



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní  
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**Vyhodnocení mechanických vlastností materiálu vyrobeného pomocí  
technologie 3D tisku**

**Evaluation of the mechanical properties of the material produced using 3D  
printing technology**

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství  
Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

**Bc. Jaroslav Schweiner**

ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Akademický

rok: 2017/2018

---

**Praha 2018**

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Jaroslava Schweinera**

Program: Strojní inženýrství

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Vyhodnocení mechanických vlastností materiálu vyrobeného pomocí technologie 3D tisku

Název anglicky: Evaluation of the mechanical properties of the material produced using 3D printing technology

## **Zásady pro vypracování:**

1. 3D tisk – spékání kovového prášku.
2. Návrh stavební palety.
3. Vyhodnocení mechanických vlastností.

### **Prohlášení o autorství:**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr navazujícího magisterského studia Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu

Praha dne:

.....

Podpis studenta

### **Prohlášení o udělení souhlasu s užitím:**

Podle § 60 zákona č.121/2000 Sb., O právu autorském a právu souvisejícím s právem autorským, O studiu na vysokých školách a zákona o závěrečných zkouškách, je diplomová práce duševním spoluvlastnictvím autora, vedoucího diplomové práce a Fakulty strojní ČVUT. Citace povoluje fakulta. Podmínkou externího použití je smlouva s řešiteli.

**Poděkování:**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Janu Šimotovi za spoustu cenných rad a stráveného času při vedení a tvorbě mé diplomové práce a Zdeňku Pitrmucovi za pomoc při přípravě vzorků. Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za pomoc a konzultaci při realizaci mechanických zkoušek a panu Ing. Jakubu Horníkovi, Ph.D. Dále děkuji kolegovi Ing. Miroslavu Ivankovi za konzultace ohledně 3D tisku a poskytnuté materiály.

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**

Obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

Název diplomové práce: **Vyhodnocení mechanických vlastností materiálu vyrobeného pomocí technologie 3D tisku**

Autor diplomové práce: **Jaroslav Schweiner**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Šimota**

Rozsah diplomové práce:	Počet stran:	81
	Počet obrázků:	70
	Počet grafů:	9
	Počet tabulek:	21
	Počet příloh:	1 CD

**Anotace:**

Diplomová práce se zabývá porovnáním mechanických vlastností vzorků vytištěných v různé orientaci na 3D kovové tiskárně. Zároveň práce porovnává dvě 3D tiskárny, které pracují na principu Selective Laser Sintering. Stroje značky Trumpf a Concept Laser jsou ve standardním nastavení od výrobce bez dodatečných parametrových úprav. Porovnávají se dosažené výsledky tisku s tabulkovými parametry. Zkoušení vzorků je zkouškou rázem v ohybu dle Charpyho. V práci se také objevuje analýza trhu České Republiky. Týká se počtu a zastoupení jednotlivých výrobců 3D kovových tiskáren fungujících na principech podobných SLS metodě a jejich zastoupení v průmyslu a na vysokých školách a univerzitách.

**Klíčová slova: 3D kovová tiskárna, Selective Laser Sintering, Trumpf, Concept Laser, zkouška rázem v ohybu dle Charpyho, 3D tisk ČR**

**CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE**  
**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Field of study: **Technology, material engineering and economics**

Diploma thesis: **Evaluation of the mechanical properties of the material produced using 3D printing technology**

Author: **Jaroslav Schweiner**

Supervisor: **Ing. Jan Šimota**

Extent of diploma thesis:	Number of pages:	81
	Number of pictures:	70
	Number of graphs:	9
	Number of tables:	21
	Number of attachments:	1 CD

**Abstract:**

This diploma thesis deals with the comparison of mechanical properties of samples printed in various orientations on a 3D metal printer. At the same time, the work compares two 3D printers that work on the principle of Selective Laser Sintering. Trumpf and Concept Laser machines are in default factory settings without additional parameter modifications. They compare the results of printing with table parameters are achieved. Sample testing is a bending test according to Charpy. The thesis also shows an analysis of the Czech Republic market. It concerns the number and representation of individual manufacturers of 3D metal printers operating on SLS-like principles and their representation in industry and universities and universities.

**Keywords: 3D metal printer, Steel, Selective Laser Sintering, Trumpf, Concept Laser, Charpy Impact Bending Test, 3D Print in Czech Republic**

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>3D tisk .....</b>	<b>11</b>
2.1.1	3D model.....	11
<b>2.2</b>	<b>Materiály 3D tisku.....</b>	<b>12</b>
2.2.1	Hliníkové slitiny.....	12
2.2.2	Titanové slitiny.....	12
2.2.3	Niklové slitiny.....	13
2.2.4	Slitiny mědi .....	13
2.2.5	Kobalt-chromové slitiny.....	14
2.2.6	Ocelové slitiny.....	14
<b>2.3</b>	<b>Technologie 3D tisku .....</b>	<b>16</b>
2.3.1	Rozdělení technologií .....	17
<b>2.4</b>	<b>3D tisk kovů v ČR.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>3D tisk kovů na VŠ a univerzitách a výzkumných institutech v ČR.....</b>	<b>22</b>
2.5.1	ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta strojní.....	22
2.5.2	TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace .....	23
2.5.3	VYSOKÁ ŠKOLA BĀŇSKÁ V OSTRAVĚ .....	24
2.5.4	VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ BRNO, NETME Centre .....	24
2.5.5	ZĀPADOČESKĀ UNIVERZITA V PLZNI, New Technologies Research Censtre (NTC)/RTI.....	25
2.5.6	UNIVERZITA PALACKĚHO V OLOMOUCI .....	25
<b>3</b>	<b>3D TISKĀRNA .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Rizika práce a bezpečnost práce .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Časová náročnost.....</b>	<b>26</b>

<b>3.3</b>	<b>Problematika stavby modelu</b>	<b>27</b>
3.3.1	Optimalizace součástí	28
3.3.2	Optimalizace technologická	29
<b>3.4</b>	<b>Porovnání LMF vs LMD</b>	<b>30</b>
3.4.1	Porovnání	30
3.4.2	Laser metal fusion (LMF)	30
3.4.3	Laser metal deposition (LMD)	31
<b>3.5</b>	<b>Trumpf TruPrint 1000</b>	<b>31</b>
3.5.1	Parametry 3D tiskárny	32
3.5.2	Popis tiskárny	32
<b>4</b>	<b>3D TISK</b>	<b>35</b>
4.1	Příprava tiskárny před tisknutím	35
4.2	Nanášení kovového prášku	36
4.3	Spékání prášku	37
4.4	Princip expozice, parametry tisku	38
4.5	Porovnání Trumpf TruPrint 1000 vs. Concept Laser M2 Cusing	40
<b>5</b>	<b>NÁVRH EXPERIMENTU</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelování</b>	<b>41</b>
5.1.1	Návrh pracovní palety pro rázovou zkoušku - SolidWorks	41
5.1.2	Práce se softwarem NX	43
<b>5.2</b>	<b>Tisk</b>	<b>44</b>
5.2.1	Nahrání součásti do tiskárny	44
5.2.2	Samotný tisk	45
5.2.3	Vyjmutí součásti	45
<b>5.3</b>	<b>Vyhodnocení 3D tisku, report</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>POSTPROCESING</b>	<b>48</b>
<b>6.1</b>	<b>Odříznutí vzorků</b>	<b>48</b>



6.2	Tepelné zpracování .....	48
6.3	Broušení vzorků .....	48
7	<b>VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....</b>	<b>50</b>
7.1	<b>Kontrola rozměrů.....</b>	<b>50</b>
7.1.1	Výsledky měření.....	50
7.2	<b>Měření drsnosti .....</b>	<b>51</b>
7.2.1	Výsledky měření.....	51
7.3	<b>Zkouška porozity.....</b>	<b>55</b>
7.3.1	Tomograf.....	55
7.3.2	Výsledky porozit vzorků .....	59
7.4	<b>Rázová zkouška v ohybu.....</b>	<b>61</b>
7.4.1	Zkouška rázem v ohybu metodou dle Charpyho .....	61
7.4.2	Výsledky zkoušky .....	62
7.4.3	Vyhodnocení lomové plochy vzorků.....	64
8	<b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PRÁCE.....</b>	<b>68</b>
8.1	<b>Materiálové náklady .....</b>	<b>68</b>
9	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>70</b>
10	<b>SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>73</b>
11	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>77</b>
12	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>80</b>
13	<b>SEZNAM GRAFŮ.....</b>	<b>81</b>

# 1 ÚVOD

Kovový 3D tisk postupem času dostává v průmyslu své čestné místo a stále více společností a firem a to i světových formátů a velikostí, začíná využívat jeho výhody. Největší uplatnění nachází kovový 3D tisk v prototypové výrobě, ale čím dál více se dostává i do výroby sériové. Plastový 3D tisk se také primárně používá pro prototypovou výrobu, stejně tak se dostává do sériové výroby v široké míře, ale stále má své místo na hobby prototypové úrovni.

Na vrcholu průmyslu kovového 3D tisku je zdravotnictví, lidé sami do sebe investují vysoké částky a je zde značně vysoká přidaná hodnota na výrobek. Tyto výrobky vznikají na tiskárnách s malým stavebním prostorem. Dalším významným „hráčem“ na trhu 3D kovového tisku je obor letectví. V letectví jde konstruktérům hlavně o snižování hmotnosti a svazování jednotlivých komponent v jednolitě funkční kusy. Příkladem může být firma GE, která se snaží vývojově o kompletní topologickou optimalizaci leteckých motorů.

Práce je zaměřená na vliv anizotropie mechanických vlastností 3D vytisknutých kovových vzorků metodou Selective Laser Sintering. Porovnává výsledky tisku ve vertikální poloze a poloze horizontální a především porovnává výsledky tisku dvou odlišných strojů. Konkrétně laboratorní 3D tiskárnu na kov a tiskárnu průmyslovou.

Cílem práce je vyhodnocení mechanických vlastností z dat a výsledků získaných zkouškou rázem v ohybu pomocí Sharpyho kladiva. Zároveň práce ukazuje, jakým způsobem si tiskárny od dvou různých společností poradí s finálním výrobkem, jak moc se liší jeden od druhého, a jak moc se ve výsledku liší od parametrů, které daný výrobce před tiskem slibuje. Výrobky jsou vytištěné stejnou technologií kovového tisku Selective Laser Sintering a stejně tak metodika procesu stavby byla volena stejně. Byly nastaveny stejné základní parametry tiskárny.

V rámci vyhodnocení mechanických vlastností byla kontrolována i porozita materiálu kvůli jejímu možnému vlivu na výsledek mechanických zkoušek. Tisknutý vzorek by měl mít ideálně homogenní strukturu v celém objemu, aby bylo možné zanedbat vliv vnitřní struktury na výsledky mechanických zkoušek.

V práci se také objevuje detailní průzkum trhu týkající se počtu jednotlivých 3D kovových tiskáren pracujících na principech SLS, v rámci České Republiky a většiny technických univerzit a vysokých škol.

## **2 TEORETICKÁ ČÁST**

### **2.1 3D tisk**

3D tisk je aditivní způsob výroby trojrozměrných pevných předmětů na základě digitálního modelu. Počítačový model je rozložen do jednotlivých tenkých vrstev a následné sestavení skutečného modelu probíhá až ve stavebním prostoru tiskárny.

Vytvoření 3D tištěného předmětu je dosaženo za použití aditivních procesů. Dochází k přidávání materiálu, na rozdíl od klasického obrábění, kde dochází k úběru materiálu. Staví se po sobě jdoucí vrstvy materiálu jedna na druhou a model je vytvářen na základní desce. Základní deska po každém cyklu poklesne o tloušťku dané vrstvy, dokud není vytvořen celý objekt. Objekt pak může být vytvořen vrstvu po vrstvě. Vrstva od vrstvy jsou téměř nerozeznatelné a trojrozměrný vytvořený objekt vypadá celistvě. [7],[8],[14]

Technologie 3D tisku je zařazovaná zatím nejčastěji do prototypové a malosériové výroby forem a jader pro odlitky. Stále častěji se ale dostává i do výroby sériové a to hlavně díky kovovému 3D tisku do lékařství, letectví i automobilového průmyslu. [4], [7], [33]

#### **2.1.1 3D model**

Jako první ze všeho je nutné vytvořit virtuální model předmětu, který se má tisknout. Virtuální návrh vzniká buď za pomoci 3D modelovacího CAD (Computer Aided Design) programu, nebo využitím 3D skeneru. Pokud se vytváří zcela nový předmět, je nutné si tento předmět navrhnout v CAD programu, zatímco díky 3D skeneru se může vytvářet digitální kopie již existujícího předmětu. Veškerá data jsou uložena a zálohována v digitální formě a jsou neustále připravena k použití. [7],[8],[14], [33]

3D skener slouží k rychlé digitalizaci reálných dílů. Tato výstupní data jsou dále lehce zpracovatelná a výstupem je 3D formát .STL. 3D skenování nachází uplatnění v reverzním inženýrství, při kontrole rozměrů, při digitalizaci, ve 3D tisku a dalších oborech a technologiích. [17]

Pro vytváření digitálního modelu 3D modelováním se používají CAD softwary. Digitální soubor pro tisk, 3D model, je rozvrstven do stovek nebo tisíců vodorovných vrstev a tak nahrán do tiskárny. [7], [17]

## 2.2 Materiály 3D tisku

K 3D tisku se používají různé materiály, od plastů až po beton v závislosti na technologii tisku. Pro průmyslové využití a zejména na spékání prášku se nejvíce používají kovové materiály. Nejčastější jsou následující:

### 2.2.1 Hliníkové slitiny

#### AlSi10Mg-A LMF a AlSi12-A LMF

Jedná se o materiály na bázi hliníku, které jsou předem legované a dobře odolné vůči korozi. Nevýhodou AlSi12 je, že se nedá dále vytvrzovat. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Dobrá pevnost a tvrdost,  
dobré slévárenské vlastnosti,  
vysoká odolnost vůči korozi,  
odolnost vůči nárazovému zatížení. [15]

**Použití:**

Automobilový průmysl,  
letecký průmysl a kosmonautika,  
strojírenství - tenkostěnné díly. [15]

### 2.2.2 Titanové slitiny

#### Ti2-A LMF

Tento materiál vykazuje po vytvrzení ideální poměr pevnosti a hmotnosti a také dobrou tažnost. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Velmi dobrá vrubová houževnatost,  
dobrá odolnost vůči korozi,  
nízká tepelná roztažnost. [15]

**Použití:**

Letectví a kosmonautika,  
lékařství,  
šperkařství. [15]

### **Ti64 ELI-A LMF**

Jedná se o materiál na bázi titanu, který je předem legovaný Ti6Al4V a dobře odolný vůči korozi. Použitelný pro komerční i lékařské účely. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Relativně nízká hustota (ocel),  
vysoká pevnost,  
dobrá odolnost vůči korozi a oxidaci,  
biologická kompatibilita. [15]

**Použití:**

Lékařství,  
letectví a kosmonautika,  
energetika. [15]

### **2.2.3 Niklové slitiny**

#### **In718- A LMF**

Slitina vykazuje velmi dobrou pevnost v tahu, ohybu, tečení a trvalou pevnost až do teploty 650°C. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Odolnost vůči oxidaci až do 1000 °C,  
velmi dobrá svařitelnost. [15]

**Použití:**

Při vysokých teplotách,  
plynová potrubí,  
automobil. průmysl, letecký průmysl. [15]

### **2.2.4 Slitiny mědi**

#### **Bronz 90/10-A LMF**

Jedná se o bronzový prášek, který je předem legovaný. Díly vyrobené z tohoto prášku odpovídají složením nerezavějící bronzové slitině ISO CuSn10. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Vysoká roztažnost,  
dobrá odolnost vůči korozi. [15]

**Použití:**

Šperkařství, hodinářství. [15]

## 2.2.5 Kobalt-chromové slitiny

### Mediloy S-Co

Jedná se o materiál na bázi kobalto-chromové slitiny. Tento prášek byl vyvinutý pro použití v oblasti zubní techniky. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Velmi dobrá koroziodolnost,  
výborná biokompatibilita,  
velmi dobrá pevnost a tvrdost. [15]

**Použití:**

Rekonstrukce chrupu, zubní korunky,  
můstky, implantáty, ortopedie. [15]

### Kobalt-chrom CoCr-B

Je materiál, který je předem legovaný CoCr prášek. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Vysoce odolný v tahu a ohybu,  
vysoká odolnost vůči korozi (pasivace),  
dobrá biologická kompatibilita,  
vysoká odolnost vůči opotřebení. [15]

**Použití:**

Strojírenství,  
lékařství, implantáty,  
letectví a kosmonautika. [15]

## 2.2.6 Ocelové slitiny

### Nástrojová ocel 1.2709 LMF

Jedná se o předem legovaný prášek a díly vyrobené z tohoto prášku odpovídají složením nástrojové oceli 1.2709 (označovaná také maraging steel). Má velmi dobrou elektrickou vodivost. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Vysoká pevnost a tvrdost, dobrá tažnost,  
dobrá svařitelnost, nízké % C (0,03),  
precipitační vytvrzení,  
dobrá elektrická vodivost,  
obrobitelnost a leštitelnost. [15]

**Použití:**

Vhodné vysoce mech. namáhané díly,  
automobilový průmysl, letectví,  
výroba nástrojů. [15]

### Ušlechtilá ocel 630-A LMF

Ušlechtilá ocel 630 je předem legovaný materiál, který se podobá nejvíce konvenční oceli s označením 1.4542. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Velmi dobré mechanické vlastnosti,  
dobrá kujnost, odolnost vůči korozi. [15]

**Použití:**

Letectví, kosmonautika  
automobilový průmysl, strojírenství. [15]

**Ušlechtilá ocel 316L-A LMF**

Jedná se o práškový materiál, který se svým složením a finální výrobky podobají ušlechtilé oceli 1.4404. Prášek je předem legovaný. [15]

**Charakteristické vlastnosti:**

Velmi stálý materiál,  
vysoká odolnost vůči korozi – krycí vrstva obohacena o chrom,  
vysoká tuhost a tažnost,  
materiál bez fázových přeměn,  
precipitačně vytvrditelný. [15]

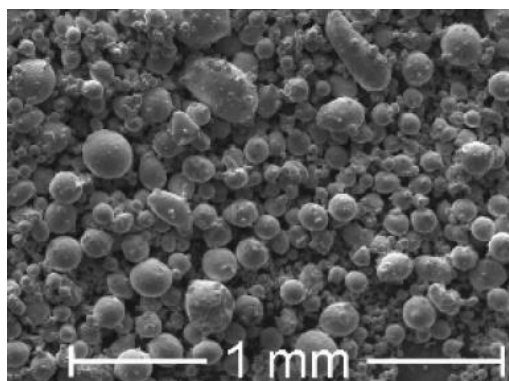
**Použití:**

Strojírenství,  
použitelný v agresivním korozním prostředí – stavba lodí,  
lékařská technika. [15]

*Tabulka 1 Mechanické a fyzikální vlastnosti AISI 316L*

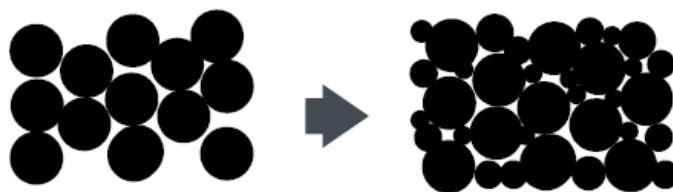
Vlastnost	316L – A LMF katalogové hodnoty	CL20ES katalogové hodnoty	Konvenčně vyrobený materiál
Mez kluzu Re [N/mm <sup>2</sup> ]	500	470	210
Mez pevnosti Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	515	570	515
Tažnost A [%]	35	>15	40
Youngův modul E [N/mm <sup>2</sup> ]	200.10 <sup>3</sup>	200.10 <sup>3</sup>	200.10 <sup>3</sup>
Tepelná vodivost λ [W/mK]	15	15	14
Tvrdost	20 HRC	20 HRC	<215 HB

Velmi jemný prášek, který při prvním pohledu vypadá, jako když teče. Kovový prášek může být po prosítí použitý znovu. Přebytek prášku se z přeřadové komory vloží do přesívačky a prosije se. Po prosítí vykazuje stejně dobré mechanické vlastnosti. Cena prášku je přibližně 500 Euro za 5 kg nádobu. [2],[5],[15]



Obrázek 1 Struktura materiálu

Jedná se o plynem atomizovaný prášek s nezoxidovaným povrchem. Zrnitost prášku se pohybuje v rozmezí 10 – 40  $\mu\text{m}$ . K tisku se používá právě zrnitost v určitém rozmezí pro lepší vyplnění objemu. Zrna jsou sférického tvaru a to zajišťuje maximální objemovou hustotu prášku v prostoru. [2],[4], [15]



Obrázek 2 Schématický obrázek zrnitosti prášku.[6]

Výroba takto jemného prášku je drahá a složitá. Pomocí atomizéru dostane roztavený kov jasně definovaný a požadovaný tvar kuliček, což je základní požadavek na tento prášek. Prosetím se získávají zrna o maximální povolené velikosti. [2],[5],[15]

### 2.3 Technologie 3D tisku

Ne všechny 3D tiskárny používají stejnou technologii. Existuje několik způsobů jak tisknout a všechny tyto metody jsou aditivní. Metody se liší především ve způsobu, jakým jsou vrstvy nanášeny, a jak je finální objekt vytvářen. [7]

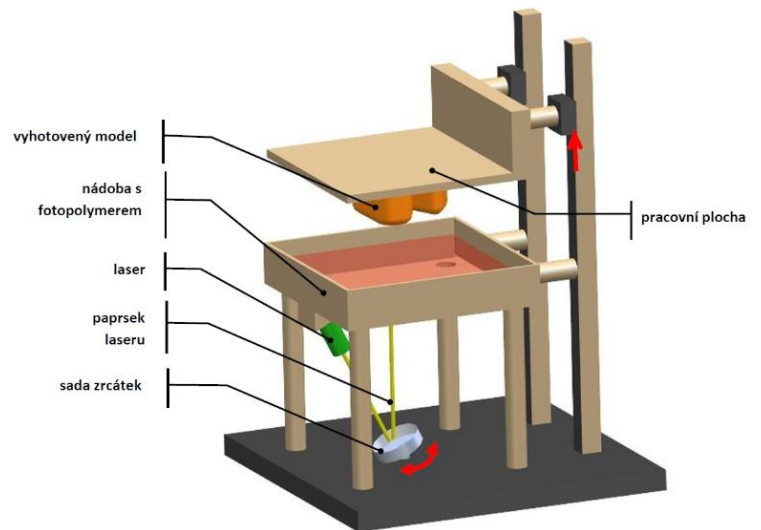
Některé metody používají k výrobě vrstev tavení nebo měknutí materiálu. Nejběžnější technologie využívající tento způsob tisku jsou na principu laserového spékání prášku (SLS), případně tavení materiálu (FDM) ve formě struny (drátu). Jiný způsob tisku je za použití UV laseru. Nejobvyklejší technologie této metody se nazývá stereolitografie (SLA). [7],[14], [33]



### 2.3.1 Rozdělení technologií

#### SLA – stereolitografie

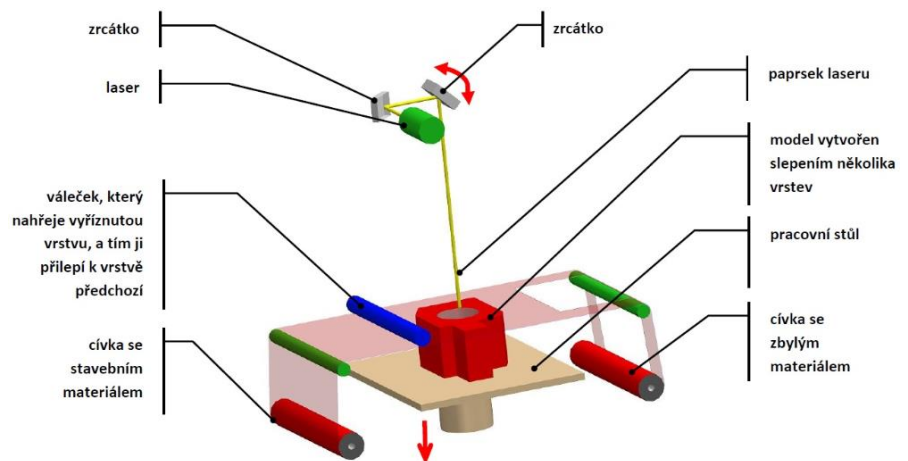
Nejuniverzálnější a zároveň nejstarší technologií 3D tisku je stereolitografie, která je používána přibližně od roku 1986. Vytvrzování tekutého kompozitu probíhá pomocí laserového paprsku. [7],[9],[10]



Obrázek 3 Schéma technologie stereolitografie [30]

#### LOM - Laminated Object Manufacturing

Vysoce odpadová, ale přesto jedna z nejlevnějších technologií 3D tisku na trhu spočívá v lepení jednotlivých vrstev plastu na sebe. Každá vrstva o tloušťce až 0,165 mm, je vyříznuta z folie a plošně přilepena k vrstvě předchozí.



