



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VÝZKUM PROCESNÍCH PARAMETRŮ PRO VÝROBU STRUKTUROVANÉHO MATERIÁLU TECHNOLOGIÍ SELECTIVE LASER MELTING

RESEARCH ON PROCESS PARAMETERS FOR PRODUCING OF A STRUCTURED MATERIAL MADE BY
SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vladislav Richter

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radek Vrána

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Vladislav Richter**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radek Vrána**
Akademický rok: 2015/16

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:

Výzkum procesních parametrů pro výrobu strukturovaného materiálu technologií Selective Laser Melting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je výzkum procesních parametrů pro výrobu strukturovaného materiálu technologií Selective Laser Melting (SLM). Práce bude zahrnovat návrh vzorků pro technologii SLM a testování jejich materiálových a tvarových vlastností.

Cíle bakalářské práce:

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

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

Forma práce: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data

Typ práce: experimentální

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_2016.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Yadroitsev, I. (2009): Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken.

Vrána, R. (2014): Návrh porézních struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting. Vysoké učení technické v Brně, FSI, Brno

Qiu, Ch., Yue, S., Adkins, J. E. N., Ward, M., Hassanin, H., Lee, D. P., Withers, J. P., Attallah, M. M. (2015): Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. Materials Science and Engineering, vol. 628: pp. 188-197. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.031.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Selective laser melting (SLM) je jednou z aditivních technologií, které umožňují vyrábět tvarově velmi složité díly. Příkladem takového výrobku jsou porézní lattice struktury, které nacházejí díky svým dobrým mechanickým vlastnostem a nízké hmotnosti uplatnění v kosmonautice nebo lékařství. V této práci je zkoumán vliv procesních parametrů (výkonu laseru a skenovací rychlosti) na materiálové a tvarové vlastnosti prutů ve strukturách. K nalezení optimálních parametrů byla použita široká škála výkonů laseru (100–400 W) a skenovacích rychlostí (1000–10000 mm/s). Pomocí optického 3D skeneru a mCT byl sledován průměr, struktura povrchu a vnitřní porozita prutů. Na základě provedených měření byl jako optimální vyhodnocen výkon laseru 350 W a skenovací rychlost 3000 mm/s. Díky optimalizaci je možné vyrábět rychleji geometricky přesnější struktury o stejné porozitě v porovnání s dříve používanými parametry.

KLÍČOVÁ SLOVA

Porézní struktury, aditivní technologie, Selective Laser Melting, výrobní parametry, AlSi10Mg

ABSTRACT

Selective laser melting (SLM) is one of additive technologies which allows manufacturing of components with very complex shape. One of the examples are porous lattice structures which are used in cosmonautics or medicine due to its good mechanical properties and low weight. In this work the influence of processing conditions (laser power and laser scanning speed) on material properties and geometry of as-fabricated trusses is investigated. Wide range of laser powers (100–400 W) and laser scanning speeds (1000–10000 mm/s) were used to determine optimum process parameters. Truss size, morphology and internal porosity was investigated using optical 3D scanner and X-ray micro computer tomography (mCT). Based on executed measurements optimum processing conditions were determined to be 350 W and 3000 mm/s. It is possible to manufacture faster geometrically more precise structures with equal internal porosity due to optimization.

KEY WORDS

Lattice structures, additive manufacturing, Selective Laser Melting, processing conditions, AlSi10Mg

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RICHTER, V. *Výzkum procesních parametrů pro výrobu strukturovaného materiálu technologií Selective Laser Melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vrána.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Výzkum procesních parametrů pro výrobu strukturovaného materiálu technologií Selective Laser Melting* jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Radka Vrány. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 23. května 2016

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Radku Vránovi za poskytnuté rady a připomínky při zpracování práce.

