

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2018**

**MATĚJ  
MYSLIVEČEK**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Myslivoček** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **437219**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Koncepční návrh práškové 3D tiskárny**

Název bakalářské práce anglicky:

**Concept design - 3D printer - powder bed**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je provést koncepční návrh práškové 3D tiskárny. Projekt by měl ukázat, zda je nebo není možné tiskárnu realizovat v 'domácích' podmínkách. Tiskový materiál bude pravděpodobně práškové PLA.

Úkoly:

- 1) Rešerše technologie, konstrukce a parametrů zařízení (výkon laseru, dostupnost prášku, mechanika, teploty v zařízení)
- 2) Provedení a vyhodnocení experimentů s práškem na laserové řezačce.
- 3) Koncepтуální návrh tiskárny včetně specifikace hlavních konstrukčních dílů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] C. Barnatt, 3D Printing Third Edition, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.
- [2] J. Montagu, Galvanometric and Resonant Scanners, v Handbook of Optical and Laser scanning, CRC Press, 2012.
- [3] W. M. Steen, Laser Material Processing, Springer-Verlag London Limited, 2003.
- [4] S. F. Sagan, Optical Systems for Laser Scanners, v Handbook of Optical and Laser scanning, CRC Press, 2012.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


**Ing. Zdeněk Novák, U12110.1**

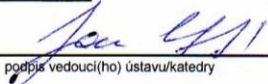
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

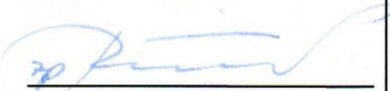
Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.06.2018**

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

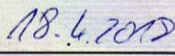
  
Ing. Zdeněk Novák  
podpis vedoucí(ho) práce

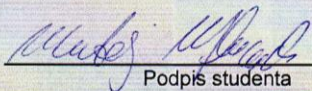
  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne 15. června 2018

Podpis

## Abstrakt

V teoretické části práce analyzuji funkci a konstrukci průmyslové 3D SLS tiskárny. Podrobněji jsou popsány funkce dílčích komponentů. Srovnávám dva odlišné přístupy ke konstrukci strojů a na základě jednoho z nich navrhuji možné uspořádání pro stavbu tiskárny svépomocí. Na základě cenového hlediska je sestaven zkrácený seznam potřebných součástí, jejich ceny a parametrů a toho, kde je pořídit. Práce se dále zabývá vlastnostmi materiálů vhodných k SLS tisku a bezpečností při stavbě a provozu. Experimentální část se věnuje zkušebnímu spečení vzorků PA12 a jejich analýze.

## Klíčová slova

SLS, Selective Laser Sintering, 3D tisk, 3D tiskárna, CO2 laser, PA12

## Abstract

In the theoretical part, function and construction of an industrial 3D SLS printer are analysed. Function of several components is described in a detailed way. A comparison of two different approaches to the design is made and based on one of them a possible solution for DIY assembly is proposed. A shortened bill of materials is formed, considering the price and parameters of components and including the information where to obtain them. The thesis further analyses the properties of plastic materials suitable for SLS printing and the safety during the assembly and operation. The experimental part is dedicated to a sintering test of PA12 powder. The results of the test are analysed afterwards.

## Keywords

SLS, Selective Laser Sintering, 3D printing, 3D Printer, CO2 laser, PA12

# Poděkování

Děkuji tímto svému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Novákovi za jeho čas a ochotu ke konzultacím. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D děkuji za úvodní zasvěcení do řešené problematiky. Bc. Petru Vaňkovi Dis. ze společnosti Hacker Model Production a.s., děkuji za odborné konzultace a poskytnutí tiskového materiálu.

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. ÚVOD.....</b>  | <b>9</b>  |
| 1.1. MOTIVACE.....   | 9         |
| 1.2. VÝCHODISKA.....   | 9         |
| <b>2. PRINCIPY SLS TISKÁRNY A JEJÍ KONSTRUKCE .....</b>                              | <b>11</b> |
| 2.1. PRINCIP FUNKCE.....   | 11        |
| 2.2. SROVNÁNÍ SLS A FFF TISKÁRNY.....  | 12        |
| 2.2.1. Přednosti SLS tiskáren:.....  | 14        |
| 2.2.2. Přednosti FFF tiskáren.....   | 14        |
| 2.3. KONKRÉTNÍ PŘÍKLAD SLS TISKÁRNY.....   | 14        |
| 2.3.1. CO <sub>2</sub> Laser.....  | 15        |
| 2.3.2. Skenovací jednotka (Zrcátka, F-Theta objektiv).....                           | 16        |
| 2.3.2.1. Galvanometry.....   | 16        |
| 2.3.2.2. Objektiv F – Theta.....   | 17        |
| 2.3.3. Tisková komora.....   | 18        |
| 2.3.4. Mechanismus nanášení vrstvy.....  | 19        |
| 2.3.5. Post-processing.....  | 19        |
| 2.3.6. Shrnutí.....  | 20        |
| 2.4. OPENSLS A JEHO KONSTRUKCE.....  | 21        |
| 2.4.1. Laser a mechanismus posuvu jeho optiky.....                                   | 22        |
| <b>3. NÁVRH NA KONSTRUKCI SLS TISKÁRNY .....</b>                                     | <b>23</b> |
| 3.1. POROVNÁNÍ OBOU PŘÍSTUPŮ F-THETA A X-Y.....                                      | 23        |
| 3.2. NÁVRH KONSTRUKCE F-THETA.....   | 24        |
| 3.2.1. Úvaha nad zvolenými součástmi.....  | 24        |
| 3.2.2. Elektronická výbava stroje.....   | 26        |
| 3.2.3. Práškový modul.....   | 26        |
| 3.2.3.1. Návrh krokového motoru a pohybového šroub pod tiskovou plochou (Osa Z)..... | 26        |
| 3.2.3.2. Stanovení středního průměru závitu.....                                     | 27        |
| 3.2.4. Shrnutí vybraných konstrukčních výzev u F-Theta.....                          | 28        |
| 3.2.5. Nákupní seznam.....   | 28        |
| 3.3. KOMENTÁŘ KE KONSTRUKCI X-Y.....   | 29        |
| <b>4. SINTROVÁNÍ A POUŽITÉ MATERIÁLY.....</b>  | <b>30</b> |
| 4.1. SINTROVÁNÍ (SPÉKÁNÍ).....   | 30        |
| 4.2. MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI.....  | 30        |
| 4.2.1. Tepelné vlastnosti.....   | 30        |
| 4.2.2. Optické vlastnosti.....   | 31        |
| 4.2.3. Viskozita a povrchové napětí.....   | 31        |
| 4.2.4. Vlastnosti zrna.....  | 31        |
| 4.2.5. Prášek a jeho vlastnosti.....   | 31        |
| 4.3. DALŠÍ VHODNÉ MATERIÁLY K SLS ZPRACOVÁNÍ.....                                    | 31        |
| 4.4. PA A JEHO VLASTNOSTI.....   | 32        |
| <b>5. BEZPEČNOST.....</b>  | <b>33</b> |
| 5.1. PROVOZ LASERU.....  | 33        |
| 5.1.1. Záření laseru.....  | 33        |
| 5.1.2. Napětí na kontaktech laseru.....  | 33        |
| 5.2. ELEKTRICKÁ BEZPEČNOST.....  | 33        |
| 5.3. RIZIKA POUŽITÍ INERTNÍ ATMOSFÉRY.....   | 33        |
| 5.4. RIZIKO POPÁLENÍ.....  | 34        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.5. MANIPULACE S PRÁŠKEM .....                               | 34        |
| <b>6. EXPERIMENT .....</b>                                    | <b>35</b> |
| 6.1. TEST SPEČENÍ PLASTOVÉHO PRÁŠKU PA2200.....               | 35        |
| 6.1.1. <i>Stanovení parametrů experimentu</i> .....           | 35        |
| 6.1.1.1. Tloušťka vrstvy a vlivy použité tiskové plochy ..... | 35        |
| 6.1.1.2. Vliv výkonu laseru a rychlosti posuvu .....          | 37        |
| 6.1.2. <i>Provedení experimentu</i> .....                     | 37        |
| 6.1.3. <i>Výsledky experimentu</i> .....                      | 39        |
| 6.1.3.1. Plexisklo – PMMA.....                                | 39        |
| 6.1.3.2. Sklo.....  | 39        |
| 6.1.3.3. Hliník .....   | 40        |
| 6.1.4. <i>Závěry z experimentu</i> .....                      | 41        |
| <b>7. ZÁVĚR.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>8. SEZNAM ZDROJŮ .....</b>                                 | <b>44</b> |
| <b>9. SEZNAM PŘÍLOH .....</b>                                 | <b>46</b> |

## Slovník pojmů

Pozn.: Krom některých termínů obsažených v českém jazyce zde vysvětluji také slova a zkratky z anglického jazyka. Abych se vyvaroval jejich nepřesného překladu a ztráty povědomí „o čem se to vlastně bavíme“, používám je v původním znění, vždy však s dostatečným vysvětlením ve Slovníku pojmů, konkrétní větě či v poznámce pod čarou.

**AM** – Additive Manufacturing – aditivní výroba, v kontrastu s obvyklejší výrobou úběrem materiálu.

**F-Theta** – konstrukce objektivu s plochou zaostřovací rovinou. Využívá se u skenovacích systémů, obvykle ve spojení s → galvanometry.

**Galvanometr** – mj. měřič proudu (ampérmetr), stejného principu využívají zařízení zmíněná v této práci k rychlému natáčení zrcátek, jež jsou umístěna na hřídelích.

**Hot-end** – část FFF (FDM) strojů. Zde probíhá natavení plastového drátu, který je tryskou položen na tiskovou plochu.

**Open-source** – software/hardware s otevřeným designem. Ten je volně šiřitelný, kopírovatelný a upravovatelný. Obvykle okolo něj vzniká komunita nadšenců, kteří produkt dále upravují a vylepšují. Typickou ukázkou open-source hardwaru je projekt → RepRap 3D tiskáren.

**PSD** – Particle-size distribution – Statistické rozdělení velikostí zrn v prášku.

**RepRap** - Replicating Rapid Prototyper (zařízení schopné „sebezkopírování“ a rychlé tvorby prototypů).

## Přehled vybraných metod 3D tisku

**DSLM** – Direct Metal Laser Sintering – Velmi podobná technologie jako → SLS, v tomto případě s využitím kovového prášku.

**MJF** – Multi Jet Fusion – technologie spékání plastového prášku podobná SLS. Výběrové působení tepla díky použití čínidel vstříkovaných do plastu. Rychlejší nežli SLS.

**FDM** – Fused Deposition Modeling – původně patentovaná technologie, průmyslové využití, stejný princip jako → FFF.

**FFF** – Fused Filament Fabrication – 3D tisk tavením drátu z termoplastu v trysce, kladení materiálu po vrstvách na tiskovou plochu. Zpopularizováno s rozvojem RepRap komunity.

**SLA** – Stereolithography – Stereolitografie – Vytvrzování pryskyřice pomocí světelného záření.

**SLS** – Selective Laser Sintering – Laserové sintrování (spékání) plastového prášku po vrstvách.



# 1. Úvod

## 1.1. Motivace

Je tomu více jak šest měsíců od doby, kdy jsem si domů pořídil 3D FFF tiskárnu. Troufám si tvrdit, že to představuje jedno z nejdůležitějších rozhodnutí, které jsem doposud vykonal. Otevřela se mi tím budoucnost. Budoucnost, kdy bude běžné si vyrobit téměř jakýkoli předmět, ať už funkční či estetické hodnoty, rychle a levně z domova. Společnost zatím do takové fáze nedospěla: tiskáren existuje stále relativně málo a jsou nedokonalé, internetové repositáře modelů nejsou ucelené a tištěné výrobky prozatím nevykazují takové materiálové vlastnosti, jakými disponuje konvenční výroba, která navíc ve většině aplikací bývá levnější.

Dovolím si nyní hledat analogii s dneškem v době před 80 lety: „*Na Světové výstavě v New Yorku roku 1939 byly představeny první exempláře televizoru. Tyto přístroje stály mezi 200 a 600 dolary (tedy podobně jako osobní automobil) a měly poměrně neostrou pětipalcovou černobílou obrazovku. Většina z návštěvníků výstavy označila televize za módní výstřelek, který se nikdy neuchytí. Však kdo by také chtěl trávit značnou část svého času před malou blikající obrazovkou?*“ [1, p. 6]

Dovedl si tenkrát někdo představit, jak budou televizory roku 2018 vypadat? Jaké různé pokročilé technologie se během let vývoje objeví a že třeba proběhne digitální revoluce? Podobně lze uvažovat o 3D tiskárnách a jejich vývoji.

Myslím si, že 3D tiskárna představuje skvělou ukázkou soudobého inženýrství. V jednom stroji se snoubí požadavky na pevnou a odolnou konstrukci bez vibrací, na elektricko-elektronickou výbavu, která zajistí jak bezpečnost, tak přesnost, opakovatelnost a spolehlivost výroby, na software (*firmware, slicer*), jenž dokáže provázat jednotlivé komponenty a přeložit požadavky uživatele do strojového kódu, a na chemické (materiálové) inženýrství, bez něhož se při výrobě plastů (a jiných materiálů) nelze obejít. Díky poměrně nízké komplexitě celého stroje, tedy alespoň v případě FFF zařízení, lze snadno takříkajíc sedět na čtyřech židlích a poznat základy každého z oborů.

Proto, v návaznosti na výše zmíněné a z onoho pocitu, že se v blízkém budoucnu dočkáme značného rozvoje 3D tisku, jsem jako svou bakalářskou práci zvolil „Koncepční návrh práškové 3D tiskárny“.

## 1.2. Východiska

Pod pojmem prášková tiskárna (v mém případě SLS) je třeba si představit značně odlišnou technologii než FFF (více o konstrukci v dalších kapitolách). Oproti dnes již poměrně rozšířeným FFF tiskárnám se SLS stroje uplatňují prakticky pouze v průmyslových aplikacích; v

podstatě neexistuje trh cenově dostupných SLS tiskáren pro koncové zákazníky.<sup>1</sup> Jejich cena je relativně vysoká, a ač uplynuly čtyři roky od vypršení patentu [2] v roce 2014, pořizovací náklady neklesly na úroveň FFF technologie. Lze očekávat další zlevňování? Pravděpodobně ano, ovšem velkým argumentem proti je použití komplikovanější, a tedy obecně dražší, technologie. Navíc vyšší složitost celého zařízení může odrazovat od amatérských experimentů.

Spolu s absencí SLS modelů pro běžné zákazníky neexistuje (až několik samostatných prací, které jsou výjimkami) ani komunita nadšenců podobná RepRap, tedy open-source projektu, jenž vzniknul zásluhou Adriana Bowyer roku 2005 [3] a který zpopularizoval FFF tiskárny.