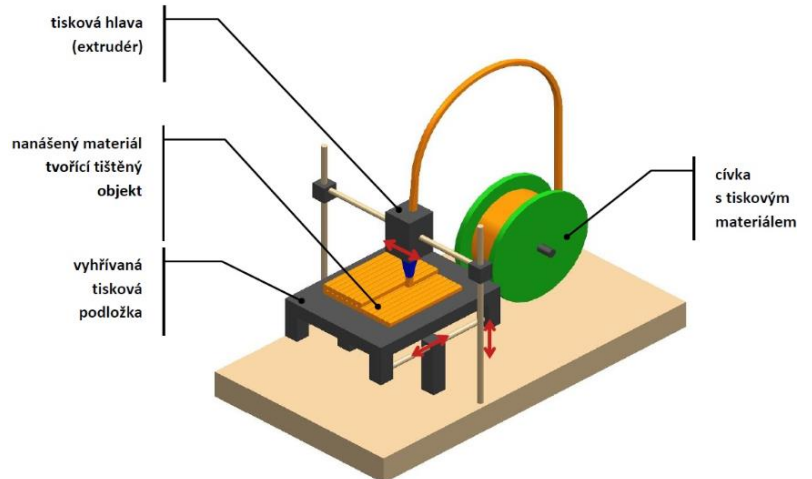
Obrázek 4 Schéma technologie LOM [30]

Hotový model je po dokončení umístěn v kvádru materiálu o maximálních rozměrech 3D modelu. Po mechanickém odstranění přebytečného podpurného materiálu vzniká velmi kvalitní povrch vodorovných ploch s vysokou přesností. Technologie je nevhodná pro velmi drobné konstrukce. [7],[12]

## FDM - Fused Deposition Modeling

Tato technologie používá k vytváření vznikající součásti dva stavební materiály. Modelovací a podpurný materiál. Dochází k vrstvení materiálu na sebe a tloušťka vrstvy je až 0,25 mm. Velkou výhodou je, že je tato technologie téměř bezodpadová. Výsledná kvalita povrchu modelu odpovídá tloušťce vrstvy.

Ty nejmenější kroky mohou být i po setinách mm, ale nejpoužívanější jsou kolem 0,2 mm. Jsou nutné další povrchové úpravy. Vytisknuté podpory jsou dále manuálně, nebo v ultrazvukové pračce za přítomnosti tepla odstraněny. FMD technologie je vhodná pro pevné, nedrobné, tvarově stálé mechanické modely, u kterých není požadavek na kvalitu povrchu. [7],[13]



Obrázek 5 Schéma technologie FDM [30]

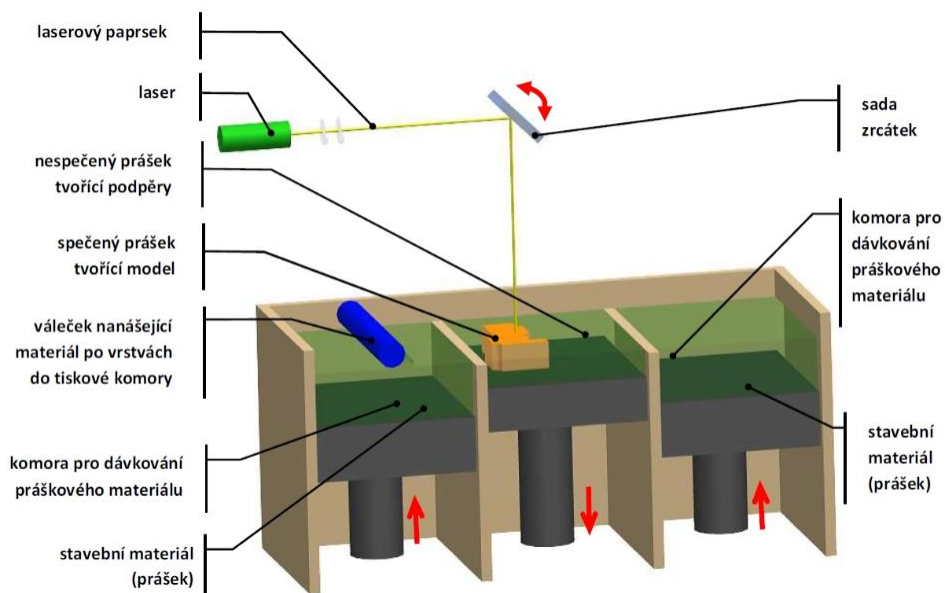
## SLS - Selective Laser Sintering

Výchozím materiálem je prášek. Ke spékání prášku, kterým může být plast, kov, nebo třeba keramika, dochází pomocí laserového paprsku. Cena tohoto materiálu může dosahovat velmi vysokých částek, až kolem 5000 euro za kilogram materiálu, ale jsou i materiály cenově dostupné a levné. Velmi drahé jsou také výrobní stroje, 3D tiskárny. Touto technologií se dají vytvářet i velice tvarově náročné díly a komponenty. [7],[11]

**DMLS - Direct Metal Laser Sintering** je jiné označení stejného principu stavby modelu jako technologie SLS. Většina výrobců označuje tuto technologii laser sintering, i když toto označování může být zavádějící, protože k žádnému sintrování nedochází. Nejsprávnější označení je SLM – selective laser melting, protože dochází jen k tavení prášku bez působení tlaku.

Energie laseru taví kovový prášek pouze v oblasti geometrie dílu. Tento postup opakuje laser tak dlouho, dokud není kovový díl, vrstvu po vrstvě, vytvořen. Vytisknutý výrobek má vlastnosti stejné, nebo velmi podobné materiálu vloženého do práškové formy. Tisknout je možné velký počet kovových materiálů, jako jsou např. ocel, hliník nebo titan a drahé kovy. Proces umožňuje výrobu několika tvarově odlišných výrobků zároveň. [16], [18], [30]

Stabilita a nízká hmotnost jsou určujícími faktory, které určují uplatnění těchto technologií. Zvláště pak pro odlehčené konstrukce a bionické struktury, v kosmonautice a letectví, nebo třeba také v automobilovém průmyslu a medicínské technice. [18]



Obrázek 6 Schéma technologie Selective Laser Sintering. [30]

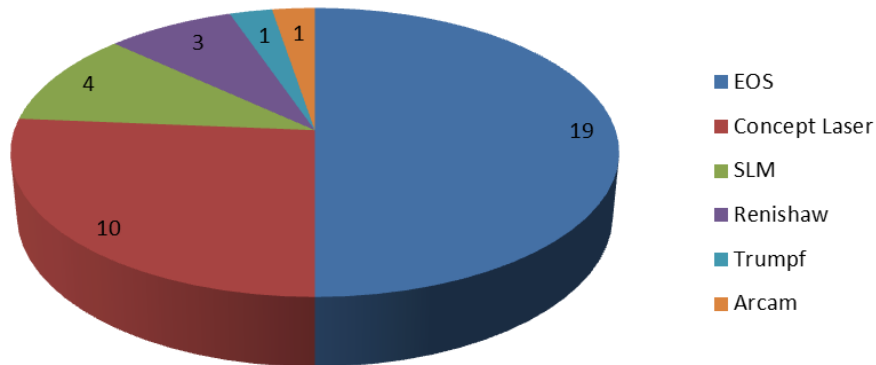
## 2.4 3D tisk kovů v ČR

V rámci trhu České Republiky, týkajícího se 3D kovového tisku, se vyskytuje šest největších konkurentů výrobců 3D kovových tiskáren. Byla vytvořena podrobná analýza a zmapování trhu. Byly zjištěny následující informace, které by bylo nejlepší, pro co největší názornost, ukázat na jednotlivém počtu tiskáren každé značky. Všechna následující data jsou aktuální k dubnu roku 2018. [25], [26]

Celkem se v České Republice nachází 38 kovových 3D tiskáren pracujících na principu technologie SLS. Nejvíce 3D kovových tiskáren má v ČR společnost EOS, za poslední rok mají 10 nových strojů. Druhou nejúspěšnější společností vyrábějící 3D tiskárny kovových slitin je Concept Laser s 10 instalacemi. Společnost SLM Solutions má 4 a Renishaw má celkem

3 stroje. Jednu instalaci má společnost Trumpf a jednu má také švédská firma Arcam, která ale nemá v České Republice obchodní zastoupení. [25], [26]

Graf 1 Graf počtu 3D kovových tiskáren jednotlivých společností v ČR v roce 2018 [25]



### EOS.

Výrobce 3D tiskáren EOS má v České Republice celkem 19 kovových tiskáren. Neustálý růst a zájem o 3D kovový tisk potvrzuje fakt, že 10 nových tiskáren této značky přibylo jen v minulém roce.

- 2 x Vzdělávací instituce: Západočeská univerzita (ZČU) Plzeň  
Vysoká škola Báňská v Ostravě
- 17 x Komerční subjekty: 2x Innomia (od roku 2006, 1. v ČR)  
15x firmy nezveřejněné [25]

### Concept Laser.

Concept Laser v České Republice funguje ve spolupráci s firmou Misan a celosvětově spolupracuje s předním výrobcem leteckých motorů GE. V České Republice je 10 tiskáren této značky.

- 2 x Vzdělávací instituce: ČVUT fakulta strojní  
Univerzita Palackého v Olomouci
- 8 x Komerční subjekty: Bosch  
Prospon Kladno  
6x firmy nezveřejněné [25]

### **Renishaw.**

U této společnosti je zajímavé, že se angažuje ve zbrojařském průmyslu, jaké výrobky v tomto odvětví vznikají, se bohužel nepodařilo zjistit.

- 1 x Vzdělávací instituce: Vysoká škola Báňská v Ostravě
- 2 x Komerční subjekty: CAVD Praha  
Společnost fungující ve zbrojařském průmyslu.

### **SLM Solution.**

SLM solution patří celosvětově mezi nejrozšířenější výrobce 3D tiskáren, v České Republice jsou celkem 4 jejich stroje.

- 2 x Vzdělávací instituce: Vysoké učení technické (VUT) Brno  
Technická univerzita v Liberci
- 2 x Komerční subjekty: firmy nezveřejněné [25]

### **Trumpf.**

Výrobce Trumpf je předním výrobcem obráběcích strojů v oblasti zpracování plechů. Dostává se ale také na trh 3D tiskáren. V České Republice se nachází zatím pouze jedna tiskárna této značky v prostorách ČVUT.

- 1 x Vzdělávací instituce: ČVUT, prostory CIIRC [25]

### **Arcam.**

Jedná se o společnost, která nemá v České Republice obchodní zastoupení, přesto se však jejich tiskárna v České Republice vyskytuje v americké firmě Honeywell.

- 1 x Komerční subjekty: Honeywell [25]

## 2.5 3D tisk kovů na VŠ a univerzitách a výzkumných institutech v ČR

### 2.5.1 ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta strojní

#### Trumpf TruPrint 1000



Obrázek 7 Trumpf TruPrint 1000 [1]

Tabulka 2 Technické parametry TruPrint 1000 [1]

Stavební paleta [mm]	Ø 100 x výška 100, Kapacita prášku 0,8 l
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojová ocel,</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu,</li> <li>➤ slitiny chromu,</li> <li>➤ slitiny mědi,</li> <li>➤ slitiny titanu</li> </ul>
Rychlost stavby cm <sup>3</sup> /h	2 – 18
Tloušťka vrstvy [μm]	10 – 50
Laserový zdroj[W]	200 (opce 2x200)
Průměr ohniska [μm]	55 (opce 30)
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	Max. 3
Ochranný plyn	Argon, dusík
Rozměry [mm]	1445 x 730 x 1680
Váha [kg]	650

#### Concept Laser M2



Obrázek 8 Concept Laser M2 [24]

Tabulka 3 Technické parametry Concept Laser M2 [24]

Stavební paleta [mm]	250 x 250 x 380
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojové oceli,</li> <li>➤ vytvrditelná korozivzdorná ocel,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu a chromu</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny titanu.</li> </ul>
Rychlost stavby [cm <sup>3</sup> h]	2 - 35
Tloušťka vrstvy [μm]	20 – 80
Laserový zdroj [W]	200 (2x200, nebo 400)
Průměr ohniska [μm]	50 (50 – 500)
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [/s]	Max. 7
Ohranný plyn	Argon, dusík
Rozměry [mm]	2542 x 1818 x 1985
Váha [kg]	2400

## RCMT - Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii

Spolupráce s firmou Kovosvit MAS.  
Dva různě rozpracované prototypy stroje WELDPRINT 5X nabízeného firmou KMAS pro ověření technologie.



Obrázek 9 WELDPRINT 5X

Laserové navařování, hlava pro navařování prášku a hlava pro navařování drátu. Stroj WeldPrint MCV 5X spadá do kategorie hybrid manufacturing. Aдитivní a obráběcí technologie je integrována do jednoho pracovního prostoru.

### 2.5.2 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace

#### SLM 280 HL



Obrázek 10 SLM 280 HL [23]

Tabulka 4 Technické parametry SLM 280 HL [23]

Stavební paleta mm]	280 x 280 x 350
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ nerezová ocel,</li><li>➤ nástrojové oceli,</li><li>➤ slitiny niklu,</li><li>➤ slitiny kobaltu a chromu</li><li>➤ slitiny hliníku,</li><li>➤ slitiny titanu.</li></ul>
Rychlost stavby cm <sup>3</sup> /h]	2 - 35
Tloušťka vrtvy [μm]	20 – 100
Laserový zdroj[W]	400 YLR-Faser-Laser
Průměr ohniska [μm]	70 – 120 (700)
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [/s]	Max. 15
Ochranný plyn	Argon, dusík
Rozměry [mm]	1800 x 2400 x 1000
Váha [kg]	1000

## 2.5.3 VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ V OSTRAVĚ

### RENISHAW AM 400



Obrázek 11 RENISHAW AM 400 [22]

Tabulka 5 Technické parametry RENISHAW AM 400[22]

Stavební paleta [m]	250 x 250 x 300
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojové oceli,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu a chromu</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny titanu.</li> </ul>
Rychlost stavby [cm <sup>3</sup> /h]	2 - 20
Tloušťka vrstvy [μm]	20 – 100
Laserový zdroj [W]	400
Průměr ohniska [μm]	70
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	Max. 7
Ochranný plyn	Argon, dusík
Rozměry [mm]	853 x 1700 x 2115
Váha [kg]	1225

## 2.5.4 VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ BRNO, NETME Centre

### SLM 280 HL



Obrázek 12 SLM 280 HL [23]

Tabulka 6 Technické parametry SLM 280 HL [23]

Stavební paleta [mm]	280 x 280 x 350
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojové oceli,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu a chromu</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny titanu.</li> </ul>
Rychlost stavby[cm <sup>3</sup> /h]	2 - 35
Tloušťka vrstvy [m]	20 – 100
Laserový zdroj [W]	400 YLR-Faser-Laser
Průměr ohniska [μm]	70 – 120 (700)
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	Max. 15
Ochranný plyn	Argon, dusík
Rozměry [mm]	1800 x 2400 x 1000
Váha [kg]	1000



## 2.5.5 ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, New Technologies Research Centre (NTC)/RTI

### EOS M 290



Obrázek 13 EOS M 290 [21]

Tabulka 7 Technické parametry EOS M 290 [21]

Stavební paleta [mm]	250 x 250 x 325
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojové oceli,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu a chromu</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny titanu.</li> </ul>
Rychlost stavby [cm <sup>3</sup> /h]	2 - 20
Tloušťka vrstvy [μm]	20 – 100
Laserový zdroj[W]	400
Průměr ohniska [μm]	100
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	Max. 7
Ochranný plyn	Argon, dusík
Rozměry [m]	2500 x 1300 x 2190
Váha [kg]	1250

## 2.5.6 UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

### Concept Laser M2



Obrázek 14 Concept Laser M2 [24]

Tabulka 8 Technické parametry Concept Laser M2 [24]

Stavební paleta [m]	250 x 250 x 380
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojové oceli,</li> <li>➤ vytvrditelná korozivzdorná ocel,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu a chromu</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny titanu.</li> </ul>
Rychlost stavby [c <sup>3</sup> /h]	2 - 35
Tloušťka vrstvy [μm]	20 – 80
Laserový zdroj [W]	200 (2x200, nebo 400)
Průměr ohniska μm]	50 (50 – 500)
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	Max. 7
Ochranný plnyn	Argon, dusík
Rozměry [mm]	2542 x 1818 x 1985
Váha [kg]	2400

### 3 3D TISKÁRNA

Je důležité si uvědomit o jakou 3D tiskárnu dané technologie se jedná. Jestli se jedná o průmyslovou tiskárnu, či laboratorní. Tyto tiskárny se liší v mnoha faktorech a potřebách. Při práci na laboratorní 3D tiskárně pracovník přichází do přímého kontaktu s kovovým práškem, zatímco na průmyslové 3D tiskárně nikoli. [1] [2]

#### 3.1 Rizika práce a bezpečnost práce

Na laboratorních 3D tiskárnách je důležité dodržovat zásady bezpečné práce, které jsou pro tyto tiskárny nastaveny a doporučeny. Pracovník přichází do přímého kontaktu s kovovým práškem, proto musí při práci používat ochranné pomůcky. Mezi nejdůležitější se řadí:

- Ochranné rukavice,
- ochranná dýchací maska,
- ochranné brýle.

