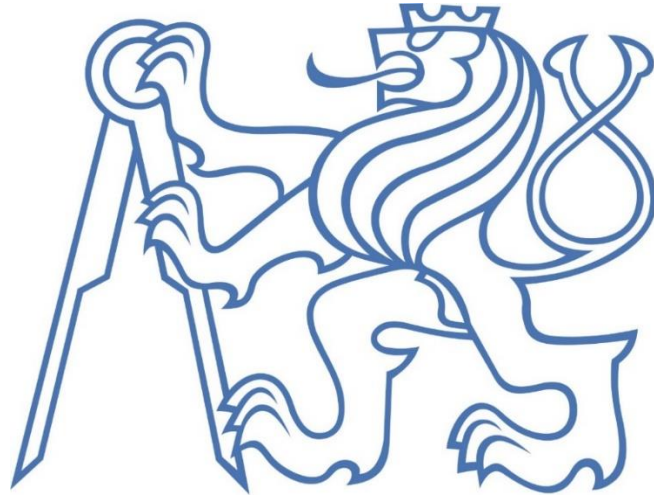


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Optimalizace procesu kovových aditivních  
technologií**

**Process optimization of metal additive technologies**

**Autor:** Bc. Jiří Blažek

**Studijní program:** Strojní inženýrství (N2301)

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Šimota

Praha 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Blažek** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **457639**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Optimalizace procesu kovových aditivních technologií**

Název diplomové práce anglicky:

**Process optimization of metal additive technologies**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše problematiky kovového tisku.
2. Optimalizace nastavení a realizace zkušebních vzorků.
3. Analýza výsledků a definice parametrů pro perspektivní využití.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

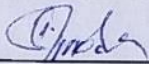
**Ing. Jan Šimota, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

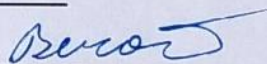
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

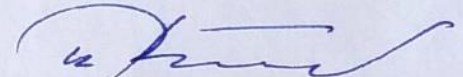
Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_



Ing. Jan Šimota  
podpis vedoucí(ho) práce



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



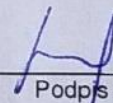
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Prohlášení

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

V Praze dne .....

podpis autora.....

## Poděkování

Rád bych poděkoval všem, bez kterých by tato diplomová práce nevznikla. Konkrétněji vedoucímu práce Ing. Janu Šimotovi za důvěru a ochotu, Ing. Filipu Rušarovi za skvělou spolupráci a zpětnou vazbu, Bc. Davidu Štěpánovi za korekci textu, a pánům od tiskárny za jejich ochotu vytisknout vše potřebné. Dále bych rád poděkoval hlavně rodičům, ale i všem ostatním, kteří mě podporovali na mé cestě studiem.

## Anotace

Tato diplomová práce pojednává o optimalizaci procesních parametrů kovových aditivních technologií. Teoretická část obsahuje výčet kovových aditivních technologií, oblasti jejich využití či používané materiály. Dále popisuje procesní parametry, konstrukci tiskáren, zdravotní rizika a porovnává aditivní a konvenční technologie. V praktické části je provedena rešerše dostupných procesních parametrů, na jejímž základě je proveden návrh a optimalizace procesních parametrů kovového 3D tisku při tloušťce vrstvy 100  $\mu\text{m}$ .

## Klíčová slova

Kovový 3D tisk, optimalizace, procesní parametry, aditivní technologie, 100  $\mu\text{m}$

## Annotation

This thesis is about optimization of parameters for additive metal technologies. Theoretical part contains summary additive metal technologies, their application and used materials. Further it describes process parameters, printer construction, health hazards and compares additive and conventional technologies. Practical part contains overview of available process parameters which is base for a draft and optimization of process parameters of 3D metal print with 100  $\mu\text{m}$  layer thickness.

## Keywords

3D metal printing, optimization, proces parameters, additive technologies, 100  $\mu\text{m}$

## Seznam použitých zkratk

3D	Trojdimenzionální
SLA	Stereolithography
FDM	Fused Deposition Modeling
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
USD	United Stated Dollar
EUR	Měna eurozóny
DED	Direct Energy Deposition
PBF	Powder Bed Fusion
MJF	Metal Jet Fusion
LENS	Laser Engineered Net Shape
EBAM	Electron Beam Additive Manufacture
PREP	Plasma Rotating Electrode Process
GA	Gas Atomization
SEM	Scanning Electrone Microscope
CAD	Computer Aided Design
STL	Univerzální datový formát
BaL	Beneš a Lát a.s.
HAZ	Heat Affected Zone
LS	Laser Speed
SW	Software

## Obsah

Zadání .....	2
Anotace .....	5
Seznam použitých zkratk .....	6
Úvod.....	11
Teoretická část .....	12
1. Historie.....	12
2. Současný trh.....	13
3. Oblasti využití.....	14
3.1. Letecký průmysl.....	14
3.2. Automobilový průmysl .....	15
3.3. Zdravotnictví .....	16
3.4. Energetický průmysl .....	17
3.5. Stavební průmysl.....	17
4. Rozdělení technologií .....	19
4.1. Powder Bed Fusion .....	20
4.1.1. SLM (DMLS) .....	21
4.1.2. EBM.....	22
4.2. Binder Jetting .....	22
4.3. DED.....	23
4.3.1. LENS .....	23
4.3.2. EBAM.....	23
4.4. Hybridní technologie.....	24
5. Materiály.....	26
5.1. Nástrojová ocel 1.2709.....	26
5.2. Výroba práškového materiálu .....	27
5.2.1. Plynová atomizace .....	27

5.2.2.	PREP .....	28
5.2.3.	Plazmová atomizace .....	28
5.2.4.	Plazmová sféroidizace .....	29
5.3.	Parametry materiálu .....	29
5.4.	Recyklace prášku .....	29
6.	Procesní parametry .....	31
6.1.	Tloušťka vrstvy .....	31
6.2.	Rychlost skenování .....	32
6.3.	Výkon laseru .....	32
6.4.	Šrafovací vzdálenost .....	33
6.5.	Hustota energie.....	33
6.6.	Sledované parametry .....	34
7.	Tiskárny a jejich konstrukce .....	36
7.1.	Pracovní prostor .....	36
7.2.	Nanašeč .....	37
7.2.1.	Měkký nanašeč .....	37
7.2.2.	Tvrký nanašeč .....	37
7.2.3.	Minimalizace defektů .....	37
7.3.	Zásobníky práškového materiálu .....	38
7.4.	Zdroj energie .....	38
7.5.	Chlazení.....	39
7.5.1.	Smrštění .....	39
8.	Software .....	40
8.1.	Materialise Magics .....	41
8.2.	Predikce tisku .....	41
9.	Zdravotní rizika.....	42
9.1.	Způsoby kontaminace .....	42



9.2.	Zdravotní komplikace .....	42
10.	Porovnání s konvenčními technologiemi.....	43
	Praktická část .....	45
11.	Návrh experimentu .....	45
12.	Návrh procesních parametrů.....	46
12.1.	Rešerše dostupných zdrojů .....	46
12.2.	Stávající parametry .....	47
12.3.	Aproximace hodnot .....	47
12.4.	Procesní parametry .....	48
13.	Single tracky .....	49
13.1.	Příprava a tisk .....	49
13.2.	Vizuální vyhodnocení.....	51
13.3.	Příprava metalografických výbrusů.....	53
13.4.	Vyhodnocení metalografických výbrusů.....	54
13.5.	Celkové vyhodnocení .....	56
14.	Objemová tělesa V1 .....	57
14.1.	Návrh parametrů .....	57
14.2.	Příprava tiskových dat .....	58
14.3.	Tisk objemových těles .....	59
14.4.	Vizuální vyhodnocení.....	60
14.5.	Příprava metalografických výbrusů.....	60
14.6.	Vyhodnocení metalografických výbrusů.....	61
15.	Objemová tělesa V2.....	63
15.1.	Návrh parametrů .....	63
15.2.	Příprava objemových těles .....	63
15.3.	Tisk objemových těles .....	64
15.4.	Vizuální vyhodnocení.....	65

15.5.	Příprava metalografických výbrusů.....	65
15.6.	Vyhodnocení metalografických výbrusů.....	66
16.	Tahové zkoušky .....	69
	Závěr .....	71
	Zdroje.....	72
	Seznam obrázků.....	76
	Seznam tabulek .....	78

## Úvod

Aditivní technologie výroby součástí nabízejí široké spektrum možností, které jsou pomocí konvenčních metod nedosažitelné či finančně nepřijatelné. Díky jejich flexibilitě je možné zkrátit čas od návrhu po hotový výrobek na minimum a vyrobit součásti zdánlivě nevyrobitelné. Při jejich neustálém rozvoji dochází k jejich širšímu a efektivnějšímu využívání napříč škálou nejrůznějších uplatnění, k finanční a časové úspoře, ale i ke snížení zátěže životního prostředí.

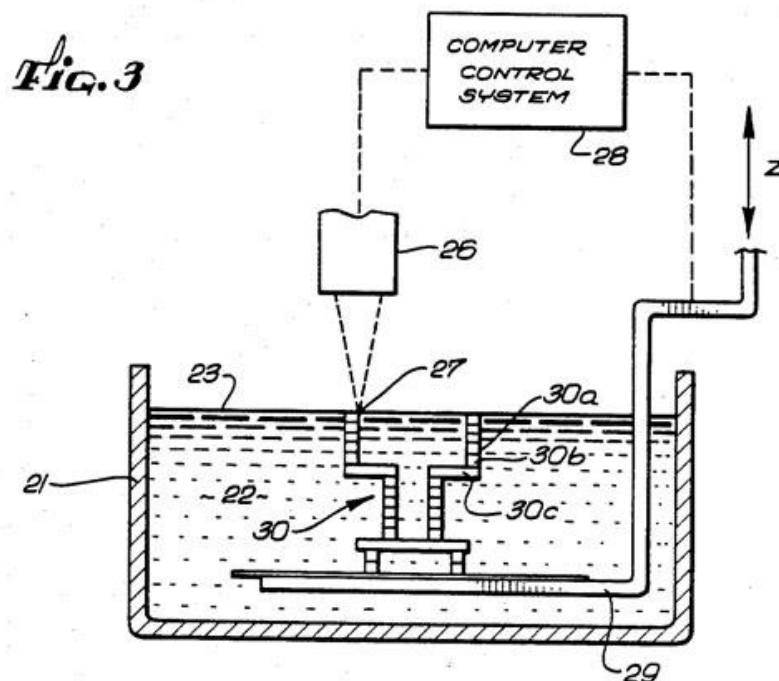
Princip kovových aditivních technologií je založen na postupném tvoření vrstev na stavební platformě. Tloušťka vrstvy nanášeného materiálu do jisté míry ovlivňuje finanční náročnost celkového procesu výroby. Tloušťka vrstvy při standardních aplikacích se pohybuje od 20  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$ . Při zvýšení tloušťky vrstvy na 100  $\mu\text{m}$  může být dosaženo zvýšení produktivity a tím také značné finanční úspory.

Cílem této práce bylo provést rešerši na téma aditivních technologií a jejich procesních parametrů, a na jejím základě navrhnout a optimalizovat procesní parametry pro tisk součástí při tloušťce vrstvy 100  $\mu\text{m}$ . Relativní hustota vyrobeného materiálu by měla přesahovat hodnotu 99,9 % a při optimalizaci by měl být brán zřetel na efektivitu procesu.

## Teoretická část

### 1. Historie

Jako základ vzniku technologií 3D tisku je považován jejich objev Charlesem Hullem v roce 1984. Své objevy si nechává patentovat a tak 11. března 1986 vychází patent nazvaný „Zařízení pro výrobu trojrozměrných objektů pomocí stereolitografie“, kde dochází k definování stereolitografie (SLA), jakožto metody pro výrobu pevných objektů pomocí postupného vrstvení tenkých vrstev materiálu vytvrditelného ultrafialovým zářením. Schematické znázornění technologie, které bylo uvedené v patentovém spisu, je zobrazeno na Obr. 1. Po uvedení svého objevu zakládá ještě v roce 1986 společnost 3D Systems, která dodnes působí v oblasti 3D tisku. V témže roce také uvádí na trh první komerční 3D tiskárnu. I přes značnou dominanci stereolitografie dochází k objevům dalších technologií. Nejdříve je objevena technologie FDM (Fused Deposition Modeling), kterou si nechává patentovat Scott Crump, zakladatel společnosti Stratasys. K rozvoji 3D tisku kovových materiálu dochází v 90. letech 20. století díky objevu laserového tavení a sintrování (spékání) materiálu. Tento princip používají metody selektivní laserové slinování (SLS) a selektivní laserové tavení (SLM), popřípadě Direct Metal Laser Sintering (DMLS). [1,2]



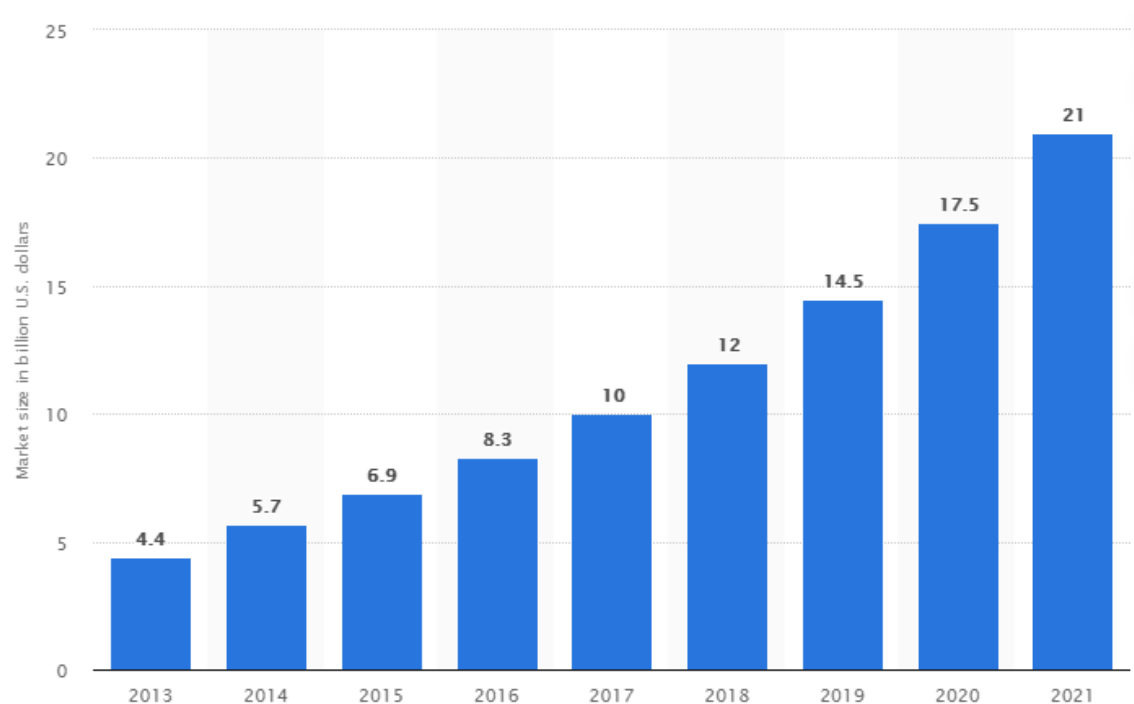
Obr. 1 - Patentové schéma technologie SLA [3]

V roce 1997 dochází k založení společnosti Arcam, specializující se na výrobu 3D tiskáren využívajících pro tisk kovových součástí elektronový paprsek (EBM). Následujícího roku uvádí společnost Geometry Objects na trh novou technologii, která je nazvaná PolyJet. V roce 2005 je na trh uveden open source projekt nazvaný Reprap, který způsobí značný rozvoj a zpřístupnění technologii pro širší spektrum uživatelů. [1,3]

V roce 2009 dochází k vypršení platnosti patentových práv na používání technologií FDM a SLA, a tak dochází k překotnému vývoji a rozšíření technologií. Vzniká nejen spousta společností vyrábějících dostupné tiskárny pro širší veřejnost, ale také společnosti vyrábějící špičkové průmyslové tiskárny (například Desktop Metal, Carbon 3D). [3]

## 2. Současný trh

V současné době dochází k masivnímu rozvoji a rozšíření aditivních technologií po celém světě. Celková hodnota trhu 3D tisku byla v roce 2019 zhruba odhadována na 13,7 miliard USD. [4]

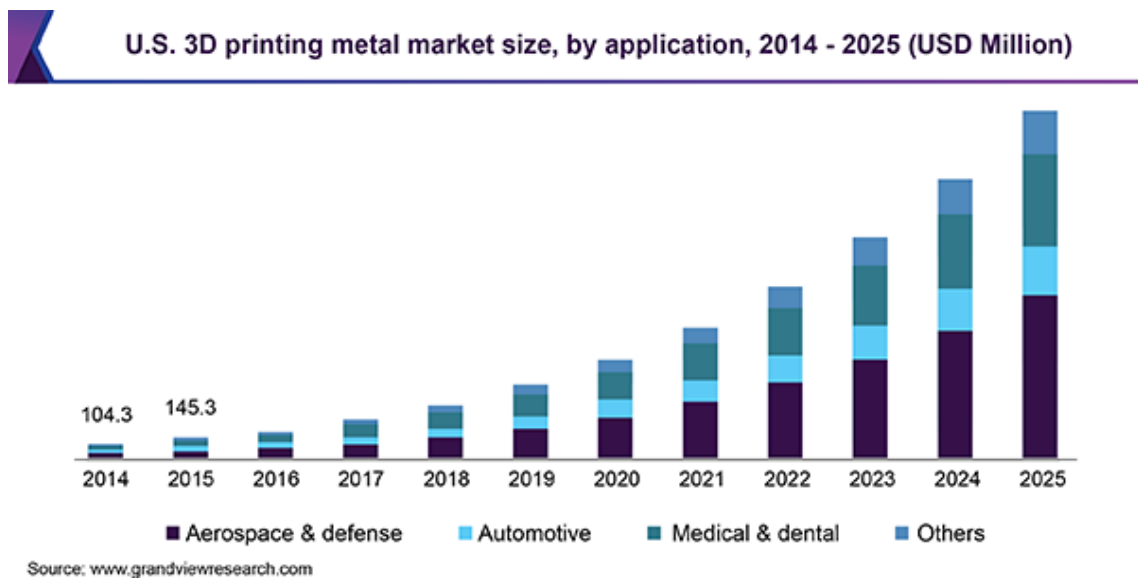


Obr. 2 - Růst hodnoty trhu 3D tisku v mld. USD [5]

Z Obr. 2 je patrné, že tato hodnota každoročně stoupá. Během let 2013 až 2017 došlo ke zdvojnásobení hodnoty trhu, a očekává se její nárůst pro rok 2025 až na 63,46 miliard USD. Tento trh je převážně ovládán hrstkou velikých společností, mezi které patří například Stratasys Ltd., 3D Systems Co., EOS GmbH, Arcam AB a další. Tyto společnosti investují obrovské peníze do rozvoje trhu. [4, 5]

### 3. Oblasti využití

Díky specifickým možnostem aditivních technologií je jejich oblast využití velmi široká. Aditivní technologie jsou využívány hlavně v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu a ve zdravotnictví. Předpokládá se, že v roce 2025 bude zhruba 84% trhu aditivních technologií připadat právě na tyto tři odvětví. Další rozvíjející se uplatnění lze nalézt v oblasti energetického a stavebního průmyslu. [6]



Obr. 3 - Rozložení Amerického trhu kovového 3D tisku pro jednotlivá průmyslová odvětví [7]

Vzájemný podíl jednotlivých průmyslových odvětví využívajících 3D tisk kovových součástí na Americkém trhu v průběhu let, je zobrazen na Obr 3. Je patrné dominantní postavení leteckého a zdravotního průmyslu. [7]

#### 3.1. Letecký průmysl

Využívání aditivních technologií v leteckém průmyslu se stává velmi populární, neboť oproti klasickým výrobním technologiím má příznivý poměr buy-to-fly. Tento poměr se používá k hodnocení využití materiálu v letectví, a jedná se o poměr nakoupeného materiálu vůči materiálu, který se reálně dostane do vzduchu. Odhaduje se, že použití aditivních technologií při výrobě letadla, by mohlo ušetřit až 4,3mil. EUR na jedno letadlo, a to díky úspoře při výrobě a úspoře paliva způsobené snížením hmotnosti. [6]

Například společnost GE Aviation vyvinula palivovou trysku, zobrazenou na Obr. 4, vyrobenou pomocí aditivních technologií. Původní tryska se skládala z 18 částí, přičemž nová tryska je vyrobena z jednoho kusu. Dále se podařilo snížit hmotnost o čtvrtinu a

pětinásobně prodloužit životnost. Společnost plánuje vyrábět ročně až 100 000 ks součástí pomocí aditivních technologií, přičemž chce využít až 400 tiskáren. [6]

Mezi další uživatele aditivních technologií v oblasti letectví patří firma SpaceX, která se zabývala tiskem spalovacích prostorů motoru z niklové superslitiny a dalších tepelně či vibračně namáhaných součástí motorů. Mezi výhody, které tyto technologie do tohoto odvětví přináší, patří rychlá možnost změny výroby a nesrovnatelně jiné vlastnosti a možnosti, než nabízejí klasické technologie. [6]



*Obr. 4 - Tryska leteckého motoru vyrobená pomocí aditivních technologií společností GE Aviation [6]*

### 3.2. Automobilový průmysl

Rozvoj aditivních technologií se nevyhnul ani automobilovému průmyslu. K využití těchto technologií dochází již při navrhování prototypu, a to nejdříve výrobou modelů, následně některých součástí, popřípadě speciálního nářadí. Díky dostupnosti těchto technologií je možné značně zrychlit vývoj nových součástí či celých automobilů. [8]

Nejen při vývoji, ale i při samotné výrobě se využívají aditivní technologie. S jejich pomocí je možné dosáhnout značné hmotnostní úspory, například u hliníkových dílů je možné dosáhnout pomocí vnitřních struktur až 80% hmotnostní úspory. Jak již bylo zmíněno, tyto úspory se projeví nejen v ceně vozidla, ale i v jeho hospodárnějším provozu. Další využití není čistě praktické, ale spíše luxusní požadavek. Například zákazníci firmy Rolls-Royce si mohou nechat vyrobit zakázkový interiér či jiné části vozidla, přičemž se využívají aditivní technologie. [8]

Aditivní technologie však mají i využití u vozidel, která dávno přesáhla svou předpokládanou životnost. Dlouholetý výrobce automobilů Porsche zavádí aditivní výrobu již dávno nedostupných náhradních dílů pro klasické automobily. Množství takto potřebných dílů je většinou velmi malé, a tak by se nevyplatilo vyvíjet a vyrábět nástroje. Na Obr. 5 je zobrazen náhradní díl pro Porsche 911, který byl vyroben v rámci tohoto programu. [8, 9]



*Obr. 5 - Náhradní díl pro Porsche 911 vyrobený pomocí aditivních technologií [9]*

V Číně již proběhly pokusy s kompletně vytištěnými vozy, ale dlouhé trvání tisku stále nedovoluje využít tuto možnost v reálné produkci. Aditivní technologie mají v automobilovém průmyslu našlápnuto na bohatou budoucnost, avšak je třeba stále se věnovat jejich rozvoji, aby došlo k zrychlení procesu a lepší cenové dostupnosti. [8]

### 3.3. Zdravotnictví

Z pohledu nároků na materiály používané ve zdravotnictví nabízí aditivní technologie zajímavé možnosti. Na takovéto implantáty jsou kladeny veliké nároky nejen z hlediska kvality, struktury, povrchu a pevnosti, ale i z pohledu biokompability. Proto mezi nejpoužívanější materiály v tomto odvětví patří titanové, nebo kobalt-chromové slitiny, které kombinují výborné vlastnosti s dobrou biokompabilitou. Klasické kovové implantáty mají vyšší tuhost než kost, ve které jsou umístěny, což může časem vést k jejich uvolnění, způsobení bolesti a nutnosti chirurgického zákroku. Implantáty vyrobené pomocí aditivních technologií lze vyrobit s vlastnostmi blízcími se reálné kosti, což značně prodlužuje jejich životnost a kvalitu života pacienta. [6]



Mezi vyráběné implantáty patří zubní náhrady, kyčelní klouby, jednotlivé obratle, různé výztužné části při léčení zlomenin, či celé protézy nahrazující chybějící končetiny. Vzhledem k různým nárokům na každý individuální implantát jsou aditivní technologie velmi vhodné a přínosné, neboť lze postavit implantát na míru konkrétní osobě. Titanový obratel, který byl vytisknut firmou EOS, je zobrazen na Obr. 6. [6, 10, 11]



*Obr. 6 - Titanový obratel vytisknutý firmou EOS [11]*

Dále se tyto technologie používají i v oblastech výzkumu a výroby léčiv, výzkum rakoviných buněk a jiných defektů, či k tréninku chirurgických zákroků. Provádět tyto úkony je umožněno díky tomu, že je například tisknuta umělá kůže, tkáň, či celé orgány z biomateriálů. [10]

#### 3.4. Energetický průmysl

Mezi nejčastější využití aditivních technologií v oblasti energetického průmyslu patří opravy turbín. Pokud dojde k jejich opotřebení, tak se odstraní opotřebovaná část a pomocí aditivních technologií dojde k jejímu nahrazení. Takováto oprava je až o 90 % rychlejší než pomocí klasických technologií. Dále může docházet k vylepšování stávajících zařízení na základě zvyšujících se nároku, přičemž cena takového úkonu je mnohem menší než náhrada kompletního zařízení. [6]

#### 3.5. Stavební průmysl

Stavební průmysl do jisté míry využívá aditivní technologie zpracovávající různé materiály. Mezi počiny, které stojí za zmínku, je vhodné zařadit vytištěný kovový most

MX3D, který je od roku 2019 umístěn v centru Amsterdamu. Most o délce 10 m, šířce 2,5 m je zobrazen na Obr. 7, a k jeho tisku byla použita technologie DED (Directed Energy Deposition).