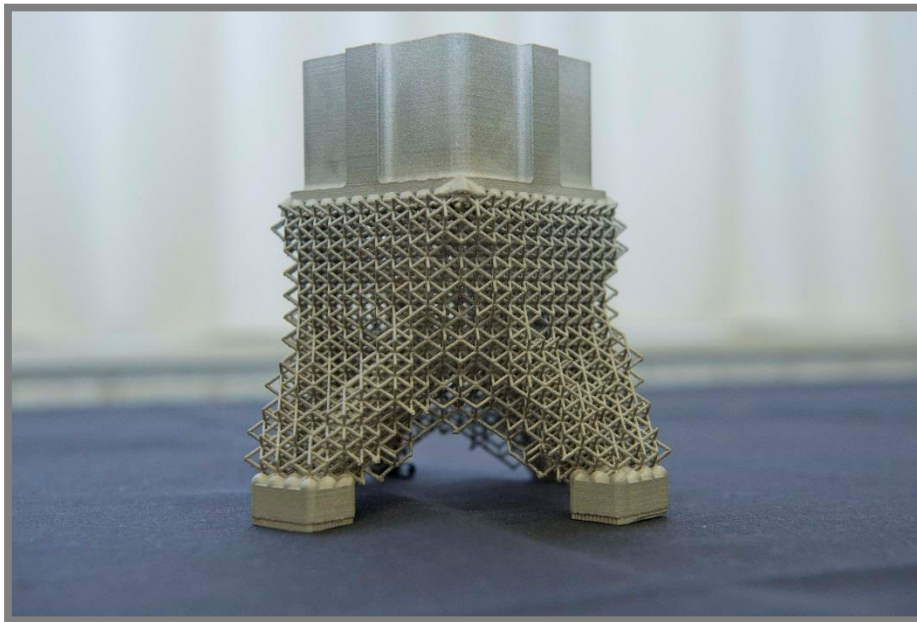
OBSAH

OBSAH	11
1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	22
3.1 Analýza problému	22
3.2 Cíl práce	23
4 MATERIÁL A METODY	24
4.1 SLM 280 HL	24
4.2 Prášek AlSi10Mg	25
4.3 Návrh vzorků	25
4.4 Výroba vzorků	26
4.5 Analýza vzorků	27
4.6 ATOS Triple Scan	28
4.7 Micro computer tomography	29
5 VÝSLEDKY	31
5.1 Předběžné výsledky	31
5.1.1 Měření hmotnosti	31
5.1.2 Měření průměru prutů na datech z 3D skeneru	32
5.2 Výsledky z mCT	32
5.2.1 Měření objemu	32
5.2.2 Měření průměru prutů na datech z mCT	33
5.3 Vyhodnocení	35
5.4 Test porozity	36
6 DISKUZE	37
7 ZÁVĚR	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	41
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	42
SEZNAM TABULEK	43
SEZNAM PŘÍLOH	44

1 ÚVOD

Aditivní výroba je v dnešní době velmi progresivní průmyslové odvětví. Dříve se používala pouze pro výrobu prototypů a modelů, dnes již proniká i do výroby reálných součástí. Při aditivním procesu se materiál přidává, čímž se výrazně liší od konvenčních výrobních metod, jako jsou obrábění, tváření nebo odlévání. Díky tomu dokáže vyrobit i tvarově velmi složité součásti, v tomto případě porézní struktury. V minulosti byl tento způsob výroby omezen pouze na plasty (technologie FDM, SLS, SLA), v posledních letech se rozvíjí také aditivní výroba kovů (technologie DMLS, SLM). [1]

Porézní struktury z kovových slitin se dnes využívají například v letectví nebo kosmonautice, kde je kladen důraz na velmi dobré mechanické vlastnosti a zároveň nízkou hmotnost (obr. 1.1). V lékařství se používají jako kostní náhrady struktury vyrobené ze slitin titanu, které jsou schopny díky své chemické stálosti odolat i velmi reaktivnímu prostředí, jakým je lidské tělo. Dále se používají jako chladiče nebo jako akustické tlumiče, kde se využívá jejich schopnost pohlcovat energii. [2,3,4]



