



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**ZPRACOVÁNÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN TECHNOLOGIÍ
SELECTIVE LASER MELTING**

PROCESSING OF MAGNESIUM ALLOYS USING SELECTIVE LASER MELTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavol Kaščák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Suchý

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Pavol Kaščák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Suchý**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Zpracování hořčkových slitin technologií selective laser melting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní způsob výroby umožňuje produkci topologicky optimalizovaných dílů z různých materiálů, avšak jejich portfolio je zatím stále poměrně omezené. Zpracování hořčkových slitin se nachází v prvotní fázi vývoje. Pro další posunutí vývoje hořčkových slitin aditivním způsobem je nutné vypracovat úvodní experimenty na 3D tiskárně kovu a vyhodnotit je.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů při zpracování hořčkových slitin technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu

Dílčí cíle bakalářské práce:

- definice hlavních procesních parametrů,
- návrh a realizace experimentů,
- analýza získaných výstupů a jejich porovnání.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

YADROITSEV, Igor. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, 2009, iv, 266 s. ISBN 978-3-8383-1794-6.

MANAKARI, Vyasraj, Gururaj PARANDE a Manoj GUPTA. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloy Powders: A Review. Metals. 2017, 7(1), 2. DOI: 10.3390/met7010002. ISSN 2075-4701.

CHUNG NG, Chi, Monica SAVALANI a Hau CHUNG MAN. Fabrication of magnesium using selective laser melting technique. Rapid Prototyping Journal. 2011, 17(6), 479-490. DOI: 10.1108/13552541111184206. ISSN 1355-2546.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Spracovanie materiálov na báze horčika technológiou Selective laser melting, je vďaka jeho vysokej reaktivite v počiatočných fázach vývoja. Táto práca sa zaoberá objasňovaním vplyvu jednotlivých procesných parametrov pri spracovaní horčíkových zliatin na výslednú porozitu materiálu. Cieľom je vypracovanie úvodných experimentov pre posun v spracovaní horčíkových zliatin aditívnymi technológiami. Teoretická časť práce obsahuje náhľad do problematiky SLM a prehľad súčasného stavu poznania spracovania horčíkových zliatin touto technológiou. Analýzou teoretickej časti bol navrhnutý hlavný objemový test tejto práce. Vybraným materiálom pre tento test bola biodegradibilná horčíková zliatina WE43. Na tejto zliatine, podľa znalostí autora tejto práce, nebol doposiaľ publikovaný žiaden výskum. Na základe výsledkov experimentu boli zhotovené závislosti jednotlivých procesných parametrov na výslednej relatívnej hustote vzoriek. V závere boli získané výstupy porovnané s odbornou literatúrou.

KEÚČOVÉ SLOVÁ

SLM, Selective laser melting, horčík, horčíkové zliatiny, procesné parametre, WE43

ABSTRACT

The processing of magnesium-based materials with Selective laser melting technology is due to its high reactivity in the initial stages of development. This bachelor thesis deals with the elucidation of impacts of individual process parameters in processing of magnesium alloys on the resulting material porosity. The aim is to develop initial experiments for the shift in the processing of magnesium alloys by additive technologies. The theoretical part contains an insight into the SLM technology and an overview of the current state of knowledge of processing of magnesium alloys by this technology. By the analysis of the theoretical part, the main volume test of this thesis has been designed. The selected material for this test was the biodegradable magnesium alloy WE43. According to the author's knowledge, no research has been published on this alloy so far. Based on the results of the experiment, the dependencies of the individual process parameters were made on the resulting relative density of the samples. At the end, the outputs were compared with the literature.

KEY WORDS

SLM, Selective laser melting, magnesium, magnesium alloys, process parameters, WE43

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KAŠČÁK, P. *Zpracování hořčíkových slitin technologií selective laser melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Suchý.

POĎAKOVANIE AUTORA

Moja vďaka patrí predovšetkým vedúcemu tejto práce, Ing. Jánovi Suchému. Ďakujem mu za cenné rady, pripomienky a veľkú ochotu. Taktiež by som sa chcel týmto poďakovať svojej rodine a priateľom, ktorý ma podporovali pri štúdiu a pri tvorbe tejto práce.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že túto bakalársku prácu *Zpracování hořčíkových slitin technologií selective laser melting* som vypracoval samostatne, pod vedením vedúceho bakalárskej práce Ing. Jána Suchého. Zároveň prehlasujem, že som v zozname uviedol všetky použité literárne zdroje.

V Brne dňa 18. května 2018

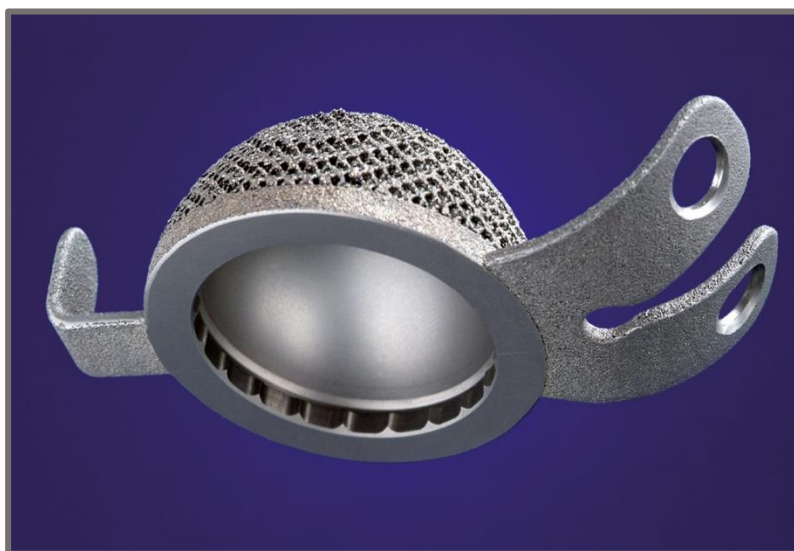
.....
Pavol Kaščák

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	13
2.1 Technológia SLM	13
2.2 Procesné parametre	13
2.3 Efekt procesných parametrov na horčíkové zliatiny	14
2.3.1 Oblasť veľkej vstupnej energie	14
2.3.2 Oblasť nízkej vstupnej energie	14
2.3.3 Oblasť formovania	15
2.3.4 Oblasť ballingu	15
2.4 Horčíkové zliatiny spracované technológiou SLM	15
2.4.1 AZ91D	15
2.4.2 Čistý horčík	19
2.4.3 Mg-9%Al	21
2.4.4 ZK60	22
2.4.5 Mg-Mn zliatina	24
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	25
4 MATERIÁL A METÓDY	27
4.1 Vybraný materiál	27
4.2 Použité zariadenie	27
4.3 Návrh experimentu	29
4.3.1 Predbežný test	29
4.3.2 Návrh hlavného testu	30
4.4 Príprava experimentu	31
4.5 Hodnotenie experimentu	32
5 VÝSLEDKY	33
5.1 Analýza prášku	33
5.2 Experiment	34
5.3 Relatívna hustota vzoriek	34
5.3.1 Relatívna hustota zhodnotená metódou výbrusov	34
5.3.2 Relatívna hustota zmeraná pomocou μ CT	36
6 DISKUSIA	38
7 ZÁVER	40
8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	41
9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	44
10 ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV	45
11 ZOZNAM TABULIEK	46
12 ZOZNAM PRÍLOH	47
13 PRÍLOHY	48

1 ÚVOD

Aditívne technológie majú celú radu výhod oproti konvenčným obrábacím metódam. Ich základom je postupné pridávanie materiálu, čo umožňuje komplexnosť tvarov. Ekonomickosť procesu je taktiež ďalšou veľkou výhodou. Jednou z masívne rozvíjajúcich sa technológií súčasnosti je aj Selective Laser Melting. Jej podstatou je tavenie kovového prášku laserom. Pomocou tejto technológie je v dnešnej dobe možné spracovať široké spektrum materiálov, ako napríklad hliník, nehrdzavejúcu oceľ alebo titán [1]. Menej používaný kov, ktorý je na vzostupe je horčík a jeho zliatiny. Vďaka svojej nízkej hustote ($1,74 \text{ g/cm}^3$) má využitie v aplikáciách, pri ktorých je nízka hmotnosť nevyhnutnosťou. Jeho hustota je od hliníka menšia dokonca až o 33 %. Materiály, na báze horčíka sa vyznačujú taktiež vynikajúcou obrobitelnosťou, vysokými tlmiacimi vlastnosťami, vysokou tepelnou stabilitou, skvelou tepelnou a elektrickou vodivosťou a odolnosťou voči elektromagnetickému žiareniu. Oblasť použitia horčíka však majú svoje obmedzenia, medzi ktoré patrí nízka odolnosť voči korózii, nízky modul pružnosti, nízka pevnosť, obmedzená ťažnosť a húževnatosť pri izbovej teplote a nízka odolnosť voči tečeniu materiálu [2]. Modul pružnosti horčíku (41 – 45 GPa) sa približuje modulu pružnosti ľudskej kosti (3 – 20 GPa) omnoho viac, než moduly pružnosti bežne používaných biomateriálov, ako napríklad titánových zliatin (110 – 117 GPa) alebo Co-Cr zliatin (230 GPa) [3]. Kombinácia tejto vlastnosti s jeho biokompatibilitou, biodegradabilitou a osteokonduktivitou robí tento materiál jedným z najperspektívnejších biomateriálov súčasnosti. Využitie horčíka a jeho zliatin je však vo veľkej miere obmedzené jeho výrobou. Odlievanie je najčastejšia metóda spracovania horčíka [2]. Vysoká reaktivita horčíka limituje použitie aditívnych technológií v tejto oblasti, a to je aj dôvod, prečo sú výskumy niektorých jeho zliatin ešte stále vo vývoji. SLM je progresívna technológia a horčík a jeho zliatiny spracované touto technológiou majú potenciál nájsť si v budúcnosti uplatnenie napríklad v biomedicíne alebo automobilovom či leteckom priemysle.



Obr. 1-1 Časť bedrového kĺbu (*acetabular cup*) vyrobená technológiou SLM [4]

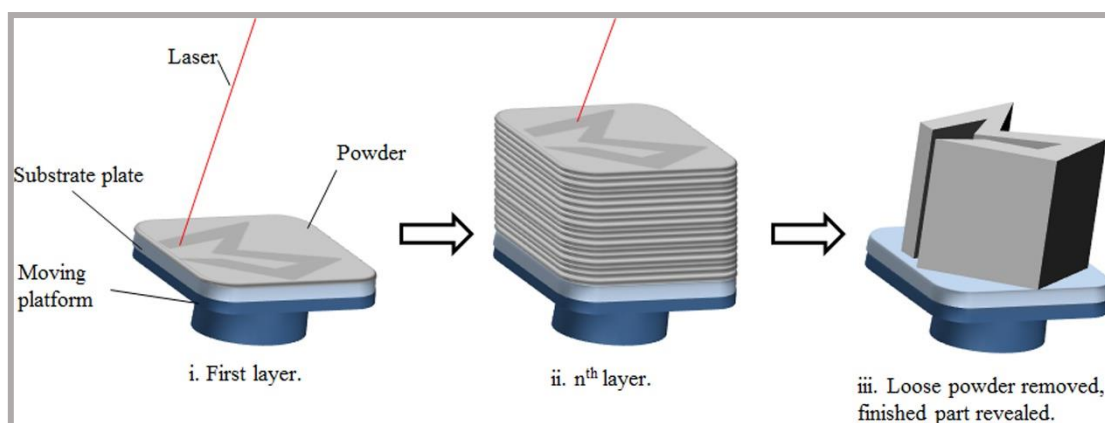
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2

2.1 Technológia SLM

2.1

Selective laser melting je proces, pri ktorom vysoko-výkonný laser taví vybrané oblasti prášku, vrstvu po vrstve, podľa CAD dát. Slovo „selective“ z názvu znamená, že tavené sú len vybrané časti prášku, „laser“ označuje, že na proces je použitý laser a slovo „melting“ znamená, že prášok sa taví. Stavebný proces začína umiestnením tenkej vrstvy kovového prášku na podkladovú dosku v stavebnej komore. Po nanosení prášku laser s vysokou hustotou energie roztaví vybrané oblasti podľa spracovaných dát. Po ukončení skenovania podkladová doska poklesne o hrúbku jednej vrstvy, ktorá je zvyčajne 20 – 100 µm [5] a ďalšia vrstva je nanosená a následne roztavená laserom.



Obr. 2-1 Schéma SLM procesu [6]

Tento proces sa znovu opakuje až kým nie je celý diel hotový. Pri vysokých teplotách pri tomto procese hrozí reakcia kovu s atmosférou, preto je priestor komory vyplnený inertnou atmosférou, ktorá je zvyčajne z N₂ alebo Ar. U vysoko reaktívnych materiálov sa používa argón, pretože je inertnejší ako dusík (viz. periodická tabuľka prvkov) a zároveň dusík reaguje s niektorými kovmi a vytvára nitridy. Ako je zrejmé z obr. 1, vyrábaný diel je podopieraný prebytočným práškom a podpera je potrebná len ak je uhol medzi podkladovou doskou a dielom väčší než 45° [7].

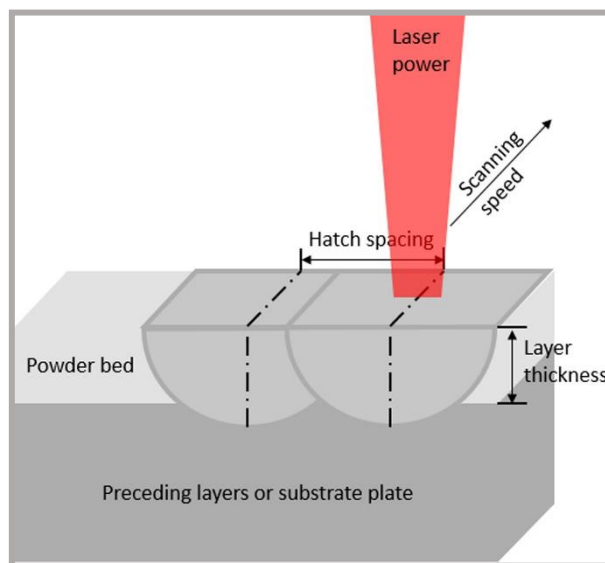
2.2 Procesné parametre

2.2

SLM vyžaduje dôslednú voľbu procesných parametrov nutných k predchádzaniu problémov, s týmto procesom spojených, ako napríklad oxidácia, balling efekt, teplotná nestabilita [2]. Procesné parametre majú zásadný vplyv na výsledné mechanické vlastnosti komponentu. Najdôležitejšie z nich sú výkon laseru, skenovacia rýchlosť, vzdialenosť stôp a šírka vrstvy, ktorá sa taví. Všetky tieto parametre ovplyvňujú množstvo energie (hustotu energie), ktoré je privádzané behom procesu do miesta tavby a je definované ako

$$E = \frac{P}{v \cdot s \cdot t} \quad (2.2)$$

Kde P je výkon laseru, v je rýchlosť skenovania, s je vzdialenosť stôp a t je šírka tavenej vrstvy [8]. Medzi ďalšie procesné parametre patrí napríklad skenovacia stratégia a kvalita prášku.