Mezi další výrobky testované ve stavebnictví patří speciální fasádní klouby či držáky osvětlení. I zde je možné dosáhnout značných materiálových úspor, avšak časová náročnost je bohužel stále značným problémem proti zavedení do sériové výroby. [6]



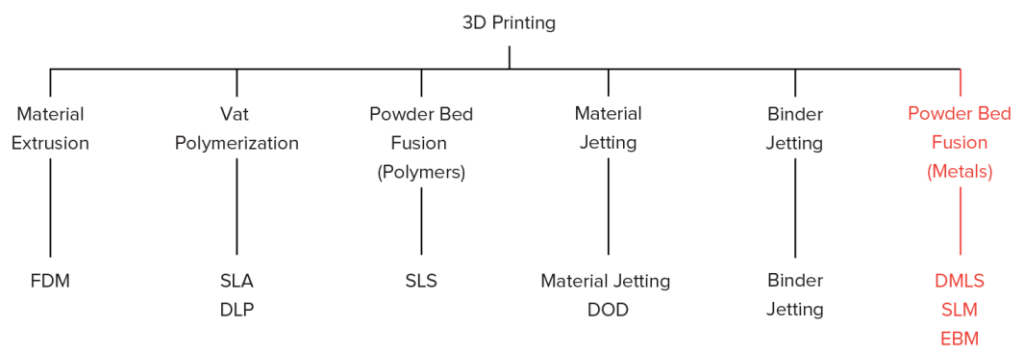
*Obr. 7 - Kompletně vytištěný MX3D most [6]*

#### 4. Rozdělení technologií

Rozdělení aditivních technologií je dáno normou ISO/ASTM 52,900:2015 (Additive manufacturing— General principles—Terminology), na jejímž základě jsou děleny do sedmi kategorií:[12]

- Vat Photo Polymerization (Fotopolymerizace)
- Material Extrusion (Vytlačování materiálu)
- Powder Bed Fusion (Spékání práškové vrstvy)
- Material Jetting (Tryskání materiálu)
- Binder Jetting (Tryskání pojiva)
- Sheet Lamination (Laminace vrstev)
- Directed Energy Deposition (Řízená energetická depozice)

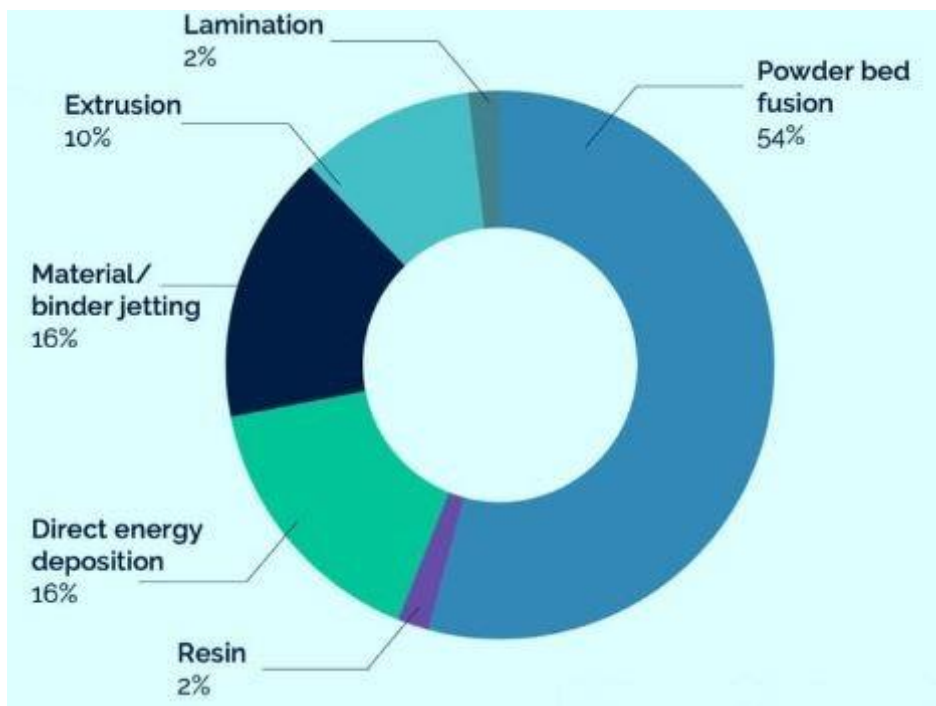
Aditivní technologie využívané v oblasti 3D tisku jsou zobrazené na Obr. 8.



Obr. 8 - Rozdělení technologií 3D tisku [13]

Pro účely této diplomové práce jsou následně popsány technologie, které se používají pro tisk kovových součástí, popřípadě součástí s obsahem kovů a zvláště bude větší rozsah věnován technologii DMLS, neboť byla využita v praktické části práce.

Dominantní postavení PBF technologií pro kovový 3D tisk je zřetelné z rozložení trhu zobrazeného na Obr 9. Z tohoto obrázku je patrné, že více než polovina všech prodaných zařízení v roce 2019 používá tyto technologie. [14]



Obr. 9 - Rozložení trhu se zařízením k 3D tisku kovových součástí v roce 2019 [14]

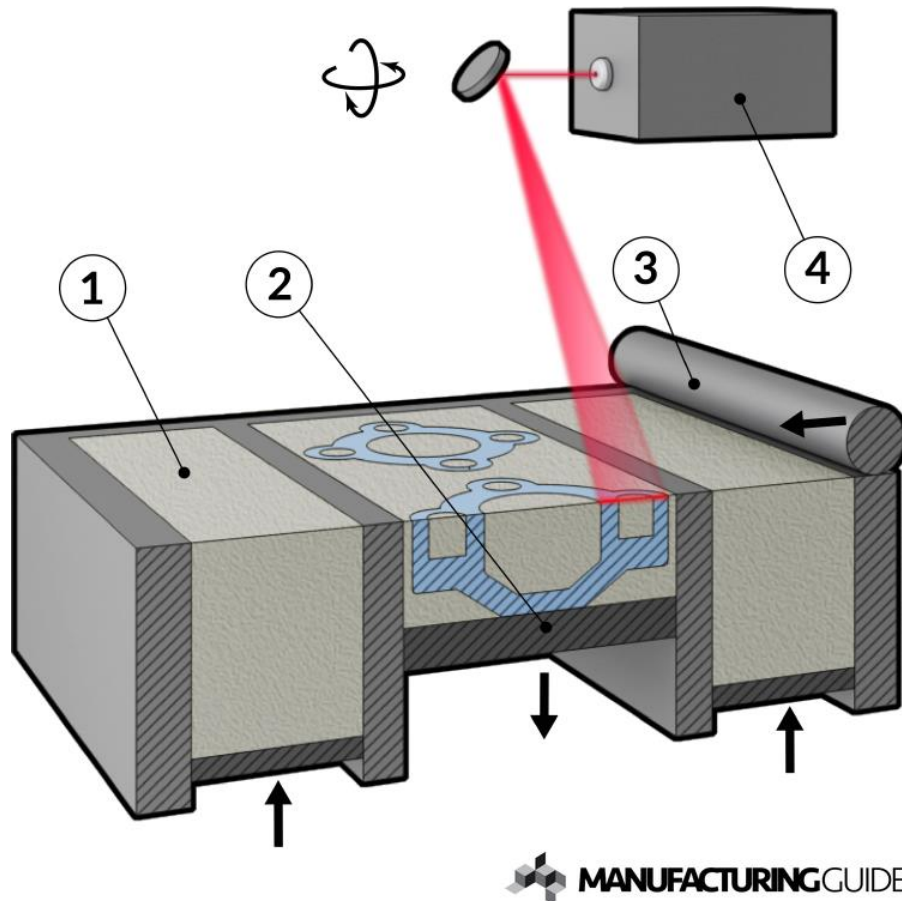
#### 4.1. Powder Bed Fusion

Výroba součástí pomocí PBF technologií využívá tepelný zdroj, který způsobuje fúzi (tání, či slinování) mezi částicemi stavebního materiálu. Rozdíly mezi jednotlivými technologiemi jsou dány tím, jaký zdroj tepelného záření je použit (laserový, nebo elektronový paprsek). Mezi technologie spadající do této kategorie patří SLM, DMLS a EBM, přičemž SLM a DMLS využívají laserový paprsek pro tavbu materiálu a EBM využívá elektronový paprsek. Dále do této kategorie řadíme SLS, avšak tuto technologii nelze využít pro tisk kovových součástí, tudíž zde není popisována.

Součásti vyrobené pomocí těchto technologií vykazují obvykle velmi vysokou pevnost, tuhost a dobré mechanické vlastnosti. Díky širokému spektru možností následného zpracování lze dosáhnout různých kvalit povrchu, což vede k jejich využívání jakožto finálního produktu. Mezi nevýhody těchto metod patří náchylnost k porositě, smršťování a problémy spojené s manipulací a likvidací prášku. [15]

Princip technologií je zobrazen na Obr. 10. V zásobnících (1) je uložen předehřátý materiál, který je postupně nanášečem (3) nanášen do pracovního prostoru stroje (2), kde tvoří rovnoměrnou vrstvu. V této vrstvě je pomocí laseru (4) vytvářen odpovídající řez součástí. Po jeho dokončení dojde k posuvu pracovního prostoru směrem dolů, aby mohla být vytvořena další vrstva materiálu. Velikost posuvu dolů se označuje jako

tloušťka vrstvy, jejíž hodnota se pohybuje v rámci desítek  $\mu\text{m}$ . Tento proces se neustále opakuje, dokud není součást vytištěná. Z uvedeného principu vyplývá, že vznikající součást je zapouzdřena v nevyužitém materiálu, tudíž nelze vytvořit uzavřený dutý prostor, neboť by byl plný nenataveného materiálu. Materiál, který zůstává nevyužit okolo součásti, se může znovu použít, čímž dochází ke značné nákladové úspoře. [16]



Obr. 10 - Princip technologie SLM a DMLS [16]

#### 4.1.1. SLM (DMLS)

SLM (Selective Laser Melting) či DMLS (Direct Metal Laser Sintering) metody využívají podobný princip jako metoda SLS (Selective Laser Sintering). Rozdíl mezi SLM a DMLS je ve způsobu spojování jednotlivých částic materiálu. U metody SLM dochází k plnému natavení materiálu, kdežto u metody DMLS dochází k ohřátí těsně pod teplotu tavení a částice jsou spojovány pomocí chemických procesů.

Rozsah materiálů u metody DMLS je omezen pouze na vícesložkové materiály, kdežto SLM může pracovat i s čistými kovy, jako je například hliník. Mezi další používané materiály se řadí Titan, korozivzdorná ocel, niklové slitiny, kobalt-chromové slitiny a jiné. Pro obě technologie je nutné používat podpurné struktury, neboť dochází ke vzniku



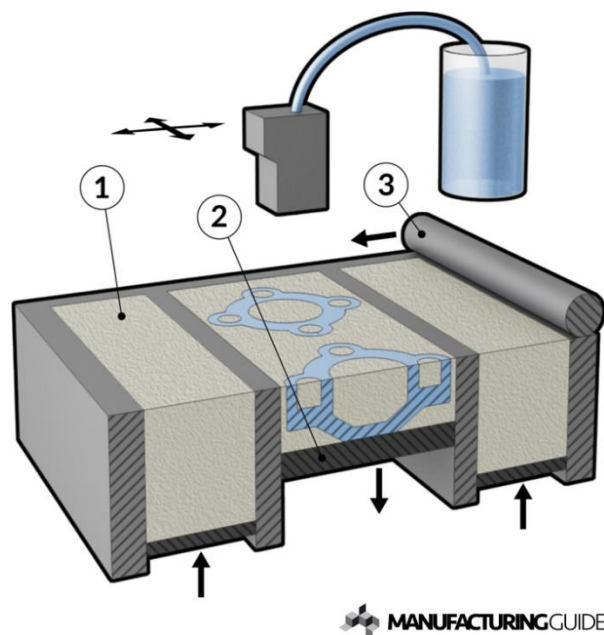
zbytkových napětí a mohlo by docházet k nežádoucím deformacím. Mezi hlavní výrobce těchto technologií se řadí EOS GmbH, 3D Systems co., SLM Solution, Concept Laser či Renishaw.[15]

#### 4.1.2. EBM

Jak již bylo zmíněno, EBM (Electron Beam Melting) technologie využívá k natavování práškového materiálu elektronový paprsek. Elektronový paprsek, zaostřený na tenkou vrstvu naneseného prášku, způsobuje lokální natavování a tuhnutí specifikovaného místa. Mezi výhody této technologie lze řadit vznik menších zbytkových napětí než je tomu u předcházejících technologií, což vede k pozitivnímu zmenšení deformací a není třeba využívat takové množství podpor. Taktéž je tato metoda méně energeticky náročná a rychlejší než metody SLM a DLMS. Mezi nevýhody patří snížená kvalita vzniklého povrchu, nutnost výroby součástí ve vakuu a možnost její aplikace pouze na vodivé materiály. Mezi hlavní výrobce této technologie patří společnost Arcam. Používané materiály pro tuto technologii jsou například titan, nebo kobalt-chromové slitiny. [15]

#### 4.2. Binder Jetting

Binder Jetting, neboli nanášení pojiva, je technologie při které se nanáší pojivo na tenké vrstvy práškového materiálu. Tyto práškové materiály mohou být na bázi keramiky, či kovu. Mezi používané kovové materiály se řadí korozivzdorná ocel, karbid wolframu či kobalt chromové slitiny.



Obr. 11 - Princip technologie Binder Jetting [17]

Princip tisku je podobný jako u FBM technologií, avšak místo paprskového zdroje se nad ložem pohybuje tisková hlava, která nanáší pojivo. Schématické vyobrazení této technologie je na Obr. 11. Po dokončení vrstvy dojde k posuvu lože dolů, nanesení nové vrstvy prášku a proces se opakuje. Pro zlepšení mechanických vlastností se již během tisku používá infiltrát, v případě kovových součástí se jedná o bronz. Po dokončení je třeba součást ještě dodatečně zpracovat, neboť vytištěný díl je velmi křehký a má špatné mechanické vlastnosti. [15]

### 4.3. DED

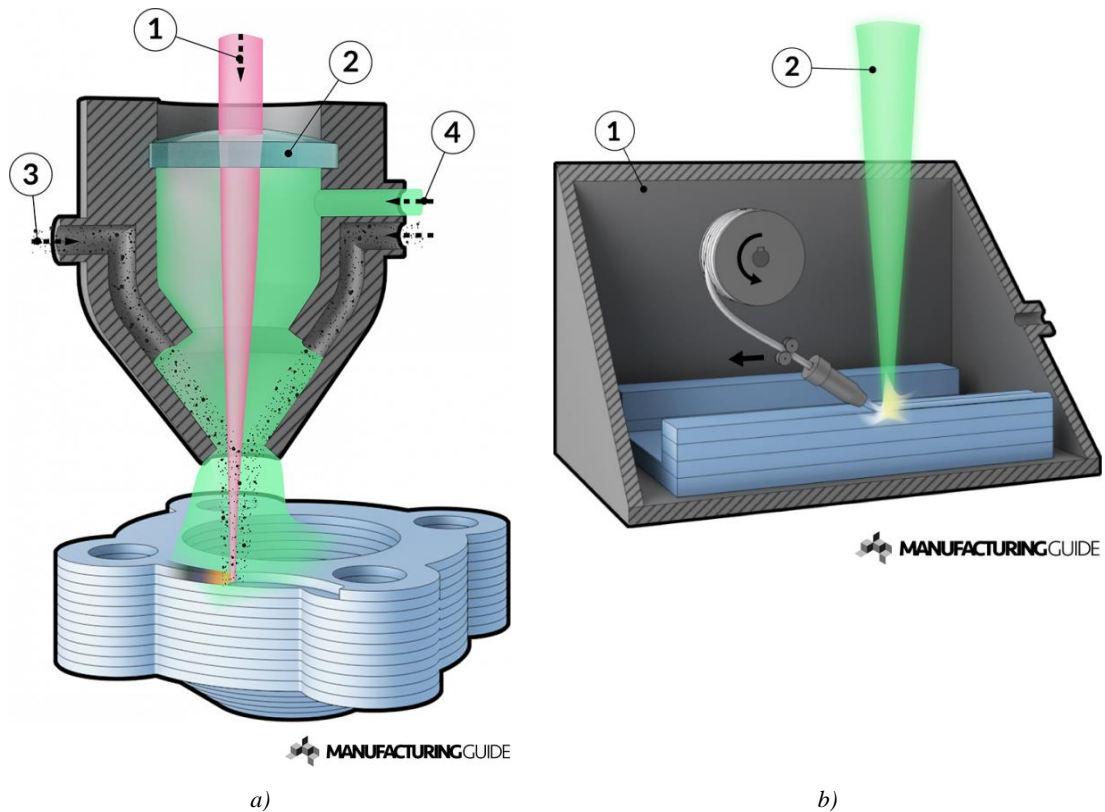
DED (Direct Energy Deposition) je technologie, u které dochází k tavně práškového, nebo drátového materiálu přímo při jeho nanášení. Mezi tyto technologie patří LENS a EBAM. Rozdíl mezi nimi, podobně jako u PBF technologií, je dán způsobem tavy materiálu. Vzhledem k podstatě nanášení materiálu u těchto technologií, jsou vhodné pro nanášení materiálu na již existující součásti, jako například lopatky turbín. Naproti tomu, díky silné potřebě podpurných struktur, se nehodí na stavbu součástí od počátku. [15]

#### 4.3.1. LENS

LENS (Laser Engineered Net Shape) technologie využívá speciální nanášecí hlavu, ve které dochází k natavování materiálu pomocí laseru. Schématické znázornění této technologie je na Obr. 12 a). Laserový paprsek 1) je zaměřován pomocí čočky 2) na pracovní plochu a dochází k natavování materiálu 3). Celý proces se děje v prostředí inertní atmosféry 4), aby nedocházelo k nežádoucím jevům během svařovacího procesu. Mezi používané materiály patří titan, korozivzdorná ocel, hliník, měď, nebo nástrojová ocel. [15, 18]

#### 4.3.2. EBAM

EBAM (Electron Beam Additive Manufacture) technologie využívá, oproti LENS, k tavně elektronový paprsek. Schéma procesu je znázorněno na Obr. 12 b). Objekt je umístěn ve vakuové komoře 1) a pomocí elektronového paprsku 2) dochází k natavování přídavného materiálu a povrchu součástí. Jakmile dojde k posuvu paprsku, kapalný kov tuhne a dojde ke spojení. EBAM technologie jsou téměř stejné jako LENS, avšak díky použití elektronového paprsku jsou více efektivní.[15, 18]



Obr. 12 - Princip technologií DED a) LENS b) EBAM [18]

#### 4.4. Hybridní technologie

Výhody aditivních technologií jsou značné, a při kombinaci s tradičním obráběním lze dosáhnout unikátních výrobků. Mezi úspěšné průkopníky těchto technologií patří firma DMG MORI. Tato společnost zkombinovala laserové navařování a 5osé obráběcí centrum, čehož výsledkem je unikátní kombinace výrobních možností. Stroj disponuje laserovou navařovací hlavou, která se, jakožto i obráběcí nástroje, dokáže pohybovat a pracovat v 5osém systému bez vlivu změny kvality. Hlavu je možné během procesu automaticky vyměnit za obráběcí nástroj, tudíž je možné obrobit například vnitřní plochu během aditivního procesu, což u běžných technologií není možné. Dále je možné kombinovat různé materiály, díky čemuž lze dosáhnout různých materiálových vlastností v různých částech výrobku. Příkladem této kombinace materiálů je například výměník tepla zobrazený na Obr. 13, jehož vnitřní část je vyrobena z odlišného materiálu než jeho obal. [19]





*Obr. 13 - Výměník tepla vyrobený hybridní technologií [19]*

## 5. Materiály

Většina zde uvedených technologií využívá jako základní stavební materiál kovový prášek. Existují však i technologie, například zmiňovaná EBAM, které používají stavební materiál ve formě drátu. Množství práškového materiálu používaného pro aditivní technologie je z celkového objemu trhu velmi malé (v roce 2013 to činilo pouhých 0,0047%), neboť práškové materiály se hlavně využívají v tradičních procesech slinování či lisování. [20]

Pro výrobu aditivními technologiemi se používá rozsáhlé spektrum kovových materiálů. Přehled základních skupin a jejich zástupců je uveden v Tab. 1. Z uvedených materiálů je níže popsána nástrojová ocel 1.2709, neboť byla součástí praktické části této práce.