Obr. 1.1 Držák antény vesmírné stanice, vyrobeno na VUT v Brně [5]

Při tomto typu výroby existuje velké množství procesních parametrů, které lze měnit, a které mají výrazný vliv na výsledné vlastnosti součásti. Patří mezi ně např. výkon laseru, skenovací rychlost laseru, tloušťka nanášené vrstvy, vzdálenost mezi jednotlivými trajektoriemi laserového paprsku, průměr laserového paprsku nebo směr skenování.

Tato práce se bude věnovat nalezení optimálního výkonu laseru a skenovací rychlosti pro výrobu porézních lattice struktur z materiálu AlSi10Mg

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

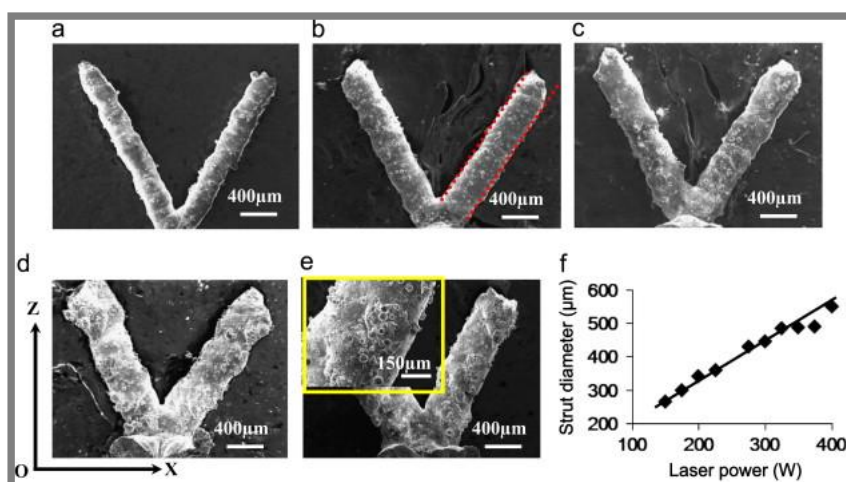
2

V rešeršní části práce se budu zabývat výrobními parametry použitými při výrobě porézních struktur převážně z materiálu AlSi10Mg a jejich vlivem na průměr prutů, strukturu jejich povrchu, vnitřní porozitu a mikrostrukturu.

Qiu et al. [6] vyšetřovali vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na průměr prutů, jejich tvar, porozitu a následně vliv těchto vyšetřovaných parametrů na mechanické vlastnosti struktur vyrobených z materiálu AlSi10Mg.

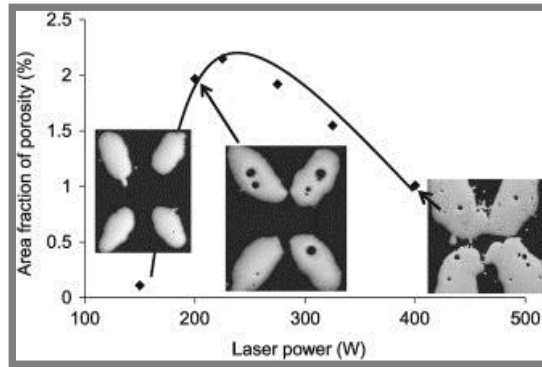
Pro tyto účely byly vyrobeny dvě sady vzorků. První za konstantní skenovací rychlosti 3500 mm/s a výkonem laseru od 150 W do 400 W. Druhá za konstantního výkonu laseru 400 W a skenovací rychlosti od 1000 mm/s do 4000 mm/s. Ostatní výrobní parametry – velikost částic prášku 25-50 μm ; průměr laserového paprsku 50 μm , navržený průměr prutů 0,3 mm, délka strany základní buňky 2 mm, rozměry vzorků 20x20x11 mm.