Obr. 2-2 Základné procesné parametre [6]

Výsledné mechanické vlastnosti sú vo veľkej miere ovplyvnené uvedenými procesnými parametrami.

2.3 Efekt procesných parametrov na horčíkové zliatiny

U rôznych horčíkových zliatin sa v závislosti na výkone laseru a skenovacej rýchlosti vyskytujú štyri hlavné oblasti „chovania“, ktoré vo svojej práci popísal Manakari a kol. [2] a sú vysvetlené v nasledujúcich podkapitolách.

2.3.1 Oblasť veľkej vstupnej energie

Pri energetickej hustote, ktorá je príliš veľká z dôvodu veľmi vysokého výkonu laseru, nastáva vyparovanie a ionizácia prášku kvôli nízkemu bodu varu horčíku ($1093\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vyparený prášok prudko expanduje a poškodzuje roztavený bazénik, čo vedie k porušovaniu stôp. Zvýšená energetická hustota spôsobuje prehriatie tavného bazéniku, čo ovplyvňuje dynamickú viskozitu. Roztavený horčík má omnoho menšiu hodnotu dynamickej viskozity ($1,5\text{ Pa}\cdot\text{s}$) než železo ($6,93\text{ Pa}\cdot\text{s}$) a titan ($2,2\text{ Pa}\cdot\text{s}$). Vysoká hodnota energetickej hustoty spôsobuje vysoké tepelné napätie, ktoré znižuje viskozitu roztaveného kovu a môže zapríčiniť deformáciu konečného dielu.

2.3.2 Oblasť nízkej vstupnej energie

Pri použití nedostatočného výkonu laseru a pomerne veľkej skenovacej rýchlosti nemusí dôjsť k dosiahnutiu teploty tavenia magnézia ($650\text{ }^{\circ}\text{C}$), takže prášok sa taví len čiastočne. Energetická hustota je nedostatočná na vytvorenie adekvátnej tekutej fáze. Aj keď medzi časticami došlo k čiastočnej fúzii, výsledkom sú krehké vzorky so zvyškami neroztaveného prášku na povrchu, veľkou porozitou alebo delamináciou (viz obr. 2-3). Pri príliš vysokej skenovacej rýchlosti sa kvôli malej hustote

a chemickým vlastnostiam horčíku môže prášok dostať do atmosféry v komore, kde oxiduje, vytvára čiernu hmlu (MgO) a znečisťuje stavebnú komoru.

2.3.3 Oblasť formovania

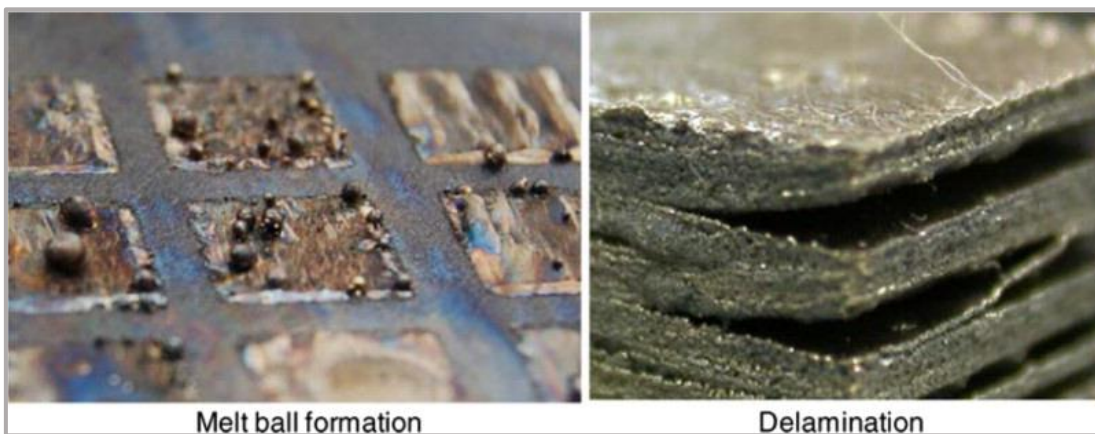
2.3.3

V tejto oblasti je hustota energia dostatočná nato, aby viskozita klesla natoľko, že sa tavenina môže vhodne rozvrstviť na už spracované vrstvy. Táto zóna je najžiadanejšia a je v nej možné postaviť diely s hustotou 75 – 99,5 % bez väčších defektov.

2.3.4 Oblasť ballingu

2.3.4

Balling efekt je charakterizovaný hromadením guľovitých častíc z dôvodu nedostatočnej hustoty energie v mieste tavby, a to napríklad kvôli nízkym výkonom laseru, vysokej skenovacej rýchlosti alebo veľkej hrúbky vrstvy. Jeho príčinou je nedostatočná zmáčavosť tavného bazéniku s predchádzajúcou vrstvou, ktorá ovplyvňuje tvorbu stopy a tým bráni vytváraniu ďalších vrstiev. Výskyt ballingu spôsobuje tepelné namáhanie a slabé prepojenie medzi zrnami a vrstvami, čo sa prejavu napríklad v zhoršenom povrchu dielu.



Obr. 2-3 Balling a delaminácia [9]

2.4 Horčíkové zliatiny spracované technológiou SLM

2.4

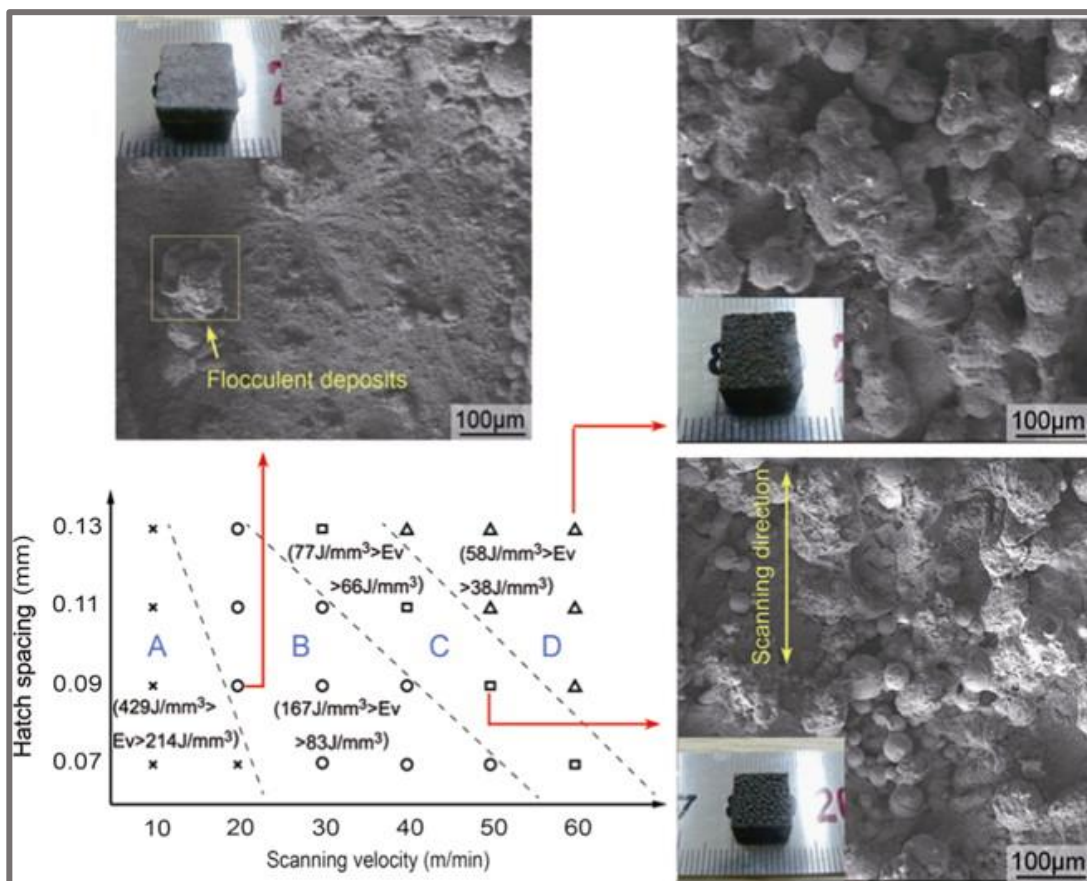
Nasledujúce podkapitoly pojednávajú o najpoužívannejších horčíkových zliatinách spracovaných technológiou SLM. Vhodné procesné parametre sa pohybujú v podobných hodnotách u väčšiny zliatin, preto sa pri výskumoch získané hodnoty parametrov jednej zliatiny môžu aplikovať aj na iné druhy zliatin.

2.4.1 AZ91D

2.4.1

AZ91D je najrozšírenejšia horčíková zliatina na odlievanie. Má vynikajúcu kombináciu dobrých mechanických vlastností a odolnosti voči korózii. Skladá sa z hliníku (8,3 – 9,7 hm.%), zinku (0,35 – 1 hm.%), mangánu (0,15 – 0,5 hm.%) a z horčíku, ktorý tvorí zbytok [10]. Táto zliatina sa používa v automobilovom priemysle a v poréznych implantátoch v medicíne.

Wei a kol. [11] ako jedny z prvých spravili pomerne rozsiahly výskum ohľadom procesných parametrov tejto zliatiny. Používali laser typu IPG YLR-200 ($\lambda=1.07\text{ }\mu\text{m}$) s výkonom 200 W pri argónovej atmosfére s malou koncentráciou H_2O a O_2 (50 ppm). Skenovacia stratégia sa skladala z obojsmerných stôp, pričom vrstva „n“ bola vždy v x-smere a vrstva „n+1“ sa natočila o 90° (v y-smere). Hrúbka vrstvy dosahovala 0,04 mm. Vo svojom výskume dokázali, že tvarovateľnosť priamo závisí na hustote energie, ktorá sa vypočíta už uvedeným vzťahom (rovnica 2.2). Energetická hustota rozdeľuje takzvanú procesnú mapu (obr. 2-4) na štyri zóny.

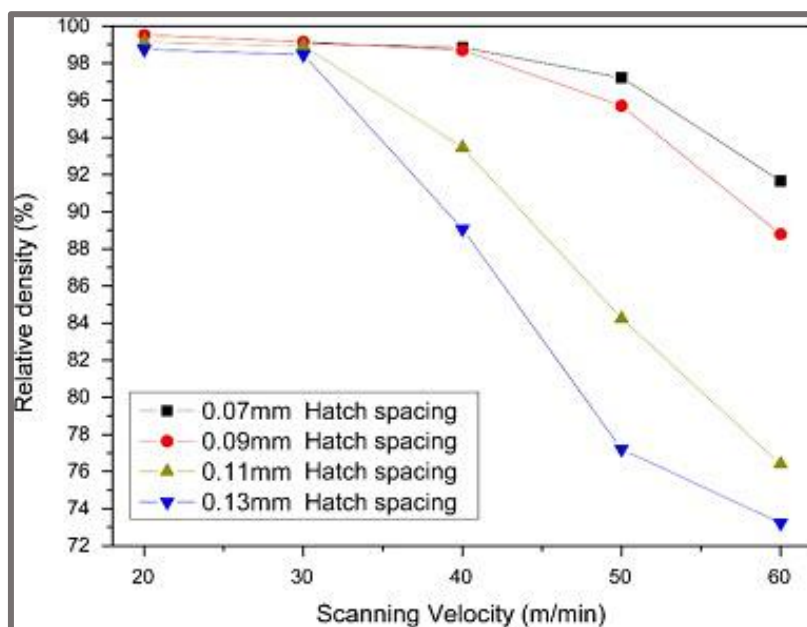


Obr. 2-4 Procesná mapa rozdelená podľa hustoty energie [11]

V oblasti A (obr. 2-4) vysoké hodnoty energetickej hustoty (nad 214 J/mm^3) zvyšovali teplotu v tavnom bazéniku natoľko, že dochádzalo k vyparovaniu prášku z dôvodu nízkeho bodu varu a vysokých tlakov pár horčíku. Odparený prášok prudko expandoval a vytváral spätný tlak na miesto tavby. To spôsobovalo porušenie tavného bazéniku a odľukovanie neroztaveného prášku. Celkovo bol proces neúspešný. V oblasti B pri energii v rozmedzí $83 - 167\text{ J/mm}^3$ dokázali vyrobiť vzorky bez viditeľnejších defektov. Pri hodnote $166,7\text{ J/mm}^3$ však stále dochádzalo k vyparovaniu prášku a teda k porušovaniu stopy a vločkovitým depozíciám (obr. 2-4 vľavo hore). V oblasti C ($66 - 77\text{ J/mm}^3$) vznikal balling efekt na povrchu. Gulovitité častice paralelné so smerom skenovania spolu s množstvom neroztaveného prášku spôsobovali zhoršený povrch (obr. 2-4 vpravo dole). V poslednej oblasti D, v ktorej

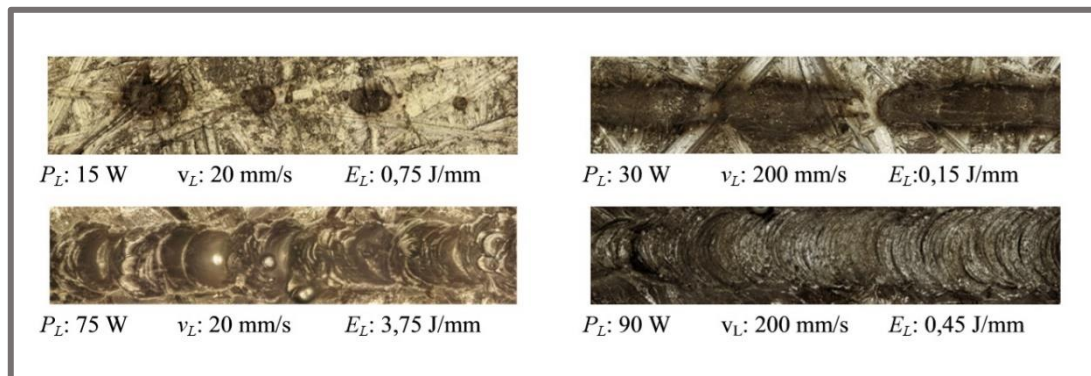
bola hustota energie menšia ako 58 J/mm^3 , sa v dôsledku neúplného tavenia väčšiny prášku dosiahli vzorky bez mechanickej pevnosti.