Položím si nyní otázku, která se stane východiskem celé této práce: lze SLS tiskárnu sestavit z běžně dostupných či vyrobitelných komponentů a úspěšně provozovat v domácích podmínkách?



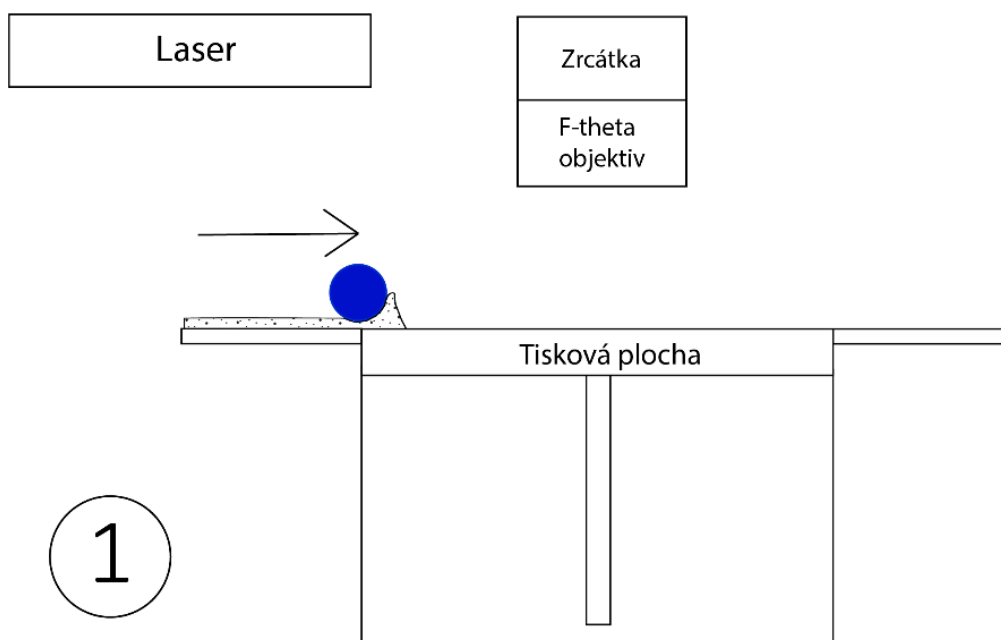
Obr. 1 – Komerční prášková SLS tiskárna Sintratec S1. Disponuje tiskovým prostorem 130 x 130 x 180 mm. Je zde využit diodový laser o výkonu několika wattů. Cena se pohybuje okolo 9000 €.

<sup>1</sup> Pouze dvě společnosti (Sintratec, Sinterit) vyrábějí cenově nejdostupnější SLS tiskárny. Jejich cena, začínající na 5000 €, je však přibližně 10-20x vyšší než u FDM zařízení.

## 2. Principy SLS tiskárny a její konstrukce

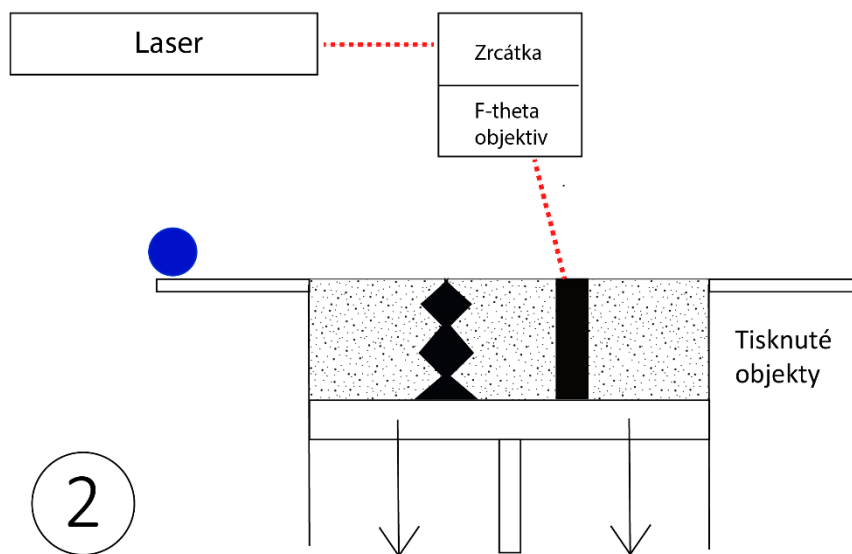
### 2.1. Princip funkce

SLS technologie je založena na spékání (sintrování) prášku, v mém případě plastového, po jednotlivých vrstvách. Základ celého stroje tvoří laser. Ten slouží jako zdroj energie, která zajišťuje lokální spékání vrstvy. Cyklus stroje lze rozdělit na dvě poloviny. Nejdříve je nanесena tenká vrstva čerstvého prášku po celé tiskové ploše, následně se pohybem laserového paprsku prášek ve vybraných místech speče. Tisková plocha s první nanесenou spečenou vrstvou se poté celá posune směrem dolů o jednu tloušťku vrstvy a celá posloupnost se opakuje do té doby, než je vytištěn kompletní trojrozměrný objekt.



Obr. 2 - nanášení vrstvy prášku

Na Obr. 2 je zobrazeno nanášení první vrstvy prášku. V tomto případě válec (*jedno z možných konstrukčních řešení*) koná rotační a posuvný pohyb, zachovává přesnou mezeru mezi sebou samým a tiskovou plochou. Velikost této vůle se odvíjí od použitého prášku, jeho hrubosti a viskozity. Výsledkem je nanесení rovnoměrné a homogenní vrstvy, která se tím připraví k druhé fázi, tedy spečení. Po čas této první poloviny cyklu zůstává laser vypnutý.



Obr. 3 – proces spékání vrstvy

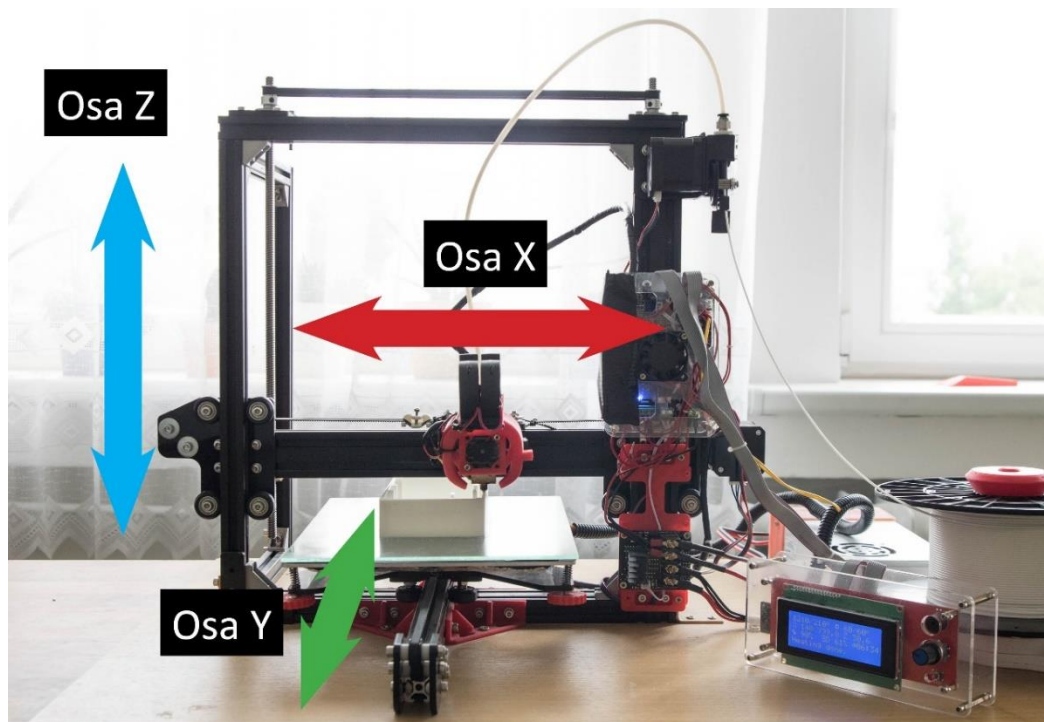
Obr. 3 zachycuje průběh sintrování. Válec, který v předchozím kroku nanese vrstvu prášku, se nyní nachází mimo tiskovou plochu a nepohybuje se. Statický laser vysílá svůj paprsek do opticko-elektromechanické soustavy, skládající se z pohyblivých zrcátek, umístěných na tzv. galvanometrech, a objektivu (o nich bude řeč dále). Toto zařízení dokáže paprsek laseru nasměrovat do kteréhokoli místa na tiskové ploše a tam spéci konkrétní bod vrstvy. Rychlým posuvem laserového paprsku se dosahuje spékání „po čárách“, které, pokud jsou dostatečně blízko sebe, vytvoří plochu (jedná se tedy o podobný princip „skládání“ jako u konvenčnějších FFF tiskáren).

Obr. 3 také naznačuje, že ačkoli je před spuštěním laseru pokryta vždy celá plocha materiálem, spékání probíhá pouze v určitých částech – a to tam, kde se „nachází“ objekt, který tiskneme. V tomto zobrazení lze spatřit, že část obou objektů, umístěných v nádobě s posuvným dnem, je již vytištěna, a že se kolem nachází volný, nespečený prášek.

## 2.2. Srovnání SLS a FFF tiskárny

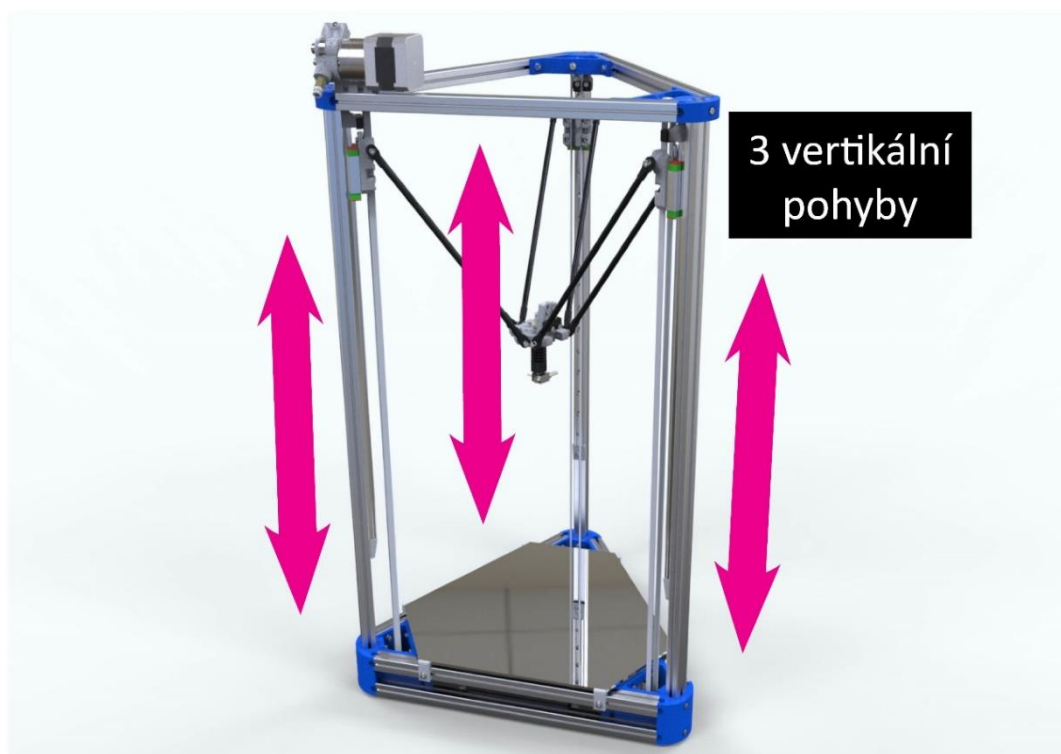
Nyní srovnám SLS metodu se značně rozšířenějším, jednodušším a pro domácího uživatele přívětivějším způsobem 3D tisku. Metodu FFF (Fused Filament Fabrication – výroba pomocí taveného drátu) využívají stroje, které po vrstvách kladou tavený plast na tiskovou plochu. Každý pracovní posuv tiskárny znamená vytvoření tenké „čáry“ plastu, obvykle o šířce 0,4 mm a výšce 0,1 – 0,4 mm. Překrytím těchto úseků přes sebe vznikne plocha, tedy jednotná vrstva plastu. Postupné kladení materiálu se opakuje do doby, kdy je hotový celý produkt.

Tepelná energie potřebná pro natavení materiálu vzniká v odporovém tělísku, umístěném v tzv. hot-end. Plastový drát, tlačný krokovým motorem, se zde taví a tryskou



Obr. 4 – Schéma přímého kartézského systému FFF tiskárny

s otvorem o průměru obvykle přímo šířky „čáry“ je pokládán na tiskovou plochu. Nejčastěji používanou konfiguraci FFF tiskáren tvoří varianta využívající přímo kartézských souřadnic k definování polohy trysky (Obr. 4). Druhý obvyklý způsob konstrukce představuje systém



Obr. 5 – Složení 3 vertikálních pohybů definuje pozici hot-end na tiskové ploše (delta kinematika. [16])

delta, jenž využívá goniometrických vztahů k přepočtu souřadnic tří polohovacích ramen na kartézské souřadnice hot-endu (Obr. 5). Oba typy sdílejí stejný mechanismus tavení plastu, delta se liší konstrukcí (využívá více prostor v ose Z, je tak často vyšší). Použitá elektronika v obou typech bývá u levných strojů z Číny založena na 8-bitových mikroprocesorech (například populární desky RAMPS či obdobné druhy), u dražších strojů se standardně objevují 32-bitové kontroléry, což pozitivně ovlivňuje kvalitu tisku. Obě FFF tiskárny jsou poháněny krokovými motory, které zajišťují posuv v jednotlivých směrech.

### 2.2.1. Přednosti SLS tiskáren:

- Lze tisknout bez podpor (příklad „ježka v kleci“) – nespečený prášek drží struktury nad sebou
- Detailnější tisk o vyšší přesnosti (tenčí vrstvy, preciznější body)
- Vhodné pro komplexní tvary
- Tisk probíhá v celém objemu prášku – lze lépe využít tiskový prostor

### 2.2.2. Přednosti FFF tiskáren

- Řádově levnější stroje<sup>2</sup>
- Levnější tisk (nižší spotřeba energie)
- Levnější tiskový materiál, výběr více druhů i barev
- Konstrukčně i softwarově jednodušší, dají se relativně snadno sestavit
- Bezpečnější provoz, nižší ohrožení zdraví
- Open-source komunita (návody, modifikace, software)

## 2.3. Konkrétní příklad SLS tiskárny

Vzhledem k faktu, že v průmyslu se využívá v podstatě shodné konstrukční řešení, jaké jsem naznačil výše, popíšu ho blíže na funkčním zařízení německé společnosti EOS, které jsem měl možnost poznat při své návštěvě ve společnosti Hacker.