Tab. 1 - Přehled používaných materiálů [20]

Oceli	1.2709, 1.7225
Korozivzdorné oceli	1.4404, 1.4307
Slitiny Ni	Inconel 625 (2.4856)
Slitiny Ti	Ti-6Al-4V
Slitiny Al	A356
Slitiny Co	Stellit 6
Slitiny Cu	Bronz, Cu-Ni
Žáruvzdorné kovy a slitiny	W, Ta, Nb, Mo

### 5.1. Nástrojová ocel 1.2709

Ocel 1.2709 je martenziticky vytvrditelná nástrojová ocel. Jiná mezinárodní označení ji označují jako 18Ni (300 grade) maraging steel, nebo X3NiCoMoTi 18-9-5. Označení maraging pochází z anglického výrazu martensite aging, tedy martenzitické stárnutí. Svých výborných mechanických vlastností dosahují díky vzniku nízkouhlíkového martenzitu. Tato ocel je charakteristická vynikající pevností při vysoké houževnatosti, a velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, kterých lze snadno dosáhnout výbornou možností tepelného zpracování. Díky těmto vhodným vlastnostem se často používá ve spojení s aditivními technologiemi pro výrobu složitých nástrojů, speciálně pro tlakové lití. Složení této nástrojové oceli je uvedeno v Tab. 2. [22,23,24]

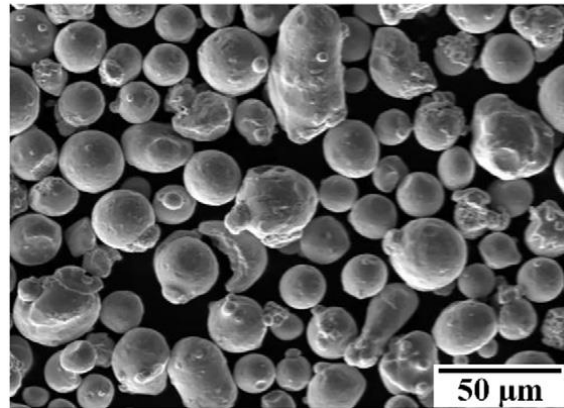
Tab. 2 - Složení nástrojové oceli 1.2709 [22,23]

Prvek	Ni	Co	Mo	Ti	Cr	Si	Mn	Al	C	P	Fe
hm. zl. [%]	17- 19	8,5- 9,5	4,5- 5,2	0,6- 0,8	max. 0,25	max. 0,1	max. 0,15	0,05- 0,15	max. 0,03	max. 0,01	Zbytek

Jak již bylo zmíněno, pro zlepšení mechanických vlastností se využívá tepelného zpracování. Obvykle se nejprve využívá kalení do oleje při teplotách okolo 800 °C, během čehož dochází ke vzniku niklového martenzitu. Takto zakalené materiály jsou dobře obrobitelné či svařitelné. Pro zlepšení finálních vlastností výrobku dochází k vytvrzování zhruba při 450 – 550 °C, kdy může mez kluzu dosáhnout až 2,5 násobné hodnoty. Jak dokládá několik dalších prací, i v oblasti tepelného zpracování výrobků aditivních technologií stále dochází k hledání optimálních parametrů. [22,24]

## 5.2. Výroba práškového materiálu

Pro výrobu práškového materiálu se používá několik různých technologií. Volba jednotlivých technologií značně ovlivňuje vlastnosti materiálu, cenu produktu a spektrum použitelných materiálů. Vzhledem k nutnosti kontinuální dopravy materiálu během aditivního procesu jsou vhodnější takové materiály, jejichž základní částičky mají pravidelný kulový tvar a podobnou velikost. Pro výrobu práškového materiálu využívaného v aditivních technologiích se využívá například plynová atomizace, plazmová atomizace, PREP či plazmová sféroidizace. Na Obr 14. je zobrazena nástrojová ocel 1.2709 vyrobená plynovou atomizací. [20]



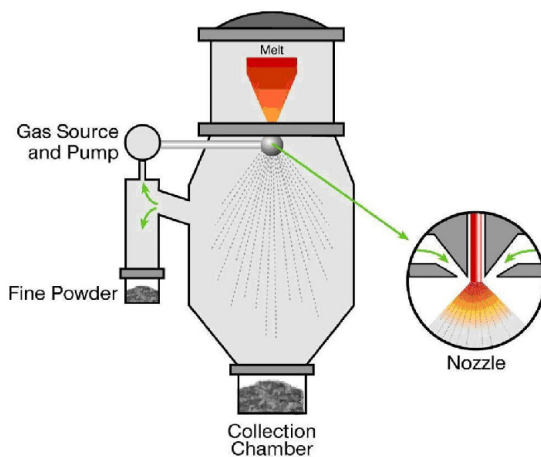
Obr. 14 – Snímek ze SEM na nástrojovou ocel 1.2709 [22]

### 5.2.1. Plynová atomizace

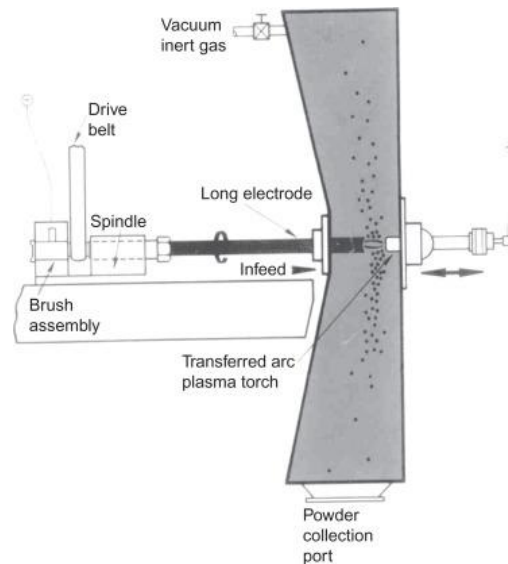
Plynová atomizace (Gas Atomization – GA) je považována za nejoblíbenější technologii produkující kulový prášek. Schématické zobrazení této technologie je znázorněno na Obr. 15.

Základní materiál je natavován v uzavřené peci pod vzduchovým polštářem, inertní atmosférou nebo vakuem. Následně je roztavený kov přiváděn k trysce, odkud může být transportován pomocí vysokého tlaku plynů (Ar, He, nebo N<sub>2</sub>), nebo pouze vlivem

gravitace do prostoru, kde při kontaktu s atmosférou dochází k tuhnutí. Většina ztuhlých částic je kulového tvaru, avšak vznikají i asymetrické částice a satelity (několik částic slepených k sobě během tuhnutí). Ztuhlé částice padají do sběrného místa, odkud dále pokračují k roztřídění. Pomocí této technologie je možné vyrábět částice o velikosti 0-500  $\mu\text{m}$ . Pro zpracování jsou vhodné téměř všechny kovové materiály, například ocele, nerezové ocele, slitiny Ni, slitiny Co, slitiny Ti, slitiny Al, nebo slitiny Cu. [20]



Obr. 15 - Schéma plynové atomizace [21]



Obr. 16 - Schéma PREP [20]

### 5.2.2. PREP

PREP (Plasma Rotating Electrode Process), neboli plazmový proces s rotační elektrodou, využívá základní materiál ve formě tyčí. Jak je znázorněno na Obr. 16, Rotující tyč je tavena při kontaktu s plazmatem a dochází k rozstříku materiálu v ochranné atmosféře či vakuu. Takto vyráběný prášek je téměř 100% kulovitý, většinou neobsahuje nepravidelné částice či satelity, a dosahuje maximální velikosti částic okolo 100  $\mu\text{m}$ , díky čemuž je velmi drahý. Z ekonomického hlediska je tato technologie nejvýhodnější například pro slitiny Ti, slitiny Ni, korozivzdorné oceli nebo slitiny Cu. [20]

### 5.2.3. Plazmová atomizace

Principem plazmové atomizace je tavení drátu materiálu v plazmovém hořáku, kde za pomoci plynů dochází k atomizaci prášku. Finální prášek je velmi dobré kvality a velikost jednotlivých částic je do 200  $\mu\text{m}$ . Zpracovávat jdou pouze materiály, které se dají zformovat do podoby drátu, například slitiny Ti. [20]

#### 5.2.4. Plazmová sféroidizace

Během plazmové sféroidizace dochází k přeměně prášků obsahujících částice nepravidelných tvarů na kulové. Materiál je gravitačně přiváděn do proudu plazmy a je vystřikován tryskou ven. Během letu dojde ke kompletnímu roztavení a ztuhnutí na požadovaný kulový tvar. Takto zpracovaný prášek je velmi čistý, neboť dochází k odpařování nečistot. Obvykle může být použita po technologiích vyrábějících prášek nepravidelného tvaru, jako je například mletí, drcení, atomizací vody nebo sintrování. Taktéž je tento způsob ekonomicky výhodnější pro žáruvzdorné kovy jako je Ta, W, Nb či Mo, ale je možné jej i využít na slitiny Ti, Al nebo Ni. [20]

#### 5.3. Parametry materiálu

U práškového materiálu je třeba sledovat jeho jednotlivé kvalitativní parametry, aby nedocházelo k nepřipustným chybám během výrobního procesu. Mezi sledované parametry patří morfologie, velikost, chemické složení, tok materiálu, hustota a podmínky skladování.

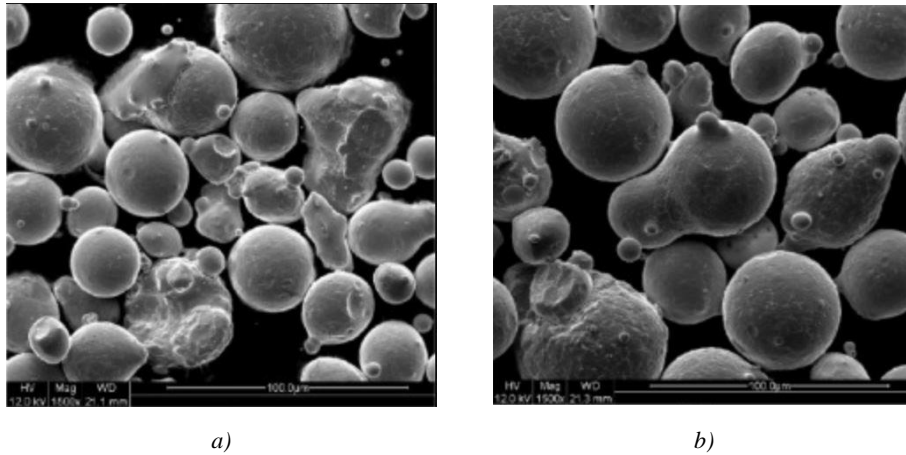
Z hlediska morfologie je pro aditivní technologie ideální kulový tvar, avšak toho není možné dosáhnout na všech částicích materiálu. Taktéž nehomogenita velikosti jednotlivých částic může způsobit nekontinuální dopravu materiálu (tok), což se může projevit vadou na výrobku. Stran chemického složení dochází k hlavnímu ovlivnění možných dosažitelných vlastností a je třeba jej hlídat a kontrolovat. V závislosti na hustotě materiálu se odvíjí velikost rizika zachycení nežádoucích prvků do práškového materiálu. Například se může jednat o atomizační plyn u materiálů vyráběných plynovou atomizací. Tyto nežádoucí prvky se mohou projevit v tisknutém materiálu jako nežádoucí porozita. Rovněž podmínky skladování práškového materiálu mají značný vliv na výslednou kvalitu výrobku, neboť například nežádoucí vlhkost v materiálu způsobuje jeho sníženou tekutost, tvorbu oxidů nebo jiné chemické reakce. [20]

#### 5.4. Recyklace prášku

Jak již bylo uvedeno, mezi hlavní výhody aditivních technologií patří mnohem menší spotřeba materiálu, než je tomu u konvenčních technologií, a to díky možnosti recyklace nevyužitého materiálu. Pokud by nedocházelo ke zpětné recyklaci materiálu, ekonomické důsledky na cenu by byly nepřijatelné.

Během recyklace dochází ke změnám vlastností práškového materiálu. Může docházet ke zlepšení tekutosti materiálu, což by se dalo připisovat na vrub postupnému odstranění

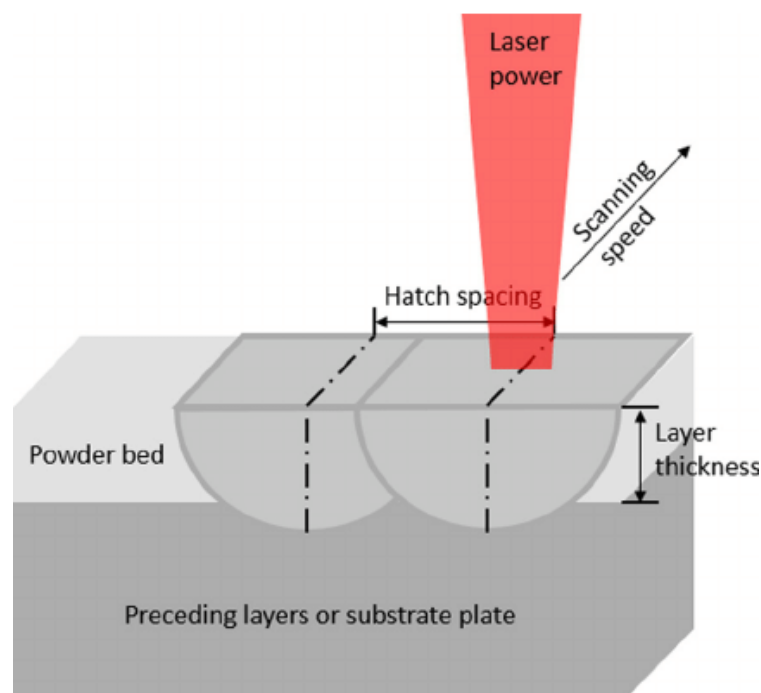
satelitů či odstraňování vlhkosti. Taktéž se objevují záznamy o změně chemického složení, či hustotě materiálu. Na Obr. 17 a) je zobrazena panenská martenzitická ocel 1.4542 a na Obr. 17 b) je zobrazena ta stejná ocel, ale jedenáctkrát recyklovaná. Drobné změny vzhledu jsou patrné, avšak práce [20] uvádí, že nedošlo k významným změnám sledovaných vlastností, tudíž by nemělo docházet k nežádoucím negativním vlivům na vlastnosti finálního výrobku. [20]



*Obr. 17 Snímek ze SEM oceli 1.4542 a) panenská b) recyklovaná [20]*

## 6. Procesní parametry

Průběh a výsledek procesu 3D tisku je do jisté míry závislý na nastavení různých parametrů. Variace kombinací jednotlivých parametrů mimo jiné ovlivňuje výslednou kvalitu výrobku, cenovou náročnost výroby a dobu trvání tisku. Při nevhodné kombinaci může docházet k nežádoucí porozitě, nestabilitě tisku a negativní změně mechanických vlastností. Mezi hlavní parametry, které se dají běžně variovat, patří tloušťka vrstvy (layer thickness -  $t$ ), rychlost skenování (scanning speed -  $v$ ), výkon laseru (laser power -  $P$ ) či šrafovací vzdálenost (hatch spacing -  $h$ ). Jednotlivé parametry jsou názorně zobrazeny na Obr. 18. [25]



Obr. 18 - FBM procesní parametry [25]

Proces 3D tisku je také ovlivňován dalšími parametry, jako je například kvalita materiálu, použité prostředí, možnosti zařízení a jiné. Pro účely této diplomové práce jsou následně podrobněji popsány jen ty parametry, které se dále optimalizovaly, nebo hrály významnou roli v praktické části této práce.

### 6.1. Tloušťka vrstvy

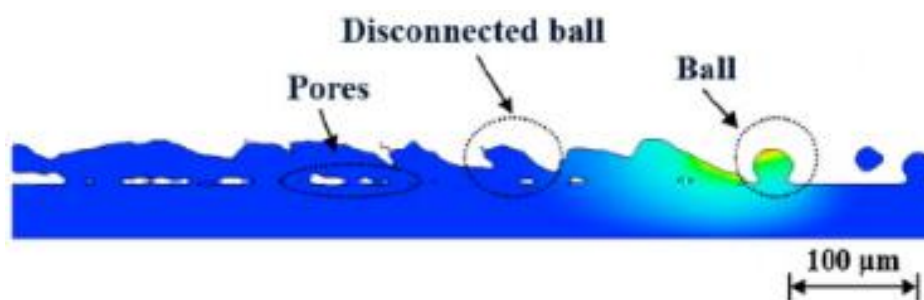
Tloušťkou vrstvy se rozumí výška jedné nanesené vrstvy během procesu 3D tisku. Jedná se o pohyb ve směru osy  $Z$ , tedy směrem do výšky tisknutého objektu. Běžně se u PBF technologií používá tloušťka vrstvy v rozmezí 20-50  $\mu\text{m}$ , avšak je snaha o její zvýšení,

neboť tento parametr značně ovlivňuje dobu tisku, tedy i finanční nákladnost. Z teoretického pohledu je patrné, že pokud dojde ke zdvojnásobení tloušťky vrstvy, tak pro tisk stejné součásti je třeba jen poloviční počet vrstev a tím pádem menší doba trvání tisku. Zvyšování tloušťky vrstvy však s sebou nese rizika spojená s horší kvalitou výsledného povrchu, hrozbu nedokonalého metalurgického spojení jednotlivých vrstev či celkové nezdaření tisku součásti. [26]

## 6.2. Rychlost skenování

Pojmem rychlost skenování se označuje rychlost posuvu tiskové hlavy ve směrech os X a Y. Běžná velikost rychlosti skenování pro PBF technologie se pohybuje v řádu stovek až tisíce mm/s. Rychlost skenování společně s výkonem laseru definuje lineární hustotu energie vstupující do materiálu. Tato energie je definována jako poměr výkonu laseru k rychlosti skenování, přičemž ovlivňuje teplotu tavné lázně a tím pádem výsledek celého procesu.

Při nesprávně zvolené rychlosti vůči ostatním parametrům dochází k nežádoucím jevům. Například příliš malá rychlost skenování způsobí přebytek energie vstupující do materiálu a bude docházet natavování příliš široké oblasti, přehřátí následovaného rozstříkáním materiálu a celkové deformací výrobku. Oproti tomu příliš vysoká rychlost způsobí nedostatečné natavení, nedokonalé metalurgické spojení vrstev a tvorbu různých kulovitých útvarů na povrchu. Podélný řez návarem zhotoveným přílišnou rychlostí skenování je zobrazen na Obr. 19, kde lze pozorovat póry a kulové útvary vzniklé příliš nízkou velikostí vstupující energie. [26, 27]



Obr. 19 - Podélný řez návarem vytvořeným přílišnou rychlostí skenování [27]

## 6.3. Výkon laseru

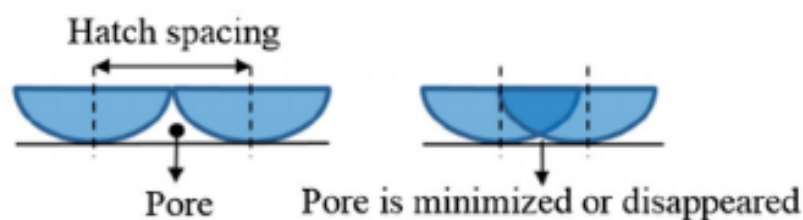
Hodnota vyzařované energie z laserového zdroje se označuje jako výkon laseru. Běžně používané výkony se pohybují v rozmezí 50-500 W. Pokud dojde k mylné volbě výkonu laseru, tak jsou symptomy podobné jako u rychlosti skenování, neboť jak již bylo



zmíněno, tyto dva parametry společně tvoří hustotu laserové energie vstupující do materiálu. Při nízkém výkonu dochází k nedostatečnému natavení materiálu, vzniku pórů a nedochází k dostatečnému metalurgickému spojení jednotlivých vrstev. Naopak při přílišném výkonu dochází k odpařování materiálu, natavování širší oblasti, rozstříku materiálu a nežádoucí deformaci výrobku. [26, 27]

#### 6.4. Šrafovací vzdálenost

Šrafovací (osová) vzdálenost udává rozměr, který je dán jako rozteč středů jednotlivých návarů. Tato vzdálenost musí být taková, aby docházelo k dokonalému metalurgickému propojení jednotlivých návarů, k dostatečné efektivitě procesu a nedocházelo ke vzniku pórovité struktury. Princip vzniku pórovité struktury vlivem velikosti šrafovací vzdálenosti je zobrazen na Obr. 20. Při veliké vzdálenosti návarů by vznikala nehomogenní struktura se zbytky práškového materiálu a výsledný povrch výrobku by byl příliš drsný. Naopak přílišné zmenšení vzdálenosti by vedlo ke značné neefektivitě procesu a vlivem většího množství vnášeného tepla by mohlo docházet k defektům. [26, 27]



Obr. 20 - Vliv šrafovací vzdálenosti na vznik pórů [27]

#### 6.5. Hustota energie

Hustota energie patří mezi kombinované procesní parametry. Je dána kombinací jednotlivých vstupních hodnot, přičemž její nesporná výhoda je v jednoduché komparativnosti různě nastavených procesů. Běžně se používá lineární, plošná a objemová hustota energie. Lineární energie je vyjádřena pomocí výkonu laseru a rychlosti skenování v podobě vzorce 6.5.1:

$$E = \frac{P}{v} \left[ \frac{J}{mm} \right] \quad (6.5.1)$$

E...Lineární energie [J/mm]

P...Výkon laseru [W]

v...Rychlost skenování [mm/s]

Plošná energie je vhodná k posouzení energie použité pro vytvoření single tracků (osamocený návar na substrátu vytvořený pro posouzení vhodnosti zvolených parametrů) a je vyjádřena obdobně jako lineární energie s tím rozdílem, že zde má navíc vliv tloušťka vrstvy. Podoba finálního vztahu je zobrazena ve vzorci 6.5.2:

$$E_2 = \frac{P}{v \cdot t} \left[ \frac{J}{mm^2} \right] \quad (6.5.2)$$

$E_2$ ...Plošná energie [J/mm<sup>2</sup>]

$P$ ...Výkon laseru [W]

$v$ ...Rychlost skenování [mm/s]

$t$ ...Tloušťka vrstvy [mm]

Objemová hustota energie je vyjádřena jako poměr výkonu laseru na objem taveného materiálu. Pomocí objemové hustoty lze snadno porovnávat energii použitou při stavbě objemových těles. Svoji roli zde hraje i tloušťka vrstvy a šrafovací vzdálenost, díky čemuž je tato informace relevantnější pro porovnání jednotlivých procesů. Vzorec pro výpočet objemové hustoty energie je dán jako 6.5.3:

$$E_3 = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \left[ \frac{J}{mm^3} \right] \quad (6.5.3)$$

$E_3$ ...Objemová energie [J/mm<sup>3</sup>]

$P$ ...Výkon laseru [W]

$v$ ...Rychlost skenování [mm/s]

$t$ ...Tloušťka vrstvy [mm]

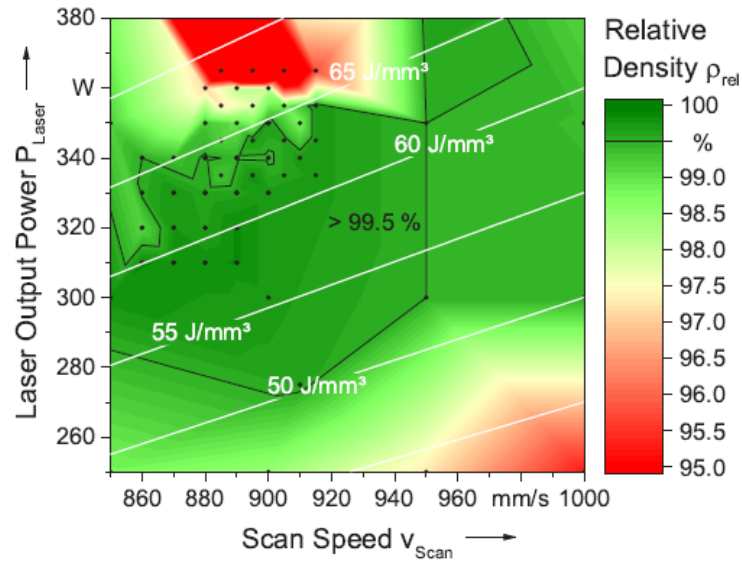
$h$ ...šrafovací vzdálenost [mm]

Běžná hodnota objemové hustoty energie se většinou pohybuje v rozmezí 50-100 J/mm<sup>3</sup>, avšak je možné dosahovat i mnohem rozdílnějších hodnot. [26]

## 6.6. Sledované parametry

Důsledkem volby procesních parametrů jsou ovlivňovány parametry, které sledujeme pro hodnocení kvality dané součásti. Mezi často kladené požadavky na výrobky patří dobré metalurgické spojení, homogenita materiálu, mechanické vlastnosti nebo vysokou relativní hustotu. Čím je relativní hustota materiálu větší, tím méně obsahuje pórů a je

vhodnější (pokud se nejedná o speciální aplikaci kde je pórovitost žádoucí). Požadavky na relativní hustotu bývají minimálně 99%. Vliv výkonu laseru a rychlosti skenování na relativní hustotu je znázorněn na Obr. 21, kdy pro získání této mapy bylo vytištěno 83 objemových těles při různých kombinacích parametrů. [28]



Obr. 21 - Závislost Relativní hustoty na příkonu laseru a rychlosti skenování [28]

## 7. Tiskárny a jejich konstrukce

Paleta tiskáren dostupných na trhu je velmi široká a je možné pořídit tiskárnu od řady větších či menších firem. Mezi hlavní firmy působící na trhu PBF technologií patří například EOS GmbH, Stratasys Ltd., DMG MORI, 3D Systems Co., Renishaw, Concept Laser a další. Technologie tisku jsou napříč škálou výrobců téměř totožné, ale jednotlivé typy tiskáren disponují různými vlastnostmi. Konstrukční uspořádání tiskáren využívajících technologie PBF je zobrazeno na Obr. 10. Jak již bylo nastíněno v kapitole 4.1, mezi hlavní části zařízení patří pracovní prostor tiskárny, nanašeč, zásobníky či sběrače práškového materiálu, tepelný zdroj a chlazení. Tyto části ovlivňují maximální rozměry výrobku, objem a rychlost výroby, kvalitu produkce či pořizovací cenu zařízení.

