



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONŠTRUOVANIA

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# STÚDIUM VPLYVU VPLYVU VÝROBNÝCH PARAMETROV ADITÍVNEJ TECHNOLOGIE SELECTIVE LASER MELTING NA VLASTNOSTI VYROBENÉHO OBJEKTU

THE STUDY OF THE EFFECT OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY  
PARAMETERS SELECTIVE LASER MELTING PROPERTIES OF THE PRODUCED OBJECT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MAREK ŽABKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. RADEK VRÁNA

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Marek Žabka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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:

### **Studium vlivu výrobních parametrů aditivní technologie Selective Laser Melting na vlastnosti vyrobeného objektu**

v anglickém jazyce:

### **The study of the effect of additive manufacturing technology parameters Selective Laser Melting properties of the produced object**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je přehled současného stavu poznání v oblasti nastavení výrobních parametrů technologie Selective Laser Melting a jejich vliv na výsledné vlastnosti vyráběného objektu z materiálů AlSi10Mg a nerezové oceli 316L.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Analýza problému a cíl práce
3. Přehled současného stavu poznání
4. Diskuze
5. Závěr
6. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva

Typ práce: rešeršní; Účel práce: výzkum a vývoj

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

Zásady pro vypracování práce:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2015.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf)

Šablona práce: [http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK\\_sablona\\_praci.zip](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip)

Seznam odborné literatury:

- 1) YADROITSEV, Igor. Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert, c2009, iv, 266 s. ISBN 978-3-8383-1794-6.
- 2) VRÁNA, R. Návrh porézních struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 96 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- 3) KEMPEN, K., L. THUIS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. Physics Procedia. 2012, vol. 39, s. 439-446. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.059. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389212025862>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radek Vrána

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

---

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

---

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

---

## **ABSTRAKT**

Kovová aditívna technológia v súčasnej dobe nachádza uplatnenie vo veľkom množstve priemyslových odvetví. Hlavne v oblastiach ako letectvo, lekárstvo a kozmonautika je kladený dôraz na mechanické a materiálové vlastnosti materiálov.

Táto bakalárska práca sa zaoberá rešeršnou štúdiu procesných parametrov technológie Selective Laser Melting pre materiál AlSi10Mg a nerezovú oceľ 316L. V práci bola vykonaná analýza vplyvu hlavných procesných parametrov: výkon laseru, rýchlosť skenovania, šrafovací rozstup, hrúbka vrstvy, hlavne na pórovitosť vzoriek. Na základe rešerše súčasného stavu boli nájdené doporučené nastavenia pre oba materiály. Ďalej bol zistený vplyv parametrov ako napríklad vlhkosť prášku alebo stratégie skenovania laseru.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Selective Laser Melting, Aditívne technológie, AlSi10Mg, 316L, pórovitosť, hustota energie

## **ABSTRACT**

Metal additive technology currently finds use in a large number of industrial sectors. Mainly in domains such as aviation, medicine and astronautics, the emphasis is laid on mechanical and material properties of materials.

This bachelor thesis deals with the research study of process parameters of technology Selective Laser Melting for material AlSi10Mg and stainless steel 316L. In thesis the impact analysis of main process parameters: laser power, scanning speed, hatch distance, layer thickness, especially on the porosity of the samples was carried out. Recommended settings for both materials were found based on the research of the current state. It was further found out the influence of parameters such as powder humidity or laser scan strategy.

## **KEY WORDS**

Selective Laser Melting, Additive technology, AlSi10Mg, 316L, porosity, energy density

---



---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

ŽABKA, M. *Studium vlivu výrobních parametrů aditivní technologie Selective Laser Melting na vlastnosti vyrobeného objektu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vrána.

---





---

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že túto bakalársku prácu Studium vlivu výrobních parametrů aditivní technologie Selective Laser Melting na vlastnosti vyrobeného objektu som vypracoval samostatne, pod vedením vedúceho bakalárskej práce Ing. Radka Vrání. Súčasné prehlasujem že som v zozname uviedol všetky použité literárne zdroje.

V Brne dňa 22. mája 2015.

.....  
Podpis autora

---



---

## **POĎAKOVANIE**

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu bakalárske práce Ing. Radkovi Vránovi za poskytnuté rady a pripomienky pri spracovaní bakalárskej práce. Ďalej mojej rodine za trpezlivosť a podporu a nakoniec patrí veľká vďaka gramatickému korektorovi.

---



**OBSAH**

<b>OBSAH</b>	<b>11</b>
<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>	<b>13</b>
1.1 Analýza problému	13
1.2 Cieľ práce	13
<b>2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>14</b>
2.1 Aditívne technológie výroby kovových dielov	14
2.1.1 Selective Laser Melting (SLM)	15
2.1.2 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	16
2.1.3 Electron Beam Melting (EBM)	17
2.2 Materiály používané na výrobu	18
2.3 Rešeršná štúdia článkov	20
2.3.1 Prášok z nerezovej oceli 316L	20
2.3.2 Zhrnutie pre zliatinu 316L	36
2.3.3 Prášok zo zliatiny hliníku AlSi10Mg	37
2.3.4 Zhrnutie pre zliatinu AlSi10Mg	47
<b>3 DISKUSIA</b>	<b>48</b>
<b>4 ZÁVER</b>	<b>51</b>
<b>5 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>	<b>52</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN</b>	<b>56</b>
<b>ZOZNAM OBRÁZKOV</b>	<b>57</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK</b>	<b>59</b>

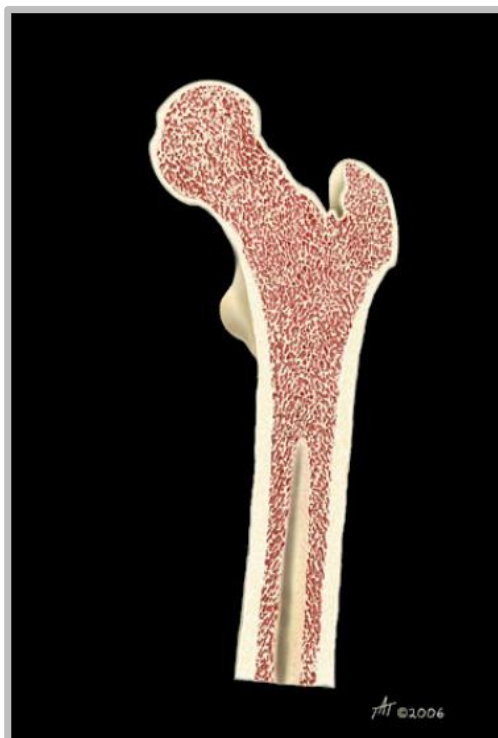
## ÚVOD

---

Aditívne technológie si v posledných rokoch našli cestu ako do výroby prototypov tak aj do výroby finálnych dielov v širokej škále priemyselných odvetví. Pri využití aditívnej výroby je možné navrhnuť súčasti, ktoré majú neštandardný veľmi obecný tvar. Takéto tvary môžu mať nižšiu hmotnosť a výrazne lepšie mechanické v porovnaní s rovnakou súčiastkou z plného materiálu. Takýmto príkladom je ľudská kosť (obr. 0.1)

Jednou zo špecifických oblastí je výroba kovových dielov. Súčasti sú vyrábané pri relatívne krátkom čase výroby od návrhu (pomocou CAD programov). Proces výroby je ovplyvnený veľkým množstvom procesných parametrov, ktoré ovplyvňujú výsledné vlastnosti vyrábaného objektu, ako sú hustota, mechanické vlastnosti a rozmerová presnosť objektov. Pre získanie dobrých vlastností vyrábaných objektov je potrebné nastaviť optimálne procesné parametre, ktoré sa môžu líšiť v závislosti na veľkosti a tvare súčasti tak, aby umožnili využitie potenciálov tohoto spôsobu výroby, preto je nutný neustály výskum týchto metód. Aditívne metódy výroby zahŕňajú Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DLMS) a Electron Beam Melting (EBM). Všetky tieto tri metódy spočívajú v natavovaní prášku vrstvu po vrstve, kedy sa týmto spôsobom stavia výsledný diel.

Táto práca bude zameraná na nájdenie vhodných nastavení hlavných procesných parametrov kovovej aditívnej technológie SLM pre materiál AlSi10Mg a nerezovú oceľ 316L



Obr.0.1 Rez kosťou [26]

## 1 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

---

**1**

### 1.1 Analýza problému

---

**1.1**

Metóda Selective Laser Melting (SLM) je nová rozvíjajúca sa aditívna metóda výroby, ktorá ponúka možnosť výroby zložitých dielov z kovu. V súčasnosti sa SLM používa k výrobe funkčných prototypov a k výrobe odľahčených materiálov v lekárstve, letectve, kozmonautike. Nakoľko v týchto odvetviach sa kladie veľký dôraz na dobré materiálové a mechanické vlastnosti vyrábaných súčastí je veľmi dôležité nájsť optimálne nastavenie procesných parametrov, ktoré budú zaručovať kvalitu a opakovateľnosť pre väčšinu vyrábaných dielov.

Autori v štúdiách skúmali vplyv nastavení rôznych hustôt laserových energií. Táto hodnota predstavuje súbor viacerých procesných parametrov, ktoré ovplyvňujú výsledné vlastnosti vyrobených vzoriek. Zamerali sa najmä na výslednú hustotu vzoriek vyrobených metódou SLM, prípadne na ďalšie úpravy, ktorými je možné dosiahnuť vyššiu hustotu vzoriek.

V ďalších prácach bol kladený dôraz na vplyv procesných parametrov na šírky, spojitosť a hĺbku návaru, ktorý priamo ovplyvňuje výslednú štruktúru a povrch vzoriek.

Ďalej skúmali vplyv parametrov zmeny rôznych vstupných teplôt, ako je predhrev základnej dosky alebo predúšanie kovového prášku pomocou zvýšenia teploty.

### 1.2 Cieľ práce

---

**1.2**

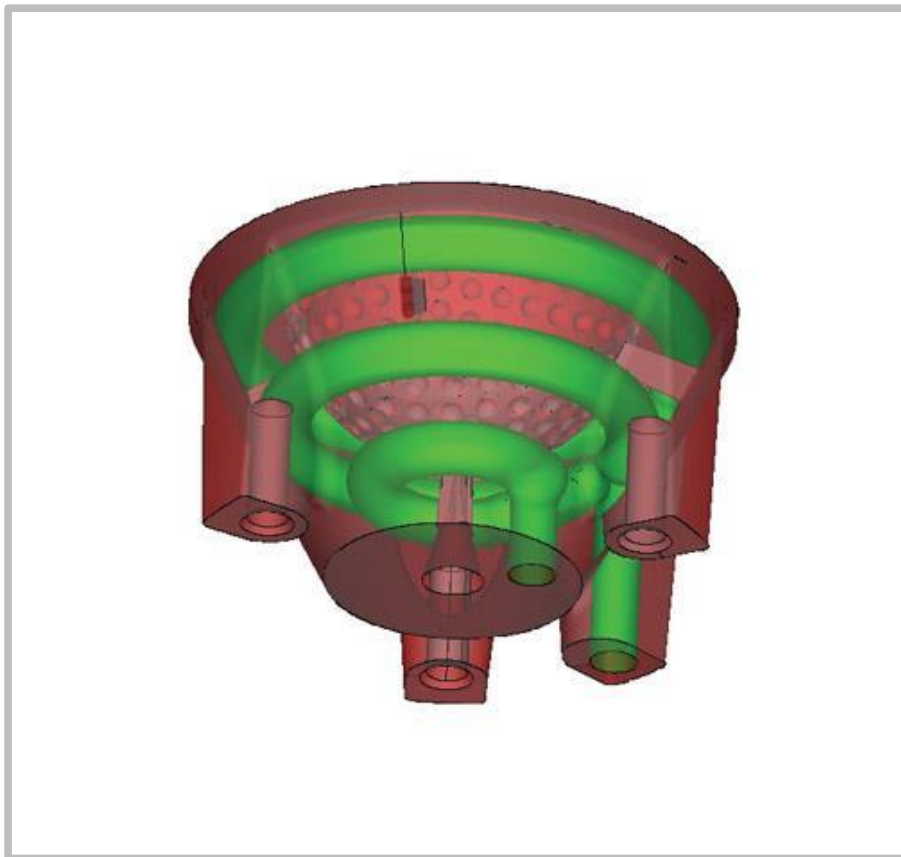
Cieľom tejto bakalárskej práce je rešeršná štúdia jednotlivých prác, ktoré sa zaoberajú vplyvom výrobných parametrov na nerezové ocele 316L a hliníkové zliatiny AlSi10Mg. V závere budú porovnané doporučené nastavenia parametrov pre konkrétny materiál.

## 2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

### 2.1 Aditívne technológie výroby kovových dielov

Aditívne výrobné technológie sú definované tým, že diel je stavaný postupne vrstva po vrstve. Ako vstupné dáta pre výrobu sa používajú CAD dáta vo formáte STL, ktorý popisuje tvar objektu pomocou siete trojuholníkov. Tento formát je pomocou špeciálneho softwaru rozrezaný do vrstiev s hrúbkou spravidla pod  $150\ \mu\text{m}$  podľa hrúbky vrstvy prášku. V súčasnej dobe táto metóda umožňuje stavbu dielov z kovových, polymérových a keramických práškov. Pri kovovej aditívnej technológii je týmto materiálom kov vo forme veľmi jemného prášku guľôčkového tvaru. Prášok je lokálne tavený podľa použitej metódy, buď laserovým lúčom (SLM, DMLS) alebo zväzkom elektrónov (EBM). Stavebné časy súčastí vyrábaných touto metódou sú v rádoch hodín, podľa náročnosti. [1, 5, 10]

Metóda výroby súčastí vrstva po vrstve dáva široké možnosti vo výrobe dielov z vnútornými dutinami, rebrovaním - konformné chladenia foriem ( vid'. obr. 2.1). Takéto diely sú inou metódou prakticky nevyrobitel'né . Tiež sa táto metóda používa napríklad na výrobu foriem na odliatky a pod. [2]



Obr. 2.1 Konformné chladenie foriem [27]



Ďalej tieto metódy nachádzajú široké uplatnenie v medicíne, hlavne vo výrobe kĺbových náhrad a náhradách čeľustí, kde sú potrebné práve komplexné tvary. Pri výrobe zubných náhrad (suprastructures), táto metóda umožňuje použiť ultra-silné zliatiny titánu stupňa V. Tieto zliatiny majú lepšie mechanické vlastnosti, ako všetky bežne používané titánové zliatiny stupňa II (viď. obr. 2.2). [4,2]

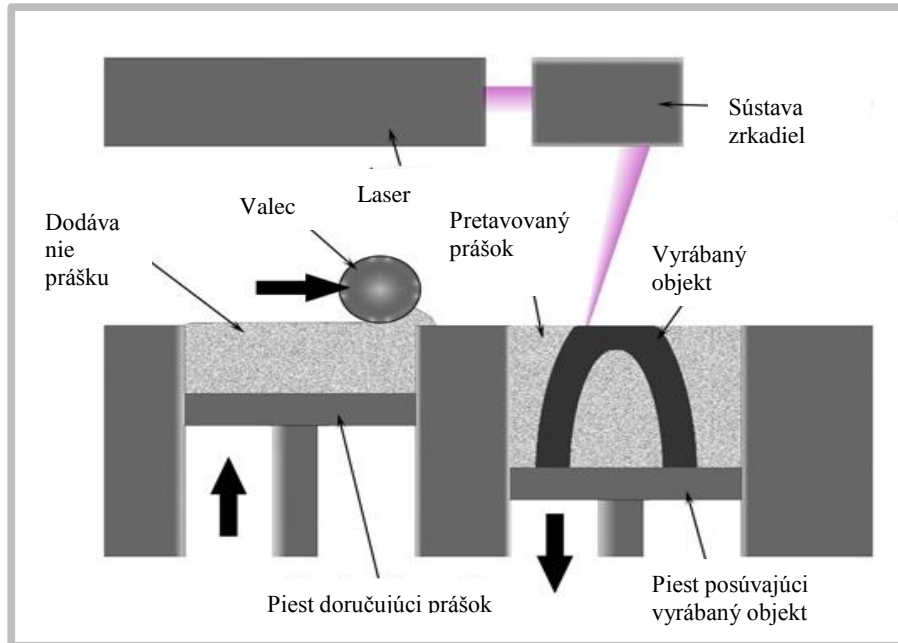


Ob.2.2 Zubná náhrada [2]

### 2.1.1 Selective Laser Melting (SLM)

2.1.1

SLM je aditívny proces výroby z veľmi jemného kovového prášku (do 50  $\mu\text{m}$ ). Tento prášok je nanášaný po vrstvách na základnú dosku, kde je rozhrnutý do užívateľom definovanej vrstvy. Prášok sa taví pomocou vysoko výkonného lasera (väčšinou vláknového ytterbiového), vďaka ktorému je prášok dokonalo roztavený a tým zabezpečí jednoliatosť dielov s takmer 100 % hustotou. Pohyb lasera v osiach X a Y je uskutočňovaný pomocou sústavy zrkadiel, pohyb v ose Z tvorí pohyb základnej dosky, ktorá vždy po nanosení vrstvy klesne o hrúbku vrstvy. Celý proces prebieha v inertnej atmosfére (napr. Ar, He, H<sub>2</sub>). Vysoká hustota ponúka mechanické vlastnosti porovnateľné, alebo dokonca lepšie, ako mechanické vlastnosti konvenčne vyrábaných dielov. Z toho vyplýva že proces SLM ponúka možnosť vyrábať komplexné tvary dielov v kombinácii s dobrými mechanickými vlastnosťami. Priebeh procesu je schematicky zobrazený na obrázku 2.3. [1, 3, 4, 10]

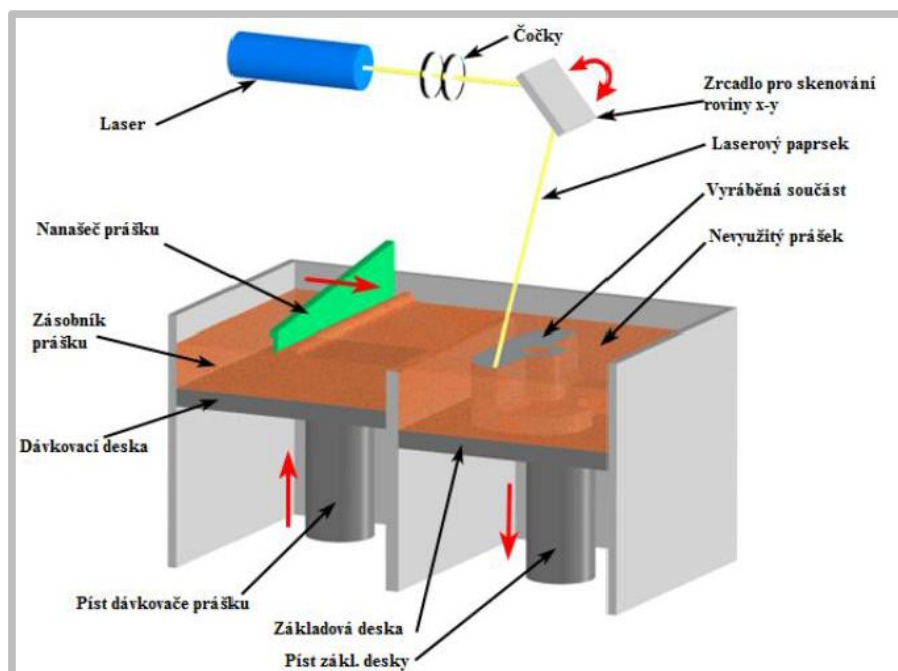


2.3 Schéma SLM procesu [30]

## 2.1.2

**2.1.2 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)**

Technológia DMLS je tiež aditívna technológia spekania kovového prášku ako technológia SLM. Rozdiel medzi technológiami je iba v použítom lasery, ktorý pri DMLS nedosahuje takého vysokého výkonu ako pri SLM. Súčasti vyrábané touto metódou vykazujú horší povrch a menšiu hustotu v porovnaní s EBM alebo SLM. Schematicky je tento proces zobrazený na obr. 2.4. [6]