Doporučené jsou dále ochranné pomůcky, jako jsou pevné uzavřené boty, popřípadě celý jednorázový overal. [2], [5], [20]

Reaktivní materiály, jako hliník, titan a jejich sloučeniny, jejichž částice jsou lehčí než vzduch se uvolňují do vzduchu. Neměly by se dostat do kontaktu s pokožkou, do dýchacích cest nebo očí. Proniknou do těla i přes póry a mohou způsobit zdravotní problémy. Další velké riziko je nebezpečí požáru a exploze. Je nutné pečlivě číst bezpečnostní list k danému kovovému prášku a používat k tomu předepsané prostředky a pomůcky. Hašení požáru musí být prováděno suchým pískem, nebo přímo hasicím přístrojem na požár kovů, v žádném případě CO<sub>2</sub> hasicím přístrojem. Reaktivní kovový prášek nesmí přijít do kontaktu s vodou. Chemickou reakcí vzniká vodík, který při kontaktu se vzduchem vybuchuje. Proto se s reaktivními prášky musí manipulovat výhradně přes Glove-box. Kovový prášek je nutno uchovávat v suchém prostředí s nízkou vlhkostí. [2], [5], [20]

#### 3.2 Časová náročnost

3D tisk není až tak časově nenáročný, jak se může zdát a nekončí samotným vytisknutím výrobku. Celý proces za sebou skrývá spoustu operací. Prvním krokem je vytvoření 3D modelu, který je následně potřeba převést do STL formátu. Tento 3D model

je nahrán do příslušného CAD softwaru, kde je provedena potřebná korekce a vygenerují se podpěry. [5], [20]

Další kroky jsou už v samotné 3D tiskárně, do které se soubor nahraje z flash disku, nebo je možné jej do tiskárny poslat i přes síť. V softwaru tiskárny se následně může dořešit poloha a parametry tisku. [5], [20]

Po vytisknutí následuje očištění součásti a odstranění přebytečného prášku. Každá součást se musí od stavební palety odříznout. Ve většině případech se vytisknutá součást musí dále obrábět, otryskat, tepelně zpracovat a povrchově upravit. [20]

### 3.3 Problematika stavby modelu

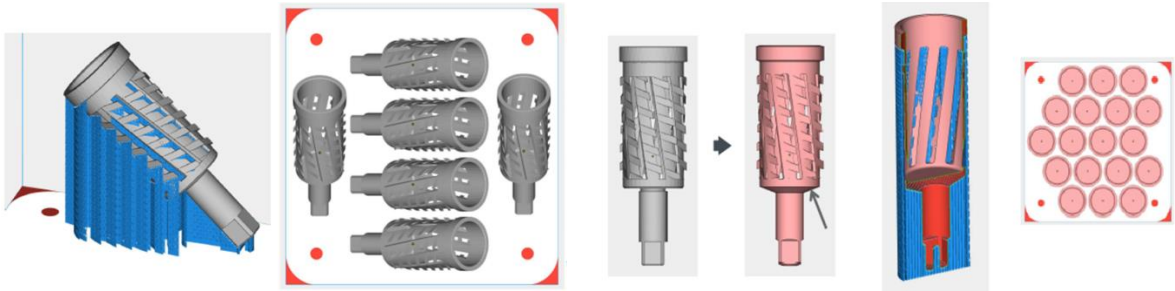
Existují zaběhlé způsoby stavby modelu, které by se měly dodržovat. Jsou to technologická pravidla stavby. [4]

- Rozhodnout se, zda stavba bude vznikat na podporách, nebo rovnou na stavební paletě. (Hrozí-li velké zdeformování dílu, nebo nejde-li to jinak, staví se díl přímo na paletu, jinak je snaha stavět díl na podporách, kvůli snazšímu sejmutí dílu z palety.)
- Vyhnout se vysokému pnutí principem obrácené pyramidy.
- Umístit podpěry na všechna místa s úhlem menším než 45° ke stavební paletě.
- Klenby s průměrem pod 6 mm tisknout bez podpěr.
- Velké díry tisknout kolmo k ose díry, kvůli deformaci vlivem tisku.
- Vytvářet klenby na spodní plochy větší než 10x10 mm.
- Vytvářet podpěry v těžišti hmotného bodu.
- Upravit orientaci dílů na paletě, nastavit šikmé náběžné hrany (pro minimalizaci potřeby podpůrných struktur, pro minimalizaci vnitřního pnutí dílu)
- Podpěry musí jít odstranit.
- Maximalizovat využití palety a minimalizovat výšku. [4]

Když je díl hodně složitý, nebo tvarově nesourodý, je potřeba i několikrát optimalizovat tvar a polohu součásti. Například jedná-li se o součást s mnoha „stropy“ (velké vodorovné plochy). [4], [6], [34]

### 3.3.1 Optimalizace součásti

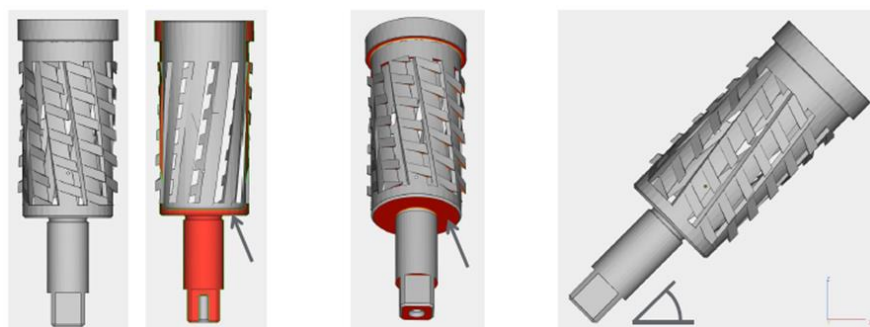
Nejdříve probíhá tvarová optimalizace. Díky tvarové optimalizaci a vyřešení orientace dílu na paletě je možné mnohem lépe využít stavební prostor palety. Úprava spočívá v přidání například malého úkosu, nebo velkého úkosu v místech vodorovných ploch. Záleží na součásti a také na tom, kolik podpěr následně bude tento úkos potřebovat. [4]



Obrázek 15 Optimalizace součásti tvarová + polohová [4]

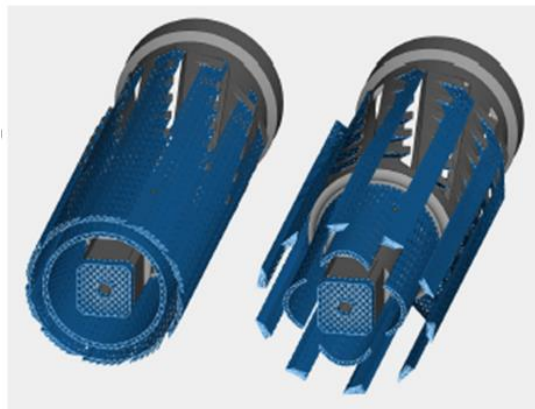
Další tvarovou optimalizací může být klenba. Tato úprava dokáže zásadním způsobem zredukovat množství podpěr „stropu“ na součástech, které nemohou být nakloněné, nebo jinak upravené. [4], [6]

Když nestačí tvarová optimalizace, přichází na řadu optimalizace polohová. Původní součást se nakloní pod určitým úhlem, při které dojde ke zbavení vodorovných ploch. Taková součást ale bude potřebovat velké množství podpěr a tím bude malé využití stavební palety. Proto je důležité dobře promyslet správnou a nejvhodnější optimalizaci součásti. [6]



Obrázek 16 Polohová optimalizace [4]

Další optimalizace a pravděpodobně jedna z posledních se týká podpěr. Je potřeba dávat pozor, aby vytvořené podpěry nebyly v kolizi a vzájemně se výrazně nepřekrývaly. Také je potřeba zohlednit jejich odstranitelnost, aby se nestalo, že podpora zůstane v součásti, například v nějaké dutině, či nepřístupném otvoru. [4], [6] [34]

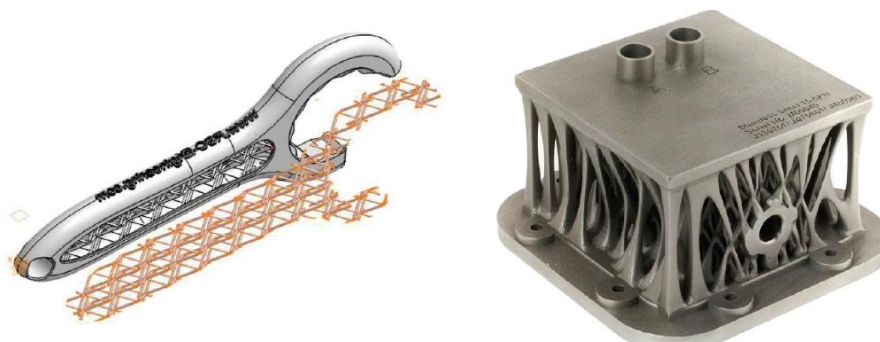


Obrázek 17 Optimalizace podpěr [4]

### 3.3.2 Optimalizace technologická

Výsledkem této optimalizace je, že součást bude lehčí a menší. Tím se zkrátí doba tisku/výroby a jelikož cena součásti se velkým podílem odvíjí od doby běhu stroje, bude tím součást také levnější. Do technologické optimalizace se také řadí čištění součásti po vytisknutí. Přebytečný prášek by měl být snadno vysypatelný ze všech míst. [4], [6]

Technologická optimalizace je také odlehčování součástí, nebo výrobků. V rámci topologické optimalizace se využívají osvědčené nápady přírody. Využívá se například plášťová konstrukce, či krápníková struktura. [4], [6]



Obrázek 18 Plášťová a krápníková struktura [4]

Nové myšlení při technické optimalizaci přináší nové možnosti. Příkladem je firma GE, která v rámci udržení know how koupila firmu Concept Laser. Vytváří prototyp leteckého motoru, kde 3D tisk přináší možnosti, které nejsou tradiční výrobou dosažitelné. Dochází ke spojování jednotlivých dílů v jednotné funkční celky, čímž odpadají spojovací prostředky, jako svařování, či šroubové spoje. Tím se docílí velmi znatelné odlehčení součástí.

### 3.4 Porovnání LMF vs LMD

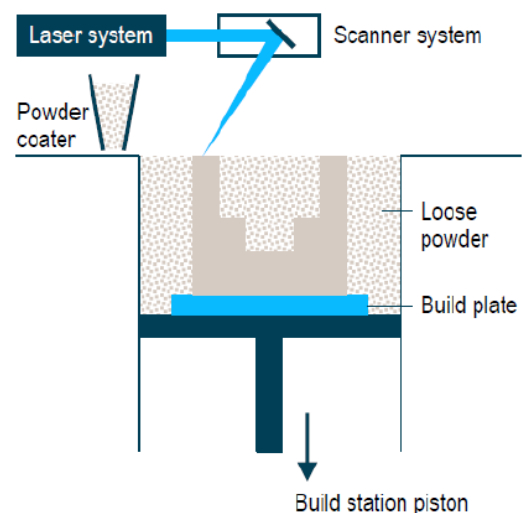
Je potřeba rozlišovat terminologii a principy, na kterých spékání kovového prášku vzniká. Existuje více metod vytvrzování kovového prášku, ale většina výrobců rozlišuje 2 základní metody, a to Laser Metal Fusion a Laser Metal Deposition. [1], [2], [18]

#### 3.4.1 Porovnání

- Obě metody stavby pracují se stejnými materiály a mají podobné výrobní náklady,
- LMF dokáže sestavit součásti geometricky složitější a s větší přesností do 0,1 mm,
- LMF dosahuje lepší kvality povrchu (Ra 5-10  $\mu\text{m}$ ),
- LMD zvládá stavět rychleji (40-300  $\text{cm}^3/\text{h}$ ) oproti LMF (5-70  $\text{cm}^3/\text{h}$ ). [18], [19]

#### 3.4.2 Laser metal fusion (LMF)

Pro objasnění významu zkratk je potřeba vysvětlit označování této technologie. Laserové tavení v práškové loži (LMF) se označuje jako metalický 3D tisk, nebo také Selective Laser Melting (SLM) = Selective Laser Sintering (SLS). [18]

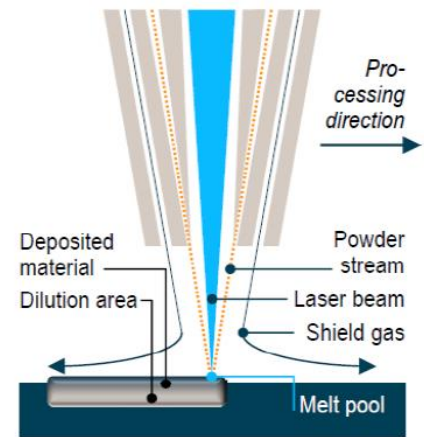


Obrázek 19 Schématické znázornění LMF. [19]

Procesy a technologie 3D tisku jsou popsány v kapitole 2.3.

### 3.4.3 Laser metal deposition (LMD)

Česky tuto technologii nazýváme navařování laserem. Laserem je vytvářena tavenina přímo na povrchu dílu, do které je přiváděn tryskou kovový prášek. Dochází ke zvětšování objemu taveniny, vznikají svarové housenky a tím nový natavený materiál. Výhodou LMD je rychlost stavby a navařování rozličných materiálů střídavě.[18]



Obrázek 20 Schématické znázornění LMD.  
[19]

Praktická část práce se zabývá metodou LMF a proto této technologii a metodě vytvrzování je věnována větší pozornost.

### 3.5 Trumpf TruPrint 1000

Stroj společnosti Trumpf s označením TruPrint 1000 je nejmenší 3D kovová tiskárna od této společnosti. Jedná se o stroj, který je v České Republice pouze jeden. Jedná se o laboratorní tiskárnu, u které má pracovník plný přístup k pracovnímu prostoru i k tisknutému prášku, jelikož pracovní prostor lze otevřít.

TruPrint 1000 je vhodný k výrobě malých kovových dílů. Stejně jako jiné 3D tiskárny vyrábí díly podle CAD navrhnutého souboru, který je nahrán do stroje. V tiskárně je při tisknutí inertní atmosféra tvořená dusíkem a je důležité mít dostatečnou zásobu plynu v lahvi. Stroje mohou být vybavené také externím generátorem dusíku a záleží na zákazníkovi, či uživateli, co si zvolí a co mu vyhovuje. [5],[18],[19]

### 3.5.1 Parametry 3D tiskárny

Tabulka 9 Parametry 3D tiskárny Trumpf TruPrint 1000. [1], [5], [19]

Technická data	
Stavební paleta [mm]	Ø 100 x výška 100, Kapacita prášku 0,8 l
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojová ocel,</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu,</li> <li>➤ slitiny chromu,</li> <li>➤ slitiny mědi,</li> <li>➤ slitiny titanu</li> </ul>
Rychlost stavby [cm <sup>3</sup> /h]	2 – 18
Tloušťka vrstvy [μm]	10 – 50
Laserový zdroj [W]	200 (opce 2x200)
Průměr ohniska [μm]	55 (opce 30)
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	Max. 3
Ochranný plyn	Argon, dusík
Rozměry [mm]	1445 x 730 x 1680
Váha [kg]	650

### 3.5.2 Popis tiskárny

Číslo 1 označuje nejdůležitější část celé tiskárny, místo vzniku výrobku, tedy procesní komoru. Ta má průhled s ochranou před laserovým zářením. Pod komorou se nachází hlavní filtr tiskárny, označený číslem 2. Vedle hlavního filtru se nachází skříňový rozvaděč, č. 3. Číslo 4 označuje bezpečnostní vypínač, který je umístěný vedle ovládacího panelu. Hlavní vypínač je na zadní straně stroje.[5]

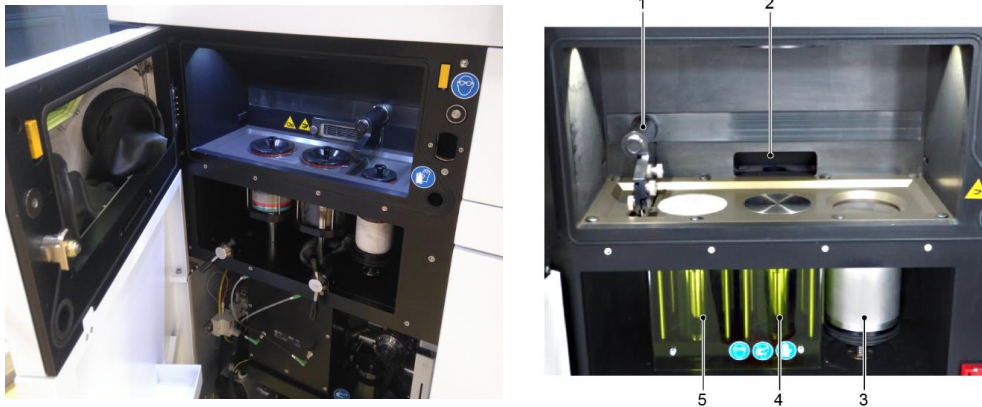


Obrázek 21 Trumpf TruPrint 1000. [5]



### 3.5.2.1 Procesní komora

V procesní komoře probíhá proces LMF v ochranné atmosféře. Ze zásobního válce nanáší nanášecí zařízení vrstvu kovového prášku ze zásobního válce na stavební paletu. Přebytečný kovový prášek je shromažďován v přepadovém válci.



Obrázek 22 Procesní komora. [5]

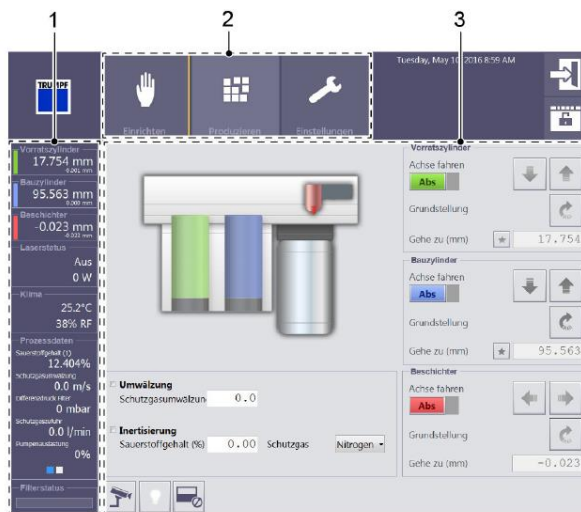
Pod číslem 1 je označené nanášecí zařízení, které manipuluje s práškem. Vzhledem k prašnosti, která vzniká v procesní komoře a nutnosti inertní atmosféry je v procesní komoře umístěné odsávání, označené číslem 2. Pod číslem 3 je označená přepadový válec. Číslo 4 je montážní válec se stavební paletou a zásobní válec je označený číslem 5. [5]

Pracovní prostor obsahuje trysku, která vhání do pracovního prostoru dusík. Vytváří se inertní atmosféra a je zde také odvod pro plyn, který je znečištěný kovovým práškem. Uvnitř pracovního prostředí jsou čidla na kyslík a jakmile je tato hodnota pod 0,3 % kyslíku je možné tisknout. V tiskárně je již vytvořená dostatečná inertní atmosféra. [2], [5]

Dále jsou v pracovním prostoru vidět tři válce/písty. První píst slouží, jako zásobárna kovového prášku a nachází se v dolní úvrati, když je plný prášku. Během tisku se pohybuje směrem nahoru a dodává stavební materiál. Druhý válec je stavební plocha, na které vzniká tisknutá součást, se nachází se naopak v horní úvrati a během tisku postupně krokově klesá vždy o výšku vrstvy. Třetí válec slouží pro shromažďování přebytečného prášku, jako přepadová komora. [2] [5]

### 3.5.2.2 Ovládací panel 3D tiskárny

Ovládací panel tiskárny je dotykový, to usnadňuje ovládání tiskárny. Součástí je také jednoduchá fyzická klávesnice pro urychlení například psaní. Ovládací panel je rozdělený do 3 hlavních sekcí, jak je vidět na názorném obrázku 23 níže. [5]



1. Zobrazení stavu stroje
2. Hlavní činnosti
3. Provozní rozsahy stroje + hlavní osy

#### Jednotlivé funkce hlavní činnosti



##### Seřizování

- Pojezdy os,
- zobrazení stavu,
- % kyslíku.



##### Výroba

- Založení úlohy,
- uspořádání, poloha,
- kontrola kolizí,
- spouštění.



##### Nastavení

- Uživatelská úroveň,
- výběr jazyka.

Obrázek 23 Ovládací panel stroje [5]

Při zapnutí tiskárny a stisknutí tlačítka „start“ najede tiskárna do reference. Na obrazovce se zobrazuje prostředí pracovní plochy. Data se do stroje přenesou na flash disku, potom se provede import do náhledu stavebního prostoru, kde je možná ještě dodatečná editace jako změna parametrů, nebo polohy.

Na displeji se dále ukáže, jak dlouho tiskárna bude pracovat a po tisku vyhodnotí kompletní stručný, nebo velmi podrobný report z celého průběhu tisku. Uvedeny jsou informace o vstupních parametrech, počtu vrstev, velikosti součásti, dále výkon laseru, rychlost stěrače, procento kyslíku v pracovním prostoru a další. Z CAMu jsou přednastavené charakteristiky laseru, ty je možné na tiskárně také upravit.

Tiskárna sama dopočítá kolik materiálu/prášku je potřeba pro tisk součásti v závislosti na objemu a velikosti součásti. Graficky pak znázorní potřebu materiálu na prvním válci, který má v případě, že je vše v pořádku zelenou barvu.

## 4 3D TISK

### 4.1 Příprava tiskárny před tisknutím

Nejdříve je potřeba zkontrolovat nanášecí zařízení. Zda není poškozené, je dobře připevněné a gumička stěrače je ve stoprocentním stavu. Nanášecí médium by mělo být v levé koncové poloze. Tyto podmínky by měly být dodrženy. [5]

Podle bezpečnostních pravidel používání tiskárny je nutné mít nasazené rukavice, roušku, brýle a antistatický náramek. Podrobné info o bezpečnosti práce je v kapitole 3.1.



*Obrázek 24 Zásobovací válec před dosypáním prášku*

Při plnění zásobovacího válce se nesmí zapomínat na zhutňování prášku pomocí stahovacího plechu. Zvýší se tím sypná hustota a homogenizace prášku. Jakmile je prášku v zásobovacím válci dostatek, zarovná se stahovacím plechem do roviny s hranou válce. Takto připravená procesní komora je už téměř přichystaná k tisku. Nyní je potřeba zavřít procesní komoru a zmáčknout RESET. Důležité je sledovat, zda nanášecí zařízení dosáhne práškového lože. Pokud tomu tak není, je potřeba vyzvednout zásobovací válec a tento proces opakovat, dokud lože zásobního válce nevykazuje dokonale homogenní povrch, jako je vidět na obrázku 25. [5]



*Obrázek 25 Plnění zásobovacího válce a plný válec s vyrovnanou pracovní paletou.*

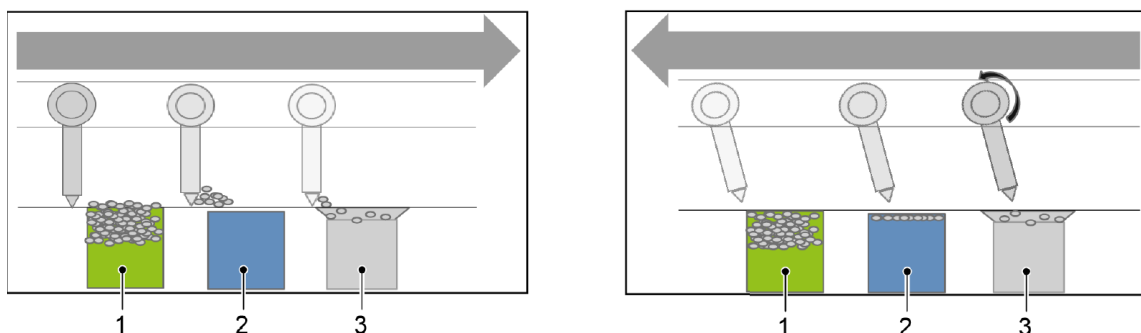
Správné vyrovnaní válců, před tiskem se bohužel musí dělat „od oka“. Tiskárna nemá žádnou přednastavenou nulovou pozici pro válec s pracovní plochou, jelikož stavební paleta se může používat vícekrát. Předtím musí být zfrézovaná, nebo zbrúšená. [5]

Tisk musí probíhat v inertní atmosféře, jak už je výše zmiňované, a to z důvodu, že kovové prášky mohou při kontaktu s kyslíkem explodovat. Čidlo na kyslík proto nedovolí tisk zapnout, dokud v komoře neklesne procento kyslíku pod 0,3 %.