### 7.1. Pracovní prostor

Pracovním prostorem tiskárny se rozumí prostor, ve kterém je možné tisknout výrobky, tedy určuje jejich maximální rozměry. Malé pracovní prostory obvykle mají laboratorní a nízkoobjemové tiskárny, které obvykle slouží k tištění vzorků pro různé zkoušky či výrobu drobných součástí. Například tiskárna DMP Flex 100 od firmy 3D Systems disponuje pracovním prostorem o rozměrech 100x100x90 mm. [29]



Obr. 22 - EOS M290 [30]

Nejběžnější velikost tiskáren, které se využívají v prototypování i výrobě, disponuje pracovním prostorem o velikostech okolo 250x250x300 mm. Na Obr. 22 je zobrazena tiskárna od společnosti EOS GmbH, konkrétně typ M290, která byl použit pro výrobu

součástí během praktické části této práce. Tato tiskárna disponuje pracovním prostorem 250x250x325 mm, laserem o maximálním výkonu 400 W a rychlostí skenování až 7 m/s. [29, 30]

Velkoobjemové tiskárny jsou vhodné pro výrobu koncových produktů, neboť jsou schopné vyrábět veliké množství výrobků najednou, popřípadě vyrábět rozměrnější dílce. Do této kategorie například patří tiskárna XLine 2000R od společnosti Concept Laser, která disponuje pracovním prostorem o rozměrech 800x400x500 mm. [29]

## 7.2. Nanašeč

Pojmem nanašeč (recoater) je ve většině případů myšlen břit umístěný v zařízení, který slouží k rovnoměrné distribuci práškového materiálu po celém pracovním prostoru tiskárny. Jeho kvalita a odolnost značně ovlivňuje výslednou kvalitu tisku. Obecně existují dva typy, měkký a tvrdý, přičemž každý má své využití, výhody a nevýhody. [31]

### 7.2.1. Měkký nanašeč

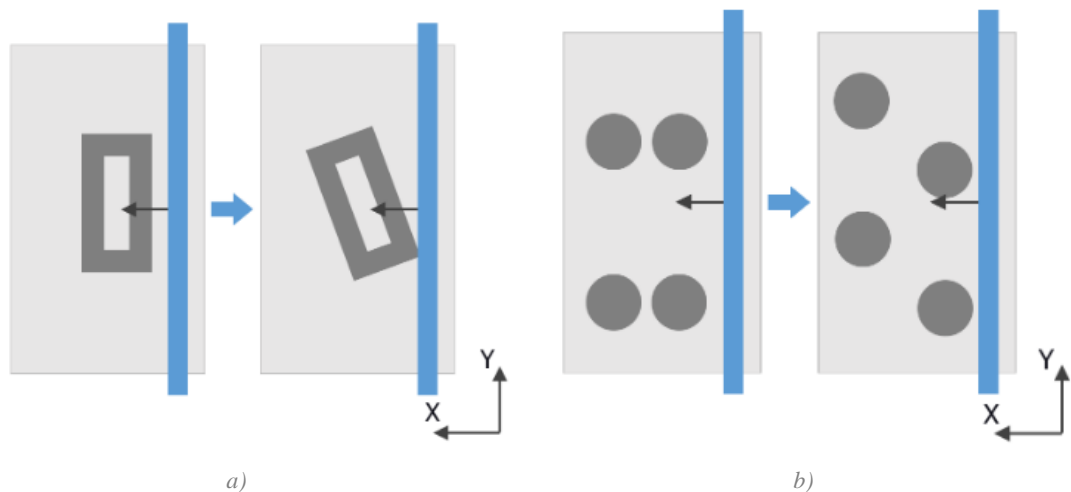
Břit měkkého nanašeče bývá vyroben ze silikonu, gumy nebo měkkých uhlíkových vláken. Tento nanašeč je náchylnější na mechanické opotřebení, avšak jeho výhodou je možnost deformace při kontaktu s tvrdším materiálem. Této vlastnosti se využívá při stavbě různých typů výrobků najednou, kdy se každý výrobek může jinak deformovat vlivem tepla. Taktéž pokud dojde k defektu jednoho výrobku, tak je možné tisk ostatních dokončit. [31]

### 7.2.2. Tvrdý nanašeč

Tvrdý nanašeč má břit obvykle vyrobený z vysokopevnostní oceli nebo keramiky. Pokud nastane rozdílné roztažnost jednotlivých výrobků, může dojít k destrukci staveb či nanašeče. Tvrdý nanašeč je tedy vhodnější pro stavbu stejných součástí, u kterých bude docházet k rovnoměrnému roztahování. Hlavní výhodou tohoto nanašeče je jeho mnohem větší odolnost než u měkkého. [31]

### 7.2.3. Minimalizace defektů

Značný vliv na minimalizaci či úplné odstranění defektů nanašeče či výrobků má umístění výrobků na platformě. Pro zamezení deformace stěn výrobků a zmenšení namáhání stroje je vhodné neumisťovat plochy výrobku rovnoběžně s rovinou nanašeče. Díky natočení výrobku okolo osy Z v rozmezí 5-45°, nemusí nanašeč překonávat veliký odpor a značně se sníží riziko defektu. Schématické zobrazení je na Obr. 23 a). [31]



Obr. 23 - Příklady umístění staveb ve stroji [31]

Pokud probíhá stavba více součástí najednou, je vhodné rozmístit je tak, aby na ně nanašeč najížděl postupně. Rovněž je vhodné neumisťovat součásti za sebe, jak je zobrazeno na Obr. 23 b), neboť by důsledkem defektu na předchozí součásti mohlo dojít k defektu i následující součásti. [31]

### 7.3. Zásobníky práškového materiálu

Zásobník práškového materiálu bývá umístěn vedle pracovního prostoru a jeho úkolem je neustále zajišťovat vhodné množství materiálu pro nanašeč, který materiál posouvá dále do pracovního prostoru. Přebytečný materiál se dostane do sběrného kanálu, odkud je recyklován. Maximální množství prášku obsažené v zásobníku by mělo být minimálně takové, aby zaplnilo s rezervou celý pracovní prostor.

Existuje dva základní způsoby uspořádání, a to buď s jedním zásobníkem, nebo dvěma. V případě jednoho zásobníku dochází k nanášení pouze při pohybu nanašeče jedním směrem. Při použití dvou zásobníků dochází k nanášení při pohybu nanašeče oběma směry, což urychluje proces stavby. [12, 32]

### 7.4. Zdroj energie

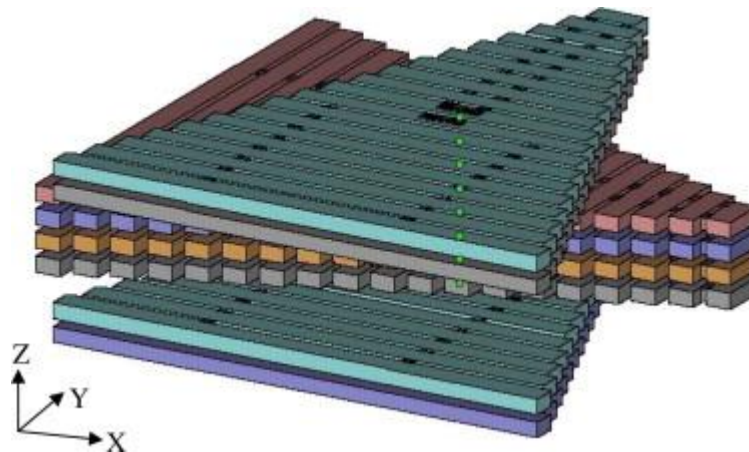
Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1, technologie PBF používají dva různé zdroje. Laserový zdroj využívají technologie SLM a DMLS, kdežto technologie EBM využívá elektronový zdroj. Kromě laserového či elektronového zdroje je ještě potřeba zaostřovací a polohovací zařízení, které směřuje paprsek vždy do požadovaného místa. [32]

## 7.5. Chlazení

Během samotné stavby je nutné chránit pracovní prostor ochrannou atmosférou, aby nedocházelo k degradaci tavné lázně vlivem vzdušné atmosféry. Běžně se pro tyto účely využívá dusík nebo argon. Vhodnost konkrétní ochranné atmosféry většinou udává výrobce práškového materiálu.

### 7.5.1. Smrštění

Vlivem proudění ochranné atmosféry dochází k ochlazování výrobku během procesu. Během umístování výrobku je tedy nutné brát v potaz směr proudění ochranné atmosféry, neboť při ochlazování součásti dochází ke smrštění, a tak při nevhodném umístění by mohlo vlivem rozdílného ochlazování jednotlivých částí dojít k deformaci výrobku či nežádoucímu kontaktu s nanašečem. V práci [33] byly prováděny pokusy s orientací výrobků na osu X či Y, jak je zobrazeno na Obr. 25.



Obr. 24 - Orientace vzorků při zkoumání vlivu smrštění [33]

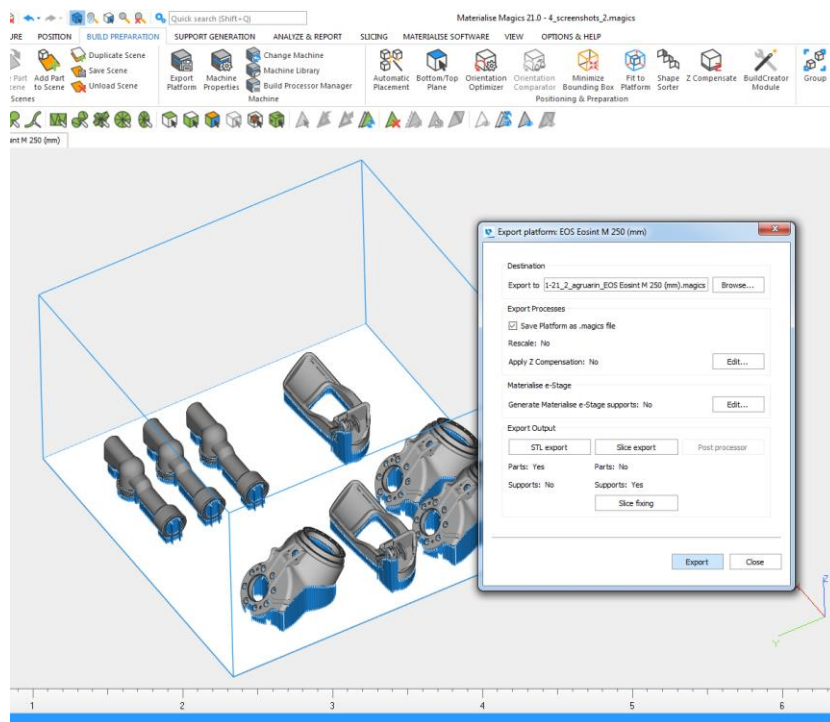
Během těchto pokusů bylo zjištěno, že pokud je orientace proužkových vzorků shodná s osou X, tak dochází vlivem smrštění ke změně rozměru v rozmezí 0,2 až 0,3% v závislosti na délce vzorku. Pokud byla orientace shodná s osou Y, tak docházelo ke změně rozměru v rozmezí -0,4 až 0,35% v závislosti na délce vzorku. [33]

## 8. Software

Vstupními daty pro výrobu součásti pomocí aditivních technologií je obvykle model ve formátu STL, který bývá vytvořen pomocí CAD softwaru, či získán pomocí reverzního inženýrství. Výhodou formátu STL je jeho univerzálnost a přenosnost mezi jednotlivými softwary.

Tiskárna však nedokáže sama zpracovat model ve formátu STL, a tak je třeba jej upravit pro její potřeby ve speciálním softwaru. Část výrobců nabízí vlastní software dodávaný k tiskárně, avšak existuje i mnoho externích. Většina těchto softwarů je postavená na Build Processoru od společnosti Materialise. Build Processor slouží ke komunikaci mezi tiskárnou a samotným softwarem. [34]

Model ve formátu STL je nejprve třeba opravit, aby nedocházelo ke špatné přípravě dat k tisku. Modely totiž mohou být díky různým konverzím mezi programy neúplné, špatně vykreslené, obsahovat duplicitní plochy či jiné defekty. Po opravení je třeba provést umístění výrobku na stavební platformu a rozřezání modelu na jednotlivé tiskové vrstvy (slice) ve sliceru, kde v jednotlivých tiskových vrstvách jsou pak vygenerovány vektory odpovídající drahám laseru při tisku. Takto upravená vstupní data jsou již pro tiskárnu zpracovatelná a je možné zahájit tisk.



Obr. 25 - Náhled do softwaru Materialise Magics [34]

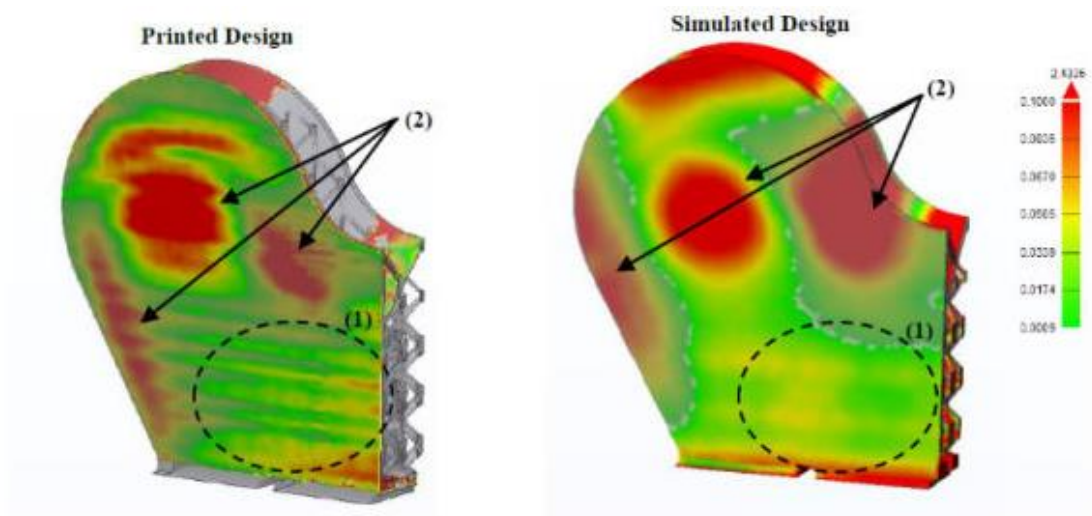


## 8.1. Materialise Magics

Jak již bylo zmíněno, většina softwarů používá Build Processor od společnosti Materialise. Samotná společnost nabízí i vlastní kompletní produkt, a to Materialise Magics. Náhled do pracovního prostoru softwaru je zobrazen na Obr. 25. Tento software nabízí širší paletu možností úprav či oprav modelů, a to v podobě různých modulů a postprocesorů. Mimo jiné je možné model dále upravovat (přidávat loga, čísla, dutiny), provádět duplikace modelů, upravovat a generovat podpory pro lepší kvalitu tisku a další. [34]

## 8.2. Predikce tisku

Některé softwary skýtají značný benefit ve formě predikce tisku. Pomocí tohoto nástroje lze vizualizovat předpokládané deformace a jiné defekty, které vzniknou během tisku součásti. Na základě této predikce je možné do určité míry optimalizovat výsledek tisku, aniž by docházelo k jeho fyzické realizaci. Díky tomu je možné značně ušetřit čas a materiál, který by byl spotřebován při opakovaném tisku. Porovnání predikované a skutečné deformace je zobrazeno na Obr. 26. [35]



Obr. 26 - Porovnání predikované a skutečné deformace součásti [35]

## 9. Zdravotní rizika

Vzhledem k malé velikosti jednotlivých částic materiálu, který se využívá pro aditivní technologie, je velké riziko vstupu částic do lidského těla. Mimo částice požadovaných rozměrů je práškový materiál doprovázen i částicemi, jejichž rozměry jsou mnohem menší. Částice mohou vstoupit do těla nejen pomocí dýchacích cest či očí, ale při určité velikosti i kůží. Vzhledem k tomu, že lidské tělo není schopné většinu používaných kovů odbourat, je snadné rychle dosáhnout toxických limitů pro lidské tělo. [36]

Značným problémem v oblasti pracovního prostředí je rychlost usazování jednotlivých částic. Pokud dojde k rozptýlení částic v prostoru, tak díky jejich malým rozměrům může trvat i mnoho hodin, než dojde k jejich usazení. Doba jejich usazení je odvislá od jejich velikosti a hmotnosti. Při kontaminaci prostředí částicemi do velikosti 20  $\mu\text{m}$  lze předpokládat, že budou dlouho přítomné a mohou způsobovat zdravotní potíže. [36]

### 9.1. Způsoby kontaminace

Jak již bylo zmíněno, částice práškového materiálu vstupují do těla pomocí dýchacích cest, očí a kůže. Jako hlavní cesta pro vstup částic do těla slouží dýchací cesty. Z tohoto důvodu je jejich ochrana základním požadavkem na práci s těmito technologiemi. Při inhalaci práškového materiálu dochází k jeho usazování v horních i dolních cestách dýchacích. [36]

Proti dermálnímu prostupu práškového materiálu by měla chránit neporušená pokožka, avšak existují studie, které tvrdí že při dlouhodobější expozici dochází k pronikání nanočástic do spodních částí pokožky. Odtud může docházet k nežádoucímu šíření po celém těle. [36]

Oční expozice práškového materiálu je možná nejen z částic, které se vyskytují v daném prostředí, ale také z kontaktu obličeje s kontaminovanými rukama. Doposud provedené výzkumy stran oční expozice byly v rámci týdnů a měsíců, avšak zatím není žádná studie, která by se zabývala dlouhodobou expozicí. [36]

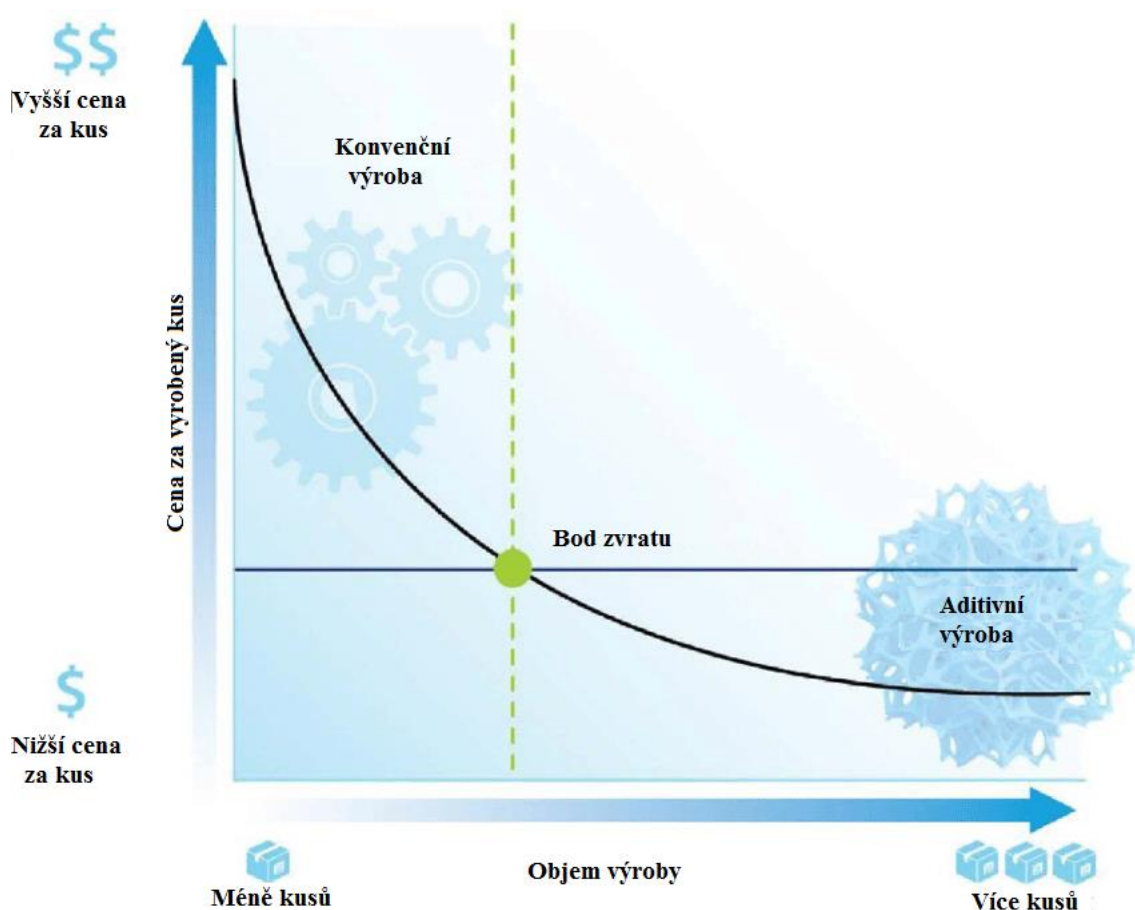
### 9.2. Zdravotní komplikace

Vzhledem k veliké ploše práškového materiálu může docházet v organismu ke značné oxidaci. Je prokázáno, že na základě expozice práškovými materiály dochází ke vzniku kardiovaskulárních onemocnění, zánětů a neurologických poruch. [36]

## 10. Porovnání s konvenčními technologiemi

Aditivní technologie skýtají řadu možností, které nejsou v rámci tradičních produkčních metod (obrábění, odlévání, kování aj.) dosažitelné. Při porovnávání aditivních technologií s konvenčními technologiemi je možné sledovat několik faktorů. Mezi tyto faktory lze například zařadit náklady na výrobek, rychlost a náročnost výroby, dopad na životní prostředí, a další. [37]

Při výrobě pomocí konvenčních technologií jsou náklady na výrobek závislé na počtu vyráběných kusů. Oproti tomu při výrobě aditivními technologiemi jsou náklady na výrobek téměř stále stejné bez ohledu na počet kusů. Tato vlastnost je velmi výhodná v oblastech prototypování či výroby malokusových sérií. Grafické zobrazení ceny výrobku v závislosti na množství produkce pro konvenční a aditivní technologie je na Obr. 27. Na grafu je vyobrazen bod zvratu, který limituje vhodnost jednotlivých metod v závislosti na objemu výroby. [37]



Obr. 27 - Závislost ceny výrobku na objemu výroby [37]

Při porovnání z pohledu rychlosti a náročnosti výroby je nutné uvažovat tvarovou složitost výrobku. Různé křivkové tvary mohou být pro konvenční technologie nepřijatelné, kdežto s aditivními technologiemi lze vyrobit téměř jakákoliv obecná plocha. Díky tomu dochází k masivnímu rozvoji aditivních technologií v prostředí výrobních nástrojů, jako jsou například lisovací formy aj. [37, 38]

Aditivní technologie jsou ve srovnání s těmi konvenčními mnohem šetrnější k životnímu prostředí. Díky recyklaci nevyužitého materiálu nevzniká mnoho odpadu a výsledky studií naznačují, že aditivní technologie mohou mít až o 70 % nižší dopad na životní prostředí než konvenční technologie. [38]

## Praktická část

Úkolem praktické části této diplomové práce bylo naleznout a optimalizovat procesní parametry pro tisk nástrojové oceli 1.2709 při tloušťce vrstvy 100  $\mu\text{m}$ . Z tohoto materiálu jsou tisknuté licí nástroje, přičemž doposud se používá tloušťka vrstvy 20, 40 a 50  $\mu\text{m}$ . Zvýšení tloušťky vrstvy by mohlo vést k časové i finanční úspoře. Hlavní požadavek na výsledný materiál je relativní hustota v minimální hodnotě 99,9%. Dále je sledována celková efektivita procesu a mechanické vlastnosti. Kvalita výsledného povrchu není sledována, neboť po vytištění dochází u důležitých ploch k obrobení a přešetění.