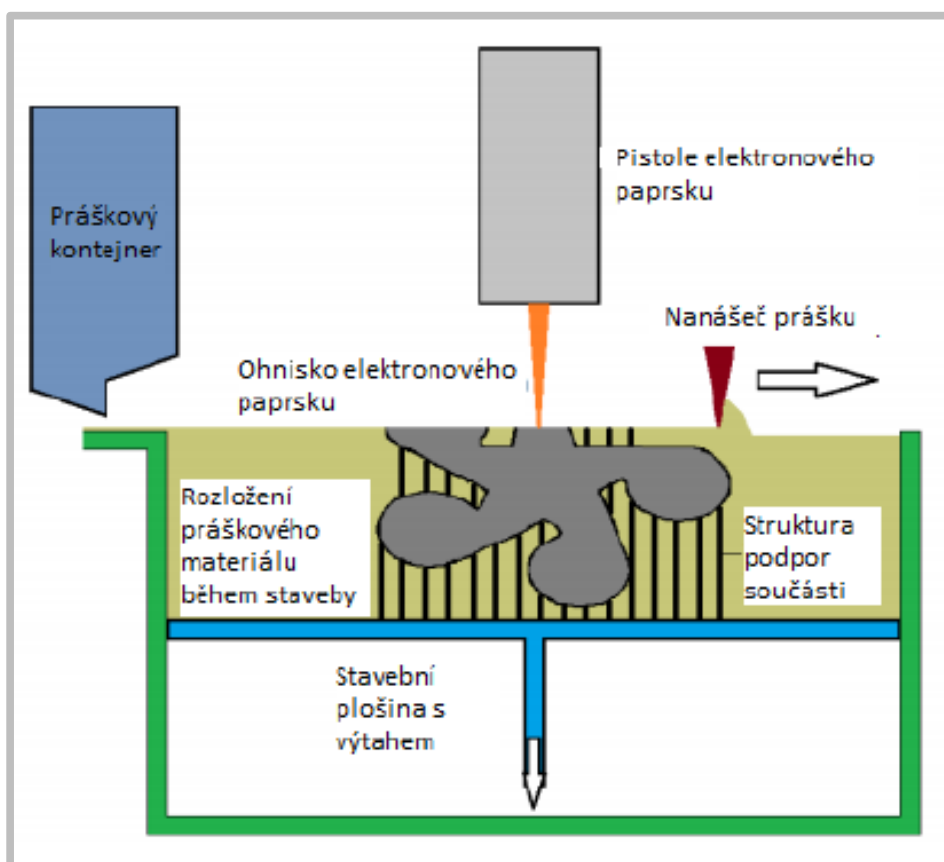


Obr.2.4 Schéma procesu DMLS [29]

### 2.1.3 Electron Beam Melting (EBM)

2.1.3

EBM je aditívna kovová technológia výroby, ktorá na roztavenie kovového prášku používa urýchlený zväzok elektrónov. Vysoký výkon elektrónového lúča až 3000 W, umožňuje taktiež ako pri SLM dobré roztavenie práškov, čo zabezpečuje takmer 100 % hustotu vyrábaných súčastí. Umožňuje použiť aj materiály s vysokou teplotou tavenia. Najpoužívanejšie sú vďaka tomuto faktu titánové prášky. Táto metóda výroby je vhodná na výrobu súčastí od sub-milimetrových veľkostí po veľkosti v rádoch centimetrov. Celý proces prebieha vo vákuu, čo zabraňuje reakcii taveniny so vzduchom a hromadeniu nečistôt. Proces výroby je schematicky zobrazený na obrázku 2.5. [7, 8]



Obr.2.5 Schéma procesu EBM [28]

## 2.2 Materiály používané na výrobu

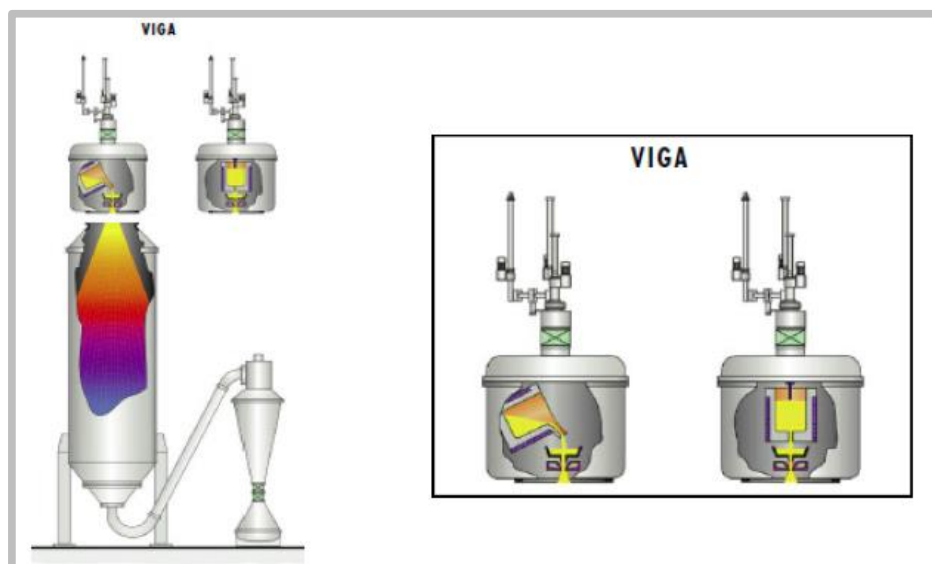
Metóda SLM používa na výrobu súčastí kovové prášky, ktoré sa vyznačujú veľmi jemnou zrnitosťou a chemickou čistotou. Veľmi jemná zrnitosť je dôležitý parameter, vďaka ktorému súčasti dosahujú lepšie mechanické vlastnosti, ako súčasti vyrábané konvenčnými metódami odlievania. Najbežnejšie používané materiály práškov sú nerezová oceľ 316L, hliníková zliatina AlSi10Mg a titánová zliatina Ti6Al4V.

Základné parametre prášku sú :

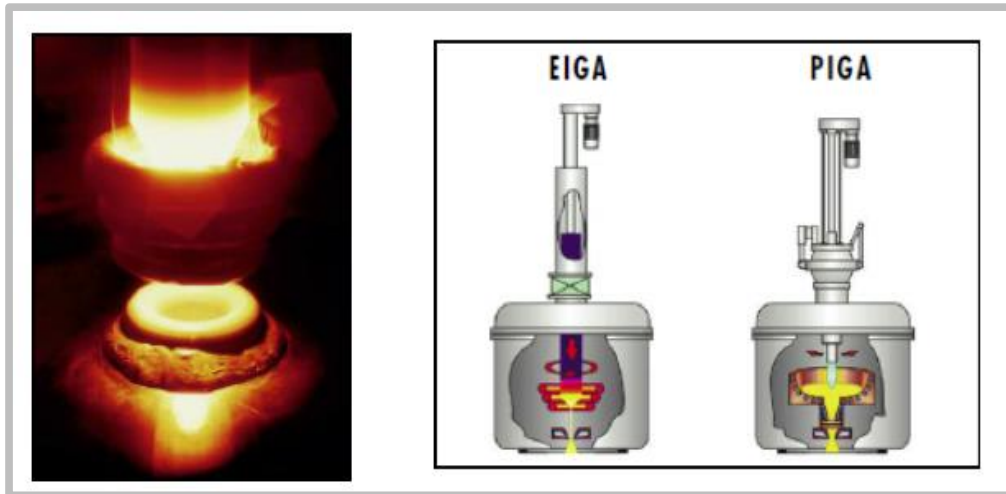
- homogénna mikroštruktúra
- rýchle tuhnutie
- guľovitý tvar
- vysoká chemická čistota

### Výroba práškov

Kovové prášky sa vyrábajú tromi rôznymi spôsobmi: Electrode Induction Melting Gas Atomization (EIGA), Plasma melting Induction Guiding Gas Atomization (PIGA) a Plasma melting Induction Guiding Gas Atomization (PIGA). Schematické postupy týchto metód sú znázornené na obrázkoch 2.6 a 2.7



Obr.2.6 Proces VIGA [9]



Obr.2.7 Schéma procesu EIGA(vpravo) a PIGA(vľavo) [9]

## 2.3 Rešeršná štúdia článkov

V tejto časti bakalárskej práce sa zameriam na štúdiu jednotlivých článkov. Budem skúmať hlavne vplyv procesných parametrov na výslednú štruktúru a vlastnosti objektov vyrobených z kovových práškov. Prášky skúmané v tejto práci sú vyrábané z nerezovej oceli 316L a hliníkovej zliatiny AlSi10Mg.

### 2.3.1

#### 2.3.1 Prášok z nerezovej oceli 316L

Cherry et al. [11] v práci skúmali vplyv hustoty laserovej energie na zliatinu 316L. Hustota energie zahŕňa viacero procesných parametrov (viď. vzťah 2.1). Autori menili v priebehu experimentu dobu expozície a vzdialenosť, pričom skúmali dopad na pórovitosť, výsledný povrch, mikroštruktúru, hustotu, tvrdosť a drsnosť. Tieto závislosti skúmali na vzorkách v tvare kociek o rozmeroch 10x10x10 mm<sup>3</sup>. Výsledné hustoty energie sú počítané so vzťahu 2.1. Autori menili dva hlavné parametre a ostatné procesné parametre boli nastavené fixne (výkon laseru 180 W, hrúbka vrstvy 50 µm a šrafovací rozstup 126 µm). Výsledné údaje a menené parametre sú zobrazené v tabuľke 2.1.

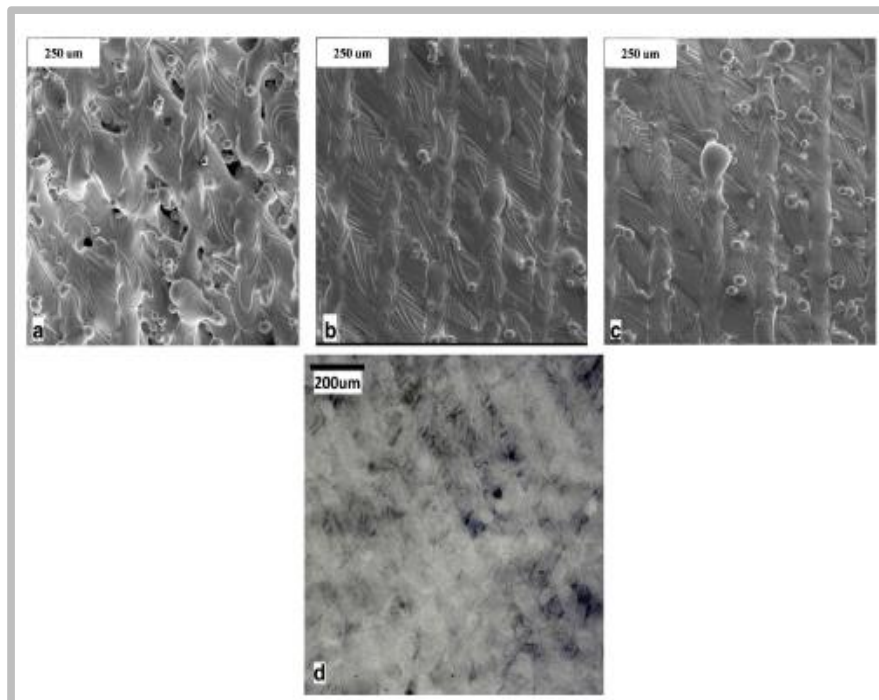
		Point Distance (µm)		
		25	50	75
Exposure time (µs)	75	125.42	62.71	41.81
	100	167.23	83.61	55.74
	125	209.03	104.52	69.68

Tab. 2.1 Nastavené parametre a odpovedajúce hustoty energie J/mm<sup>3</sup>

Hustota energie:

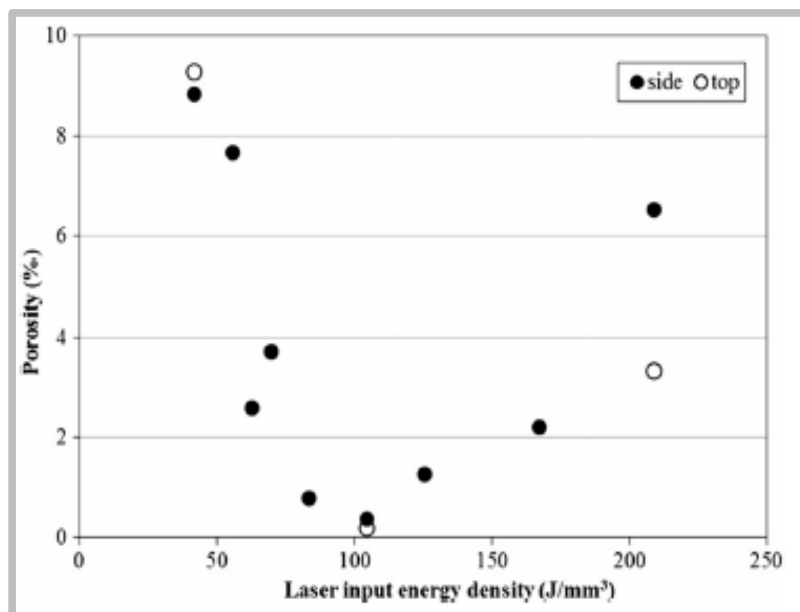
$$E = \frac{\text{laser power} \left( \frac{\text{exposure time}}{\text{hatch space} \times \text{point distance}} \right)}{\text{layer thickness}} \quad (2.1)$$

Pri experimentoch najhoršie výsledky pórovitosti 8,84 % autori dosahovali pri nízkej hustote energie 41,81 J/mm<sup>3</sup>. Častice pri tejto hustote majú veľkosti 5-45 µm a nastáva porucha nazývaná balling (vzniká formovaním taveniny do guľôčok), veľkosť vzniknutých guľôčok je okolo 50 µm. Dráhy sú nespojité a tiež vznikajú medzery medzi jednotlivými dráhami. Hustota energie nie je pravdepodobne dosť veľká k vytvoreniu dostatočnej tavnej lázne (viď. Obr2.8a). Pri zvýšení hustoty energie na 104,52 J/mm<sup>3</sup> klesá pórovitosť na 0,38 %. Vzorky vykazovali neprerušované dráhy a minimálny balling (viď. obr. 2.8b). Ďalším zvyšovaním hustoty energie dochádzalo k zvyšovaniu pórovitosti vzoriek až na 6,51 %, dráhy boli spojité ale balling sa zvýšil až na 100 µm (obr. 2.8c).



Obr.2.8 SEM obrázky zobrazujúce topografiu povrchu vzoriek staveného tromi rozdielnymi hustotami laserovej energie a.)  $41,81 \text{ J/mm}^3$ , b.)  $104,52 \text{ J/mm}^3$ , c.)  $209,03 \text{ J/mm}^3$  [11]

Všetky ďalšie výsledky v tejto štúdií viedli k optimálnej hustote energie  $104,52 \text{ J/mm}^3$ , pri ktorej sa autorom podarilo vyrobiť kocku s hustotou až  $99,62 \%$  a pórovitosťou  $0,38 \%$  (vid'. obr.2.9).



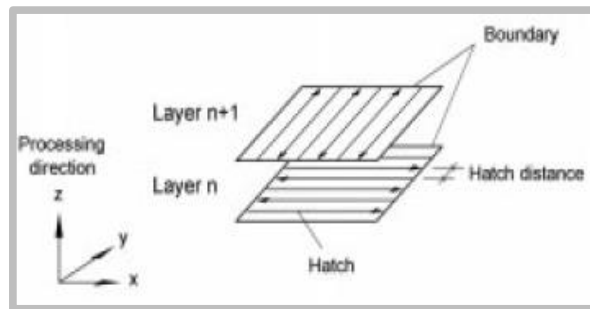
Obr. 2.9 Pórovitosť verzus hustota laserovej energie. Čierne bodky zobrazujú pórovitosť bočnej steny a biele bodky pórovitosť vrchných stien [11]

Vo svojej práci Meier et. al [12] počítali hustotu energie bežným vzťahom 2.2. Hustota energie :

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

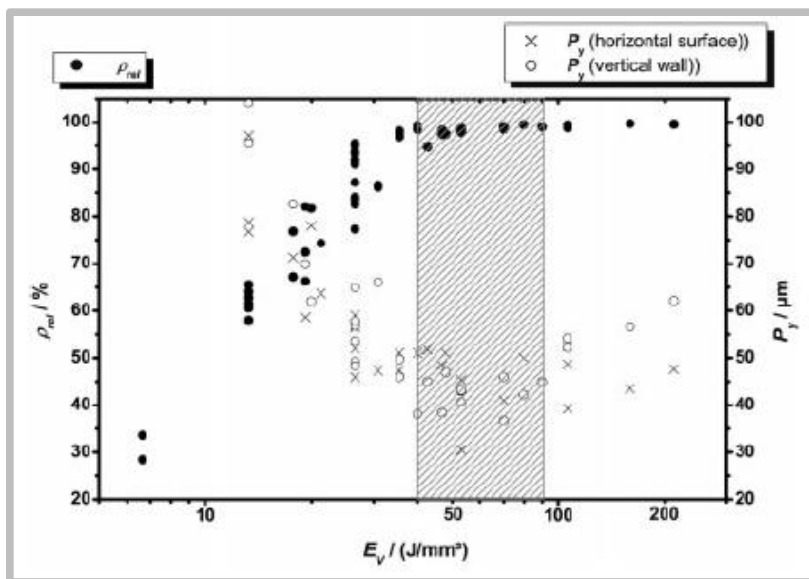
Kde P - výkon laseru, v - rýchlosť skenovania, t - hrúbka vrstvy.