Wei a kol. [11] ďalej merali porozitu vzoriek. Pre každú vzorku boli po brúsení a leštení vykonané optické mikrofotografie pri 50-násobnom zväčšení. Obr. 2-5 ukazuje závislosť medzi relatívnou hustotou, skenovacou rýchlosťou a rôznymi vzdialenosťami stôp. Ako je zjavné z obrázku, relatívna hustota klesá pri zvyšujúcej sa rýchlosti skenovania pri všetkých vzdialenostiach stôp. To dokazuje, že relatívna hustota je závislá na privádzanej energii. Ak je pri procese relatívne vysoká energetická hustota dosiahnutá malou skenovacou rýchlosťou, prášok sa stihne úplne roztaviť a plyny vytvárané v tavnom bazéniku sa dokážu uvoľniť. Naopak, pri vysokých rýchlostiach skenovania sa prášok taví len čiastočne a plyn nestíha uniknúť. To vedie k zmenšeniu relatívnej hustoty vzorky. Vo svojej štúdii dokázali vyrobiť vzorku s relatívnou hustotou 99,52 % pri energetickej hustote rovnjej $166,7 \text{ J/mm}^3$ ($P = 200 \text{ W}$, $v = 333,33 \text{ mm/s}$, $s = 0,09 \text{ mm}$, $t = 0,04 \text{ mm}$).



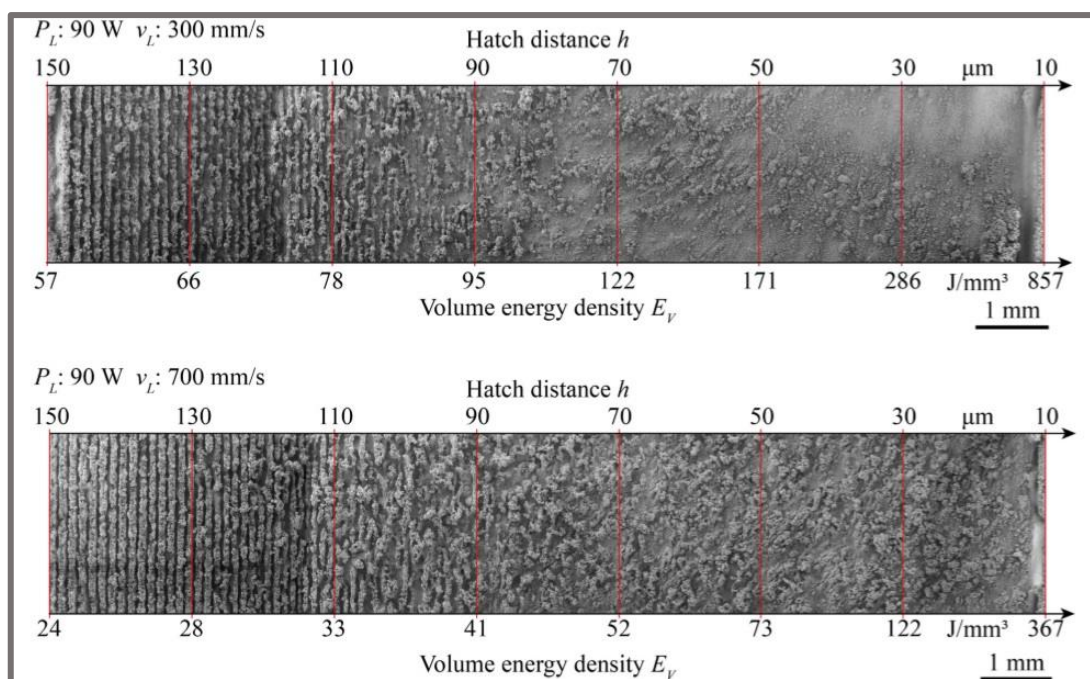
Obr. 2-5 Relatívna hustota v závislosti na procesných parametroch [11]

Schmid a kol. [12] uskutočnili o čosi odlišný výskum. Používali IPG vláknový laser (YLM-100). Zo začiatku používali argónovú atmosféru s 0,3% obsahom O_2 . Priemery častíc boli v rozsahu od $15 - 45 \mu\text{m}$ a stavebná doska bola zo zliatiny AZ31 s hrúbkou $1,5 \text{ mm}$. Na začiatok urobili skúšobné testy návarov len na stavebnej doske, ktorej absorpciu zvýšili zdrsnením povrchu. Výkon laseru s hodnotou 15 W bol nedostatočný pri všetkých skenovacích rýchlostiach. Pri výkone 30 W a rýchlosti nad 200 mm/s bola stopa laseru na niektorých miestach porušená. Pre vyššie hodnoty výkonu (75 a 90 W) a skenovacej rýchlosti 20 mm/s sa stopa nepravidelne vyformovala ako je zrejmé z nasledujúceho obrázku.



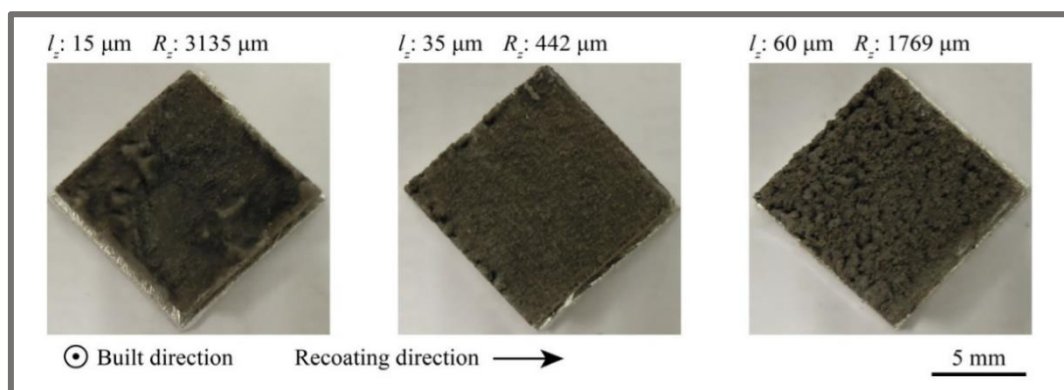
Obr. 2-6 Jednotlivé návary na stavebnej doske zo zliatiny AZ3 [12]

Aby zistili vplyv vzdialenosti stôp, rozhodli sa použiť maximálny výkon laseru (90 W) a rôzne rýchlosti skenovania. Vytvorili vzorku dlhú 14 mm, pričom ju rozdelili na sedem častí podľa vzdialenosti stôp (každá časť bola dlhá dva milimetre). Nepodarilo sa im dokázať výskyt štyroch oblastí, rozdelených podľa energetickej hustoty, ktoré sú opísané v rešeršnej časti tejto práce.



Obr. 2-7 Vplyv vzdialenosti stôp [12]

Na ďalší výskum zvolili tieto hodnoty: $P = 90 \text{ W}$, $v = 700 \text{ mm/s}$, $s = 35 \text{ }\mu\text{m}$, $t = 30 \text{ }\mu\text{m}$ ($E = 122 \text{ J/mm}^3$). Snažili sa o vytvorenie kocky s najlepším povrchom a tvrdosťou. Vybrané vzorky sú na obr. 2-8, pričom „ l_z “ je nami označované „ t “ a „ R_z “ sú hodnoty tvrdosti, ktoré však nie sú predmetom tejto práce, preto sa nimi nebudeme zaoberať. Všetky zvolené hrúbky vrstvy viedli k drsnému povrchu avšak vzorky s hrúbkou od 25 – 45 μm mali najhladší povrch. Z ich výskumu vyplynulo, že zmena hrúbky vrstvy v rozsahu od 15 – 45 μm nemá veľký vplyv na tvrdosť vzorku a percentuálny počet chybných vzoriek. V ďalšom výskume sa z dôvodu vysokej afinity horčíku s kyslíkom snažili určiť vplyv obsahu kyslíku v inertnej atmosfére. Zistili, že obsah kyslíku v nimi skúmanom rozmedzí 0,09 – 0,6 % nemá zásadný vplyv na výslednú hustotu a percentuálny počet chybných vzoriek.



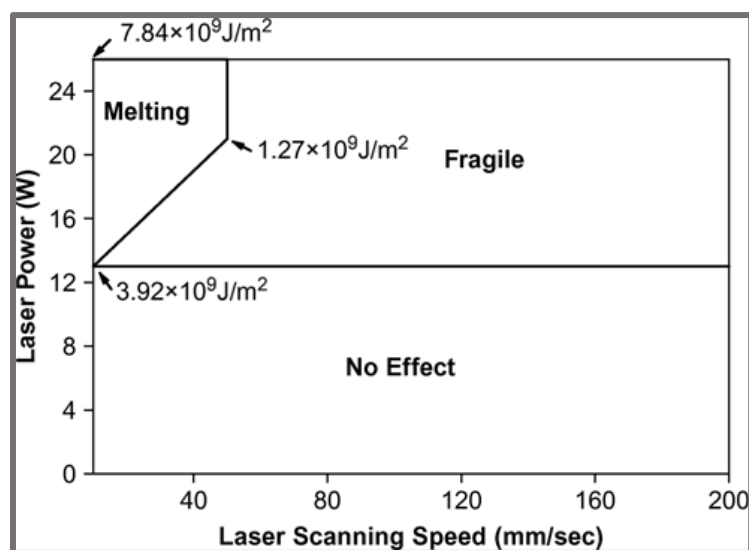
Obr. 2-8 Kvalita povrchu pri rôznych hrúbkach vrstiev [12]

2.4.2 Čistý horčík

2.4.2

Vo svojej elementárnej forme má horčík lesklý šedý kovový vzhľad a je mimoriadne reaktívny. V prírode sa vyskytuje v horninách ako karnalit, dolomit, magnezit, olivín a mastenec [13].

Prvé výskumy návarov (single trackov) čistého horčíku urobili Ng a kol. [14, 15]. Prášok ktorý použili bol tvorený z 98,44 at.% horčíkom (zvyšok O) a nanášali ho vo vrstvách s hrúbkou 0,5 mm. Veľkosť častíc boli v intervale od 10 do 45 μm . Inertná atmosféra bola tvorená argónom s prívodom 20 l/hod. Používali kontinuálny laser typu Nd:YAG s vlnovou dĺžkou 1.016 μm . Efekt procesných parametrov na vlastnosti a vzhľad návarov je znázornený na obr. 2-9.



Obr. 2-9 Procesná mapa [15]

Ng a kol. [16] vo svojom ďalšom výskume skúmali vplyv procesných parametrov na výsledné mechanické vlastnosti stôp. Dokázali, že so zvyšujúcou sa veľkosťou zrna klesá tvrdosť ako je zrejmé z tabuľky 2-1 (vzorky spracované pod kontinuálnym laserom).

Tab. 2-1 Vlastnosti vzoriek v závislosti na hustote energie (upravené z pôvodného zdroja) [16]

Hustota energie (J/mm ²)	1,27 · 10 ⁹	2,11 · 10 ⁹	3,92 · 10 ⁹	6,33 · 10 ⁹	7,84 · 10 ⁹
Veľkosť zrna (μm)	2,3	2,82	3,65	4,1	4,87
Tvrdosť (Gpa)	0,87	0,75	0,67	0,62	0,59
Youngov modul (Gpa)	32,76	27,99	26,22	24,09	20,84

Hu a kol. [17] používali prášok s obsahom horčíka rovným 99,81 %. Testy uskutočňovali s laserom typu Nd:YAG ($\lambda=1,06 \mu\text{m}$). Podkladová doska bola zo zliatiny AZ31. Prívod argónovej atmosféry bol nastavený na 100 l/min pričom obsah kyslíku sa udržiaval pod 0,2 %. Pri skenovaní sa každá vrstva natáčala vzhľadom k predchádzajúcej vrstve o 63,5° proti smeru hodinových ručičiek. Používali dva prášky, prvý s veľkosťou častíc rovnou 400 mesh (veľkosť častíc priemerne cca 37 μm) pri ktorom určili najvhodnejšie procesné parametre a druhý s veľkosťou častíc rovnou 250 mesh (veľkosť častíc priemerne cca 60 μm). Pri malej rýchlosti skenovania trvala stavba vzoriek príliš dlho. Naopak, pri príliš veľkej rýchlosti sa prášok odľakoval a reagoval s kyslíkom a vytváral čiernu hmlu. Použité parametre pri stavbe su zhrnuté na obr. 2-10. Najlepšie vzorka bola vyrobená pri rýchlosti 0,1 m/s, výkone 90 W, vzdialenosti stôp 0,1 mm, hrúbke vrstvy 0,03 mm. Vo svojom výskume zistili, že veľkosť častíc má zásadný vplyv na diely vyrobené pomocou SLM. Pri prášku s veľkosťou 250 mesh mali výsledné vzorky lepšiu topológiu, vyššiu relatívnu hustotu (96,13 %) a vyššiu tvrdosť, v porovnaní s práškom s veľkosťou častíc 400 mesh (hustota 95,28 %). Okrem toho sa pri hrubšom prášku odľakuje počas procesu menej častíc.

Scan speed (m/s)	Laser power (W)	Specimen quality
0.05	15	No mechanical strength
0.05	30	Not forming
0.05	45	Brittle and non-handleable
0.05	67.5	Not forming
0.075	45	Not forming
0.075	67.5	Brittle and non-handleable
0.1	30	Not forming
0.1	60	No mechanical strength
0.1	90	Integrate and handleable
0.1	125	Process stopped halfway due to much fog
0.1	150	Process stopped halfway due to much fog

Obr. 2-10 Rýchlosť skenovania a výkon laseru v závislosti na kvalite vzoriek [17]

2.4.3 Mg-9%Al

2.4.3

Zhang a kol. [18] použili dva prášky, zmiešané v hmotnostnom pomere 91:9 (Mg: Al). Priemerná veľkosť častíc Mg bola 42 μm a priemerná veľkosť častíc Al bola rovná 17 μm . Použili Nd:YAG laser s vlnovou dĺžkou 1064 nm. Proces prebiehal v argónovej atmosfére s obsahom kyslíka menším než 0,5 %. Hrúbku vrstvy zvolili rovnú 50 μm a vzdialenosť stôp 80 μm . Použitím rôznych procesných parametrov vyrobili 56 vzoriek pomocou ktorých dokázali vytvoriť procesnú mapu, znázornenú na obr. 2-11.

