy plastů jako jsou PLA, ABS, nylon, PET, PP a další. Je také možné použít filamenty s příměsí bronz, uhlíkového vlákna nebo také dřeva. V extrémních případech bychom mohli říci, že použitelným materiálem je beton, kdy v Evropě vznikají první vytištěné domy technologií téměř identickou s FDM. [26]

PLA, *Polylactic Acid*, je jedním z nejpoužívanějších materiálů. Je vyrobený z obnovitelných zdrojů, konkrétně z bramborového a kukuřičného škrobu, tudíž při tisku nezapáchá. Také je energeticky méně náročný na zpracování. Typickými teplotami pro

zpracování je  $210 \pm 10$  °C tiskové hlavy a  $50 \pm 10$  °C nosné desky. Vlákno je tuhé, ale křehké a málo tepelně odolné. Začíná měknout již při 60 °C. Proto je vhodné pro nenáročné aplikace jako třeba stolní hračky nebo prototypy. Existuje spousta modifikací tohoto materiálu jako například magnetický, s příměsí bronzového (nebo jiného) prachu, zvýšenou tvrdostí a spoustu další. Běžné PLA je také možné rozpustit v hydroxidu sodném, který je dominantním rozpouštědlem v oblasti 3D tisku.

ABS, *Acrylonitrile Butadiene Styrene*, je pevnější a tepelně odolnější materiál než PLA, začíná měknout až při 100 °C, a také dobře tvárný s dobrou odolností proti opotřebení. Běžnými teplotami tiskové hlavy je  $230 \pm 10$  °C, nosné desky  $90 \pm 10$  °C. Navíc je doporučeno tisk provádět v uzavřené vyhřívané komoře na přibližně 100 °C. V praxi se jedná o velmi běžný materiál, jehož významným zástupcem je například firma LEGO.

Nylon je velmi silný a odolný materiál, ale také citlivý na vlhkost. Také proto se při tisku doporučuje využít vysoušečů, případně zvýšené teploty. Materiál je flexibilní a má vysokou přilnavost vrstev. Pro tisk se používají teploty tiskové hlavy  $260 \pm 10$  °C a nosné desky  $70 \pm 10$  °C. Nylon je vhodný pro použití na pohyblivé části jako jsou například závěsy.

PET, nebo častěji se sloučeninami PETG, je pomyslnou kombinací PLA, a jeho snadnosti zpracování, se silou a odolností ABS, dále také dobře odolné proti rázům. Tento materiál je schválený FDA<sup>4</sup> pro použití v potravinovém průmyslu. Velkou nevýhodou PET, potažmo PETG, je, že je biologicky neodbouratelný, ale je možné jej recyklovat. Teplota extrudéru je běžně  $245 \pm 10$  °C, nosné desky  $60 \pm 10$  °C.

PP, *PolyPropylene*, má dobrou tepelnou odolnost a schopnost se prodlužovat bez přetržení. Je chemicky inertní a flexibilní materiál. Teplota extrudéru pro zpracování je  $250 \pm 15$  °C, nosné desky  $110 \pm 10$  °C. Využití nalezne například v potravinářském a textilním průmyslu nebo v laboratořích.

Technologicky zajímavými materiály jsou takové, které jsou rozpustné ve vodě. Jedním z takových materiálů je HydroFill společnosti Airwolf 3D, který je možný rozpustit v běžné vodě. V té je možné rozpustit také PVA, neboli *polyvinylalkohol*. Jedná se o netoxický, biologicky odbouratelný, pružný a v tahu pevný materiál určený pro tisk podpěr. Teplota pro tisk je  $190 \pm 10$  °C extrudéru a 50 °C nosné desky. [23] [27]

---

<sup>4</sup> FDA (*Food and Drug Administration*) je agentura zodpovědná za kontrolu potravin, léčiv, lékařských přístrojů a mnoho dalších mezi které patří také určování nezávadnosti použitých materiálů v jednotlivých odvětvích.

Tabulka 1.: Shrnutí vlastností a cen materiálů

	<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>	<b>Cena [Kč/kg]</b>
<b>PLA</b>	Snadný tisk, biologicky rozložitelný	Nízká tepelná odolnost, křehkost	300 až 1500
<b>ABS</b>	Pevný, odolný proti opotřebení, tepelně odolný	Silné kroucení během tisku	300 až 650
<b>Nylon</b>	Silný, tepelně a mechanicky odolný, flexibilní	Citlivý na vlhkost, obtížný tisk	~ 1500
<b>PET/PETG</b>	Odolný proti rázům, pružný, recyklovatelný	Biologicky neodbouratelný	350 až 700
<b>PP</b>	Lehký, tepelně odolný, ohebný, odolný proti opotřebení	Náročnější tisk, cena	~ 3000
<b>PVA</b>	Rozpustný ve vodě – vhodný na podpory	Horší přilnavost, citlivý na vlhkost, náročnější tisk	~ 1500

### 2.1.3 Zástupci FDM technologie

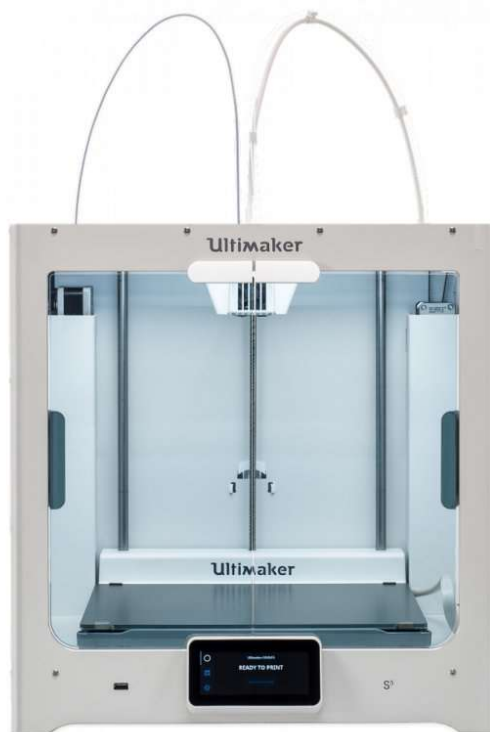
Vhodnou tiskárnou pro začátečníky je Creality Ender 3, kterou je možné koupit už za 4000 korun. I přes svou nízkou cenovku nabízí vyhřívanou tiskovou plochu o rozměrech 22 x 22 centimetrů a zvládne tisk vrstvy o minimální výšce 0,1 milimetru, maximum je pak 0,4 milimetru. Maximální rychlost tisku je 180 mm/s. Její výhodou, kromě ceny, je velké množství koupitelných vylepšení. Nevýhodou je nutnost ruční kalibrace výšky tiskové plochy. [28]



Obr. 20.: Tiskárna Creality Ender 3 vhodná pro začátečníky (převzato z [28])

Pokročilejší variantou je tiskárna od českého výrobce Prusa i3 MK3S+ (viz Obr. 19). Ta dokáže, oproti tiskárně od Creality, tisknout jemnější vrstvy, číselně v rozsahu 0,05 až 0,35 milimetrů, ovšem za cenu o centimetr menší tiskové plochy. Tisk zvládne o trochu rychleji při rychlosti 200 mm/s. Velkou výhodou představuje automatická kalibrace před začátkem každého tisku. Tiskárnu je možné si pořídit jako stavebnici za 20.000 korun nebo již sestavenou o 7000 dráž. [25]

Zástupce profesionálních tiskáren představuje Ultimaker S5. Ta již disponuje vlastní vyhřívanou komorou, tiskovou hlavou s dvěma extrudéry, přičemž neaktivní se přizvedává, a automatickým vyrovnáváním tiskové plochy s rozměry 330 x 240 milimetrů. Rozsah tisknutelných výšek vrstvy je od, v závislosti na trysce, 0,02 až 0,6 milimetru. Samozřejmě je zde i možnost zadat tisk online. Tiskárna také obsahuje integrovanou kameru zabírající tiskovou plochu, tudíž je možné sledovat průběh tisku přes web. Toto vše se odráží i na ceně, která je bezmála 200 tisíc korun. [29]



Obr. 21.: Profesionální 3D tiskárna Ultimaker S5 (převzato z [29])

#### 2.1.4 Vícemateriálový a vícebarevný tisk

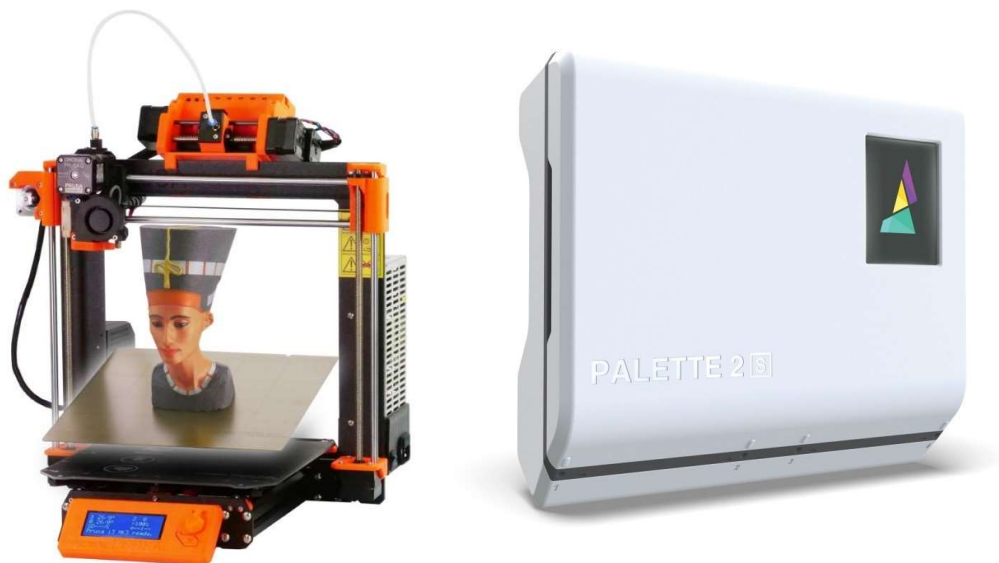
Vícemateriálovým tiskem bychom mohli nazvat tiskárny s dvěma tryskami (viz Obr. 22). Oba dva extrudéry sdílí jednu tiskovou hlavu a pohybují se jako jeden kus. Právě proto, i přes vyšší počet trysek, to neznamena, že by 3D tiskárna tiskla rychleji, ale existují výjimky.