Procesné parametre použité v tejto práci boli. Ochranná atmosféra argón, hrúbka vrstvy 75  $\mu\text{m}$ , skenovacia stratégia a použitá skenovacia stratégia "bidirectional" (viď. obr. 2.10), kde sa mení smer po každej vrstve o 90°. Vzorok boli kocky o rozmere 8x8x8 mm<sup>3</sup>.



Obr. 2.10 Stratégia "bidirectional" [12]

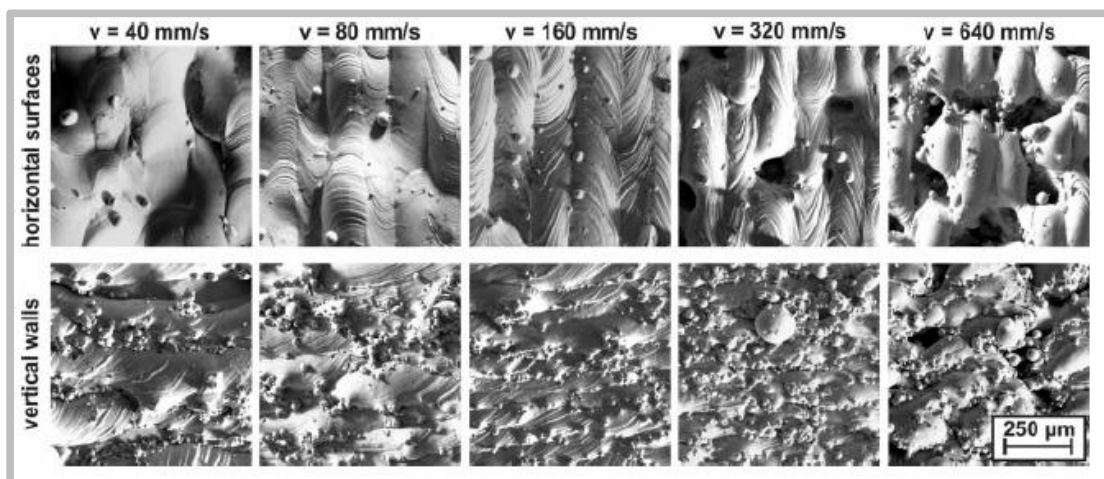
Nakoľko je vzťah (2.2) častejšie používaný k výpočtu hustoty energie, bude potrebné pre porovnanie výsledkov nutné prepočítať hustoty energie z práce [4] podľa zjednodušeného vzťahu 2.2. Z obrázku 2.11 je jasne vidieť že stabilne vyššie hustoty autori dosahovali pri hustote energie medzi 45 – 95 J/mm<sup>3</sup>, kedy sa hustota vzoriek blížila približne k 98 %.



Obr. 2.11 Dopad hustoty energie na relatívnu hustotu  $q_{rel}$  a profilovú charakteristiku  $P_y$  [12]



Optimálny výkon pre najvyššiu hustotu bol stanovený na 90 W a rýchlosť pre dosiahnutie najlepšieho povrchu (spojité dráhy a minimálna pórovitosť) na hodnotu 160 mm/s. Pri tejto hodnote vykazovali najlepšie vlastnosti vzoriek stavaných vertikálne aj horizontálne (vid'. obr. 2.12).



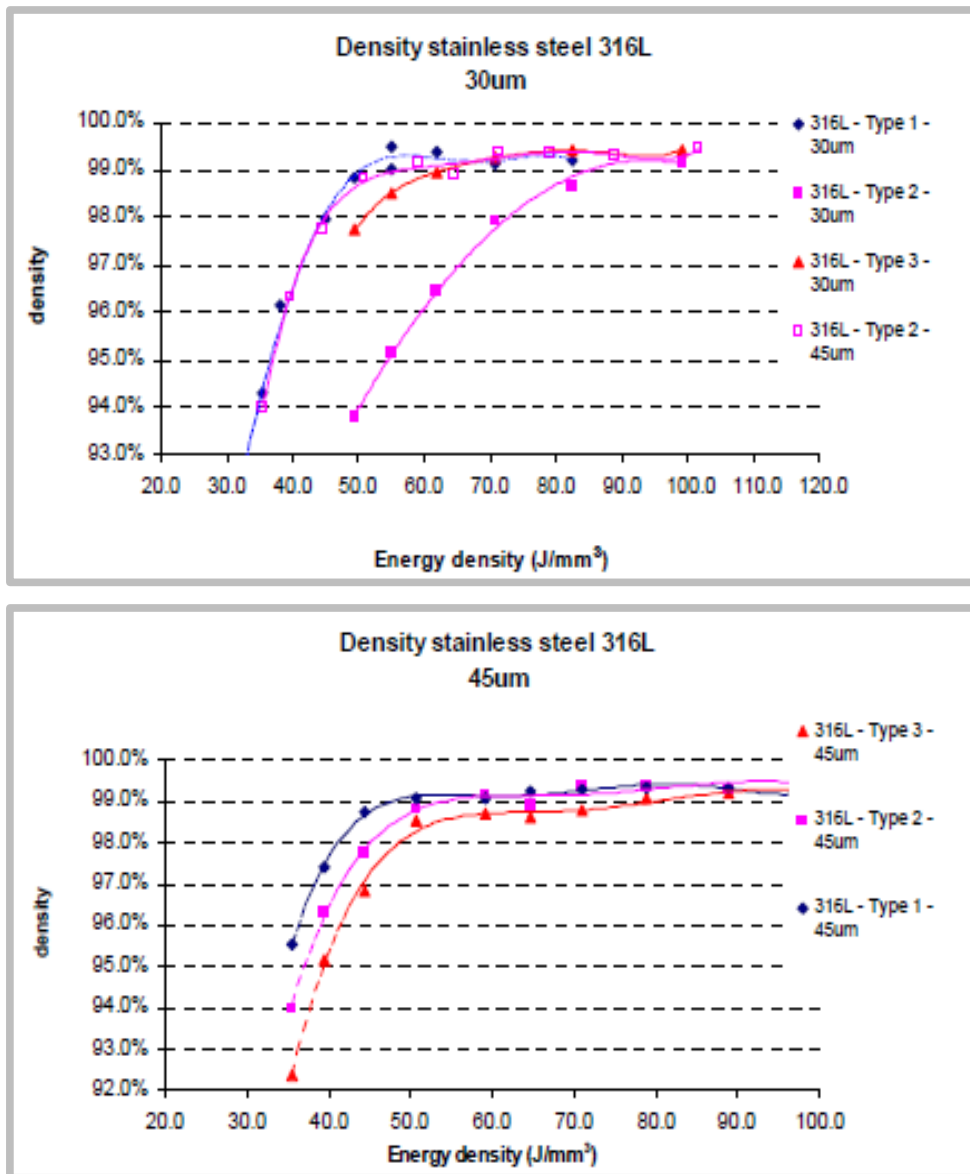
Obr. 2.12 SEM – Mikrografické snímky horizontálneho povrchu (hore) a vertikálnych stien (dole) pri rozdielnych nastaveniach skenovacej rýchlosti. (výkon laseru pri experimente 90W)) [12]

V ďalšej práci Spierings et. al. [13] skúmali vplyv hustoty energie na výslednú hustotu vzoriek. Hustota energie bola počítaná podľa vzťahu 2.2. Štúdia bola doplnená o vplyv vlastností prášku (veľkosť častíc, relatívna hustota, a priemery častíc) na výslednú hustotu. Autori sa zamerali na 3 používané prášky z nerezovej ocele 316L, ktoré sa líšili hlavne veľkosťou častíc (vid'. tab. 2.2), použili dve hrúbky vrstiev a to 30 µm a 45 µm. Rozmery testovacích vzoriek boli 12x12x12 mm<sup>3</sup>, procesné parametre pri zmenách skenovacích rýchlostí boli nasledovné: hrúbka vrstvy 30-45 µm, výkon laseru 104 W, šrafovací rozstup 0,13 mm a skenovacia rýchlosť sa menila medzi hodnotami 250 – 800 mm/s.

Powder No.	316L – Type 1	316L – Type 2	316L – Type 3
D <sub>10</sub> [µm]	6.3	19.91	15.64
D <sub>50</sub> [µm]	15.05	28.19	37.00
D <sub>90</sub> [µm]	30.79	41.31	59.69
D <sub>50</sub> / D <sub>10</sub>	2.4	1.4	2.4
Tap density [g/cm <sup>3</sup> ]	4.8	4.6	4.7
Relative powder density	≈ 60.1%	≈ 57.6%	≈ 58.9%
Span S [ - ] [19]	1.63	0.76	1.19

Tab. 2.2 Prášky z 316L používané na produkciu testovacích vzoriek [13]

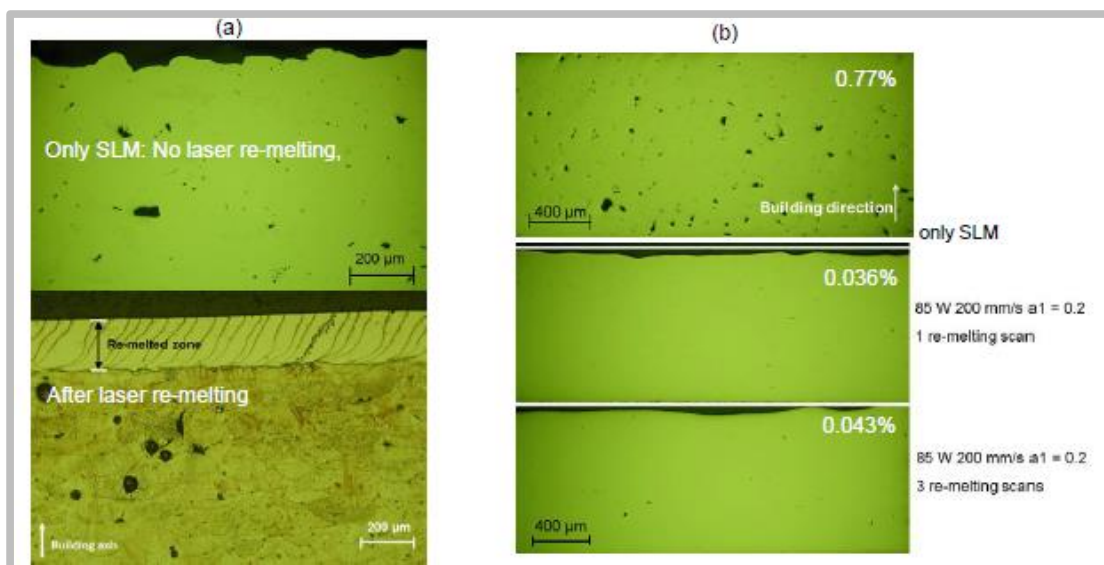
Z výsledkov vyplynulo, že bez jemných zrn, ktoré sú schopné vyplniť medzery medzi hrubými zrnami, sú nutné nižšie rýchlosti skenovania, aby sa vytvárali husté diely. Hustoty energií použité na výrobu jednotlivých vzoriek sú zobrazené na obrázku 2.13.



Obr.2.13 Vplyv hustoty energie na výslednú hustotu pri hrúbke vrstiev 30 a 45 µm [13]

Výsledky pri rôznych hustotách energií viedli k vyrobiteľnosti súčastí s hustotou okolo 99,5%, za použitia všetkých troch typov práškov. Pri použití hustôt energie v rozmedzí 50 – 100 J/mm<sup>3</sup> v závislosti na type prášku. Tak isto sa ukázalo, že hrúbka vrstvy má minimálny vplyv na výslednú hustotu.

V ďalšej práci [14] sa Yasa et.al. pokúšali vyriešiť zostatkovú pórovitosť 1-2 % súčastí vyrobených metódou SLM, ako jedno z možných riešení sa ukázal takzvaný re-melting - spočítava v opakovanom pretavovaní už existujúcej skenovanej vrstvy pred položením ďalšej vrstvy. Pre dosiahnutie maximálnej hustoty boli použité procesné parametre: rýchlosť skenovania 380 mm/s, výkon laseru 105 W, šrafovací rozstup 125  $\mu\text{m}$  ( $A1 = 70\%$ ) a spot diameter 180  $\mu\text{m}$  (priemer laseru na základnej doske) a hrúbka vrstvy 30  $\mu\text{m}$  podľa odporúčaní výrobcu pre zariadenie Concept laser M3. Ďalej pri re-meltingu boli použité tieto parametre: rýchlosť skenovania 200 mm/s, výkon laseru 85 W, spot size 180  $\mu\text{m}$ . Výsledná štruktúra pri použití re-meltingu je zobrazená na obr. 2.14. Pri re-meltingu vykazovali vzorky z nerezovej ocele 316L zníženie drsnosti z 12  $\mu\text{m}$  až na 1,5  $\mu\text{m}$ . Súčiastka bez použitia laser re-meltingu, vykazovala pórovitosť asi 0,77%, pričom re-melting ďalej zníži pórovitosť vzoriek až na hodnotu 0,036 % pri nastavení správnych parametrov.



Obr.2.14 a.) Dopad re-meltingu na kvalitu povrchu (50mm/s, 85 W,  $a1 = 0,1$ ) aplikovaného na vrchnú vrstvu b.) Mikroskopické snímky vzoriek bez re-meltingu (hore) a s re-meltingom s rozdielnymi parametrami [14]

Z výsledkov vyplýva, že re-melting pri troch skenovaniach zvyšuje hustotu súčastí takmer na 100 % a tiež znižuje drsnosť povrchu asi o 90 %, ale za cenu zvýšenia času výroby.

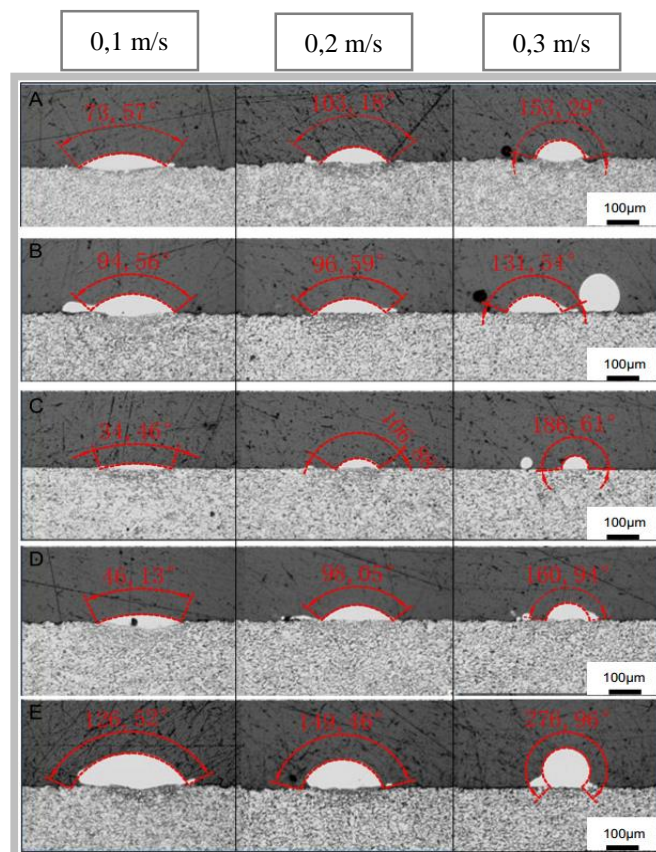
Autori Zhang et. al. [15] sa vo svojej práci zamerali na skúmanie ostatných procesných parametrov, ako sú predohrev základnej dosky a úprava základnej dosky, ktoré ovplyvňujú hustotu a mechanické vlastnosti vyrobených objektov.

V prvej časti článku testujú procesné parametre metódou, kedy vyrábajú jednotlivé „návary“ (single track) s rôznym nastavením výkonu laseru, povrchom základnej dosky (otrysaný povrch, lesklý povrch), hrúbkou vrstvy nanášaného prášku a rýchlosťou skenovania laseru (tab. 2.3).

Séria	Výkon laseru [W]	Povrch dosky	Hrúbka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
A	100	Otryskaný	50
B	80	Otryskaný	50
C	100	Brúsený	50
D	100	Otryskaný	75
E	100	Otryskaný	100

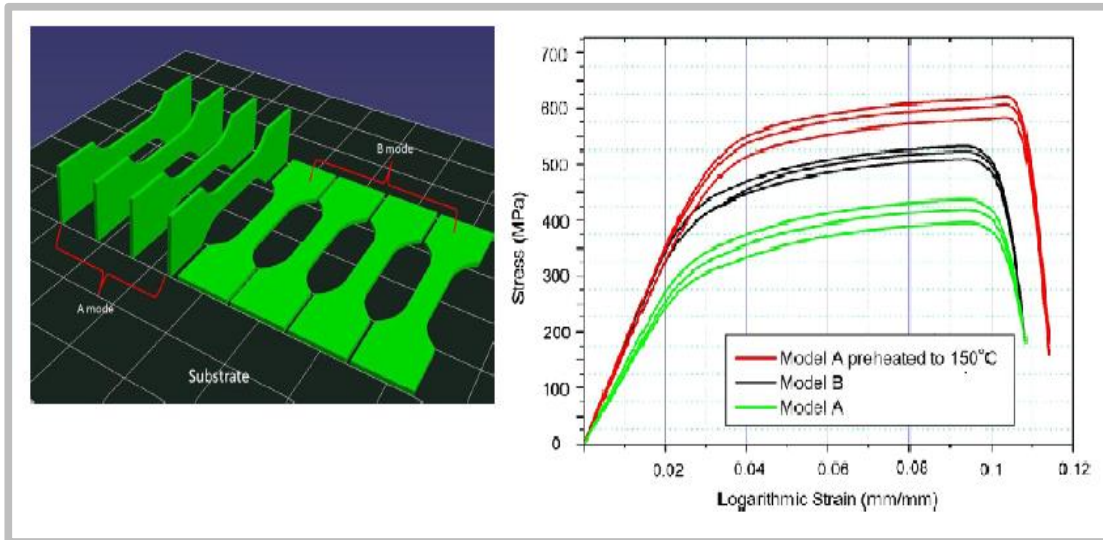
Tab. 2.3 Tabuľka nastavených procesných parametrov [15]

Analýza návaru ukazuje, že nízka skenovacia rýchlosť a vysoký výkon laseru môže viesť k rôznym tvarom návaru. Tvar a veľkosť návaru je dôležitý parameter. Pokiaľ sa susedné návary neprekrývajú, vznikajú materiálové vady a sú degradované mechanické vlastnosti. Optimálne nastavenia pre materiál SS 316L boli určené nasledovne  $P=100$  W, skenovacia rýchlosť  $v = 0,3$  m/s a hrúbka vrstvy prášku je  $50 \mu\text{m}$ .



Obr.2.15 Tvar návarov s rôznym nastavením parametrov [15]

Ďalej v článku testovali mechanické vlastnosti skúšobných telies z materiálu SS 316L pri ktorých bola menená poloha vzorku pri výrobe a teplota predhrevu základnej dosky (viď. obr.2.16).