Obr. 2.1 ukazuje vliv výkonu laseru na průměr prutů za konstantní skenovací rychlosti. Lze vidět, že nižší výkony vedou k výrazně tenčím prutům. Při výkonu 150 W je průměr prutů 260 μm , zatímco při výkonu 400 W je to 500 μm . Závislost je přibližně lineární. S rostoucím výkonem laseru také roste množství částečně nataveného prášku na povrchu prutů.



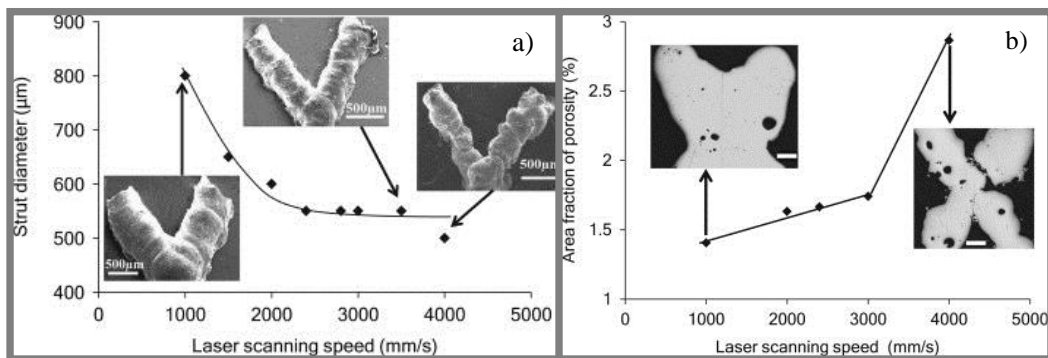
Obr. 2.1 Vliv výkonu laseru na průměr prutů a) 150 W, b) 200 W, c) 275 W, d) 300 W, e) 375 W [6]

Obr. 2.2 dokumentuje vliv výkonu laseru na porozitu. Při nejnižších výkonech mají pruty minimální porozitu. S rostoucím výkonem se hodnota zvyšuje a svého maxima (přes 2 %) dosahuje asi při 225 W, poté pozvolna klesá, až k hodnotě 1 % při nejvyšším výkonu 400 W. Póry mají kulovitý tvar a nejsou vyplněny neroztaveným práškem, což vede autory k domněnce, že nevznikly v důsledku neúplného roztavení materiálu.



Obr. 2.2 Vliv výkonu laseru na porozitu [6]

Vliv skenovací rychlosti na průměr prutů za konstantního výkonu laseru je vyobrazen na obr. 2.3a. Je vidět, že při nejnižších rychlostech jsou pruty výrazně mohutnější. Naopak od rychlosti 2000 mm/s se průměr prutů téměř nemění. Závislost je tedy klesající exponenciála. Porozita se s rostoucí rychlostí skenování exponenciálně zvyšuje, jak lze vidět na obr. 2.3b.



Obr. 2.3 Vliv skenovací rychlosti a) na průměr prutů; b) na porozitu prutů [6]

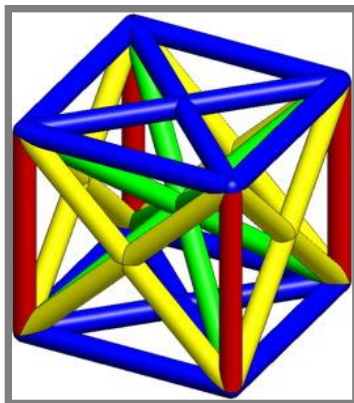
Leary et al. [7] zkoumali mechanické vlastnosti struktur z materiálu AlSi12Mg vyrobených za optimalizovaných procesních podmínek. Dále také zjišťovali vyrobitelnost struktur při jejich různé geometrii. U vyrobených struktur vyčíslili drsnost povrchu a jejich mechanické vlastnosti.