Některé tiskárny podporují tisk oběma tryskami najednou v případě, že tiskneme dva malé, identické modely, které nepřesahují velikostí vzdálenost mezi tryskami. To výrazně urychluje proces tisku. Velkou výhodou přináší dvou extruderové tiskárny v podobě tisku podpor přičemž jedna tryska tiskne samotný model a druhá tiskne pouze podpěry z vhodného materiálu, kterým by mohlo být PVA, jenž je rozpustitelné ve vodě. Také je možné pomocí dvou extruderové tiskárny realizovat tisk ze dvou různých barev. [30]



Obr. 22.: Detail tiskové hlavy se dvěma extrudéry (převzato z [30])

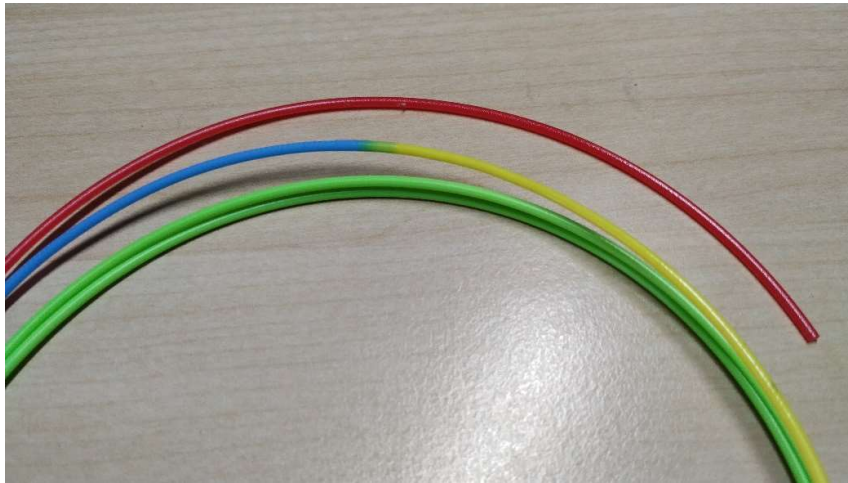
Pokud potřebujeme kombinovat více barev i materiálů v rámci jednoho modelu, můžeme to realizovat pomocí druhého zařízení. Může se jednat o, například, sadu vylepšení pro tiskárnu Prusa MK3S s názvem MMU2S (*Multi Material Upgrade 2.0*). Další možností je univerzálnější Mosaic Palette 2S Pro, případně jeho ostatní varianty jako 2S nebo novější 3S. Obě tyto zařízení umožňují kombinovat nejen různé barvy jednoho materiálu, ale také více různých materiálů. Výhodou je tisk složitějších sestav jako jednoho kusu, kdy jednotlivé díly musí být z různého materiálu a tím se vyhneme nutnosti montáže. Případně, jak bylo v předchozím odstavci již zmíněno, k tisku podpěr z materiálu, který je následně snadno odstranitelný, čímž zkracuje dobu a zvyšuje kvalitu očištění výtisku. Problém může tvořit přilnutí různých materiálů, u kterých nemusí dojít ke správnému propojení vrstev a tím k praskání výtisku.



Obr. 23.: Prusa MMU2S (vlevo) a Mosaic Palette 2S Pro (vpravo) (převzato z [25], [31])

Princip obou zařízení spočívá v tom, že předem, nezávisle na tiskárně, připravují filament ještě než dosáhne trysky. Do zařízení se zavedou filameny podobným způsobem jako do 3D tiskárny. Tyto filameny si zařízení interně měří a nařezává do potřebné délky a spojuje je.

Pro spojení filamentů jsou důležité 3 parametry. Těmito parametry je ohřátí, komprese a chlazení. Ohřátí filamentu musí být dostatečné, aby došlo k mírnému natavení a filameny se mohli spojit. Pokud by tato teplota příliš vysoká, vytváří se na filamentu krčky, neboli zúžené spoje. To, kromě potíží při tisku, může způsobit i přilepení ke stěně zařízení a tím dojít k zaseknutí filamentu. Naopak při příliš nízké teplotě by se filament nemusel natavit a spoj by nebyl vytvořen. Komprese udává jakou silou k sobě budou filameny přitlačeny. Při nízké hodnotě je spoj křehký a láme se. Na druhou stranu při příliš vysoké kompresi se na spoji utváří vlivem silně přitlačených filamentů boule, která má větší průměr než zbytek filamentu a tím by mohlo dojít k zaseknutí. Intenzita chlazení kompenzuje ohřátí filamentu. To znamená, že pokud k natavení filamentu je zapotřebí vyšší teploty, ale je zde riziko vytvoření krčku, nastavuje se vyšší chlazení, aby tuto vyšší teplotu kompenzovalo. Takto připravený filament je připraven v zásobníku, který zařízení průběžně doplňuje tak, aby 3D tiskárna měla nepřetržitou dodávku materiálu.



Obr. 24.: Filament vytvořený ze 4 barev

Oproti výhodám, jako je tisk z více barev i materiálů, jsou zde nevýhody v podobě doby tisku, ale také odpadního materiálu. Spoje představují plynulý přechod z jedné barvy, potažmo materiálu, na druhou. Materiál tohoto spoje musí být spotřebován typicky na jiný objekt než námi tisknutý model. Řešením tohoto problému je “věž“ tisknutá vedle hlavního modelu, která slouží ke spotřebování materiálu spoje. Tato věž se po dokončení tisku stává odpadem. Její velikost se odvíjí od počtu spojů. S tím se pojí i délka tisku, která se kvůli tisku věže pro přechody výrazně prodlužuje, i více než 2x. Důležité je přesná kalibrace, jinak může docházet k tomu, že se následující barva/materiál dostane do trysky dříve, nebo naopak později, a na modelu se objeví nesprávná barva/materiál.



Obr. 25.: Výtisk (vlevo) a odpadní materiál vzniklý při jeho tisku (vpravo)



### 2.1.4.1 Vlastní práce

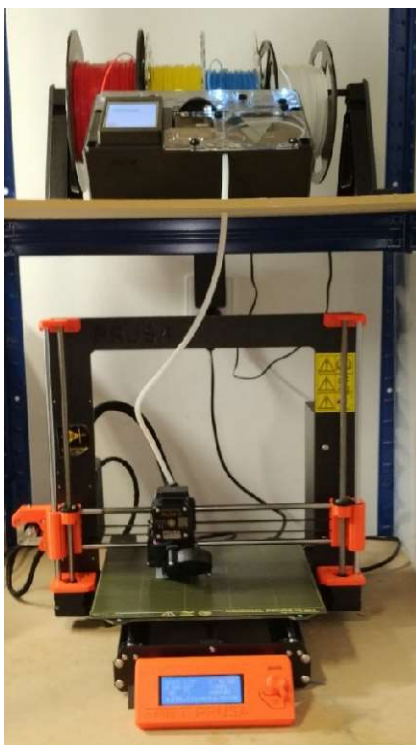
Mým úkolem bylo zkalibrovat Mosaic Palette 2S Pro (dále jen MP) a pomocí tiskárny Prusa i3 MK3S+ vytisknout několik vícebarevných modelů. Toto obnášelo zkalibrovat interní měřicí systém MP a pomocí kalibračních výtisků sladit kalibrační body (*Pings*) tiskárny a MP. Dalším úkolem bylo sepsat návod k použití celé soustavy (viz Příloha A).

#### Sestava

MP pracuje se standartním filamentem o průměru 1,75 mm a dokáže kombinovat až 4 různé barvy nebo materiály, kterými může být PVA, PLA, ABS, PETG, HIPS, TPU, PVOH a Nylon. V případě, že nedodržíme předepsanou tloušťku filamentu může dojít k jeho zaseknutí v případě tlustšího, naopak při menším průměru by ho MP nemusel detekovat.

Mě přidělená tiskárna Prusa i3 MK3S+ disponuje tryskou o průměru 0,4 mm, což znamená, že minimální tloušťka čáry je 0,4 mm. Rozsah výšek vrstvy, které tiskárna podporuje, je od 0,05 mm do 0,35 mm přičemž maximální přesah, který nevyžaduje tisk podpěr je 45°. Rozsah použitelných materiálů je stejný jako pro MP rozšířený o kompozitní materiály.

Filament je od MP veden teflonovou trubičkou, která jde skrze přesně vyvrtanou díru v polici. Toto řešení jsem zvolil z toho důvodu budoucího zastavení prostoru tiskárny, který bude vyhříváný.



Obr. 26.: Sestava pro vícebarevný tisk v Makerspacu na FEL

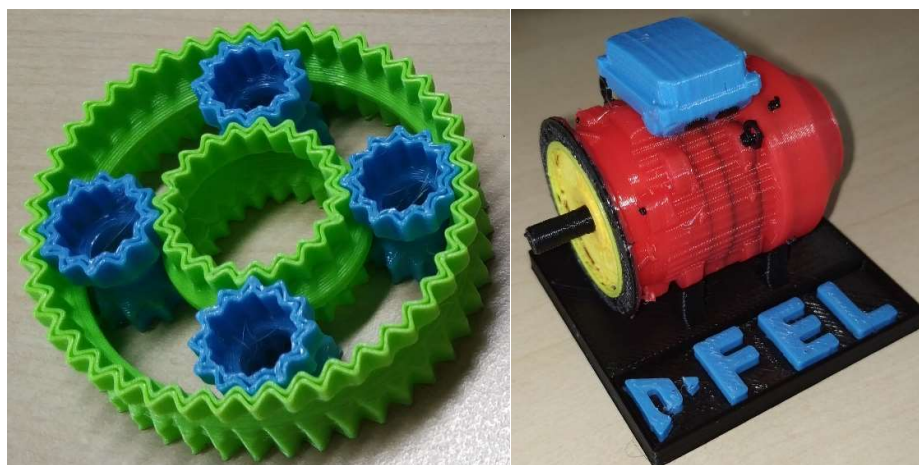
Modely

Většinu mnou tisknutých modelů jsem vytvářel sám ve studentské verzi Solidworks. Konkrétně se jedná například o kroucenou vázu (viz. Obr. 25.), válečkové ložisko, reklamní přívěšek “FEL ZČU” nebo podstavec modelu asynchronního motoru.



Obr. 27.: Mnou vymodelované a vytištěné válečkové ložisko (vlevo) a reklamní přívěšek (vpravo)

Tiskl jsem i modely stažené z internetu (*thingiverse.com* a *grabcad.com*), které jsem kvůli omezení na studentskou verzi Solidworks nemohl vytvořit, konkrétně planetární převod, nebo jsem k jejich vymodelování neměl dostatečné vědomosti a dovednosti.



Obr. 28.: Vytisknutý planetární převod (vlevo) a model asynchronního motoru s podstavcem (vpravo)

Výhodou tohoto tisku s více barvami je možnost vytisknout pohyblivé modely, které není možné složit a jsou tak tvořeny pomyslným jedním kusem, přičemž jednotlivé pohyblivé části můžeme barevně odlišit.

Na planetárním převodu (viz Obr. 28 vlevo) se vyskytuje třepení a vystupující zelená barva na obíhajících kolech. Oba tyto defekty způsobila špatně nastavená retrakce (vtáhnutí

filamentu při přejíždění tiskové hlavy), kdy v případě třepení se při přejezdech zbytkový materiál táhne za extrudérem, v případě zelených přesahů se kousek zbytkového materiálu uchytí právě na dvou obíhajících modrých kolech a tento materiál bylo potřeba odstranit, protože značně omezoval otáčení soustavy. Také se přímo v pár vrstvách objevilo na modrých kolech zelená, což bylo způsobeno nepřesně zkalibrovaným měřicím systémem MP.