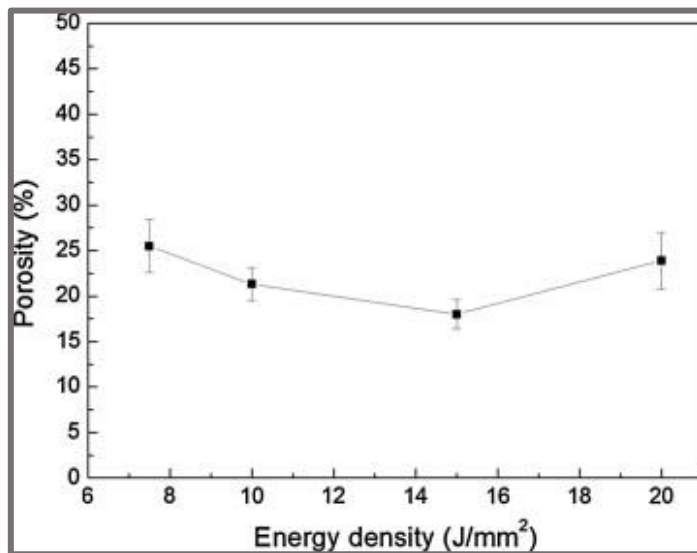
	10W	15W	20W	30W	60W	90W	110W
0.01 m/s	A	VII. Coarse		II. Much smoke appear and a little of metal remnant		I. Much powder was evaporated	
0.02 m/s	VI. Brittle	B					
0.04 m/s		D	C				
0.08 m/s	V. Loose						
0.16 m/s	IV. No mechanical streng th						
0.3 m/s							
0.5 m/s	III. A little of metal remnant						
1 m/s							

Obr. 2-11 Procesná mapa Mg-9%Al [2]

I, II - sú oblasti s veľkou vstupnou energiou. Hustota energie bola príliš veľká pre všetky rýchlosti skenovania. Počas experimentu sa veľká časť prášku odparila, zoxidovala a vytvorila MgO, čo znečistilo komoru. Výsledkom boli príliš tenké vrstvy s nepravidelným tvarom.

III, IV, V – sú oblasti s malou vstupnou energiou. Vzorky boli bez mechanickej pevnosti, keďže medzi časticami nevznikalo dostatočné spojenie.

A, B, C, D, VI, VII – sú formovacie zóny. V zóne VI boli výsledkom krehké vzorky. V oblasti VII dochádzalo k balling efektu. Najvhodnejšie vzorky (A, B, C, D) vyrobené pri hustote energie rovnkej 20 J/mm^2 , 15 J/mm^2 , 10 J/mm^2 , $7,5 \text{ J/mm}^2$ boli podrobené ďalšiemu skúmaniu.



Obr. 2-12 Závislosť porozity vzorku na energetickej hustote [18]

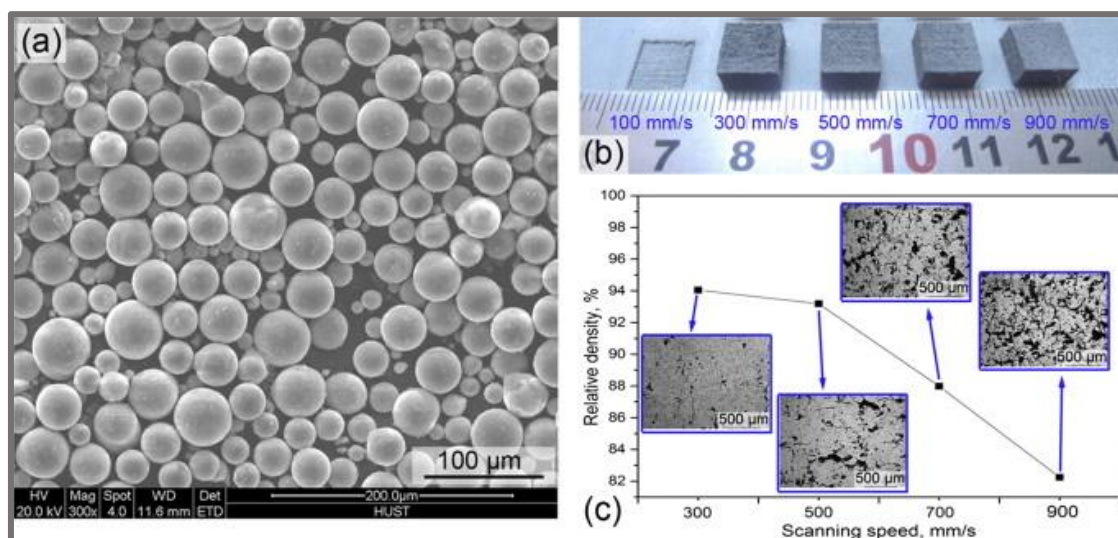
Ako je zrejmé z obr. 2-12, najmenšia porozita bola dosiahnutá pri vzorku B, a to 18 % (15 W , $0,02 \text{ m/s}$). Nízka porozita sa dá teda dosiahnuť pri relatívne vysokej energetickej hustote. Porozita však narastá, ak je vstupná energia príliš vysoká. Je to z dôvodu nízkeho bodu varu a nízkej miery absorpcie energie laseru Mg-Al prášku.

2.4.4 ZK60

Táto zliatina sa skladá zo Zinku (4,8 – 6,2 wt%), Zirkónia (min. 0,45 wt%) a Horčíku, ktorý tvorí zvyšok. Hustota je v okolí $1,83 \text{ g/cm}^3$ [19].

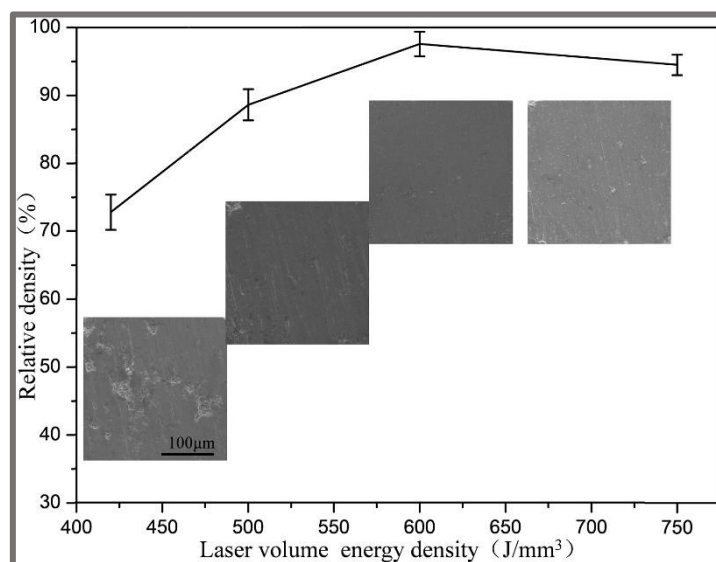
Wei a kol. [20] použili prášok s priemernou veľkosťou častíc rovnou $30 \mu\text{m}$ (obr. 2-13). Vytvorili niekoľko vzoriek o veľkosti $8 \times 8 \times 4 \text{ mm}^3$ pri rôznych rýchlostiach skenovania. Výkon laseru, ktorý zvolili bol 200 W , veľkosť laserovej stopy (*spot size*) $150 \mu\text{m}$. Hrúbka vrstvy bola $20 \mu\text{m}$ a vzdialenosť stôp $80 \mu\text{m}$. Stavba prebiehala v argónovej atmosfére. Obr. 2-3 znázorňuje jednotlivé vzorky a ich porozitu. Keďže veľkosť teploty tavného bazénika vzrastala s klesajúcou rýchlosťou skenovania, pri rýchlosti s veľkosťou 100 mm/s dochádzalo k masívnemu vyparovaniu prášku, takže prášok vyhorel. Výsledkom bola vypálená diera na podkladovej doske. Pri rýchlosti rovnkej 300 mm/s vyparovanie nebolo tak výrazné a výsledkom bola vzorka bez zrejmých makro-defektov. Stabilita tavného bazénika však bola narušená spätným tlakom z vypareného prášku, čo sa prejavilo v relatívnej hustote o veľkosti 94,05 %

a zhoršenom povrchu dielu. Následné zvýšenie rýchlosti skenovania zlepšilo povrch dielu ale porozita naopak stúpala, vďaka neúplnému roztaveniu častíc.



Obr. 2-13 Mikrofotografia prášku, jednotlivé vzorky a závislosť rýchlosti skenovania na porozite [20]

Shuai a kol. [21] taktiež skúmali zliatinu ZK60. Používali výkon laseru s hodnotou 50 W, veľkosť stopy (*spot size*) rovnú 150 µm. Vzďialenosť stôp a hrúbka vrstvy boli nastavené na 0,1 mm. Vytvorili niekoľko vzoriek o veľkosti 6×6×6 mm³. Jednotlivé veľkosti energetických hustôt s mikrofotografiami ich prierezu v závislosti na ich porozite sú znázornené na obr. 2-14.



Obr. 2-14 Závislosť porozity vzorku na energetickej hustote [21]

Rýchlosti skenovania jednotlivých vzoriek boli 700 mm/min, 600 mm/min, 500 mm/min and 400 mm/min. Hustoty energie odpovedajúce týmto rýchlostiam (vypočítané zo vzťahu 2.2) boli 420 J/mm³, 500 J/mm³, 600 J/mm³, 750 J/mm³ (v

uvedenom poradí). Pri najmenej hustote energie bola relatívna hustota rovná 72,8 % a vzorka mala na svojom povrchu póry. Vzorky spracované pri vyššej energetickej hustote mali tieto póry zmenšené. Najlepšia relatívna hustota bola dosiahnutá pri energetickej hustote rovnej 600 J/mm^3 s hodnotou 97,4 %. Zvýšenie hodnoty hustoty energie (750 J/mm^3) viedlo k trhlinám na povrchu. Tie znížili relatívnu hustotu na 94,5 %.

2.4.5 Mg-Mn zliatina

Yang a kol. [22] na počiatku svojho výskumu vyrobili sériu zliatin Mg-Mn, pričom obsah Mn sa pohyboval v hodnote 0 – 3 wt%. Ich výskum bol primárne zameraný na testovanie korozivzdornosti pre použitie v implantátoch v ľudskom tele. Uvádzajú, že najoptimálnejšie parametre na stavbu vzoriek boli nasledujúce: výkon laseru rovný 70 W, rýchlosť skenovania s hodnotou 700 mm/min (11,7 mm/s), hrúbka vrstvy 100 μm , pričom sa im podarilo postaviť vzorky s veľkosťou $4 \times 4 \times 2 \text{ mm}$. Pridanie Mn malo pozitívny dopad na mikroštruktúru, mechanické vlastnosti a korozivzdornosť. V závere uvádzajú, že najväčší potenciál pre kostné implantáty má zliatiny Mg-2Mn.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3

Medzi najdôležitejšie parametre, ktoré môžeme pri procese SLM meniť, patrí výkon laseru, skenovacia rýchlosť, hrúbka vrstvy a vzdialenosť jednotlivých stôp. Kombinácia týchto parametrov sa dá premietnuť do jednej veličiny, a to energetickej hustoty, ktorá určuje množstvo energie privádzané do miesta tavby. Každý materiál vyžaduje rozdielnu voľbu vhodných procesných parametrov. Ich kombinácia vo výraznej miere ovplyvňuje mikroštruktúru, kvalitu povrchu a porozitu vzorku. Podľa rešerše sa dá konštatovať, že horčík potrebuje ku svojmu spracovaniu relatívne vysokú hustotu energie. Príliš veľké hodnoty energetickej hustoty však spôsobujú odparovanie prášku, čo v porovnaní s inými materiálmi nie je až tak bežné. Pri definovaní vyhovujúcich parametrov materiálu je možné vychádzať z materiálov s podobným chemickým zložením. Práve to bola úloha rešeršnej časti tejto práce, z ktorej najvhodnejšie parametre (vzhľadom k porozite) jednotlivých výskumov sú prehľadne zhrnuté v tabuľke 3-1. Výskum Mg [14, 15] zahŕňal len single tracky, preto má jeho energetická hustota jednotku v J/mm². U niektorých článkov údaj porozity chýba, keďže sa jej autori nevenovali a preto nie je v tabuľke uvedený.

Tab. 3-1 Procesné parametre vzoriek s najmenšou porozitou

Prášok	Výkon laseru (W)	Hrúbka vrstvy (μm)	Vzdialenosť stôp (μm)	Rýchlosť skenovania (mm/s)	Energetická hustota	Výsledná relatívna hustota (%)
AZ91D [11]	200	40	90	333,33	166,7 J/mm ³	99,52
AZ91D [12]	90	30	35	700	122 J/mm ³	-
Mg [14, 15]	13-26	500	-	0-50	1,27-7,84·10 ⁹ J/mm ²	-
Mg [17]	90	30	100	100	300 J/mm ³	96,1
Mg-9%Al [18]	15	50	80	20	187,5 J/mm ³	82
ZK60 [19]	200	20	80	300	416,6 J/mm ³	94,05
ZK60 [21]	50	100	100	8,33	600 J/mm ³	97,4
Mg-Mn [22]	70	100	50	11,7	1196 J/mm ³	-

Analýzou teoretickej časti tejto práce teda získavame približný prehľad použiteľných parametrov pre materiály na báze horčíku. Vzdialenosť stôp sa javí byť najvhodnejšia v rozmedzí 80-100 μm. Použité výkony laseru, hrúbka vrstvy ako aj skenovacie rýchlosti majú v jednotlivých článkoch veľký rozptyl. Hodnota energetickej hustoty taktiež kolíše. Dá sa ale konštatovať, že pri výskume AZ91D [11] boli postavené vzorky s najmenšou porozitou. Formačná oblasť pri tomto experimente bola určená v rozmedzí 83 – 167 J/mm³.

Cieľ práce

Hlavným cieľom tejto práce je objasniť vplyv jednotlivých procesných parametrov pri spracovaní horčíkových zliatin technológiou Selective Laser Melting na výslednú porozitu materiálu.

Čiastkové ciele

- Definovanie hlavných procesných parametrov
- Návrh a realizácia experimentu
- Analýza získaných výstupov a ich porovnanie

4 MATERIÁL A METÓDY

4

4.1 Vybraný materiál

4.1

Horčíková zliatina WE43

Táto vysokopevnostná horčíková zliatina ponúka dobré mechanické vlastnosti pri bežných ale aj pri zvýšených teplotách (do 300°C). WE43 má vysokú odolnosť voči korózii. Je taktiež vynikajúcim inžinierskym riešením v aplikáciách, kde sa vyžaduje zníženie hmotnosti bez zníženia výkonu [23]. Podľa znalostí autora na nej nebol publikovaný žiaden výskum. Táto zliatina bola skúmaná aj vďaka grantu: 2017-2019, MPO FV20232 - Biodegradovateľné štruktúrované implantáty vyrobené metódou 3D tisku kovů.