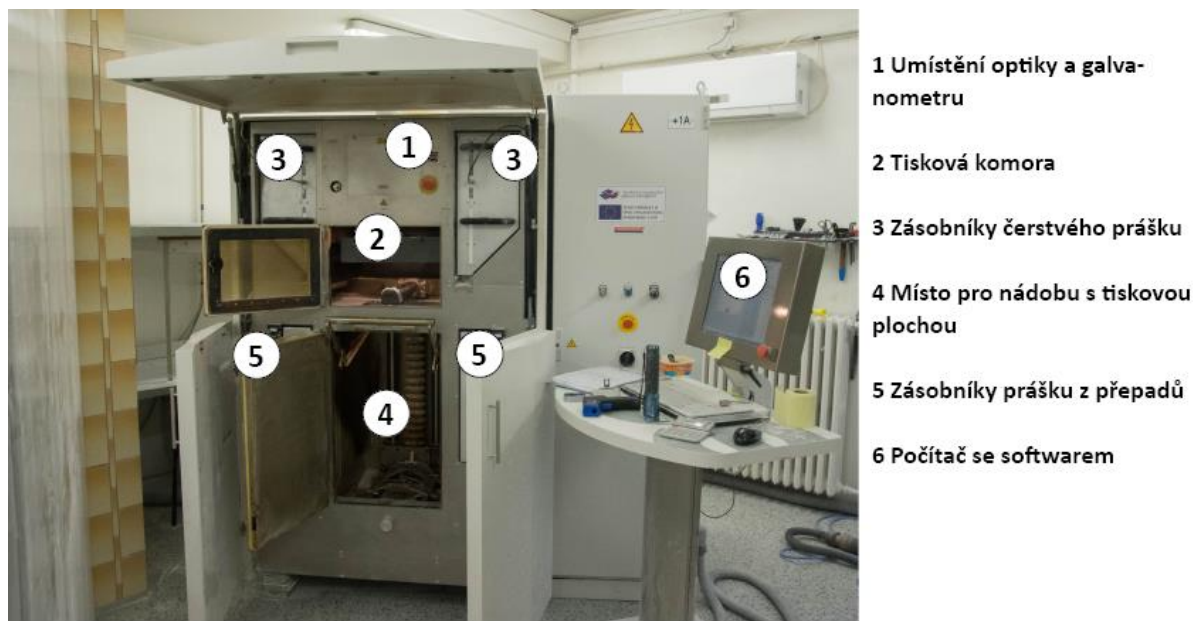
Na Obr. 6 se nachází celkový pohled na Eosint P 385. Tento více jak 10 let starý, 1080 kg těžký stroj disponuje CO<sub>2</sub> laserem o výkonu 50 wattů [4]. V horní části se nachází laser a skenovací jednotka se zrcátky a F-Theta objektivem. Po obou stranách se nacházejí zásobníky čerstvého prášku, jenž je postupně odsypáván níže do mechanismu, který vytváří vrstvu

---

<sup>2</sup> Zde je potřeba připomenout, že srovnávám průmyslovou technologii (SLS) s experimentálnějšími stroji (FFF), na které nejsou kladeny stejné nároky, co se kvality tisku i spolehlivosti provozu týče. Průmyslové stroje FDM se cenově stále pohybují na řádově srovnatelné hladině jako typy SLS. „První vlaštovky“ dostupnějších SLS tiskáren – viz Úvod - stále nejsou cíleny na nekomerčního zákazníka a jejich design je uzavřený (nikoli tedy open-source).

prášku na tiskové ploše. Tisková komora s ohřátou inertní atmosférou vytváří správně podmínky k tisku<sup>3</sup>.

Samotná tisková plocha s postupujícím tiskem postupně sjíždí do nádoby (není vyobrazena na Obr. 6) v dolní části tiskárny. Zde jsou na obou stranách umístěny zásobníky zachytávající přebytečný prášek, který se nepoužil při vytváření vrstvy a jenž byl odsunut pryč z tiskové komory.



Obr. 6 – 3D tiskárna Eosint P 385 společnosti Hacker

Nyní se zaměřím na jednotlivé části stroje:

### 2.3.1. CO<sub>2</sub> Laser

Srdcem 3D práškové tiskárny je laser. Jeho úkol spočívá v přeměně světelné energie na tepelnou, která zajistí spečení vrstvy prášku. Díky zaostřenému úzkému svazku paprsků se tomu děje „v bodě“, tedy na malé ploše ideálně kruhového průřezu.

Název tohoto typu laseru vychází z excitované látky. Tyto druhy laserů využívají směs plynů, obvykle v následujícím poměru: 78 % He, 13 % N<sub>2</sub>, 10 % CO<sub>2</sub>. Elektrickým výbojem (provozní napětí u 40W laseru činí  $\cong 20$  kV) uvnitř skleněné trubice laseru se mezi dvěma elektrodami za sníženého tlaku vytvoří plasma. Výboj excituje molekuly dusíku, jež se srážejí s molekulami CO<sub>2</sub>. Energie vybuzeného N<sub>2</sub> se velmi blíží energii potřebné pro uvedení molekuly CO<sub>2</sub> do nejvyššího energetického stavu, ve kterém je molekula schopna spontánně vyzařovat fotony. Některé vybuzené molekuly CO<sub>2</sub> svou energii ztratí na stěnách trubice, jiné vyzáří fotony o vlnové délce 10,6  $\mu$ m. Tyto vyzářené fotony mohou letět kterýmkoli směrem, některé z nich se však začnou pohybovat mezi dvěma konci trubice, kde jsou umístěna zrcadla. Tím začne docházet k stimulované emisi dalších protonů. Postupně nastane stav „inverze populace“, kdy

<sup>3</sup> Více o mechanismu sintrování a jeho teplotách v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.. - Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

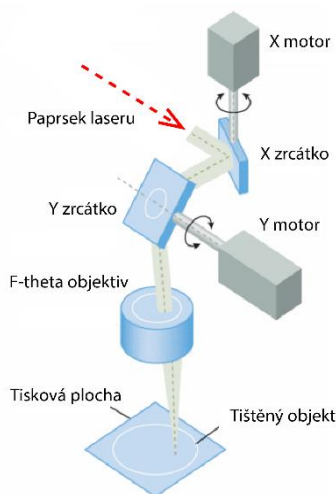
je větší počet molekul na vyšších energetických hladinách nežli na těch nižších. Dochází k zesilování energie a nakonec k emisi záření skrze malý otvor v jednom z konců trubice. [5, pp. 15-16] [6]

Aby celý proces fungoval a došlo k excitaci molekul oxidu uhličitého molekulami dusíku, je potřeba laser chladit. CO<sub>2</sub> se při změnách svých energetických stavů zahřívá, odpadní teplo odcházející skrze hélium<sup>4</sup> se proudící vodou odebírá z vnitřního válce skleněné trubice.



Obr. 7 – Nepřipojená rubice CO<sub>2</sub> laseru [18]

### 2.3.2. Skenovací jednotka (Zrcátka, F-Theta objektiv)



Obr. 8 - Skenovací jednotka [14]

Pod názvem skenovací jednotka se skrývá soustava optických a elektromechanických prvků, které usměřňují papřsek laseru na ta správná místa na tiskové ploše. Tento na první pohled jednoduchý úkol je u většiny SLS tiskáren (a částečně také SLA strojů) vyřešen dvěma prvky.

#### 2.3.2.1. Galvanometry

V tiskárně jsou použity dva galvanometry, na jejichž hřídelích jsou umístěna zrcátka. Každé zrcátko se naklápí kolem své osy a vzhledem k tomu, že jsou umístěna kolmo na sebe, dokážou nasměrovat papřsek do bodů na ploše. Z konstrukčního hlediska se jedná o servomotor se zpětnovazebním řízením, součástí konstrukce je tedy i snímač polohy. Galvanometry dokáží ve zlomcích milisekund reagovat na změny napětí a měnit své natočení.

<sup>4</sup> Molekuly helia slouží jako stabilizační médium, tak jako prostředek pro přenos tepla

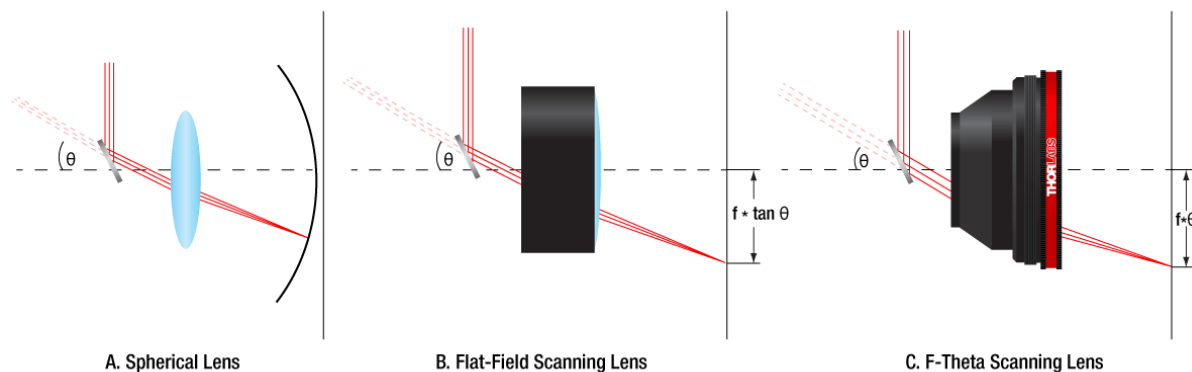


Uvedu nyní některé požadavky na vlastnosti těchto zařízení:

- Vysoký poměr krouticího momentu ku setrvačnosti (*rychlá schopnost reakce z mechanického hlediska*)
- Malá časová konstanta, tedy malý poměr indukčnosti a odporu (*rychlá schopnost reakce z elektrického hlediska*)
- Lineární závislost mezi točivým momentem, el. proudem a úhlovou pozicí
- Vysoká pevnost v krutu a ohybu
- Nízká tepelná roztažnost [7, p. 398]

### 2.3.2.2. Objektiv F – Theta

Paprsek laseru, jenž byl nyní usměrněn zrcátkem a směřuje do konkrétního bodu na tiskové ploše, stále nedovoluje zahájit proces spékání. Nebyl totiž zaostřen. Do osvětleného místa na tiskové ploše by se tak bez optického členu nevnesla dostatečně velká koncentrace energie ( $J/cm^2$ ), potřebná k požadovanému zvýšení teploty plastového prášku. Vložení objektivu se paprsek zaostří a energie se zkoncentruje do bodu. Jistou komplikací ovšem přináší geometrické uspořádání. Vzhledem k tomu, že se paprsek laseru posouvá po rovině, délka optické dráhy od druhého zrcátka k tiskové ploše se různí v každém bodě – v jejím středu je vzdálenost nejkratší, v rohu naopak nejdelší (předpokládám umístění druhého zrcátka tak, aby nejkratší dráha paprsku vedla na střed tiskové plochy).<sup>5</sup>



Obr. 9 – Srovnání standardního objektivu, objektivu s plochou zobrazovací rovinou a objektivu s F-Theta konstrukcí. [17]

Řešení existuje v zásadě dvojí: 1) Použití pohyblivého objektivu, který je schopen svým posuvem (nebo posuvem svých optických členů) paprsek zaostřit nebo 2) Využit přímo zvláštního tvaru objektivu, jenž se nazývá F-Theta. Jeho funkce spočívá v tom, že plocha, na níž objektiv paprsek laseru zaostřuje, má tvar roviny kolmé na optickou osu. Nezáleží tak na

<sup>5</sup> Zostřená plocha bez objektivu by v tomto případě byla zakřivená.

tom, kde se nachází místo, do něhož směřuje paprsek. Jeho dalším specifickým je lineární závislost mezi posuvem paprsku laseru na zobrazovací rovině a jeho úhlem vychýlení. U standardního objektivu se tato závislost dá popsat vztahem

$$u = f \cdot \tan \theta,$$

kde  $u$  je vzdálenost paprsku od optické osy (měřeno na zobrazovací rovině),  $f$  značí ohniskovou vzdálenost,  $\theta$  je sklon (úhel) paprsků od optické osy.

Objektiv F-Theta přináší zjednodušení tohoto vztahu na

$$u = f \cdot \theta.$$

Tato linearizace přináší výhodu v jednodušším, rychlejším a přesnějším softwarovém řízení, kdy při každé změně polohy paprsku není potřeba přepočítávat výsledek funkce tangens.

### 2.3.3. Tisková komora

V tiskové komoře (Obr. 10) probíhá samotný tisk a většina procesů kolem. Komora modelu P 385 tak zahrnuje tiskovou plochu, mechanismus nanášení vrstvy prášku a topné těleso. Splňuje také podmínku snadné přístupnosti pomocí dvířek, které navíc obsahují průhled pro kontrolu procesu tisku. Komora je důležitá i kvůli potřebě udržovat tepelně izolovanou inertní atmosféru. Sintovací proces totiž probíhá z výchozí teploty, která se pohybuje o několik



Obr. 10 – tisková komora s tiskovou plochou a nádobou s vytištěným produktem

stupňů Celsia níže, než činí teplota tání (více kap. 4.2.1). Pro spečení materiálu tak stačí menší přenesená energie laseru. Bez inertní atmosféry (v tomto případě dusíku) by došlo k oxidaci a horší kvalitě tisku, či dokonce vznícení prášku.

#### 2.3.4. Mechanismus nanášení vrstvy

Na Obr. 11 je obecně naznačen mechanismus nanášení vrstvy prášku. Inženýři z EOSu se místo válce, konajícího posuvný a rotační pohyb, přiklonili k použití dvou mosazných desek, které jsou usazeny v jednom modulu za sebou a prášek roztírají. Tyto stěrky se nacházejí ve velmi přesně nastavené výšce nad tiskovou plochou, aby výsledkem byla opět homogenní nanesená vrstva.

Čerstvý prášek se do mechanismu dostává samospádem z horní části tiskárny. Po nanesení vrstvy (tedy po přesunu stěrek na opačnou stranu tiskové komory) propadne přebytečný prášek do jednoho ze spodních zásobníků, odkud ho lze po skončení tisku odebrat a znovu použít.

Stírací mechanismus přejíždí plochu pouze jednou, neboť podavače prášku jsou umístěny na obou stranách tiskové komory.