## **4.2 Nanášení kovového prášku**

Nanášení prášku probíhá prostřednictvím nanášecího zařízení, pomocí tzv. stěrače, kterých je více druhů. Nejběžnější a nejpoužívanější jsou stěrače pryžové, ale existují také kovové, či plastové. Číslem 1 je označený, na obrázku 26, zásobní válec. Číslo 2 je stavební paleta a číslo 3 je přepadová nádrž. [3], [5]

Stěrač nabere prášek, který je přizdvížený zásobním válcem. Zásobní válec je zdvižený o procentuální navýšení tisknuté vrstvy. Je přesunut do míst stavební palety druhého válce, který pro změnu klesne o výšku tisknuté vrstvy a přebytečný prášek končí v přepadové komoře. Jakmile nanášecí zařízení dojde do konečné pozice, dojde k jeho vyklopení o bezpečný úhel, pod kterým se může bezpečně vrátit do počáteční výchozí pozice. Díky vyklopení stěrače je zabezpečený rychlý návrat a následná příprava nanášecího média pro další vrstvu. Nehrozí nebezpečí kolize s dílem, ani rozrušení nanášené vrstvy. [3], [5]

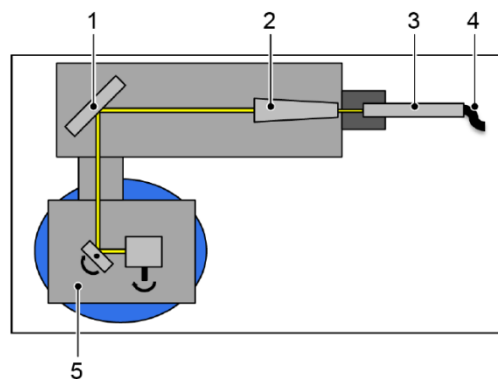


Obrázek 26 Schéma nanášení kovového prášku. [3]

Standardně je nastavené, že pro vznik jedné vrstvy se používá 200 % potřebného prášku. Pro představu, když se tiskne vrstva o tloušťce 0,02 mm (20 mikronů), válec se zásobou prášku povyjede nahoru o 0,04 mm, zatímco válec se stavební plochou klesne o 0,02 mm. Přebytek prášku je shrnutý do přepadového válce. Záleží na dané součásti, její složitosti, členitosti a velikosti. Je to z důvodu, aby došlo k vyplnění všech dutin a nevznikaly žádné nerovnosti, či dutiny v prášku z důvodu nedostatku materiálu. [3], [5]

### 4.3 Spékání prášku

Laserový paprsek je veden pomocí optického kabelu, prochází přes skener a pokračuje k F-theta čočce. Tato čočka zaostřuje laserový paprsek přesně na podkladovou desku do procesní komory.[3], [5]



Obrázek 27 Schéma optiky laseru [3]

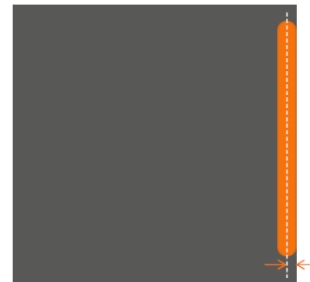
Na obrázku 28 Můžeme vidět zjednodušený schématický pohled na mechaniku laseru shora. Laserový světlomet je označený číslem 4. Paprsek dále projde přes soustavu čoček a je usměrněn a nasměrován. Následuje rozšíření paprsku v části 2. Paprsek pokračuje na odrazové zrcátko, kde dojde k jeho odražení do skeneru. [3], [5]

#### 4.4 Princip expozice, parametry tisku

Základní segmenty expozice:

**Expozice kontur** (základní vnitřní obrys, základní vnější obrys).

*Aby byl zachován správný rozměr součástí, musí být nastaven ofset na vnitřním obrysu kontury. [6], [32]*



Obrázek 28 Expozice kontur [6]

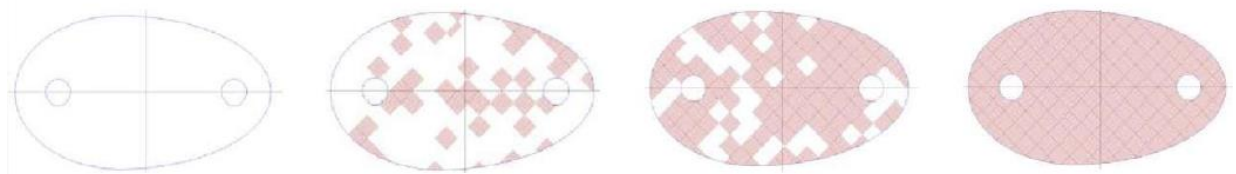
**Expozice rovinných ploch** (kontinuální, ostrůvková).

*Stejně tak u expozice ploch musí být nastavená kompenzace paprsku, jak je zobrazené na obrázku 30. [6], [32]*



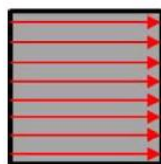
Obrázek 29 Expozice rovinných ploch [6]

Tloušťka vrstvy, která se pohybuje v nejběžněji v rozmezí 15  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$  představuje základní parametr tisku a zásadním způsobem ovlivňuje čas stavby. Čím větší je tloušťka vrstvy, tím je kratší čas potřebný ke stavbě, ale o to je horší kvalita povrchu. [6], [32]



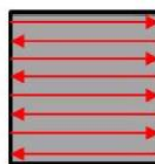
Obrázek 30 Princip expozice Island exposure [6]

a) Standardní metoda expozice.



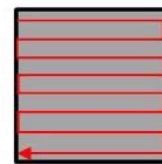
a)

b) Metoda oboustranné expozice.



b)

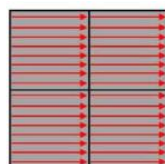
c) Metoda s meandry.[6,] [32]



c)

Obrázek 31 Strategie expozice [6]

a) Každý čtvereček (5x5 mm) je vytvářen vybranou strategií, dle obrázku 32



a)

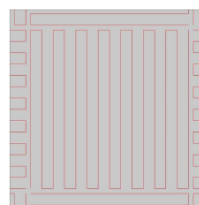


b)

b) Princip šachovnice[6], [32]

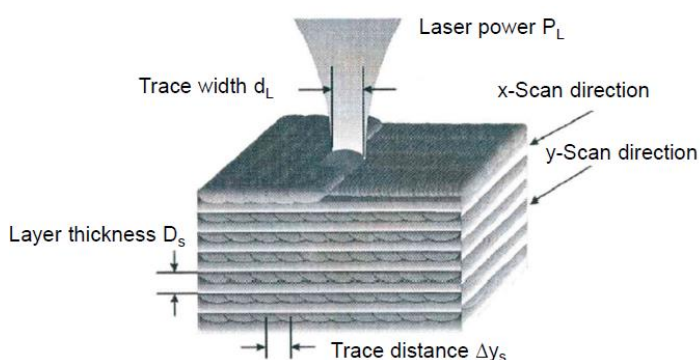
Obrázek 32 Schématický pohled stavby [6]

Island exposure = ostrůvková expozice s meandry v jednom čtverečku 5x5 mm stavby. [6], [32]



Obrázek 33 Meandry v jednom čtverečku expozice [6]

3D tisk součásti závisí hodně na strategii. Součást je vytvářena tiskem ve dvou směrech. Součást vzniká nejčastěji ve formě čtverečků 5x5 mm, nebo kontinuálním tiskem, nebo tzv. metodou Island exposure. Každý čtvereček má pak definovanou strategii expozice, jak je popsáno na obrázcích výše. Je důležité správně zvolit strategii, protože u větších dílů existuje riziko tepelného ovlivnění v jednom směru. [5], [6]



$E_V$  - Hustota energie [J / mm<sup>3</sup>]

$P_L$  - Výkon laseru [J / s]

$V_s$  - Rychlost skenování [mm / s]

$D_s$  - Tloušťka vrstvy [mm]

$\Delta y_s$  - Stopová vzdálenost [mm]

Obrázek 34 Důležité ovlivňující proměnné [32]

## 4.5 Porovnání Trumpf TruPrint 1000 vs. Concept Laser M2 Cusing

Tabulka 10 Porovnání strojů pro tisk vzorků [19], [24]

Technická data	Trumpf TruPrint 1000	Concept Laser M2 Cusing
Stavební paleta [mm]	Ø 100 x výška 100, Kapacita prášku 0,8 l	250 x 250 x 380
Konstrukční materiály	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojová ocel,</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu,</li> <li>➤ slitiny chromu,</li> <li>➤ slitiny mědi,</li> <li>➤ slitiny titanu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nerezová ocel,</li> <li>➤ nástrojové oceli,</li> <li>➤ vytvrditelná korozivzdorná ocel,</li> <li>➤ slitiny niklu,</li> <li>➤ slitiny kobaltu a chromu</li> <li>➤ slitiny hliníku,</li> <li>➤ slitiny titanu.</li> </ul>
Rychlost stavby [cm <sup>3</sup> /h]	2 – 18	2 - 35
Tloušťka vrstvy [μm]	10 – 50	20 – 80
Laserový zdroj [W]	200 (opce 2x200)	400 (2x200, nebo 400)
Průměr ohniska [μm]	55 (opce 30)	50 (50 – 500)
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	Max. 3	Max. 7
Ochranný plyn	Argon, dusík	Argon, dusík
Rozměry [mm]	1445 x 730 x 1680	2542 x 1818 x 1985
Váha [kg]	650	2400



## 5 NÁVRH EXPERIMENTU

Experiment spočívá v porovnání dvou strojů, které, jak je vidět v tabulce 10 mají základní parametry stejné. Ověřuje se jestli i výsledek tisku bude stejný. Vzorky budou vytištěny v poloze vertikální a horizontální, jelikož vytištěný materiál může mít jiné vlastnosti v těchto polohách. Práce je zaměřená na porovnání mechanických vlastností 3D vytisknutých kovových vzorků metodou Selective Laser Sintering.

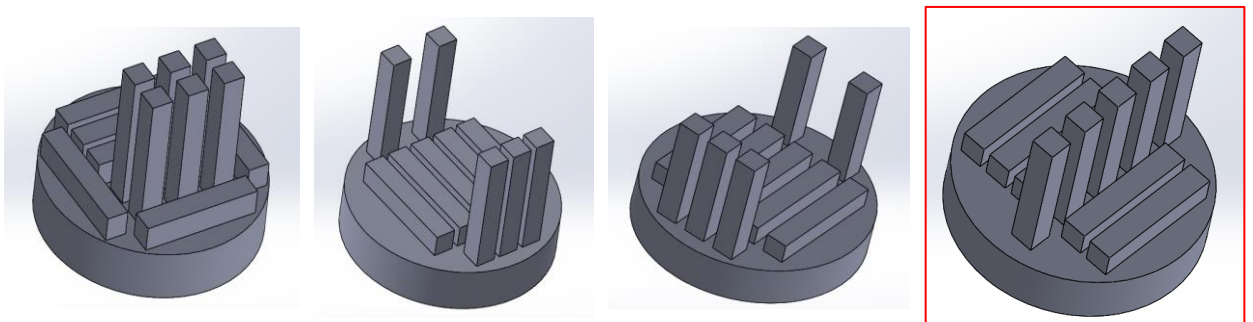
Zároveň práce ukazuje, jakým způsobem si tiskárny od dvou různých společností poradí s finálním výrobkem, jak moc se liší jeden od druhého, a jak moc se ve výsledku liší od parametrů, které daný výrobce před tiskem slibuje. Výrobky jsou tištěné stejnou technologií kovového tisku a stejně tak metodika procesu stavby je stejná. Stejně jsou také základní nastavené parametry tiskárny.

### 5.1 Modelování

#### 5.1.1 Návrh pracovní palety pro rázovou zkoušku - SolidWorks

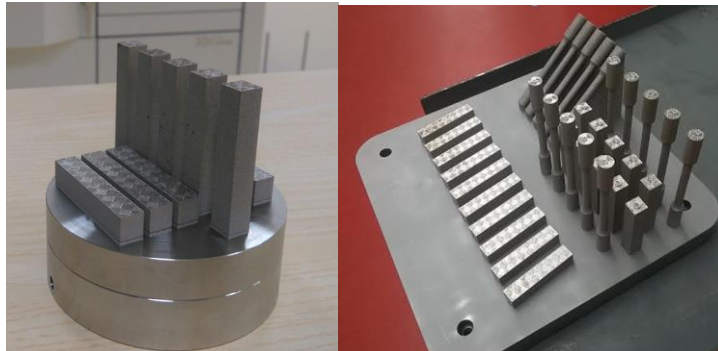
Pracovní paleta tiskárny Trumpf má průměr 100 mm, což nedává moc prostoru pro rozmístění vzorků a jejich vytištění. Proto bylo potřeba navrhnout optimální rozložení vzorků. Byly navrženy čtyři různé stavební palety.

První byla navržena pro co nejvíce vzorků. Vešlo se jich dokonce šest a to jak v poloze vertikální, tak poloze horizontální. Mezi těmito vzorky však byly moc malé mezery a mohlo by dojít k vzájemnému tepelnému ovlivňování v průběhu tisku. Výsledný návrh palety má podobu, která je vidět na posledním ohraničeném obrázku. Vzorky v poloze vertikální jsou v přímce a horizontálně tisknuté vzorky jsou rovnoběžně rozmístěné kolem nich.



Obrázek 35 Návrhy palety pro tisknutí vzorků

Jelikož stavební paleta stroje Concept Laser M2 má podstatně větší rozměry, (porovnání obou strojů je uvedené v kapitole 4.5), mohlo být najednou vytištěno více vzorků a zároveň mohly být vytištěné i vzorky pro zkoušku tahovou, jak je vidět na obrázku 28.



*Obrázek 36 Porovnání tisknutých palet na stroji od Trumpfu a Concept Laseru*

Byly vytištěné jen vzorky pro rázovou zkoušku a k tisku vzorků pro tahovou zkoušku nedošlo. Stavební prostor stroje Trumpf je menší a vzorky na zkoušku tahem by nebyly stejně vysoké a musela by se použít zkrácená verze. Od tohoto vyhodnocení se ustoupilo, aby se porovnávaly jen srovnatelné díly. Vzhledem k nastavenému procentuálnímu navýšení objemu materiálu (200 %) by musela být stavba přerušena, musel by být doplněný prášek a vznikalo by nové navaření materiálu. Výsledné vlastnosti materiálu by těmito proměnnými byly ovlivněné a takové vzorky by nebyly vhodné pro porovnání.

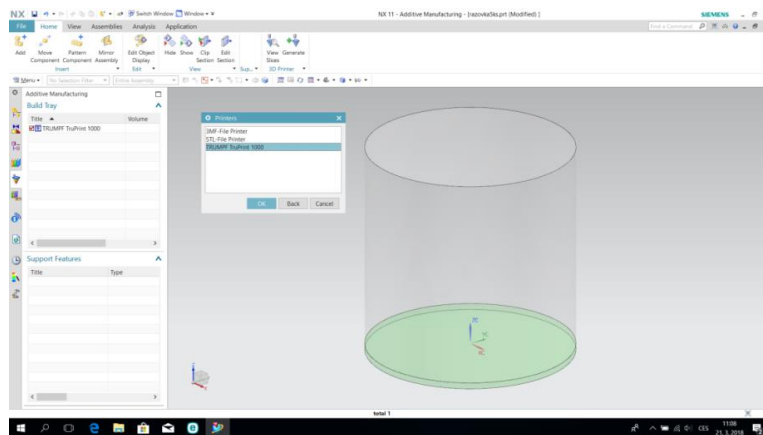
Vzorky pro tahovou zkoušku se netiskly také kvůli ceně kovového prášku a další časové náročnosti.. Musela by se tisknout další celá paleta.

Pracovní paleta lze použít znovu po odříznutí vytištěné součásti, musí se zfrézovat a brousit tak, aby měla optimální drsnost i vzhledové vlastnosti. Ideální je pracovní paleta matná, při které nedochází k odrážení paprsku od palety a poškození optických senzorů tiskárny. Pracovní paleta je použitelná znovu jen do určité doby. Záleží na tisknutém materiálu a velikosti dílu. Podle toho se volí i tloušťka podstavy pracovní palety, aby se vlivem vysokých teplot nekroutila.

## 5.1.2 Práce se softwarem NX

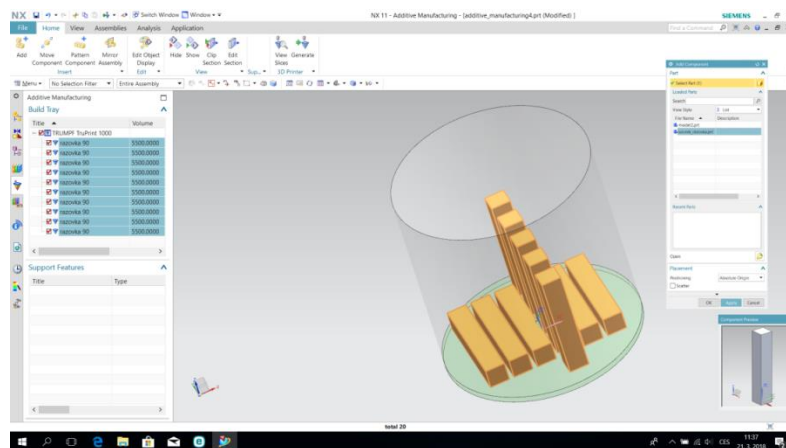
3D Software NX má široký výběr pracovních možností. Kromě klasického modelování jsou v programu i možnosti obrábění, měření, simulování a 3D tisk. Software NX je až uživatelsky nepřívětivý z důvodu, široké škály individuálních uživatelských nastavení programu. Uživatele, který s programem nikdy nepracoval, mohou tato nastavení plést.

Na samotný kovový 3D tisk existuje v programu záložka *Additive manufacturing*. Následně se musí zvolit uložště pro danou práci v programu. Otevře se pracovní prostor stroje a vybere se konkrétní 3D tiskárna. [35]



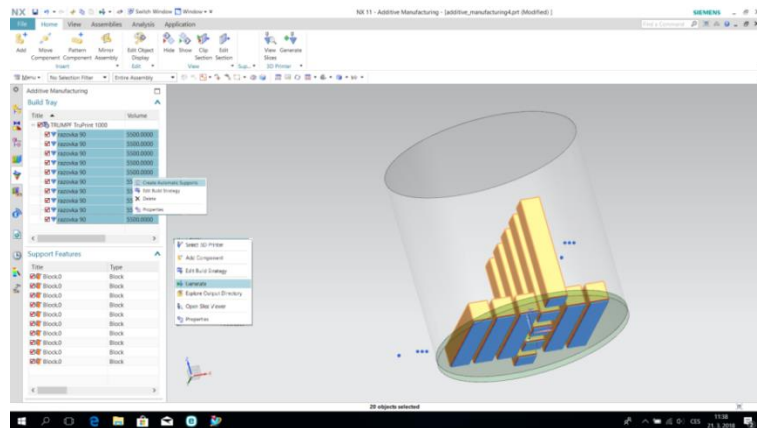
Obrázek 37 Pracovní prostředí softwaru NX - stavební paleta

Následně je možné přistoupit k samotnému nahrání součásti, která je již připravena z jiného modelovacího softwaru, v tomto případě v SolidWorksu. Součást ale může být vymodelována i přímo v NX softwaru. Tyto součásti jsou ve formátu soubor.prt. [35]



Obrázek 38 Stavební paleta s nahranými a zavazbenými vzorky

Velkou výhodou je, že samotný program sám automaticky vygeneruje podpory pro danou tisknutou součást. Podpory, mohou být generovány pracovníkem také manuálně. Program vypočítá veškeré převisy a vyhodnotí úhly a záhyby součásti, nutné pro tisk podpor. Automaticky vygenerované podpory může pracovník také jednoduše upravit, či odstranit. V tomto případě nebylo potřeba nad podpěrami dlouze přemýšlet, protože díly jsou jednoduché. Hlavním cílem vytvoření podpěr bylo jednoduché odříznutí dílů od palety. Podpěry jsou vysoké 1 mm. [35]



Obrázek 39 Vygenerované podpěry k vzorkům

Dále se musí vytvořit strategie tisknutí. Určí se šířka laserového paprsku a také výška jedné vrstvy tisknutého materiálu, která je v tomto případě 20 mikrometrů. Vygenerují dráhy laseru a další data pro 3D tiskárnu. Data jsou ve formátu *soubor.vza*. [35]

## 5.2 Tisk

Před tiskem musí být provedeny veškeré úkony, které jsou popsány v kapitole 4.1 o přípravě 3D tiskárny před tiskem. Jestliže všechny tyto úkony byly zdárně provedeny, může se přistoupit k dalšímu kroku. [5]

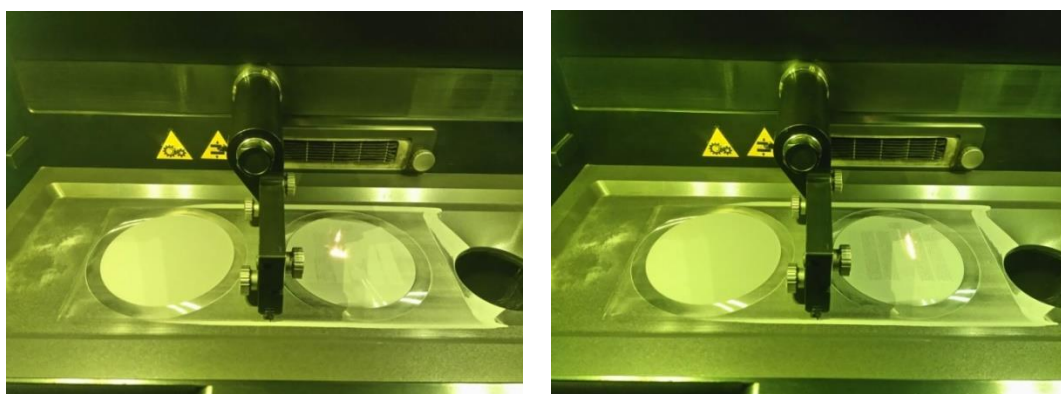
### 5.2.1 Nahrání součásti do tiskárny

Samotné nahrání součásti do tiskárny již probíhá přes ovládací panel tiskárny, který obsahuje standardní průmyslový software PC Trumpf. Ovládací panel je polohovatelný a dotykový. Po nahrání součásti do tiskárny je možné prohlédnout jednotlivé vrstvy součásti a tím ji také zkontrolovat. Na obrázku 41 je vidět, v jaké vrstvě se zrovna nachází náhled. Po dokončení tohoto procesu tiskárna hned ukáže, jak bude tisk dlouho trvat. [5]



Obrázek 40 Nahraná součást v tiskárně a možná dodatečná optimalizace.