Podkladová doska

Platforma bola vyrobená zo zliatiny AZ91 s rozmermi 98 × 98 × 30 mm. Pred experimentom bola plocha dosky opieskovaná.

4.2 Použité zariadenie

4.2

Experimenty prebiehali na zariadení SLM 280^{HL} od firmy SLM Solution GmbH. Toto zariadenie ponúka veľa možností pre optimalizáciu výrobných procesov a taktiež široké spektrum nastaviteľných parametrov procesu pre realizáciu vývoja materiálov. Stroj umožňuje výrobu jednotlivých kovových komponentov na základe údajov CAD pre sériovú výrobu, ale aj jednorázovú výrobu s individuálnymi parametrami [24]. V nasledujúcej tabuľke sú zhrnuté najdôležitejšie parametre tohto zariadenia.

Tab. 4-1 Parametre SLM 280^{HL} [24]

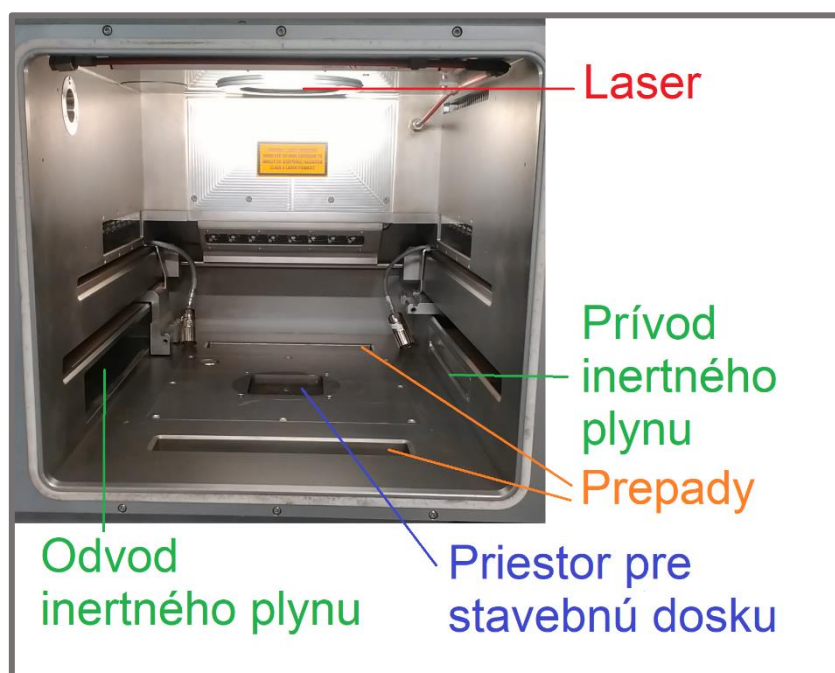
Objem stavebného priestoru	280 x 280 x 350 mm ³
Laser	YLR-Faser-Laser 400 W
Priemer laserového lúča	82 μm
Maximálna skenovacia rýchlosť	15 m/s
Hrúbka vrstvy	20-75 μm
Spotreba inertného plynu	Ar/N ₂ , 2,5–3,0 l/min
Hmotnosť zariadenia	1000 kg
Rozmery zariadenia	(D x V x Š) 1800 x 1900 x 1000 mm
Elektrická prípojka a spotreba	400 V 3NPE, 32A, 50-60 Hz, 8kW/h

Časti zariadenia sú popísané na obr. 4-1. Najdôležitejšia časť zariadenia, stavebná komora, je miesto kde prebieha samotný proces. Na jej spodku je umiestnená stavebná doska. Na krajoch stavebného priestoru sa nachádzajú prepady, ktoré slúžia na odvádzanie prebytočného prášku. Prepadnutý prášok sa môže znova použiť. V hornej časti komory sa nachádza laser a tiež kamera, pomocou ktorej sa dá stavba kontrolovať. Táto kamera taktiež kontroluje, či je na podkladovej vrstve nanosená dostatočná vrstva prášku. Ochranná atmosféra (Ar alebo N₂) prúdi ponad platformu a odvádza spaliny, ktoré vznikajú pri tavení prášku. Prášok je nanášaný pomocou zariadenia nazývaného *recoater*. Toto zariadenie obsahuje zásobník prášku, do ktorého sa prášok prisypuje z hornej strany. Ďalej obsahuje dve drážkované hriadele,

ktoré zabezpečujú prívod prášku na stierku, ktorá zodpovedá za rovnomerné naniesenie vrstvy. Nanášacie zariadenie obsahuje senzory, ktoré monitorujú množstvo prášku v zásobníku. Senzory kyslíku sú v komore dva, pričom jeden je umiestnený v hornej a jeden v dolnej časti stavebnej komory.



Obr. 4-1 Fotografia SLM 280^{HL} s popisom hlavných častí stroja



Obr. 4-2 Stavebná komora (s vyňatým nanášacím zariadením) s popisom hlavných častí

4.3 Návrh experimentu

Návrh experimentu vychádzal z rešerše tejto práce a z prvotného testu zliatiny WE43, ktorý je opísaný v nasledujúcej podkapitole.

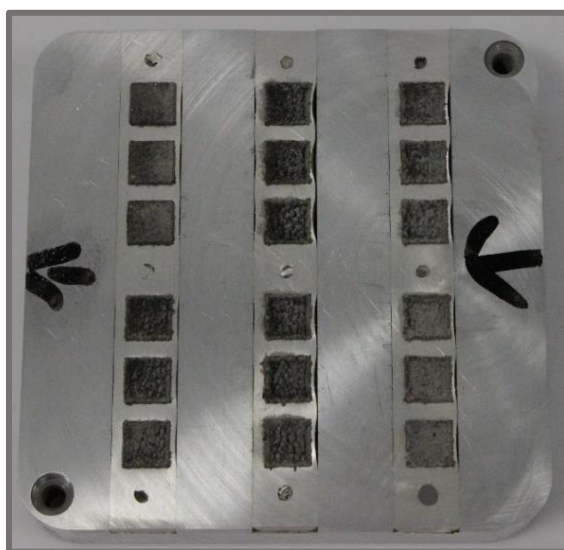
4.3.1 Predbežný test

Tento pokus bol vykonaný Ing. Jánom Suchým na Ústave Konstruování FSI v Brne na zliatine WE43. Nie je uvedený v rešeršnej časti tejto práce, pretože bol iba orientačný a nebol z neho vytvorený žiaden článok. Rozloženie kociek z tohto testu s procesnými parametrami je vizualizované na ďalšom obrázku.

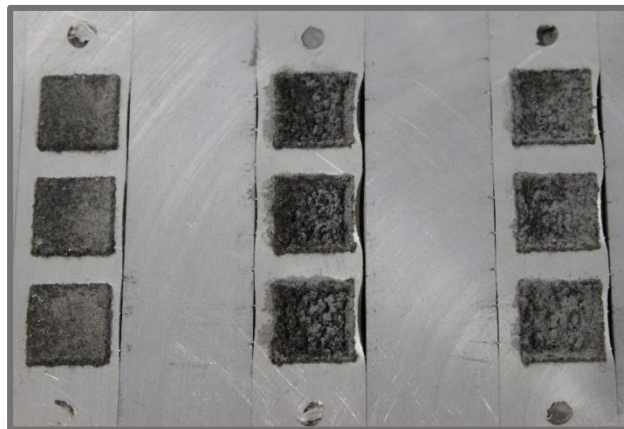
	TSD1 Lp = 275 W Ls = 650 mm/s Hd = 80 μm E = 105,8 J/mm ³	TSD3 Lp = 350 W Ls = 1000 mm/s Hd = 80 μm E = 87,5 J/mm ³	TSD5 Lp = 275 W Ls = 800 mm/s Hd = 80 μm E = 85,9 J/mm ³
	TSD2 Lp = 275 W Ls = 650 mm/s Hd = 110 μm E = 76,9 J/mm ³	TSD4 Lp = 350 W Ls = 1000 mm/s Hd = 110 μm E = 63,6 J/mm ³	TSD6 Lp = 275 W Ls = 800 mm/s Hd = 110 μm E = 62,5 J/mm ³

Obr. 4-3 Rozloženie vzoriek s procesnými parametrami

Celkovo bolo použitých šesť kombinácií procesných parametrov, pričom na každú kombináciu pripadali tri kocky. Pri teste boli použité pomerne vysoké skenovacie rýchlosti. Hrúbka vrstvy bola nastavená na 50 μm. Fotografie stavebnej dosky po teste sú na nasledujúcich obrázkoch.



Obr. 4-4 Fotografia dosky po stavbe



Obr. 4-5 Detail hornej polovice stavebnej dosky

Jediné objemové vzorky, ktoré sa podarilo postaviť boli z oblasti 1. Vzorky v hornej polovici dosky, teda tie s vzdialenosťou stôp rovnou $80\text{ }\mu\text{m}$, boli po vizuálnej stránke lepšie, ako vzorky z dolnej polovice, kde táto vzdialenosť bola $110\text{ }\mu\text{m}$. Vzorky v strede (3, 4), s výkonom laseru rovným 350 W , evidentne javili známky prepálenia. Tieto vzorky mali čiernu farbu a tepelne ovplyvnili pásy na doske, ktoré sa mierne zmrštili. K trochu menej výraznému prehnutiu došlo aj pri vzorkách na pravom kraji (5, 6).

4.3.2 Návrh hlavného testu

Samotný návrh hlavného testu tejto práce prebiehal nasledovne. Bola zvolená veľkosť kociek $8 \times 8 \times 8\text{ mm}$. Tento rozmer vzoriek je pre metalografický výbrus a určenie porozity dostatočný. Vybraný počet vzoriek bol 18. Každá kocka sa natočila okolo svojej osy o 20° za účelom zníženia nábehovej hrany pri nanášaní prášku. Volená hrúbka vrstvy s hodnotou $50\text{ }\mu\text{m}$ je v SLM štandard. Vzdialenosť stôp sa javí byť podľa tab. 3-1 najlepšia v intervale $80 - 90\text{ }\mu\text{m}$. Opisovaný predbežný test zliatiny WE43 to len potvrdzuje. Vzdialenosti testu tejto práce boli volené v tomto intervale. S ohľadom na rentabilitu procesu je zvolenie čo najvyššej skenovacej rýchlosti pri procese SLM žiadúce. To ale znamená väčšie výkony laseru. Z tab. 3-1 vyplýva, že Wei a kol. [11] použili najväčší výkon laseru (200 W) spomedzi ostatných výskumov. Pri opisovanom teste zliatiny WE43 bola postavená vzorka s výkonom 275 W . V návrhu testu tejto práce bol teda výkon laseru stanovený medzi týmito dvoma hodnotami ($200 - 275\text{ W}$). Skenovacia rýchlosť bola po takto zvolených parametroch určená s ohľadom na výslednú energetickú hustotu. Interval energetických hustôt v teste bol vybraný v hodnotách od $90,91$ po $137,5\text{ J/mm}^3$. Vzorky, pri ktorých je energetická hustota vyššia, majú tendenciu znečisťovať stavebný priestor výraznejšie, než vzorky s nižšou použitou energiou. Práve preto boli pri teste kocky s vyššou hustotou energie umiestnené v ľavej časti dosky. Inertná atmosféra v komore prúdi z pravej strany smerom k ľavej strane komory. Vzájomnému znečisteniu medzi vzorkami sa dá takýmto spôsobom čiastočne zabrániť.

Tab. 4-2 Parametre jednotlivých vzoriek a ich hustota energie

Jednotky v J/mm³

Vzdialenosť stôp 80 µm					
Výkon laseru [W]	Skenovacia rýchlosť [mm/s]				
		450	500	550	600
	225	125	112,5	102,27	
	250		125	113,64	104,17
	275		137,5	125	114,58
Vzdialenosť stôp 90 µm					
Výkon laseru [W]	Skenovacia rýchlosť [mm/s]				
		450	500	550	600
	225	111,11	100	90,91	
	250		111,11	101,01	92,59
	275		122,22	111,11	101,85

4.4 Príprava experimentu

4.4

Tvorba dát

Príprava súboru pre zariadenie prebiehala v programe Materialise Magics. Tento softvér umožňuje import dát vo formáte *.stl. Ponúka taktiež možnosť generovania elementárnych telies. Takýmto spôsobom boli vytvorené kocky s nami-definovanou veľkosťou. Vzorky boli rozmiestnené na platforme podľa návrhu experimentu. Pre každú jednu boli procesné parametre nastavené individuálne. Skenovacia stratégia bola nastavená na šrafovanie bez natáčania jednotlivých vrstiev. Nakoniec boli dáta vyexportované vo formáte *.slm, ktorý je zariadením SLM 280^{HL} podporovaný.

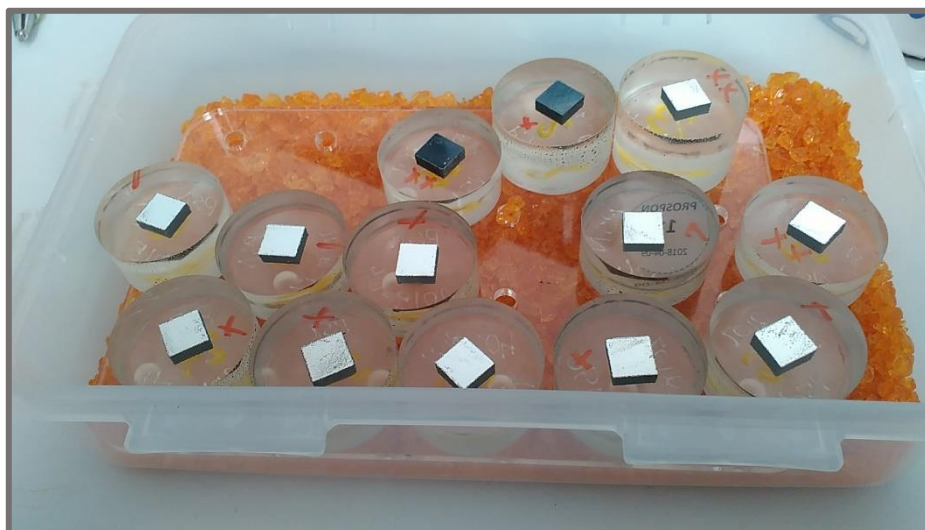
Príprava zariadenia

Kompletné vyčistenie najhlavnejších častí stroja, ktoré prichádzajú do kontaktu s práškom počas procesu, je veľmi dôležitý krok. Toto zariadenie je na VUT FSI veľmi vyťažené a každodenne na ňom prebiehajú stavby s práškami s rôznym chemickým zložením. Častice práškov z predchádzajúcich procesov môžu spôsobovať kontamináciu, čo by mohlo mať vplyv na samotný proces. Pred každou stavbou je teda nutné čiastočne rozobrať stavebnú komoru, nanášacie zariadenie a všetky trúbky, ktoré prichádzajú do kontaktu s práškom. Čistenie sa vykonáva pomocou izopropylalkoholu (IPA). Je to relatívne netoxické rozpúšťadlo, ktoré sa rýchlo odparuje. Sklo laseru sa čistí pomocou špeciálneho prípravku na čistenie optiky. Platformu sa následne musí zarovnať na úroveň redukčného rámčeka. Jedným z posledných úkonov v komore, je nastavovanie stierky na nanášacom zariadení. Pred začatím stavby je nutné zapnúť prívod inertnej atmosféry. Obsah kyslíku by sa mal znížiť na ideálne čo najnižšiu hodnotu. Prvá vrstva musí zaplniť celú plochu platformy. Jej nanášanie vykonáva užívateľ, pričom jej kontrola prebieha vizuálne pomocou kamery v stavebnej komore. Pri samotnom procese je prvotná vrstva skenovaná dvakrát, pre lepšie spojenie s platformou.