### 11. Návrh experimentu

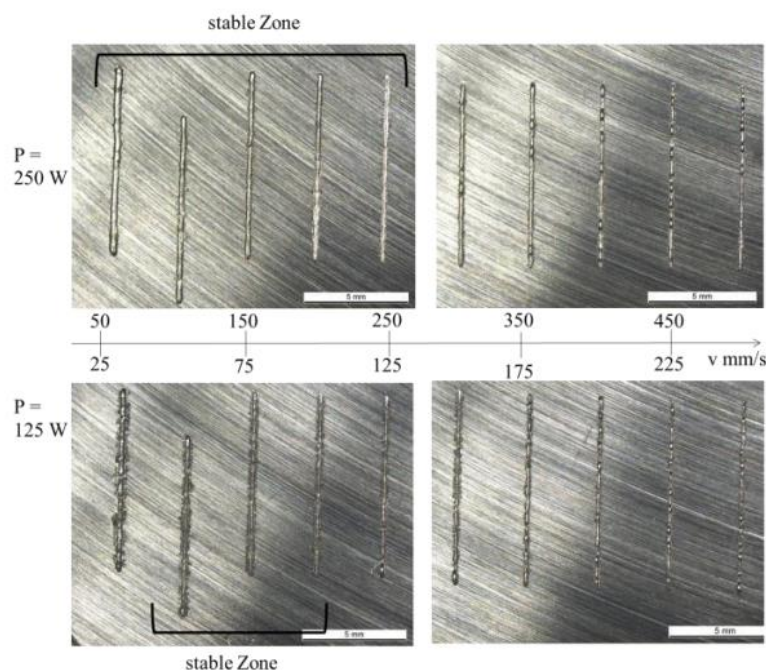
Na základě obecných zvyklostí byl stanoven následující postup optimalizace:

- 1) Rešerše dostupných zdrojů zabývajících se podobnou problematikou a porovnání s daty pro tisk slabších vrstev poskytnutých společnostmi BaL
- 2) Vyhodnocení získaných dat z rešerše a návrh matice procesních parametrů pro stavbu single tracků
- 3) Stavba single tracků na základě matice navržených procesních parametrů
- 4) Vyhodnocení single tracků pomocí vizuální kontroly a metalografických výbrusů
- 5) Návrh optimalizované matice procesních parametrů pro stavbu objemových těles na základě informací získaných z vyhodnocení single tracků
- 6) Stavba objemových těles s následným vyhodnocením pomocí metalografických výbrusů dosažené kvality tisku a vymezení potenciálně vhodné oblasti procesních parametrů
- 7) Návrh matice procesních parametrů blíže zaostřených do vhodné oblasti parametrů pro další stavbu objemových těles
- 8) Stavba objemových těles s následným vyhodnocením pomocí metalografických výbrusů a vymezením oblasti procesních parametrů vhodných pro průmyslové využití
- 9) Stavba zkušebních těles za využití získaných procesních parametrů pro účel tahových zkoušek
- 10) Provedení tahových zkoušek a zhodnocení výsledků

## 12. Návrh procesních parametrů

### 12.1. Rešerše dostupných zdrojů

Pro prvotní návrh matice procesních parametrů bylo nutné provést rešerši dostupných zdrojů.



Obr. 28 - Vzorčky s různými vstupními parametry výkonu laseru a rychlosti skenování [39]

V práci [39] je popsáno experimentální zjišťování parametrů pro tisk materiálu 1.2709 pomocí single tracků, přičemž experiment byl prováděn právě na vrstvě o tloušťce 100  $\mu\text{m}$ . Pro stanovení ideálních parametrů byl použit výkon laseru 125 W a 250 W. Pro výkon 125 W byla nastavována rychlost skenování v rozmezí 25 až 250 mm/s. Pro výkon 250 W byla rychlost skenování 50 až 500 mm/s. Vzorčky byly nejprve hodnoceny makroskopicky pohledem z vrchu, kdy byla hodnocena jejich kontinuita. Následně byly zkoumány v příčném řezu pomocí metalografických výbrusů. Na základě těchto pozorování byly vyznačené oblasti vstupních parametrů, během kterých nedochází k nežádoucím defektům. Tyto oblasti jsou viditelné na Obr. 28, na kterém jsou dále zobrazeny jednotlivé single tracky.

Během dalšího experimentu byl prováděn výzkum osové vzdálenosti jednotlivých tracků  $h$ , která byla stanovena na 0,15 mm. Při hodnotě 0,175 mm docházelo ke vzniku pórovité a hrubé struktury, kdežto při hodnotě 0,125 mm docházelo k opakovanému natavování a vzniku kulovitěho útvaru.

Vzhledem k nedostatečnému množství prací zabývajících se tiskem nástrojové oceli 1.2709 při tloušťce vrstvy 100  $\mu\text{m}$  bylo nutné dále zohlednit dostupné informace pro tisk při nižších vrstvách. Hodnoty získané z uvedeného experimentu společně s dalšími zjištěnými pro odlišné tloušťky vrstvy jsou zobrazené v Tab. 3, na jejímž základě byly postaveny prvotní hodnoty pro optimalizaci tisku. Zeleně zvýrazněné parametry nebyly do výpočtu zahrnuty, neboť jejich objemová energie je značně odlišná od ostatních.

Tab. 3 - Parametry procesů získaných rešerší

P [W]	v [mm/s]	t [mm]	h [mm]	E [J/mm]	E2 [J/mm <sup>2</sup> ]	E3 [J/mm <sup>3</sup> ]	Zdroj
250	250	0,1	0,15	1,00	10,00	66,66	[39]
300	700	0,05	0,12	0,43	8,57	71,43	[22]
285	960	0,04	0,11	0,30	7,42	67,47	[41]
258	960	0,04	-	0,27	6,72	-	[40]
275	1091	0,03	0,12	0,25	8,40	70	[44]
90	220	0,03	0,14	0,41	13,64	97,4	[43]
100	180	0,03	0,14	0,56	18,52	132,28	[43]
105	150	0,03	0,125	0,70	23,33	186,67	[44]

### 12.2. Stávající parametry

Jako další zdroj vstupních informací k návrhu procesních parametrů posloužily informace poskytnuté společností BaL. Tyto informace se týkají nastavení parametrů pro tisk vrstev o tloušťce 20, 40 a 50  $\mu\text{m}$ . Hodnoty jsou zobrazené v Tab. 4.

Tab. 4 - Tabulka používaných procesních parametrů

Layer thickness [mm]	0,02	0,04	0,05
Laser Power [W]	150	285	305
Laser Speed [mm/s]	800	960	1010
Energy [J/mm <sup>3</sup> ]	93,75	62,47	54,91

### 12.3. Aproximace hodnot

Hodnoty získané z rešeršní části a od společnosti BaL byly následně podrobeny aproximaci. Aproximace byla provedena kvadratická, lineární a mocninná. Pomocí získaných rovnic byly vypočteny hodnoty procesních parametrů. Na základě koeficientu spolehlivosti R a reálně dosažitelných hodnot byly následně vybrány reprezentativní hodnoty, které jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 - Hodnoty procesních parametrů získané aproximací

	Rešeršní část	Poskytnuté par.
Layer thickness [mm]	0,1	0,1
Laser Power [W]	249	281
Laser Speed [mm/s]	242	480
Energy [J/mm <sup>2</sup> ]	10,29	5,85

#### 12.4. Procesní parametry

Na základě získaných hodnot byl stanoven střed matice procesních parametrů na výkon 250 W a rychlost skenování 350 mm/s. Následně byla matice navrhovaných procesních parametrů sestavená tak, aby obsahovala hodnoty získané aproximací rešeršních dat i hodnoty získané aproximací stávajících parametrů. Navržená matice procesních parametrů je zobrazena v Tab. 6.

Tab. 6 - Navržená matice procesních parametrů

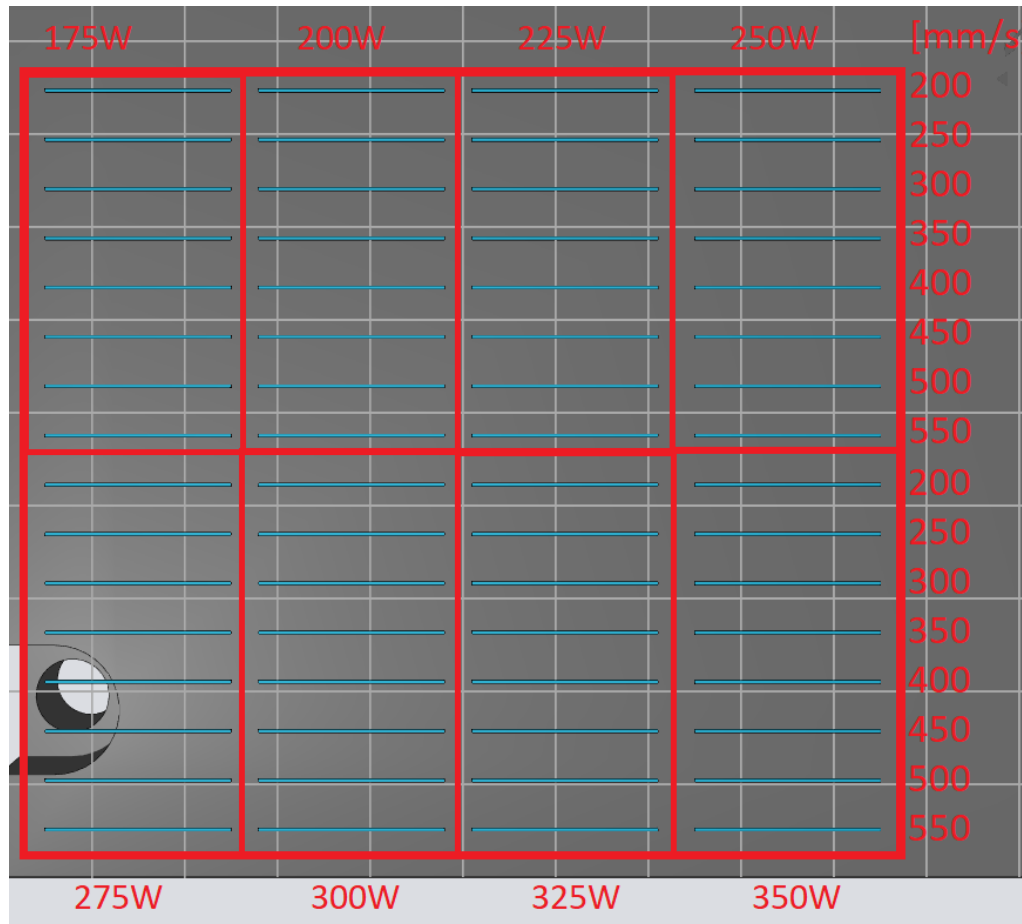
Energy [J/mm <sup>2</sup> ]		Laser speed [mm/s]							
		200	250	300	350	400	450	500	550
Laser Power [W]	175	8,75	7,00	5,83	5,00	4,38	3,89	3,50	3,18
	200	10,00	8,00	6,67	5,71	5,00	4,44	4,00	3,64
	225	11,25	9,00	7,50	6,43	5,63	5,00	4,50	4,09
	250	12,50	10,00	8,33	7,14	6,25	5,56	5,00	4,55
	275	13,75	11,00	9,17	7,86	6,88	6,11	5,50	5,00
	300	15,00	12,00	10,00	8,57	7,50	6,67	6,00	5,45
	325	16,25	13,00	10,83	9,29	8,13	7,22	6,50	5,91
	350	17,50	14,00	11,67	10,00	8,75	7,78	7,00	6,36



## 13. Single tracky

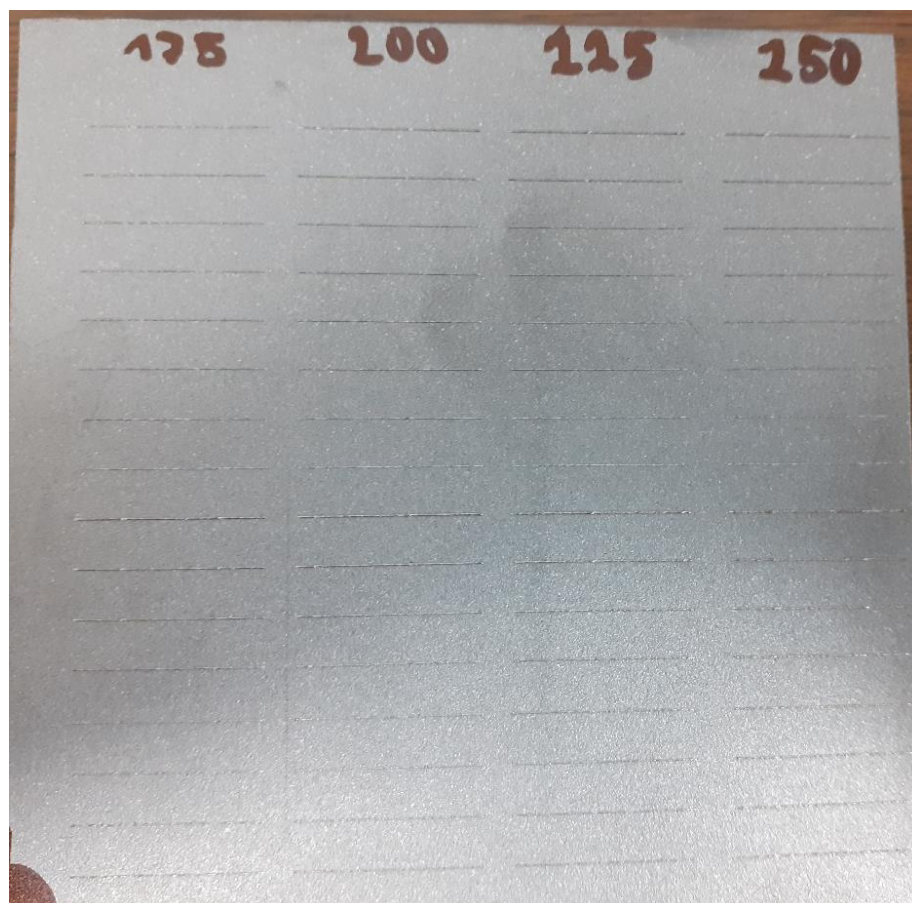
### 13.1. Příprava a tisk

Na základě navržených procesních parametrů v kapitole 12, byla provedena stavba single tracků. Jednotlivé single tracky byly umístěné na platformě tak, jak je zobrazeno na Obr. 29. Délka jednotlivých single tracků byla 20 mm. Pro tisk byla využita tiskárna EOS M290.

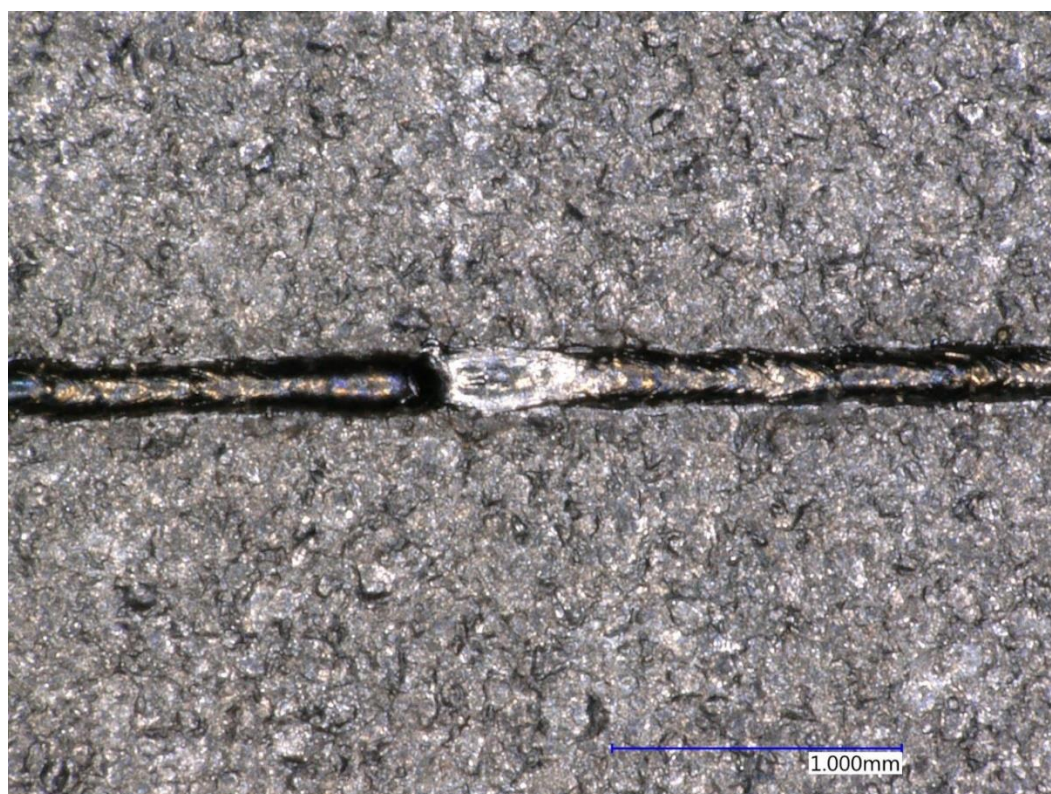


Obr. 29 - Rozložení single tracků na stavební platformě

Stav platformy po stavbě je zobrazen na Obr. 30. Na jednotlivých návarech je možné pozorovat pravidelné přerušení. Nejedná se o defekt vzniklý při tisku či mechanické porušení vzorku, ale o důsledek parametru tisku, který ovlivňuje maximální délku svaru bez přerušení. V tomto případě se jednalo o 10 mm. Detail tohoto přerušení je zobrazen na Obr. 31. V praxi je toto přerušení využíváno z důvodu rovnoměrnějšího rozdělení tepelného namáhání tisknutého objektu.



*Obr. 30 - Stavební platforma s vytištěnými single tracky*



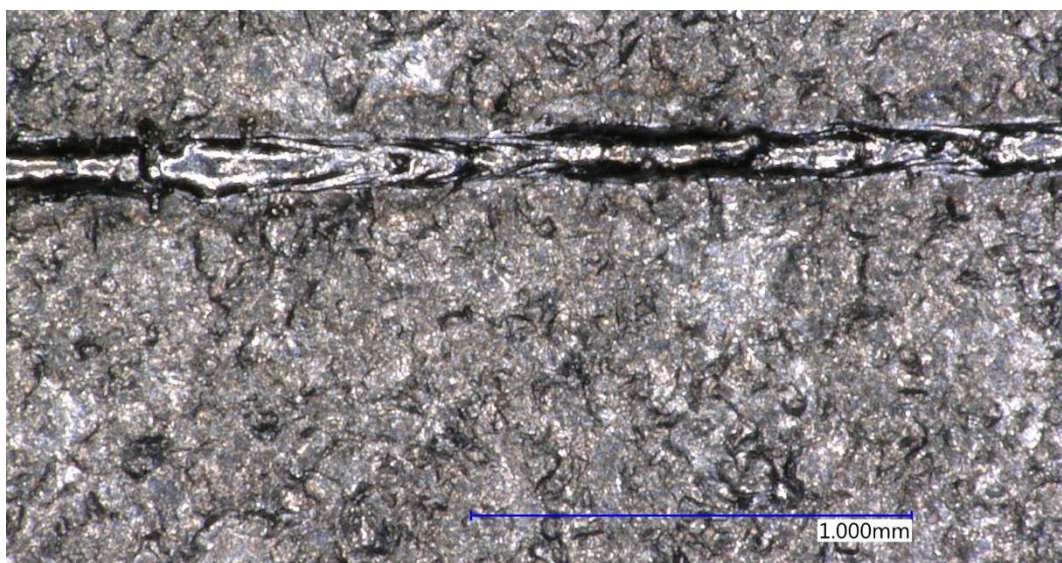
*Obr. 31 - Detail pravidelného přerušení single tracku*



### 13.2. Vizuální vyhodnocení

Nejprve bylo nutné provést selekci single tracků pomocí vizuálního zkoumání. Pro toto zkoumání byly pořízeny makroskopické snímky. Sledované svary musí být kontinuální a bez viditelných vad, jako je například chybějící část svarů či rozstřík nataveného materiálu. Jako defekt nelze brát v potaz již zmiňované pravidelné vynechávání, neboť se jedná o definovatelný parametr.

Příklad nehomogenity svaru je zobrazen na Obr. 32 a příklad rozstříku je na Obr. 33.



*Obr. 32 - Nehomogenita svaru  $P=200$  W  $LS=550$  mm/s*



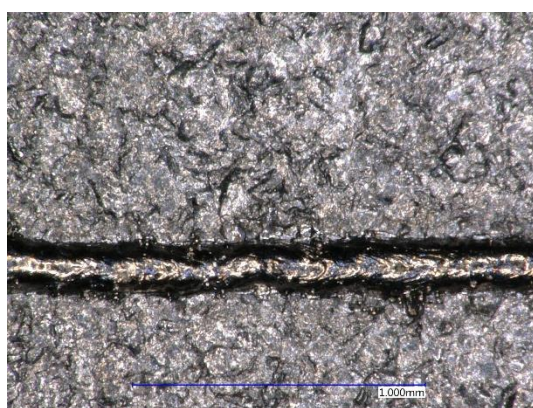
*Obr. 33 - Rozstřík nataveného materiálu svaru  $P=275$  W  $LS=275$  mm/s*



Tab. 7 - Vyhodnocení single tracků na základě vizuálního zkoumání

Energy [J/mm <sup>2</sup> ]		Laser speed [mm/s]							
		200	250	300	350	400	450	500	550
Laser Power [W]	175	8,75	7,00	5,83	5,00	4,38	3,89	3,50	3,18
	200	10,00	8,00	6,67	5,71	5,00	4,44	4,00	3,64
	225	11,25	9,00	7,50	6,43	5,63	5,00	4,50	4,09
	250	12,50	10,00	8,33	7,14	6,25	5,56	5,00	4,55
	275	13,75	11,00	9,17	7,86	6,88	6,11	5,50	5,00
	300	15,00	12,00	10,00	8,57	7,50	6,67	6,00	5,45
	325	16,25	13,00	10,83	9,29	8,13	7,22	6,50	5,91
	350	17,50	14,00	11,67	10,00	8,75	7,78	7,00	6,36

Na základě vizuální zkoušky byly vybrány potenciálně vhodné vzorky, které jsou v Tab. 7 znázorněné zelenou barvou. Pohled na tyto jednotlivé vzorky je zobrazen na Obr. 34. Žlutě vyznačené vzorky obsahovaly určitý defekt, který by se však v rámci objemové stavby nemusel projevit. Červeně vyznačené vzorky obsahovaly nežádoucí defekty, a tak byly v rámci single tracků vyhodnoceny jako nevhodné.



a)  $P=225\text{ W}$   $LS=200\text{ mm/s}$



b)  $P=250\text{ W}$   $LS=200\text{ mm/s}$



c)  $P=275\text{ W}$   $LS=250\text{ mm/s}$



d)  $P=300\text{ W}$   $LS=250\text{ mm/s}$

Obr. 34 - Vizuálně vhodné single tracky

### 13.3. Příprava metalografických výbrusů

Pro metalografické vyhodnocení bylo nutné stavební platformu rozřezat. První řezy byly provedeny společností BaL pomocí elektrojiskrového řezání. Tyto řezy jsou kolmé vůči návarům, aby bylo možné je pozorovat v příčném řezu. Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění a znehodnocení vzorků, nemohla být použita metalografická bruska. Ta byla následně použita ke zmenšení vzorků na takovou velikost, aby bylo možné je zalisovat do metalografických puků. Vzhledem k blízkému umístění návarů se do jednoho puku vešly dva až tři vzorky, v závislosti na rozmístění na platformě. Systém rozřezání platformy je zobrazen na Obr. 35.