Prvním úkolem bylo určit optimální výrobní parametry pro výrobu struktur. Z tohoto důvodu bylo vyrobeno několik plných krychlí o délce strany 4 mm při různém výkonu laseru a skenovací rychlosti. Porovnávány byly na základě relativní hustoty (porozity). Jako nejlepší byly vyhodnoceny tyto parametry – výkon laseru 350 W; hatch spacing 0,19 mm; skenovací rychlost 921 mm/s; tloušťka vrstvy 50 μm. Měrná energie, vypočítána podle vztahu (2.1), byla v tomto případě 40 J/mm³. Porozita při těchto použitých parametrech dosahovala 1,1 %.

$$E_v = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (2.1)$$

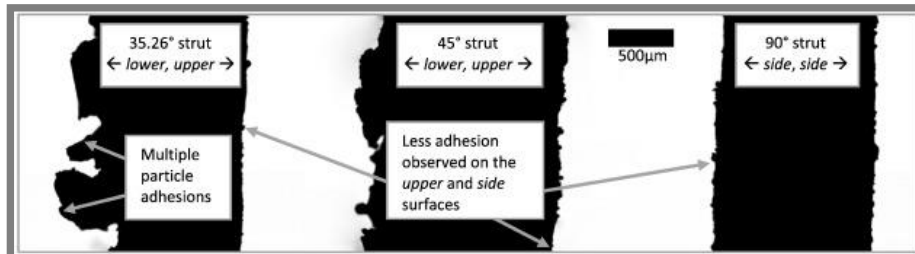
, kde E_v je měrná energie (J/mm³); P je výkon laseru (W), v je skenovací rychlost (mm/s), h je hatch spacing (mm) a t je tloušťka vrstvy (mm).

Pruty při různých geometriích základních buněk mohou svírat s platformou 4 různé úhly (obr. 2.4 - červené 90°, žluté 45°, zelené 35,26° a modré 0°). Autoři provedli sérii experimentů, při kterých zjistili, že pouze pruty rovnoběžné s platformou (modré) nejsou vyrobitelné.



Obr. 2.4 Stoupání prutů [7]

Z obr. 2.5 lze vidět, že povrch prutů z jejich spodní strany je daleko více nepravidelný než z vrchní. Dále je z obrázku jasné, že množství částečně nataveného prášku na spodní straně prutů je výrazně vyšší pro strukturu, kde pruty svírají se základnou menší úhel. Tento efekt se projevuje i v uzlech, ty jsou kvůli tomu, na rozdíl od CAD dat, nesymetrické.



Obr. 2.5 Struktura povrchu prutů při různém úhlu stoupání [7]

Pro vyčíslení drsnosti povrchu byly v každé struktuře vybrány 3 pruty a na každém z nich změřeny na dvou místech jejich průměry. Střední aritmetická drsnost povrchu R_a byla vypočítána podle vztahu (2.2), výška nerovnoměrnosti profilu R_z podle vztahu (2.4).

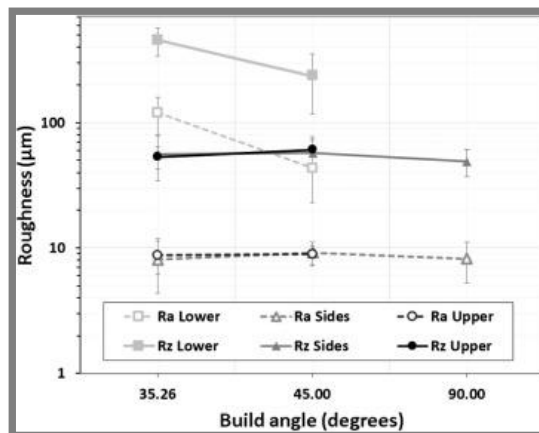
$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad (2.2)$$

$$R_t = \max(y_i) - \min(y_i) \quad (2.3)$$

$$R_z = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j R_{ti} \quad (2.4)$$