## 5.2.2 Samotný tisk



Obrázek 41 Pohled přes průzor do stroje - tisk podpěr

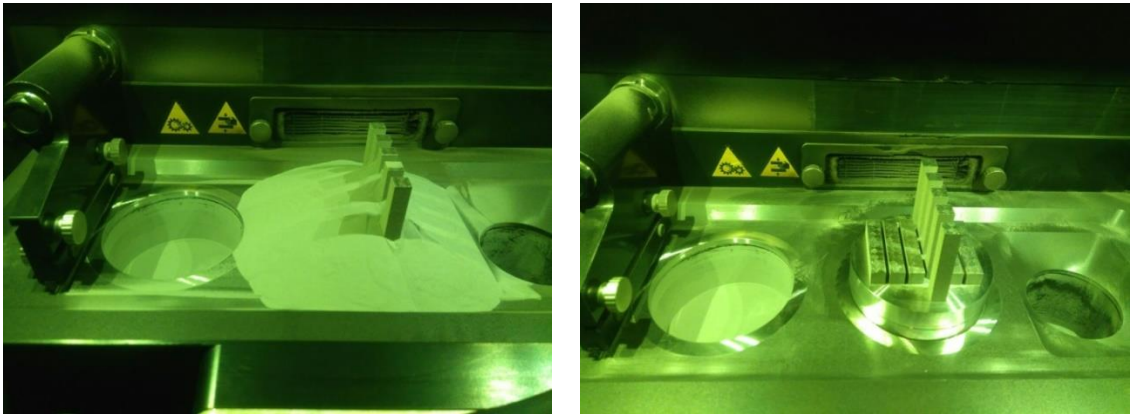


Obrázek 42 Pohled přes průzor do stroje - tisk vzorků

## 5.2.3 Vyjmutí součásti

Jakmile se na ovládacím panelu zobrazí, že je montážní úloha ukončena a nanášecí zařízení se nachází v koncové levé poloze, je možné přistoupit k vyjmutí součásti. Po důkladném očištění se prášek prosévá pro možnost dalšího použití. [3], [5]

Po otevření GloveBoxu se musí postupovat podle zásad bezpečnosti práce, které jsou popsány v kapitole 3.1.



*Obrázek 43 Odstranění přebytečného kovového prášku a vysunutí součásti*

Po skončení práce na tiskárně je důležitá následná údržba a úklid pracovního prostoru tiskárny. Tato činnost zabere stejně, jako u jiných technologií, hodně času. Po vyjmutí stavební palety, která je přichycena pomocí vnitřního šestihranu se použije průmyslový vysavač, pro důkladné odstranění kovového prášku. Následuje čištění celé komory včetně čočky. Důkladné vyčištění pracovní komory je důležité, protože usazené nečistoty by mohly poškodit čočku při dalším tisku. [3] [5]



*Obrázek 44 Vyjmutí součásti*

### 5.3 Vyhodnocení 3D tisku, report

Tiskárna na skončení tisku vyhodnotí celý tisk a zobrazí veškerá data z tisku, technologické vlastnosti a parametry tiskárny.

Tabulka 11 Report tisku

Výkon laseru [W]	90
Rychlost laseru [mm/s]	500
Rychlost nanášení vrstvy [mm/s]	100
Vratná rychlost stěrače[mm/s]	250
Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	20
Počet vrstev	2800
Průměr ohniska [ $\mu\text{m}$ ]	55
Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	2,5
Množství potřebného materiálu [%]	200
Doba tisku [h,m,s]	21h 17min 29s
Celková spotřeba plynu [l]	452
Průměrná regulace plynu [l/min]	0,297

Tisk vzorků trval celkem 21 hod. 17 min. a 29 s. Bylo vytvořeno 2800 vrstev a výška jedné vrstvy byla 20 mikrometrů. Rychlost nanášení vrstvy byla 100 mm/s. Po celou dobu tisku byla v procesní komoře udržována inertní atmosféra a koncentrace kyslíku nepřesáhla 0,3 %.

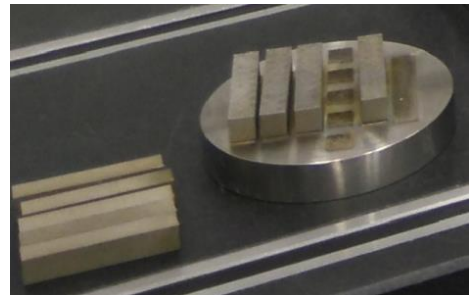
## 6 POSTPROCESSING

3D tisk nekončí samotným vytisknutím součásti, jak je již zmíněné v kapitole 3.2 o časové náročnosti tisku, ale v rámci dalšího použití vzorků, je potřeba udělat spoustu dalších úkonů. V první řadě se musí řešit odříznutí vzorků ze stavební palety. Záleží na složitosti dílu, množství podpěr a celkově na technologických pravidlech, která jsou před tiskem nastavena.

Dále v rámci postprocesingu byla provedena kompletní příprava vzorků pro další použití a mechanické zkoušky. Vzorky prošly tepelným zpracováním pro odstranění vnitřního pnutí a broušením ploch a V vrubu, který nebyl předtisknut.

### 6.1 Odříznutí vzorků

Vzorky byly tištěny na stavební paletu na podporách, tudíž k jejich odříznutí bylo potřeba mnohem menších sil a celý proces byl rychlejší a jednodušší. Odřezání vzorků proběhlo na drátové řezačce.



Obrázek 45 Odříznuté vzorky z palety

### 6.2 Tepelné zpracování

Bylo provedeno tepelné zpracování vzorků. Konkrétně žíhání na snížení vnitřního pnutí, které při 3D tisku vznikalo. Žíhání probíhalo při teplotě 600 °C. Na této teplotě vydržely vzorky přibližně 3 hodiny a následovalo postupné samovolné ochlazování.

### 6.3 Broušení vzorků

Broušení probíhalo na brusce BRH 20 CNC s řídicím systémem MIKRONEX SN 600.4. Bruska je vhodná pro klasické rovinné broušení a také broušení tvarové, obvodem, či bokem brousícího kotouče. [31]

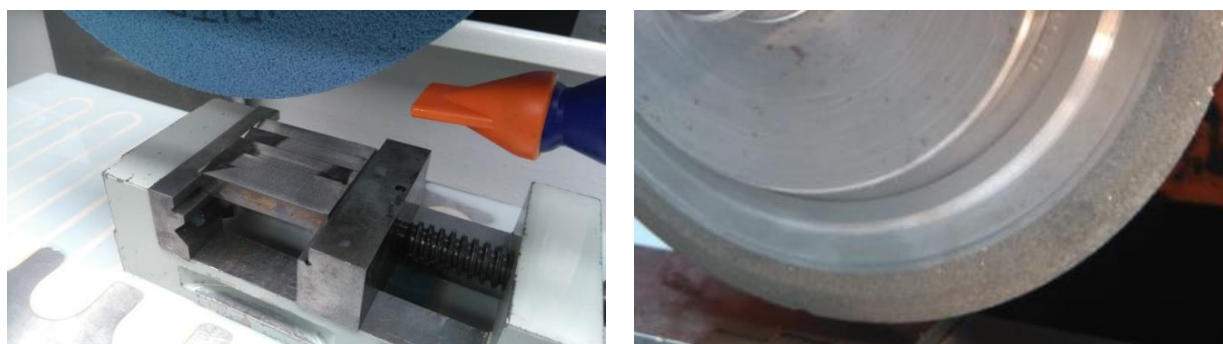


Obrázek 46 Bruska BRH 20 CNC [31]



Nejdříve bylo potřeba vzorky zbrusit na stejný rozměr, jelikož vzorky neměly úplně totožné rozměry. Tato deformace byla způsobena tiskem ve dvou různých polohách. Vzorky tištěné v horizontální poloze byly vlivem velkého pnutí od stavební palety lehce prohnuté, jak je vidět na obrázku 47. Vzorky byly uchycené ve svěráku, který byl následně magneticky chycený ke stolu brusky.

Vzorky byly srovnány ze všech stran, aby byla zajištěna stejná lomová plocha. Následně byl vybroušen V vrub CBN kotoučem.



*Obrázek 47 Broušení vzorků*

## 7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

### 7.1 Kontrola rozměrů

Měřily se délkové rozměry, šířka a výška vzorků, aby se potvrdily předpoklady a dohady před tiskem.

#### 7.1.1 Výsledky měření

Tabulka 12 Naměřené rozměrové hodnoty

$h \times b \times l$	Vytištěné vzorky	Průměrné hodnoty	Vytištěné vzorky po tepelném zpracování	Vytištěné vzorky po tepelném zpracování a broušení
<b>Vzorky horizontální [mm x mm x mm]</b>				
1.	9,65 x 10,05 x 54,93	9,74 x 10,07 x 54,94	9,65 x 10,05 x 54,85	9,36 x 9,99 x 54,81
2.	9,73 x 10,05 x 54,93		9,69 x 10,02 x 54,85	9,35 x 9,97 x 54,82
3.	9,74 x 10,07 x 54,92		9,73 x 10,03 x 54,85	9,35 x 10,03 x 54,82
4.	9,79 x 10,11 x 54,92		9,79 x 10,08 x 54,88	9,33 x 9,75 x 54,84
5.	9,80 x 10,08 x 54,97		9,80 x 10,06 x 54,85	9,34 x 9,99 x 54,84
<b>Vzorky vertikální [mm x mm x mm]</b>				
1.	10,06 x 10,02 x 54,69	10,03 x 9,99 x 54,76	10,02 x 9,97 x 54,66	9,40 x 9,97 x 54,66
2.	10,05 x 9,98 x 54,78		10,00 x 9,94 x 54,70	9,41 x 9,98 x 54,67
3.	10,01 x 9,98 x 54,86		9,97 x 9,95 x 54,85	9,42 x 9,97 x 54,78
4.	10,02 x 9,97 x 54,70		9,99 x 9,94 x 54,70	9,42 x 9,98 x 54,70
5.	10,01 x 10,01 x 54,77		9,98 x 9,98 x 54,76	9,42 x 9,97 x 54,75

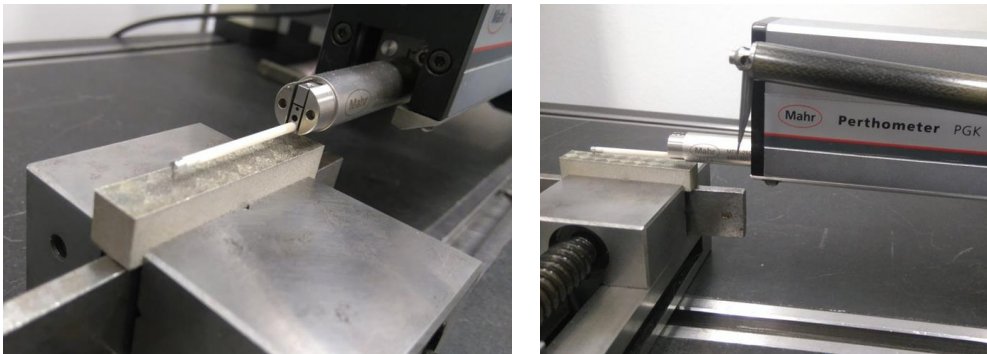
Potvrdilo se, co se před tiskem očekávalo, a to fakt, že vzorky tištěné v horizontální poloze podléhají značnému pnutí a mají tendenci si sedat, tj. jejich výška je menší, než šířka. Průměrná výška vzorků byla 9,74 mm a šířka 10,07 mm. Tento jev platí obecně u 3D tisku, tavením se díly roztečou do stran a jejich výškové rozměry jsou mírně nižší, než by měly být.

Rozměry vzorků tištěných ve vertikální poloze byly vyrovnané a lišily se jen v setinách milimetrů, jak vůči sobě, tak vůči normě. Největší odchylka od normovaných rozměrů byla 0,06 mm. Průměrné rozměry šířky a výšky jsou 10,03 x 9,99 mm. U vertikálně tisknutých vzorků se projevila poloha tisku na jejich délce. Průměrná délka těchto tištěných vzorků je 54,76 mm přičemž CAD model má délku 55 mm.

## 7.2 Měření drsnosti

Měření drsnosti probíhalo na laboratorním drsnoměru Mahr s jednotkou MarSurf PGK 120. Měřeny byly strany vzorků, konkrétně strana v rovině tisku vzorků a bočnice vzorků, na vzorcích tištěných v horizontální poloze. Na vzorcích tištěných v poloze vertikální se měřila drsnost na bocích vzorků. Měření probíhalo hrotem s diamantovým kuželem a vrcholovým úhlem 90°.

- Drsnost byla měřena podle normy ISO 4287.
- Volena byla délka měření  $N + 2 \cdot L_c$ , ( $2 \cdot L_c$  je náběh a přeběh měření).
- Celková měřená délka byla 17,5 mm.



Obrázek 48 Měření drsnosti na stroji Mahr

### 7.2.1 Výsledky měření

Měřeny byly parametry drsnosti:

**Ra – Průměrná aritmetická hodnota drsnosti.** Střední hodnota drsnosti Ra je aritmetickou střední hodnotou všech částí profilu drsnosti.

**Rz – Hloubka drsnosti.** Rz je aritmetický průměr jednotlivých hloubek drsnosti Rzi za sebou následujících dat z měření.

**Rmax – Maximální hloubka drsnosti.** Je největší jednotlivá hloubka drsnosti v rámci celé měřicí dráhy.

**RSm – Střední vzdálenost rýh.** Střední šířka rýh je hodnota šířek profilových elementů profilu drsnosti. Jeden element odpovídá vyvýšení profilu se sousední prohlubní.

### 7.2.1.1 Výsledky měření (Trumpf)

Tabulka 13 Naměřené hodnoty drsnosti (vzorky Trumpf)

	Rovina tisku				Bočnice vzorku			
	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	RSm [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	RSm [μm]
<b>Horizontální vzorky</b>								
1.	9,0	58,2	71,2	635,8	10,3	67,4	74,9	217,9
2.	9,1	59,6	71,2	527,2	10,1	66,6	84,0	232,4
3.	10,3	65,9	91,0	707,3	11,7	77,8	84,3	240,0
4.	8,2	48,2	62,6	635,5	8,6	53,6	59,6	185,1
5.	10,3	70,6	91,4	770,7	10,3	60,8	75,6	204,5
	Bočnice vzorku							
	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	RSm [μm]				
<b>Vertikální vzorky</b>								
1.	12,9	78,4	117,5	271,5				
2.	10,6	68,4	87,3	202,3				
3.	9,8	64,2	78,6	216,5				
4.	10,5	64,1	68,5	246,7				
5.	9,8	68,5	93,0	222,0				

Drsnost roviny tisku vertikálních vzorků nebyla měřena, protože vyhodnocovaná délka je dle normy 10 mm plus náběžná a přeběžná délka.

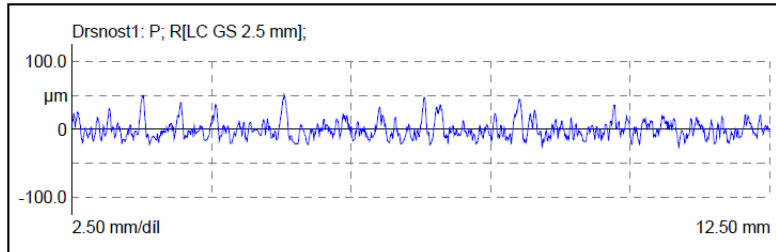
Průměrná drsnost boků vzorků tištěných ve vertikální poloze je Ra 10,7 μm a průměrná drsnost boků vzorků tištěných v horizontální poloze je Ra 10,2 μm. Očekávalo se, že strana roviny tisku, bude mít větší drsnost, ale výsledky jsou opačné. Průměrná drsnost této strany horizontálních vzorků je Ra 9,4 μm.

	Parametr drsnosti [μm]			
	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	RSm [μm]
<b>Horizontální vzorky</b>				
Průměrná hodnota	9,8	68,9	76,6	435,6
<b>Vertikální vzorky</b>				
Průměrná hodnota	10,7	68,7	89,0	231,8

## Porovnání drsností horizontálních vzorků v rovině tisku a z boku vzorku

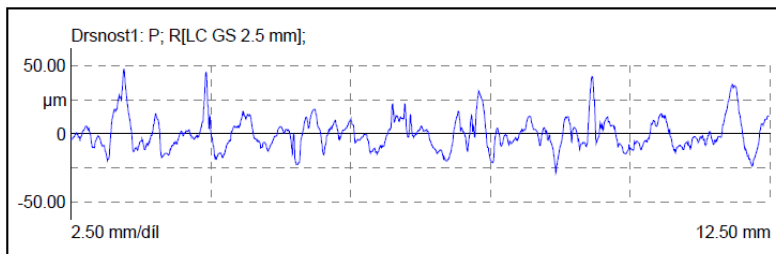
### Vzorek č.1

Graf 2 Graf drsnosti boku horizontálně tištěného vzorku č.1



Ra	10,3118 μm
Rz	67,4245 μm
Rmax	74,8569 μm
R Sm	217,9091 μm

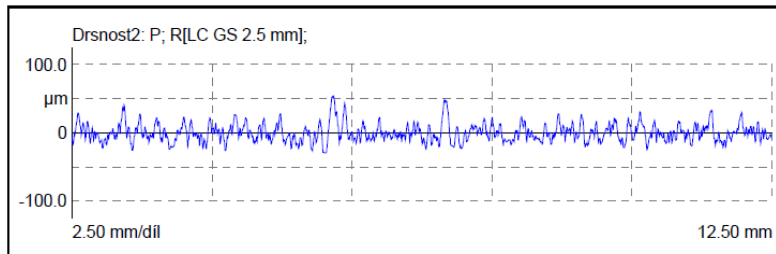
Graf 3 Graf drsnosti horizontálně tištěného vzorku č.1 v rovině tisku



Ra	9,0019 μm
Rz	58,2232 μm
Rmax	71,1988 μm
R Sm	635,8421 μm

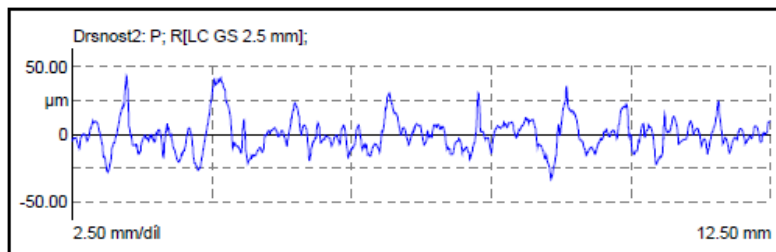
### Vzorek č.2

Graf 4 Graf drsnosti boku horizontálně tištěného vzorku č.2



Ra	10,0783 μm
Rz	66,5980 μm
Rmax	83,9839 μm
R Sm	232,3585 μm

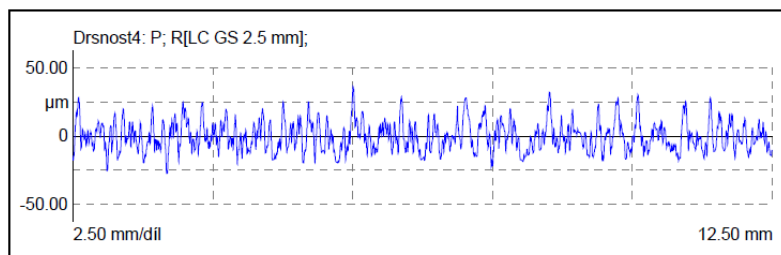
Graf 5 Graf drsnosti horizontálně tištěného vzorku č.2 v rovině tisku



Ra	9,0654 μm
Rz	59,6089 μm
Rmax	71,1836 μm
R Sm	527,2174 μm

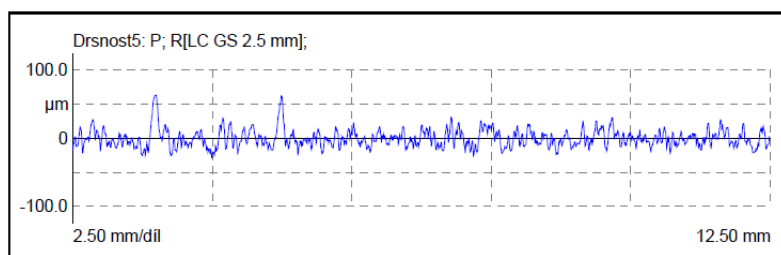
## Porovnání drsnosti boků vzorků tištěných v různých polohách

Graf 6 Nejnižší drsnost horizontálně tištěného vzorku



Ra	8,5830 µm
Rz	53,6041 µm
Rmax	59,5875 µm
R Sm	185,0682 µm

Graf 7 Nejnižší drsnost vertikálně tištěného vzorku



Ra	9,8047 µm
Rz	68,5176 µm
Rmax	93,0230 µm
R Sm	221,9455 µm

Hodnoty drsnosti jsou podle tabulkových předpokladů, které slibuje výrobce stroje Trumpf. V tabulce parametrů tisku uvádí drsnost vzorků Ra 5 -10 µm a celková průměrná drsnost vzorků je při základním nastavení tiskárny Ra 9,8 µm. (Kapitola 3.5.1)

### 7.2.1.2 Výsledky měření (Concept Laser)

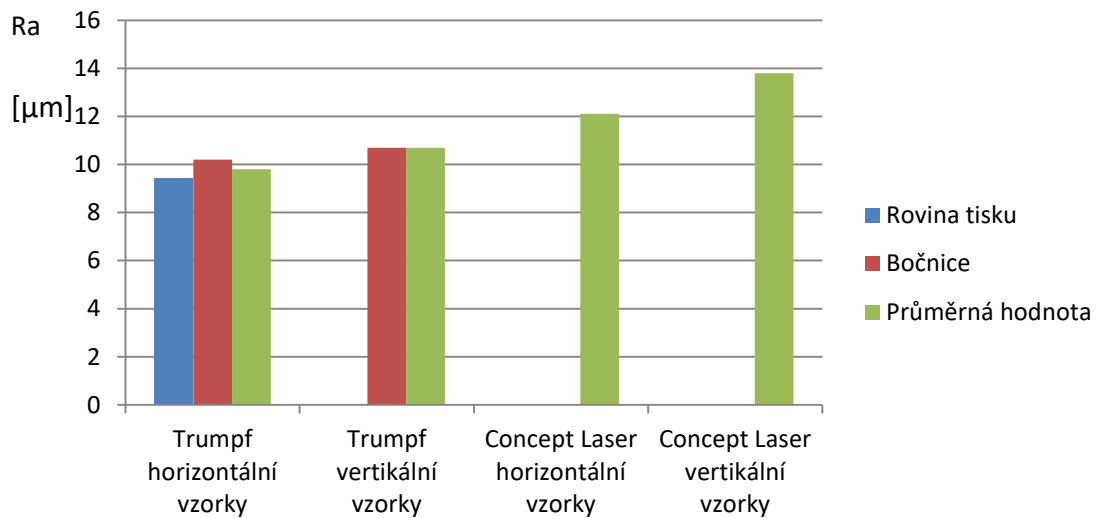
Pro porovnání jsou uvedeny průměrné hodnoty parametrů drsnosti vzorků vytištěných na tiskárně od Concept Laseru.