U modelu asynchronního motoru (na Obr. 28 vpravo) jsou v místech ok a některých šroubů vidět na červeném těle černé pruhy. Toto je způsobeno tím, že je obtížné tisknout velmi malé objekty (šroub je pouze tečka) odlišnou barvou. Pro správný výtisk je potřeba velmi přesná kalibrace měřicího systému MP, ale také velmi přesné zavedení filamentu na začátku tisku, jinak se barva dostane do trysky dříve, nebo později, než by měla a výsledkem jsou pruhy jako na tomto modelu. Tento problém nenastává na podložce motoru ani na jeho čele právě díky přítomnosti větší plochy, kterou barva zabírá.

Destička s jehlánky a válečky byla jeden z prvních výtisků. Je zde dobře vidět stejný problém s tiskem malých detailů, a tiskem detailů obecně, odlišnou barvou stejně jako u modelu asynchronního motoru a stejný problém s retrakcí a přejezdy tiskové hlavy jako u planetárního převodu. Celý tento problém umocňoval fakt, že měřicí systém byl nepřesně nakalibrován.



Obr. 29.: Testovací destička s jehlánky a válečky jak měla vypadat (vlevo) a hotový výtisk (vpravo)

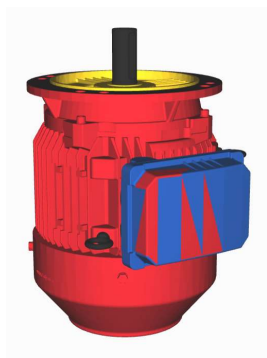
Naopak příkladem dobrého výtisku je válečkové ložisko (Obr. 28 vlevo), přívěšek „FEL ZČU“ (Obr. 28 vpravo) a kroucená váza (Obr.27). Zde nedošlo k žádným defektům v podobě třepení, nesprávných barev nebo špatně vytisknutých detailů. Jediným problémem je u přívěšku „FEL ZČU“ malé a slabé očko, což ovšem není problém tisku, ale návrhu.

#### Příprava modelů

K přípravě modelů pro tisk jsem použil výrobcem doporučený webový slicer (software pro přípravu tisku a generování souborů pro tiskárnu) na stránkách <https://canvas3d.io>, který

je přímo určený k práci s MP, ale je možné ho po registraci využívat i jako alternativu k jiným volně dostupným slicerům, kterým je například Ultimaker Cura.

Slicer, kromě klasických funkcí jako je změna velikosti, úprava parametrů pro tisk a další, disponuje nástrojem pro barvení celých dílů, v případě, že tisknutý objekt je z více dílů, nebo nástrojem pro ruční barvení po menších částech. Tyto menší části představují trojúhelníky generované standartním .stl souborem, které tvoří samotný objekt.



Obr. 30.: Nedovybarvený model asynchronního motoru tvořený jedním dílem

Výstupem sliceru je klasický soubor .gcode s názvem projektu určený pro tiskárnu a, v případě použití vícebarevného tisku, soubor .maf pro MP. Tyto dva soubory jsou generovány pokud tisk probíhá v offline režimu a MP je používán jako příslušenství. To znamená, že 3D tiskárna s MP nejsou propojeny a pracují “nezávisle na sobě,” přičemž tisk se provádí z SD karet.

#### Online tisk

Slicer také podporuje online tisk. V tomto případě generuje soubor s koncovkou .mcf.gcode, který je přímo ze sliceru posílán do CANVAS Hubu (dále jen Hub), který tento soubor rozdělí mezi tiskárnu a MP. Ten je fyzicky propojuje pomocí USB, s počítačem komunikuje prostřednictvím Wi-Fi sítě.

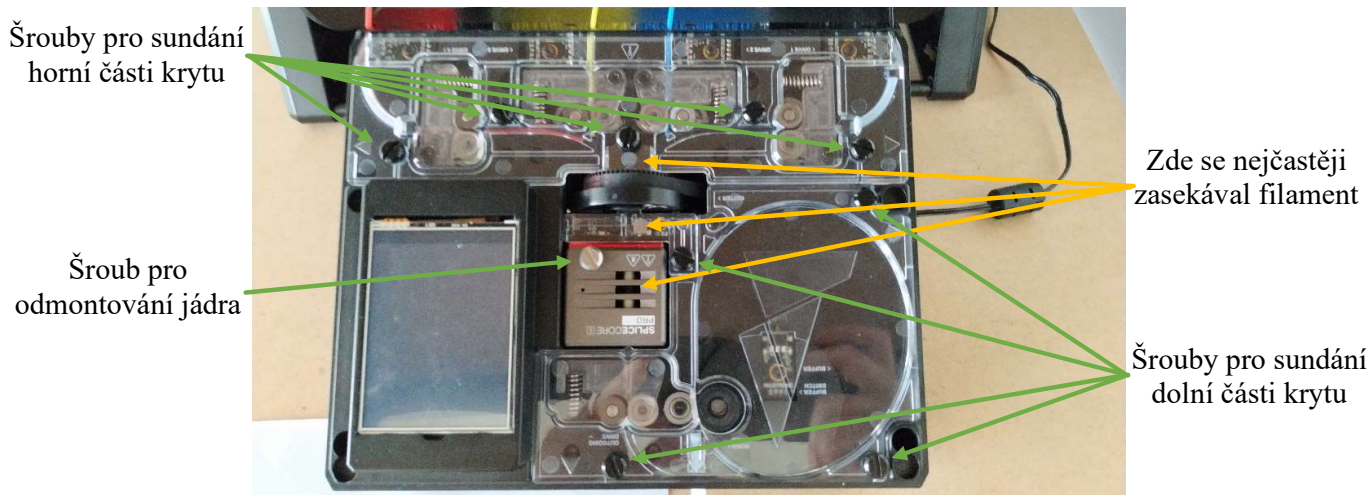
Tento Hub jsem bohužel nemohl využít, neboť v Makerspacu, kde se sestava nachází, je izolovaná síť, která nedisponuje vlastním Wi-Fi routerem, tudíž nebylo možné realizovat komunikaci mezi Hubem a počítačem.



Obr. 31.: CANVAS Hub sloužící k realizaci online tisku (převzato z [31])

### Komplikace při práci

Během tisku se stávalo, že si filament občasně zasekl a to na třech konkrétních místech. Prvním je “křižovatce“ před zastříhovacím kolečkem, druhým mezi zastříhovacím kolečkem a jádrem nebo přímo v jádře. Tyto místa jsou označena žlutými šipkami na Obr. 32. Odstranit tyto zaseknuté filamenty znamenalo sundat černý kryt, který drží pouze na magnetech, a následně jeden z průhledných krytů uchycených černými šrouby, případně vyšroubovat i stříbrný šroub držící jádro, pokud se filament zasekl v něm.



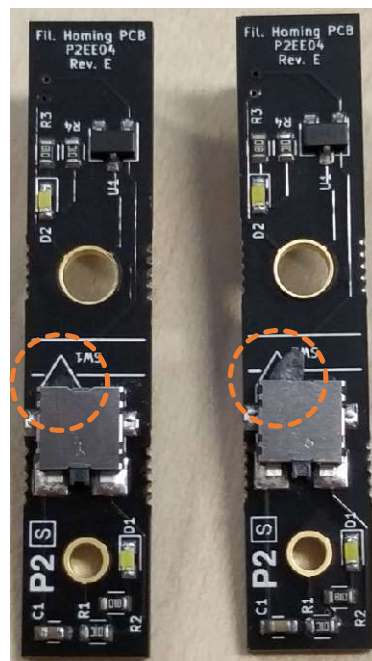
Obr. 32.: Znázornění nejčastějších míst, kde se zasekával filament, a šroubů, kterými je kryty uchycen

Výraznější problém nastal při zaseknutí, konkrétně bílého, filamentu mezi zastříhovacím kolečkem a jádrem, kdy se filament po zastříhnutí zkroutil a zničil čidlo detekující, zda se zaváděný filament již nachází za zastříhovacím kolečkem nebo ne. Toto čidlo detekuje filament pomocí pohyblivého jazýčku, který filament promáčkne dovnitř samotného senzoru a tím už nezasahoval do dráhy filamentu. Výsledkem bylo, že při zavádění filamentu ho MP

nedetekuje a do nekonečna ho zavádí dál do zařízení až je zátěž moc velká a krokový motor, který tento filament zavádí, začne přeskakovat. Řešením bylo celou destičku se senzorem vyšroubovat a odpojit konektor. Součástí balení MP bylo i jedno toto náhradní čidlo. Porovnání poškozeného a nového čidla můžeme vidět na Obr. 34.



Obr. 33.: Lokace zničeného čidla s viditelným zamáčknutým jazýčkem



Obr. 34.: Porovnání poškozeného (vlevo) a nového čidla (vpravo)

### Další postup

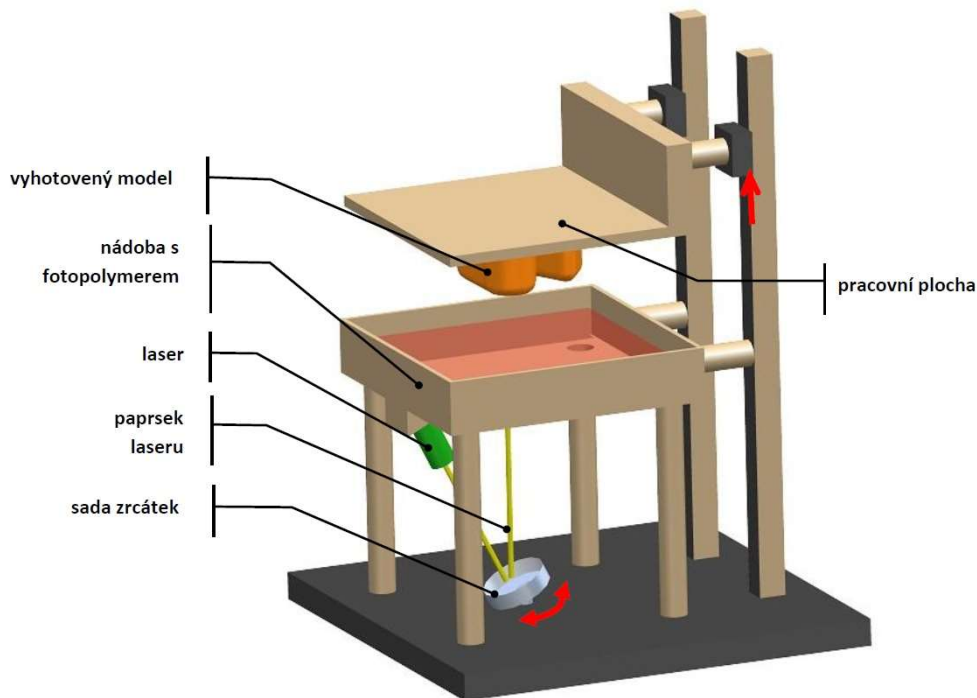
Veškeré mnou vytištěné modely byli z materiálu PLA, avšak MP dokáže pracovat i s různými kombinacemi materiálů. Pro realizaci tisku s více materiály je nutné odladit parametry pro spojování těchto materiálů (viz poslední odstavec kapitoly 2.4.1), přičemž pro spojení, například, z PETG na ABS nemusí být parametry stejné jako z ABS na PETG. Důležité je také odladění teploty tisku tak, aby se materiál tepelně náročnější na tisk roztavil a materiál tepelně méně náročný nepřehříval a nepoškodil. Celé toto nastavení je pak potřeba zanást do webového sliceru.