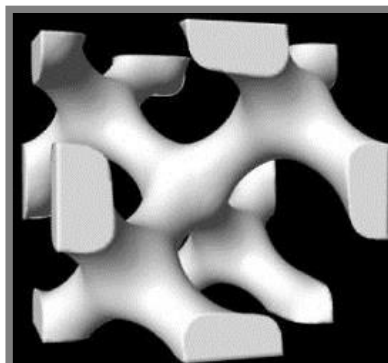
, kde R_a je střední aritmetická drsnost povrchu (μm); N je počet měření (-); y je vzdálenost nominálního povrchu od aktuálního v měřeném místě (μm); R_t je maximální rozdíl mezi všemi y ; R_z je výška nerovnoměrnosti profilu (μm) a j je počet měření (-).

Na obr. 2.6 je zobrazena závislost drsnosti povrchu na geometrii struktur. Je zde potvrzeno již výše napsané, tj. že hodnota R_a i R_z pro spodní stranu prutů je výrazně vyšší pro pruty stoupající pod menším úhlem. Dále můžeme vidět, že hodnoty R_z pro vrchní a boční povrch prutů jsou téměř stejné a nezávisí na úhlu stoupání. Hodnoty R_a pro vrchní a boční povrch prutů jsou zanedbatelné.



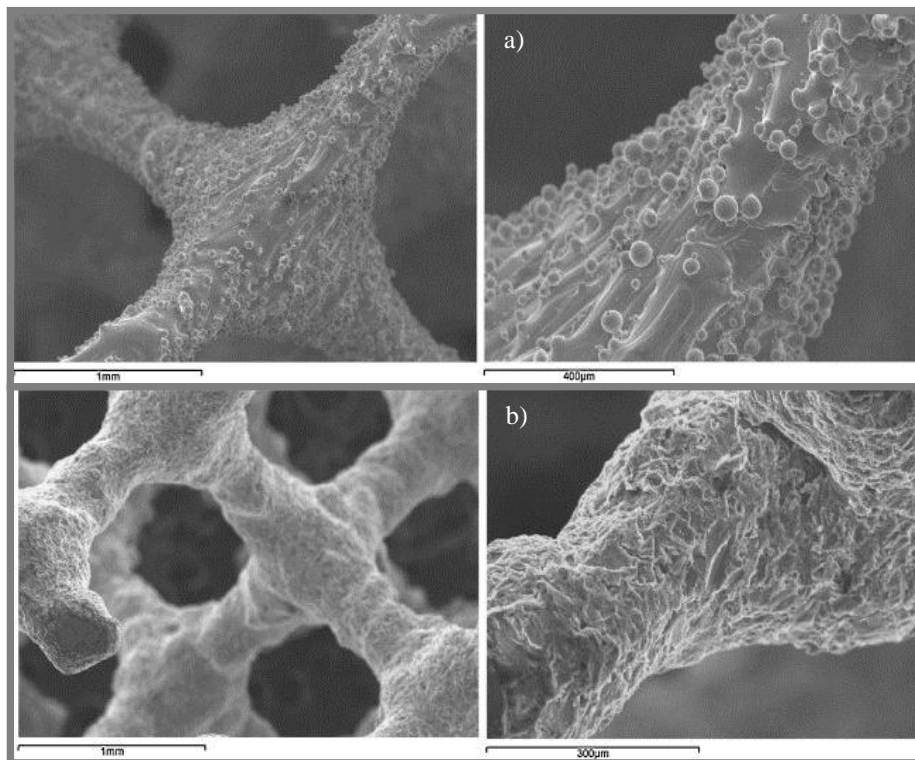
Obr. 2.6 Vliv úhlu stoupání prutů na R_a a R_z [7]