Tabulka 14 Naměřené hodnot drsnosti (vzorky Concept Laser)

	Parametr drsnosti [µm]			
	Ra [µm]	Rz [µm]	Rmax [µm]	RSm [µm]
<b>Horizontální vzorky</b>				
Průměrná hodnota	12,1	78,0	106,3	466,0
<b>Vertikální vzorky</b>				
Průměrná hodnota	13,8	88,2	115,1	285,8

Vzorky tištěné na tiskárně od Concept Laseru měly vyšší drsnost, než vzorky tištěné na tiskárně Trumpf. Celková průměrná drsnost těchto vzorků byla Ra 13 µm. Tyto hodnoty neodpovídají normě.

Graf 8 Porovnání drsností vzorků

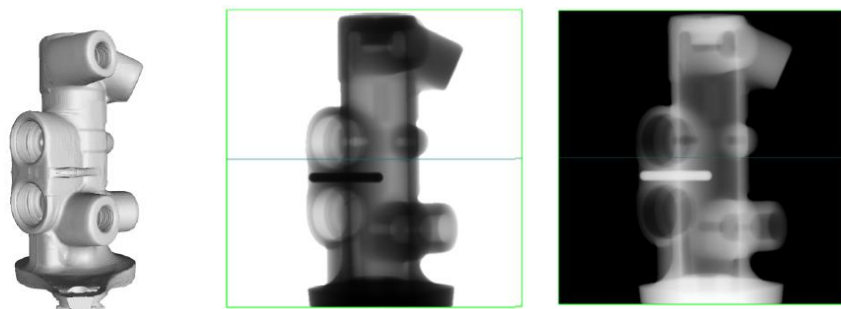


### 7.3 Zkouška porozity

Na vzorcích tištěných na tiskárně od Trumpfu byla pro kontrolu udělaná zkouška porozity. Hlavním cílem této zkoušky bylo zjistit vnitřní strukturu vzorků ve stavu, v jakém vyjdou z tiskárny. Cílem bylo také zjistit možný vliv vnitřní struktury na mechanické zkoušky.

#### 7.3.1 Tomograf

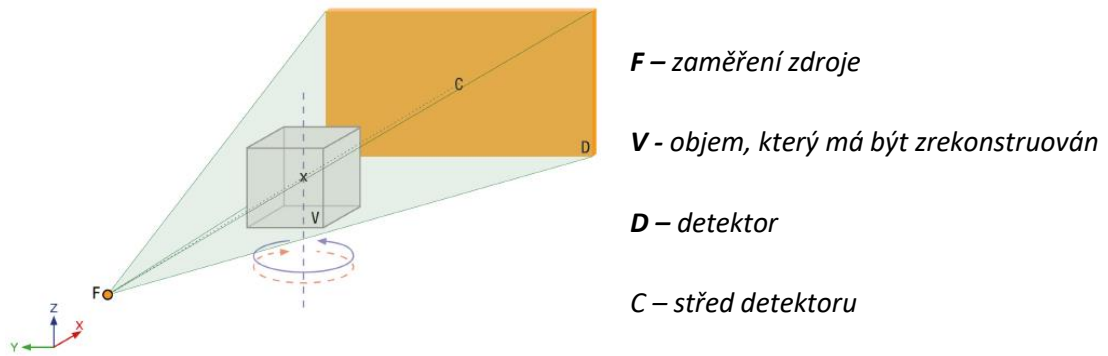
Je přístroj pracující na principu rentgenu, zjednodušeně se dá říct na principu světla a tmy. Čím větší je tloušťka stěny snímaného dílu, tím méně paprsků projde a detekovaný obrázek je tmavší. Čím je stěna tenčí, tím projde paprsků více a nasnímaný obrázek je světlejší. [28]



Obrázek 49 Součást, obraz prosvícené součásti, Prosvícená součást po korekci. [28]

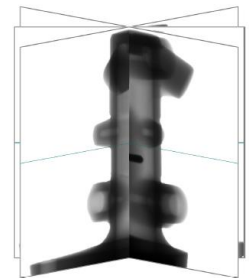
## Limity stroje snímaných tlouštěk vybraných materiálů

Pro hliník je limit cca 20 cm tloušťky snímaného objektu, pro ocel 5 cm a plasty jsou téměř „neomezené“. Nejsnadněji prozářitelné tedy právě díly plastové, protože mají malou hustotu. Materiály typu hliník, ocel jsou už obtížněji prozářitelné a materiály, jako jsou nikl, zinek a další, které mají vysokou hustotu jsou velmi obtížně prozářitelné.



Obrázek 50 Schéma rentgenové zkoušky tomografem. [28]

Skenovaný objekt se musí otočit kolem své osy. Výsledný 3D model se postupně vytváří z jednotlivých skenů, které jsou během otáčení nafoceny. Jednotlivých rentgenových snímků bývá tisíce a tím vzniká mrak bodů, který reprezentuje snímaný objekt. [28]



Obrázek 51 Skládání jednotlivých snímků [28]

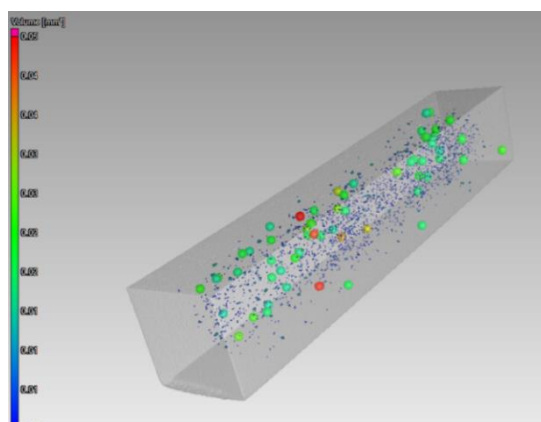


Obrázek 52 Vzorek v tomografu

Prosvicování vzorků probíhalo při napětí 225 V a proudu 264 A.



Poměr defektů ve vzorku přístroj ukáže v procentech. Nejvyšší porozita byla 0,1 % z celého objemu vzorku, a to v případě vzorků horizontálních. Konkrétně se jedná o vzorky číslo 4 a 5.



Obrázek 53 Vzorek č.4 (H4) tištěný v poloze horizontální s celkově největším objemem porozity.

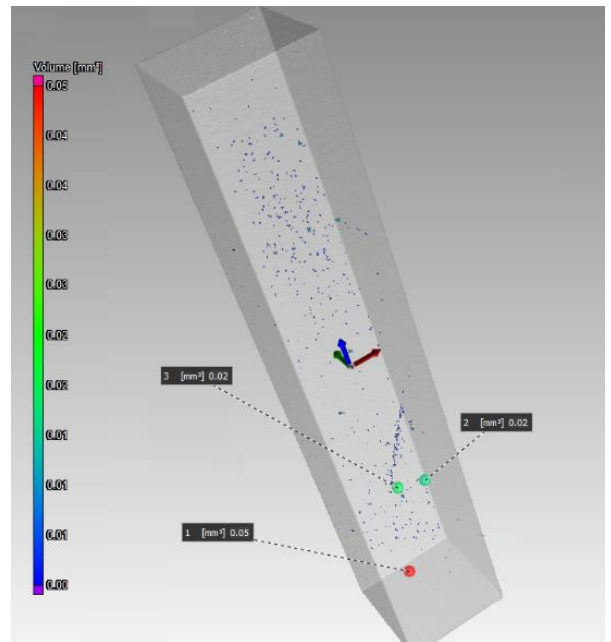
Bylo zjištěno mnoho defektů, nicméně 90 % z nich jsou v řádech do  $0,01 \text{ mm}^3$ . Nelze říci, jestli se jedná o dutinu, nebo jen jinak natavenou částici kovového prášku. Tyto defekty se berou jako nezajímavé a řeší se jen defekty od velikosti  $0,02 \text{ mm}^3$ . Celkově bylo zjištěno 163 defektů větších než  $0,02 \text{ mm}^3$  v horizontálně tisknutých vzorcích a 27 ve vertikálně tisknutých vzorcích. Největší defekt měl objem  $0,09 \text{ mm}^3$  a nácházel se v horizontálním vzorku č.1. Defekt o velikosti  $0,08 \text{ mm}^3$  byl také jeden a nácházel se v horizontálním vzorku č.2. Následoval jeden defekt o velikosti  $0,06 \text{ mm}^3$  v horizontálním vzorku č.2 a celkem bylo ve vzorcích sedm defektů velikosti  $0,05 \text{ mm}^3$ . Celkově se také ukázalo 10 defektů o velikosti  $0,04 \text{ mm}^3$ .

Tabulka 15 Největší indikace v jednotlivých vzorcích

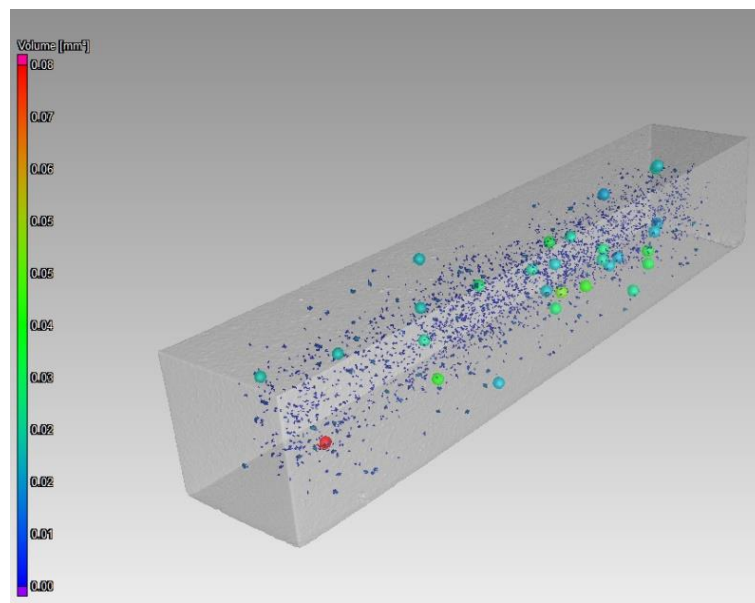
3 největší defekty v jednotlivých vzorcích [ $\text{mm}^3$ ]			
Horizontální vzorky			
1.	0,09	0,05	0,04
2.	0,06	0,05	0,03
3.	0,05	0,04	0,03
4.	0,05	0,05	0,04
5.	0,08	0,05	0,04
Vertikální vzorky			
1.	0,04	0,02	0,01
2.	0,05	0,02	0,02
3.	0,03	0,03	0,02
4.	0,04	0,02	0,02
5.	0,04	0,03	0,03

Tyto deformace se nenachází v místě dopadu kladiva a neovlivní tedy výsledky.

V průměru se více defektů nacházelo ve vzorcích tištěných v horizontální poloze, než ve vzorcích tisknutých ve vertikální poloze. Důvodem je, že exponovaná plocha tisku je větší a proto dochází k většímu tepelnému ovlivnění. Další příčinou je, že při delší době tisku vzniká více spalin, které mohou dopadat na plochu, která se teprve bude natavovat. Takto vzniklé nečistoty se zapečou do tisknutého tělesa a jsou vidět na snímcích z tomografu, jako nejmenší modré indikace defektů



Obrázek 54 Vzorek č.2 (V2) tištěný ve vertikální poloze s celkově nejnižší porozitou.



Obrázek 55 Vzorek č.1 tištěný v poloze horizontální poloze s celkově největší indikací o objemu 0,09 mm<sup>3</sup> (červená indikace.)

## 7.3.2 Výsledky porozit vzorků

### 7.3.2.1 Hodnoty porozity vertikálně tisknutých vzorků

Tabulka 16 Porovnání vzorků (č.2) s nejmenším objemem porozity a vzorku (č.4) s největším objemem porozity.

Informace o 3 největších indikacích v každém vzorku							
Indikace	Vzorek č.2 (V2)				Vzorek č.4 (V4)		
	1	2	3		1	2	3
Objem defektů vůči celému objemu [mm <sup>3</sup> ]	0,67				4,69		
Objem vzorku [mm <sup>3</sup> ]	5315,09				5300,43		
Porozita [%]	0,01				0,09		
Poloha [mm]							
X	3,56	6,77	6,66		2,16	4,30	6,87
Y	3,55	0,73	8,49		4,68	4,32	8,27
Z	-49,11	-37,98	-44,52		-1,68	-1,77	-46,79
Objem [mm <sup>3</sup> ]	0,05	0,02	0,02		0,04	0,02	0,02
Průměr [mm]	0,77	0,51	0,54		0,74	0,58	0,56

Porozita vertikálně tištěných vzorků byla průměrně 0,056 %.

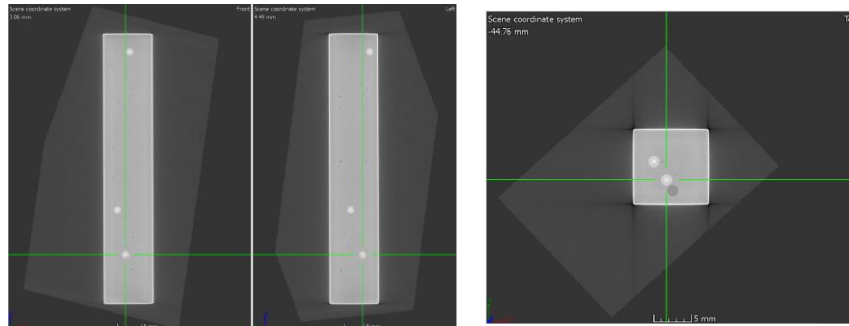
### 7.3.2.2 Hodnoty porozity horizontálně tisknutých vzorků

Tabulka 17 Porovnání vzorků (č.1) s nejmenším objemem porozity a vzorku (č.4) s největším objemem porozity.

Informace o 3 největších indikacích v každém vzorku							
Indikace	Vzorek č.1 (H1)				Vzorek č.4 (H4)		
	1	2	3		1	2	3
Objem defektů vůči celému objemu [mm <sup>3</sup> ]	3,26				5,38		
Objem vzorku [mm <sup>3</sup> ]	5119,80				5246,24		
Porozita [%]	0,06				0,1		
Poloha [mm]							
X	-10,50	-12,56	-18,87		24,77	39,27	31,31
Y	-3,73	-2,51	-6,28		2,79	6,88	4,51
Z	-0,55	-3,86	-6,84		-2,29	-7,42	-6,08
Objem [mm <sup>3</sup> ]	0,09	0,05	0,04		0,05	0,05	0,04
Průměr [mm]	1,01	0,83	0,78		0,90	0,85	0,73

Porozita všech horizontálně tištěných vzorků byla průměrně 0,082 %

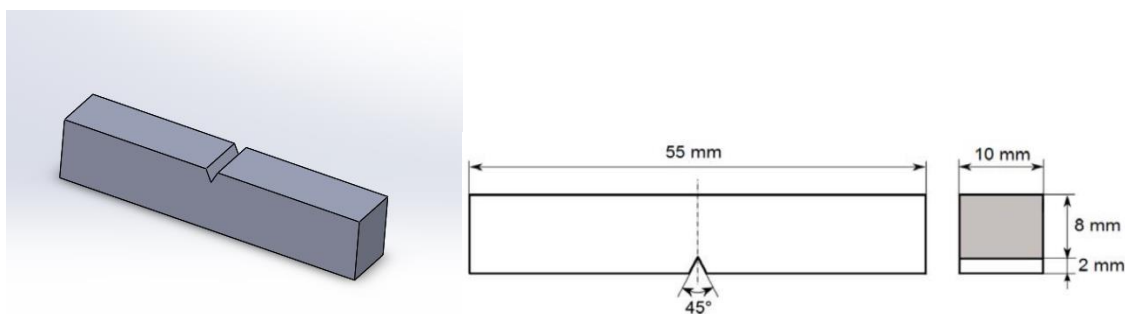
Pokud by se defekty nacházely v rovině vrubu a nárazu kladiva, mohly by mít potenciální vliv na soudržnost materiálu a tím ovlivnit výsledky zkoušky, ale jak je vidět z obrázku 56, největší indikace jsou mimo tuto rovinu.



*Obrázek 56 Snímky vzorku z přední, levé a horní strany.*

Projevil se zde tedy vliv anizotropie materiálu a rozdíly jsou vidět. Dá se říci, že porozita s větší pravděpodobností vznikne ve vzorcích tištěných v horizontální poloze. Ve výsledku jsou ale vady tak malé, že by byly těžko detekovatelné jakýmkoli jiným přístrojem. Viditelné indikace nejsou jen porozita, ale z velké části jej tvoří s největší pravděpodobností nečistoty zapečené v prášku. Tyto nečistoty by mohly vznikat z kouře, který se uvolňuje při spékání kovového prášku a následně se dostávají do další nanášené vrstvy prášku. Defekty jsou mimo rovinu vrubu a většina se nachází mimo rovinu nárazu, takže na výsledky mechanické zkoušky nemají vliv.

## 7.4 Rázová zkouška v ohybu



Obrázek 57 Model a výkres vzorku pro rázovou zkoušku

Tabulka 18 vzorky pro rázovou zkoušku

Rozměr v průřezu	Rozměr v průřezu s vrubem [ $h_k \times b$ ]	Průřez v rovině vrubu [ $\text{mm}^2$ ]
<b>Vzorky tištěné v horizontální poloze</b>		
H1 [mm x mm]	7,36 x 9,99	73,53
H2 [mm x mm]	7,35 x 9,97	73,28
H3 [mm x mm]	7,35 x 10,03	73,72
H4 [mm x mm]	7,33 x 9,75	71,47
H5 [mm x mm]	7,34 x 9,99	73,33
<b>Vzorky tištěné ve vertikální poloze</b>		
V1 [mm x mm]	7,40 x 9,97	73,78
V2 [mm x mm]	7,41 x 9,98	73,95
V3 [mm x mm]	7,42 x 9,97	73,98
V4 [mm x mm]	7,42 x 9,98	74,05
V5 [mm x mm]	7,42 x 9,97	73,98

### 7.4.1 Zkouška rázem v ohybu metodou dle Charpyho

Zkouška se provádí pomocí otáčivého kladiva. Zkušební tělesa jsou umístěná na dvou podpěrách a k přeražení dochází v místě roviny vrubu zkušebních vzorků. V principu se jedná se o tříbodový ohyb. [29], [36]

Rázová houževnatost je definována jako kinetická energie kyvadlového rázového kladiva nutná k přeražení zkušební tělesa vztažená na původní plochu příčného průřezu (u zkušebních těles obdélníkového profilu je důležité rozlišovat šířku a tloušťku) [29], [36]

Vrubová houževnatost je hodnota získaná na zkušebních tělesech zeslabených vrubem různého tvaru (obrázek 57) vztažená na průřez po odečtení vrubu. [29], [36]

$$KCV = \frac{W}{b \cdot h_k} \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}] \text{ [29]}$$

*W* - deformační energie spotřebovaná k přeražení zkušební vzorku

*b* - šířka zkušební tělesa

*h<sub>k</sub>* - redukovaná tloušťka vzorku v místě vrubu

#### 7.4.2 Výsledky zkoušky

Vzorky byly přeražené na kladivu v laboratoři Fakulty strojní. Teplota okolního vzduchu byla 20 °C.

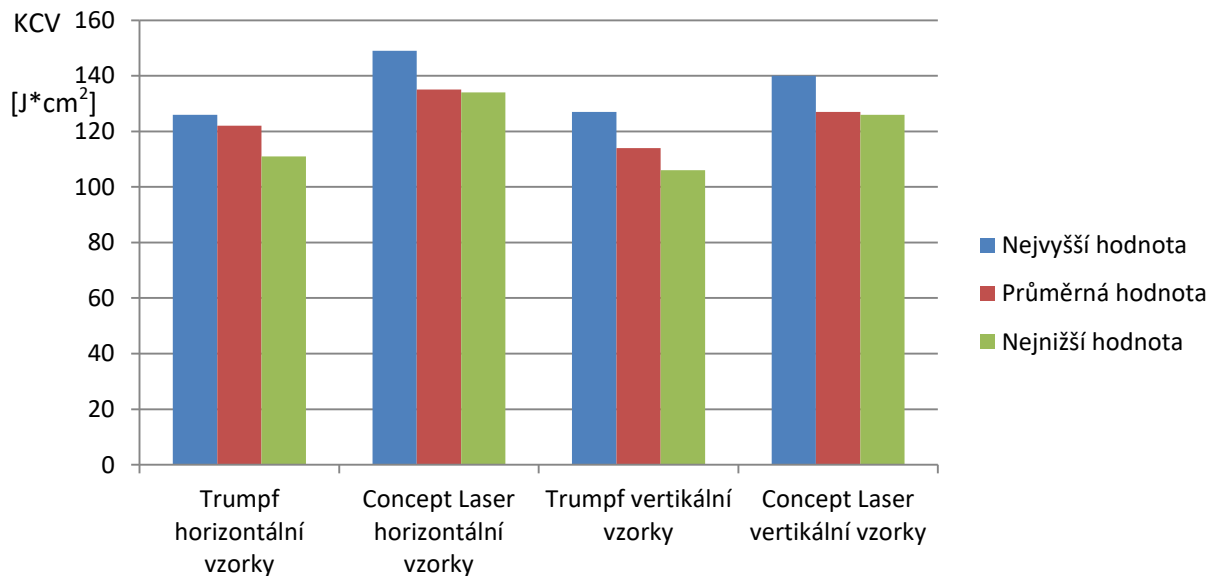


Obrázek 58 Přeražené vzorky.