Obr. 11 – mechanismus nanášení vrstvy prášku

### 2.3.5. Post-processing

Po skončení tisku a vytažení nádoby s hotovým produktem práce na modelu nekončí. Vždy je ho třeba očistit od přebytečného nespečeného prášku. (Vzhledem k teplotám okolo 100 °C uvnitř tiskové nádoby a 175 °C uvnitř tiskového prostoru a jejich dlouhodobému působení se tento plast jeví jako napůl spečený – tvoří se hrudky a k jeho odstranění je vhodné krom sítá použít i metodu otryskání práškem sytkým.)

Kvůli ceně prášku (cca 60 €/kg) je ekonomicky výhodnější po každém tiskovém procesu smíchat tepelně ovlivněný plast z tiskové nádoby s čerstvým práškem, a to v poměru 50:50. Kvalita tisku se tím neovlivní a uživatel zároveň docílí finanční úspory.



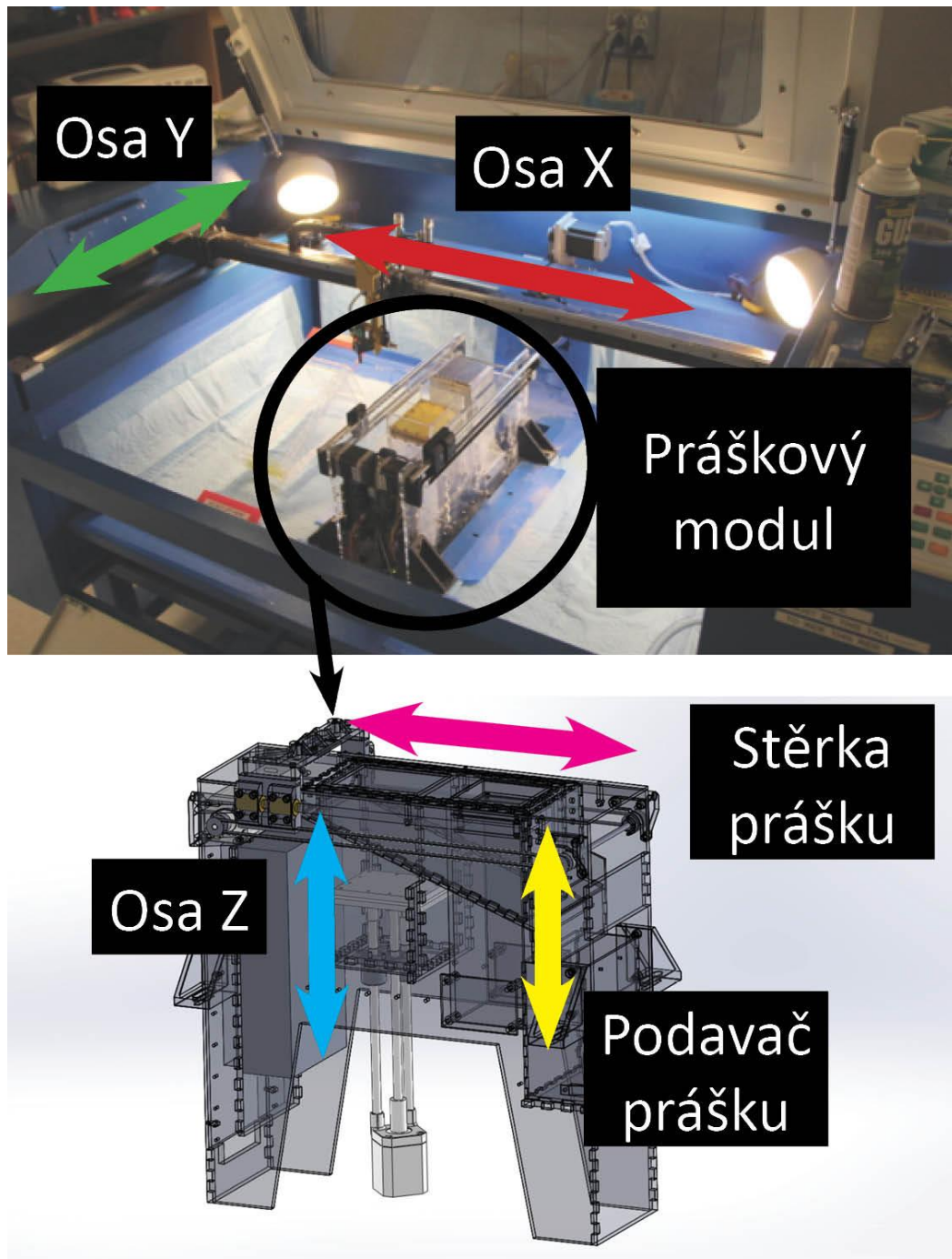
Obr. 12 – nádoba se sítím pro oklepání nespečeného prášku z výtisku

### 2.3.6. Shrnutí

F-Theta konstrukce netvoří jedinou technologii, která umožňuje dojít k funkční 3D SLS tiskárně. Pohovořím nyní o pravděpodobně jediném podrobněji rozpracovaném open-hardware projektu SLS tiskárny, jehož zdrojové soubory a pojednání o něm jsou k dispozici na webu [8].

## 2.4. OpenSLS a jeho konstrukce

OpenSLS projekt je založen na konvenční laserové řezačce, jejíž srdce tvoří CO<sub>2</sub> laser, stejný, jaký lze nalézt u průmyslových SLS strojů. Jednoduchou úpravou – přidáním modulu se zásobníkem prášku a tiskovou komorou – vznikne hardwarový základ pro 3D tiskárnu.



Obr. 13 – OpenSLS projekt – upravená laserová řezačka s práškovým modulem

### 2.4.1. Laser a mechanismus posuvu jeho optiky

Rozdíl oproti standardní průmyslově používané variantě stroje spočívá v systému přenosu paprsku na tiskovou plochu. I zde zůstává CO<sub>2</sub> laser nehybný, paprsek se v tomto případě přenáší soustavou zrcátek do laserové hlavy. Ta v sobě nese zaostřovací čočku, jež paprsek kolmo usměřňuje na tiskovou plochu. Stroj pracuje přímo v kartézských souřadnicích; nosná konstrukce se zrcátka se na lineárním vedení pohybuje ve směru X-Y a tisková plocha (neboli píst) pomocí šroubového mechanismu v ose Z.

Pohon v osách X-Y je řešen skrze dva krokové motory (tedy bez zpětnovazebního řízení) s řemenicemi a řemeny (stejně, pouze v subtilnějším provedení, jsou povětšinou konstruovány i FFF 3D tiskárny).

Zajímavou myšlenkou projektu je důraz na modularitu. Vzhledem k velikosti řezacího prostoru původního stroje do něj lze umístit více práškových modulů. Toto konstrukční řešení by tak umožnilo tisk více produktů naráz, každý v odděleném tiskovém prostoru.

Celková funkčnost a tiskové vlastnosti v porovnání s F-Theta řešením závisí především na řešení práškového modulu. Ten v sobě obsahuje tiskovou plochu, podavač prášku a mechanismus nanášení vrstvy. Celý proces nanášení vrstvy se děje stejným způsobem, jaký byl popsán v kap. 2.1. Oproti stroji P 385 je ale přítomen pouze jeden podavač prášku, roztírací mechanismus se tak po nanesení vrstvy vždy vrací do své výchozí polohy.

Tisková plocha (neboli podstava tiskového objemu) je opatřena perforací pro vstup inertního plynu a zároveň umožňuje instalaci topných tělísek pro udržení požadované teploty (účinky obojího objasňuji v kapitole 4). Za předpokladu správné funkce těchto prvků se šance na úspěšně pracující tiskárnu zvyšují.

## 3. Návrh na konstrukci SLS tiskárny

Tato kapitola je věnována zamyšlení se nad oběma přístupy ke konstrukci při stavbě strojů v domácím prostředí. Uvedu zde seznamy základních dílů potřebných ke stavbě, včetně jejich ceny a toho, kde je lze pořídit. Abych zůstal věrný smyslu této práce, budu klást důraz na cenu. Od tiskárny nebude očekávána průmyslová kvalita ani spolehlivost, což je stejný přístup, který se uplatňuje v RepRap komunitě.

### 3.1. Porovnání obou přístupů F-Theta a X-Y

Z předchozí kapitoly je patrné, že existují dva základní přístupy ke konstrukci SLS tiskárny. Nyní krátce shrnu jejich přednosti:

#### **F-Theta:**

- Rychlost posuvu laseru (až jednotky m/s vs. setiny – desetiny m/s u X-Y)<sup>6</sup>
- Kvalita tisku – méně pohyblivých částí, méně vibrací i hluku

#### **X-Y**

- Jednodušší konstrukce
- Snazší softwarové řešení tisku
- Možnost využít laserové řezačky, konverze prostým přidáním modulu
- Silná komunita uživatelů CNC strojů (snadno se dají konzultovat technické obtíže)
- Dostupnější díly

Jako variantu, kterou popíšu podrobněji, volím F-Theta. Shledávám tři hlavní důvody:

- 1) Zásadně vyšší rychlost tisku, která vede k vyšší produktivitě.
- 2) Vyšší hodnota zkoumání – zatímco stavba varianty X-Y je poměrně dobře popsána projektem OpenSLS (a do určité míry i jinými<sup>7</sup>), prozatím (se vši pravděpodobností) neexistuje projekt, který by se věnoval konstrukci F-Theta a jenž by objasňoval její technické obtíže.
- 3) Výhoda varianty X-Y se naplno projevuje především, je-li dostupná upravitelná laserová řezačka (stačí přidat práškový modul a upravit software). Je-li potřeba tiskárnu postavit od základu, ztrácí do určité míry svou konkurenční výhodu, především kvůli bodu 1).

---

<sup>6</sup> Maximální rychlost skenování – tedy pohybu laseru u F-Theta varianty – dosahuje u popsaného modelu P385 5 m/s. Standardní laserové řezačky dosahují maximální rychlosti posuvu okolo 0,25 m/s. Rozdíl v rychlostech je tedy dvacetinásobný, což se významně projevuje v čase, za který se speče tisková vrstva.

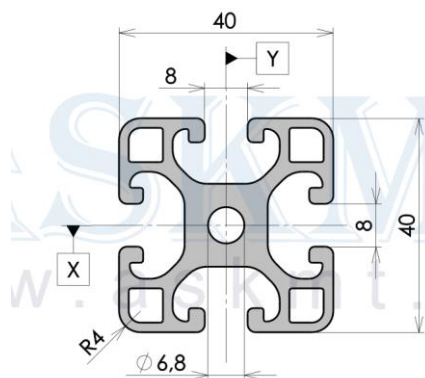
<sup>7</sup> <https://www.thingiverse.com/thing:33697>

## 3.2. Návrh konstrukce F-Theta

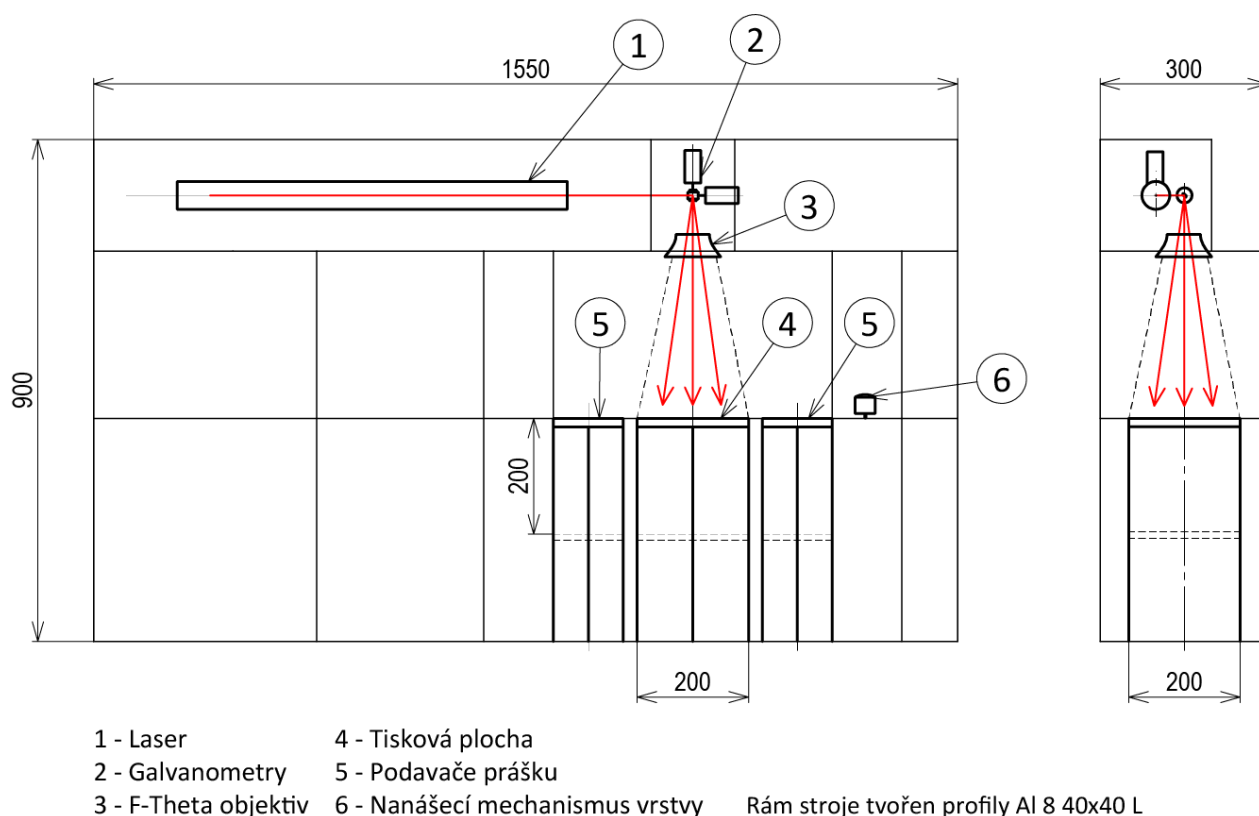
### 3.2.1. Úvaha nad zvolenými součástmi

Jako základ stroje slouží rám z hliníkových profilů Al 8 40x40, který by měl zajistit potřebnou tuhost. Svou modulární funkcí s drážkami na každé straně je vhodný pro tento typ aplikace, kdy je potřeba po objemu rámu rozmístit různá příslušenství stroje.

V jeho horní části rámu je usazen laser, jenž směřuje svůj paprsek do modulu s galvanometrií a F-Theta objektivem. Ten zaostřuje paprsek na tiskovou plochu. Její rozměry jsou 200 x 200 mm, výška zdvihu 200 mm. Po obou jejích stranách se nacházejí podavače prášku, s rozměry 125 x 200 mm a zdvihem 200 mm. Jejich větší rozměry slouží k přenesení většího množství prášku na tiskovou plochu, čímž se zajistí spolehlivé nanášení vrstvy. (Přebytečný prášek bude při nanášení vrstvy odsunut za podavače do nádob. Ty na Obr. 15 vyobrazeny nejsou.)