4.5 Hodnotenie experimentu

Použitý mikroskop

Jednotlivé vzorky boli brúsené a leštené. Vyhodnocované boli pomocou mikroskopu Zeiss-UltraPlus.



Obr. 4-6 Vybrúsené a vyleštené vzorky zaliate v akrylátovej hmote

Určovanie porozity metódou výbrusov

Porozita bola u všetkých vzoriek určovaná freewarom na spracovanie obrazu s názvom ImageJ. Z jednotlivých osembitových fotografií metalografických výbrusov sa pomocou prahovacej funkcie (s automatickým nastavením) určila pórovitosť. Táto metóda je ekonomicky a časovo nenáročná. Je však skôr orientačná, pretože vo výraznej miere závisí na výbere oblasti. Pri vyhodnocovaní experimentov sa používa často pri prvotných experimentoch.

Určovanie porozita pomocou μ CT

Najpresnejšia a nedeštruktívna metóda na určovanie porozity je metóda počítačovej tomografie. Využíva röntgenové žiarenie, vďaka čomu je možné vytvoriť 3D modely vzoriek. Najväčšou nevýhodou je však vysoká cena. Táto metóda je taktiež časovo nákladná. Z tohto dôvodu boli týmto spôsobom analyzované len tri vzorky. Použitý softvér na analýzu bol myVGL (volume graphics).

5. VÝSLEDKY

5

5.1

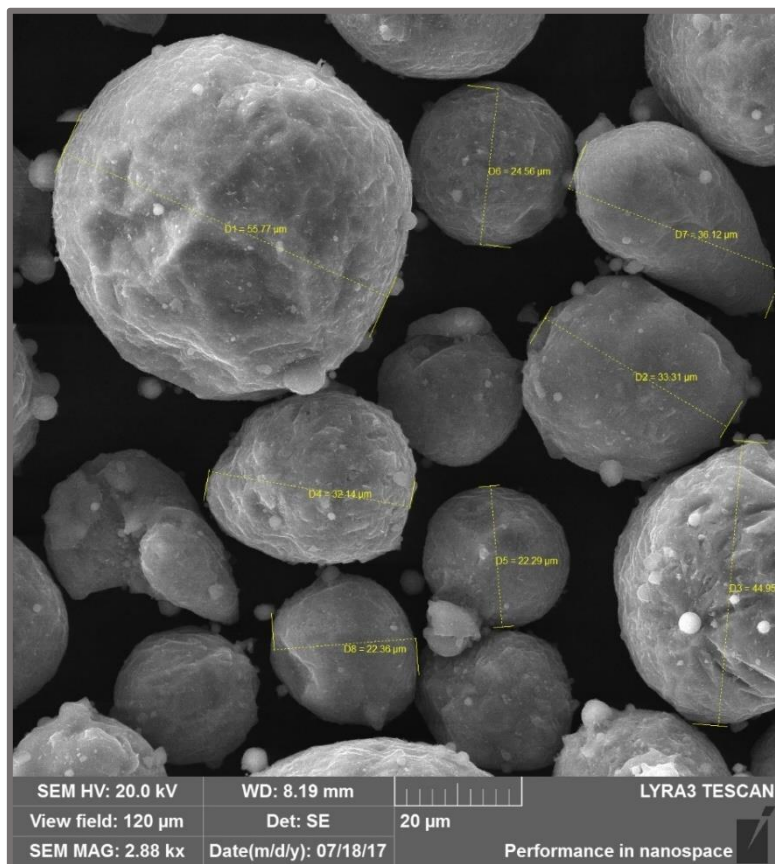
5.1 Analýza prášku

Morfológia a veľkosť častíc má veľký vplyv na SLM proces. Analýza prášku odhalila chemické zloženie, morfológiu a veľkosti častíc. Prášok je tvorený hlavne Yttriom (3,96 %), Neodýmiom (2,3 %), Zirkóniom (0,56 %) a Horčíkom, ktorý tvorí zvyšok. Celkové chemické zloženie je v priloženom laboratórnom protokole. Toto zloženie odpovedá zloženiu zliatiny WE43, z voľne dostupného zdroja [25], ktoré je zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 5-1 Zloženie zliatiny WE43 [25]

Chem. prvok	Mg	Y	Nd	Zr	Li	Zn	Mn	Cu	Ni	Si
Obsah (%)	92	3,7-4,3	2,4-4,4	0,4-1,0	≤0,2	≤0,2	≤0,15	≤0,03	≤0,005	≤0,01

90 % častíc by podľa analýzy malo byť menších než 57,9 μm . Prášok taktiež obsahuje dostatočné množstvo malých častíc, ktoré sú zodpovedné za vyplňovanie priestoru medzi väčšími časticami, čím sa tavená vrstva stáva kontinuálnejšia. Ďalší test sa zaoberal kontrolou kruhovitosti častíc prášku. Morfológia častíc bola pozorovaná pomocou SEM. Ako je zrejmé z nasledujúceho obrázku, častice majú dostatočne sférický tvar.



Obr. 5-1 Fotografia SEM

5.2 Experiment

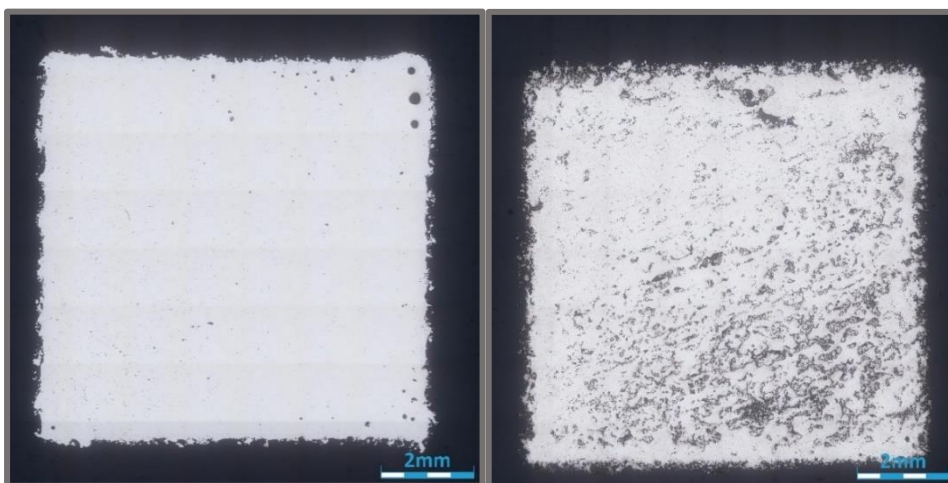
Priebeh samotného hlavného testu tejto práce bol od začiatku atypický. Proces bol sprevádzaný silným znečisťovaním komory. Najpravdepodobnejšie sú dve verzie pôvodu tohto znečistenia. Buď sa jednalo o vaporizovaný prášok alebo o prášok priamo odľudovaný z okolia miesta tavby. Vzorky na ľavej strane stavebnej dosky, vďaka väčšej použitej energetickej hustote, javili výraznejšia známky znečisťovania. Dym ktorý sa nestihol odsasť, sa odrážal od ľavej strany a prenikal do celého objemu komory. To pravdepodobne spôsobovalo rozostrovanie laseru čo mohlo mať za následok zníženie privádzanej energie do tavného bazénika. Za zmienku stojí aj fakt, že k najväčšiemu prívalu znečistenia a k miernemu zvukovému efektu dochádzalo vždy pri začiatku skenovania jednotlivých vzoriek. Vysokú reaktivitu horčiku bolo možné pozorovať voľným okom. Aj keď obidva senzory vykazovali nulové hodnoty kyslíku, malé iskry bolo možné sledovať až vo výške piatich centimetrov nad platformou.

Za povšimnutie stojí zvláštny fenomén, ktorý bol viditeľný vďaka chybe, ktorá počas experimentu nastala. Pri neotvorení pumpy po výmene argónovej fľaše došlo k postupnému narastaniu obsahu kyslíka. Prekvapivo sa však proces výrazne ustabilizoval. Tavenie prebiehalo bez viditeľného znečisťovania. Hodnota kyslíka dosahovala 0,6 – 0,8 %. Pri hodnote väčšej než 0,8 % však už bola nad jednotlivými vzorkami viditeľná plazma. Toto horenie bolo pochopiteľne tým výraznejšie, čím bol obsah kyslíku vyšší. Kyslík dosiahol hodnotu 1,5 %, čo spôsobilo vyhorenie celej jednej vrstvy. Po následnom klesaní sa proces opäť ustabilizoval pri hodnote kyslíka v už spomínanom intervale. Keď kyslík poklesol približne pod hodnotu 0,6 %, znečisťovanie znova pokračovalo.

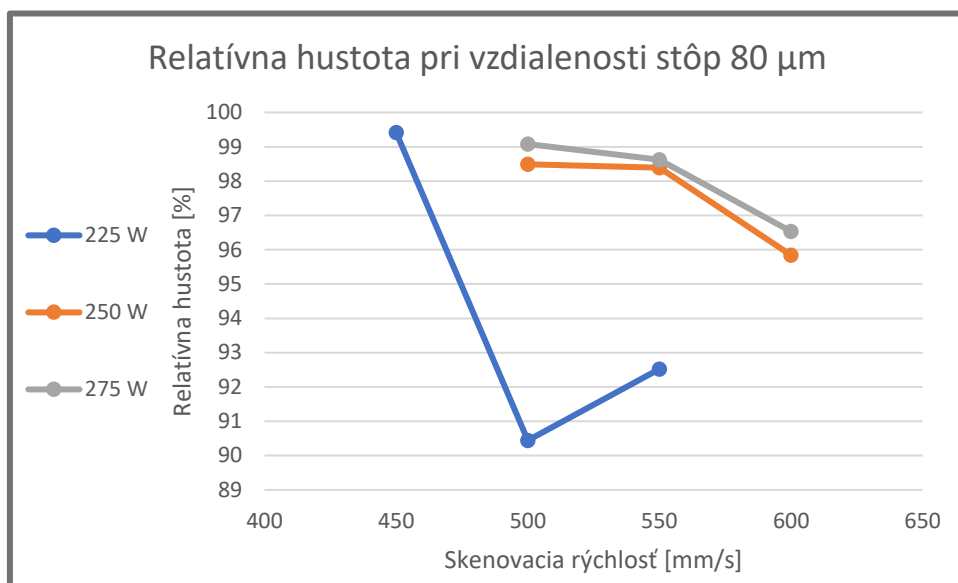
5.3 Relatívna hustota vzoriek

5.3.1 Relatívna hustota zhodnotená metódou výbrusov

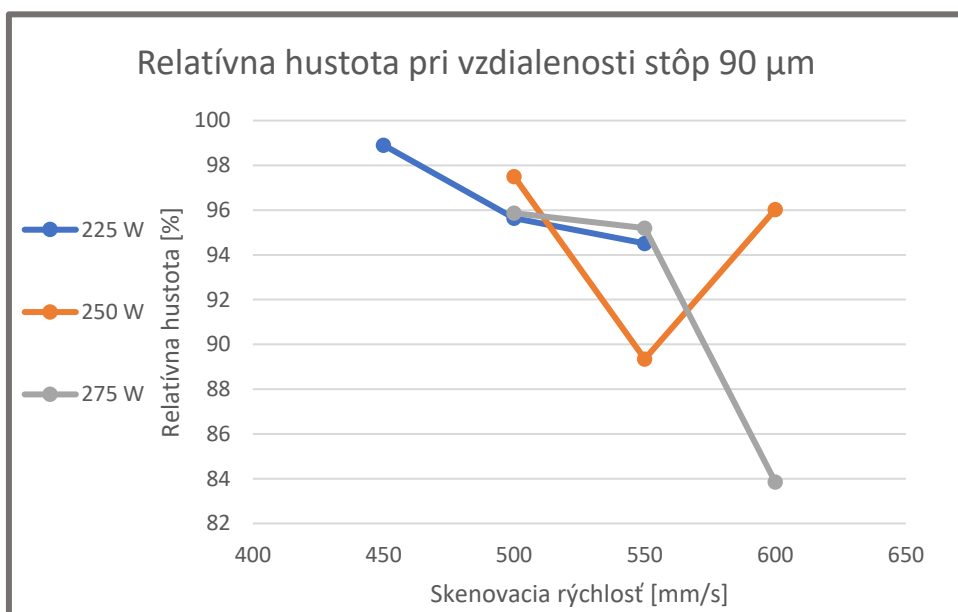
Z fotografií výbrusov bola vytvorená procesná mapa, ktorá je uvedená v prílohách. Po vyhodnotení porozity kociek bolo možné vytvoriť závislosti relatívnej hustoty na skenovacej rýchlosti pre rôzne výkony laseru. Pre každú vzdialenosť stôp bol vytvorený samostatný graf.