Dalším postupem může také být relokace zdroje tiskárny společně s ovládacím displejem tak, aby se mohl celý prostor tiskárny uzavřít plexisklem a vytvořit tak vyhřívanou tiskovou komoru s vlastním mikroklimatem.

## **2.2 SLA (Stereolithography)**

Technologií SLA (*Stereolithography*) byla první představenou metodou. Jedná se o princip, kdy se ke stavbě používá fotopolymeru vytvrzovaného laserovým paprskem bod po bodu, respektive v místech, kde má vzniknout model. Důležitou roli hraje intenzita vytvrzovacího laserového paprsku a doba ozáření, která musí být zvolena dostatečně dlouhá pro spojení všech bodů vrstvy. Pokud by ozáření bylo nedostatečné, nedojde k dostatečnému vytvrzení, proniknutí a spojení s předchozí vrstvou. V případě příliš velkého ozáření pak k nadměrnému zkroucení součástí. To může nastat i vlivem nedotvrzení, případně velkou časovou prodlevou mezi vytvořením výtisku a jeho dovytvrzením.

Tento princip je díky přesnosti zaměřování laserem a následného vytvrzování jednou z nejpřesnějších metod tisku. V osách X a Y je přesnost v řádech jednotek mikrometrů, výška vrstvy se pohybuje v rozmezí 15–100 mikrometrů, díky čemuž je povrch výtisků velmi hladký a jednotlivé vrstvy bývají těžko rozeznatelné. Nevýhodou je, že po dokončení výtisku je potřeba výrobek dotvrdit pro zlepšení jeho mechanických vlastností. To se provádí ve speciální vytvrzovací peci. Kromě tohoto také není možné vytvářet dutá tělesa, neboť by nevytvrzený tekutý materiál zůstal uvnitř. SLA technologie neumožňuje využití více materiálů, respektive objekt může být pouze z jednoho materiálu a to včetně podpěr. [6] [32]



Obr. 35.: Principiální znázornění SLA technologie (převzato z [6])

Samotný proces tisku může probíhat ve dvou principech:

- 1) Pracovní plocha je na začátku úplně ponořena v nádobě s tekutým fotopolymerem. Postupně, vrstvu po vrstvě, vytvrzuje laserem vytvořené UV záření. Laser působí na pracovní plochu ze spodu, skrze nádobu s fotopolymerem. Pracovní plocha se tak pohybuje směrem vzhůru, přičemž doslova vytahuje zhotovovaný model ven z nádoby. Tento princip je znázorněn na Obr. 35.
- 2) Pracovní plocha, na kterou má být vyhotoven model, postupně ponořována do tekutého fotopolymeru. Laserový paprsek působí narozdíl od předešlého principu shora. To znamená, že se pracovní plocha na začátku procesu ponoří do hloubky o velikosti jedné vrstvy. [6]

### 2.2.1 Konstrukce SLA tiskáren

SLA tiskárna může být konstruována dvěma styly podle principu, na kterém pracuje, jak bylo popsáno v minulé kapitole. Základ těchto konstrukcí je však stejný, pouze vzájemně otočený. Tiskárna je složena z pracovní plochy, laseru, galvanometru, zrcadel pro zaměřování laseru v X-Y ose a nádobou na fotopolymer.



Na pracovní ploše se vytváří tisknutý objekt. Plocha musí mít dobrou přilnavost, aby se na ní správně uchytila první vrstva a tisk proběhl správně.

Laser, typicky ultrafialový (UV), realizuje vytvrzování fotopolymery a tím vytváření samotného modelu.

Úkolem galvanometru je nasměrovat laserový paprsek podélně k zrcadlům tak, aby byl vždy kolmý k pracovní ploše. Díky tomu jsme schopni dosáhnout ještě vyšší přesnosti zaměřování.

Pohyblivé ploché zrcadlo, poháněné typicky krokovými motory, společně s pevně uchyceným parabolickým zrcadlem zajišťují přesné zaměření laserového paprsku. [33] [34]



Obr. 36.: SLA tiskárna Prusa SL1S (vlevo) s dovytvrzovací pecí Prusa CW1 (vpravo) v Makerspacu na FEL

## 2.2.2 Materiály pro tisk technologií SLA

Nevýhodou této technologie je výběr materiálů, který je omezen pouze na fotocitlivé materiály, respektive fotopolymery. Ty můžeme rozdělit dle dvou kritérií a to sice podle druhu a podle účelu.

### 2.2.2.1 Podle druhu

Fotopolymery jsou obecně tvořeny ze tří hlavních složek, a to konkrétně z pojiva, monomerů a fotoiniciátorů. Pojiva tvoří asi 50-80%, monomery se vážou s dalšími monomery, polymery a pojivem, a fotoiniciátory v procesu slouží právě k vázání všech složek pryskyřice dohromady. Akrylátové pryskyřice jsou nejstaršími používanými fotopolymery s velkou smrštitivostí a malou přesností. Epoxidové pryskyřice vynikají

přesností a nižší smrštivostí. Plněné pryskyřice jsou vyplňovány organickými materiály, kovy nebo keramikou. V praxi jsou vhodnými pro namáhané části. [9]

#### 2.2.2.2 Podle účelu

Fotopolymery můžeme podle účelu rozdělit do třech základních skupin a to sice na polymery standartní, tavitelné, biokompatibilní a technické, které můžeme dále dělit na houževnaté, odolné proti opotřebení, odolné proti vyšším teplotám, pružné/flexibilní a tuhé.

Standartní fotopolymery dosahují vysoké tuhosti, přesnosti a hladkého povrchu. Je možné vybírat z celé řady barev, případně i bezbarvé, ale v tomto případě barva ovlivňuje výsledné vlastnosti výtisku. Jako příklad můžeme uvést bílou pryskyřici, která se vyznačuje velmi hladkým povrchem. Hlavní výhodou je nižší cena, protože tyto standartní fotopolymery, na rozdíl od ostatních, neobsahují další příměsi. Nevýhodami je nízká tažnost, malá rázová houževnatost a křehkost. Také proto se hodí především pro prototypy, potažmo pro umělecké modely. [26]

Technické fotopolymery, jak bylo již řečeno, se dále rozdělují do dílčích skupin tak, aby bylo možné vybrat vhodný fotopolymer pro každou aplikaci.

- Houževnaté technické fotopolymery, jak již z názvu vyplývá, vynikají svou houževnatostí a pevností v tahu podobnou ABS, která je přibližně 55 megapascalů. Využívají se pro vysoce namáhané součásti jako jsou funkční prototypy pro testování a podobně.
- Druhá skupina technických fotopolymerů se vyznačují vysokou odolností proti opotřebení podobnou PP. Využití najde pro aplikace u kterých požadujeme vysokou pružnost materiálu a nízkou náchylnost na opotřebení. Nevýhodou je horší pevnost v tahu.
- Fotopolymery se zvýšenou odolností proti vyšším teplotám jsou křehké a málo houževnaté, ale mají velmi hladký povrch. Jejich pracovní teplotní rozsah je v mezích 200-300 °C a najdou uplatnění k prototypování forem, vytváření nástrojů k odlévání nebo v zařízeních pro proudění horkého vzduchu.
- Pružné fotopolymery se vlastnostmi nejvíce blíží pryži. Umožňují simulovat pružné pryžové části, které jsou měkké na dotek. Mají vysokou tažnost a odolnost proti rázu. Nevýhodami jsou nízká tvrdost, postupné zhoršování vlastností s časem a obtížný tisk, který vyžaduje rozsáhlé podpůrné struktury.

- Poslední podskupina technických polymerů vyniká svou tuhostí. Tyto tuhé pryskyřice jsou vyztuženy sklem nebo jinými keramickými částicemi. Mají vysoký modul pružnosti a odolnost proti deformaci v čase, avšak jsou křehčí než houževnaté technické fotopolymery.



Obr. 37.: Rozdělení technických fotopolymerů s příkladem aplikace (převzato z [26])

Biokompatibilní fotopolymery, neboli lékařské pryskyřice, se používají pro tisk výrobků pro zdravotnické zařízení, potažmo zdravotních pomůcek. Tyto výrobky je možné parou pomocí autoklávu<sup>5</sup> sterilizovat a používat přímo na operačním sále. Využití je především pro chirurgické pomůcky, přístroje a ve stomatologii. Hlavní výhodou je biokompatibilita, naopak nevýhodou je menší odolnost proti opotřebení a lomu.

Poslední skupinou jsou tavitelné, respektive vytavitelné, fotopolymery, jejichž předností je velmi vysoká přesnost, hladkost povrchu, ale především schopnost čistého hoření s nízkým množstvím zbytkového popela (menším než 0,02%). Z těchto důvodů se používají pro tvorbu velmi přesných dílů s vysokými nároky na detail. [26]

### 2.2.3 Zástupci SLA technologie

Amatérským dostupným zástupcem této technologie je tiskárna Creality LD-006 s cenou začínající na 15.000 korunách. Tisková deska má rozměry 192 x 120 milimetrů s tloušťkou vrstvy 0,01 až 0,05 milimetrů. Rychlost tisku je až 60 milimetrů výšky za hodinu, přičemž doba vytvrzení jedné vrstvy je 1 až 4 sekundy. Díky dvěma vodícím tyčím pro osu Z dosahuje vyšší stability. [28]

<sup>5</sup> Přístroj pro reakce probíhající za vysokého tlaku a teploty, který se typicky používá v laboratořích, potažmo nemocnicích, pro sterilizaci materiálů. Proces sterilizace je prováděn teplým vlhkým vzduchem a zvýšením tlaku, standartně pomocí vodní páry o teplotě 123 °C a tlaku 101,3 Pascalů.