Tabulka 19 Mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků tištěných na tiskárně Trumpf a Concept Laser + porovnání s konvenčně vyrobeným materiálem AISI 316L

	Trumpf Práce spotřebovaná k přeražení vzorku [J]	Trumpf KCV [J*cm <sup>2</sup> ]	Concept Laser KCV [J*cm <sup>2</sup> ]	Konvenčně vyrobený materiál KCV [J*cm <sup>2</sup> ]
<b>Vzorky tištěné v horizontální poloze</b>				
H1	92,5	126	Průměrná hodnota 122	Průměrná hodnota 135
H2	92,5	126		
H3	88	119		
H4	86	120		
H5	81	111		
<b>Vzorky tištěné ve vertikální poloze</b>				
V1	78	106	Průměrná hodnota 114	Průměrná hodnota 127
V2	94	127		
V3	80	108		
V4	82,5	111		
V5	86,5	117		
				120

Graf 9 Porovnání vrubové houževnatosti



Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti vzorků tištěných na tiskárně od Trumpfu jsou velice podobné tabulkové hodnotě, která odpovídá konvenčně vyrobenému materiálu AISI 316, ta odpovídá min KCV = 120 J\*cm<sup>2</sup>. Mezi těmito vzorky tvoří výchytku od průměru vzorek H5, který dosáhl hodnoty KCV = 111 J\*cm<sup>2</sup>. Při vyloučení nejnižší hodnoty KCV vzorku H5 a nejvyšší hodnoty KCV vzorku H2, je hodnota průměrné vrubové houževnatosti horizontálně tištěných vzorků (KCV = 122 J\*cm<sup>2</sup>) vyšší, než u konvenčně vyrobeného materiálu.

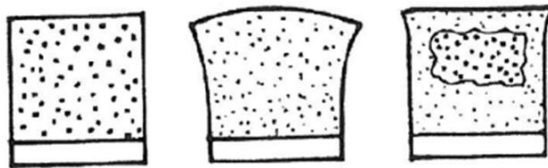
Hodnoty vrubové houževnatosti vzorků tištěných na tiskárně Concept Laser M2 dosahovaly vyšších hodnot. Průměrná hodnota horizontálně tištěných vzorků byla KCV = 135 J\*cm<sup>2</sup> a průměrná hodnota vrubové houževnatosti vzorků tištěných vertikálně byla KCV = 127 J\*cm<sup>2</sup>. Vertikálně tištěný vzorek dosáhl nejlepší hodnoty cca KCV = 140 J\*cm<sup>2</sup> a nejlepší hodnota deformační energie vzorku tištěného v poloze horizontální byla dokonce KCV = 149 J\*cm<sup>2</sup>.

Tento rozdíl od vzorků tištěných na tiskárně Trumpf může být způsobený jinou fokusací laserového paprsku u tiskárny od Concept Laseru. Paprsek byl zaostřený do pozice -3 mm a tím mohlo dojít k lepšímu provaření materiálu.

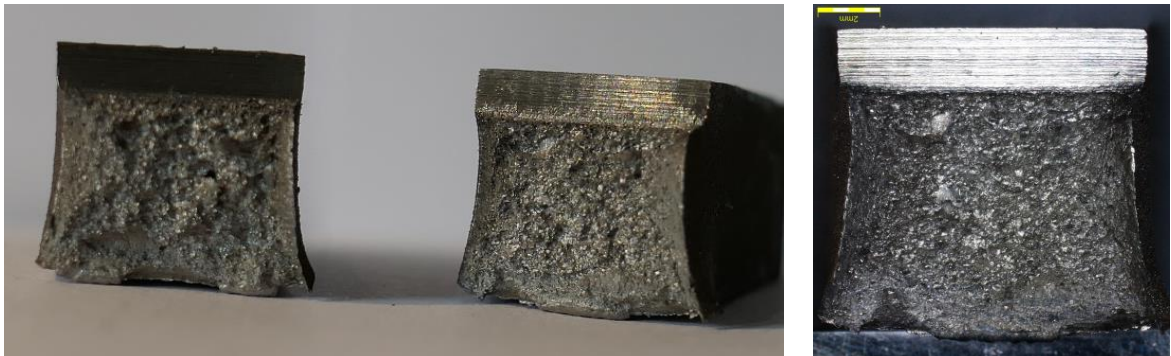
Vzorky tištěné v horizontální poloze vykazovaly vyšší hodnoty vrubové houževnatosti, přibližně o 6 – 7 %, než v poloze vertikální v případě obou 3D tiskáren. Tato poloha se zdá být vhodnější pro jejich tisk. Rázová zkouška proběhla v pořádku a všechna měření jsou platná, jelikož všechny vzorky byly přeraženy úplně

### 7.4.3 Vyhodnocení lomové plochy vzorků

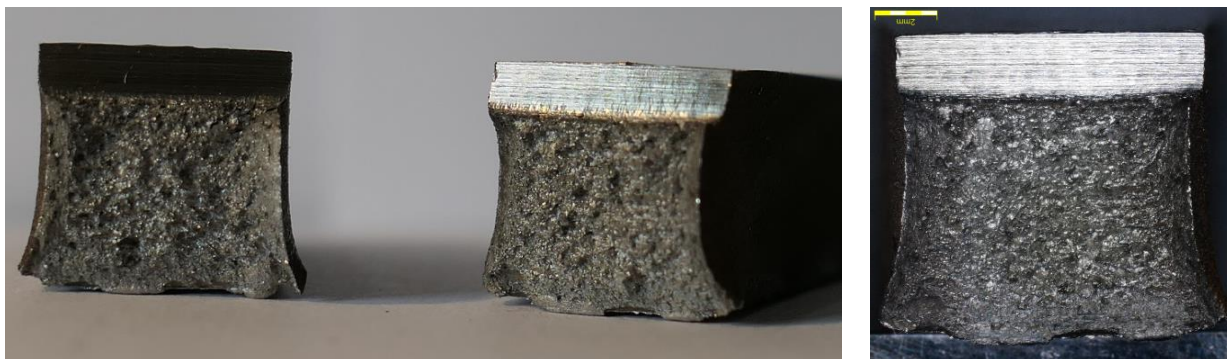
K hodnocení vzorků patří kromě vyhodnocení vrubové houževnatosti i hodnocení vzhledu lomové plochy. Rozlišujeme 3 základní charakteristiky lomu, a to lom křehký, houževnatý a kombinovaný. Křehký lom je charakteristický více krystalky s lesknoucími se plochami s žádnou, nebo nevýraznou deformací tvaru vzorku. Lom houževnatý naopak tvar vzorku značně deformuje a lomová plocha je šedé barvy a bez odlesků. U lomu kombinovaného je pak vidět kombinaci obou lomů. [36]



Obrázek 59 Křehký, houževnatý a kombinovaný lom. [36]

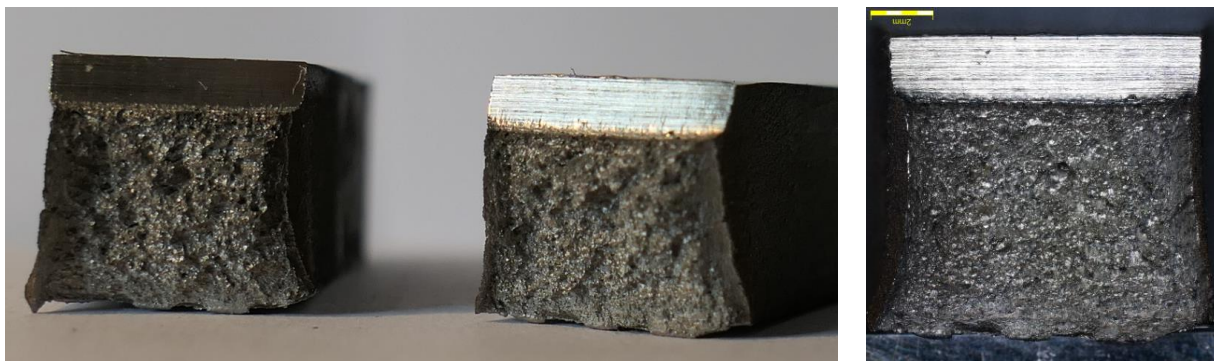


Obrázek 60 Lomová plocha vzorku H1

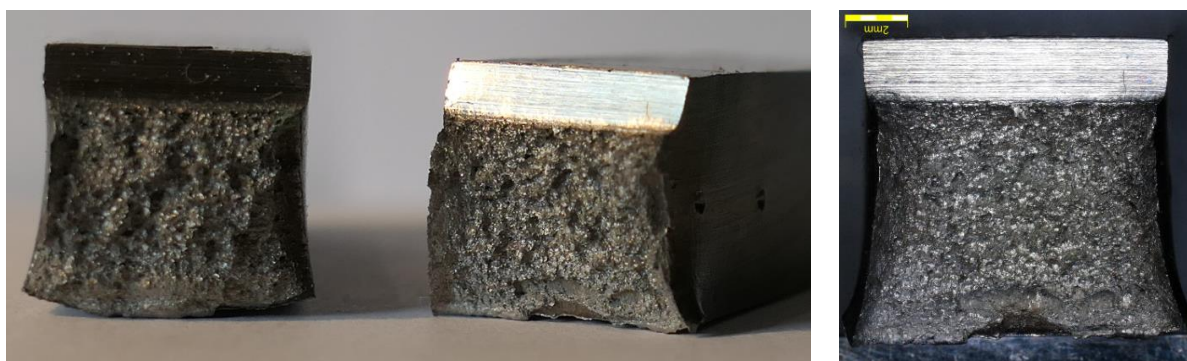


Obrázek 61 Lomová plocha vzorku H2

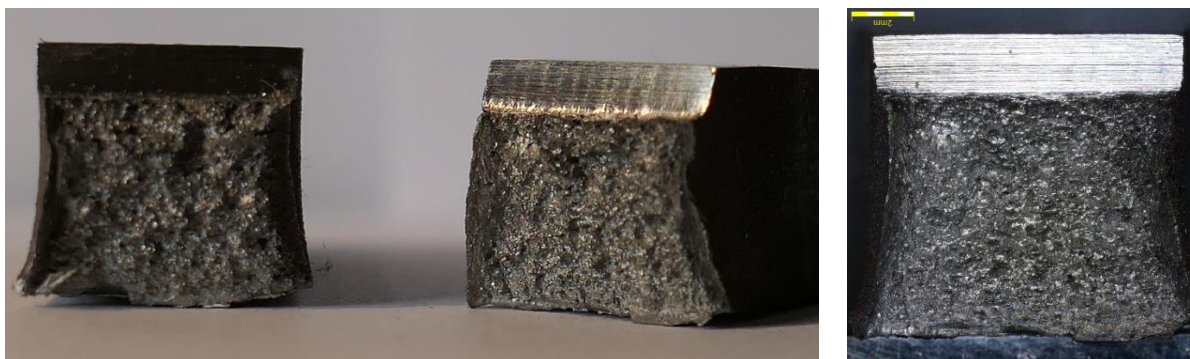




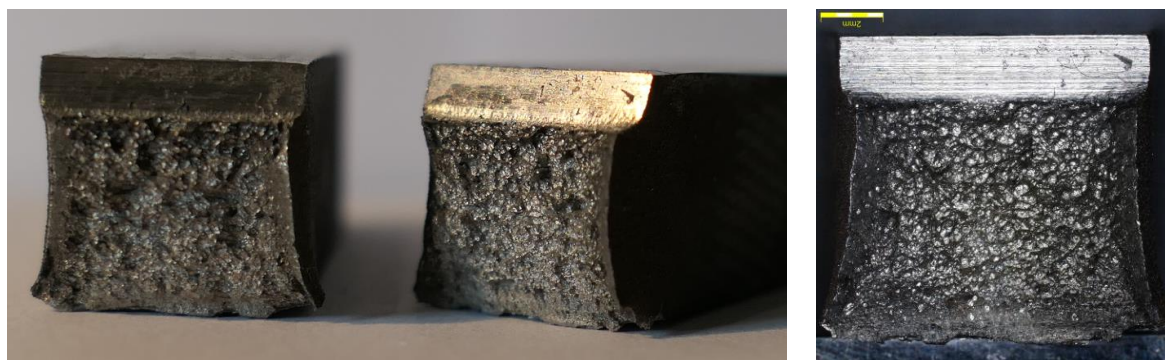
*Obrázek 62 Lomová plocha vzorku H3*



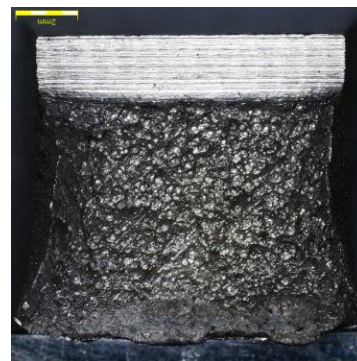
*Obrázek 63 Lomová plocha vzorku H4*



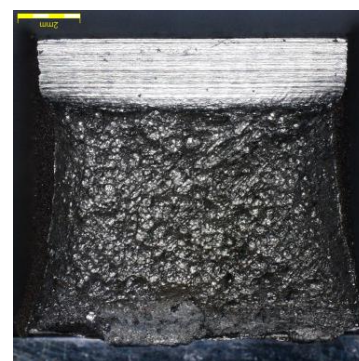
*Obrázek 64 Lomová plocha vzorku H5*



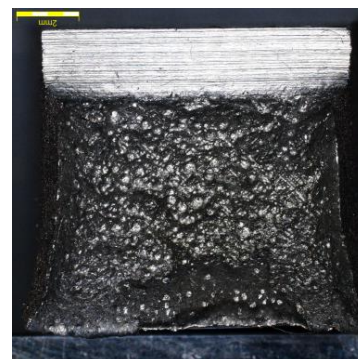
*Obrázek 65 Lomová plocha vzorku V1*



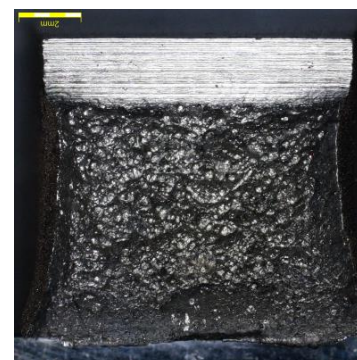
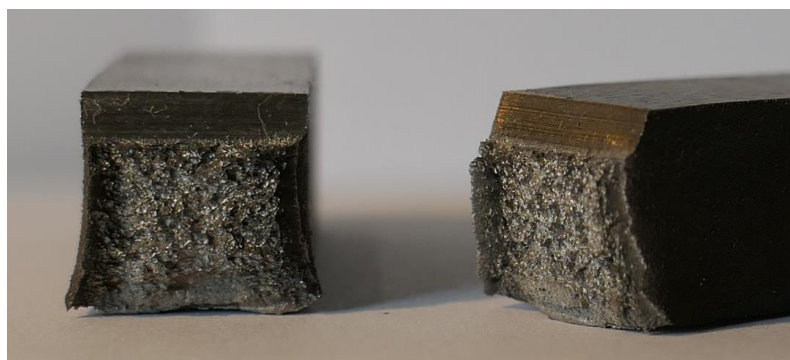
Obrázek 66 Lomová plocha vzorku V2



Obrázek 67 Lomová plocha vzorku V3



Obrázek 68 Lomová plocha vzorku V4

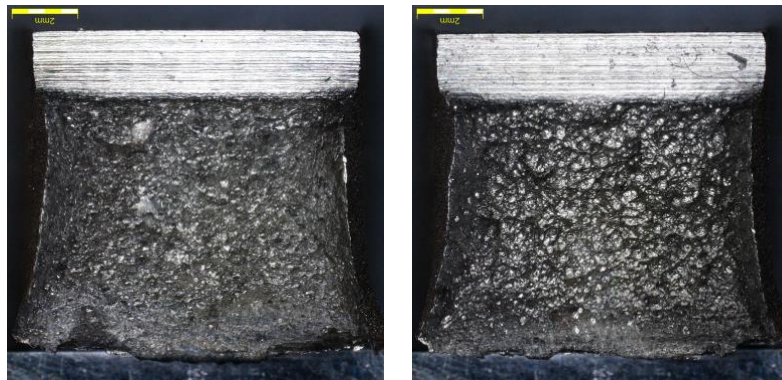


Obrázek 69 Lomová plocha vzorku V5

Lomové plochy přelámaných vzorků jsou velice podobné a všechny mají houževnatý charakter. Je vidět pro houževnatý lom charakteristická deformace tvaru vzorku. Jedná se ale o lom kombinovaný a lom houževnatý je výrazně převládající. Na lomové ploše se vyskytují i náznaky křehkého porušení. Zhruba z 90 % je lom tvořen houževnatým/tvárným porušením a maximálně z 10 % tvořen porušením křehkým/štěpným.

Tvárný lom je charakteristický šedou barvou s minimálními odlesky, který je dobře vidět v krajích lomové plochy. V malém množství se nachází na lomové ploše v centrální části také lom křehký, nebo-li štěpný. Štěpný lom je u těchto vzorků viditelný jako části lomové plochy se stříbrnými odlesky a více je vidět na vzorcích tištěných v poloze vertikální. Tyto části lomové plochy jsou hladké, proto jsou na nich vidět odlesky. Porušená místa štěpným lomem můžou být nedokonale natavené/slinované částice kovového prášku, nebo vytržená celá zrna/kuličky prášku.

Předpoklad, že vertikálně tištěné vzorky budou mít větší tendenci ke křehkému lomu se potvrdil. Lomové plochy vertikálně tisknutých vzorků jsou členitější a mají větší podíl odrazových ploch, které svědčí o křehkém porušení. Vertikální uspořádání tisknutých vzorků vede k mírnému zhoršení vrubové houževnatosti.



*Obrázek 70 Porovnání lomu horizontálního a vertikálního vzorku*

## 8 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PRÁCE

Pro kompletní představu vznikla jednoduchá ekonomická kalkulace v rámci práce. Je nutné si uvědomit všechny proměnné, které se do výsledné ceny 3D tisku promítají.

Nejvyšší položku tvoří cena materiálu. V tomto případě se tisklo z nerezové oceli, jejíž cena je na trhu kovových prášků přibližně 100 Euro za kilogram prášku a to platí jak v případě nabízených prášků od Trumpfu, tak v případě Concept Laseru.

Zde se projeví výhody právě laboratorní tiskárny Trumpf TruPrint 1000, jejíž pracovní prostor je válec o průměru 100 mm a max. výšce 100 mm. V porovnání s průmyslovou tiskárnou Concept Laser M2 Cusing, kde pracovní prostor má rozměry 250 x 250 x 380 mm. Při kovovém 3D tisku je nutné, vždy vyplnit celý pracovní prostor a jestliže se tiskne pro experiment pouze pár vzorků, je výhodnější použít laboratorní tiskárnu s podstatně menším pracovním prostorem, kde se spotřebuje mnohem méně prášku. Trumpf TruPrint 1000 se více vyplácí na jednorázové tisknutí.

### Výsledné náklady se skládají z následujících kategorií

- Materiálové náklady (M)
- Strojní náklady (PO = náklady na nákup stroje, provozní náklady)
- Cena energie a náklady na inertní atmosféru (EA)
- Náklady na obsluhu stroje (L) [37]

Náklady na vytvoření jedné palety se vypočítají následovně:

$$COST = M + PO + EA + L [37]$$

### 8.1 Materiálové náklady

V ekonomickém zhodnocení jsou propočítané pouze náklady za materiál. Ostatní náklady nebyly brány v potaz, protože tisk probíhal v rámci interní spolupráce ČVUT. V tomto případě nebyly ostatní náklady jasně stanovené a u každého tisku se liší.

Tabulka 20 Náklady na materiál

Tiskárna	Trumpf TruPrint 1000	Concept Laser M2
<b>Parametry</b>		
Počet součástí na paletě [ks]	10	
Objem součástí [cm <sup>3</sup> ]	52 530	
Hmotnost všech vzorků [kg]	0,418	
Objem jedné součásti [cm <sup>3</sup> ]	5253	
Stavební prostor [mm x mm x mm]	Ø 100 x výška 100,	250 x 250 x 380
Objem stavebního prostoru [l]	0,8	24
Použitý materiál	Kovový prášek AISI 316 L	
Hustota materiálu [kg/dm <sup>3</sup> ]	7,95	
Cena materiálu [Euro/kg]	100	

Bylo tisknuto celkem 10 vzorků. Objem jednoho vzorku dle normy je 5500 mm<sup>3</sup> a pomocí vzorce byla dopočítána hmotnost jednoho vzorku, která je 43,72 g.

Tabulka 21 Cena tištěných vzorků

Cena [Euro]	
10 vzorků	43,72
1 vzorek	4,37

Důležité je si uvědomit, že při tisku se musí zaplnit celá pracovní paleta. Pak cenu nejvíce ovlivňuje výška tisknuté součásti. Na vytištění vzorků je tedy potřeba tisknout v tomto případě do výšky přibližně 60 mm.

K zaplnění takového objemu je potřeba v případě Trumpfu 0,47 dm<sup>3</sup> kovového prášku a případě Concept Laseru 3,75 dm<sup>3</sup> kovového prášku. Tiskárny navíc pracují s procentuálním navýšením objemu prášku. V tomto případě to bylo 100 % materiálu navíc. K vytištění 10 vzorků na tiskárně Trumpf bylo potřeba využít celý zásobní válec, tedy 0,8 dm<sup>3</sup> a k vytištění 10 vzorků na Concept Laseru bylo potřeba 7,5 dm<sup>3</sup> kovového prášku. K tomu, aby tyto díly mohly vzniknout, je potřeba mít nakoupenou dostatečnou zásobu prášku. V případě tiskárny Trumpf jsou potřeba dvě plechovky kovového prášku, což je investice kolem 1000 Euro. V případě Concept Laseru je počáteční investice do prášku 6000 Euro, to znamená 12 plechovek materiálu k vytištění těchto deseti vzorků.

Kdyby se připočítaly i ostatní položky nákladů, bude cena výrazně vyšší.

## 9 ZÁVĚR

Kovový 3D tisk nachází největší uplatnění v prototypové výrobě a jeho výhody jsou v dnešní době využívány v letectví, kosmonautice, v medicínském průmyslu, ale už také v průmyslu automobilovém. Některé firmy 3D tisk zařazují už i do výroby sériové. Je jen otázkou času, kdy se kovový 3D tisk rozšíří do sériové výroby i v dalších průmyslových odvětvích. 3D tisk součástí nabízí úplně nový pohled na jejich konstrukci a přináší možnosti kompletní topologické optimalizace dané součásti i celých výrobků.