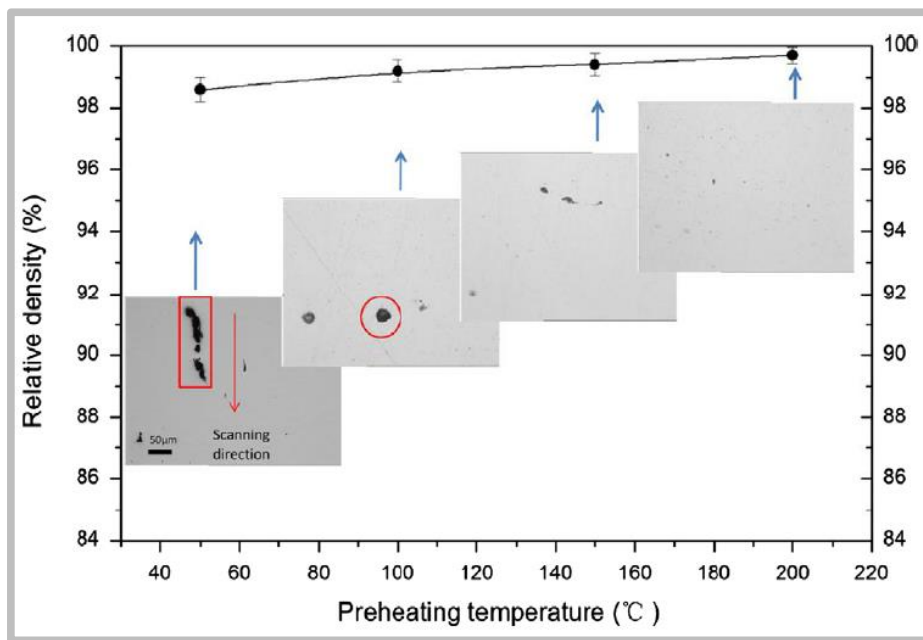
Obr. 2.16 Vplyv výrobnjej orientácie a predhrevu na mechanické vlastnosti [15]

Získané mechanické vlastnosti materiálu sú zobrazené v tabuľke 2.4 a sú porovnané zo štandardným liatym materiálom.

	Pevnosť v ťahu [MPa]	Youngov modul [GPa]
Model A pri izbovej teplote	501,1 ± 8,3	151,5 ± 13,1
Model B pri izbovej teplote	547,6 ± 4,9	193,1 ± 4,1
Model A s prehriatim 150 °C	549 ± 35 2	194,8 ± 14,5
Bežná SS 316L	500 - 550	200

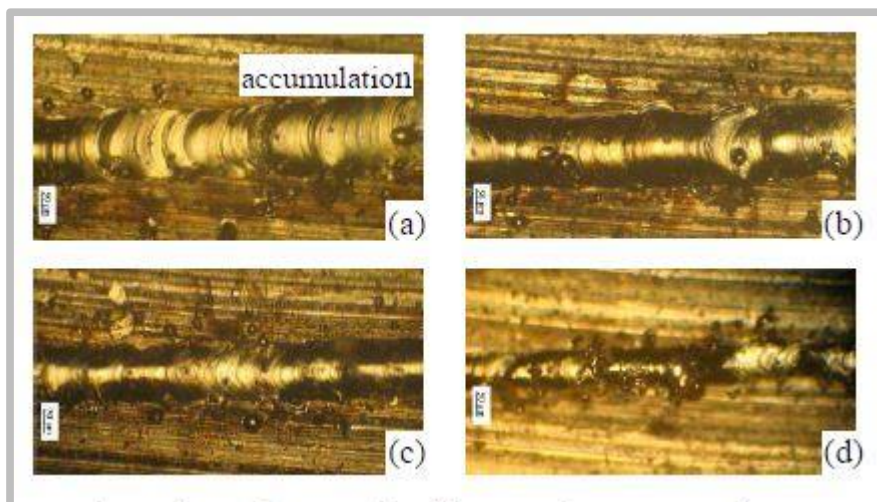
Tab..2.4 Hodnoty medze klzu a Youngovho modulu [15]

Z výsledkov tlakovej skúšky je zrejmé, že vyhrievanie základnej dosky má významný vplyv na vznik materiálových vád a tým pádom na mechanické vlastnosti vyrábaných vzoriek, rozmerovú presnosť a na hustotu vyrobených vzoriek (viď. obr. 2.17). Ako vhodné nastavenie predhrevu pre výrobu SS 316L uvádzajú hodnotu  $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



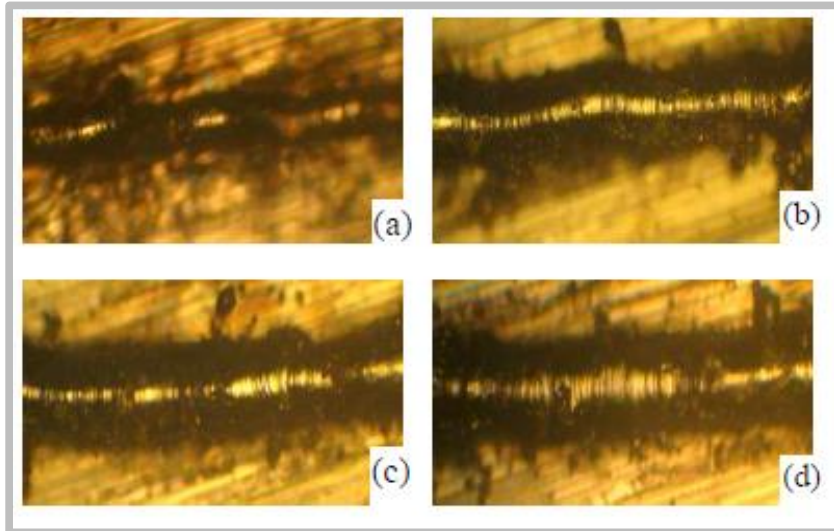
Obr.2.17 Vplyv predhrevu na výslednú hustotu [15]

Autori v ďalšej štúdií [16] sa Wei et. al. zaoberali tak isto dopadom procesných parametrov (skenovacia rýchlosť, výkon laseru, skenovací rozstup, hrúbka vrstvy a skenovacia stratégia) na kvalitu povrchu, vznik balling efektu a hustotu súčastí vyrobených metódou SLM. Ukázalo sa, že kvalita návarov je ovplyvnená najmä výkonom laseru a skenovacou rýchlosťou. Najskôr nastavili výkon laseru na hodnotu 98 W a menili skenovacie rýchlosti (30,90,120,300 mm/s). Z obrázku 2.18 je vidieť, že ideálnu šírku a spojitosť dosahovali pri rýchlosti skenovania 90 mm/s.



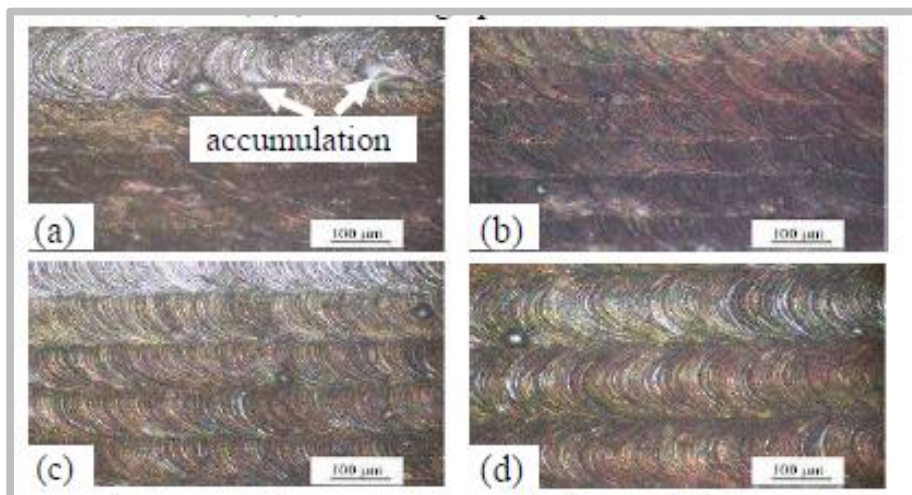
Obr.2.18 Tvary návorov za použitia rovnakého výkonu laseru ale rozdielnych skenovacích rýchlostí a.) 30 mm/s b.) 90 mm/s c.) 120 mm/s d.) 300 mm/s [16]

Potom nastavili rýchlosť skenovania 90 mm/s a naopak menili výkon laseru, výsledky (vid'. obr. 2.19) ukazujú, že pokiaľ je výkon laseru medzi 80 - 98 W návary sú rovné, pri malom výkone laseru sa nevytvárali dostatočne spojitý návary, čo bolo spôsobené nedostatkom energie, naopak pri vysokom výkone bola šírka návarov väčšia ale klesala kvalita povrchu.



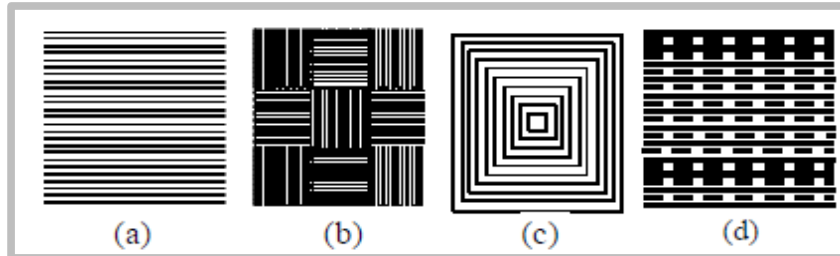
Obr. 2.19 Morfológia návarou za použitia rovnakej skenovacej rýchlosti 90 mm/s a zmeny výkonu laera a.) 40 W b.) 80 W c.) 90 W d.) 98 W [16]

Ďalej ukázali že veľké skenovacie vzdialenosti (scanning space ) spôsobujú, že návary nie sú dostatočne blízko seba, tým pádom vytvárajú nespojitý povrch. Z experimentu je jasne vidieť že najlepšie prekrytie jednotlivých vrstiev vykazoval rozstup vrstiev 0,07 mm (vid'. obr. 2.20b) .

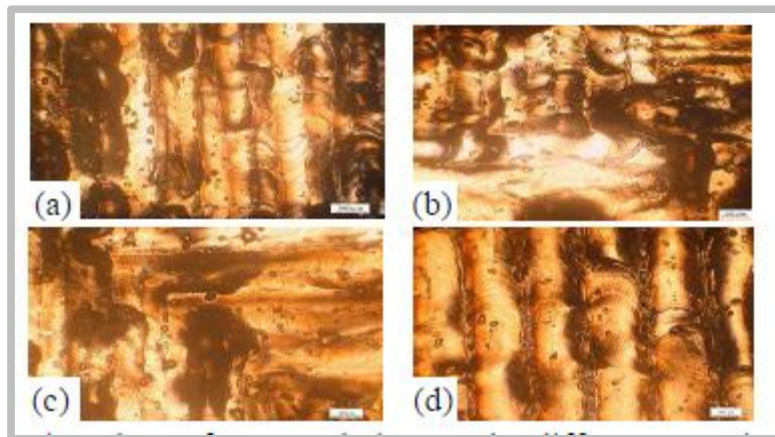


Obr.2.20 Povrch vzoriek pri rozdielnych skenovacích rozstupoch (výkon laseru 98 W, skenovacia rýchlosť 90mm/s a.) 0,03 mm b.)0,07 mm c.) 0,10 mm d.) 0,12 mm [16]

Ďalej skúmali vplyv skenovacích stratégií na výsledný povrch vzoriek (viď. obr. 2.21) pri nastavených výrobných parametroch: rozstup vrstiev 0,1 mm a skenovacia rýchlosť 90 mm/s. Zo skúmaných skenovacích stratégií dosahovala najlepšie výsledky metóda "jumping and turning", kde druhý skenovací ohrev odstraňuje napätie, redukuje akumuláciu tepla a zabraňuje balling efektu (viď. obr. 2.22).



Obr.2.21 Vyobrazené skenovacie stratégie a.) layers and turning b.) blocks and turning c.) internal to external circular d.) jumping and turning [16]



Obr. 2.22 Povrch vzoriek pri rozdielnych skenovacích rozstupoch (výkon laseru 98 W, skenovacia rýchlosť 90mm/s a.) 0,03 mm b.)0,07 mm c.) 0,10 mm d.) 0,12 mm [16]

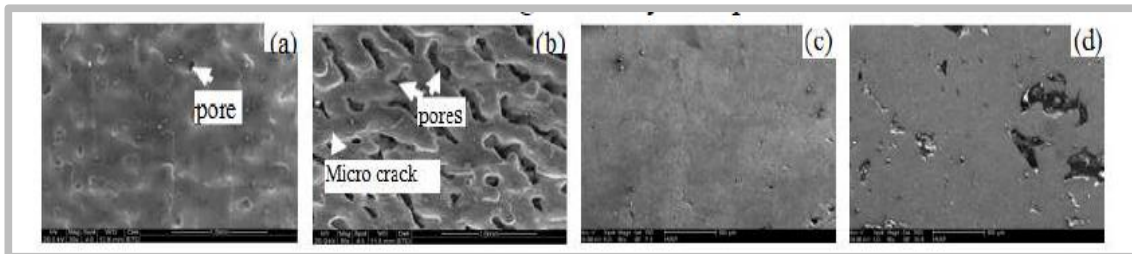
Nakoniec skúmali vplyv hrúbky vrstvy na výslednú hustotu komponentov, čo môžeme vidieť v tabuľke 2.5 .

t - hrúbka vrstvy	v = 90 mm/s	v= 120 mm/s	v = 120 mm/s	v = 150 mm/s
0,10 mm	90	79,4	78,1	77,30
0,15 mm	86,2	77,2	74,4	71,50

Tab. 2.5 Výsledky hustoty pri rozdielnych procesných parametroch (P = 98W)



Ukázalo sa, že hustota sa so zvyšujúcou hrúbkou vrstvy znižuje. Ak je hrúbka vrstvy 0,1 mm, povrch komponentov a vnútorná morfológia komponentov je hladká (smooth) s menej pórmi, pri zvyšovaní hrúbky vrstvy povrch začína byť nerovný a vznikajú väčšie póry a mikro trhliny (vid'. obr. 2.23), toto ale platí iba pri rovnakej hustote energie.

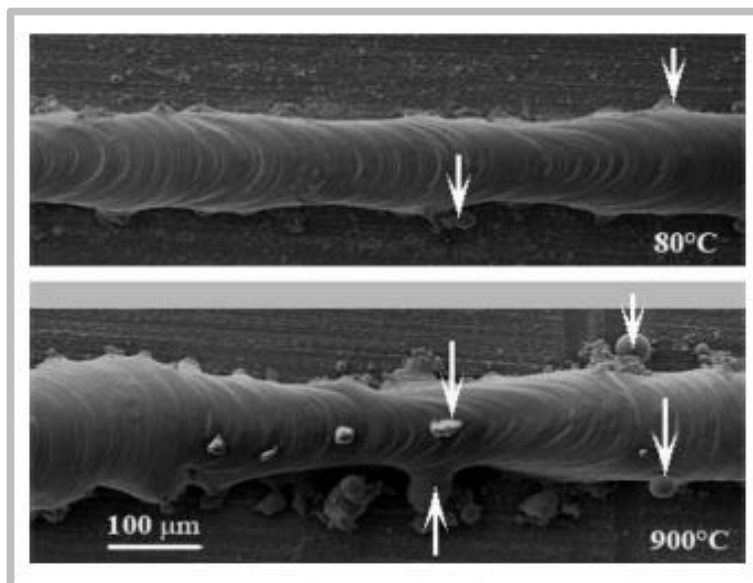


Obr. 2.23 Povrch a vnútorná morfológia ( $P = 98 \text{ W}$ , skenovacia rýchlosť  $90 \text{ mm/s}$ , skenovací rozostup  $0,07 \text{ mm}$ ) a.) morfológia povrchu pri hrúbke vrstvy  $0,1 \text{ mm}$  b.) morfológia povrchu pri hrúbke vrstvy  $0,15 \text{ mm}$  c.) vnútorná morfológia pri hrúbke vrstvy  $0,1 \text{ mm}$  d.) vnútorná morfológia pri hrúbke vrstvy  $0,15 \text{ mm}$  [16]

Stanovené optimálne parametre po sérii experimentov sú nasledovné : Výkon laseru  $98 \text{ W}$ , skenovacia rýchlosť  $90 \text{ mm/s}$ , šrafovací rozostup  $0,07 \text{ mm}$ , hrúbka vrstvy  $0,1 \text{ mm}$  a skenovacia stratégia "jumping and turning".

V ďalšej štúdií sa Yadroitsev et. al. [17] zamerali na vplyv procesných parametrov (rýchlosť skenovania a predhrev) na vlastnosti návarov . Jednotlivé vzorky boli vyrobené pri procesných parametroch:  $50 \text{ W}$ , spot diameter  $70 \mu\text{m}$ , hrúbka vrstvy  $80 \mu\text{m}$ .

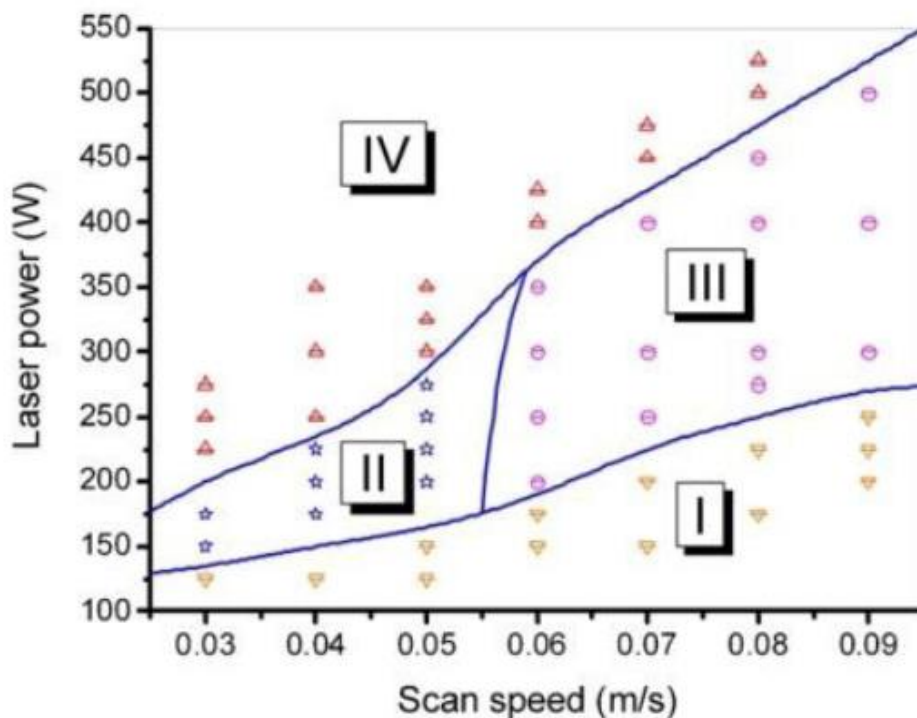
Pri teplotách predhriatia medzi  $700 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ , bola pozorovaná najväčšia miera balling efektu (vid'. obr. 2.24). Pre vznik ballingu pri vyšších teplotách je lepšie kontrolovať mikroštruktúru pomocou skenovacej rýchlosti.