Obr. 38.: SLA tiskárna Creality LD-006 (převzato z [28])

Prusa SL1S (viz Obr. 36 vpravo) představuje pokročilejší variantu s výškou vrstvy od 0,025 po 0,1 milimetru s menší tiskovou plochou o rozměrech 127 x 80 milimetrů. Doba vytvrzování jedné vrstvy je 1,3 až 2,4 sekundy. Tiskárna také dobře eliminuje zápach při tisku pomocí ventilátoru s uhlíkovým filtrem. Výhodou je, že tisk je možné zadat i online. Další výhodou je, že tiskárnu stačí pouze jednou zkalibrovat. Cena této tiskárny je 50.000 korun. [25]

Profesionální SLA 3D tiskárnu představuje Formlabs Form 3L, která vyniká svou tiskovou plochou 335 x 200 milimetrů s dvěma současně pracujícími vytvrzovacími lasery, které výrazně urychlují tisk. Výška vrstvy je závislá na materiálu a pohybuje se v rozmezí 0,025 až 0,3 milimetru. Tiskárna disponuje automatickým doplňováním materiálu ze zásobníku, připojením k internetu a vyhřívanou tiskovou komorou. Cena této tiskárny je téměř 350.000 korun. [29]

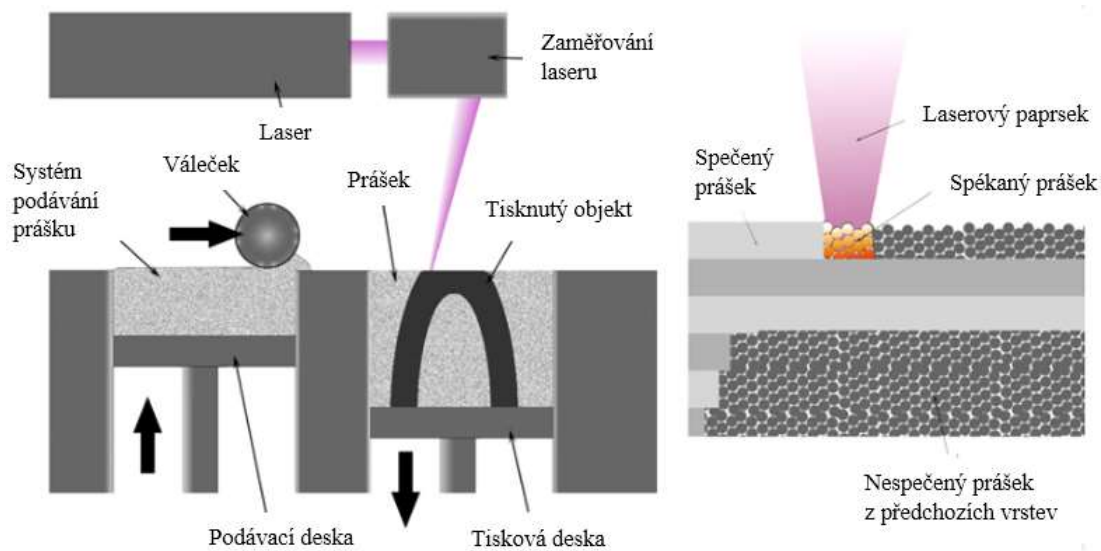


Obr. 39.: Profesionální SLA 3 tiskárna Formlabs Form 3L (převzato z [29])

### 2.3 SLS (Selective Laser Sintering)

SLS (*Selective Laser Sintering*) využívá k výrobě práškový materiál, který je zapékán laserovým paprskem. Na tiskovou desku se rozprostře tento práškový materiál a tvar požadované vrstvy je následně vytvrzen pomocí laseru, tisková deska se následně posune o výšku vrstvy, nanese se další vrstva prášku a proces se opakuje.

Velkou výhodou této metody je, že není zapotřebí tisk podpěr, jelikož výtisk je vždy obklopen zbytkovým nespečeným materiálem, který slouží jako podpora. Kromě toho tento nespečený materiál je možné použít znovu. Výsledné výtisky jsou relativně silné a odolné, ale na jejich povrchu vznikají póry, které je možné odstranit následnou povrchovou úpravou. Obtížná je také změna tiskového materiálu, kdy musíme tiskárnu vyčistit od jemného prášku. [35]



Obr. 40.: Principiální znázornění SLS technologie (převzato z [39])

Tento princip znázorňuje GIF na odkazu:

[https://sinterit.com/wp-content/uploads/2022/02/previs\\_rolka\\_komora\\_bed\\_fala\\_laser\\_montage\\_loop\\_230f\\_800px\\_opt3.gif](https://sinterit.com/wp-content/uploads/2022/02/previs_rolka_komora_bed_fala_laser_montage_loop_230f_800px_opt3.gif)

### 2.3.1 Konstrukce SLS tiskáren

SLS tiskárna se skládá ze čtyř hlavních částí: tiskové a podávací desky (respektive tiskové komory a zásobníku materiálu), válečku a laseru společně s jeho zaměřováním.

Na tiskové desce vzniká tisknutý objekt. Ta nemusí být vyhřívána, ale je nutné, aby byla velmi přesně ve vodorovné poloze z důvodu principu přidávání materiálu. V opačném případě by vrstva nemusela být po celé rovině stejně vysoká.

Podávací deska zajišťuje dodávku materiálu, který je pomocí válečku nanášen tiskovou desku. Tisková a podávací deska se pohybují vždy o stejnou výšku, pouze v opačném směru. Takto podávací deska vždy vytlačí nad úroveň zásobníku materiál o výšce jedné vrstvy, který je následně přesunut a zarovnan válečkem do roviny.

Samotné spékání je prováděno laserem velmi přesně zaměřovaným laserem o výkonu několika Wattů. [36]



Obr. 41.: SLS 3D tiskárna Sintratec S2 na FEL

### 2.3.2 Materiály pro tisk technologií SLS

Typickým materiálem pro SLS tisk jsou různé varianty nylonu. Jedná se o termoplastické polymery patřící mezi polyamidy, přičemž se liší svými vlastnostmi. Pro SLS technologii jsou běžnými nylon 11, 12 a 12 GF.

- Nylon 11 je význačný svou tvárností, odolností a flexibilitou. Je vhodný pro nárazuvzdorné prototypy, tenkostěnné díly, svorky a závěsy.
- Nylon 12 je vhodný pro univerzální použití. Jeho předností je vysoká rozměrová přesnost a detaily. Používá se pro tisk prototypů, kde je požadována právě vysoká přesnost, pro malosériové výroby a trvanlivé části.
- Nylon 12 GF je materiál plněný sklem se zvýšenou tuhostí a vyšší tepelnou stabilitou, který nachází uplatnění v průmyslovém prostředí. Tisknou se z něj robustní přípravky, přípravky vystavené trvalému zatížení a díly vystavené vysokým teplotám. [37]



Obr. 42.: Příklady uplatnění nylonu 11 (vlevo), 12 (uprostřed) a 12 GF (vpravo) (převzato z [37])

Dalšími variantami nylonu mohou být verze plněné místo skleněného vlákna hliníkem nebo například karbonovým vláknem, případně jiné termoplasty a keramika.

### 2.3.3 Zástupci SLS technologie

Formlabs Fuse 1 má být dostupnější, ale stále profesionální, SLS 3D tiskárnou. Tloušťka vrstvy dosahuje 0,11 milimetrů a tisková plocha má 165 x 165 milimetrů s kapacitou zásobníku 8,5 kg. Výrobce udává dobu přípravy tisku přibližně 60 minut. Je možné k tiskárně dokoupit zařízení pro čištění modelů i tiskárny a lehké získávání materiálu zpět ke znovupoužití. Cena tiskárny je sdělena pouze při podání poptávky.



Obr. 43.: SLS tiskárna Formlabs Fuse 1 (vlevo) se zařízením pro čištění (vpravo) (převzato z [38])

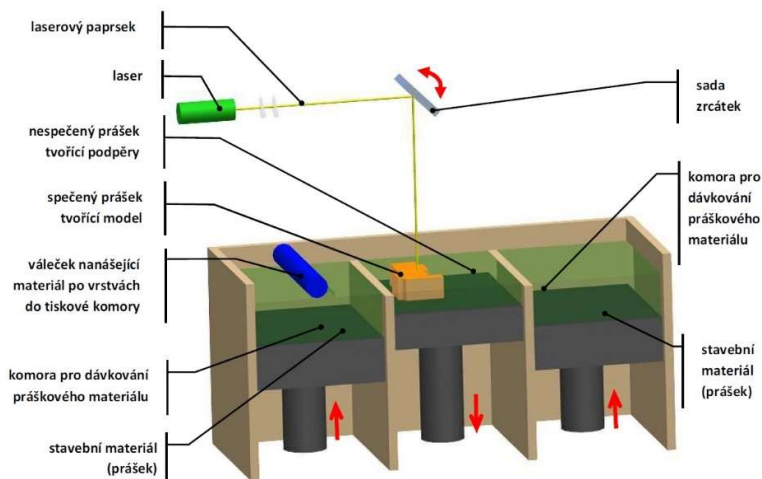


Dalším zástupcem je Sintratec S2 (viz Obr. 41) s výrazně větší tiskovou plochou o rozměrech 160 x 360 milimetrů. Tato tiskárna má také navíc možnost ovládání online, kameru pro online monitorování tisku v reálném čase, více zónové vyhřívání pracovního prostoru a bezkontaktní měření horní vrstvy materiálu. Díky dvěma zásobníkům je urychlený proces tisku a, oproti předchozí tiskárně, je také kratší doba přípravy před tiskem. Cena, stejně jako u předchozí, je pouze na vyžádání při podání objednávky. [43]

## 2.4 Ostatní technologie

**EMB** (*Electronic Beam Melting*) je technologie podobná SLS. Dochází ke spékání, zpravidla titanového, prášku pomocí usměrněného proudu elektronů. Hlavní výhodou je excelentní přesnost a technické vlastnosti vytištěných objektů, ale tato metoda není příliš využívaná kvůli své náročnosti a velmi vysoké ceně tiskáren, neboť proces tisku je nutné provádět ve vakuu. [39] [40]

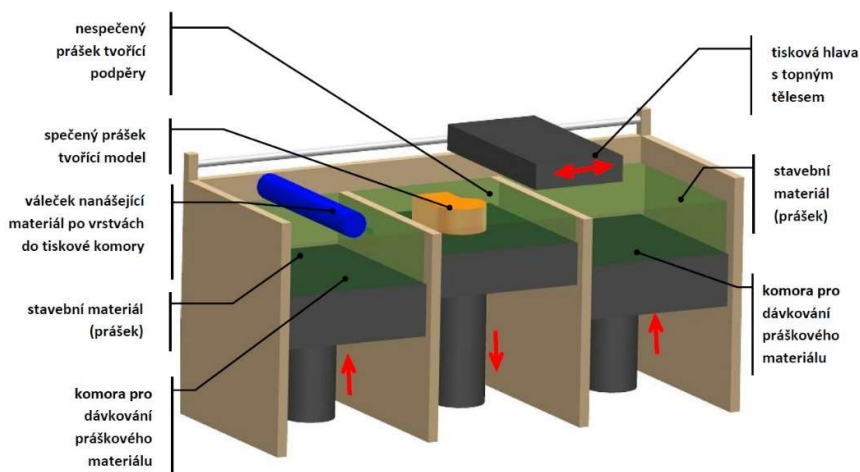
**DMLS** (*Direct Metal Laser Sintering*) je opět technologie velmi blízká SLS. Je založena na identickém principu se zaměřením výhradně na tisk kovů jako například nerezová ocel, titan, bronz nebo také inconel, který má výbornou žáruvzdornost. Výhodou této metody je jednoznačně rozsah použitelných materiálů a, stejně jako u SLS, výroba složitých tvarů bez nutnosti podpor. Výsledný objekt má pak kvalitní povrch s vysokým rozlišením. Nevýhodou je pořizovací cena tiskárny, která se pohybuje v řádech jednotek milionů korun. [6]



Obr. 44.: Princip DMLS technologie (převzato z [6])