Obr. 14 – Hliníkový profil 40x40 s 8mm drážkou [15]



Obr. 15 – Schematický návrh koncepce se základními rozměry ve dvou pohledech. Červeně je vyobrazena dráha laseru. Detailější rozměry v Příloze 1.



Rám by měl svou naddimenzovanou délkou umožnit pohodlnou montáž dalších prvků, jako jsou zdroje pro laser a kontroléry s krokovými motory/galvanometry. Jeho šířka byla volena s poměrně malou vůlí v oblasti tiskové komory (5 cm na každé straně). V případě nedostatku místa v této části se dá celý stroj snadno rozšířit instalací delších příčných tyčí.

Nad rámec této práce bude potřeba promyslet vhodné opláštění rámu na exponovaných místech (okolo dráhy paprsku laseru) a také vhodnou izolaci tiskové komory a spodní části s tiskovou plochou.

V této práci se nezabývám potřebným tepelným výkonem a umístěním topných těles, která by zajistila funkční tisk bez kroucení. (Průmyslové stroje krom vytápěné komory těsně pod sintrovací teplotu využívají i temperovaného prostoru s již vytištěnými částmi produktu – viz. tisková nádoba na Obr. 10.)

Další nutnou úpravou se jeví zajištění inertní atmosféry v tiskové komoře během tisku. (Více viz kap.4.4). Standardně se k tomuto využívá dusík ( $N_2$ ), který lze dodat v tlakových lahvích. S touto modifikací souvisí výše zmíněná izolace, v ideálním případě se podaří zcela utěsnit tiskovou komoru a zabránit tak úniku dusíku ven (o rizicích při úniku viz kapitola 5.3).

Zvolený výkon laseru odpovídá potřebě tisku. 40W trubice disponují poměrně nízkým prahem sepnutí v desetinách wattu (viz experiment v [8]), jsou tedy vhodné k pomalému tisku s předehřátým práškem, kdy potřebný výkon je malý. Zároveň je jejich maximální dostupný výkon dostatečný k experimentům při nevyhřáté komoře<sup>8</sup>.

K uložení laseru by měly postačovat dvě nastavitelné objímky. Vzhledem k absenci držáku nakupovaných galvanometrů bude pro ně potřeba navrhnout a vyrobit dostatečně přesné a tuhé uložení. Je otázkou, zda k tomu postačí díly vytištěné z plastu na 3D tiskárně, či zda kvůli vyšší přesnosti provozu i větší bezpečnosti<sup>9</sup> bude nutné využít hliníkovou konstrukci.

$CO_2$  laser je pro funkční provoz nutné chladit. K tomu účelu poslouží ponorné čerpadlo, jehož kapacita 17 l/min by měla k ochlazení laserové trubice stačit. Detailnější návrh a ověření výpočtem má smysl provádět po navržení celkové chladicí soustavy, tedy především objemu a umístění sběrné nádrže a dále podle okolních podmínek (teplota okolí, proudění vzduchu). Je nutné mít na paměti, že chlazení laseru tvoří zásadní prvek celého stroje, poněvadž i při několikavteřinovém výpadku hrozí nenávratné poškození laseru.

Řešením může být i napojení chlazení laseru přímo na vodovodní kohoutek, v takovém případě ale lze očekávat neúměrnou spotřebu vody během provozu.

---

<sup>8</sup> Usuzuji tak z vlastního testu na 80W laseru, více v kapitole 6.

<sup>9</sup> V případě použití plastu považuji důležité promyslet, jak zajistit, aby nepřišel při poruše do kontaktu s paprskem laseru a nevzniklo tak riziko požáru. Dá se uvažovat například o odstínění povrchu kovovým plechem.

### 3.2.2. Elektronická výbava stroje

Mikrokontroléry je potřeba zajistit ovládání galvanometrů se zrcátky a mechanismu výměny vrstvy, dále spínání laseru a vyhřívání tiskového prostoru. Očekávám, že pro správnou funkci mechanismu nanášení prášku bude stačit 8-bitový kontrolér, ovládající 4-5 krokových motorů: každý pro jeden pohybový šroub pod tiskovou plochou a dvěma zásobníky prášku a 1-2 pro mechanismus stíracího modulu.

V případě vyhřívání tiskového prostoru bude pravděpodobně stačit podobně nenáročná výpočetní kapacita, ovšem přídatný obvod s odporovými články bude silového charakteru, budou tedy potřeba spínací prvky snášející vyšší proudy (například MOSFETy – tranzistory vhodné k PID ovládní).

Galvanometry a laser bude nutné řídit z jedné desky. V tuto chvíli nelze říci, jaký kontrolér je dodáván s galvanometry z výroby, tudíž volba vhodného řešení je nyní předčasná. Lze již ale povědět, že kontrolér a jeho firmware musí umožňovat zpracování G-kódu a ovládání zmíněných dílů v dostatečné rychlosti, což může znamenat volbu 32-bitové architektury. V lepším případě půjde z této desky ovládat také mechanismus nanášení vrstvy (což je poměrně praktické, vzhledem k nutným instrukcím k nanesení nových vrstev během tisku<sup>10</sup>) a také vyhřívání tiskárny.

Ze softwarového hlediska bude při ovládní laseru a galvanometrů potřeba buď 1) využít některého z existujících programů pro SLS tisk a například úpravou profilů existujících tiskáren nalézt řešení, anebo 2) upravit G-kód ze standardního sliceru FFF tiskáren pro chod na SLS stroji.

### 3.2.3. Práškový modul

Konstrukce práškového modulu umožní „pístům“ tiskové plochy a podavačů prášku vertikální pohyb. Vše musí být utěsněno tak, aby materiál nepropadával pod písty. Zároveň by tisková plocha měla být schopna vyhřívání alespoň na teplotu 175 °C, a to kvůli zabránění nežádoucích deformací během tisku. Tyto požadavky vedou úvahy směrem k použití hliníku jako materiálu pro stěny modulu i pro tiskovou plochu. Takové řešení nebude levné, navíc pravděpodobně bude vyžadovat pájení či svařování.

#### 3.2.3.1. Návrh krokového motoru a pohybového šroubu pod tiskovou plochou (Osa Z)

Považuji za vhodné se ujistit, že pohybový šroub, který zvolím, unese tíhu tiskové plochy a materiálu na ní. Zároveň spočítám potřebný krouticí moment krokového motoru a zvolím odpovídající model.

---

<sup>10</sup> Nanášení nových vrstev prášku lze ovšem vyřešit i při instalaci dvou vzájemně nekomunikujících desek, a to prostou úpravou G-kódu na obou deskách.

### 3.2.3.2. Stanovení středního průměru závitu

$$\Psi_h = 1,5$$

$$\Psi_H = 0,5 \quad \text{pro závit } Tr$$

$$\rho_{PA12} \cong 1000 \text{ kg/m}^3^{11}$$

$$Q_{prášek} = a \cdot b \cdot c \cdot \rho = 0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,2 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 78,5 \text{ N}$$

$$m_{plochy}^{12} \sim 5 \text{ kg} \rightarrow Q_{plocha} = 5 \cdot 9,81 = 49 \text{ N}$$

$Q = 78,5 + 49 = 127,5 \text{ N}$  (Zatížení spočteno jako součet tíhy prášku v tiskovém prostoru a odhadu tíhy tiskové plochy)

$$p_D = 8 \div 10 \text{ MPa (Ocel – bronz, použiji 10 MPa)}$$

$$d'_2 = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot \Psi_h \cdot \Psi_H \cdot p_D}} = \sqrt{\frac{127,5}{\pi \cdot 1,5 \cdot 0,5 \cdot 8}} = \underline{2,6 \text{ mm}}$$

Pozn.: Průměr vycházející z návrhového vztahu je velmi malý. Hodnota středního průměru závitu bude zvolena s ohledem na celkovou robustnost a tuhost konstrukce.

$$d = 12 \text{ mm}$$

$$d_2 = 11 \text{ mm}$$

$$d_3 = 9,5 \text{ mm}$$

$$P = 2$$

$$H_1 = 8 \text{ mm}$$

$$S_3 = 8171 \text{ mm}^2$$

Volím tedy závit **Tr 12 x 2 (P4)**.

$$tg(\gamma) = \frac{i \cdot P}{\pi \cdot d_2} = \frac{4 \cdot 2}{\pi \cdot 11} = 0,23 \rightarrow \underline{\gamma = 13,03^\circ}$$

$$tg(\beta_n) = tg(\beta) \cdot \cos(\gamma) = tg(15^\circ) \cdot \cos(13,03^\circ) = 0,26154 \rightarrow \underline{\beta_n = 14,63^\circ}$$

$$tg(\varphi') = f' = \frac{f}{\cos(\beta_n)} = \frac{0,08}{\cos(14,63^\circ)} = 0,08268 \rightarrow \underline{\varphi' = 4,73^\circ}$$

Vzhledem k předdimenzování průměru šroubu nepovažuji za nutné počítat redukované napětí (z krutu a tlaku) a kontrolovat jeho hodnotu vůči mezi kluzu. To samé platí o kontrole na vzpěr a na otláčení závitu.

<sup>11</sup> Hustota spečeného plastu, výpočet tedy předpokládá kompletní pokrytí plochy. Hodnota hustoty sypkého prášku (tzv. bulk density) je přibližně poloviční – 500 kg/m<sup>3</sup>.

<sup>12</sup> Horní odhad hmotnosti zdvihané tiskové plochy.

Větší informační hodnotu má výpočet potřebného momentu k překonání třecího odporu šroubu. Potřebný minimální krouticí moment krokového motoru se dá spočítat jako:

$$M_k = Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi')$$
$$M_k = 127,5 \cdot \frac{11}{2} \cdot \operatorname{tg}(13,3 + 4,73)$$
$$M_k = 228 \text{ N} \cdot \text{mm} = 0,23 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Volím krokový motor NEMA17-4401 o maximálním točivém momentu  $M_{max} = 0,4 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Koeficient bezpečnosti  $k$  vůči  $M_{max}$  činí

$$k = \frac{M_{max}}{M_k} = \frac{0,4}{0,23} = 1,7.$$

Krokový motor byl volen s důrazem na cenu, jedná se tak o model dostupný z čínského webu Aliexpress.com (více viz Příloha 2 – Nákupní list). Tento model i s pohybovým šroubem lze použít také k pohonu podavačů prášku, vzhledem k menšímu zatížení.

### 3.2.4. Shrnutí vybraných konstrukčních výzev u F-Theta

V krátkosti zde shrnuji, jaké prvky konstrukci je třeba dále promyslet:

- Opláštění stroje – ochrana před únikem laserového záření
- Tepelná izolace vyhřívaných částí stroje
- Uložení sestavy laser – galvanometry – objektiv a zajištění kolmostí a tuhosti
- Ověření dostatečné kapacity ke chlazení stroje
- Volba kontrolérů a způsobu ovládání jednotlivých prvků
- Konstrukce modulu s tiskovou plochou a zásobníky prášku
- Přístup do tiskové komory a průhledové okno

### 3.2.5. Nákupní seznam

Strukturované shrnutí této kapitoly uvádím v Příloze 1. Nákupní seznam by měl fungovat jako vodítko pro další rozvinutí konceptu. Ačkoli v něm nejsou zahrnuty všechny položky, jež budou ke stavbě potřeba, seznam by vzhledem k rezervě ve výši 20 000 Kč měl odrážet skutečnou výslednou cenu. Tu jsem spočetl na 55 000 Kč.

### 3.3. Komentář ke konstrukci X-Y

Ačkoli v této práci dále nerozebírám variantu X-Y, považuji za vhodné se zamyslet nad výslednou cenou i této konstrukce.

V této variantě budou galvanometry a F-Theta objektiv nahrazeny soustavou čoček a zrcátek, což by mělo vést k úspoře 1-2 tisíc Kč. Pravděpodobně se také podaří uspořit na rámu, vzhledem k tomu, že jeho rozměry vyjdou menší. Zde očekávám, že by cena bude nižší o 3000 Kč. Celkové náklady na X-Y variantu by mohly díky menším rozměrům a předpokladu menšího počtu komplikací vycházet o 10 – 15 tisíc Kč méně než v případě F-Theta tiskárny. (Tedy přibližně 40-45 tisíc Kč.) Výsledná cena bude značně odvislá od použitých konstrukčních řešení.

## 4. Sintrování a použité materiály

### 4.1. Sintrování (spékání)

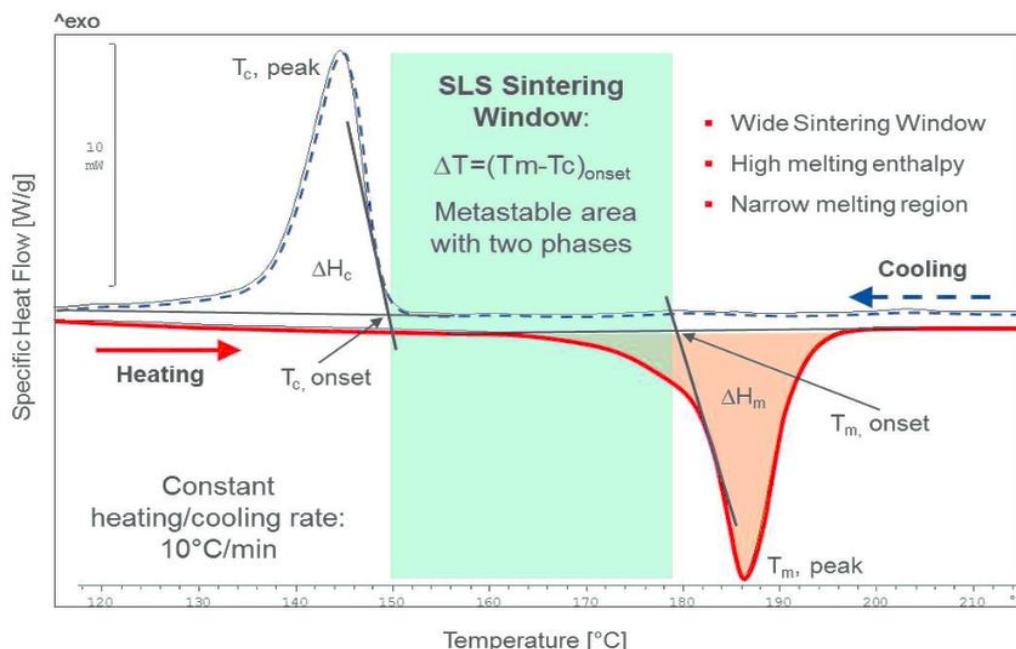
Sintrování je proces, při kterém se plastový<sup>13</sup> prášek lokálně zahřívá laserovým paprskem na teplotu tání či mírně za ní a tímto částečným natavením se jeho zrna spojují. Vzniká tak kompaktní struktura, která postupně, vrstvu po vrstvě, vytvoří požadovaný produkt.