Yan et al. [8] zkoumali vliv geometrie základní buňky na vyrobiteľnosť a mechanické vlastnosti struktur z materiálu AlSi10Mg tvořených periodicky se opakující základní prutovou buňkou typu gyroid. Geometrie tohoto typu buňky je lehce odlišná od té, se kterou se bude pracovat v této práci (obr. 2.7). Tloušťka prutů je zde proměnlivá, a proto se jako základní geometrické parametry uvádějí objemový podíl materiálu (objem materiálu na jednotku objemu) a délka strany základní buňky. Výrobní parametry byly následující – velikost částic prášku 5-20 μm ; průměr laserového paprsku 100 μm ; tloušťka vrstvy 30 μm a rozměry vzorků 25x25x15 mm.



Obr. 2.7 Buňka typu gyroid [8]

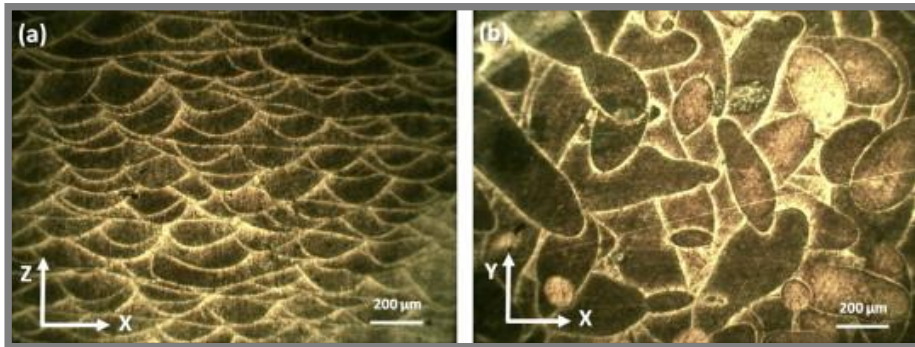
Po vyrobení byly vzorky tepelně zpracovány, což způsobilo, že částečně natavený prášek na povrchu prutů se roztavil úplně a přilnul k jejich povrchu (obr. 2.8).



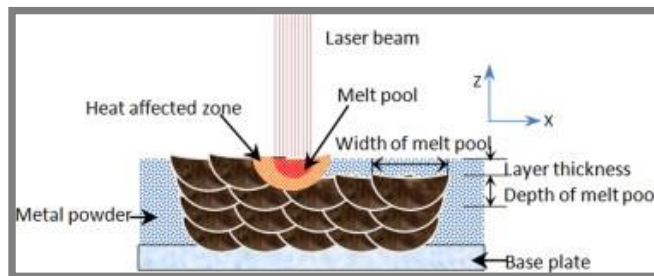
Obr. 2.8 Snímky ze SEM a) před TZ, b) po TZ [8]

Yan et al. [9] se v další práci zabývali kromě mechanických vlastností struktur vyrobených z materiálu AlSi10Mg také mikrostrukturou, pórovitostí a mikrotvrdostí. Výrobní parametry – velikost částic prášku 1-34 µm; průměr laserového paprsku 100 µm; výkon laseru 280 W; tloušťka vrstvy 30 µm; skenovací rychlost 2000 mm/s; hatch spacing 60 µm, rozměry vzorků 25x25x15 mm.

Pozorování optickým mikroskopem odhalilo, že při skenování vrchní vrstvy se nataví i několik vrstev pod ní. Na obr. 2.9a, kde je osa z totožná se směrem výroby, můžeme vidět, že hloubka jednotlivých návarů je asi 140 µm, což je daleko více než výška vrstvy 30 µm. Obr. 2.9b je pořízen kolmo ke směru výroby. Zde je vidět, že návary, které mají velikost až 400 µm, jsou větší než průměr laserového paprsku 100 µm. To je důkazem faktu, že laserový paprsek nataví materiál i ve svém okolí. Obě tyto skutečnosti přispívají k tomu, že vyrobené pruty mají relativní hustotu téměř 100 % (pórovitost téměř 0 %). Na obr. 2.10 je schématické znázornění celé situace.