*Obr. 35 - Systém rozřezání platformy s návarý*

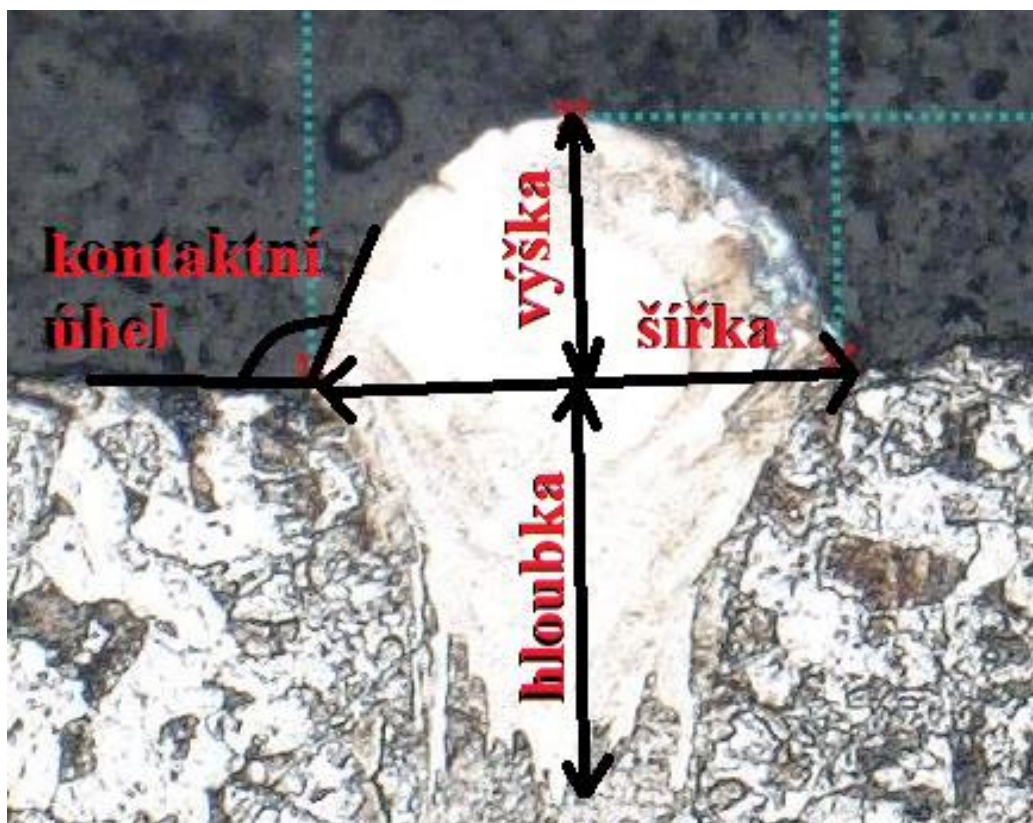
Vzorky byly postupně zalisovány do podoby metalografických puků. Byla použita lisovací hmota DuroFast od společnosti Struers, která je určena pro přesné vyplnění jemných hran.

Po zalisování následovalo leštění vzorků. Postupně byly použity brusné papíry o zrnitosti 120, 320 a 500. Poté následovalo leštění s přísadou diamantové brusné emulze. Nejprve byla použita s velikostí částic 9 $\mu$ m, následně s 3  $\mu$ m. Pro zobrazení struktury materiálu byly vzorky později naleptány pomocí Nitinolu.



### 13.4. Vyhodnocení metalografických výbrusů

Při hodnocení kvality návaru při pohledu na řez je vhodné sledovat hloubku zásahu do předchozí vrstvy, výška svaru musí být dostatečná, aby docházelo k optimální stavbě, kontaktní úhel musí být větší než  $90^\circ$  a nesmí obsahovat praskliny či jiné defekty. [45]



Obr. 36 - Sledované parametry na výbrusu svaru

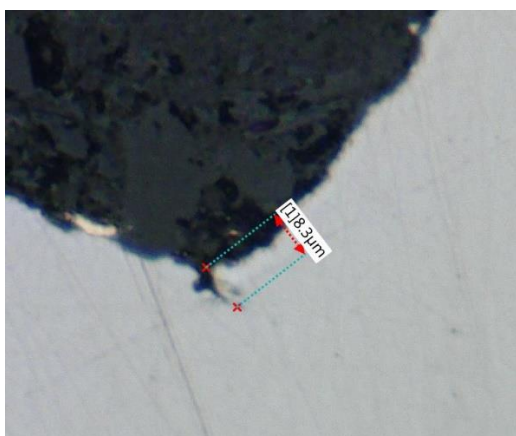
Sledované parametry pro vyhodnocení svaru jsou zobrazeny na Obr. 36. Na obrázku není zobrazena hloubka tepelně ovlivněné oblasti (Heat Affected Zone – HAZ), která udává vzdálenost, po kterou je pozorovatelná změna struktury materiálu od konce svaru.

Na základě měření byla sestavena Tab. 8, která obsahuje naměřené sledované parametry u vybraných svarů. Zeleně označené svary č. 3, 6, 10 a 12 jsou v pořádku. Žlutě označené svary č. 4, 5 a 8 jsou z pohledu metalografického zkoumání v pořádku, avšak při pohledovém zkoumání celého návaru byly odhaleny určité drobné defekty. Červeně označené svary byly vyhodnoceny jako nevhodné. Svary č. 1 a 2 jsou nevhodné z důvodu nedostatečného metalurgického spojení se substrátem. Na svaru č. 9 byla nalezená prasklina na rozhraní mezi substrátem a svarem, která je zobrazena na Obr. 37. Svar č. 11 byl vyřazen z důvodu nalezení defektu v místě výbrusu, zobrazeném na Obr. 38. Svary č. 13, 14 a 15 byly vyhodnoceny jako příliš nízké.

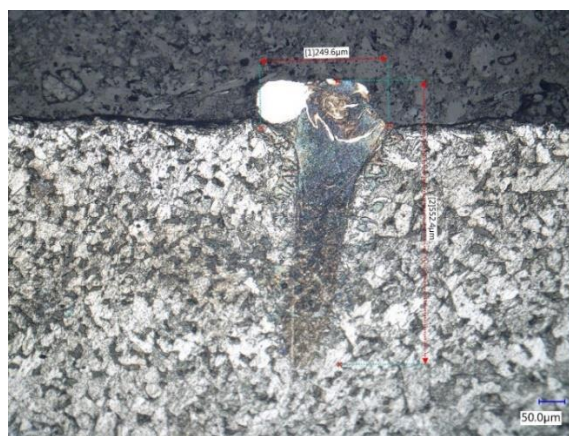
Tab. 8 - Vyhodnocení vybraných svarů na základě metalografických výbrusů

Svar	P [W]	LS [mm/s]	Šířka [ $\mu\text{m}$ ]	Výška [ $\mu\text{m}$ ]	Hloubka [ $\mu\text{m}$ ]	HAZ [ $\mu\text{m}$ ]
1	175	550	153	54	92	x
2	200	550	134	38	109	x
3	225	200	184	74	111	383
4	225	250	145	73	119	290
5	225	300	152	67	122	314
6	250	200	178	66	124	434
7	250	250	166	62	128	377
8	250	300	163	77	113	309
9	275	200	204	79	129	389
10	275	250	179	62	144	405
11	300	200	230	77	161	475
12	300	250	214	63	184	413
13	350	200	170	46	201	487
14	350	250	189	24	202	571
15	350	300	195	32	167	426

Šedivě vyznačený svar č. 7 by měl být vyhodnocen jako nevhodný, neboť obsahuje praskliny mezi návarem a substrátem. Nalezené praskliny jsou zobrazené na Obr. 37. Vzhledem k pravděpodobnému umístění roviny řezu metalografického výbrusu přímo do již zmiňovaného pravidelného vynechávání, není možné tento návar jednoznačně vyloučit.



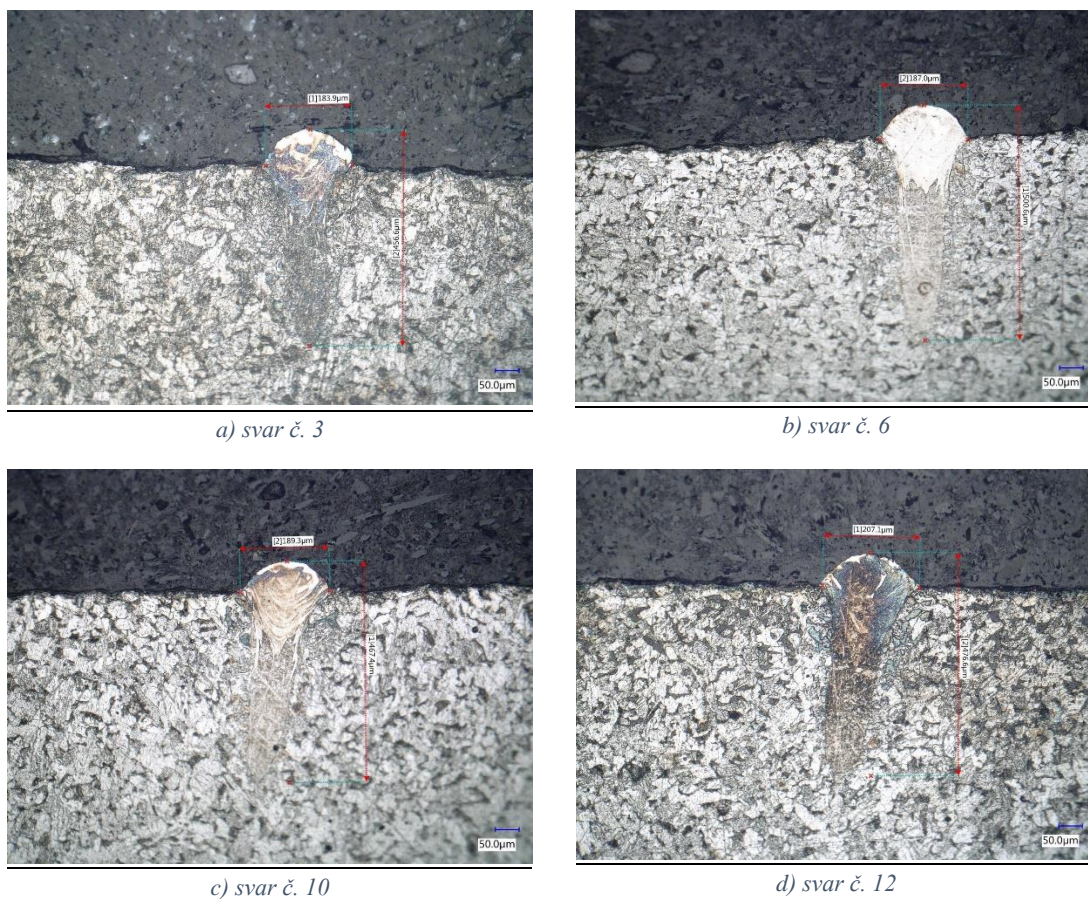
Obr. 37 - Prasklina na svaru č. 9



Obr. 38 - Defekt na svaru č. 11

Pohled na vybrané metalografické snímky svarů je zobrazen na Obr. 39.





Obr. 39 - Metalografické snímky vybraných svarů

### 13.5. Celkové vyhodnocení

Na základě zkoumání jednotlivých svarů byly vybrány svary tisknuté parametry zobrazenými v Tab. 9. Na základě těchto zjištění se jeví vhodná oblast plošné energie v rozmezí 11-12,5 J/mm<sup>2</sup>.

Tab. 9 - Výsledné svary

Svar	P [W]	LS [mm/s]
3	225	200
6	250	200
10	275	250
12	300	250

Zjištěné skutečnosti budou využité při návrhu matice procesních parametrů pro tisk objemových těles.



## 14. Objemová tělesa V1

Pro další krok optimalizace procesních parametrů byl využit tisk objemových těles. Jedná se o matici krychlových vzorků, přičemž každá je tisknutá při jiných procesních parametrech, aby bylo možné nalézt oblasti vhodné pro kvalitní tisk.

### 14.1. Návrh parametrů

Na základě zjištěných výsledků byla sestavena Tab. 10, která obsahuje návrh kombinací jednotlivých parametrů pro objemové vzorky. Celkově byly variovány čtyři různé osové vzdálenosti (hatch distance) na čtyřech stavebních platformách.

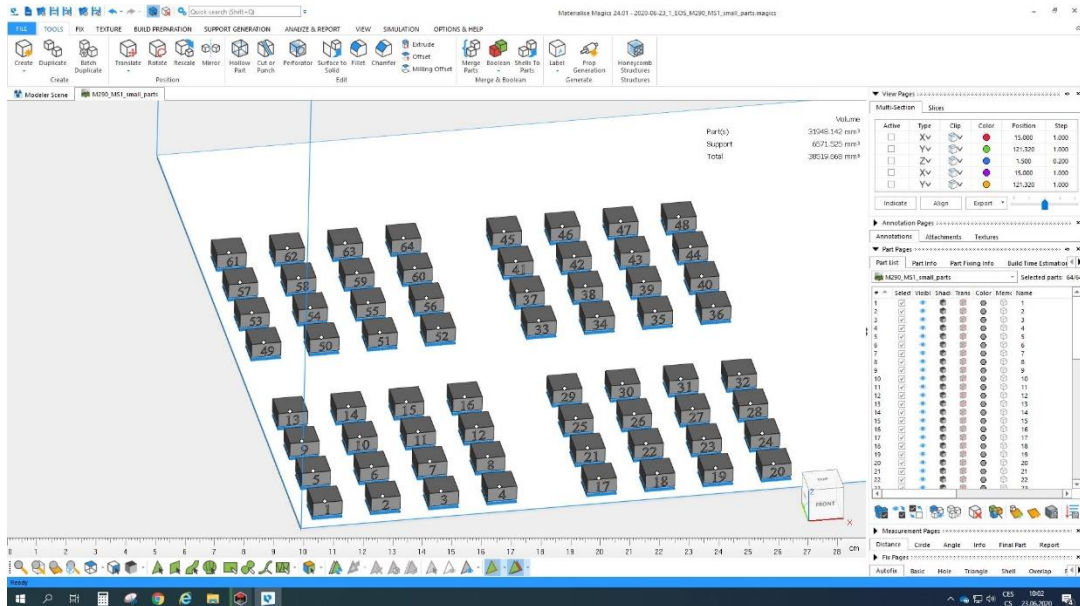
Velikost jednotlivých objemových těles byla půdorysně 10x10 mm, tudíž na jedné stavební platformě o velikosti 80x80 mm jich bylo umístěno šestnáct, což odpovídá návrhu v Tab. 10. Celkově tedy bylo 64 objemových těles.

Tab. 10 - Navržené parametry pro tisk objemových těles

E <sub>3</sub> [J/mm <sup>3</sup> ]		Laser speed [mm/s]				
h [mm]	0,095	200	225	250	275	300
Laser Power [W]	225	118,4	105,3	94,7	x	78,9
	250	131,6	117,0	105,3	x	87,7
	275	x	128,7	115,8	105,3	x
	300	x	140,4	126,3	114,8	105,3
	325	x	x	x	x	114,0
E <sub>3</sub> [J/mm <sup>3</sup> ]		Laser speed [mm/s]				
h [mm]	0,1	200	225	250	275	300
Laser Power [W]	225	112,5	100,0	90,0	x	75,0
	250	125,0	111,1	100,0	x	83,3
	275	x	122,2	110,0	100,0	x
	300	x	133,3	120,0	109,1	100,0
	325	x	x	x	x	108,3
E <sub>3</sub> [J/mm <sup>3</sup> ]		Laser speed [mm/s]				
h [mm]	0,105	200	225	250	275	300
Laser Power [W]	225	107,1	95,2	85,7	x	71,4
	250	119,0	105,8	95,2	x	79,4
	275	x	116,4	104,8	95,2	x
	300	x	127,0	114,3	103,9	95,2
	325	x	x	x	x	103,2
E <sub>3</sub> [J/mm <sup>3</sup> ]		Laser speed [mm/s]				
h [mm]	0,11	200	225	250	275	300
Laser Power [W]	225	102,3	90,9	81,8	x	68,2
	250	113,6	101,0	90,9	x	75,8
	275	x	111,1	100,0	90,9	x
	300	x	121,2	109,1	99,2	90,9
	325	x	x	x	x	98,5

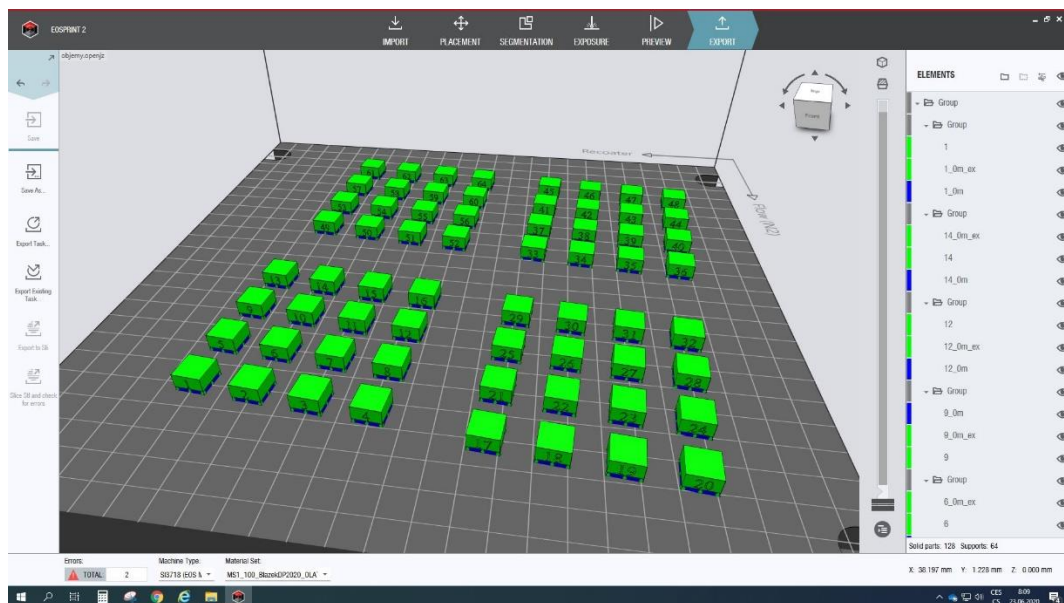
## 14.2. Příprava tiskových dat

Pro přípravu objemových dat byl využit již zmiňovaný software Materialise Magics. Náhled do přípravy objemových těles je zobrazen na Obr. 40. Pro lepší orientaci a přehled byly vzorky označené bočním číslováním. Taktéž zde byl nakonfigurován systém podpor pod objemovými tělesy.



Obr. 40 - Příprava dat v SW Materialise Magics

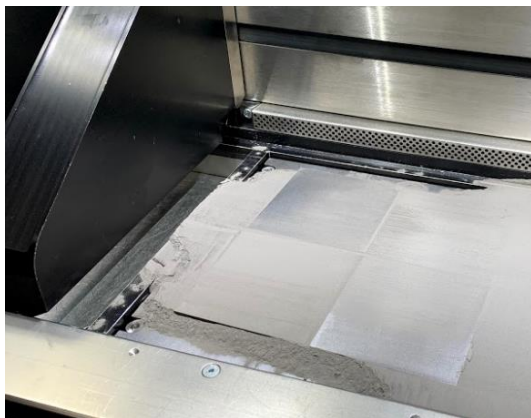
Po vytvoření objemových dat byl využit software EOSPRINT zobrazený na Obr. 41, ve kterém došlo k definování procesních parametrů pro jednotlivá tělesa.



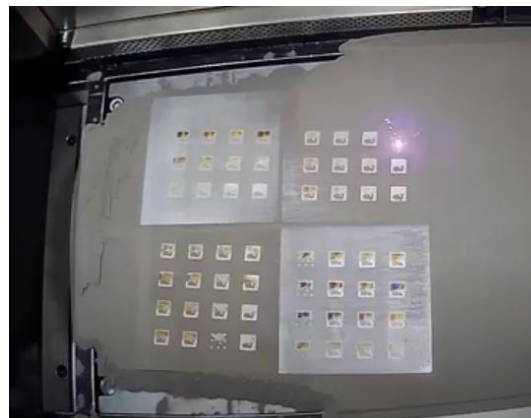
Obr. 41 - Příprava dat v SW EOSPRINT

### 14.3. Tisk objemových těles

Po přípravě tiskových dat následoval příprava samotného tisku. Do zařízení bylo nutné upnout stavební platformy, na které bude provedena stavba. Platformy bylo nutné vyrovnat, aby na všech místech byla přibližně stejná vzdálenost mezi povrchem a nanašečem. Umístění palety s první vrstvou prášku jsou zobrazené na Obr. 42.



*Obr. 42 - Palety umístěné v pracovním prostoru*



*Obr. 43 - Probíhající proces tisku*

Po vyrovnání bylo možné zahájit samotnou stavbu. Na Obr. 43 je zobrazen snímek pořízený z průběhu stavby.

Po vytištění a vychladnutí stavby bylo nutné odsát přebytečný práškový materiál, aby nedocházelo ke kontaminaci pracovního prostředí. Stav dokončené palety tisku je zobrazen na Obr. 44. Stav povrchové vrstvy dává tušit přílišnou objemovou energii, která může způsobit vznik sazí a přepalování výrobku. Pro výzkum relativní hustoty bylo nutno povrchovou vrstvu odbrousit. Stav palet po zbrúšení je viditelný na Obr. 45.

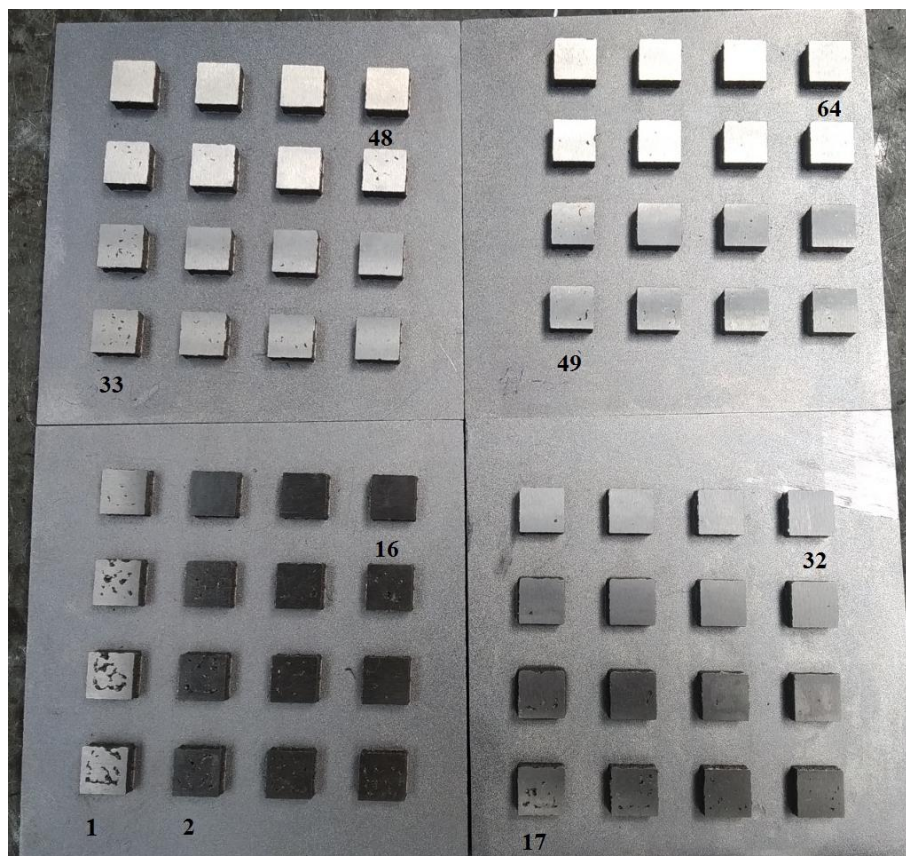


*Obr. 44 - Stav palety po vytištění*



#### 14.4. Vizuální vyhodnocení

Po odbroušení povrchových vrstev mohlo začít vizuální vyhodnocení. Jak je z Obr. 45 patrné, nejhůře dopadly vzorky s vysokou hustotou objemové energie. Vždy se jedná o vzorky ve spodním levém rohu jednotlivých palet. Dobře to je patrné z palety obsahující vzorky č. 1 až 16. Dále je možné pozorovat rozdíl mezi jednotlivými paletami, které se liší osovou vzdáleností. S rostoucí osovou vzdáleností jsou na první pohled vzorky méně pórovité.