### 4.2. Materiály a jejich vlastnosti

Jistou limitací SLS metody (například oproti FFF tisku) přináší omezený výběr materiálů, které by měly vhodnými vlastnostmi. Těmi disponuje polyamid (PA), či také nylon, který je nejvyužívanějším plastem pro SLS tisk. (Jednu jeho verzi, konkrétně PA2200, využívám v kap. 6 k experimentu.) Dle [9] existuje pět oblastí, ve kterých plastový prášek musí splňovat jistá kritéria. K vnitřním vlastnostem patří tepelné, optické a reologické, za vnější lze označit ty, které lze ovlivnit při výrobě prášku, tedy vlastnosti zrn i prášku jako takového.

#### 4.2.1. Tepelné vlastnosti

Charakteristika materiálu je do velké míry určena teplotami zpracování. Obr. 16 ukazuje výstup z DSC – diferenciální skenovací kalorimetrie. Tato analytická metoda umožňuje určit potřebnou velikost vneseného tepla pro změnu teploty. Tímto způsobem lze stanovit polohu



Obr. 16 – Výstup z diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC). Na vodorovné ose se nachází teplota v [°C], na svislé měrný tepelný tok [W/g]. [9]

<sup>13</sup> Obecně lze sintrovat různé materiály, například kovy a keramiku. O těchto materiálech a různých typech spékání v nich si lze udělat dobrou představu z [19]

fázových přechodů či teplot krystalizace. Zeleně je na grafu vyznačeno „sintrovací okno“. Jedná se o pásmo teplot (přibližně mezi 150 – 180 °C), v němž se PA nachází v metastabilní fázi mezi teplotou počátku krystalizace a teplotou tání. Během celého procesu tisku na průmyslových strojích je teplota v tiskové komoře udržována<sup>14</sup> v této oblasti, těsně pod teplotou tání. Zabraňuje se tím teplotním deformacím a kroucení tištěných předmětů vlivem krystalizace.

Pro spečení plastu se využívá laserové energie, která prášek krátkodobě zahřeje nad teplotu tání.

#### 4.2.2. Optické vlastnosti

Aby se materiál mohl natavit, musí dobře absorbovat energii laseru. Většina polymerů toto splňuje pro vlnové délky kolem  $\cong 10,6 \mu\text{m}$ .

#### 4.2.3. Viskozita a povrchové napětí

Důležitou vlastností je také viskozita po natavení a povrchové napětí. Na rozdíl od vstřikování plastu do formy zde nepůsobí přetlak, materiál se tak musí spojit samovolně. Pokud je viskozita příliš vysoká, soudržnost zrn se horší. To představuje komplikaci při použití amorfních materiálů, které vykazují nízkou pevnost oproti semikrystalickým [9] [10].

#### 4.2.4. Vlastnosti zrna

Pro bezproblémové nanášení vrstvy prášku na tiskovou plochu je příhodné, aby se tvar zrna blížil co nejvíce kouli. To přinese „skluz“ zrn po sobě a zmenšený odpor při tvorbě vrstvy. Tvary zrn určují také výslednou pevnost produktu.

#### 4.2.5. Prášek a jeho vlastnosti

Parametrem je zde hodnota PSD (Particle-size distribution). Jedná se o statistické rozdělení velikostí zrn v prášku. Co se týče vhodné velikosti zrna pro SLS tisk, její hodnota se pohybuje mezi 20 – 80  $\mu\text{m}$ . Platí zde však, že větší počet malých částic je nežádoucí, protože se zrna „lepí“ na sebe, což vede ke zhoršeným tiskovým výsledkům.

### 4.3. Další vhodné materiály k SLS zpracování

Krom PA se pro SLS tisk využívá PEEK (polyetherketon). Pokusy úspěšně proběhly například na PP (polypropylenu) [10]. Mezi použitelné amorfní materiály se řadí PC (polykarbonát), vzhledem k zmíněné nízké pevnosti se ale využívá spíše pro odlévání „na ztracenou formu“.

---

<sup>14</sup> Udržet konstantní teplotu v celém objemu je velmi obtížný úkol. Záleží na umístění topných těles, na jevech při přenosu tepla plastem i na ztrátách nedokonalým utěsněním. Přínosnou analýzu v tomto směru přináší [20].

#### 4.4. PA a jeho vlastnosti

V této práci zmiňovaný a v experimentu použitý PA2200 je obchodní název společnosti EOS pro upravený PA12, jehož vlastnosti jsou optimalizovány pro použití v SLS technologii. Jeho mez pevnosti činí  $R_m = 48 \text{ MPa}$  a Youngův modul pružnosti  $E = 1700 \text{ MPa}$ . Cena za kilogram prášku se pohybuje okolo 60€/kg, což je porovnatelná hodnota s cenou za kilogram nylonového drátu pro FFF tiskovou technologii.

Aby plast při tisku nedegradoval, je nutné použít inertní atmosféry dusíku. Zabraňuje se tím oxidaci a v horším případě i vznícení prášku. V této práci popisovaný model tiskárny P 385 je vybaven přímo odlučovačem kyslíku, dusík se tak vytváří přímo z okolní atmosféry. U jiných strojů je potřeba připojit tlakovou lahev se stlačeným plynem.



## 5. Bezpečnost

Považuji za důležité zmínit se o několika rizicích, které se stavbou tiskárny a jejím provozem souvisejí. Dobrou představu o tématech, nad kterými je potřeba se zamyslet, dávají například manuály výrobců [11, pp. 19-41] či odborné publikace, jako je [12].

### 5.1. Provoz laseru

U samotného CO<sub>2</sub> laseru je potřeba věnovat zvýšenou pozornost dvěma oblastem.

#### 5.1.1. Záření laseru

Největší nebezpečí při manipulaci s laserem představuje záření. Výkon 40 W laseru je dostačený, aby při styku s tkání došlo k velmi rychlému popálení. Extrémní je v tomto případě riziko oslepnutí. Během experimentů s laserem je vždy třeba nosit ochranné brýle, které záření laseru nepropustí. U CO<sub>2</sub> laserů navíc nelze paprsek vidět okem, riziko kontaktu s ním se tak ještě zvětšuje.

Při dalším rozmyšlení konceptu F-Theta bude proto potřeba vyřešit odstínění paprsku a vhodné zakrytování jeho dráhy, aby se minimalizovalo riziko úniku záření ven ze stroje. Pozor je třeba dávat také na možnost ohřevu/natavení vnitřních součástí při poruše v důsledku koncentrace energie paprsku uvnitř tiskárny.

#### 5.1.2. Napětí na kontaktech laseru

Vysoké napětí  $U \cong 20 \text{ kV}$  na kontaktech laseru lze označit za druhé riziko. Kontakty je třeba vhodně odizolovat a při manipulaci se zdrojem laseru a jeho zapojováním si počínat opatrně. Riziko zásahu elektrický proudem roste i kvůli faktu, že je potřeba laser během používání chladit vodou.

### 5.2. Elektrická bezpečnost

Vzhledem k hojnému využití elektrických zařízení a elektroniky bude při stavbě tiskárny potřeba navrhnout a umístit ochranné prvky – pojistky a/nebo jističe. Toto platí obzvláště při užití vytápěné tiskové komory, kdy lze očekávat vyšší dodávané výkony (pravděpodobně více jak 1 kW). Pozornost je třeba zaměřit také na správnou a funkční izolaci všech spojů. Hliníková kostra rámu by měla být uzemněna, aby se zabránilo vzniku nebezpečných napětí na něm.

### 5.3. Rizika použití inertní atmosféry

Při použití inertní atmosféry během tisku je nutné buď 1) utěsnit prostor tiskové komory, aby nedocházelo k únikům dusíku (či jiného plynu) do okolí, anebo 2) při stabilním úniku plynu z neutěsněného stroje vytvořit podmínky k dostatečnému odvětrávání prostoru. Cílem v obou dvou případech je zamezit poklesu koncentrace kyslíku v atmosféře. Už 12% a nižší koncentrace kyslíku způsobuje ztrátu vědomí [11]. Riziku se v tomto případě dá předcházet také čidly hlídajícími obsah kyslíku v okolním vzduchu.

## 5.4. Riziko popálení

Za další riziko lze označit riziko popálení při použití vyhřívané komory. Vzhledem k teplotám okolo 150 °C je nutné se vyvarovat přímému kontaktu s horkými částmi stroje. Buď je možné použít ochranné pomůcky, jako například rukavice, nebo lze vždy po tisku vyčkat na vychladnutí stroje.

## 5.5. Manipulace s práškem

Zdravotním rizikem při kontaktu s práškem může být jeho vdechnutí. Tomu lze zamezit použitím vhodného respirátoru. Při manipulaci s práškem je třeba zabránit víření, které by mohlo vést ke vznícení oblaku zrn materiálu. V tomto ohledu představují riziko také výboje statické elektřiny.

## 6. Experiment

Vzhledem ke komplexnosti celého zařízení usuzuji, že postavit funkční prototyp SLS tiskárny by znamenalo jít daleko za rámec této bakalářské práce, a to jak technicky, tak časově. Ovšem považuji za důležité provést experiment, jenž by nasimuloval a ověřil možnost sintrování na laserové řezačce.

### 6.1. Test spečení plastového prášku PA2200

Podstatu SLS zařízení tvoří spékání plastového prášku CO<sub>2</sub> laserem. X-Y variantou SLS tiskárny jsem ukázal, že funkční zařízení lze postavit na základě standardní laserové řezačky. Cílem této zkoušky je ověřit, že prášek půjde spéci i na neupravené řezačce. Předpoklady tomu tak napovídají, neboť laserový paprsek je shodný jak s průmyslovými stroji, tak s OpenSLS strojem.

K experimentu jsem využil zařízení na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky FS ČVUT. Jedná se o tzv. no-name brand, tedy produkt neznámého výrobce z Číny, odkud byla řezačka zakoupena.

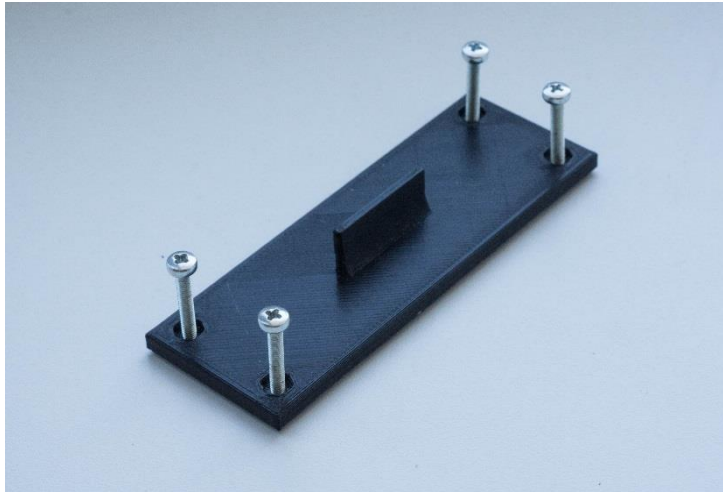
Standardní SLS tiskárny využívají tiskovou plochu pouze jako podporu materiálu, samotný tisk probíhá „do prášku“. První vrstva je tedy vyšší a laser svým teplem speče první sintrovanou vrstvu na povrchu tohoto základu.

Ve své práci se pokusím začít testy s přesně nanesenou vrstvou prášku, kde podklad pro tisk bude tvořit tisková plocha z jiného materiálu. Dále vyzkouším i metodu tisku „do prášku“ a oba výsledky srovnám.

#### 6.1.1. Stanovení parametrů experimentu

##### 6.1.1.1. Tloušťka vrstvy a vlivy použité tiskové plochy

Nutnou podmínkou tisku „na tiskovou plochu“ je potřeba zajistit správně vysokou a homogenní vrstvu prášku. Jako vhodná tloušťka vrstvy se jeví ~100 μm, neboť po takových vrstvách běžně probíhá tisk na průmyslových strojích. Správného nanesení jsem se pokusil



Obr. 17 – Plastová stěrka, původně zamýšlená k vytvoření vrstvy

docílit pomocí plastové stěrky (Obr. 17), vytištěné na FFF 3D tiskárně. Její funkci jsem zamýšlel následovně: pomocí pootočení čtyř šroubů M3 o známém stoupání 0,5 mm přesně nastavit výšku destičky nad povrchem a docílit tak vůle mezi tiskovou plochou a povrchem stěrky, díky níž by se dal rozvrstvit prášek.

Jak se ukázalo, tato konfigurace nebyla vhodná. Plastová stěrka se snadno prohýbala, což vedlo k nerovnoměrnostem ve vrstvě, a

kvůli příliš hrubému povrchu zanechávala rýhy v rozetřeném materiálu.

Druhou možností, jež se nabízela, bylo využít dvou desek, mezi něž jsem umístil prášek a krouživým pohybem ho rozetřel. Vrstva prášku by tak teoreticky měla dosáhnout rozměru zrna, tedy přibližně 50 – 80  $\mu\text{m}$ . Komplikace pravděpodobně přinesl elektrický náboj, vzniknuvší třením mezi deskami a práškem. Tento jev vyústil ve zcela nepoužitelnou tiskovou vrstvu, která obsahovala mnoho „nakupenin“ a prázdných míst bez materiálu.

Finální řešení problému nakonec přineslo použití papírové lepicí pásky a polotovaru soustružnického nože s vyleštěným povrchem (Poldi – Radeco). Lepicí páska (o výšce jedné vrstvy cca 100  $\mu\text{m}$ ) byla nalepena ve dvou vrstvách ( $\sim 200 \mu\text{m}$ ) po obou stranách tak, aby po ní nůž mohl klouzat a zároveň uprostřed – díky vůli mezi deskou a svou hranou – rozetřít vrstvu prášku (jedná se o obdobné řešení jako v případě plastové destičky, ovšem přesnější).

Zásadní proměnnou celého experimentu se ukázala volba materiálu tiskové plochy. Vzhledem k přítomnosti vrstvy přímo na ploše je třeba počítat s dvěma jevy:

- 1) S interakcí laseru s tiskovou plochou
- 2) S rozdílným únikem tepla (v závislosti na míře kondukce<sup>15</sup>) ze sintrované vrstvy, a tedy i s rozdílným zahříváním plastového prášku

<sup>15</sup> Konvekci v tomto případě zanedbávám.