Obr. 2.24 Pohľad na návar pri  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  pri rýchlosti skenovania  $0,12 \text{ m/s}$  Biele šípky označujú stality [17]

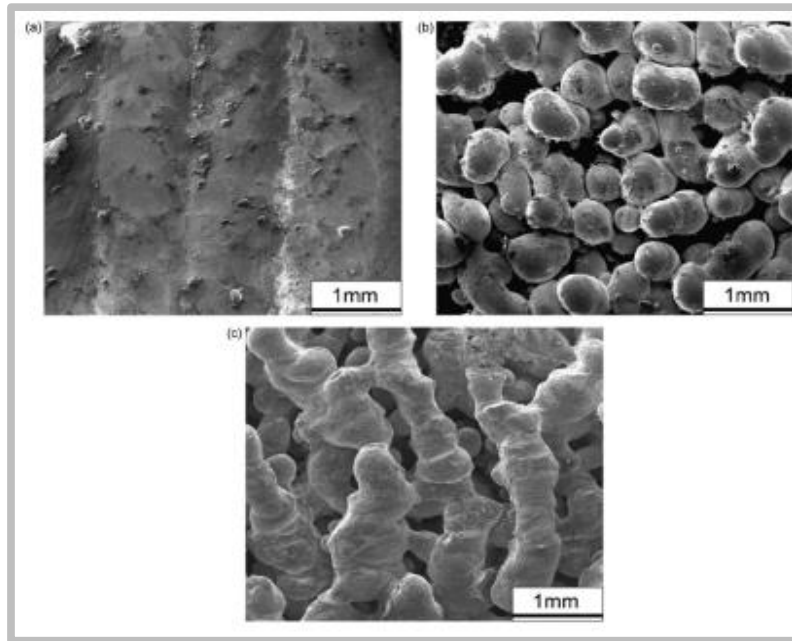
Autori Hanzl et. al. [18] v ďalšom článku sa zamerali na sumarizáciu dopadu procesných parametrov na mechanické a štruktúrne vlastnosti materiálu .

Ako sa ukázalo aj v predchádzajúcich prácach najväčší vplyv na mechanické vlastnosti a výslednú štruktúru mali výkon laseru a rýchlosť skenovania, ich kombinácia významne ovplyvňuje veľkosť dendritických kryštálov (typ kryštálov, ktoré vznikajú pri tuhnutí), štruktúru a tiež povrch. Na obrázku 2.25 je vidieť vplyv kombinácie týchto parametrov na výslednú štruktúru. V oblasti I veľké množstvo prášku ostáva vo svojom východiskovom stave. Oblasť II ( $v < 0,06$  m/s ) nastáva parciálne tavenie, spekajú sa neroztavené jadrá s hrubými guľôčkami. Oblasť III ( $v > 0,06$  m/s) nastáva tavenie s balling efektom. Oblasť IV v tomto prípade nastáva kompletne tavenie a vzniká jednoliaty pevný povrch.



Obr.2.25 Závislosť štruktúry na procesných parametroch [18]

Jednotlivé výsledné povrchy sú zobrazené na obrázku 2.26 . Obrázok 2.26 a.) zobrazuje oblasť IV pri výkone laseru bol 300 W a skenovacia rýchlosť 0,05 m/s, b.) oblasť III štruktúra pri výkone laseru 300 W a skenovacej rýchlosti 0,08 m/s, kde je jasne viditeľný balling effect , c.) oblasť medzi II a IV pri znížení výkonu na 250 W a rýchlosti skenovania 0,05 m/s môžeme vidieť štruktúru s otvorenými pórmami . Táto štruktúra nevykazuje krehkosť typickú pre balling, pretože energia je tu dostatočne vysoká a aglomeráty boli spojené silnými väzbami ("mostíky"). Je vidieť, že najlepšiu mikroštruktúru a tým pádom aj najlepšie hustotu vzoriek dostávame v oblasti IV. V tejto práci bol overený výkon 300W a skenovacia rýchlosť 0,08 m/s (viď obr. 2.26).



Obr.2.26 Štruktúra vzoriek a.) plne konzistentný povrch b.) povrch s balling fenoménom c.) porózna štruktúra [18]

Ďalej skúmali vplyv uhlu šrafovania . Tabuľka 1 ukazuje dopad jednotlivých uhlov šrafovania na mechanické vlastnosti. Je vidieť že najlepšie mechanické vlastnosti boli získané pri uhle šrafovania  $105^\circ$  (viď. tab. 2.6)

Hatch angle ( $^\circ$ )	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)	$\sigma_{0.2}/UTS$
90	530-551	696-713	32.4-43.6	0.77
105	566-570	714-717	40.6-42.8	0.79
120	540-545	682-685	36.5-37.9	0.79
135	541-556	691-693	36.6-38.4	0.79
150	534-555	698-703	39.6-40.4	0.78

Tab.2.6 Dopad uhlu šrafovania na mechanické vlastnosti vzoriek [18]

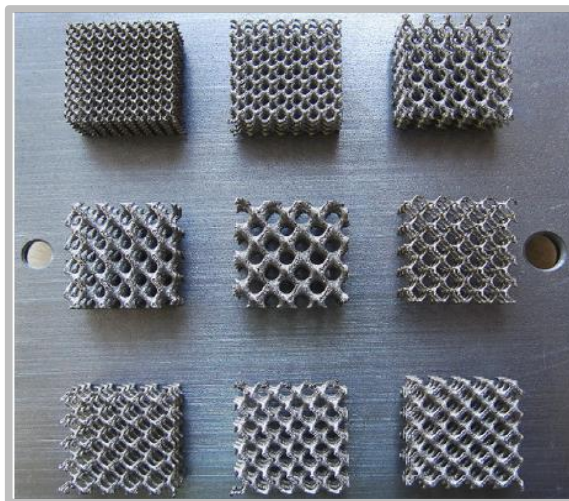
Nakoniec skúmali vplyv hrúbky vrstvy na mechanické vlastnosti . Ukázalo sa že hrúbka vrstvy a prekrytie vrstiev nemali veľký význam na mechanické vlastnosti. Majú ale dopad na výrobný čas súčastí . Meranie bolo vykonané pri nasledovných parametroch: výkon lasera 200W, rýchlosť skenovania 0,25 m/s, uhol šrafovania  $90^\circ$ , stavebný smer  $0^\circ$  a hrúbku vrstvy sa menila v rozmedzí medzi 20 - 40  $\mu\text{m}$  . Ukázalo sa, že hrúbka vrstvy nemá vplyv na ťažnosť a pevnosť (viď. tab.2.7). Toto zistenie potvrdzuje výsledky z práce.[13] Tiež sa ukázalo že veľkosť presahu vrstiev nemá zasedný vplyv na mechanické vlastnosti.

Layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)	$\sigma_{0.2}/\text{UTS}$
20	530-551	696-713	32.4-43.6	0.77
30	519-533	666-687	40.8-41.8	0.78
40	541-545	694-703	39.0-42.3	0.78
ANSI	$\geq 205$	$\geq 520$	$\geq 40$	0.39

Tab..2.7 Mechanické vlastnosti vzoriek při zmeni hrúbky vrstvy [18]

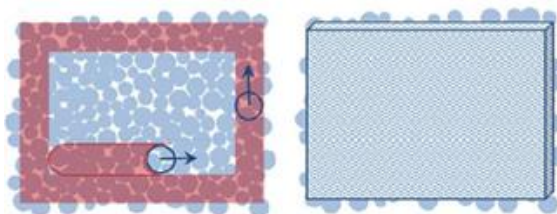
V ďalšej práci sa autori Yan et.al. [19] venujú gyroidnej (“Schoen gyroid“) štruktúre. Gyroidná štruktúra pozostáva z kruhovej vzpery a sférického jadra a vyznačuje sa samonosnými vlastnosťami. Nie je potrebné použitie podpernej konštrukcie ako pri bežnej bunkovej štruktúre, ktorá má priame vzpery a mnohostenné jadro. Použité vzorky mali rozmery 25x25x25 mm (vid'. obr. 2.27). Optimalizované procesné parametre pri výrobe boli: výkon laseru 95 W, doba expozície na bod 250  $\mu\text{s}$ , vzdialenosť bodov 75  $\mu\text{m}$ , hrúbka vrstvy 75  $\mu\text{m}$  a použitá inertná atmosféra 1%  $\text{O}_2$ .

Po sérii experimentov zistili, že na povrch vzpier sa viaže množstvo častíc,



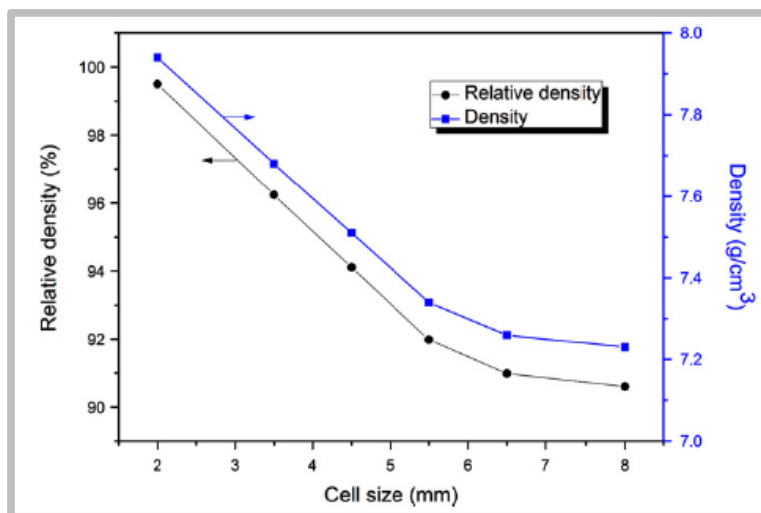
Obr.2.27 Vyrábané vzorky s rôznou objemovou frakciou [19]

tento jav bol pozorovaný pri oceli 316L. Pre zabránenie tomuto javu by mal byť použitý prášok s menšou veľkosťou častíc. Obrázok 2.28 zobrazuje princíp vzniku nečistôt na povrchu.



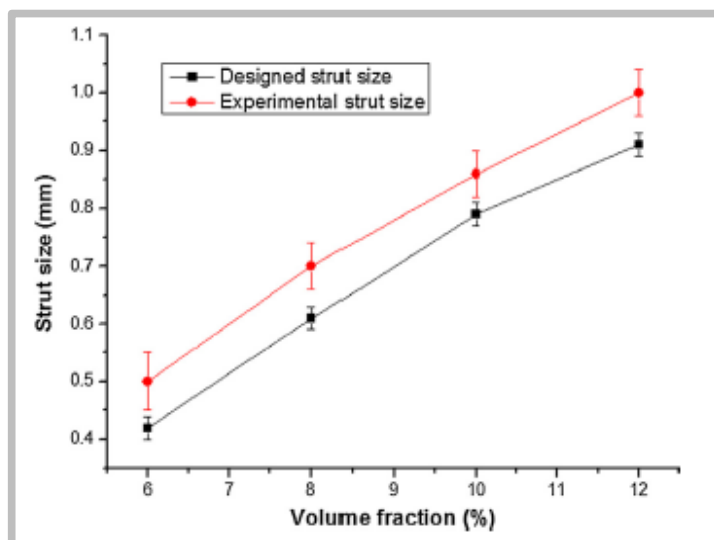
Obr.2.28 Vznik nečistôt na povrchu vzpery [19]

Ďalej skúmali vplyv veľkosti buniek na výslednú hustotu. Ukázalo sa, že vzpery v rámci mriežkovej štruktúry s malými bunkovými rozmermi majú vyššie hustoty. Napríklad pri veľkosti bunky 2 mm majú relatívnu hustotu 99,5 %, čo je značne viac ako pri veľkosti buniek 8 mm, kedy je relatívna hustota 90,6 % (viď. obr.2.29). Tento jav spôsobuje kratší vektor dĺžky skenovania, ktoré vznikajú pri zmenšení plochy skenovania a lepšie podmienky zmáčavosti, pri ktorých sú vyrábané menšie bunkové veľkosti gyroidných štruktúr.



Obr.2.29 Vplyv veľkosti buniek na výslednú hustotu gyroidnej štruktúry [19]

Autori [20] rozšírili prácu [19] o zistenie minimálnej objemovej frakcie, kedy je možné ešte vyrobiť vzpery. Objemová frakcia je percento pevného materiálu v objeme. Minimálna objemová frakcia, ktorú je možné vyrobiť bola stanovená na 6 %. Reálny priemer vzpery sa zvyšuje s objemovou frakciou takmer priamo úmerne ale vždy vyšší v porovnaní s navrhovaným CAD modelom, tak isto sa zvyšuje aj objemová frakcia, keďže priemer vzpier sa zväčšuje (viď. obr.2.30).



Obr. 2.30 Vplyv objemovej frakcie na veľkosť vzpier, červená vyrobený rozmer, čierna navrhovaný rozmer [20]

**2.3.2 Zhrnutie pre zliatinu 316L**

V tabuľke 2.8 sú zhrnuté použité hustoty energií v jednotlivých prácach a hodnoty výsledných hustôt vzoriek vyrobených pomocou týchto nastavení. Hustoty energií sú počítané podľa vzťahu 2.2. Pre príklad uvádzam vzorový prepočet podľa údajov z práce [11]. Z tabuľky 2.8 je jasne vidieť že hustota v rozmedzí 60 - 80 J/mm<sup>3</sup> bude dávať najlepšie hustoty vyrobených objektov okolo 99%. Hodnota hustoty energie 155,56 síce nespadá do tohto rozmedzia, to ale môže byť spôsobené použitím výrazne odlišnej skenovacej stratégie. Dobré hustoty je možné dosahovať pre vzorky v tvare kocky aj pre bunkové štruktúry.

Rýchlosť skenovania :

$$v_{scan} = \frac{s}{t} = \frac{\text{vzdialenosť bodov}}{\text{doba expozície}} = \frac{50 \mu\text{m}}{126 \mu\text{m}} = 0,396 \text{ m/s} \quad (2.3)$$

Dosadenie do vzťahu 2.2:

$$Ev = \frac{P_{laser}}{v_{scan} \cdot s_{hatch} \cdot t_{Layer}} = \frac{180 \text{ W}}{400 \text{ mm/s} \cdot 126 \mu\text{m} \cdot 10^{-3} \cdot 50 \mu\text{m} \cdot 10^{-3}} = 71,42 \text{ J/mm}^3$$

Výkon laseru P[W]	Vscan [mm/s]	šraf. Rozstup[mm]	hrúbkavrstvy[mm]	E [W]	Práca	Hustota [%]
180	400	0,126	0,05	71,43	[4]	99,62
90	160	-*	0,075	45 - 95	[16]	98
104	-**	-*	-**	50 - 100	[19]	99,5
105	380	0,125	0,03	73,68	[9]	99,23
85	50	-*	0	remeting	[9]	99,96
98	90	0,07	0,1	155,56	[8]	návary
50	150	0,07	0,08	59,52	[18]	návary
95	-*	0,075	0,075		[10 a 15]	99,50
100	300	-*	0,05		[1]	> 99

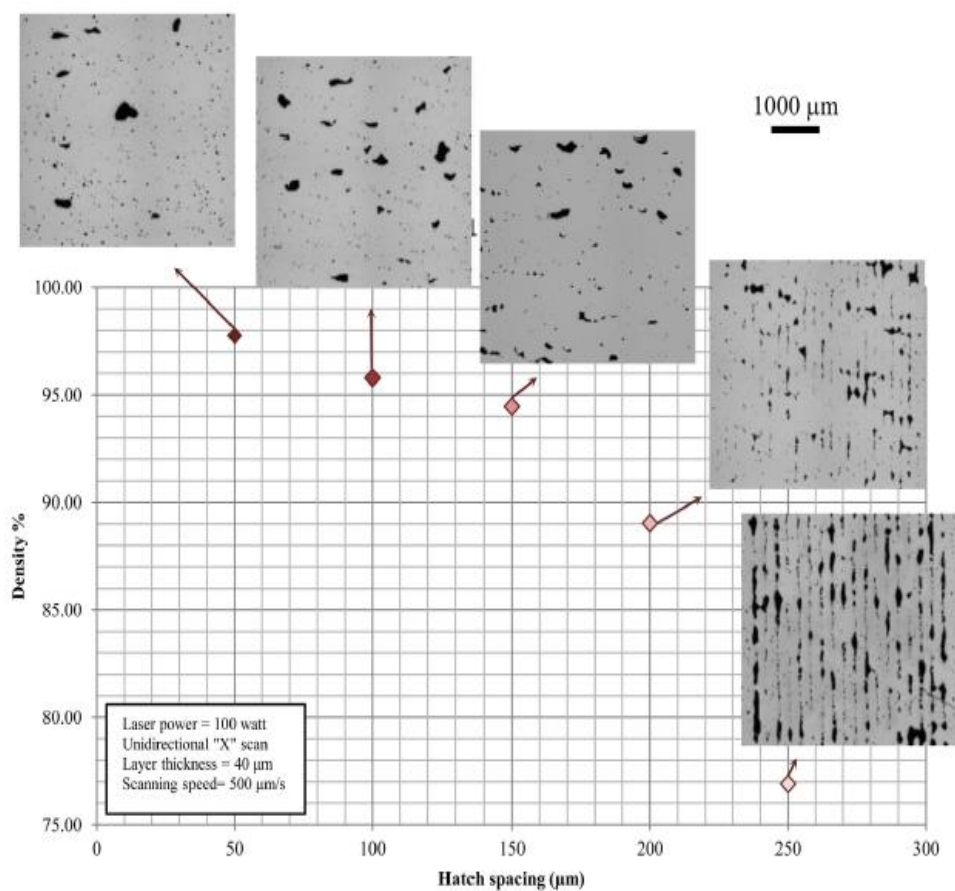
Tab.2.8 Zhrnutie parametrov -\* - neuvedené; -\*\* - meníme

## 2.3.3 Prášok zo zliatiny hliníku AlSi10Mg

2.3.3

Autori v prvej práci Aboulkhaira et. al. [21] sa zaoberali možnosťami ako redukovať pórovitosť súčastí vyrobených z AlSi10Mg. Vyrobené vzorky pre túto štúdiu mali rozmer  $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$  a základná doska bola vyhrievaná na  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Autori vyrobili 5 vzoriek so šrafovacími rozstupmi 50, 100, 150, 200, 250  $\mu\text{m}$ .