Obr. 5-4 Metalografický výbrus vzorky s najvyššou relatívnou hustotou 99,4 % (vľavo) a vzorky s najnižšou relatívnou hustotou 83,85 % (vpravo)



Obr. 5-5 Závislosť relatívnej hustoty na skenovacej rýchlosti pri rôznych výkonoch laseru pri vzdialenosti stôp rovnej 80 µm



Obr. 5-6 Závislosť relatívnej hustoty na skenovacej rýchlosti pri rôznych výkonoch laseru pri vzdialenosti stôp rovnej 90 µm

Tab. 5-2 Tabuľka relatívnej hustoty pre vzdialenosť stôp 80 µm

Vzdialenosť stôp 80 µm				
Relatívna hustota [%]	Skenovacia rýchlosť [mm/s]			
Výkon laseru [W]	450	500	550	600
225	99,416	90,443	92,518	
250		98,489	98,386	95,841
275		99,078	98,622	96,533

Tab. 5-3 Tabuľka relatívnej hustoty pre vzdialenosť stôp 90 μm

Vzdialenosť stôp 90 μm				
Relatívna hustota [%]	Skenovacia rýchlosť [mm/s]			
Výkon laseru [W]	450	500	550	600
225	98,905	95,64	94,513	
250		97,5	89,346	96,03
275		95,865	95,199	83,85

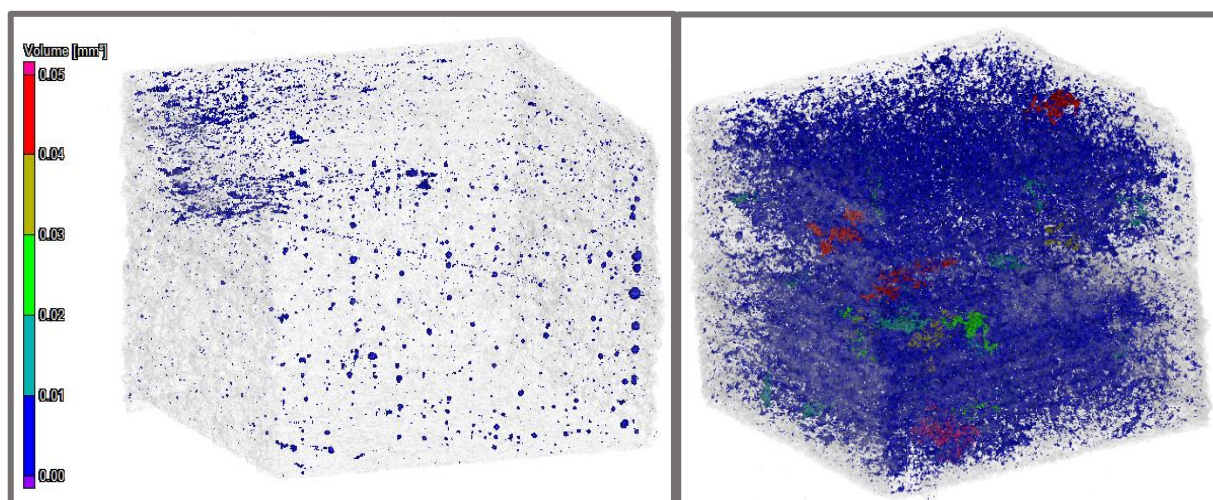
Meranie porozity metódou metalografického výbrusu vychádza z určitého rezu vzorky. Porozita sa však môže v jednotlivých vrstvách líšiť. Pri výbruse a samotnom určovaní porozity softvérom môže taktiež dôjsť k chybe, ktorá ovplyvňuje hodnotu relatívnej hustoty. Z uvedených závislostí je jasne viditeľný pokles relatívnej hustoty pri zvyšujúcej sa skenovacej rýchlosti. Veľkosti pórov vzoriek nie je možné určiť, keďže tvar pórov nie je kruhovitý. Pri bližšom skúmaní výbrusov (viz. prílohy) si je možné všimnúť, že porozita u niektorých vzoriek kopíruje stopy laseru pri skenovaní.

5.3.2 Relatívna hustota zmeraná pomocou μCT

Tri vzorky, určené pre zmeranie porozity touto metódou, boli vyberané pre určenie rozloženia pórov vo vzorkách a overenie výsledkov metódy výbrusov. Bola vybraná vzorka s jednou z najnižších porozít, vzorka s najvyššou zmeranou porozitou a vzorka, ktorá sa pohybovala medzi týmito hodnotami. Výsledky a porovnanie relatívnych hustôt zmeraných metódami výbrusov a μCT , sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 5-3 Tabuľka relatívnej hustoty pre vzdialenosť stôp 90 μm

Výkon laseru [W]	Skenovacia rýchlosť [mm/s]	Vzdialenosť stôp [μm]	Energetická hustota [J/mm^3]	Relatívna hustota metódou výbrusov [%]	Relatívna hustota metódou μCT [%]
250	550	80	113,64	98,386	99,56
225	450	90	111,11	98,905	99,95
275	600	90	101,85	83,85	98,54

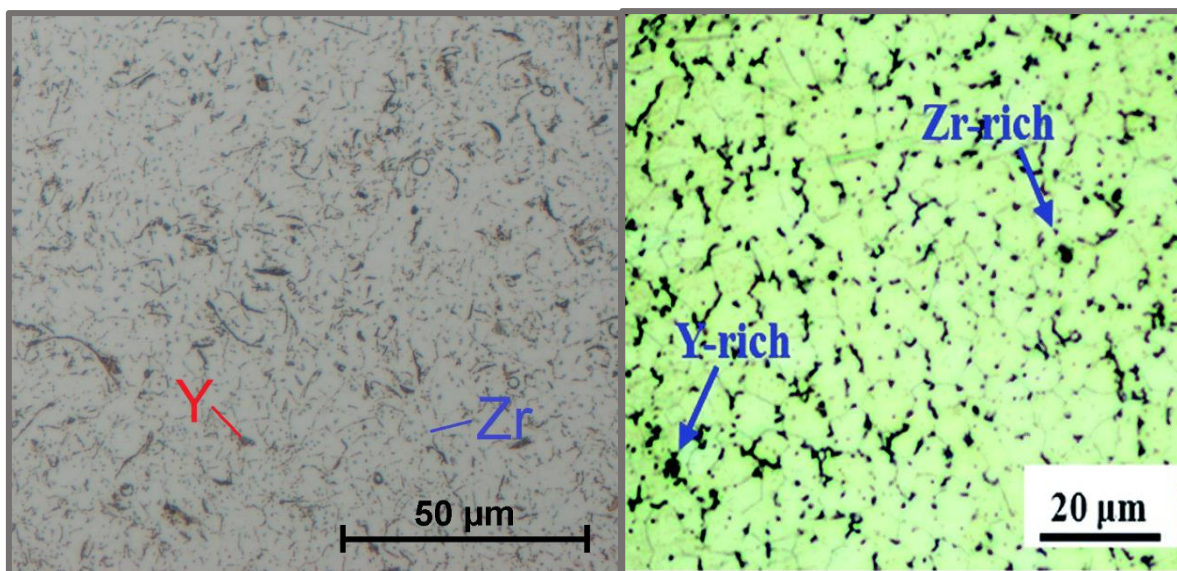


Obr. 5-7 Rozloženie porozity vzorky s relatívnou hustotou 99,56 % (vľavo) a vzorky s relatívnou hustotou 98,54 %

Ako je zrejmé z predchádzajúcich obrázkov, porozita je vo vzorkách rozložená nerovnomerne. Na obrázku 5-7 vpravo si je možné všimnúť, že vzorka obsahuje niekoľko červených oblastí, pri ktorých je objem porozity rovný $0,05 \text{ mm}^3$ oproti väčšinovej porozite, ktorá dosahuje objem $0,01 \text{ mm}^3$. Táto nerovnomernosť rozloženia môže byť dôvodom nepresnosti metódy výbrusov.

Mikroštruktúra vzoriek

U niektorých vzoriek bola pozorovaná taktiež mikroštruktúra. Liu a kol [26] vo svojom výskume uvádzajú, že zliatina WE43 spracovaná laserom vykazuje výrazné zjemnenie štruktúry a zvýšenie korozivzdornosti. Aj napriek zmenšeniu priemernej veľkosti zŕn však v štruktúre ostávajú legujúce prvky Y a Zr. Tie sú znázornené na obr. 5-8 vpravo. Vo výskume sa taktiež uvádza, že α -Mg matrica je po spracovaní WE43 laserom obohatená o legujúce prvky. Štruktúra vzorky tejto bakalárskej práce (viz. obr. 5-8 vľavo) vykazuje veľkú podobnosť so spomínaným výskumom. Taktiež sú v nej slabo viditeľné legujúce prvky, znázornené na obrázku.



Obr. 5-8 Mikroštruktúra vzorky tejto práce vľavo a mikroštruktúra vzorky Liu a kol. vpravo [26] (upravené zo zdroja)

6 DISKUSIA

Analýza prášku potvrdila, že použitý prášok má vyhovujúce chemické zloženie. Častice prášku majú dostatočne sférický tvar, ktorý je pri SLM procese najžiadanejší. Prášok je vhodný na nanášanie vrstvy s veľkosťou 50 μm .

Návrh experimentu tejto práce vychádzal z analýzy rešeršnej časti a z predbežného testu, ktorý bol vykonaný na VUT FSI. Proces bol sprevádzaný tvorbou hmly, ktorá znečisťovala komoru. Manakari a kol. [2], Zhang a kol [18] a Hu a kol. [17] vo svojich prácach taktiež zmieňujú odľukovanie prášku a tvorbu čiernej hmly MgO. Najväčšie problémy, ktoré toto znečisťovanie spôsobuje, sú kontaminácia ostatných vzoriek a rozostrovanie laseru. Práve to mohlo spôsobovať znižovanie veľkosti energie v mieste tavby.

Spozorovaný jav, pri ktorom sa znečistenie následkom zvýšeného obsahu kyslíka vytratilo, nebol zaznamenaný v žiadnom článku. Schmid a kol. [12] uvádzajú, že obsah kyslíku v hodnote 0,09 – 0,6 % nemal na proces a vzorky žiaden dopad. To sa čiastočne zhoduje s našimi zisteniami, keďže počas experimentu pri náraste kyslíku po hodnotu 0,6 % nedochádzalo ku žiadnym výraznejším zmenám (miera znečistenia sa nemenila). 0,6 % a 0,8 % obsahu kyslíka v komore sú pravdepodobne kritické hodnoty pri procese.

Aj napriek spomínanému problému v podobe tvorby hmly experiment dosiahol uspokojivé výsledky. Podarilo sa postaviť všetky navrhnuté vzorky. Z metalografických výbrusov bola pre orientáciu určovaná relatívna hustota. Najvyššia nameraná relatívna hustota mala hodnotou 99,4 %. Táto vzorka však bola naskenovaná vždy ako prvá po nanesení prášku. Komora sa počas nanášania každej novej vrstvy dokázala vyčistiť. Oproti ostatným vzorkám bolo teda znečistenie pri skenovaní tejto prvej vzorky podstatne menšie, čo mohlo dopomôcť k jej nižšej porozite. Wei a kol. [11] pri svojom experimente dokázali postaviť vzorku s relatívnou hustotou rovnou 99,52 %. Ďalšie výskumy z teoretickej časti však uvádzajú vzorky s omnoho vyššou porozitou, než väčšina zmeraných vzoriek tejto práce. Znázornené závislosti (tejto bakalárskej práce) relatívnej hustoty na skenovacej rýchlosti dokazujú, že použitie vzdialenosti stôp 80 μm má pozitívny dopad na relatívnu hustotu. To vo svojom výskume potvrdzuje aj Wei a kol. [11]. Ďalším viditeľným trendom je nárast porozity, pri zvyšujúcej sa rýchlosti skenovania. Na rovnakú závislosť taktiež poukazujú Wei a kol. [11] a Wei a kol [20]. Ako už bolo spomínané, znečistenie komory malo pravdepodobne za následok rozostrovanie laseru a teda znižovanie energie v tavnom bazéniku. Práve to mohlo spôsobovať nárast porozity u niektorých vzoriek. Zhang a kol. [18] vytvorili procesnú mapu (viz obr. 2-11). V analógii s týmto výskumom je možné, že vplyvom zníženej hustoty energie, sa niektoré vzorky z testu tejto bakalárskej práce dostali z formačnej zóny do oblasti, označenej ako „bez mechanickej pevnosti“, viz. obr. 2-11 vľavo dole.

Metódou počítačovej tomografie boli analyzované tri vzorky. Tieto vzorky boli vyberané pre overenie trendu podobnosti tvaru porozity so stopami laseru v objeme vzoriek a validáciu metódy výbrusov. Odchýlky od hodnôt zmeraných metódou výbrusov sú markantné. Je to spôsobené nerovnomernosťou rozloženia porozity

v jednotlivých vzorkách. Pri každej meranej vzorke bola zistená vyššia relatívna hustota ako zmeraná relatívna hustota metódou výbrusov. Na určenie hlavných trendov je však metóda výbrusov dostatočná, keďže poradie vzoriek (podľa veľkosti porozity) zostalo nezmenené (viz. tab 5-3). Analýza μ CT taktiež dokázala, že vo vzorkách je porozita rozložená nerovnomerne. Metalografická štruktúra vzoriek bola porovnávaná s výskumom, ktorý vykonali Liu a kol. [26]. Vykazovala veľkú podobnosť.

7 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo objasňovanie vplyvu procesných parametrov na výslednú porozitu materiálu pri spracovaní horčíkových zliatin technológiou SLM. Boli uskutočnené úvodné testy, ktoré môžu pomôcť pri vývoji spracovania horčíkových zliatin aditívnym spôsobom.

Pri hlavnom objemovom teste tejto práce sa podarilo postaviť všetky navrhnuté vzorky. Zo vzoriek, ktoré boli vyhodnocované metódou výbrusov, bola najvyššia nameraná relatívna hustota rovná 99,4 %, pričom u ďalších piatich vzoriek bola väčšia než 98 %. Použité procesné parametre pri vzorke s najmenšou porozitou boli nasledujúce: rýchlosť skenovania rovná 450 mm/s, výkon laseru s hodnotou 225 W, hrúbka nanášanej vrstvy 50 μm a vzdialenosť stôp s hodnotou 80 μm . Hustota energie pri tejto vzorke bola 125 J/mm³. Vybrané vzorky boli taktiež analyzované pomocou presnejšej metódy μCT . Bolo zistené, že skutočná relatívna hustota vzoriek je výrazne vyššia, než relatívna hustota zmeraná metódou výbrusov. Skutočná relatívna hustota najlepšej vzorky je teda pravdepodobne ešte vyššia, než bolo uvedené.