*Obr. 45 - Stav palet po broušení s naznačeným číslování*

Na základě vizuální kontroly byly vybrány potenciálně vhodná objemová tělesa. Jedná se o takové vzorky, které na první pohled nedisponovaly okem viditelnou pórovitostí. Jsou to vzorky 16, 45, 46, 47, 63 a 64.

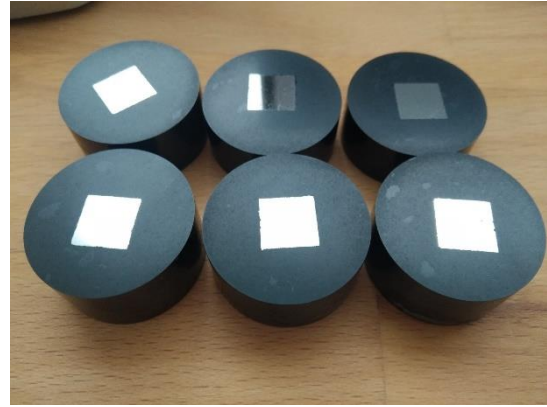
#### 14.5. Příprava metalografických výbrusů

Vybrané objemové vzorky bylo nejprve nutné mechanicky oddělit od stavební platformy. Jako nejúčinnější se ukázalo prosté mechanické odseknutí. Oddělené vzorky jsou viditelné na Obr. 46. Po oddělení byly vzorky zalisovány a vyleštěny stejným způsobem jak je popsáno v kap. 13.3 s tím rozdílem, že byla použita lisovací hmota Multifast od

společnosti Struers a vzorky nebyly leptány. Výsledný stav vzorků je zobrazen na Obr. 47. Vzhledem k následnému měření relativní hustoty bylo třeba dbát na zvýšenou kvalitu výsledného povrchu.



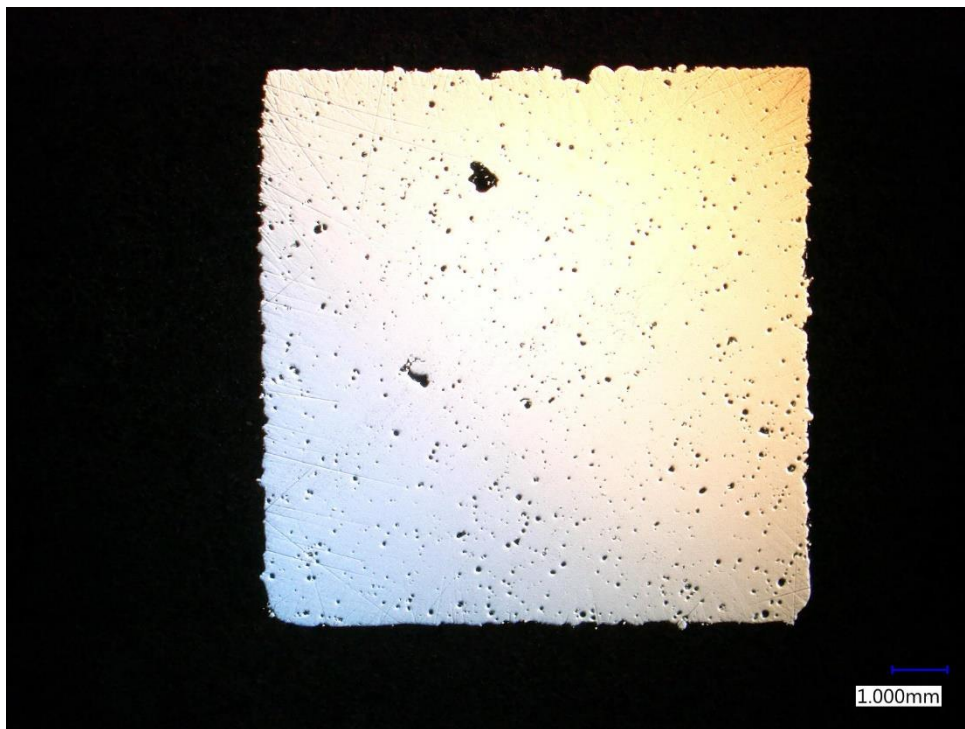
Obr. 46 - Oddělené vzorky



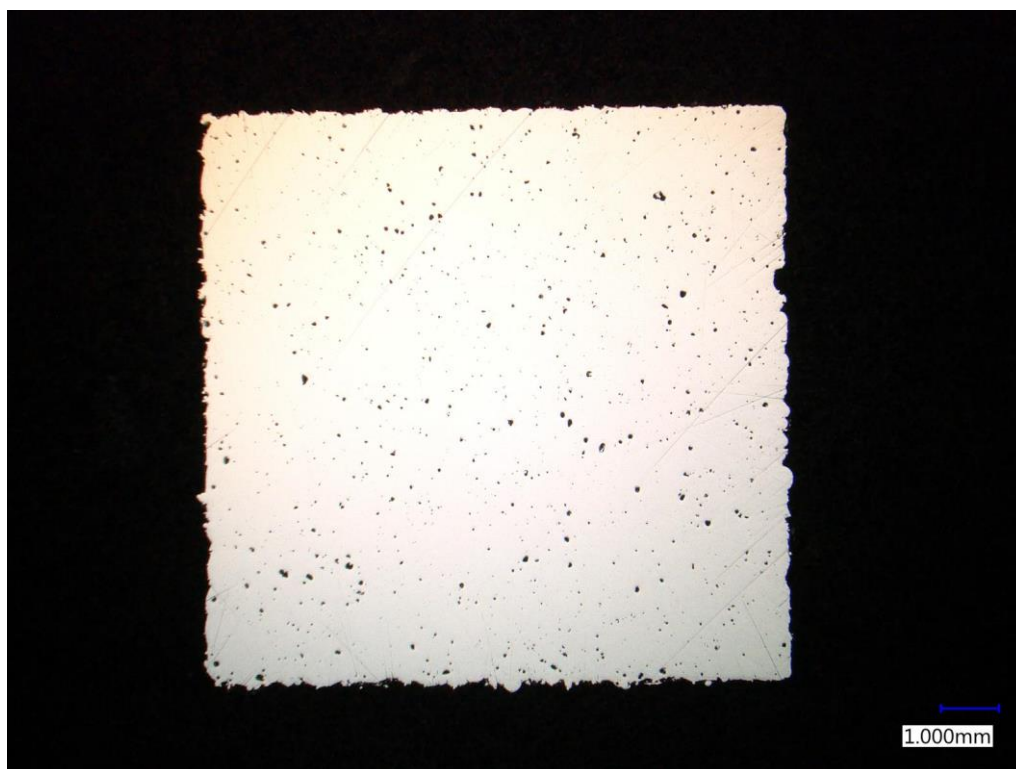
Obr. 47 - Vyleštěné metalografické vzorky

#### 14.6. Vyhodnocení metalografických výbrusů

Pomocí mikroskopu byly nasnímány záběry jednotlivých výbrusů. Obr. 48 je snímek vzorku č. 46, kde se po odbroušení objevily větší póry. Na Obr. 48. je zobrazen snímek vzorku č. 64, jehož relativní hustota byla naměřena 99,319 %. Jak je dále uvedeno v Tab. 11, výsledná relativní hustota vybraných vzorků se příliš nelišila.



Obr. 48 - Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 46



Obr. 49 - Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 64

Defekty vznikající na vzorcích jsou dle práce [46] způsobené přílišnou hustotou objemové energie. Toto tvrzení koresponduje s vysledovanou závislostí na vzorcích, kde s klesající hustotou objemové energie roste relativní hustota. Pro další sadu objemových vzorků tedy byla snaha směřovat hustotu objemové energie do maximální hodnoty  $100 \text{ J/mm}^3$ .

Oproti závěrům zjištěným u single tracků se jeví jako vhodné svary, které se tisknou menší hustotou objemové energie. Tento rozdíl může být způsoben tím, že dochází k jinému způsobu prohřátí a není třeba takové množství energie pro dokonalé metalurgické spojení, než tomu je u single tracku.

Tab. 11 - Výsledná relativní hustota vybraných vzorků

Vzorek č.	Rel. hustota [%]	P [W]	LS [mm/s]	h [mm]	E3 [J/mm <sup>3</sup> ]
16	99,127	325	300	0,95	114,0
45	99,059	300	250	0,105	114,3
46	98,91	300	275	0,105	103,9
47	99,094	300	300	0,105	95,2
63	98,931	300	300	0,11	90,9
64	99,319	325	300	0,11	98,5

## 15. Objemová tělesa V2

Na základě znalostí získaných z první sady objemových vzorků bude následovat druhá sada, jejímž cílem je lépe zaostřit na oblast potenciálně vhodných procesních parametrů.

### 15.1. Návrh parametrů

Při návrhu optimalizované matice procesních parametrů byly brány v potaz závěry získané z předchozího měření. Hustota objemové energie by se měla pohybovat do  $100 \text{ J/mm}^3$  a osová vzdálenost by měla být vyšší než  $0,095 \text{ mm}$ . Dále bylo uvažováno o efektivnosti procesu, tudíž byla zvýšená rychlost skenování při zachování výkonu laseru, aby došlo ke snížení objemové energie. Matice navržených procesních parametrů je zobrazena v Tab. 12.

Tab. 12 - Návrh matice procesních parametrů

Vzorek	P [W]	LS [mm/s]	h [mm]	E <sub>3</sub> [J/mm <sup>3</sup> ]	Vzorek	P [W]	LS [mm/s]	h [mm]	E <sub>3</sub> [J/mm <sup>3</sup> ]
1	280	300	0,1	93,3	33	320	300	0,1	106,7
2	280	370	0,1	75,7	34	320	370	0,1	86,5
3	280	440	0,1	63,6	35	320	440	0,1	72,7
4	280	500	0,1	56,0	36	320	500	0,1	64,0
5	280	300	0,103	90,6	37	320	300	0,103	103,6
6	280	370	0,103	73,5	38	320	370	0,103	84,0
7	280	440	0,103	61,8	39	320	440	0,103	70,6
8	280	500	0,103	54,4	40	320	500	0,103	62,1
9	280	300	0,106	88,1	41	320	300	0,106	100,6
10	280	370	0,106	71,4	42	320	370	0,106	81,6
11	280	440	0,106	60,0	43	320	440	0,106	68,6
12	280	500	0,106	52,8	44	320	500	0,106	60,4
13	280	300	0,11	84,8	45	320	300	0,11	97,0
14	280	370	0,11	68,8	46	320	370	0,11	78,6
15	280	440	0,11	57,9	47	320	440	0,11	66,1
16	280	500	0,11	50,9	48	320	500	0,11	58,2
17	300	300	0,1	100,0	49	340	300	0,1	113,3
18	300	370	0,1	81,1	50	340	370	0,1	91,9
19	300	440	0,1	68,2	51	340	440	0,1	77,3
20	300	500	0,1	60,0	52	340	500	0,1	68,0
21	300	300	0,103	97,1	53	340	300	0,103	110,0
22	300	370	0,103	78,7	54	340	370	0,103	89,2
23	300	440	0,103	66,2	55	340	440	0,103	75,0
24	300	500	0,103	58,3	56	340	500	0,103	66,0
25	300	300	0,106	94,3	57	340	300	0,106	106,9
26	300	370	0,106	76,5	58	340	370	0,106	86,7
27	300	440	0,106	64,3	59	340	440	0,106	72,9
28	300	500	0,106	56,6	60	340	500	0,106	64,2
29	300	300	0,11	90,9	61	340	300	0,11	103,0
30	300	370	0,11	73,7	62	340	370	0,11	83,5
31	300	440	0,11	62,0	63	340	440	0,11	70,2
32	300	500	0,11	54,5	64	340	500	0,11	61,8

### 15.2. Příprava objemových těles

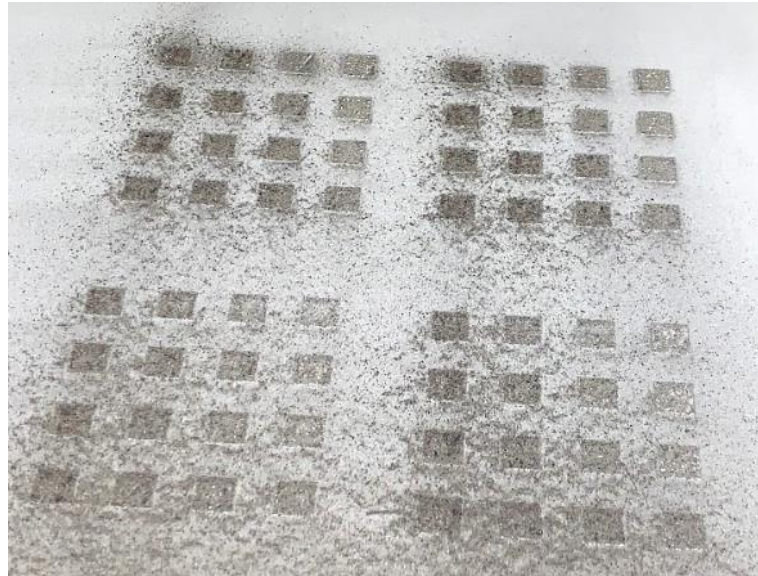
Postup přípravy tisku objemových těles byl stejný, jako je popsáno v kap. 14.2.



### 15.3. Tisk objemových těles

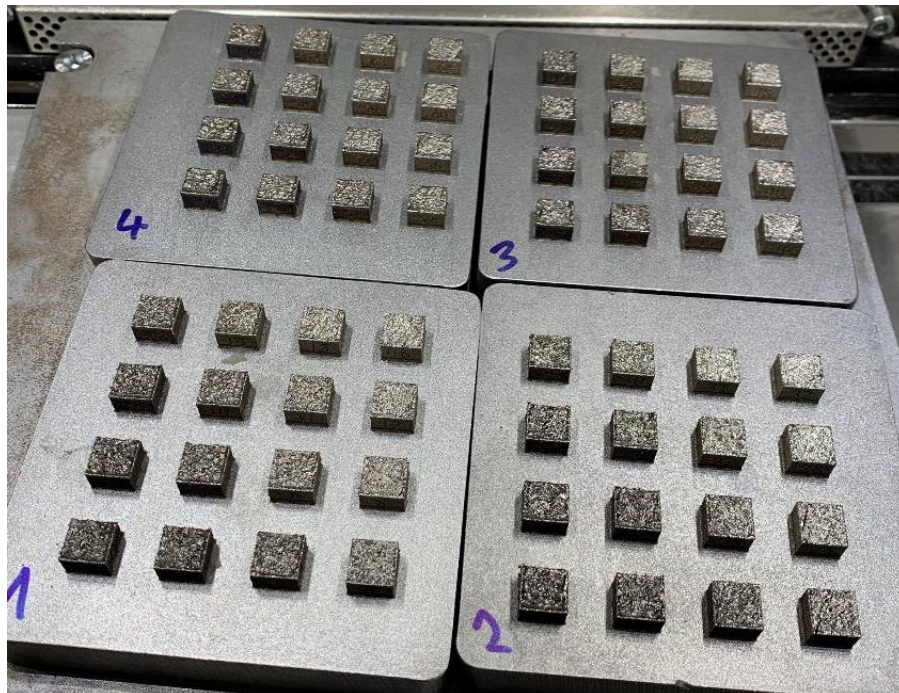
Proces tisku objemových těles byl stejný, jako je popsáno v kap. 14.3.

Po dokončení tisku byl patrný na neodstraněném práškovém materiálu výskyt sazí, které mohou vznikat při přílišné hustotě objemové energie. Výskyt sazí je zobrazen na Obr. 50.



*Obr. 50 - Výskyt sazí na dokončené stavbě*

Stav stavby po odsátí přebytečného práškového materiálu je patrný na Obr. 51. Lze pozorovat lepší kvalitu povrchové vrstvy, než jak tomu bylo u první sady vzorků.

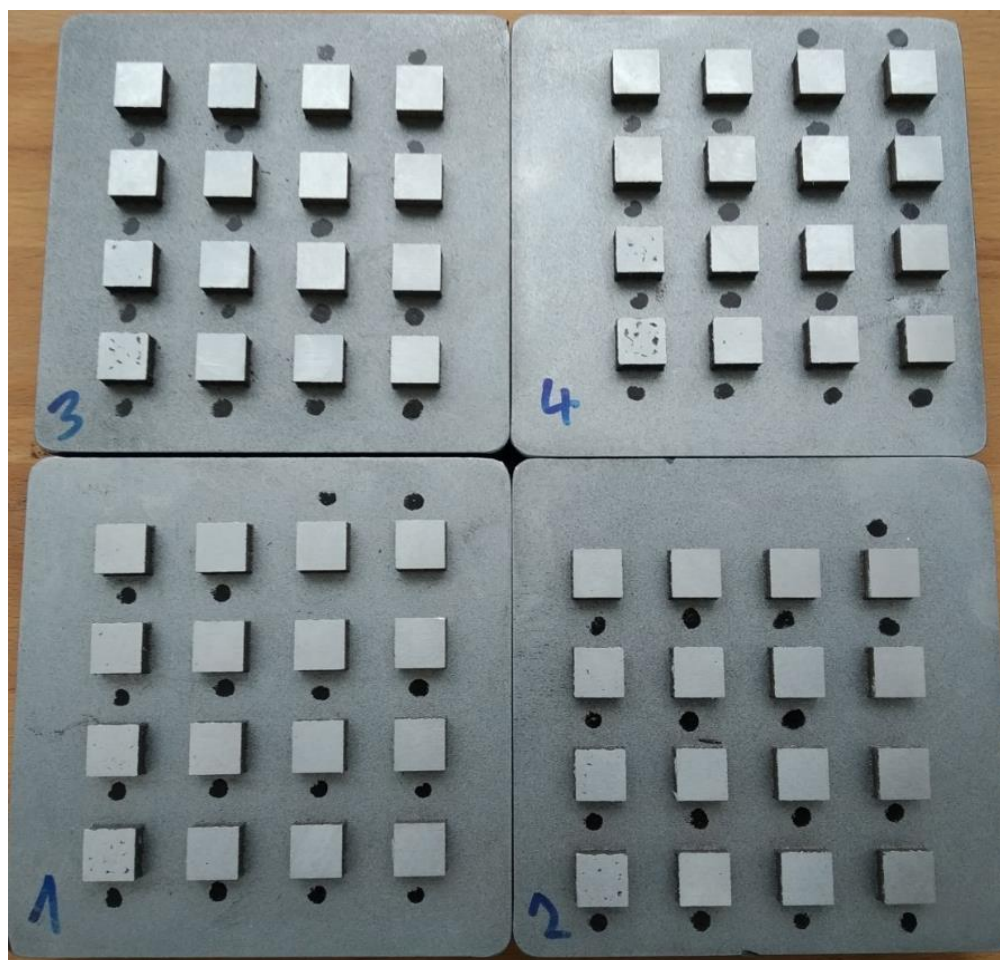


*Obr. 51 - Dokončená stavba po odsátí práškového materiálu*



#### 15.4. Vizuální vyhodnocení

Pro vizuální vyhodnocení bylo nutné opět provést odstranění povrchové vrstvy. Stav po jejím zbrúšení je patrný na Obr. 52. Lze pozorovat mnohem menší oblasti vzorků s okem patrnou porozitou.



*Obr. 52 - Stav vzorků po odbroušení povrchové vrstvy*

Na základě vizuální kontroly byla vyřazená objemová tělesa, která měla viditelný povrchový defekt. Dále byla tělesa zkoumána a vyřazována na základě pohledu na boční stranu, kde byl hodnocen stav povrchu a označovacích čísel. Celkově bylo vybráno, s důrazem na efektivnost procesu, 12 objemových těles, která byla dále upravena do podoby metalografického výbrusu. Vybrány byly vzorky č. 15, 16, 28, 32, 44, 47, 48, 56, 59, 60, 63 a 64.

#### 15.5. Příprava metalografických výbrusů

Pro metalografické vyhodnocení bylo opět nutné mechanicky oddělit vybrané vzorky pomocí odseknutí. Pohled na stav boční hrany s čísly vybraných vzorků je na Obr. 53. Jak je patrné, povrch je poměrně kvalitní a čísla čitelná.

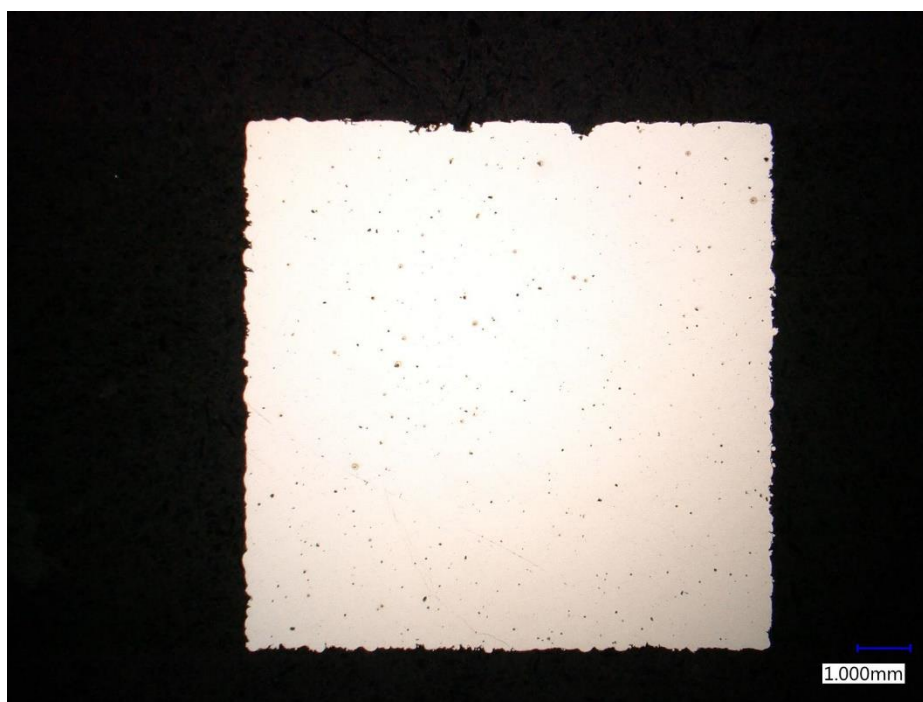


*Obr. 53 - Boční pohled na vybrané vzorky*

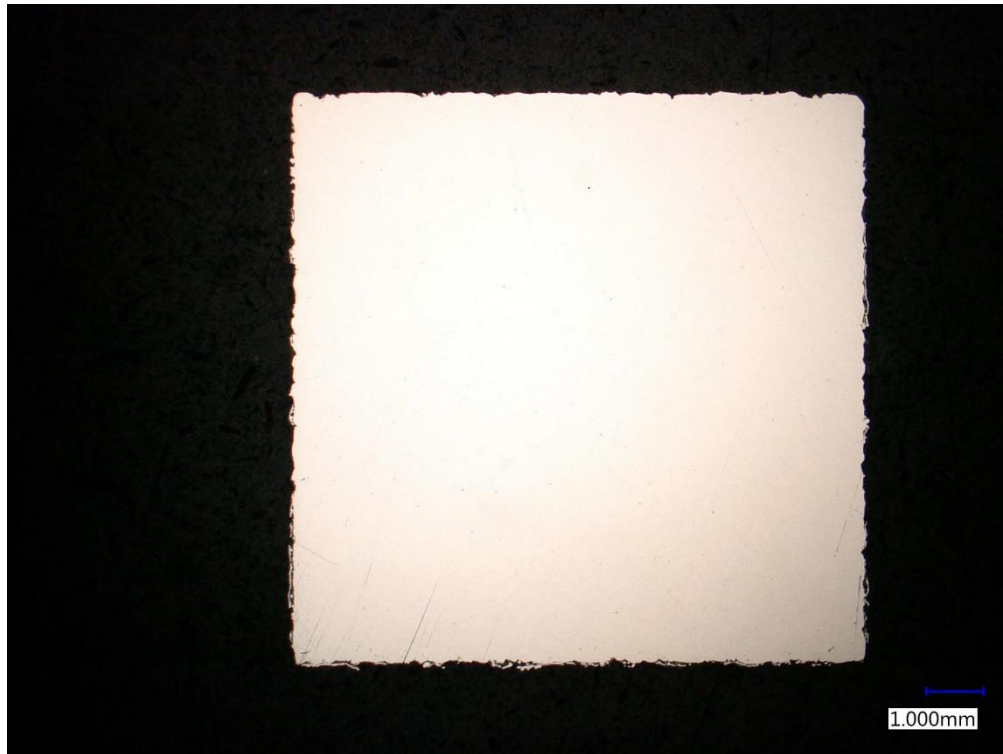
Příprava metalografických výbrusů proběhla stejně, jako je popsáno v kapitole 14.5.