Obecným cílem diplomové práce bylo vyhodnotit vlastnosti vytištěného materiálu přímo z tiskárny. Hlavním cílem této práce však bylo porovnat dvě různé 3D kovové tiskárny, odlišného zaměření. Porovnávaný je stroj laboratorní a průmyslový dvou různých výrobců Trumpf a Concept Laser. Zjišťovalo se, zda výsledky 3D tisku z těchto dvou strojů jsou porovnatelné při podobných parametrech tisku. Zároveň se práce zaměřuje na to, jak moc se liší výsledky tisku od deklarovaných hodnot, které slibují výrobci strojů.

Tloušťka tištěné vrstvy byla v obou případech 20 mikrometrů a princip expozice byl také stejný. Stavba probíhala ostrůvkovou metodou a tzv. šachovnice byla tvořena ostrůvky 5 x 5 mm. Výkon laseru byl v případě laboratorní tiskárny 200 W a případě průmyslové také 200 W. Materiálu tisku byl lehce odlišný, jelikož každý výrobce doporučuje používat prášky vlastní výroby.

V rámci postprocesingu byly vytištěné vzorky odříznuté ze stavební palety drátovou řezačkou. Dále byly vzorky tepelně zpracovány pro snížení vnitřního pnutí a následně broušeny. Zbroušení vzorků na stejný rozměr bylo provedeno rovinným kotoučem. Posléze byl tvarovým kotoučem vybroušen V vrub hluboký 2 mm

V rámci práce byla provedena kromě samotné zkoušky také kontrola vzorků s ohledem na vnitřní strukturu a přítomnost vad, které by případně mohly ovlivnit výsledek. Byla provedena kontrola rozměrů vzorků a přeměřena drsnost vzorků.

Kontrola rozměrů dopadla podle očekávání, potvrdil se předpoklad vzniku lehkých rozměrových deformací. Vzorky tištěné v horizontální poloze podléhaly vysokému pnutí od stavební palety a jejich šířkový rozměr byl větší, než výškový. Tento jev roztečení předmětu tisku je obecně známý a projevil se i na vzorcích vertikálních. Takto deformované rozměry vzorků byly v průměru o 0,3 mm menší.

Vzorky tištěné na tiskárně Trumpf odpovídaly svou drsností normě. Nižší průměrnou drsnost měla strana roviny tisku, jejíž průměrná hodnota byla Ra 9,4  $\mu\text{m}$ . Průměrná drsnost všech vzorků od Trumpfu byla Ra 9,8  $\mu\text{m}$ . Vzorky tištěné na tiskárně Concept Laser dosáhly

vyšších hodnot drsnosti. Průměrná hodnota jejich drsnosti byla Ra 13  $\mu\text{m}$ , tyto vzorky normě neodpovídají.

Byla zjišťována porozita vzorků. Ukázalo se, že indikovaných defektů je velké množství, nicméně většina je dána technologií výroby. Celkový objem vad nepřesáhl 0,1 % a naprostá většina indikací byla mimo kritické místo dopadu kladiva, tedy mimo rovinu vrubu. To znamená, že indikované defekty neměly vliv na finální výsledek mechanických zkoušek. Průměrná porozita vzorků tištěných v horizontální poloze byla 0,082 % a u vzorků tištěných v poloze vertikální 0,056 %.

Po přeražení vzorků byla vypočítaná vrubová houževnatost KCV vzorků. Vzorky horizontální měly vrubovou houževnatost vyšší, než vzorky vertikální. Průměrná hodnota vrubové houževnatosti horizontálně tištěných vzorků byla v případě vzorků od Trumpfu  $KCV = 122 \text{ J}\cdot\text{cm}^2$  a v případě vzorků z Concept Laseru  $KCV = 135 \text{ J}\cdot\text{cm}^2$ . Tyto hodnoty jsou procentuálně přibližně o 6 – 9% vyšší, než v případě vzorků tištěných ve vertikální poloze. Hodnoty vrubové houževnatosti jsou vyšší, než u stejného konvečně vyrobeného materiálu, u kterého je udávána  $KCV = 120 \text{ J}\cdot\text{cm}^2$ . Výsledky rázové zkoušky vycházejí lépe pro vzorky tištěné v horizontální poloze, to platí pro vzorky z obou porovnávaných tiskáren Trumpf a Concept Laser.

Mezi vzorky z jednotlivých tiskáren je poměrně velký rozdíl. Rozdílnost výsledků mohla být ovlivněna použitím rozdílných prášků. Tyto prášky mají lehce odlišné vlastnosti, protože každý výrobce tiskáren doporučuje používat prášky vlastní výroby. Jistou roli mohla hrát také odlišná fokusace laseru na tiskárně od Concept Laseru, konkrétně u horizontálně tisknutých vzorků.

Součástí hodnocení vzorků je i hodnocení lomové plochy vzorku. V případě všech vzorků se jedná o lom kombinovaný, ale velmi výrazně převládá lom houževnatý, jak v případě vzorků horizontálních, tak v případě vzorků vertikálních. Horizontální vzorky měly přesto vzhledové vlastnosti lomu čistší a lom je u nich přesvědčivěji houževnatý. Na vzorcích vertikálních se nachází více lesknoucích se ploch, které značí lom křehký.

Ekonomické zhodnocení v práci se týká především porovnání jednorázového tisku mezi stroji Trumpf a Concept Laser. Celková nákladovost se odvíjí od ceny prášku a doby běhu stroje. Cena prášku vychází přibližně 100 Euro za kilogram. Vzhledem k rozměrům stavebních palet těchto strojů vychází levněji tisk na laboratorní 3D tiskárně Trumpf.

V rámci diplomové práce byla vytvořena také rozsáhlá studie současného stavu pokrytí kovových 3D tiskáren, pracujících na principech podobných SLS, v České Republice. Studie

ukázala, že se v České Republice nachází, k dubnu 2018, 39 strojů ve 30 firmách, které jsou používány k prototypové i sériové výrobě. Navíc bylo zjištěno, že touto technologií disponuje i většina českých technických univerzit. To ukazuje progresivnost této technologie a rozšiřuje potenciál tohoto oboru. Lze předpokládat, že o tento obor poroste zájem i nadále, a stejně tak absolventi těchto škol, kteří v rámci svých závěrečných prací s touto technologií setkají, budou ochotni tuto technologii dále aplikovat a rozšiřovat počet strojů v České Republice. Vše se samozřejmě odvíjí od využitelnosti těchto technologií a cenové dostupnosti těchto výrobních strojů.



## 10 SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Stroje a systémy: Systémy pro 3D tisk [online]. 2018 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-pro-3d-tisk/prasek-truservices/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-pro-3d-tisk/prasek-truservices/)
- [2] LEUTENECKER-TWELSIEK, Bastian. Grundlagen LMF: TRUMPF Laser - und Systemtechnik GmbH. Additive manufacturing technologies. Ditzingen, 2017.
- [3] LEUTENECKER-TWELSIEK, Bastian. Grundlagen LMF: TRUMPF Laser - und Systemtechnik GmbH. Maschinenportfolio. Ditzingen, 2017.
- [4] HUDEC, Jan. The pioneers of metal laser melting technology. : Hofmann Innovation Group [online]. [concept-laser.de](http://concept-laser.de), 2018, s. 61 [cit. 2018-07-25].
- [5] Originální návod k provozu: TruPrint 1000. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. Ditzingen: Trumpf, 2016.
- [6] HUDEC, Jan. Technologická pravidla stavby. : Hofmann Innovation Group [online]. [concept-laser.de](http://concept-laser.de), 2018, s. 29 [cit. 2018-07-25].
- [7] 3D printing: what is 3D printing. *3Dprinting: how it works* [online]. USA: 3Dprinting.com, 2015 [cit. 2016-06-11]. Dostupné z: <http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [8] ExOne: Industry Grade Materials. *Industries and applications: Applications* [online]. USA: <http://www.exone.com/>, 2014 [cit. 2016-06-11]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Industries-Applications>
- [9] Rapid prototyping: stereolithography. *Rapid prototyping services canada: stereolithography* [online]. Kanada: rapid prototyping services canada, 2014 [cit. 2016-07-18]. Dostupné z: <http://rapidprototypingservicescanada.com/stereolithography-sla.php>
- [10] Custompart.net: Stereolithography. *Custompart.net: Stereolithography* [online]. USA: CustomPartNet, 2009 [cit. 2016-07-18]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [11] Custompart.net: Selective laser sintering. *Custompart.net: Selective Laser Sintering* [online]. USA: CustomPartNet, 2009 [cit. 2016-07-18]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>

- [12] Custompart.net: Laminated object manufacturing. *Custompart.net: LOM* [online]. USA: CustomPartNet, 2009 [cit. 2016-07-18]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/L-O-M>
- [13] Custompart.net: *Fused Deposition Modeling*. *Custompart.net: FDM* [online]. USA: CustomPartNet, 2009 [cit. 2016-07-18]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/Fused-Deposition-Modeling>
- [14] ExOne: Digital Part Materialization. ExOne: Technology overview [online]. USA: [www.exone.com](http://www.exone.com), 2014 [cit. 2016-07-19]. Dostupné z: <http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview>
- [15] SALES, After. Trumpf - SYSTÉMY PRO 3D TISK: Kovový prášek pro aditivní výrobu [online]. 2018 [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-pro-3d-tisk/prasek-truservices/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-pro-3d-tisk/prasek-truservices/)
- [16] Innomia: DIRECT METAL LASER SINTERING, FAQ - vysvětlení DMLS, SLS, SLM, EBM, Laser Cusing [online]. 2012 [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/faq-vysvetleni-dmls-sls-slm-ebm-laser-cusing>
- [17] DIRECT METAL LASER SINTERING: 3D skenování [online]. Innomia, 2012 [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <http://www.innomia.cz/sluzby/3d-skenovani>
- [18] Aditivní výroba - Obráběcí stroje/elektrické ruční nářadí: Laserová technika/elektronika. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH. Ditzingen: Trumpf, 2016.
- [19] TruPrint 1000 Kompaktní a robustní 3D tisk: Laserová technika/elektronika - Laser Metal Fusion. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH. TRUMPF Praha, spol. s r.o.: Trumpf, 2016.
- [20] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI: Laboratoře experimentálního obrábění. Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D. Plzeň, 2017.
- [21] Additive manufacturing: Systems and solutions, EOS M 290 [online]. Germany: EOS GmbH Electro Optical Systems, 2016 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <https://www.eos.info/eos-m290>
- [22] Renishaw apply innovation: AM 400 additive manufacturing - System description. [https://tech-labs.com/sites/default/files/H-5800-3137-01-A\\_EN-07%20-%20AM400%20Data%20Sheet%20-%20Media.pdf](https://tech-labs.com/sites/default/files/H-5800-3137-01-A_EN-07%20-%20AM400%20Data%20Sheet%20-%20Media.pdf), 2016.

- [23] SLM zařízení: SLM 280 HL. Praha. <http://www.kolarkk.cz/index.php/slm/51-slm-zarizeni/163-slm-280-hl>, Boris Kolář K&K, s.r.o., 2016.
- [24] S.r.o. Misan Obráběcí stroje a nástroje: Concept Laser M2 cusing. Lysá nad Labem. <http://www.misan.cz/concept-laser/katalog-detail/m2-cusing-concept-laser-m2-cusing-single--multilaser/>, 2018.
- [25] ŠTEFEK, Petr. S.r.o. Misan Obráběcí stroje a nástroje: Klastř aditivní výroby z. s. (KAV), Petr Štefek. Ostrava. <http://www.3dklastr.cz/o-klastru/>, 2018.
- [26] ŠTEFEK, Petr a Marek PAGÁČ. 3D tisk kovů: 3D tisk metodou Selective Laser Melting (SLM). Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. <https://protolab.cz/3d-tisk-kovovych-slitin/>, 2018.
- [27] IVANKO, Miroslav. Trumpf: ADITIVNÍ VÝROBA JE ŘEŠENÍ PRO PRŮMYSL. Průmyslové spektrum: [www.mmspektrum.com/180425](http://www.mmspektrum.com/180425). Praha: MM publishing, 2018, (4), 58 - 59.
- [28] CT Reconstruction parametres: Description of some parametres and how to use them. Heidelberg, Germany: Volume Graphics, 2017. ISBN Volume Graphics GmbH.
- [29] Dynamické zkoušky: Rázová a vrubová houževnatost [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_11.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf)
- [30] Přehled technologií 3D tisku [online]. Nový Jičín: DK metal prominent, 2018 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3D-tisku>
- [31] [online]. MIKRONEX s.r.o. Praha, s. 2 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>
- [32] HUDEC, Jan. BASIC EXPOSURE ELEMENTS. : Hofmann Innovation Group [online]. [concept-laser.de](http://concept-laser.de), 2018, s. 18 [cit. 2018-07-25].
- [33] ROSENBACH, Marcel a Thomas SCHULZ. Die nächste Dimension: Vervielfältigung nur mit Genehmigung der SPIEGEL-Verlag Rudolf Augstein GmbH & Co. Der Spiegel: <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-90254956.html>. Germany, 2012, (52).
- [34] HUDEC, Jan. Parametry tisku. : Hofmann Innovation Group [online]. [concept-laser.de](http://concept-laser.de), 2018, s. 13 [cit. 2018-07-25].
- [35] TruTops Print Software package with Siemens NX: Data preparation for 3D printing. TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH. Ditzingen: Trumpf, 2016.

[36] Dynamické zkoušky: Princip zkoušky – Charpyho kladivo. : OVMT – Odborné vzdělávání s moderní technikou Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky. [online]. 2002 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/dynamicke\\_zkousky.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/dynamicke_zkousky.pdf)

[37] Economic Evaluation of Preparation and Building Stage of Additive Manufacturing Process. 4. TECHNOLOGICKÉ CENTRUM Hradec Králové, o. p. s: MAGNANIMITAS Assn. ISBN GRANT journal. ISSN ISSN 1805-0638.

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1</i> Struktura materiálu .....	16
<i>Obrázek 2</i> Schématický obrázek zrnitosti prášku.[6] .....	16
<i>Obrázek 3</i> Schéma technologie stereolitografie [30] .....	17
<i>Obrázek 4</i> Schéma technologie LOM [30] .....	17
<i>Obrázek 5</i> Schéma technologie FDM [30] .....	18
<i>Obrázek 6</i> Schéma technologie Selective Laser Sintering. [30] .....	19
<i>Obrázek 7</i> Trumpf TruPrint 1000 [1] .....	22
<i>Obrázek 8</i> Concept Laser M2 [24] .....	22
<i>Obrázek 9</i> WELDPRINT 5X .....	23
<i>Obrázek 10</i> SLM 280 HL [23] .....	23
<i>Obrázek 11</i> RENISHAW AM 400 [22] .....	24
<i>Obrázek 12</i> SLM 280 HL [23] .....	24
<i>Obrázek 13</i> EOS M 290 [21] .....	25
<i>Obrázek 14</i> Concept Laser M2 [24] .....	25
<i>Obrázek 15</i> Optimalizace součásti tvarová + polohová [4] .....	28
<i>Obrázek 16</i> Polohová optimalizace [4] .....	28
<i>Obrázek 17</i> Optimalizace podpěr [4] .....	29
<i>Obrázek 18</i> Plášťová a krápníková struktura [4] .....	29
<i>Obrázek 19</i> Schématické znázornění LMF. [19] .....	30
<i>Obrázek 20</i> Schématické znázornění LMD. [19] .....	31
<i>Obrázek 21</i> Trumpf TruPrint 1000. [5] .....	32
<i>Obrázek 22</i> Procesní komora. [5] .....	33
<i>Obrázek 23</i> Ovládací panel stroje [5] .....	34
<i>Obrázek 24</i> Zásobovací válec před dosypáním prášku .....	35
<i>Obrázek 25</i> Plnění zásobovacího válce a plný válec s vyrovnanou pracovní paletou. ....	36

<i>Obrázek 26 Schéma nanášení kovového prášku. [3]</i> .....	37
<i>Obrázek 27 Schéma optiky laseru [3]</i> .....	37
<i>Obrázek 28 Expozice kontur [6]</i> .....	38
<i>Obrázek 29 Expozice rovinných ploch [6]</i> .....	38
<i>Obrázek 30 Princip expozice Island exposure [6]</i> .....	38
<i>Obrázek 31 Strategie expozice [6]</i> .....	39
<i>Obrázek 32 Schématický pohled stavby [6]</i> .....	39
<i>Obrázek 33 Meandry v jednom čtverečku expozice [6]</i> .....	39
<i>Obrázek 34 Důležité ovlivňující proměnné [32]</i> .....	39
<i>Obrázek 35 Návrhy palety pro tisknutí vzorků</i> .....	41
<i>Obrázek 36 Porovnání tisknutých palet na stroji od Trumpfu a Concept Laseru</i> .....	42
<i>Obrázek 37 Pracovní prostředí softwaru NX - stavební paleta</i> .....	43
<i>Obrázek 38 Stavební paleta s nahanými a zavazbenými vzorky</i> .....	43
<i>Obrázek 39 Vygenerované podpěry k vzorkům</i> .....	44
<i>Obrázek 40 Nahraná součást v tiskárně a možná dodatečná optimalizace.</i> .....	45
<i>Obrázek 41 Pohled přes průzor do stroje - tisk podpěr</i> .....	45
<i>Obrázek 42 Pohled přes průzor do stroje - tisk vzorků</i> .....	45
<i>Obrázek 43 Odstranění přebytečného kovového prášku a vysunutí součásti</i> .....	46
<i>Obrázek 44 Vyjmutí součásti</i> .....	46
<i>Obrázek 45 Odříznuté vzorky z palety</i> .....	48
<i>Obrázek 46 Bruska BRH 20 CNC [31]</i> .....	48
<i>Obrázek 47 Broušení vzorků</i> .....	49
<i>Obrázek 48 Měření drsnosti na stroji Mahr</i> .....	51
<i>Obrázek 49 Součást, obraz prosvícené součásti, Prosvícená součást po korekci. [28]</i> .....	55
<i>Obrázek 50 Schéma rentgenové zkoušky tomografem. [28]</i> .....	56
<i>Obrázek 51 Skládání jednotlivých snímků [28]</i> .....	56

<i>Obrázek 52 Vzorek v tomografu .....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 53 Vzorek č.4 (H4) tištěný v poloze horizontální s celkově největším objemem porozity. ....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 54 Vzorek č.2 (V2) tištěný ve vertikální poloze s celkově nejnižší porozitou. ....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 55 Vzorek č.1 tištěný v poloze horizontální poloze s celkově největší indikací o objemu 0,09 mm<sup>3</sup> (červená indikace.).....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 56 Snímky vzorku z přední, levé a horní strany. ....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 57 Model a výkres vzorku pro rázovou zkoušku .....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 58 Přeražené vzorky. ....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 59 Křehký, houževnatý a kombinovaný lom. [36] .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 60 Lomová plocha vzorku H1 .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 61 Lomová plocha vzorku H2 .....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 62 Lomová plocha vzorku H3 .....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 63 Lomová plocha vzorku H4 .....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 64 Lomová plocha vzorku H5 .....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 65 Lomová plocha vzorku V1 .....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 66 Lomová plocha vzorku V2 .....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 67 Lomová plocha vzorku V3 .....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 68 Lomová plocha vzorku V4 .....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 69 Lomová plocha vzorku V5 .....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 70 Porovnání lomu horizontálního a vertikálního vzorku .....</i>	<i>67</i>

## 12 SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Mechanické a fyzikální vlastnosti AISI 316L</i> .....	15
<i>Tabulka 2 Technické parametry TruPrint 1000 [1]</i> .....	22
<i>Tabulka 3 Technické parametry Concept Laser M2 [24]</i> .....	22
<i>Tabulka 4 Technické parametry SLM 280 HL [23]</i> .....	23
<i>Tabulka 5 Technické parametry RENISHAW AM 400[22]</i> .....	24
<i>Tabulka 6 Technické parametry SLM 280 HL [23]</i> .....	24
<i>Tabulka 7 Technické parametry EOS M 290 [21]</i> .....	25
<i>Tabulka 8 Technické parametry Concept Laser M2 [24]</i> .....	25
<i>Tabulka 9 Parametry 3D tiskárny Trumpf TruPrint 1000. [1], [5], [19]</i> .....	32
<i>Tabulka 10 Porovnání strojů pro tisk vzorků [19], [24]</i> .....	40
<i>Tabulka 11 Report tisku</i> .....	47
<i>Tabulka 12 Naměřené rozměrové hodnoty</i> .....	50
<i>Tabulka 13 Naměřené hodnot drsnosti (vzorky Trumpf)</i> .....	52
<i>Tabulka 14 Naměřené hodnot drsnosti (vzorky Concept Laser)</i> .....	54
<i>Tabulka 15 Největší indikace v jednotlivých vzorcích</i> .....	57
<i>Tabulka 16 Porovnání vzorků (č.2) s nejmenším objemem porozity a vzorku (č.4) s největším objemem porozity.</i> .....	59
<i>Tabulka 17 Porovnání vzorků (č.1) s nejmenším objemem porozity a vzorku (č.4) s největším objemem porozity.</i> .....	59
<i>Tabulka 18 vzorky pro rázovou zkoušku</i> .....	61
<i>Tabulka 19 Mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků tištěných na tiskárně Trumpf a Concept Laser + porovnání s konvenčně vyrobeným materiálem AISI 316L</i> .....	62
<i>Tabulka 20 Náklady na materiál</i> .....	69
<i>Tabulka 21 Cena tištěných vzorků</i> .....	69



## 13 SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Graf počtu 3D kovových tiskáren jednotlivých společností v ČR v roce 2018 [25].....</i>	<i>20</i>
<i>Graf 2 Graf drsnosti boku horizontálně tištěného vzorku č.1 .....</i>	<i>53</i>
<i>Graf 3 Graf drsnosti horizontálně tištěného vzorku č.1 v rovině tisku .....</i>	<i>53</i>
<i>Graf 4 Graf drsnosti boku horizontálně tištěného vzorku č.2 .....</i>	<i>53</i>
<i>Graf 5 Graf drsnosti horizontálně tištěného vzorku č.2 v rovině tisku .....</i>	<i>53</i>
<i>Graf 6 Nejnižší drsnost horizontálně tištěného vzorku .....</i>	<i>54</i>
<i>Graf 7 Nejnižší drsnost vertikálně tištěného vzorku .....</i>	<i>54</i>
<i>Graf 8 Porovnání drsností vzorků .....</i>	<i>55</i>
<i>Graf 9 Porovnání vrubové houževnatosti .....</i>	<i>63</i>