Všetky ciele tejto práce boli naplnené v plnom rozsahu. Pre budúce spracovanie tejto zliatiny je nutné riešenie eliminácie tvorby hmly, ktorá znečisťuje počas procesu stavebnú komoru. Najpravdepodobnejšie riešenie je prestavenie komory, a to konkrétne pridaním výkonnejšieho odsávacieho zariadenia. Energetická hustota vzoriek by sa mala pohybovať v hodnotách od 110 – 125 J/mm³.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] SLM® Metal Powder. SLM Solutions [online]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/accessories-and-consumables/slmr-metal-powder>
- [2] MANAKARI, Vyasraj, Gururaj PARANDE a Manoj GUPTA. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloy Powders: A Review. *Metals*. 2017, 7(12), 1-35. DOI: 10.3390/met7010002. ISSN 2075-4701. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2075-4701/7/1/2>
- [3] STAIGER, Mark P., Alexis M. PIETAK, Jerawala HUADMAI a George DIAS. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. *Biomaterials*. 2006, 27(9), 1728-1734. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2005.10.003. ISSN 01429612. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961205009014>
- [4] Selective Laser Melting for Medical Implants - Fraunhofer ILT. Ihr Partner für Innovationen - Fraunhofer ILT [online]. Copyright © 2018 Fraunhofer [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <https://www.ilt.fraunhofer.de/en/media-center/brochures/b-slm-for-medical-implants.html>
- [5] KOČICA, M. Zpracování slitin mědi pomocí technologie selective laser melting. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2016. 115 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D
- [6] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015, 2(4), 041101-. DOI: 10.1063/1.4935926. ISSN 1931-9401. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4935926>
- [7] SUCHÝ, J. Zpracování vysokopevnostní hliníkové slitiny AlSi9Cu3 technologií selective laser melting. Brno: Vysoké učení technické v Brn, Fakulta strojíního inženýrství, 2017. 92 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..
- [8] SHIPLEY H., D. MCDONNELL, M. CULLETON, R. COULL, R. LUPOI, G. O'DONNELL a D. TRIMBLE. Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018, 128, 1-20. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.01.003. ISSN 08906955. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695518300233>
- [9] SAMES W. J., F. A. LIST, S. PANNALA, R. R. DEHOFF a S. S. BABU. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. 2016, 61(5), 315-360. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649. ISSN 0950-6608. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09506608.2015.1116649>
- [10] AZ91D Properties | Magnesium Alloy AZ91D | Dynacast. Global Die Casting | Diecasting Company | Dynacast [online]. Copyright ©2018 Dynacast. All rights reserved [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <https://www.dynacast.com/az91d>
- [11] WEI Kaiwen, Ming GAO, Zemin WANG a Xiaoyan ZENG. Effect of energy input on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted AZ91D magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2014, 611, 212-222. DOI: 10.1016/j.msea.2014.05.092. ISSN 09215093. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509314007047>

- [12] SCHMID, Dominik, Johanna RENZA, Michael F. ZAEH a Johannes GLASSCHROEDER. Process Influences on Laser-beam Melting of the Magnesium Alloy AZ91. *Physics Procedia*. 2016, 83, 927-936. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.097. ISSN 18753892. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389216302048>
- [13] Magnesium Powder. AMERICAN ELEMENTS® | The Advanced Materials Manufacturer [online]. Copyright © 1998 [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <https://www.americanelements.com/magnesium-powder-7439-95-4>
- [14] NG, C. C., M. M. SAVALANI, H. C. MAN a I. GIBSON. Layer manufacturing of magnesium and its alloy structures for future applications. *Virtual and Physical Prototyping*. 2010, 5(1), 13-19. DOI: 10.1080/17452751003718629. ISSN 1745-2759. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452751003718629>
- [15] NG, C. C., M. M. SAVALANI, H. C. MAN. Fabrication of magnesium using selective laser melting technique. *Rapid Prototyping Journal*. 2011, 17(6), 479-490. DOI: 10.1108/13552541111184206. ISSN 1355-2546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552541111184206>
- [16] NG, C.C., M.M. SAVALANI, M.L. LAU a H.C. MAN. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted magnesium. *Applied Surface Science*. 2011, 257(17), 7447-7454. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.03.004. ISSN 01694332. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433211003576>
- [17] HU, Dong, Yong WANG, Dingfei ZHANG, Liang HAO, Junjie JIANG, Zhonghua LI a Yitao CHEN. Experimental Investigation on Selective Laser Melting of Bulk Net-Shape Pure Magnesium. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015, 30(11), 1298-1304. DOI: 10.1080/10426914.2015.1025963. ISSN 1042-6914. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2015.1025963>
- [18] ZHANG, Baicheng, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9%Al powder mixture. 2012, 34, 753-758. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.06.061. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306911004699>
- [19] Online Materials Information Resource - MatWeb [online]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2b98d1c524174ef1a7aec46a8bed7f62&ckck=1>
- [20] WEI, Kaiwen, Zemin WANG a Xiaoyan ZENG. Influence of element vaporization on formability, composition, microstructure, and mechanical performance of the selective laser melted Mg–Zn–Zr components. *Materials Letters*. 2015, 156, 187-190. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.05.074. ISSN 0167577X. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X1500796X>
- [21] SHUAI, Cijun, Youwen YANG, Ping WU, et al. Laser rapid solidification improves corrosion behavior of Mg-Zn-Zr alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, 691, 961-969. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.09.019. ISSN 09258388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838816327517>

- [22] YANG, Youwen, Ping WU, Qiyuan WANG, Hong WU, Yong LIU, Youwen DENG, Yuanzhuo ZHOU a Cijun SHUAI. The Enhancement of Mg Corrosion Resistance by Alloying Mn and Laser-Melting. *Materials*. 2016, 9(4), 216-. DOI: 10.3390/ma9040216. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/4/216>
- [23] WE43 Magnesium Alloy. Smiths Metal Centres Ltd [online]. Copyright © 2016 [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <https://www.smithmetal.com/we43-magnesium-alloy.htm>
- [24] Selective Laser Melting Machine SLM®280 2.0. SLM Solutions. SLM Solutions. [online]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slmr280-20>
- [25] Magnesium WE43. Material Science. Materials Engineering. [online]. Copyright © 2000 [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8539>
- [26] LIU, Cancan, Qingbiao LI, Jun LIANG, Jiansong ZHOU a Lingqian WANG. Microstructure and corrosion behaviour of laser surface melting treated WE43 magnesium alloy. *RSC Advances*. 2016, 6(36), 30642-30651. DOI: 10.1039/C5RA27010C. ISSN 2046-2069. Dostupné také z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5RA27010C>

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka	Význam
<i>CAD</i>	- Computer Aided Design
<i>ppm</i>	- počet častíc na jeden milión
<i>SEM</i>	- Scanning Electron Microscopy
<i>SLM</i>	- Selective Laser Melting
<i>mesh</i>	- americká miera pre veľkosť častíc
%wt	- hmotnostné percentá
3D	- trojdimenzionálny
μCT	- Micro Computer Tomography

Symbol	Jednotka	Popis
E	[J/mm ³]	Energetická hustota
P	[W]	Výkon laseru
s	[μm]	Vzdialenosť stôp laseru
v	[mm/s]	Rýchlosť skenovania
t	[μm]	Hrúbka vrstvy

10 ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV

Obr. 1-1 Časť bedrového kĺbu (<i>acetabular cup</i>) vyrobená technológiou SLM [4]	12
Obr. 2-1 Schéma SLM procesu [6]	13
Obr. 2-2 Základné procesné parametre [6]	13
Obr. 2-2 Základné procesné parametre [6]	14
Obr. 2-3 Balling a delaminácia [9]	15
Obr. 2-4 Procesná mapa rozdelená podľa hustoty energie [11]	16
Obr. 2-5 Relatívna hustota v závislosti na procesných parametroch [11]	17
Obr. 2-6 Jednotlivé návary na stavebnej doske zo zliatiny AZ3 [12]	18
Obr. 2-7 Vplyv vzdialenosti stôp [12]	18
Obr. 2-8 Kvalita povrchu pri rôznych hrúbkach vrstiev [12]	19
Obr. 2-9 Procesná mapa [15]	20
Obr. 2-10 Rýchlosť skenovania a výkon laseru v závislosti na kvalite vzoriek [17]	21
Obr. 2-11 Procesná mapa Mg-9%Al [2]	21
Obr. 2-12 Závislosť porozity vzorku na energetickej hustote [18]	22
Obr. 2-13 Mikrofotografia prášku, jednotlivé vzorky a závislosť rýchlosti skenovania na porozite [20]	23
Obr. 2-14 Závislosť porozity vzorku na energetickej hustote [21]	23
Obr. 4-1 Fotografia SLM 280 ^{HL} s popisom hlavných častí stroja	28
Obr. 4-2 Stavebná komora (s vyňatým nanášacím zariadením) s popisom hlavných častí	28
Obr. 4-3 Rozloženie vzoriek s procesnými parametrami	29
Obr. 4-4 Fotografia dosky po stavbe	29
Obr. 4-5 Detail hornej polovice stavebnej dosky	30
Obr. 4-6 Vybrúsené a vyleštené vzorky zaliate v akrylátovej hmote	32
Obr. 5-1 Fotografia SEM	33
Obr. 5-4 Metalografický výbrus vzorky s najvyššou relatívnou hustotou 99,4 % (vľavo) a vzorky s najnižšou relatívnou hustotou 83,85 % (vpravo)	34
Obr. 5-5 Závislosť relatívnej hustoty na skenovacej rýchlosti pri rôznych výkonoch laseru pri vzdialenosti stôp rovnej 80 µm	35
Obr. 5-6 Závislosť relatívnej hustoty na skenovacej rýchlosti pri rôznych výkonoch laseru pri vzdialenosti stôp rovnej 90 µm	35
Obr. 5-7 Rozloženie porozity vzorky s relatívnou hustotou 99,56 % (vľavo) a vzorky s relatívnou hustotou 98,54 %	36
Obr. 5-8 Mikroštruktúra vzorky tejto práce vľavo a mikroštruktúra vzorky Liu a kol. vpravo [26] (upravené zo zdroja)	37

11 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2-1 Vlastnosti vzoriek v závislosti na hustote energie (upravené z pôvodného zdroja) [16]	20
Tab. 3-1 Procesné parametre vzoriek s najmenšou porozitou	25
Tab. 4-1 Parametre SLM 280 ^{HL} [24]	27
Tab. 4-2 Parametre jednotlivých vzoriek a ich hustota energie	31
Tab. 5-1 Zloženie zliatiny WE43 [25]	33
Tab. 5-2 Tabuľka relatívnej hustoty pre vzdialenosť stôp 80 μm	35
Tab. 5-3 Tabuľka relatívnej hustoty pre vzdialenosť stôp 90 μm	36

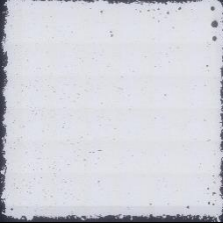
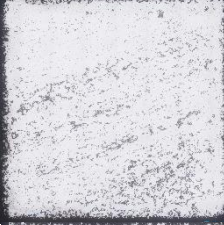
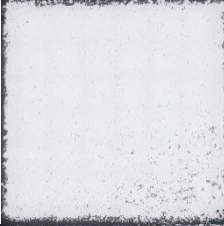
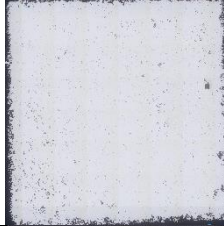
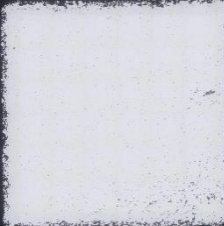
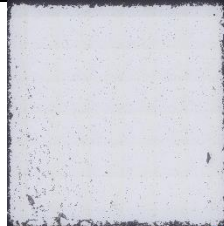
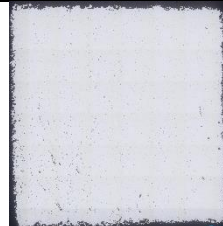
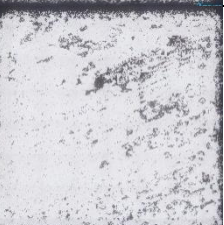
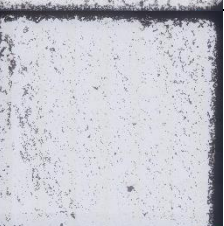
12 ZOZNAM PRÍLOH

12

PRÍLOHA 1	Procesná mapa	48
PRÍLOHA 2	Laboratórny protokol	49

13 PRÍLOHY

PRÍLOHA 1 Procesná mapa

Vzdialenosť stôp 80 μm							
Skenovacia rýchlosť [mm/s]							
Výkon Laseru [W]		450	500	550	600		
	225						
	250						
	275						
Vzdialenosť stôp 90 μm							
Skenovacia rýchlosť [mm/s]							
Výkon Laseru [W]		450	500	550	600		
	225						
	250						
	275						

Magnesium Elektron

SERVICE & INNOVATION IN MAGNESIUM

CERTIFICATE OF COMPLIANCE AND ANALYSIS

CUSTOMER: University of Chemistry & Technology, Prague DATE: 12/06/2016

PURCHASE ORDER NO.: 1161060075

NET WEIGHT: 10 Kgs

LOT NO.: 16-12-16239

PRODUCT: ELEKTRON®MAP+43 Magnesium Alloy Powder, ATOMIZED, -63/+20 MICRONS

The chemical composition of the atomized magnesium alloy powder is as follows:

	Ag	0.01
	Al	0.01
	Cu	<0.01
	Fe	<0.005
Heavy Rare Earth Elements		0.86
	Li	0.05
	Mn	0.01
	Nd	2.30
	Ni	<0.001
	Si	<0.01
Total Rare Earth Elements		3.29
	Y	3.96
	Zn	<0.01
	Zr	0.56
Other Elements, each		0.01% max

This product meets the chemical requirements of ASTM B93/B93M-06 Specification.

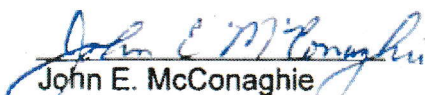
Particle Size Distribution

	<u>ACTUAL PARTICLE SIZE - MICRONS</u>
D10	26.9
D50	39.8
D90	57.9

Apparent Density, g/cm³, (MPIF Std. 04)
Tap Density, g/cm³, (MPIF Std. 46)

0.96 g/cm³
1.1 g/cm³

Magnesium Elektron Powders
www.Magnesium-Elektron.com


John E. McConaghie
Vice President Operations

Reade Plant

Reade Manufacturing Co.
2590 Ridgeway Blvd.
Manchester, NJ 08759
Tel: (732) 657-6451
Fax: (732) 657-6628

Hart Plant

Hart Metals Inc.
1415 E Broad St.
Tamaqua, PA 18252
Tel: (570) 668-0001
Fax: (570) 668-6526

ISO 9001 Certified

A Luxfer Company