Testovány byly tři druhy materiálů tiskové plochy, každý o jiné teplotě tání a součiniteli tepelné vodivosti:

| <b>Materiál</b>                 | <b>Teplota tání <math>t_f</math> [°C]</b> | <b>Součinitel tepelné vodivosti <math>\lambda</math> při 20 °C [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]</b> |
|---------------------------------|---|--|
| <b>1)</b> PMMA (plexisklo)      | 160                                       | 0,19   |
| <b>2)</b> Sklo (sodno-vápenaté) | 500-600                                   | 1,35   |
| <b>3)</b> Hliník                | 660                                       | 237  |

Tab. 1 – Charakteristiky materiálů tiskových ploch

### 6.1.1.2. Vliv výkonu laseru a rychlosti posuvu

Laserová řezačka byla osazena laserem o výkonu 80 wattů. Z popisu zkušeností při ovládání stejného druhu laseru vyplývá, že nelze úplně regulovat výkon laseru [8]; existuje hranice, pod níž se laser již nespustí. V mém případě se tato hranice pohybovala na hodnotě 10 % výkonu. (Je ovšem otázkou, zda nastavená hodnota výkonu skutečně odpovídá výstupu. Dle zkušenosti zaměstnance ČVUT, který s laserem pracuje, tomu tak není a navíc skutečný výkon laseru v oblasti nižších výkonů nestoupá lineárně se zvyšující se zadanou hodnotou v procentech.)

Vnesené teplo do materiálu je krom výkonem ovlivněno dobou expozice paprskem. Tuto proměnnou lze měnit skrze volbu rychlosti posuvu X-Y ( $v_{max} = 250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ). V tomto případě změna nastavení rychlosti odpovídá skutečné změně. Toto tvrzení jsem ověřil měřením času, za nějž laserová hlava přejede danou dráhu.

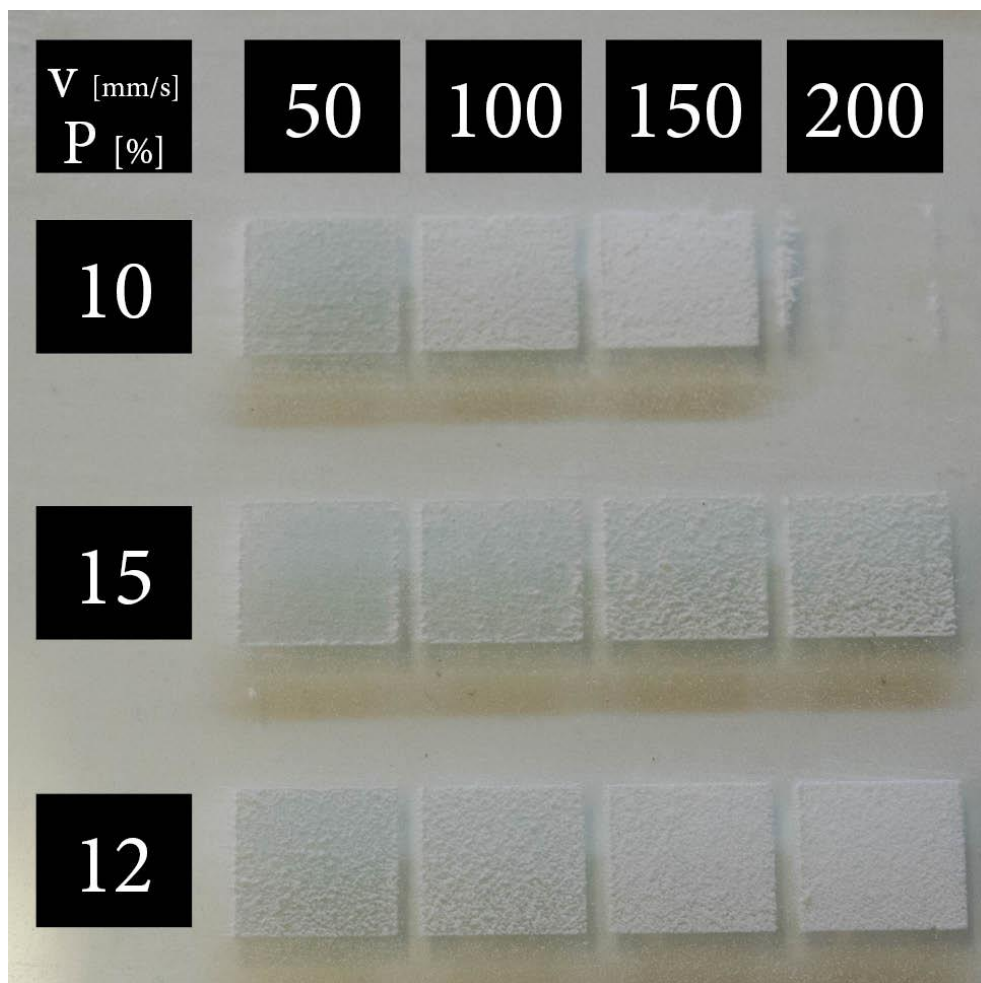
### 6.1.2. Provedení experimentu

Sintrování prášku proběhlo po vzorcích ve tvaru čtverce o straně 10 mm, v případě PMMA a skla na rastru o počtech prvků 3x4, kde se měnily hodnoty posuvu a nastaveného výkonu (dobrou představu o konfiguraci přináší test na skleněné tabulce - Obr. 18).

Vzhledem k předpokladu příliš vysokého výkonu laseru jsem hodnotu počátečního výkonu volil co nejnižší, tedy 10 %. Rychlosti posuvu byly zvoleny napříč rozsahem řezačky.

|                |              |    |     |     |     |
|----------------|--------------|----|-----|-----|-----|
| <b>1. část</b> | Posuv [mm/s] | 50 | 100 | 150 | 200 |
|                | Výkon [%]    | 10 | 10  | 10  | 10  |
| <b>2. část</b> | Posuv [mm/s] | 50 | 100 | 150 | 200 |
|                | Výkon [%]    | 15 | 15  | 15  | 15  |
| <b>3. část</b> | Posuv [mm/s] | 50 | 100 | 150 | 200 |
|                | Výkon [%]    | 12 | 12  | 12  | 12  |

Tab. 2 - Parametry nastaveného posuvu a výkonu pro plastovou a skleněnou tiskovou plochu



Obr. 18 – Sintrování na skle - rozložení parametrů během pokusu. Zleva doprava se mění posuv, čísla vlevo uvádějí výkon v procentech. S

Druhá volba výkonu - 15 % - se svým výsledkem jevila jako příliš vysoká, třetí část testu byla proto provedena s 12% výkonem. Pro hliníkovou tiskovou plochu jsem vykonal dva experimenty. V nich byla provedena pouze jedna série čtverců, a to při 12% výkonu (posuv laseru se opět měnil v pravidelných intervalech). Volba nastavení výkonu vzešla z předchozího pokusu na skle jako nejvýhodnější pro opticky nejlepší sintrování.

| Hliník | Posuv [mm/s] | 50 | 100 | 150 | 200 |
|--------|--------------|----|-----|-----|-----|
|        | Výkon [%]    | 12 | 12  | 12  | 12  |

Tab. 3 - Nastavení posuvu a výkonu pro hliníkovou tiskovou

Vzniklé vzorky měly opět tvar čtverce o straně 10 mm.

V prvním případě (AI-A) jsem se pokusil vytvořit tenkou vrstvu prášku (~200  $\mu\text{m}$ , stejně jako v případě pokusu na skle), ve druhém (AI-B) jsem prášek navrstvil tak, abych docílil spečení co nejvyšší vrstvy, která by nebyla omezena tiskovou plochou. (Tato konfigurace tedy simuluje

provoz na průmyslových strojích.) Získám zároveň představu, jak tlustou vrstvu dokáže laser při daných parametrech spéci a také, jak kvalitní strukturu bude tato vrstva vykazovat.

### 6.1.3. Výsledky experimentu

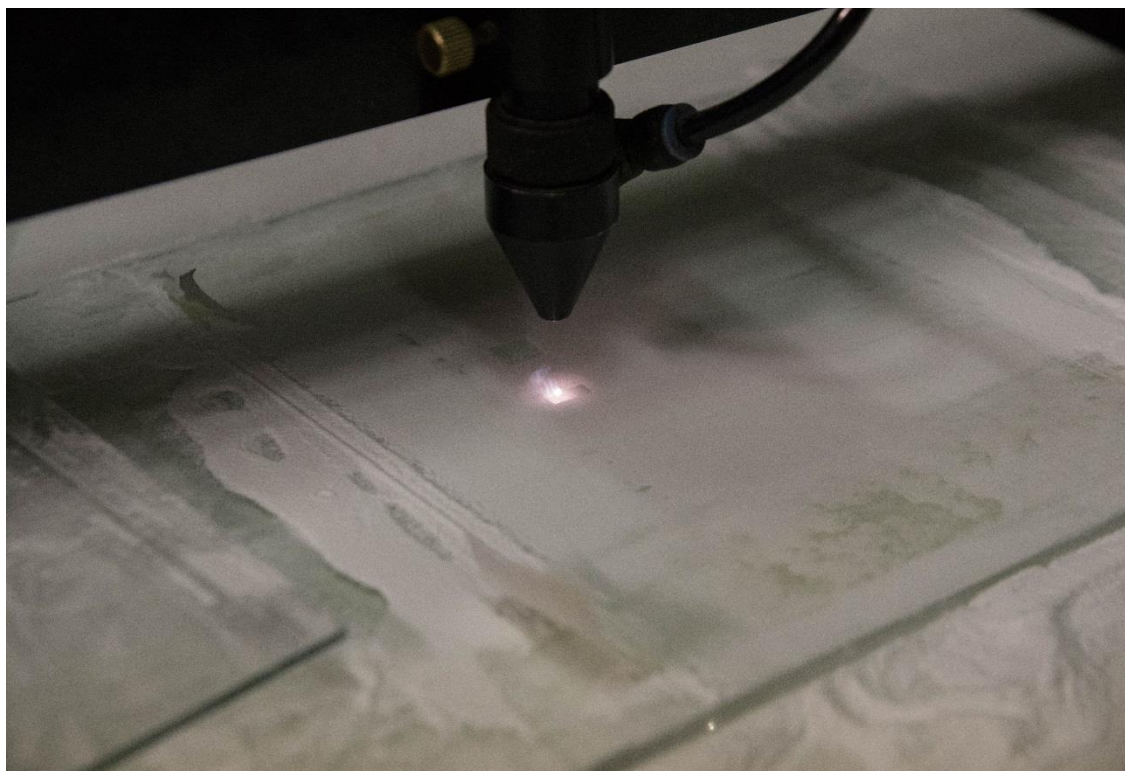
Po provedení zkoušek na třech různých tiskových plochách lze konstatovat následující:

#### 6.1.3.1. Plexisklo – PMMA

Plexisklo je ke spékání zcela nevhodné. Vrstva prášku se na něm nedá správně rozetřít a jeho vysoká pohltivost laserového záření spolu s nízkou teplotou tání  $t_t$  způsobuje tavení tiskové plochy (k tomuto procesu přispívá také nízký odvod tepla z materiálu – viz součinitel  $\lambda$  v odst. 6.1.1.1.).

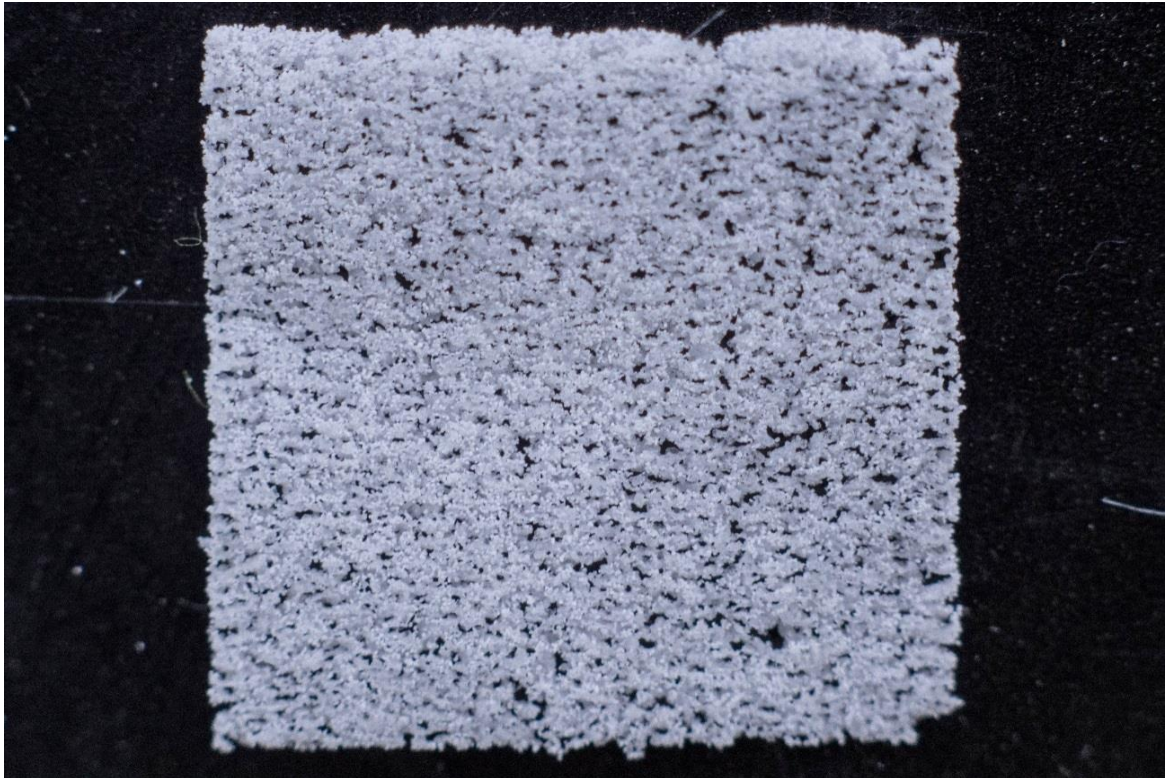
#### 6.1.3.2. Sklo

Sintrování na skle (Obr. 18) vedlo k na první pohled lepšímu výsledku než u PMMA. Bližší zkoumání ovšem ukázalo, že struktura vrstvy vykazuje značnou pórovitost, a to u všech zkušebních čtverců – spečená zrna prášku byla viditelně dál od sebe. Pokus odloupnout vzorky z tiskové plochy skončil neúspěchem, žádný z nich nevytvořil kompaktní formu. Místo toho, aby zrna vytvořila vazby mezi sebou, měla tendenci přilnout ke sklu.