V prvej časti práce skúmali vplyv šrafovacieho rozstupu. Dôležitý presah medzi príľahlými vrstvami kovových lázní bol dosiahnutý pomocou šrafovacieho rozstupu 50 - 100  $\mu\text{m}$ , ako je vidieť, presah vrstiev úzko súvisí s výslednou hustotou vyrobených vzoriek (viď. obr. 2.31)



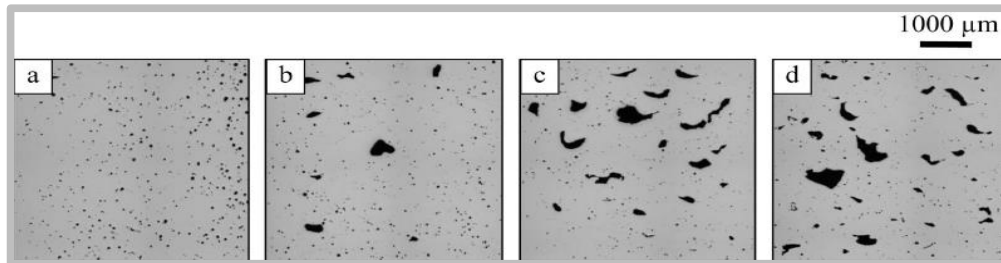
Obr.2.31 Efekt zmeny šrafovacieho rozstupu na výslednú hustotu [21]

Ďalej skúmali dopad skenovacej rýchlosti na výslednú štruktúru a hustotu vzoriek. Experiment vykonávali pri konštantnom výkone laseru nastavenom na hodnotu  $P = 100 \text{ W}$ , pri hrúbke vrstvy  $40 \text{ }\mu\text{m}$ , a rôznych skenovacích rozstupoch (50 -  $100 \mu\text{m}$ ). Optimálna rýchlosť skenovania pre získanie maximálnej hustoty vzoriek bola stanovená na  $500 \text{ mm/s}$ , pri použití šrafovacieho rozstupu  $50 \text{ }\mu\text{m}$  (viď. tab.2.9).

Šrafovací rozstup [ $\mu\text{m}$ ]	Skenovacia rýchlosť [mm/s]			
	250	500	750	1000
50	95,6 $\pm$ 1,8	97,7 $\pm$ 0,2	96,8 $\pm$ 1,6	96,9 $\pm$ 1,8
100	96,3 $\pm$ 0,6	95,8 $\pm$ 1,0	97,4 $\pm$ 1,4	96,3 $\pm$ 2,7

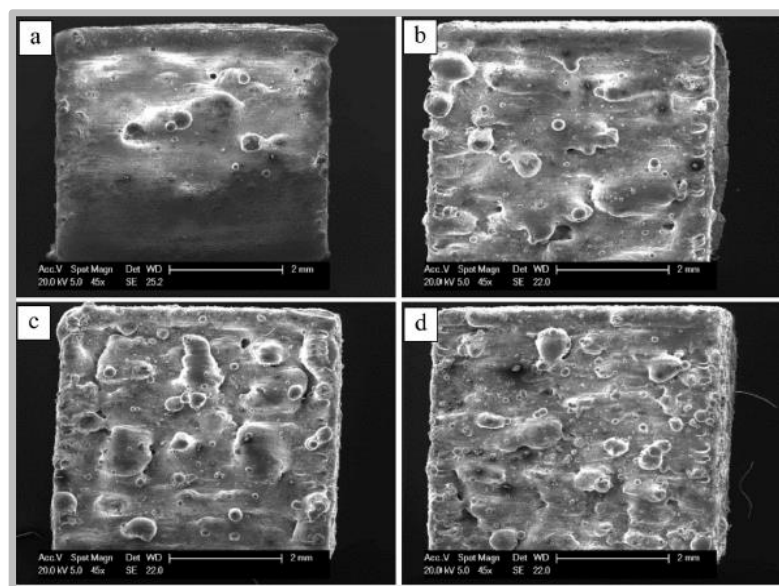
Tab.2.9 Hustota v % pri zmene šrafovacího rozstupu a skenovacej rýchlosti [21]

Mikroštruktúra pri jednotlivých pokusoch je zobrazená na obr.2.32. Pri rýchlosti 500 mm/s sa síce objavujú už aj keyhole póry (vznikajú pri rýchlom tuhnutí kovu bez úplného vyplnenia medzier), ale celkový počet pórov je menší ako pri ostatných nastavených skenovacích rýchlostiach.



Obr.2.32 Dopad skenovacej rýchlosti na štruktúru a.) 250 mm/s b.) 500 mm/s c.) 750 mm/s d.) 1000 mm/s [21]

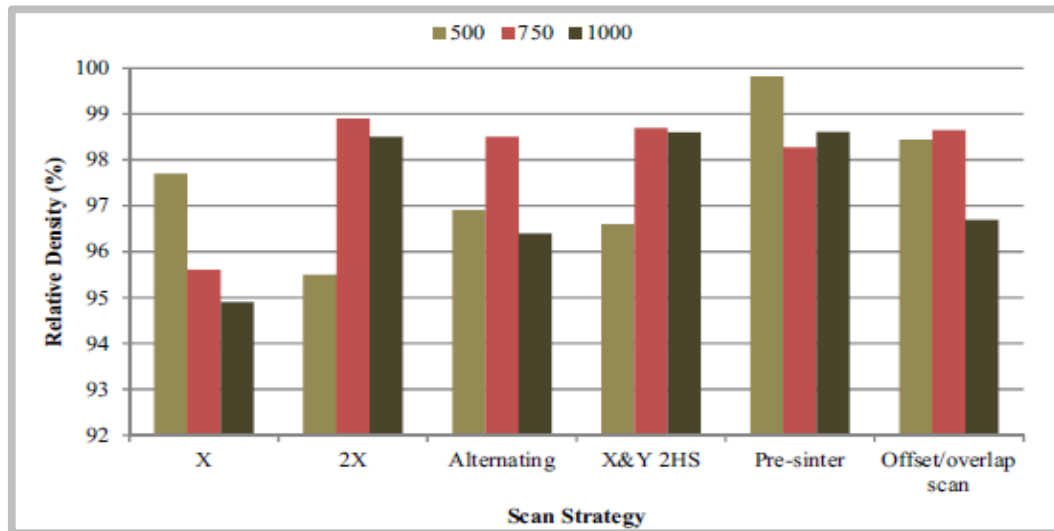
Zo záberov z počítačovej tomografie (CT) sa ukázalo, že so zvyšujúcou rýchlosťou skenovania sa vyskytujú poruchy ako sú balling, v ktorých sa pri zvyšujúcej rýchlosti skenovania zachytáva neúplne roztavený prášok, čo vedie pri nanášaní ďalšej vrstvy k tvorbe key-hole pórov a tým dochádza k znižovaniu hustoty vzoriek (viď. obr. 2.33).



Obr.2.332.6 balling zväčšujúci sa s vyššou skenovacou rýchlosťou [21]



Tento jav sa najlepšie podarilo eliminovať zmenou skenovacej stratégie na pre-sinter skenovaciu stratégiu, ktorá splošňuje povrch pred druhým skenovaním (viď obr. 2.34) a zároveň vedie k najlepšej hustote .



Obr.2.34 Dopad skenovacích stratégií na výslednú hustotu [21]

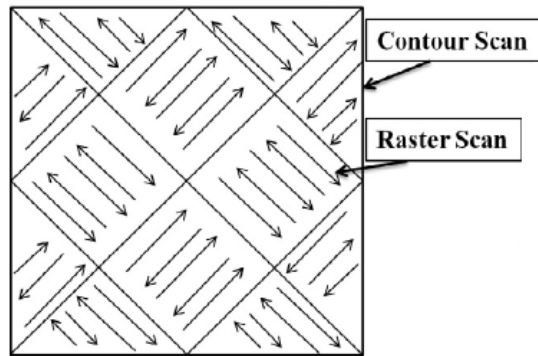
Nastavené procesné parametre pri jednotlivých skenovacích stratégiách sú vyobrazené v tabuľke 2.10.

Skenovacia stratégia	Počet skenovaní na vrstvu	Uni - bi-directional	1. Sken. parametre		2. Sken. parametre	
			Výkon [W]	Šraf. Rostup [ $\mu\text{m}$ ]	Výkon [W]	Šraf. Rostup [ $\mu\text{m}$ ]
X	1	Uni	100	50	-	-
2X	2	Uni	100	50	100	50
Alternating	1	Bi	100	50	-	-
X-Y 2HS	2	Bi	100	100	100	50
Pre-sinter	2	Uni	50	50	100	50
Presah	2	Uni	100	50	100	50

Tab.2.10 Rôzne parametre skenovacích stratégií [21]

Z predošlých experimentov boli ako najlepšie procesné parametre pre dosiahnutie maximálnej hustoty vybrané: rýchlosť skenovania 500 mm/s, šrafovací rozstup 50  $\mu\text{m}$ , výkon laseru 100 W, hrúbka vrstvy 40  $\mu\text{m}$  a skenovacia stratégia pre-sinter, čo viedlo k získaniu hustoty až 99,77 %  $\pm$ 0,08% .

V ďalšej práci autori Read et. al. [22] skúmali vplyv výrobných parametrov ako výkon laseru, šrafovací rozstup, veľkosť ostrovov (viď. obr. 2.35) na pórovitosť zliatin z AlSi10Mg. Vzorky pri tomto pokuse mali rozmer  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ .



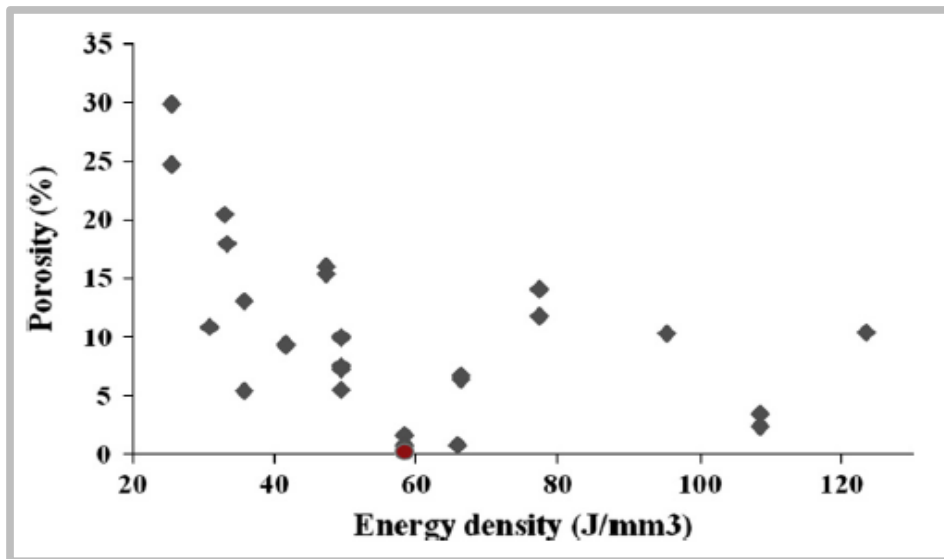
Obr.2.352.7 Schematicky zobrazený parameter island size (ohraničený štvorec) [22]

Pre dosiahnutie minimálnej pórovitosti autori použili štatistické metódy. Konkrétne štatistickou metódou z názvom ANOVA, podľa ktorej predikovali optimálne parametre. Vstupné hodnoty pre štatistický výpočet získali zo série 27 postavených vzoriek kde menili 4 hlavné procesné parametre výkon laseru, skenovaciu rýchlosť, šrafovací rozstup, veľkosť ostrovov (viď. obr. 2.35). Následne získané optimálne parametre pre minimálnu pórovitosť overili postavením 5 vzoriek. V tabuľke 2.11 je zobrazené porovnanie predikovaných a skutočných pórovitostí, kde vidno že najlepšie výsledky dosiahli pri použití procesných parametrov E, kde pórovitosť vzoriek dosahovalo hodnotu len 0,29 %, čo znamená hustotu až 99,71 %.

Vzorky	Výkon [W]	Sken. Rýchlosť [mm/s]	Šraf. Rostup [h/150 μm]	Island size	Pórovitosť [%]	
					Predpovedané	Namerané
A	175	1035	0,65	5,9	0,2	0,37
B	173	1025	0,65	6,5	0,2	0,38
C	175	1030	0,64	6	0,2	0,46
D	174	1026	0,65	6,2	0	0,61
E	175	1025	0,65	5,6	0	0,29

Tab.2.11 Predikované a merané pórovitosti [22]

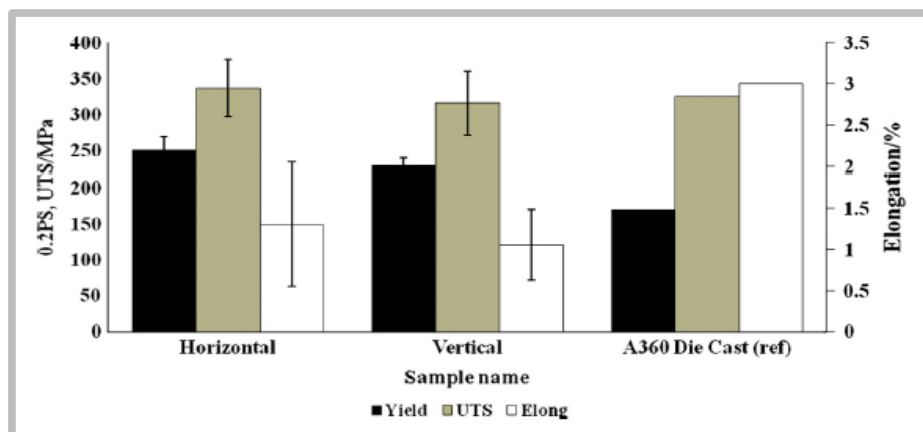
Ďalej vykonali sériu experimentov kedy menili použité hustoty energie pri výrobe vzoriek . Ako optimálna hustota energie sa ukázala hodnota energie  $58 \text{ J/mm}^3$  (viď.obr.2.36), čo zodpovedá parametrom E.



Obr.2.362.8 Vplyv hustoty energie na pórovitosť [22]

Ukázalo sa, že hlavný vplyv na pórovitosť majú výkon laseru, skenovací rýchlosť a interakcia medzi týmito parametrami, veľkosť ostrovov nemá výrazný vplyv.

Nakoniec vykonali mechanické testovanie nastavením parametrov E . Ukázalo sa že stavebný smer ( $0$  a  $90^\circ$  voči základnej doske) nemá veľký vplyv na ťahové vlastnosti (viď obr. 2.37), z čoho vyplýva, že nemá ani zásadný vplyv na výslednú hustotu vzoriek .Tiež vidieť že oba testované smery majú vyššiu pevnosť ale horšie predĺženie ako bežná zliatina A360, horizontálne vzorky vykazovali o 10% vyššiu pevnosť.



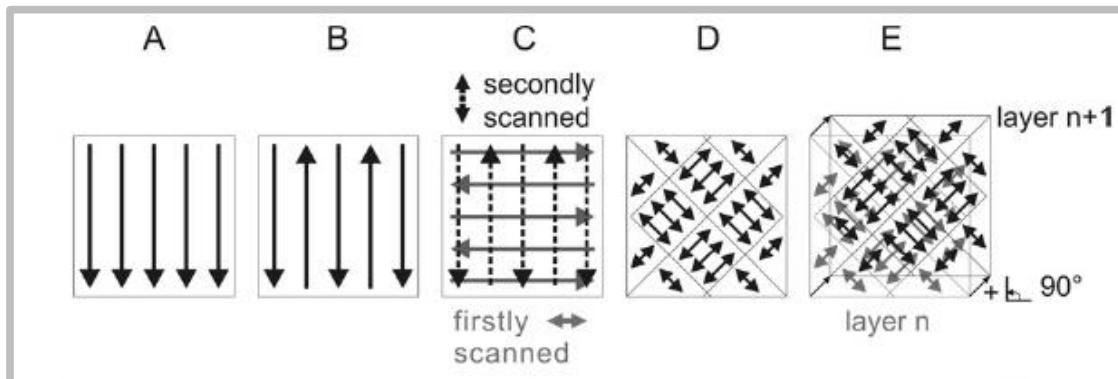
Obr.2.37 Ťahové vlastnosti vzoriek v porovnaní s bežnou odlievanou zliatinou A360 [22]

V ďalšej práci [23] Thijs et.al. skúmali hlavne vplyv nastavení rôznych skenovacích stratégií, ktoré následne overovali podľa mikroskopických snímok, röntgenového žiarenia a elektrónovou odrazovou difrakciu a ich vplyv na výslednú hustotu a textúru. Výsledky pre jednotlivé procesné parametre môžeme vidieť v tabuľke 2.12. Experimenty boli vykonané na vzorkách o rozmeroch 15x15x15 mm<sup>3</sup>. Ukázalo sa, že najvyššiu hustotu získali pri nastavení procesných parametrov C.

Vzorka	A	B	C	D	D
Skenovacie parametre					
Výkon [W]	200	200	200	200	200
Rýchlosť skenovania [mm/s]	1400	1400	1400	1400	1400
Šrafovací rostup	105	105	105	105	105
bidirectional (Bi) - unidirection (Uni)	Bi	Uni	Bi	Bi	Bi
Rotácia medzi vrstvami	0°	0°	90°	90°	90°
Island 5x5 mm	No	No	No	Yes	Yes
Posuv (Shift) 1mm	No	No	No	No	Yes
Hustota	99	98,9	99,4	98,2	98,7
Index textúry	1,974	1,982	1,266	1,127	1,079

Tab.2.12 Výsledky hustôt pre jednotlivé procesné parametre [23]

Použité skenovacie stratégie z tabuľky 2.13 sú zobrazené na obr. 2.38.



Obr.2.38 Schematicky zobrazené skenovacie stratégie [23]

Z výsledkov je vidieť, že jednosmerný (uni) alebo obojsmerný (bi) spôsob skenovania nemá žiadny vplyv na textúru. Ukázalo sa, že orientácia skenovania má významný vplyv na výslednú štruktúru. Keď sa smer skenovania mení viac ako o 90° vzniká redukovaná a slabá štruktúra. Pri postupe kedy nemenili skenovací smer, vzniká pevná štruktúra. Z toho vyplýva, že pre zvyšovanie hustoty je vhodnejšie nemeniť smer skenovania, aby sa zachovala pevná štruktúra súčastí.

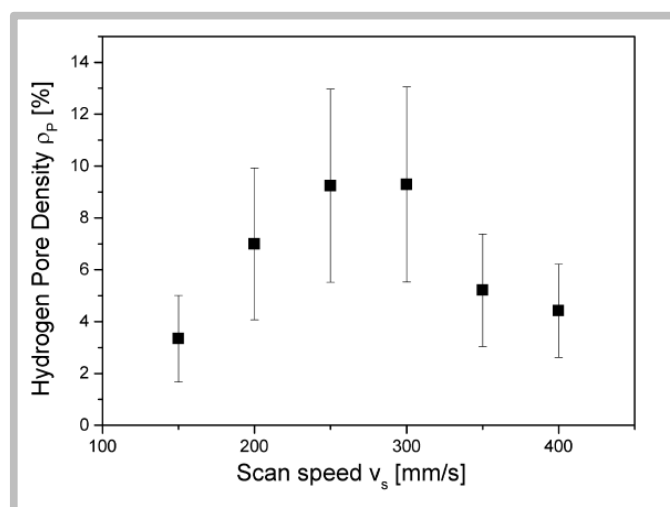
V ďalšej práci [24] sa autori zaoberajú takzvanou vodíkovou pórovitosťou, ktorá spôsobuje stratu hustoty súčastí vyrobených metódou SLM. Tento dej skúmali na vzorkách v tvare kocky. Procesné parametre nastavené pri výrobe vzoriek sú zobrazené v tabuľke 2.13.