### 15.6. Vyhodnocení metalografických výbrusů

Připravené metalografické výbrusy byly podrobeny analýze za pomoci mikroskopu. Vzhledem k malým rozměrům vyskytujících se pórů, bylo provedeno postupné naskenování plochy výbrusu při 100x zvětšení. Po nafocení povrchu byla provedena analýza pórovitosti. Na Obr. 54 je zobrazen snímek vzorku č. 15, u kterého byla naměřená relativní hustota 99,644 %. V porovnání se vzorkem č. 64 zobrazeným na Obr. 55, u kterého byla naměřená relativní hustota 99,982 %, je rozdíl značný.



*Obr. 54 - Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 15*



Obr. 55 - Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 64

Vyznačená oblast, na základě které byla vypočítaná relativní hustota, s tabulkou výsledků je zobrazena na Obr. 56. Společně s ostatními výsledky je uvedena v Tab. 13.



Obr. 56 - Určování relativní hustoty u vzorku č. 64

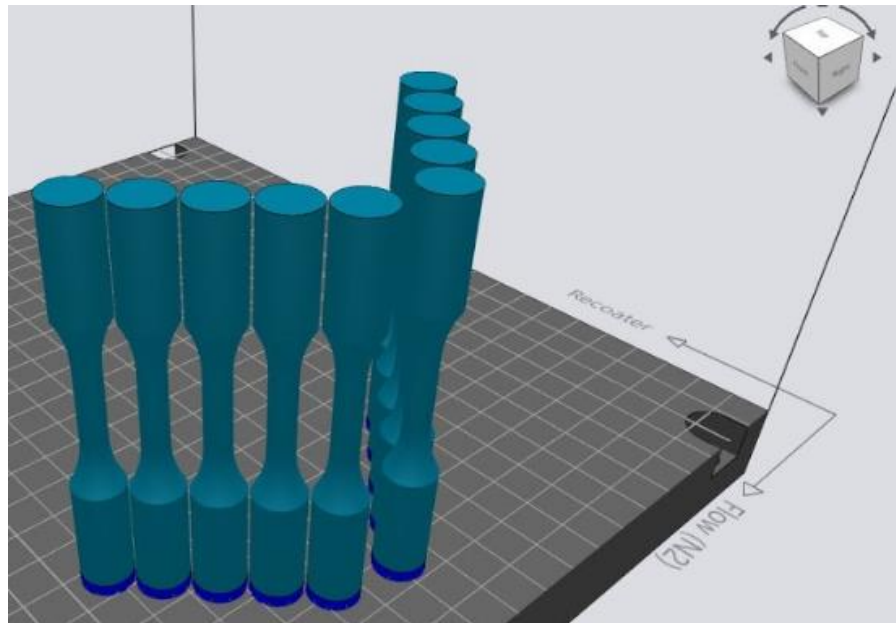
Tab. 13 - Relativní hustota vybraných vzorků

Vzorek č.	Rel. hustota [%]	P [W]	LS [mm/s]	h [mm]	E <sub>3</sub> [J/mm <sup>3</sup> ]
15	99,644	280	440	0,11	57,9
16	99,8	280	500	0,11	50,9
28	99,811	300	500	0,106	56,6
32	99,861	300	500	0,11	54,5
44	99,761	320	500	0,106	60,4
47	99,582	320	440	0,11	66,1
48	99,968	320	500	0,11	58,2
56	99,977	340	500	0,103	66,0
59	59,959	340	440	0,106	72,9
60	99,973	340	500	0,106	64,2
63	99,96	340	440	0,11	70,2
64	99,982	340	500	0,11	61,8

Na základě naměřených hodnot u druhých objemových vzorků se jeví jako perspektivní oblast s objemovou energií 60-70 J/mm<sup>3</sup>, výkonem 300-350 W, rychlostí skenování okolo 500 mm/s a osovou vzdáleností poblíž 0,11 mm. Pro tisk zkušebních tělísek na tahové zkoušky byly zvoleny procesní parametry vzorku č. 64.

## 16. Tahové zkoušky

Pro provedení tahových zkoušek ke zjištění meze pevnosti optimalizovaného materiálu bylo vytištěno deset zkušebních tělísek. Orientace tělísek v pracovním prostoru tiskárny je zobrazena na Obr. 57.



Obr. 57 - Orientace tělísek v pracovním prostoru tiskárny

Výsledný stav vytištěných zkušebních tělísek je zobrazen na Obr. 58. Tisk se zdařil, tělíška jsou bez viditelných defektů.

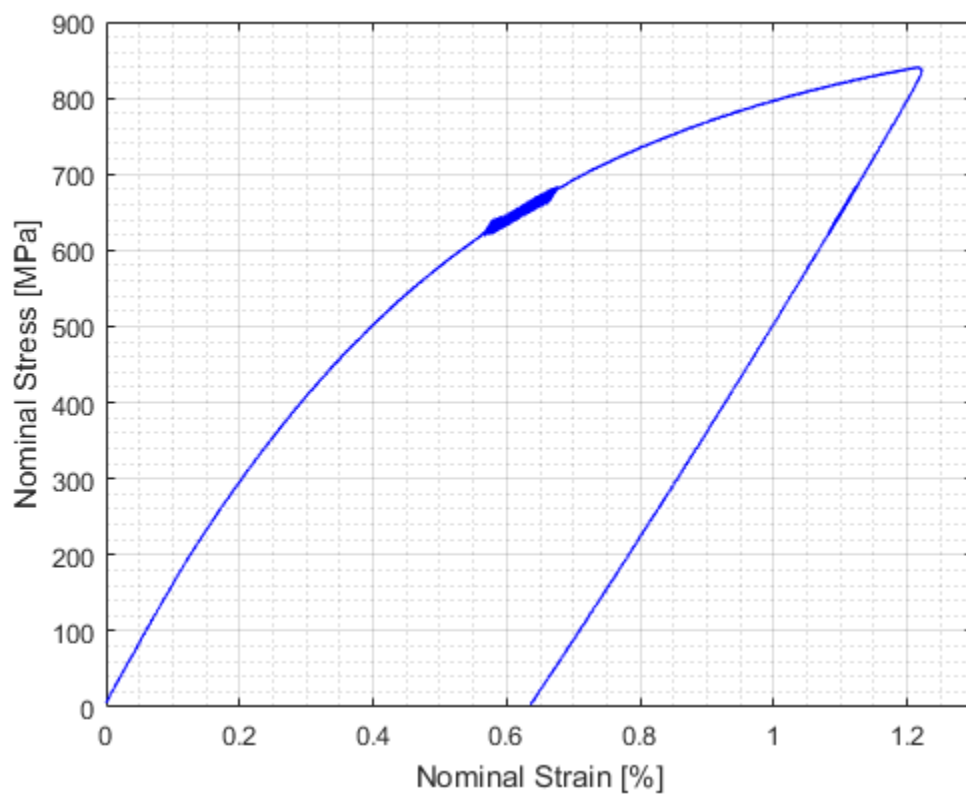


Obr. 58 - Vytištěná zkušební tělíška pro tahovou zkoušku



Pět zkušebních tělísek bylo ponecháno bez tepelného zpracování, dalších pět vzorků bylo precipitačně vytvrzeno při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin.

Následně mělo dojít k tahovým zkouškám, avšak stroj, který by byl schopen tělíska přetřhnout, měl poruchu. Pro částečné zjištění vlastností materiálu byl použit slabší stroj, který vyvinul napětí 840 MPa (na nevytvrzeném vzorku), přičemž nedošlo k destrukci vzorku. Průběh zatížení je zobrazen na Obr. 59. Vzhledem k hodnotám známým ze zkoušek tělísek tisknutých při tloušťce vrstvy 50 μm (v nevytvrzeném stavu 1000-1200 MPa), je tato hodnota pro uvažovanou aplikaci dostačující.



Obr. 59 - Průběh zatěžování nevytvrzeného vzorku

## Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřená na návrh a optimalizaci procesních parametrů u aditivní technologie produkující kovové výrobky.

V teoretické části byla nejprve popsána historie a současný stav v oboru aditivních technologií. Následně byly popsány principy jednotlivých aditivních technologií produkujících kovové výrobky. Dále byly uvedeny používané materiály, jejich výroba, používání a recyklace. Následující kapitola popisuje procesní parametry a jejich vliv na celkový výsledek procesu. Další kapitoly se zabývají konstrukcí tiskáren a používaným SW. Předposlední kapitola rozebírá zdravotní rizika při expozici práškovým materiálem a poslední kapitola teoretické části porovnává aditivní technologie s konvenčními.

V úvodu praktické části byla provedena rešerše dostupných procesních parametrů, na jejímž základě byly navrženy procesní parametry pro jednotlivé návary. Po vyhodnocení návarů byla navržena matice procesních parametrů pro stavbu objemových těles. U této stavby byla dosažena nejlepší relativní hustota 99,319 %. Na základě získaných poznatků byla upravena matice procesních parametrů a byla provedena další stavba. U této stavby byla dosažena minimální požadovaná relativní hustota, konkrétně bylo dosaženo 99,982 %.

Při nedokončené tahové zkoušce tělísko odolalo napětí 840 MPa, což je pro uvažovanou aplikaci hodnota dostatečná. Po vykonání dalších mechanických a tiskových zkoušek dojde k zavedení optimalizovaných procesních parametrů do praxe. Díky nově nalezeným procesním parametrům dochází ke snížení nákladů na 3D tisk licích nástrojů až o 40 %.

## Zdroje

- [1] History of 3D printing. *Buildatron 3d Printers* [online]. [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <http://buildatron.com/history-of-3d-printing>
- [2] Powder bed fusion. *3D Experience Market Place* [online]. [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion>
- [3] The Complete History of 3D Printing: From 1980 to the Present Day. *3D Sourced* [online]. [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://3dsourced.com/3d-printers/history-of-3d-printing/>
- [4] *3D Printing Market* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/3d-printing-market>
- [5] Worldwide forecast growth 3D printing. *Statista* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/>
- [6] BUCHANAN, C. a L. GARDNER. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*. 2019, **180**, 332-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>. ISSN 0141-0296. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029618307958>
- [7] 3D metal printing market. *Grand View Research* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-metal-printing-market>
- [8] NICHOLS, Megan R. How does the automotive industry benefit from 3D metal printing? *Metal Powder Report*. 2019, **74(5)**, 257-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.07.002>. ISSN 0026-0657. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002606571930267X>
- [9] HUMPHRIES, Matthew. Porsche Is 3D Printing Classic Car Parts. *PCmag* [online]. 14. 2. 2018 [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.pcmag.com/news/porsche-is-3d-printing-classic-car-parts>
- [10] SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*. 2019, **35**, 1286-1296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>. ISSN 2351-9789. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169>
- [11] TOP 12 Printed Implants. *3D Natives* [online]. 23. 7. 2019 [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/best-3d-printed-implants-230720195/>
- [12] PEI, Eujin. Editorial PIAM October 2019. *Progress in Additive Manufacturing*. 2019, **4(4)**, 355-356. DOI: [10.1007/s40964-019-00103-8](https://doi.org/10.1007/s40964-019-00103-8). ISSN 2363-9520. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00103-8>



- [13] Introduction to 3D metal printing. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/>
- [14] The best metal 3D printers in 2020. *Aniwaa* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/>
- [15] Additive Manufacturing Technologies: An Overview. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>
- [16] Selective Laser Sintering. *Manufacturing Guide* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>
- [17] Binder Jetting. *Manufacturing Guide* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/binder-jetting>
- [18] Direct energy deposition. *Manufacturing guide* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/direkt-energideponering>
- [19] Lasertec 125 3D hybrid. *DMG MORI* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba/praskova-tryska/lasertec-125-3d-hybrid>
- [20] DUTTA, Bhaskar, Sudarsanam BABU a Bradley JARED. Chapter 4 - Raw materials for metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing Materials and Technologies*. Elsevier, 2019, s. 77-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816634-5.00004-2>. ISBN 978-0-12-816634-5. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128166345000042>
- [21] Conceptual Design Framework for Setting Up Aluminum Alloy Powder Production System for Selective Laser Melting (SLM) Process - Scientific Figure on ResearchGate. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Gas-atomization-Courtesy-of-LPW-Technology-reprinted-with-permission-from-Ref-70\\_fig2\\_331798165](https://www.researchgate.net/figure/Gas-atomization-Courtesy-of-LPW-Technology-reprinted-with-permission-from-Ref-70_fig2_331798165)
- [22] MUTUA, James, Shinya NAKATA, Tetsuhiko ONDA a Zhong-Chun CHEN. Optimization of selective laser melting parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel. *Materials & Design*. 2018, **139**, 486-497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.042>. ISSN 0264-1275. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517310730>
- [23] *Material data sheet* [online]. In: . [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: [https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS\\_MaragingSteel\\_MS1\\_en.pdf](https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf)
- [24] *Vysoko-pevné a vysokolegované oceli a slitiny Ni a Co* [online]. In: . [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01\\_pm\\_vyskopevne\\_a\\_vysokolegovane\\_oceli\\_a\\_slitiny\\_ni\\_a\\_co.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf)

- [25] YAP, Chor Yen, C. CHUA, Z. DONG, Z. LIU, D. ZHANG, L.E. LOH a Swee Leong SING. Review of selective laser melting: Materials and applications: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015/12/01, **2**, 041101. DOI: 10.1063/1.4935926.
- [26] SUN, S., M. BRANDT a M. EASTON. 2 - Powder bed fusion processes: An overview: An overview. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*. Woodhead Publishing, 2017, s. 55-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6>. ISBN 978-0-08-100433-3. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004333000026>
- [27] PEI, Wei, Zhengying WEI, Chen ZHEN, Li JUNFENG, Zhang SHUZHE a Du JUN. Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AISi10Mg powder. *Applied Physics A*. 2017/07/25, **123**. DOI: 10.1007/s00339-017-1143-7.
- [28] KARG, Michael, Oliver HENTSCHEL, Bhrihu AHUJA, et al. *Comparison of process characteristics and resulting microstructures of maraging steel 1.2709 in Additive Manufacturing via Laser Metal Deposition and Laser Beam Melting in Powder Bed*. 2016/11/29.
- [29] 2020 Metal 3D Printer Buyer's Guide. *All3DP Pro* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>
- [30] EOS M290. *3R Systems* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <http://www.3rsystems.cz/3d-tisk-kovu/eos-m290>
- [31] Tips and Tricks for Metal 3D Printing: Recoaters. *Materialise* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/blog/metal-3D-printing-recoaters>
- [32] Powder Bed Fusion. *Digital Alloys* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.digitalalloys.com/blog/powder-bed-fusion/>
- [33] SENTHILKUMARAN, K., Pulak M. PANDEY a P.V.M. RAO. Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering. *Materials & Design*. 2009, **30**(8), 2946-2954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.009>. ISSN 0261-3069. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909000028>
- [34] Materialise Magics. *MCAE* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/materialise-magics/>
- [35] 3D Printing Simulation (Part 2). *3D Science Valley* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <http://en.51shape.com/?p=907>
- [36] CHEN, Rui, Hong YIN, Ivan S. COLE, Shirley SHEN, Xingfan ZHOU, Yuqian WANG a Shichuan TANG. Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review: A review. *Chemosphere*. 2020, **259**, 127452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127452>. ISSN 0045-6535. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520316465>
- [37] ZHAI, Yuwei, Diana A. LADOS a Jane L. LAGOY. Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation: Making Imagination the Major

Limitation. *JOM*. 2014, **66**(5), 808-816. DOI: 10.1007/s11837-014-0886-2. ISSN 1543-1851. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s11837-014-0886-2>

[38] ATTARAN, Mohsen. Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics. *Journal of Service Science and Management*. 2017/06/01, **10**. DOI: 10.4236/jssm.2017.103017.

[39] SCHOBER, Jessica. *Parametric analysis of 1.2709 maraging steel manufactured by LPBF* [online]. In: . 29.5.2019 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/b3da/899b541dfcda64ad9898090f692027792906.pdf>

[40] KUČEROVÁ, Ludmila, Ivana ZETKOVÁ, Andrea JANDOVÁ a Martin BYSTRIANSKÝ. Microstructural characterisation and in-situ straining of additive-manufactured X3NiCoMoTi 18-9-5 maraging steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2019, **750**, 70-80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.041>. ISSN 0921-5093. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509319302047>

[41] SIMSON, Thomas, Jürgen KOCH, Jakob ROSENTHAL, et al. Mechanical Properties of 18Ni-300 maraging steel manufactured by LPBF. *Procedia Structural Integrity*. 2019, **17**, 843-849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.112>. ISSN 2452-3216. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321619303208>

[42] YASA, Evren, Karolien KEMPEN, Jean-Pierre KRUTH, Lore THUIS a H.J. VAN. Microstructure and mechanical properties of maraging steel 300 after selective laser melting. *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010*. 2010/01/01, , 383-396.

[43] CASALINO, G., S.L. CAMPANELLI, N. CONTUZZI a A.D. LUDOVICO. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics & Laser Technology*. 2015, **65**, 151-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.07.021>. ISSN 0030-3992. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399214002011>

[44] SONG, Jun, Qian TANG, Qixiang FENG, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical behaviours of 18Ni-300 maraging steel manufactured by selective laser melting. *Optics & Laser Technology*. 2019, **120**, 105725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105725>. ISSN 0030-3992. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399219308473>

[45] KEMPEN, K., et al. Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. In: *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2011. p. 484-495.

[46] SOLA, Antonella a Alireza NOURI. Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*. 2019/06/01. DOI: 10.1002/amp2.10021.

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Patentové schéma technologie SLA [3] .....	12
Obr. 2 - Růst hodnoty trhu 3D tisku v mld. USD [5] .....	13
Obr. 3 - Rozložení Amerického trhu kovového 3D tisku pro jednotlivá průmyslová odvětví [7].....	14
Obr. 4 - Tryska leteckého motoru vyrobená pomocí aditivních technologií společností GE Aviation [6].....	15
Obr. 5 - Náhradní díl pro Porsche 911 vyrobený pomocí aditivních technologií [9].....	16
Obr. 6 - Titanový obratel vytisknutý firmou EOS [11] .....	17
Obr. 7 - Kompletně vytištěný MX3D most [6].....	18
Obr. 8 - Rozdělení technologií 3D tisku [13] .....	19
Obr. 9 - Rozložení trhu se zařízením k 3D tisku kovových součástí v roce 2019 [14] ..	20
Obr. 10 - Princip technologie SLM a DMLS [16].....	21
Obr. 11 - Princip technologie Binder Jetting [17] .....	22
Obr. 12 - Princip technologií DED a) LENS b) EBAM [18] .....	24
Obr. 13 - Výměník tepla vyrobený hybridní technologií [19].....	25
Obr. 14 – Snímek ze SEM na nástrojovou ocel 1.2709 [22] .....	27
Obr. 15 - Schéma plynové atomizace [21] .....	28
Obr. 16 - Schéma PREP [20].....	28
Obr. 17 Snímek ze SEM oceli 1.4542 a) panenská b) recyklovaná [20].....	30
Obr. 18 - FBM procesní parametry [25] .....	31
Obr. 19 - Podélný řez návarem vytvořeným přílišnou rychlostí skenování [27].....	32
Obr. 20 - Vliv šrafovací vzdálenosti na vznik pórů [27] .....	33
Obr. 21 - Závislost Relativní hustoty na příkonu laseru a rychlosti skenování [28] .....	35
Obr. 22 - EOS M290 [30] .....	36
Obr. 23 - Příklady umístění staveb ve stroji [31].....	38
Obr. 24 - Orientace vzorků při zkoumání vlivu smrštění [33].....	39
Obr. 25 - Náhled do softwaru Materialise Magics [34].....	40
Obr. 26 - Porovnání predikované a skutečné deformace součásti [35] .....	41
Obr. 27 - Závislost ceny výrobku na objemu výroby [37].....	43
Obr. 28 - Vzorky s různými vstupními parametry výkonu laseru a rychlosti skenování [39].....	46
Obr. 29 - Rozložení single tracků na stavební platformě .....	49

Obr. 30 - Stavební platforma s vytištěnými single tracky .....	50
Obr. 31 - Detail pravidelného přerušení single tracku.....	50
Obr. 32 - Nehomogenita svaru P=200 W LS=550 mm/s.....	51
Obr. 33 - Rozstřík nataveného materiálu svaru P=275 W LS=275 mm/s .....	51
Obr. 34 - Vizuálně vhodné single tracky .....	52
Obr. 35 - Systém rozřezání platformy s návary .....	53
Obr. 36 - Sledované parametry na výbrusu svaru.....	54
Obr. 37 - Prasklina na svaru č. 9.....	55
Obr. 38 - Defekt na svaru č. 11 .....	55
Obr. 39 - Metalografické snímky vybraných svarů .....	56
Obr. 40 - Příprava dat v SW Materialise Magics.....	58
Obr. 41 - Příprava dat v SW EOSPRINT .....	58
Obr. 42 - Palety umístěné v pracovním prostoru .....	59
Obr. 43 - Probíhající proces tisku .....	59
Obr. 44 - Stav palety po vytištění .....	59
Obr. 45 - Stav palet po broušení s naznačeným číslování“ .....	60
Obr. 46 - Oddělené vzorky .....	61
Obr. 47 - Vyleštěné metalografické vzorky.....	61
Obr. 48 - Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 46.....	61
Obr. 49 - Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 64.....	62
Obr. 50 - Výskyt sazí na dokončené stavbě.....	64
Obr. 51 - Dokončená stavba po odsátí práškového materiálu .....	64
Obr. 52 - Stav vzorků po odbroušení povrchové vrstvy .....	65
Obr. 53 - Boční pohled na vybrané vzorky.....	66
Obr. 54 - Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 15.....	66
Obr. 55 - Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 64.....	67
Obr. 56 - Určování relativní hustoty u vzorku č. 64 .....	67
Obr. 57 - Orientace tělísek v pracovním prostoru tiskárny.....	69
Obr. 58 - Vytištěná zkušební tělíska pro tahovou zkoušku .....	69
Obr. 59 - Průběh zatěžování nevytvrzeného vzorku.....	70

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Přehled používaných materiálů [20] .....	26
Tab. 2 - Složení nástrojové oceli 1.2709 [22,23].....	27
Tab. 3 - Parametry procesů získaných rešerší.....	47
Tab. 4 - Tabulka používaných procesních parametrů.....	47
Tab. 5 - Hodnoty procesních parametrů získané aproximací .....	48
Tab. 6 - Navržená matice procesních parametrů .....	48
Tab. 7 - Vyhodnocení single tracků na základě vizuálního zkoumání .....	52
Tab. 8 - Vyhodnocení vybraných svarů na základě metalografických výbrusů.....	55
Tab. 9 - Výsledné svary .....	56
Tab. 10 - Navržené parametry pro tisk objemových těles .....	57
Tab. 11 - Výsledná relativní hustota vybraných vzorků.....	62
Tab. 12 - Návrh matice procesních parametrů.....	63
Tab. 13 - Relativní hustota vybraných vzorků.....	68