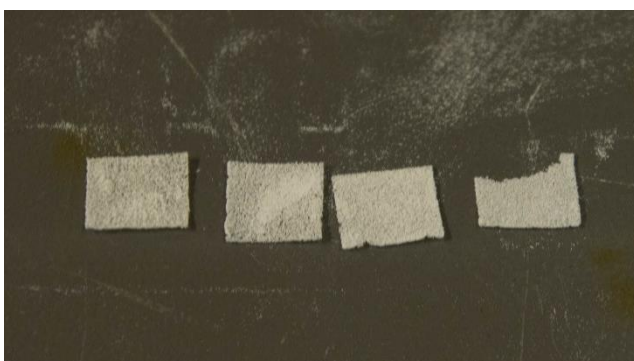


Obr. 19– Vznícení plastového prášku během spékání (chybějící inertní atmosféra)

Je pravděpodobné, že svou roli zde sehrálo více faktorů. Sklo nevede příliš dobře teplo (viz  $\lambda$ ), čímž by se dalo vysvětlit přilnutí prášku k tiskové ploše (vlivem vysokého nahromaděného tepla mohlo dojít k lokálnímu natavení prášku). Pórovitost materiálu může být zapříčiněna dvěma vlivy. Jak bylo zmíněno výše, pravděpodobný vznik statického náboje mohl způsobit nevhodné rozvrstvení prášku a tím nekvalitní spečení. Druhým možným jevem je oxidace. Vzhledem k chybějící ochranné atmosféře inertního plynu se u vyšších výkonů mohla projevit jako hoření, jak zobrazuje Obr. 19 (oxidace mohla být opět důsledkem nízké míry vedení tepla sklem).



Obr. 21 – Detail vzorku o tloušťce 0,3 mm ze série Al-A



Obr. 20 – Pokus Al-A

Výsledek použití skla jako tiskové plochy nevedl k úspěšnému spečení plastu. Kombinací nízké tepelné vodivosti skla, nedokonalého rozvrstvení prášku a chybějící ochranné atmosféry se ani v jednom případě nepodařilo vytvořit homogenní vrstvu spečeného prášku.

#### 6.1.3.3. Hliník

Tisk tenké vrstvy na hliníkové tiskové ploše (pokus Al-A) již vedl k lepšímu výsledku. Spečené vzorky se z tiskové plochy daly snadno



odloupnout a nerozpadaly se. Bližším pohledem bylo možné vyzorovat, že jejich povrch opět vykazuje nehomogenitu a je pórovitý.

Tisk „do prášku“ (Al-B) - Obr. 22. Spečená vrstva plastu se vlivem teplotních rozdílů zkroutila. (U předešlých pokusů vrstva přilnula k tiskové ploše.)

Opticky vzorky vykazovaly menší nehomogenitu a pórovitost než vzorky Al-A. Spečená vrstva prášku také méně praskala při manipulaci.

Překvapivé výsledky přineslo měření tloušťky sintrovaných vzorků. Posuvným měřítkem s noniem jsem získal následující data:

| Posuv [mm/s] | 50   | 100  | 150  | 200  |
|--------------|------|------|------|------|
| Al-A [mm]    | 0,35 | 0,30 | 0,28 | 0,20 |
| Al-B [mm]    | 0,45 | 0,35 | 0,30 | 0,20 |

Tab. 4 – porovnání tloušťky spečené vrstvy při tisku „na plochu“ (Al-A) a „do prášku“ (Al-B)

Z dat Al-A vyplývá, že předpoklad tloušťky nanesené vrstvy ~200  $\mu\text{m}$  naplněn nebyl. Přisuzuji to nepřesnému ručnímu nanesení vrstvy.

Z měření tlouštěk vrstev je obecně patrné, že se zvyšující se rychlostí posuvu klesá množství vneseného tepla a tím se snižuje hloubka spečení materiálu. U série Al-B (tedy sintrování „do prášku, obdobně jako na průmyslových strojích) jsem dosáhl maximální tloušťky sintrované vrstvy 0,45 mm. Minimální tloušťka vzorku 0,2 mm se již blíží běžně používaným nastavením (0,1 - 0,15 mm - viz Příloha 1).

#### 6.1.4. Závěry z experimentu

Podářilo se ověřit, že plastový prášek PA 2200 skutečně lze spéci na laserové řezačce, tedy stroji, který umožňuje adaptaci na 3D tiskárnu. Experiment ukázal, že výsledek při využití tiskové plochy jako podložky přímo pro sintrovanou vrstvu závisí na materiálu plochy. PMMA a sklo se v tomto případě ukázaly jako nevhodné varianty, hliníková podložka vzhledem k vyšší teplotě tání a zároveň vyššímu součiniteli vedení tepla fungovala lépe.



Obr. 22 – Pokus Al-B – tisk „do prášku“

Považuji za nutné zdůraznit, že výsledky tisku jsou zcela zásadně ovlivněny teplotou spékaného prášku. Pokud by se jeho teplota před sintrováním nacházela v rozmezí „sintrovacího okna“ – jak je tomu na průmyslových strojích, výkon laseru potřebný k vzestupu teploty prášku by byl mnohem menší. V takovém případě bych považoval za zbytečné pokračovat v pokusech na tomto stroji,

neboť 80 W laser vykazuje příliš vysokou hranici spuštění a i nejmenší výkon by pravděpodobně vnesl více tepla, než by bylo potřeba.

Zajímavé je porovnání mezi pokusy Al-A a Al-B. Při použití tiskové plochy jako podkladu vznikly vzorky s mnoha póry, zatímco při tisku „do prášku“ byla vrstva jednoznačně homogennější. Po prvním zamyšlení nad tímto jevem by se dalo usuzovat, že se v případě tisku „do prášku“ speklo více materiálu a že tedy byla zaplněna ona hluchá místa.

Tab. 4 ovšem ukazuje, že kvůli nepřesnému nanesení vrstvy plastu byla spečená vrstva vyšší i v případě Al-A a že tedy nešlo čistě o tisk na tiskovou plochu. Srovnatelné tloušťky vrstev tedy nepřinesly srovnatelnou kvalitu tisku. Je možné, že byl tento jev zapříčiněn způsobem nanášení prášku na tiskovou plochu, kdy zatímco u Al-A byl prášek pečlivě rozetřen zmíněným polotovarem soustružnického nože, u Al-B byla nanesená, podstatně tlustší, vrstva pouze jemně uhlazena plastovou stěrkou. Je tedy možné, že v případě Al-A došlo k nehomogennímu nanesení vrstvy prášku a tedy k pórovitým výsledkům experimentu.

Rozdíl v mém experimentu a SLS tisku na strojích tomu určených tkví především v absenci vhodných tiskových podmínek - teplota spékaného prášku se rovnala teplotě okolí a tisk neproběhl v inertní atmosféře. Okem patrné nehomogenity u všech vzorků tak mohly být způsobeny těmito odlišnostmi.

## 7. Závěr

V této bakalářské práci jsem teoreticky popsal dva přístupy ke konstrukci 3D SLS tiskárny plastů. U obou dvou metod jsem využil reálné příklady k detailnějšímu vysvětlení. Dále jsem navrhl základní koncepci SLS stroje, která využívá jednu z metod, a to technologii používanou v průmyslových zařízeních. Tato konstrukce byla navržena s ohledem na cenu a možnost pořízení stroje do domácích podmínek. Návrh jsem detailněji popsal v náčrtu a v kusovníku základních částí stroje (oboje součástí přílohy).

Po zamyšlení se nad konstrukčními výzvami a jejich možnými řešeními jsem dospěl k celkové ceně tiskárny, která činí 55 000 Kč.

V teoretické části práce jsem dále objasnil problematiku materiálů a dějů během tisku. Nastínil jsem také některá bezpečnostní rizika, která mohou nastat při stavbě či provozu tiskárny.

V praktické části jsem na běžně užívaném plastovém prášku PA2200 ověřil možnost jeho spečení na laserové rezačce. Základními měřeními jsem analyzoval vzniklé vzorky a zamýšlel se nad vlivem tiskových parametrů na výsledek pokusu.

Věřím, že tato práce poslouží jako základ pro další zkoumání a že její obsah a struktura přinese neinformovanému čtenáři základní vhled do problematiky SLS strojů.

A abych dostal svému závazku a odpověděl na otázku, která svou podstatou tvořila zadání této práce: Ano, zdá se, že sestavit a provozovat SLS tiskárnu v amatérských podmínkách je možné. Při konstrukci tiskárny bude potřeba překonat některé obtíže a výzvy, nicméně jejich složitost a cena se nejeví jako nepřekonatelné překážky.

## 8. Seznam zdrojů

- [1] C. Barnatt, 3D Printing Third Edition, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.
- [2] C. R. Deckard, „Apparatus for producing parts by selective sintering“. Spojené státy americké Patent US5597589A, 10. října 1986.
- [3] Wikipedia, „Wikipedia RepRap project,“ [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap\\_project](https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_project). [Přístup získán 8. Května 2018].
- [4] G. EOS, „Prospekt modelu P 385,“ 2006. [Online]. Available: [https://web.archive.org/web/20050826161230/http://www.eos.info:80/9/9\\_inma/9\\_inma\\_e/020300\\_info\\_p385.pdf](https://web.archive.org/web/20050826161230/http://www.eos.info:80/9/9_inma/9_inma_e/020300_info_p385.pdf). [Přístup získán 23. Května 2018].
- [5] W. M. Steen, Laser Material Processing, Springer-Verlag London Limited, 2003.
- [6] S. M. Goldwasser, „Types and Excitation of CO2 Lasers,“ [Online]. Available: <https://www.repairfaq.org/sam/laserco2.htm>. [Přístup získán 12 Června 2018].
- [7] J. Montagu, „Galvanometric and Resonant Scanners,“ v *Handbook of Optical and Laser scanning*, CRC Press, 2012.
- [8] I. K. Andreas, „RepRap Wiki (OpenSLS),“ [Online]. Available: [http://reprap.org/wiki/OpenSLS#Powder\\_Module](http://reprap.org/wiki/OpenSLS#Powder_Module). [Přístup získán 23. Dubna 2018].
- [9] e. a. Schmid, „Materials perspective of polymers for additive manufacturing with selective laser sintering,“ Materials Research Society, 2014.
- [10] e. a. Wei Zhu, „Study on the selective laser sintering of a low-isotacticity polypropylene powder,“ *Rapid Prototyping Journal*, pp. 621-629, 2015.
- [11] 3DSystems, „HIQ and 2500 User Guide,“ [Online]. Available: <http://infocenter.3dsystems.com/product-library/sls/hiq-and-2500>. [Přístup získán 11. Června 2018].
- [12] K. Barat, Laser Safety - Tools and Training, CRC Press, 2009.
- [13] S. F. Sagan, „Optical Systems for Laser Scanners,“ v *Handbook of Optical and Laser scanning*, CRC Press, 2012.
- [14] „Laser Focus World (Obr. skenovací jednotky),“ [Online]. Available: <https://www.laserfocusworld.com/articles/2008/04/optical-materials-silicon-carbide-mirrors-benefit-high-speed-laser-scanning.html>.

- [15] ASKMT, „Hliníkové profily,“ [Online]. Available: <https://www.askmt.com/stranka-exit-227>. [Přístup získán 9. Června 2018].
- [16] B. Morris, „GRABCAD,“ [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/kossel-delta-configuration-3d-printer-1#!>. [Přístup získán 25. Dubna 2018].
- [17] I. Thorlabs, „F-Theta Lenses Tutorial,“ [Online]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=10766](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10766). [Přístup získán 9. Června 2018].
- [18] LightObject, „SPT C130 130W CO2 Sealed Laser Tube,“ [Online]. Available: [lightobject.com](http://lightobject.com). [Přístup získán 14. Června 2018].
- [19] e. a. J-P Kruth, „Binding mechanisms in selective laser sintering,“ *Rapid Prototyping Journal*, pp. 26-36, 2005.
- [20] e. a. Bourell, „Performance limitations in polymer laser sintering,“ 2014.

## 9. Seznam příloh

Příloha 1 – Kusovník základních částí SLS tiskárny

Příloha 2 - Návrh koncepce SLS tiskárny

# Příloha 1 – kusovník základních částí SLS tiskárny

Včetně ceny a obchodu

| #                  | Součást                     | Označení         | Obchod                                      | Cena/kus [Kč] | Počet kusů | Cena [Kč] | Poznámka   |
|--------------------|-----------------------------|------------------|---|---------------|------------|-----------|--|
| 01                 | Laser                       | TONGLI TLC700-50 | Cloutray (Aliexpress.com)                   | 2589          | 1          | 2589      | CO <sub>2</sub> , 40w  |
| 02                 | Zdroj laseru                | MYJG 40WT-B      | Cloutray (Aliexpress.com)                   | 940           | 1          | 940       | Vysokonapěťový zdroj laseru  |
| 03                 | F-Theta objektiv            | LP-210-F300-10.6 | LaserPower Technology<br>(Alibaba.com)      | 3270          | 1          | 3270      | f = 300mm, 210x210mm   |
| 04                 | Galvanometry s kontrolérem  | BCX-part         | Chulei laser<br>(Aliexpress.com)            | 4360          | 1          | 4360      | Se zrcátky pro vln. délku 10.6 um  |
| 05                 | Vodní čerpadlo              | Kraftproz        | Kobras.cz                                   | 514           | 1          | 514       | Chlazení laseru  |
| 06                 | Hliníkové profily           | 8 40x40 L        | ASKMT                                       | 312           | 43,2       | 13478     | Cena za metr - Profil s drážkou 8mm (sestavta viz. náčrtek).               |
| 07                 | Krokový motor               | NEMA17-4401      | Shenzhen Hanpose<br>LinkCNCStore            | 937           | 1          | 937       | 400mNm, 5ks  |
| 08                 | Zavitová tyč                | T12              | (Aliexpress.com)                            | 196           | 3          | 589       | T12x8 (P2), 4-chodý trepézový závit  |
| 09                 | Řídící desky                |                  |   | 3000          | 1          | 3000      | Odhad elektroniky - řízení zrcátek, vytápění a výměny vrstvy prášku        |
| 10                 | Zdroj                       | E-400-24         | Shenzhen Espace Trading<br>(Aliexpress.com) | 516           | 1          | 516       | Zdroj pro kontroléry a krokové motory                                      |
| 11                 | Kabely a spojovací materiál |                  |   | 4000          | 1          | 4000      | Odhad ceny kabelů a spojovacího materiálu                                  |
| 12                 | 3D vyčištěné součásti       |                  |   | 1000          | 1          | 1000      | Odhad spotřebovaného materiálu pro vyčištěné díly (cca 2 kg)               |
| 13                 | Rezerva                     |                  |   | 20000         | 1          | 20000     | Odhad nezahrnutých položek - opláštění, izolace, vyhřívání, práškový modul |
| <b>Cena celkem</b> |                             |                  |   | <b>55193</b>  | <b>Kč</b>  |           |  |

## Příloha 2 – Návrh koncepce SLS tiskárny