Priemer laseru [mm]	Výkon laseru	Hrúbka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	Šraf. Rostup [ $\mu\text{m}$ ]	Hrana vzorky [mm]
0,3	910	50	200	10
0,1	910	50	700	20

Tab.2.13 Procesné parametre nastavené pri výrobe [24]

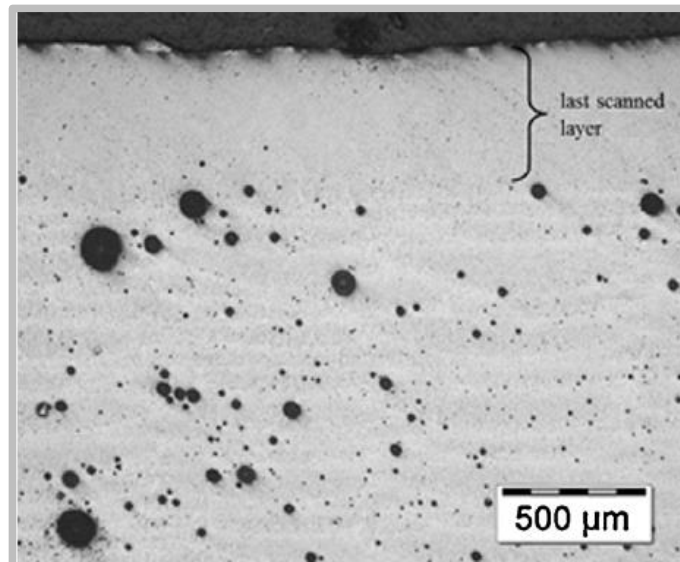
Zaoberali sa hlavne vplyvom vlhkosti častíc prášku, ktorá vedie k presýteniu taveniny a k nukleácii a rastu vodíkových pórov v tavnej lázni. Vonkajšie sušenie prášku je obmedzené teplotou spekania prášku, pri ktorom autori dosiahli redukciu pórovitosti približne 50 % pri teplote 200 °C. Pri internom sušení prášku laserom je možné dosiahnuť vyššiu teplotu, čo viedlo k hustote vrstvy až 99 % pri výkone laseru vyššom ako 900 W a priemere laserového lúča 1 mm. Ďalej bolo použité skenovanie každej vrstvy dvakrát s rovnakým výkonom laseru 910 W, čo viedlo k ďalšiemu zníženiu vodíkovej pórovitosti v porovnaní so sušením laserom.

Rýchlosť skenovania ovplyvňuje dobu medzi tavením a tuhnutím, tento čas priamo ovplyvňuje hustotu pórov vo vzorkách. Pretože rast vodíkových pórov je riadený proces a rýchlosť difúzie v tavenine je vyššia ako v tuhom materiály. Zníženie vodíkovej pórovitosti nastalo pri rýchlostiach skenovania  $v_s > 300$  mm/s (viď. obr.2.39) čo bolo spôsobené nižším časom tuhnutia. Ale prekvapivo k zníženiu pórovitosti došlo aj pri rýchlosti skenovania  $v_s < 250$  mm/s, pri tejto rýchlosti nastáva odplynenie pórov z tavnej lázne (viď. obr.2.39). K ďalšiemu znižovaniu pórovitosti dochádza pri rýchlostiach nad 1000 mm/s (viď. obr. 2.42).



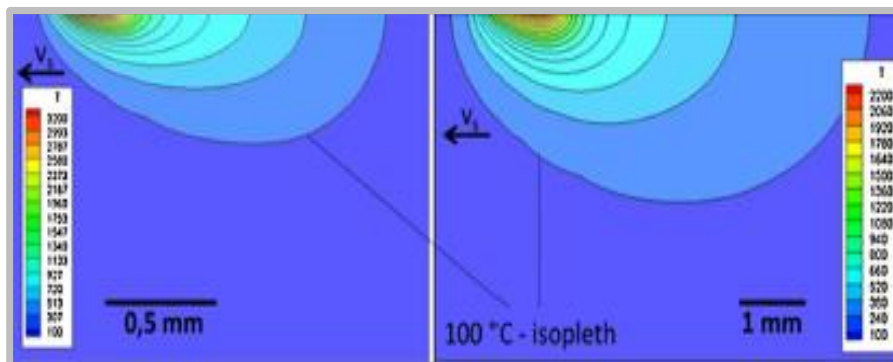
Obr.2.39 Vplyv skenovacej rýchlosti na vodíkovú pórovitosť (hore), vplyv rôznych rôznych úprav na vodíkovú hustotu pri rôznych skenovacích rýchlostiach (dole) [24]

Ďalej zistili, že pri nastavení hrúbky laserového lúča  $d_s = 1$  mm a rýchlosti skenovania 200 mm/s, má posledná rozstavená vrstva nižšiu hustotu pórov než zvyšok prierezu vzorky. Pri skenovaní novej vrstvy je konsolidovaný materiál tepelne spracovaný, a tým sa vodík difúzuje do už existujúcich pórov, čo zvyšuje hustotu pórov (viď obr. 2.40).



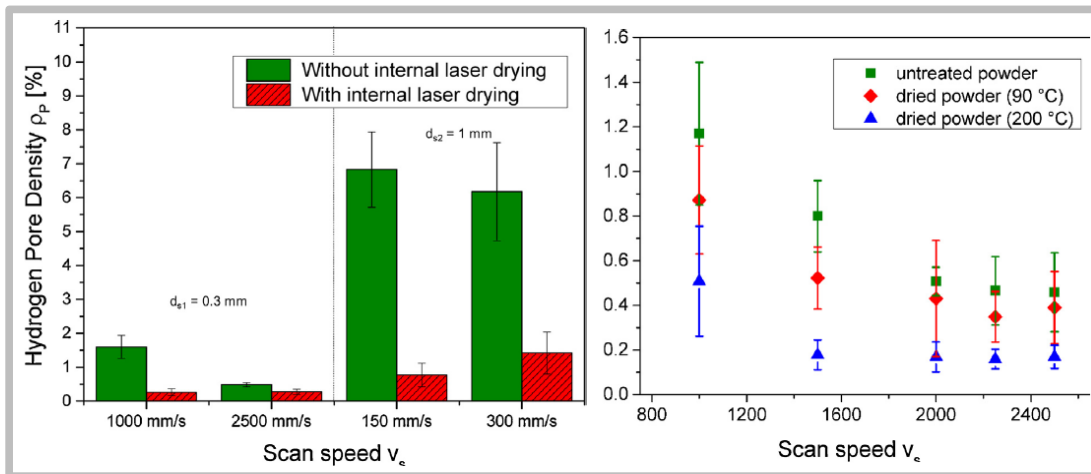
Obr.2.40 Šírenie vodíkovej pórovitosti [24]

Z obrázku 2.41 je ďalej vidieť, že pri rýchlosti skenovania  $v_s = 200$  mm/s a  $d_s = 2$  mm je tepelne ovplyvnená oblasť 5-krát hlbšia ako pri  $d_s = 1$  mm a  $v_s = 2000$  mm/s, čo samozrejme vedie k zvýšeniu hustoty pórov.



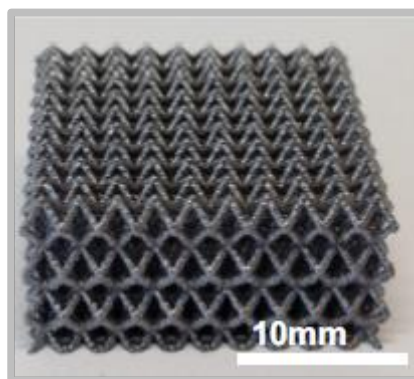
Obr.2.41 Závislosť hĺbky pretavenia na priemere lúča [24]

Pri výrobe vzoriek s použitím prášku ktorý bol pedsúšaný interne autori dosahovali nižšie hodnoty vodíkovej pórovitosti. Je nutné ale poznamenať, že tento rozdiel je v rádoch desiatín percent (viď. obr. 2.42).



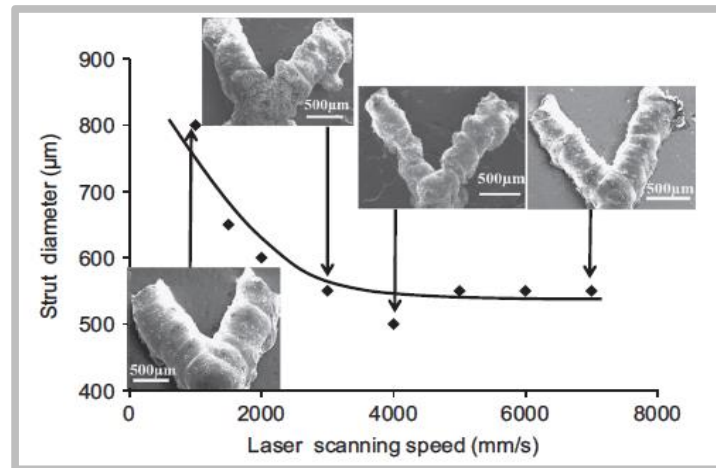
Obr.2.42 Vplyv pedsúšania na vodíkovú pórovitosť (vľavo) interné pedsúšanie (vpravo) externé pedsúšanie [24]

V ďalšej práci [25] sa Qiu et. al. zaoberali morfológiu a vnútornú pórovitosť bunkovej štruktúry vyrobenej rôznymi procesnými parametrami, kde priemer vzpery bol 0,3 mm a dĺžka 2 mm, respektíve rozmery bunkovej štruktúry boli 20x20x11 mm<sup>3</sup>(viď obr. 2.43).



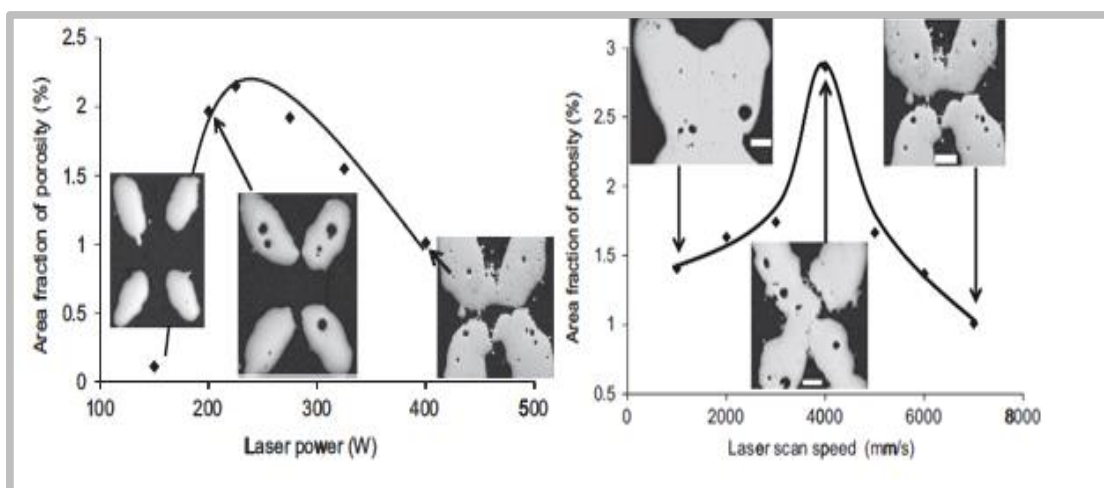
Obr.2.43 Vyrábané bunkové štruktúry [25]

Vysokorýchlostné snímanie ukázalo, že pri vyššom výkone laseru vznikajú oveľa širšie tavné lázne, ako pri nižšom výkone laseru. V kombinácii s nízkou rýchlosťou skenovania to vedie k búrlivému správaniu taveniny. Nastáva rozstrek a pulzovanie veľkosti tavnej lázne. Tento jav spôsobuje väčšiu šírku skenovania a tým zväčšovanie priemeru podpory, nepravidelnosť a tiež otvorené póry vo vrchných vrstvách. Toto priamo zvyšuje drsnosť povrchu podpier (viď obr.2.44).



Obr.2.44 Vplyv skenovacej rýchlosti na priemer vzoriek. [25]

Stabilné správanie taveniny, pri zachovaní dobrých rozmerových tolerancií (viď. obr. 2.45), dosahovali autori pri procesných parametroch 150 W a 7000 mm/s. Tieto parametre môžeme považovať za optimálne. Pri týchto parametroch mali podpery takmer nulovú pórovitosť a dobrú rozmerovú presnosť.



Obr.2.45 Dopad výkonu laseru (vľavo) a skenovacej rýchlosti (vpravo) na pórovitosť vzoriek [25]



## 2.3.4 Zhrnutie pre zliatinu AlSi10Mg

2.3.4

V tabuľke 2.14 sú zhrnuté nastavené procesné parametre pre jednotlivé práce. Pre tvorbu dokonalo hustých častí sa zdá byť optimálne nastavenie hustoty energie medzi 50 – 60 J/mm<sup>3</sup>. Toto tvrdenie podporujú práce [3 a 9]. Tiež vidno, že dobre husté časti sme schopný vyrábať aj pri bunkových štruktúrach. Nakoľko tu nebola uvedená hrúbka vrstvy nedá sa jednoznačne povedať o akú hustotu energie sa jednalo. Pre predstavu pri hrúbky vrstvy 40 μm by sme dostali hustotu energie 71,43 J/mm<sup>3</sup>. Pri použití ešte hrubšej vrstvy by sme sa už zmestili do rozsahu hustôt 45 – 70 J/mm<sup>3</sup>.

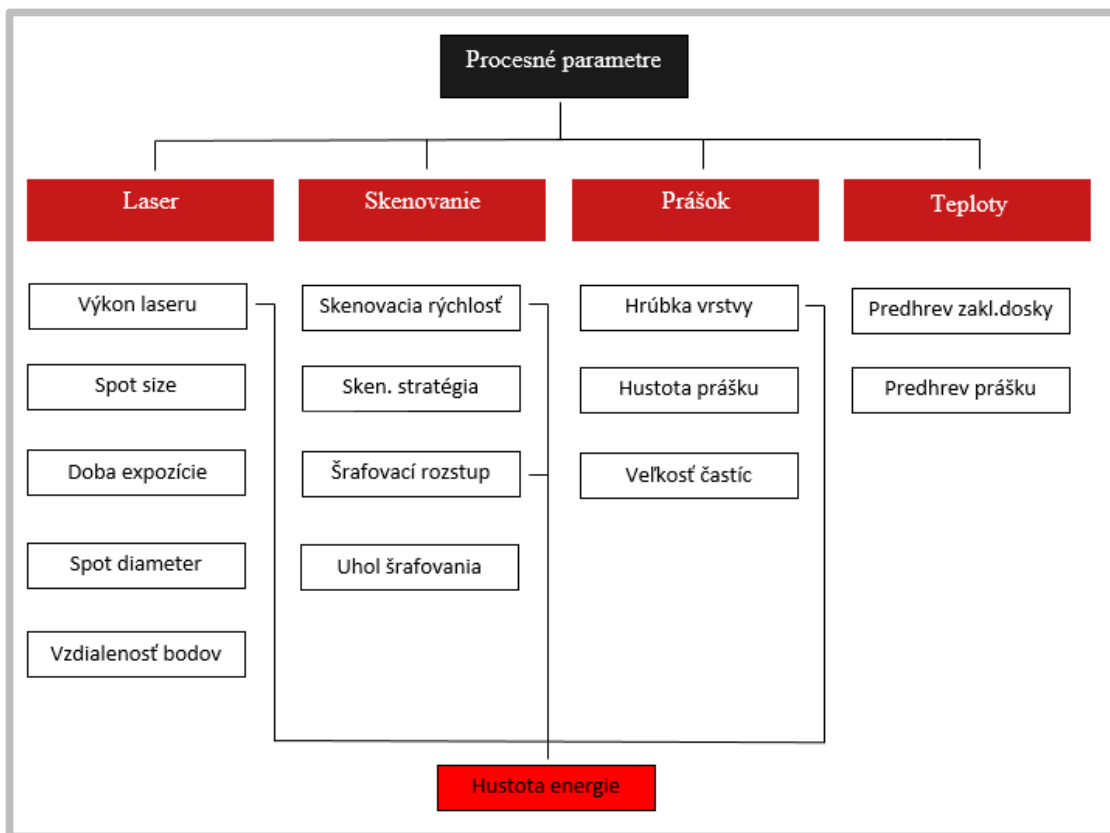
Výkon laseru P[W]	Vscan [mm/s]	šraf. Rozstup[mm]	hrúbka vrstvy[mm]	E [J/mm <sup>3</sup> ]	Práca	Hustota [%]
100	500	0,05	0,04	100,00	[2]	99,77
175	1025	0,065	0,05	počítané 52,53 uvedené 58	[3]	99,71
200	1400	0,105	0,03	45,35	[6]	99,40
910	2000	0,2	0,05	45,50	[12]	99,5
400	7000	0,02	-*		[11]	99,00
			pre hrúbku vrstvy 0,04	71,43		

Tab..2.14 Zhrnutie Al10SiMg (-\*) - neuviedné

### 3 DISKUSIA

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo skúmať vplyv procesných parametrov na výsledné vlastnosti vyrábaných objektov. Týchto parametrov je veľké množstvo (vid'. obr. 3.1). Procesné parametre udávané v jednotlivých prácach sa tiež môžu mierne líšiť podľa zariadenia, ktoré bolo na výrobu vzoriek používané. Údaje som v rešeršnej časti o nerezovom prášku 316L prepočítal na rýchlosť skenovania podľa vzťahu (2.2).

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



Obr.3.1 Procesné parametre pri SLM

Na základe rešerše sa ako hlavné procesné parametre ukazujú: výkon laseru, rýchlosť skenovania, šrafovací rozstup a hrúbka vrstvy prášku. Rôzne nastavenia týchto parametrov je potrebné porovnávať. Preto sú zhrnuté výpočtovým vzťahom 2.2 do hustoty laserovej energie. V značnom počte skúmaných článkov skúmali interakciu medzi hustotou energie a hustotou vyrábaných objektov. Následne predikovali optimálne hustoty laserovej energie, ktoré je potrebné nastaviť pre dosiahnutie maximálnej hustoty vzoriek.