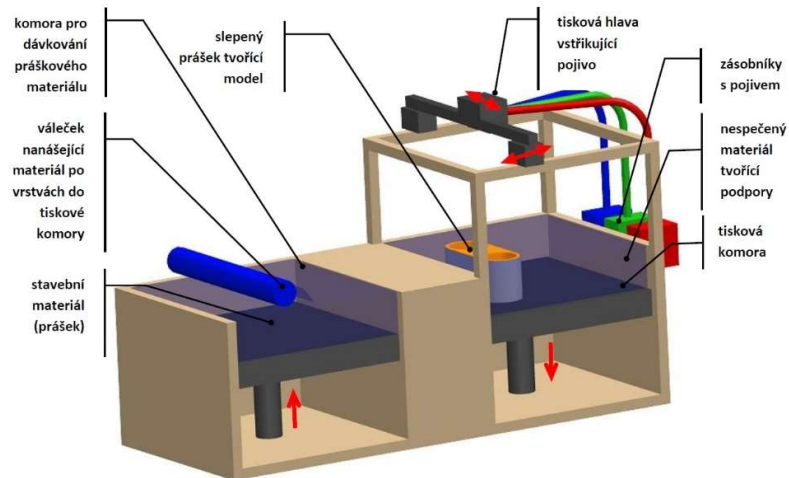
**SHS** (*Selective Heat Sintering*) je relativně nová technologie patentovaná v roce 2002 a jedná se o kombinaci SLS a FDM. Opět je využito prášku nanášeného ve vrstvách, který je

vytvřován tiskovou hlavou s topným tělesem v místech, kde má vzniknout model. Model nepotřebuje tisknout podpěry, protože je podpírán zbytkovým práškem, který je potřeba po dokončení tisku odstranit například stlačeným vzduchem. Nevytvřený prášek je znovu použitelný při další výrobě. Použitými materiály jsou hlavně plasty jako PLA, ABS, PET (potažmo PETG) nebo nylon a další. Pořizovací cena tiskárny je v řádech nižších stovek tisíc korun. [6]



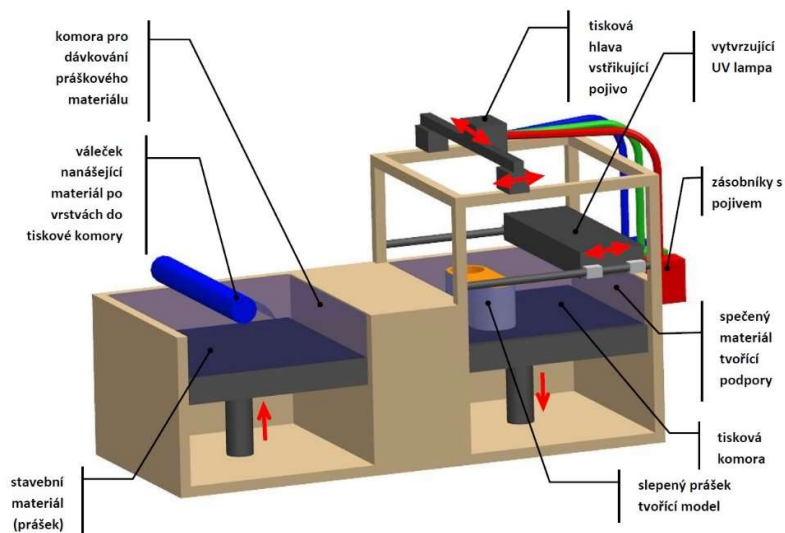
Obr. 45.: Princip SMS technologie (převzato z [6])

**BJ** (*Binder Jetting*) je technologie, kdy k vytváření materiálu dochází chemicky pomocí pojiva. Na tiskovou desku se válečkem nanese tenká vrstva materiálu, na který je následně tiskovou hlavou vstřikováno pojivo. Tisknutý objekt je tedy tvořen slepováním jednotlivých částic prášku. Samotný proces tisku je relativně rychlý. Výběr materiálů je široký, patří mezi ně například keramika, různé kompozitní materiály, hliník nebo nerezová ocel, ale po dokončení je vhodné provést dodatečné povrchové úpravy za účelem zlepšení mechanických vlastností. Pořizovací cena je od stovek tisíců až jednotky milionů korun. [6]



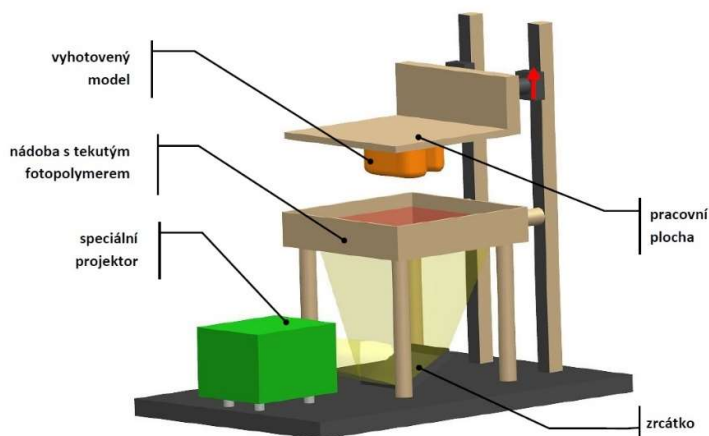
Obr. 46.: Princip BJ technologie (převzato z [6])

**MJP (Multijet Printing)** je technologie, s pomocí které je možné tisknout různé barvy, ale také různé tuhosti jednotlivých vrstev. Opět je na tiskovou desku válečkem nanášen práškový materiál, na který je nanášeno pojivo, a ihned vytvrzován UV světlem. Celý vytištěný model je obalen ve vosku, který slouží jako podpůrný materiál. Tento vosk lze velmi snadno odstranit vložení na pár minut do pece. Povrch výtisku je velmi přesný a kvalitní s dobrými mechanickými vlastnostmi. Pro tuto technologii jsem speciální materiály dělané na míru firmou 3D Systems, která má tuto technologii patentovanou.



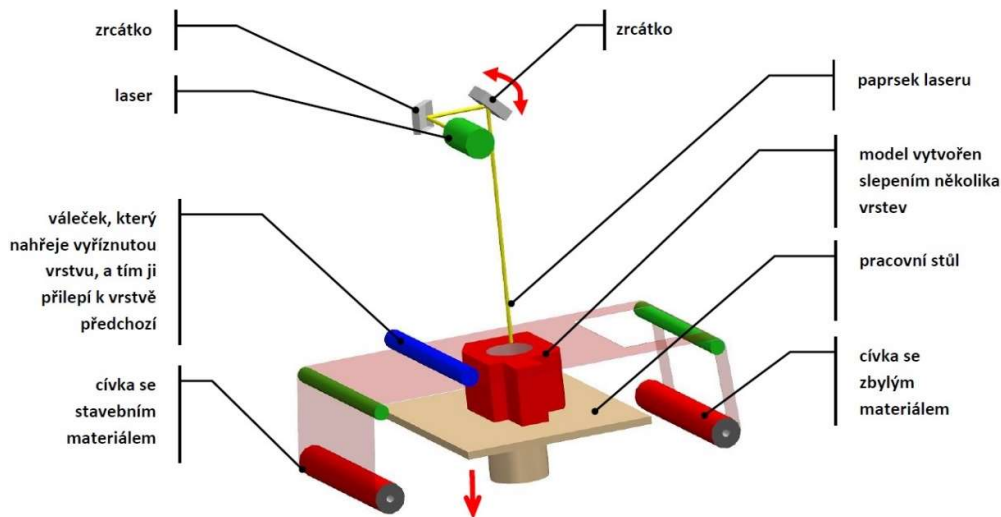
Obr. 47.: Princip MJP technologie (převzato z [6])

**DLP** (*Digital Light Processing*) je novou technologií patentovanou v roce 2012, která využívá princip velmi podobný SLA technologii. To znamená, že UV zářením je vytvrzován tekutý fotopolymer. Rozdíl je v tom, že vytvrzování neprobíhá bod po bodu, ale speciální projektor osvítí celou vrstvu najednou. Díky tomu je tisk výrazně rychlejší a levnější než v případě SLA. Nevýhodou je nutnost dovytvrzení modelu pro zlepšení jeho mechanických vlastností. Výběr materiálů je omezen na fotocitlivé materiály, jako je třeba fotopolymerická pryskyřice. Ceny tiskáren se pohybují v řádech desítek tisíc korun. [6]



Obr. 48.: Princip DLP technologie (převzato z [6])

**LOM** (*Laminated Object Manufacturing*) využívá lepení vrstev na sebe, kdy každá jednotlivá vrstva je vyřezávána z plastu nebo papíru ve formě fólie. Tato fólie se převijí přes pracovní plochu, vyřízne pomocí nože nebo laseru a přilepí. Nevýhodou je velké množství odpadního materiálu, neboť veškerá převinutá fólie, ze které již bylo vyřezáváno, je již nepoužitelná a vyhazuje se. Toto kompenzuje velmi nízká cena materiálu a výsledný kvalitní povrch objektu. Po dokončení tisku je potřeba mechanicky odstranit podpěry. Cena takových tiskáren se pohybuje v desítkách tisíc korun. [6]



Obr. 49.: Princip LOM technologie (převzato z [6])

## 2.5 Porovnání technologií

Vzhledem k různým principům jednotlivých technologií se liší jejich vlastnosti, které výrazně ovlivňují i použité materiály, se kterými pracují, a tím i jejich vhodnost pro různé aplikace. Pro porovnání můžeme technologie rozdělit na práškové a ostatní metody.

### Práškové metody

Mluvíme-li o práškových metodách, máme na mysli SLS, EMB, DMLS, SHS, BJ a MJP. Všechny tyto technologie sdílí stejný princip nanášení prášku na tiskovou desku. Největším rozdílem těchto technologií je použitý materiál společně se způsobem vytváření a spojování, potažmo vytvrzování, vrstev.

SLS zapéká práškový materiál pomocí laseru. Tímto materiálem může být keramika, nylon, ABS a další plasty. Výhodou je levný materiál, přičemž je možné nevyužitý materiál v určitém poměru namíchat s novým a znovu použít. Nevýhodami jsou vyšší pořizovací cena, která je od 500 tisíc korun výše, a horší povrch výtisků.

Oproti tomu dosahuje technologie EMB velmi vysoké přesnosti, která ke spékání prášku, typicky titanového, využívá usměrněného proudu elektronů. Právě díky využití titanu jako tiskového materiálu jsou výtisky velmi dobrých technických vlastností. Toto je vykoupeno vysokou pořizovací cenou a cenou materiálu, který je stejně jako u SLS znovu využitelný.

Technologie DMLS je pomyslným vylepšením EMB, kdy je možné pracovat se širokou škálou kovových materiálů, přičemž je možné vyrábět tvarově složité výtisky. Co se

přesnosti tyče, je stejná jako EMB společně s vysokým rozlišením. Nevýhodou je zde opětně velmi vysoká pořizovací cena, které je více než 2 miliony korun.

SHS technologie představuje alternativu k SLS s rozdílem, že vytvrzování je prováděno hlavou s topným tělesem místo laseru. Výhody jsou stejné jako u SLS rozšířené o lehce nižší pořizovací cenu, která je snížena právě absencí laseru a jeho zaměřování.

BJ představuje technologii, která využívá chemického spojování pomocí pojiva. To jí dává výhodu v podobě širokého výběru materiálů, například různé kompozity, a také vysokou rychlost tisku. Nevýhodou představuje nutnost úpravy povrchu výtisku za cílem zlepšení jeho mechanických vlastností. Ceny se pohybují u nejlevnějších tiskáren od 100 tisíc korun až k jednotkám milionů korun.

Obrovskou výhodou MJP technologie je možnosti tisknout různé barvy a tuhosti vrstev, čímž žádná jiná technologie nedisponuje. Povrch výtisku je přesný a kvalitní s dobrými mechanickými vlastnostmi. Nevýhody není možné přesně určit, neboť materiály jsou dělané pouze na míru firmou 3D Systems, která má tuto technologii patentovanou.

Tabulka níže shrnuje vlastnosti, výhody, nevýhody a použitelné materiály všech zmíněných technologií.

Tabulka 2.: Shrnutí materiálů a vlastností 3D technologií na práškovém principu [6] [39] [40]

Práškové metody						
	SLS	EMB	DMLS	SHS	BJ	MJP
<b>Materiály</b>	Keramika, nylon, ABS, PET a další plasty	Titan	Kov (nerezová ocel, titan a další)	PLA, ABS, PET, Nylon a další plasty	Keramika, hliník, nerez. ocel, kompozity	Pouze na míru od výrobce
<b>Výhody</b>	Levný materiál, znovu použitelnost nevyužitého prášku	Vysoká přesnost, vynikající mechanické vlastnosti, znovu použitelnost nevyužitého prášku	Vhodné pro složité tvary, vysoce kvalitní povrch	Složité tvary, nízká pořizovací cena, použitelnost nevyužitého prášku	Výběr materiálů, barevnost a rychlost tisku	Kvalitní povrch, přesnost, výsledné mechanické vlastnosti, rychlost tisku
<b>Nevýhody</b>	Vyšší pořizovací cena, nedokonalý povrch	Vysoká pořizovací cena, nákladný tisk	Vysoká pořizovací cena	Nutnost odstraňovat nepoužitý materiál	Nutné úpravy povrchu k vylepšení mech. vlast.	-
<b>Výška vrstvy</b>	0,06 mm	0,02 mm	0,02 mm	0,1 mm	0,09 mm	0,016 mm
<b>Cena od [Kč]</b>	440.000	1.500.000	2.300.000	250.000	100.000	1.000.000

### Ostatní metody

FDM technologie představuje nejlevnější a uživatelsky nejméně náročnou variantu 3D tisku, čímž je vhodná pro začátečníky. Výsledné modely jsou pevné, ale s hrubou strukturou, přičemž minimální šířka je dána průměrem trysky. Výhodou je také možnost vícebarevného a vícemateriálového tisku realizovaná pomocí druhého zařízení.

Technologie SLA je omezena pouze na fotocitlivé materiály, ale za to dosahuje výborné přesnosti a to včetně tisku drobných detailů. Nevýhodou je měkkost výsledného modelu, který musí být dovytvrzen. Cena 3D tiskáren s touto technologií začíná již na 40.000 Kč.

Alternativou k SLA je DLP, které dosahuje identických vlastností. Rozdíl je pouze ve vytváření vrstev, kdy materiál není vytvářen po bodech, jako je tomu u SLA, ale celá vrstva najednou, což značně zkracuje dobu tisku. Oproti SLA je DLP lehce dražší, kdy nejlevnější tiskárny se pohybují kolem 70 tisíc korun.

LOM je zcela odlišnou technologií od všech ostatních. Materiál je ve formě fólie, která se na sebe lepí do vrstev. Výsledkem je velmi dobrý povrch výtisku. Nespornou výhodou je také extrémně levný materiál i přes velké množství odpadního materiálu. Pořizovací cena 3D tiskárny je také relativně nízká. Ceny se pohybují již od 50.000 korun.

Tabulka 3.: Shrnutí materiálů a vlastností 3D technologií na ostatních principech [6]

Ostatní metody				
	<b>FDM</b>	<b>SLA</b>	<b>DLP</b>	<b>LOM</b>
<b>Materiály</b>	Termoplasty (PLA, ABS, atd.), filamenty s příměsí (bronzu, uhlíkového vlákna, atd.)	Fotopolymery (např. fotopolymerická pryskyřice)	Fotopolymery (např. fotopolymerická pryskyřice)	Papír nebo plast ve formě fólie na roli
<b>Výhody</b>	Málo odpadu, vysoká pevnost modelu	Výborná přesnost, tvorba i velmi drobných těles	Rychlost a přesnost, levná výroba	Nejlevnější materiál, velmi dobrý povrch
<b>Nevýhody</b>	Hrubá struktura	Dovytvřování modelu, omezení na fotopolymery	Dovytvřování modelu, omezení na fotopolymery	Velké množství odpadního materiálu
<b>Výška vrstvy</b>	0,05 mm	0,01 mm	0,01 mm	0,1 mm
<b>Cena od [Kč]</b>	4.000	40.000	cca 70.000	Cca 50.000

### 2.5.1 Porovnání FDM a SLA technologie na vlastním modelu

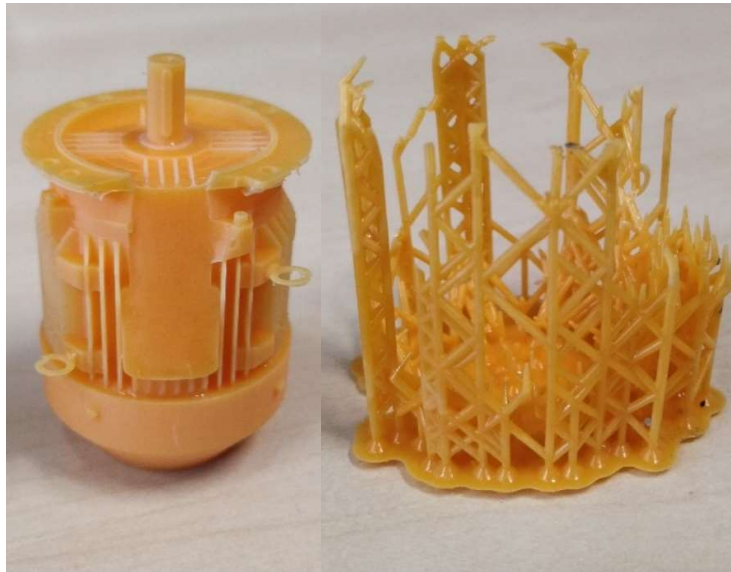
K porovnání technologií byl použit zmenšený, 5 centimetrů dlouhý, model asynchronního motoru vytisknutý na 3D tiskárnách Prusa i3 MK3S+ (FDM) a Prusa SL1S (SLA). Z tohoto porovnání vyplývají výhody a nevýhody obou technologií.

Na Obr. 50. je na první pohled vidět rozdíl v detailu a přesnosti tisku, kde SLA technologie exceluje. Nejvíce zřetelné je to na čele motoru a žebrování. Nevýhodou je složitější tisk, který musel nakonec proběhnout bez tisku podpěr a v důsledku toho se nevytiskla svorkovnice motoru (viz. Obr. 51.). Na druhou stranu výhodou FDM technologie je jednoduchost a tisk z více barev.



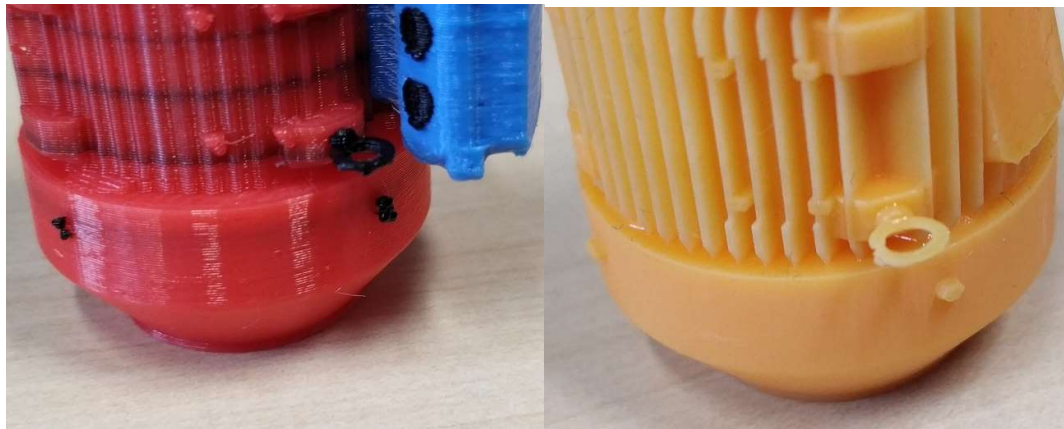
Obr. 50.: Porovnávací model asynchronního motoru z FDM (vlevo) a SLA (vpravo) 3D tiskárny





Obr. 51.: Následek tisku bez podpěr (vlevo) a podpěry z předchozího, neúspěšného tisku (vpravo)

Na Obr. 52. je vidět rozdíl v tisku malých detailů jako je závěsné oko motoru a šroubů, které jsou v případě FDM tisku v podobě černé tečky, naopak v případě tisku SLA technologií je dobře vidět šestihorná hlava šroubu i navzdory velmi malým rozměrům.



Obr. 52.: Porovnání tisku detailu oka a šroubů

Na posledním obrázku je porovnání tisku detailu čela motorů, kde u motoru vytisknutého FDM technologií jsou žlutá žebra jen obtížně viditelná, stejně tak výstupek na hřídeli. Naopak při tisku SLA technologií jsou tyto prvky zřetelně viditelné. Opět je zde také vidět detail tisku šroubů a žebrování po stranách motoru. Můžeme si také všimnout rozlišení vrstvy na (černých) krajích čela motoru, kde, a nejenom tam, dochází v případě FDM technologie k třepení materiálu.



Obr. 53.: Porovnání detailu tisku čela motorů

K porovnání pomocí technologií měl ještě posloužit stejný motor vytisknutý technologií SLS, ale na 3D tiskárně s touto technologií došlo k poruše a tak tento tisk nemohl být uskutečněn.

### 3 Závěr

Práce podrobně popisuje tři základní principy 3D tisku, to znamená FDM, SLA a SLS, jejich konstrukci a používané materiály. Dále popisuje odvozené technologie 3D tisku jako je například DLMS, LOM, BJ a další. Tyto technologie porovnává z hlediska jejich výhod, nevýhod, množství využitelných materiálů a pořizovací ceny. K tomuto porovnání posloužil i model asynchronního motoru vytisknutý na dvou tiskárnách základního principu nacházejících se přímo na FEL. Konkrétně se jedná o tiskárny Prusa i3 MK3S+ (FDM) a Prusa SL1S (SLA). Z tohoto porovnání přímo plynou výhody a nevýhody jednotlivých technologií.

Práce také stručně popisuje historii, současné využití této technologie v různých odvětvích, například ve zdravotnictví nebo stavebním průmyslu, a možné budoucí využití v budoucnosti a jak by mohli ovlivnit, případně transformovat, tato odvětví.