Z rešerše vyplýva, že hustoty laserových energií pre dosiahnutie plne hustých častí sa budú líšiť podľa typu použitého prášku. Optimálna hustota energie pre nerezové prášky sa pohybuje v rozmedzí 60 – 80 J/mm<sup>3</sup>. Pri prášku z hliníkovej zliatiny AlSi10Mg sa táto hodnota pohybuje v rozmedzí 45 – 70 J/mm<sup>3</sup>.

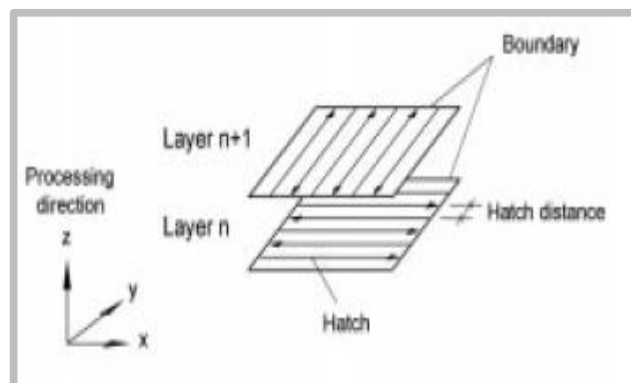
Pri zachovaní rovnakej hustoty laserovej energie, bez zmeny iných procesných parametrov, sme schopný ďalej zvyšovať hustotu vzoriek pomocou re-meltingu. Podľa rešerše dáva táto metóda hustotu až 99,962 % pri dvoch skenovaniach. [14]

Ďalej sa z rešerše ukázalo, že zrnitosť prášku a hrúbka vrstvy nemajú veľký vplyv na výslednú hustotu. Je dostačujúce meniť hustotu laserovej energie, aby bol prášok dokonale pretavený.

Nežiaducim parametrom prášku bola však vnútorná vlhkosť, ktorá spôsobuje vznik vodíkových pórov pri zliatine AlSi10Mg, a tým zvyšovanie hustoty vzoriek. Tento problém riešili autori v článku [22]. Ako vhodné riešenie sa ukázalo pedsúšať prášok, aby redukovali vnútornú vlhkosť prášku. Oba skúmané spôsoby pedsúšania – interné aj externé vykazovali lepšie hustoty vyrobených vzoriek.

Pri nerezových práškoch 316L tento problém neskúmali. Autori [17,15] ale experimentovali z rôznymi teplotami základnej dosky. Teplota základnej dosky pre tvorbu spojitých návarov, a tým pádom aj vysokých hustôt vzoriek, sa pohybuje v rozmedzí 80 – 150 °C. Pri vyšších teplotách sa už začínali šíriť póry.

Ďalším veľmi dôležitým parametrom je stratégia skenovania, pretože tento parameter udáva ako budú jednotlivé vrstvy kladené na seba. To samozrejme priamo ovplyvňuje hustotu vyrobených vzoriek. Jednosmerné (uni) alebo obojsmerné (bi) skenovanie na toto samozrejme vplyv nemalo [2]. Otáčanie skenovacích smerov medzi jednotlivými vrstvami ale už má veľký vplyv. Ako najlepšia sa ukázala skenovacia stratégia X-Y kedy je tento smer otočený práve o 90 ° (viď. obr. 3.2) [12, 13, 21, 22, 23, 24].



Obr.3.2 Schéma X-Y skenovania [12]

Čo sa týka rozmerov autori [19, 20] zistili, že je možné dobrú hustotu vzoriek dosiahnuť aj pre bunkové mriežkové štruktúry. Toto platí pre oba skúmané kovové prášky 316L a AlSi10Mg. Je ale nutné dbať na nízku zrnitosť prášku inak vznikajú veľmi drsné výsledné povrchy.

## 4 ZÁVER

V tejto práci bolo úlohou zistiť vplyv procesných parametrov technológie Selective Laser Melting na výsledné vlastnosti vyrábaných objektov. Hlavné procesné parametre boli za účelom porovnávania zlúčené do parametru hustota energie (viď. vzťah 2.2). Pri veľmi malej hustote energie dochádza v materiáli k vzniku pórov a trhlín. Pri veľmi vysokej hustote energii k zhoršovaniu povrchu a vzniku pórov. Na základe rešerše bolo zistené optimálne nastavenie procesných parametrov pre spracovanie práškového materiálu AlSi10Mg a 316L. Pomocou týchto nastavení je možné vyrábať diely s takmer 100% hustotou. Vhodné nastavenie hustoty energie pre výrobu homogénneho materiálu z nerezových práškov 316L sa pohybujú v rozmedzí 60 – 80 J/mm<sup>3</sup> (pre skúmané výkony 50- 180 W a rýchlosti skenovania 50 – 400 mm/s). Pre hliníkové prášky AlSi10Mg sa hustoty laserovej energie pohybovali v rozmedzí 45 - 70 J/mm<sup>3</sup> (pre skúmané výkony 100 – 910W a skenovacie rýchlosti 500 – 700 mm/s). Ďalšie zvýšenie hustoty, je možné vykonať použitím re-meltingu (pretavenia) za cenu zvýšenia výrobného času. Pre oba typy práškov je najlepšia skenovacia stratégia X-Y. Spôsob skenovania jednosmerný (uni) alebo obojsmerný (bi) nemá veľký vplyv na výsledné vlastnosti. Predhrev základnej dosky pre nerezové prášky 316L je optimálny medzi teplotami 80 - 150 °C. Hliníkové prášky AlSi10Mg je nutné predsúšať pre redukciu vodíkovej pórovitosti interným alebo externým predsúšaním.

Ďalej by bolo vhodné overiť získané optimálne hustoty laserových energií, prípadne vykonať ďalšie ladenie na zmenšenie týchto rozsahov.

Všetky ciele bakalárskej práce boli splnené.

## 5 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

[1] KRUTH, J.-P., B. VANDENBROUCKE, J. VAN VAERENBERGH a P. MERCELIS. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. 2005.

Dostupné z: <http://doc.utwente.nl/52902/1/Wa1021.pdf>

[2] LayerWise breaks new ground in additive manufacturing. LAYERWISE.

*MICRO manufacturing* [online]. 2010 [cit. 2014-05-16].

Dostupné z: <http://www.micromanufacturing.com/content/layerwise-breaks-new-groundadditive-manufacturing>

[3] BOIVIE, K., KARLSEN, R., YSTGAARD, P. *The concept of hybrid manufacturing for high performance parts*. South African Journal of Industrial Engineering, July 2012, Vol 23 (2): pp 106 – 115.

Dostupné z: <http://sajie.journals.ac.za/pub/article/view/334>

[4] BRANDL, Erhard, Ulrike HECKENBERGER, Vitus HOLZINGER a Damien BUCHBINDER. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design* [online]. 2012, vol. 34, s. 159-169 [cit. 2015-03-19]. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.067.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911005590>

[5] SANTOS, E.C., M. SHIOMI, K. OSAKADA a T. LAOUI. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. 2006, s. 1459-1468.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505002683>

[6] BEDNÁR, P. *Zpracování podkladů pro návrh objemových a plošných struktur: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Dostupné z:

[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=66676](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66676)

[7] Molding process [patent]. US Patent 4247508. Uděleno 1979.

[8] IKEO, Naoko, Takuya ISHIMOTO a Takayoshi NAKANO. Novel powder/solid composites possessing low Young's modulus and tunable energy absorption capacity, fabricated by electron beam melting, for biomedical applications. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2015, vol. 639, s. 336-340 [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.03.141.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815008555>

- [9] ALD. *Metal Powder Technology* [online]. 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: [http://web.ald-vt.de/cms/fileadmin/pdf/prospekte/Metal\\_powder.pdf](http://web.ald-vt.de/cms/fileadmin/pdf/prospekte/Metal_powder.pdf)
- [10] LOTT, Philipp, Henrich SCHLEIFENBAUM, Wilhelm MEINERS, Konrad WISSENBAACH, Christian HINKE a Jan BÜLTSMANN. Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM). *Physics Procedia* [online]. 2011, vol. 12, s. 683-690 [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.085.  
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001647>
- [11] CHERRY, J. A., H. M. DAVIES, S. MEHMOOD, N. P. LAVERY, S. G. R. BROWN a J. SIENZ. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, vol. 76, 5-8, s. 869-879 [cit. 2015-03-10]. DOI: 10.1007/s00170-014-6297-2.  
Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-014-6297-2>
- [12] MEIER, H. a Ch. HABERLAND. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* [online]. 2008, vol. 39, issue 9, s. 665-670 [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1002/mawe.200800327.  
Dostupné z: [http://www.researchgate.net/publication/230080251\\_Experimental\\_studies\\_on\\_selective\\_laser\\_melting\\_of\\_metallic\\_parts](http://www.researchgate.net/publication/230080251_Experimental_studies_on_selective_laser_melting_of_metallic_parts)
- [13] A.B. Spierings, G. Levy. Comparison of Density of Stainless Steel 316L Parts Produced with Selective Laser Melting Using Different Powder Grades, Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas, Austin, Texas (2009)
- [14] YASA, E. a J-P. KRUTH. Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Engineering* [online]. 2011, vol. 19, s. 389-395 [cit. 2015-03-21]. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.130.  
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811029390>
- [15] [1] ZHANG, Baicheng, Lucas DEMBINSKI a Christian CODDET. The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, vol. 584, s. 21-31. DOI: 10.1016/j.msea.2013.06.055.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509313007065>
- [16] WEI, Qing Song, Xiao ZHAO, Li WANG, Rui Di LI, Jie LIU a Yu Sheng SHI. Effects of the Processing Parameters on the Forming Quality of Stainless Steel Parts by Selective Laser Melting. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, 189-193, s. 3668-3671 [cit. 2015-03-20]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.189-193.3668.  
Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.189-193.3668>

[17] YADROITSEV, I., P. KRAKHMALOV, I. YADROITSAVA, S. JOHANSSON a I. SMUROV. Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2013, vol. 213, issue 4, s. 606-613 [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.014.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013612003391>

[18] HANZL, Pavel, Miroslav ZETEK, Tomáš BAKŠA a Tomáš KROUPA. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts. *Procedia Engineering* [online]. 2015, vol. 100, s. 1405-1413 [cit. 2015-03-26]. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.510.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815005378>

[19] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN a David RAYMONT. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2012, vol. 62, s. 32-38 [cit. 2015-03-23]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695512001095>

[20] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Philippe YOUNG a David RAYMONT. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2014, vol. 55, s. 533-541 [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.027.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913009540>

[21] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, 1-4, s. 77-86 [cit. 2015-03-09]. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.001.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860414000062>

[22] READ, Noriko, Wei WANG, Khamis ESSA a Moataz M. ATTALLAH. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design* [online]. 2015, vol. 65, s. 417-424 [cit. 2015-03-09]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.044.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860414000062>



- [23] THIJS, Lore, Karolien KEMPEN, Jean-Pierre KRUTH a Jan Van HUMBEECK. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia* [online]. 2013, vol. 61, issue 5, s. 1809-1819 [cit. 2015-03-12]. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.11.052. Dostupné z: [http://www.researchgate.net/publication/257541088\\_Finestructured\\_aluminium\\_products\\_with\\_controllable\\_texture\\_by\\_selective\\_laser\\_melting\\_of\\_pre-alloyed\\_AlSi10Mg\\_powder](http://www.researchgate.net/publication/257541088_Finestructured_aluminium_products_with_controllable_texture_by_selective_laser_melting_of_pre-alloyed_AlSi10Mg_powder)
- [24] WEINGARTEN, Christian, Damien BUCHBINDER, Norbert PIRCH, Wilhelm MEINERS, Konrad WISSENBACH a Reinhart POPRAWE. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, vol. 221, s. 112-120 [cit. 2015-03-25]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.013. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615000564>
- [25] QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J.E. ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2015, vol. 628, s. 188-197 [cit. 2015-03-24]. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.031. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509315000453/>
- [26] Apologetics Press. [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.apologeticspress.org/ApPubPage.aspx?pub=1&issue=581&article=625>
- [27] additivemanufacturinginsight.com. Seamless Process Creates the Impossible Cooling Channel [online]. [cit. cit. 29-04-15]. Dostupné z: <http://www.additivemanufacturinginsight.com/articles/seamless-process-creates-the-impossible-cooling-channel>
- [28] SHEREKAR, R.M a A.N. PAWAR. *Design and manufacturing of customized anatomical implants by using Rapid Prototyping technique. BIOINFO Mechanical Engineering*. [online]. 2011, Volume 1, Issue 1. [cit. 30-11-2013]. Dostupné z: <http://www.bioinfo.in/contents.php?id=180>
- [29] BEDNÁR, P. *Zpracování podkladů pro návrh objemových a plošných struktur: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [30] 3D Printing Your Party Shoes, TreeHUGER [online]. 2015 [cit. 2014-05-16] Dostupné z: <http://www.treehugger.com/sustainable-fashion/3d-printing-your-party-shoes-hit-or-miss.html>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

### Skratky

SLM	Selective laser melting
EBM	Eletron beam melting
DLMS	Direct Metal Laser Sintering
VIGA	Vacuum Inert gas Atomization
EIGA	Electrode Induction Melting Gas Atomization
PIGA	Plasma melting Induction Guiding Gas Atomization
CAD	Computer aided design
STL	Stereolithography
EL	predĺženie
BALLING	porucha vznikajúca formovaním taveniny do guľôčok
CT	počítačová tomografia
KEYHOLE	vznikajú pri rýchlom tuhnutí kovu bez úplného vyplnenia medzier
ISLAND SIZE	veľkosť ostrovov
E	Hustota laserovej energie
v	Rýchlosť skenovania
s	Šrafovací rozstup
t	Hrúbka vrstvy
$\rho$	Hustota

## ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 0.1	Rez kosťou [26].....	12
Obr. 2.1	Konformné chladenie foriem [27].....	14
Obr. 2.2	Zubná náhrada [2].....	15
Obr. 2.3	Schéma SLM procesu [28].....	16
Obr. 2.4	Schéma procesu DMLS [29].....	16
Obr. 2.5	Schéma procesu EBM [28].....	17
Obr. 2.6	Proces VIGA [9].....	18
Obr. 2.7	Schéma procesu EIGA a PIGA [9].....	19
Obr. 2.8	SEM obrázky zobrazujúce topografiu povrchu vzoriek [11].....	21
Obr. 2.9	Pórovitosť verzus hustota laserove energie [11].....	21
Obr. 2.10	Stratégia "bidirectional" [12].....	22
Obr. 2.11	Dopad hustoty energie na relatívnu hustotu [12].....	22
Obr. 2.12	Mikrografické snímky horizontálneho povrchu [12].....	23
Obr. 2.13	Vplyv hustoty energie na výslednú hustotu [13].....	24
Obr. 2.14	Dopad re-meltingu na kvalitu povrchu [14].....	25
Obr. 2.15	Tvar návarov s rôznym nastavením parametrov [15].....	26
Obr. 2.16	Vplyv výrobnnej orientácie a predhrevu na mechanické vlastnosti [15].....	27
Obr. 2.17	Vplyv predhrevu na výslednú hustotu [15].....	28
Obr. 2.18	Tvary návarov [16].....	28
Obr. 2.19	Morfológia návarou za použitia rovnakej skenovacej rýchlosti [16].....	29
Obr. 2.20	Povrch vzoriek pri rozdielnych skenovacích rozstupoch [16].....	29
Obr. 2.21	Vyobrazené skenovacie stratégie [16].....	30
Obr. 2.22	Povrch vzoriek pri rozdielnych skenovacích rozstupoch [16].....	30
Obr. 2.23	Povrch a vnútorná morfológia [16].....	31
Obr. 2.24	Pohľad na návar [17].....	31
Obr. 2.25	Závislosť štruktúry na procesných parametroch [18].....	32
Obr. 2.26	Štruktúra vzoriek [18].....	33
Obr. 2.27	Vyrábané vzorky s rôznou objemovou frakciou [19].....	34
Obr. 2.28	Vznik nečistôt na povrchu vzpery [19].....	34
Obr. 2.29	Vplyv veľkosti buniek na výslednú hustotu gyroidnej štruktúry [19].....	35
Obr. 2.30	Vplyv objemovej frackiu na veľkosť vzpier [19].....	35
Obr. 2.31	Efekt zmeny šrafovacieho rozstupu na výslednú hustotu [21].....	37
Obr. 2.32	Dopad skenovacej rýchlosti na štruktúru [21].....	38
Obr. 2.33	Balling zväčšujúci sa s vyššou skenovacou rýchlosťou [21].....	38
Obr. 2.34	Dopad skenovacích stratégií na výslednú hustotu [21].....	39
Obr. 2.35	Schematicky zobrazený parameter island size [22].....	40
Obr. 2.36	Vplyv hustoty energie na pórovitosť [22].....	41
Obr. 2.37	Ťahové vlastnosti vzoriek v porovnaní s bežnou zliatinou A360 [22].....	41
Obr. 2.38	Schematicky zobrazené skenovacie stratégie [23].....	42
Obr. 2.39	Vplyv skenovacej rýchlosti na hydrogenovú pórovitosť [24].....	43
Obr. 2.40	Šírenie vodíkovej pórovitosti [24].....	44
Obr. 2.41	Závislosť hĺbky pretavenia na priemere lúča [24].....	44
Obr. 2.42	Vplyv predsušania na vodíkovú pórovitosť [24].....	45
Obr. 2.43	Vyrábané bunkové štruktúry [25].....	45
Obr. 2.44	Vplyv skenovacej rýchlosti na priemer vzoriek [25].....	46
Obr. 2.45	Dopad výkonu laseru na pórovitosť vzoriek [25].....	46

Obr. 3.1	Procesné parametre pri SLM.....	48
Obr. 3.2	Schéma X-Y skenovania [12].....	49

**Zoznam tabuliek**

Tab. 2.1 Nastavené parametre a odpovedajúce hustoty energie $J/mm^3$ [11].....	20
Tab. 2.2 Prášky z 316L používané na produkciu testovacích vzoriek [13].....	23
Tab. 2.3 Tabuľka nastavených procesných parametrov [15].....	26
Tab. 2.4 Hodnoty medze klzu a youngovho modulu [15].....	27
Tab. 2.5 Výsledky hustoty pri rozdielnych procesných parametroch ( $P = 98W$ ).....	30
Tab. 2.6 Dopad uhlu šrafovania na mechanické vlastnosti vzoriek [18].....	33
Tab. 2.7 Mechanické vlastnosti vzoriek pri zmene hrúbky vrstvy [18].....	34
Tab. 2.8 Zhrnutie parametrov.....	37
Tab. 2.9 Hustota v % pri zmene šrafovacího rozstupu a skenovacej rýchlosti [21].....	38
Tab. 2.10 Rôzne parametre skenovacích stratégií [21].....	39
Tab. 2.11 Predikované a merané pórovitosti [22].....	40
Tab. 2.12 Výsledky hustôt pre jednotlivé procesné parametre [23].....	42
Tab. 2.13 Procesné parametre nastavené pri výrobe [24].....	43
Tab. 2.14 Zhrnutie Al10SiMg.....	48