Kalibrace mě přidělené sestavy, tvořenou 3D tiskárnou Prusa i3 MK3S+ a zařízením pro vícemateriálový tisk v podobě Mosaic Palette 2S Pro, byla ztížena některými nedostatky a nevhodnými technickými řešení samotného Mosaic Palette 2S Pro, které způsobovali zasekávání materiálu v konkrétních místech. Toto zapříčinilo také zničení jednoho senzoru, který musel být vyměněn. Software Mosaicu Palette 2S Pro občasně nespínal krokové motory při zavádění materiálu. Tento problém se vyskytoval pouze při spouštění tisku a vyřešil ho jednoduchý restart zařízení. Další častý problém může způsobit uživatel sám, kdy při zavádění připraveného filamentu je ho protlačeno tiskovou hlavou velké množství, a tím spotřebováno více materiálu ještě před začátkem tisku. To zapříčiní, že dojde k posunu spojů, následující barva se dostane do trysky dříve a na výtisku budou nesprávné barvy, čímž je tisk znehodnocen. Předmětem kalibrace bylo sladění kalibračních bodů zařízení pro vícemateriálový tisk a 3D tiskárny společně s kalibrací interního měřicího systému. Tato kalibrace proběhla úspěšně a návod k použití této zkalibrované soustavy se nachází v příloze A.

Výhodami soustavy je jednoduchost rozhraní obou zařízení, především pak Mosaic Palette 2S Pro, který uživatele celým procesem tisku provází a instruuje ho, jak postupovat. Další výhodou je jednoduchost použití tiskárny, která si vždy automaticky provede kalibraci osy Z, což výrazně ulehčuje práci. Na druhou stranu je četnost výskytu menších poruch, na straně Mosaicu Palette vcelku vysoká a je potřeba často odstraňovat zaseknutý filament. Druhou nevýhodou, která se pevně s vícemateriálovým tiskem pojí, je velké množství odpadního materiálu a značně prodloužená doba tisku i více než dvojnásobně, dle počtu

spojů. Omezením pro tisk je také minimální šíře čáry, která je dána průměrem trysky, v tomto případě je to 0,4 milimetru, což značně zhoršuje schopnost tisknout malé detaily.

Propojení 3D tiskárny a zařízení pro vícemateriálový tisk je provedeno pomocí teflonové trubičky vedoucí skrze přesně vyvrtanou díru v policice a to z důvodu, aby v budoucnu bylo možné zastavení tiskárny plexisklem a následně prostor mohl být vyhříván, což zvýší kvalitu výtisků z obtížněji tisknutelných materiálů. Pro realizaci tohoto řešení bude také zapotřebí přemístění zdroje tiskárny mimo vyhřívanou komoru.

Aktuálně je sestava připravena na tisk více barvami jednoho materiálu. Pro tisk různých materiálů je třeba odzkoušet jejich spojování, vhodné tiskové teploty a tyto údaje zanechat do webového sliceru. Dalším budoucím vylepšením by mohlo také být zřízení online tisku, který by mohl být realizovaný pomocí CANVAS Hubu komunikujícím prostřednictvím Wi-Fi sítě, následně pomocí USB kabelů s 3D tiskárnou, případně se zařízením pro vícemateriálový tisk. Toto v současnosti není možné, neboť se celá tato sestava nachází v Makerspacu na FEL, kde je izolovaná síť bez vlastního Wi-Fi routeru a tudíž nelze realizovat komunikaci mezi počítačem a CANVAS Hubem.

## Zdroje

- [1] 3D-printed house in Germany: a new way of building. | Gira. [online]. Poslední změna 2022. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.gira.com/uk/en/inspirations/references/3d-house-germany#The%20Gira%20E3%20in%20the%203D%20printed%20house>
- [2] Vehicles that Express the Cutting-Edge of the Human Mind | Czinger. [online]. Poslední změna 2021. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://czinger.com>
- [3] 3D-printed organs could save lives by addressing the transplant shortage. | The Conversation. [online]. Poslední změna: 06.04.2021. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://theconversation.com/3d-printed-organs-could-save-lives-by-addressing-the-transplant-shortage-132491>
- [4] Orgánů pro transplantace stále není dost. Pomohou 3D tiskárny? | Jaroslav Petr, VTM.cz – Věda, technika, zajímavosti, budoucnost [online]. Poslední změna: 08.08.2019. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/organu-pro-transplantace-stale-neni-dost-pomohou-3d-tiskarny/sc-870-a-199725/default.aspx>
- [5] "World's first" 3D printed fiberglass boat to debut at Genoa Boat Show 2020 - 3D Printing Industry. 3D Printing Industry-The Authority on 3D Printing & Additive Manufacturing [online]. Poslední změna 29.09.2020. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/worlds-first-3d-printed-fiberglass-boat-to-debut-at-genoa-boat-show-2020-176547/>
- [6] Přehled technologií 3D tisku | dkmp Nový Jičín, Ostrava. Kovovýroba, 3D tisk, konstrukce, vývoj | dkmp Nový Jičín, Ostrava [online]. Poslední změna 09.01.2018. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [7] Historie 3D tisku | ČVUT Fakulta strojní [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/historie-3d-tisk/>
- [8] 3D tisk – Wikipedie [online]. Poslední změna 21.4.2022. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/3D\\_tisk#Historie](https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk#Historie)
- [9] Konstrukce 3D tiskárny na Polymer | Bc. Pavel Mach, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní [online]. Poslední úprava 2014. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149509/V\\_11514\\_S.pdf?sequence=-1](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149509/V_11514_S.pdf?sequence=-1)

- [10] What Materials Are Used in 3D Printing? | Jeff Yoders, Redshift Autodesk [online]. Poslední změna 15.12.2021. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://redshift.autodesk.com/what-materials-are-used-in-3d-printing/>
- [11] 3D Printing in Aviation | EOS GmbH. [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/aerospace-3d-printing/airbus-case-study>
- [12] How is 3D printing used in the automotive industry | cprime studios. [online]. Poslední změna 2021. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://cprimestudios.com/blog/how-3d-printing-used-automotive-industry#impact%20of%203d%20printing>
- [13] Real Examples of 3D Printing in the Automotive Industry | Stephanie Hendrixson, Modern Machine Shop. [online]. Poslední změna 18.05.2021. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/real-examples-of-3d-printing-in-the-automotive-industry>
- [14] The History of 3D Printing: From the 80s to Today. | Sculpteo. [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [15] The Next Generation of 3D Printed Surgical Instruments | Formlabs.com. [online]. Poslední změna 31.08.2021. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-print-surgical-instruments/>
- [16] Mmuse – New Touchscreen Chocolate 3D Printer | 3D Printers Online Store [online]. Poslední změna 2022. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.3dprintersonlinestore.com/mmuse-touch-screen-chocolate-3d-printer>
- [17] 3D Printed Food: All You Need to Know in 2022 | Lucas Carolo, All3DP. [online]. Poslední změna 22.11.2021. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printed-food-3d-printing-food/>
- [18] Revolution: 3D printed heart with human tissue. | Kat Plewa, Sculpteo.com. [online]. Poslední změna 29.04.2019. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2019/04/29/groundbreaking-news-3d-printed-heart-with-human-tissue/>
- [19] 3D-printing in construction: where are we now? | Riccardo Bianchini, Inexhibit [online]. Poslední změna 15.09.2021. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.inexhibit.com/case-studies/3d-printing-in-construction-where-are-we-now/>

- [20] Recent Projects | SQ4D Inc.[online]. Poslední změna 2022. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.sq4d.com/projects/>
- [21] FDM (Fused deposition modeling) | cotu.cz. 3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/134/fdm-fused-deposition-modeling>
- [22] Vše o tryskách s různým průměrem | Mikolas Zuza, josefprusa.cz [online]. Poslední změna 29.05.2018. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem/>
- [23] Stavba 3D tiskárny | Martin Hanzlíček, Vysoké učení technické v Brně. [online]. Poslední změna 2019. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=191946](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191946)
- [24] What are the parts that make up a hotend, and what do they do? | 3D Printing Stack Exchange [online]. Poslední změna 2011. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/1519/what-are-the-parts-that-make-up-a-hotend-and-what-do-they-do>
- [25] E-shop Prusa 3D printers. [online]. Poslední změna 2022. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com>
- [26] SLA | ČVUT Fakulta strojní. [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologiei-3dtisk/sla-3dtisk/>
- [27] Materiály pro tisk technologií FDM | 3dtisk-online.cz [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-prehled-materialu-pro-3d/>
- [28] E-shop 3DJake Česká republika. [online]. Poslední změna 2022. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz>
- [29] E-shop 3Dwiser. [online]. Poslední změna 2022. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/3d-tiskarny/>
- [30] Are Dual Extruders Worth It? | Charlotte, tobuya3dprinter.com [online]. Poslední změna 29.07.2017. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://tobuya3dprinter.com/dual-extruders-worth/>
- [31] E-shop Mosaic. [online]. Poslední změna 2022. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.mosaicmfg.com/>

- [32] Technologie 3D tisku | NA3D.cz. [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z:  
<https://www.na3d.cz/blog/technologie-3d-tisku>
- [33] What is SLA 3D printing? | Alkaios Bournias Varotsis, hubs.com. [online].  
[Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [34] Stereolithography (SLA) 3D Printing Guide | Formlabs.com [online]. [Cit. 19.5.2022].  
Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [35] SLS (Selective Laser Sintering) | cotu.cz [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z:  
<https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering>
- [36] E-ship Sinterit [online]. Poslední změna 2022 [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z:  
<https://sinterit.com>
- [37] Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing | Formlabs.com [online].  
[Cit. 19.5.2022]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [38] Formlabs Fuse 1 | 3Dwiser.com [online]. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z:  
<https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/termoplasty-sls/formlabs-fuse-1/>
- [39] Informace o technologiích 3D tisku. | 4ISP spol. s.r.o. [online]. [Cit. 19.5.2022].  
Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [40] Electron Beam Melting (EBM) - 3D Printing Simply Explained. | Leo GHregurić,  
All3DP. [online]. Poslední změna 16.05.2019. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z:  
<https://all3dp.com/2/electron-beam-melting-ebm-3d-printing-simply-explained/>
- [41] Biomimicry Desing: Mother's Nature's Influence on Products and Design. |  
Ystudios.com. [online]. Poslední změna 20.02.2020. [Cit 19.5.2022]. Dostupné z:  
<https://ystudios.com/insights-passion/biomimicry-design>
- [42] Biomimicry: engineering in nature's style | Airbus.com. [online]. Poslední změna  
22.01.2018. [Cit. 19.5.2022]. Dostupné z:  
<https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2018-01-biomimicry-engineering-in-natures-style>
- [43] Sintratec S2 | Sintratec.com [online]. Poslední změna 2022. [Cit. 19.5.2022].  
Dostupné z: <https://sintratec.com/product/sintratec-s2/>



## **Seznam příloh**

Příloha A: Návod k používání zkalibrované soustavy pro vícebarevný/vícemateriálový tisk tvořené 3D tiskárnou Prusa i3 MK3S+ a Mosaic Palette 2S Pro nacházející se v Makerspacu na FEL