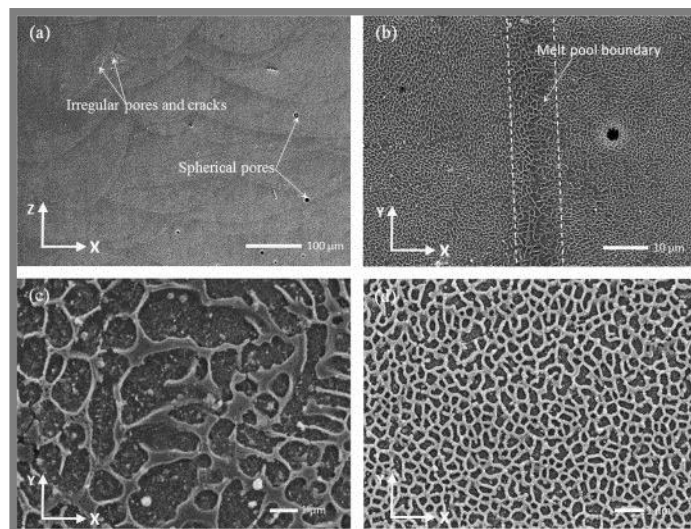


Obr. 2.9 Snímky návarů z optického mikroskopu [9]



Obr. 2.10 Schéma návarů [9]

Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) byla měřena porozita vzorků. Všechny sledované vzorky dosahují porozity okolo 1 %, což je velmi dobrý výsledek, nicméně stále jsou přítomny póry o velikosti 2-5 μm (obr. 2.11a). Tyto póry mohou být způsobeny vytvářením oxidů hliníku, které vznikají i přes to, že objem kyslíku ve stavební komoře je menší než 0,1 %. Tyto oxidy mají daleko větší teplotu tavení než hliníková slitina, vytvářejí tak vrstvičku, která brání tepelné energii dostat se k materiálu. Bylo zjištěno, že laserové paprsky o vysokém výkonu (200 W) jsou schopny prorazit tuto ochrannou vrstvu a vyrábět tak téměř dokonale husté pruty. Proto autoři v této práci volili výkon laseru ještě vyšší, nicméně dokonale hustých prutů se jim dosáhnout nepodařilo.

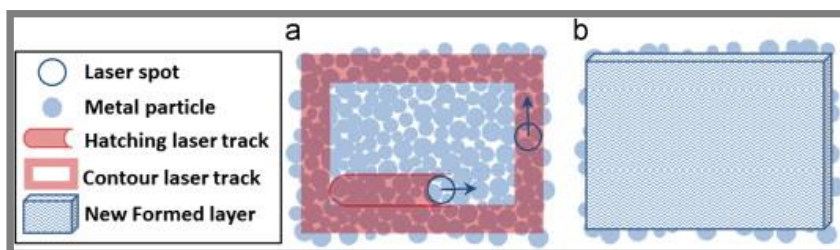


Obr. 2.11 Mikrostruktura prutů, snímky ze SEM [9]

Dále byla pomocí SEM sledována mikrostruktura. Ta je tvořena maticí hliníku a částicemi křemíku, které mají tvar vláken. Jejich pravidelné uspořádání má příznivý vliv na mechanické vlastnosti. Na obr. 2.11b můžeme snadno rozeznat dvě odlišné oblasti. Oblast s hrubší mikrostrukturou mezi dvěma čárkovanými bílými čarami o šířce asi 8 μm odpovídá okraji tavné lázně, zatímco oblast s jemnější mikrostrukturou vnitřku lázně. Obě mikrostruktury jsou porovnány ve stejném měřítku na spodních snímcích (obr. 2.11c,d).

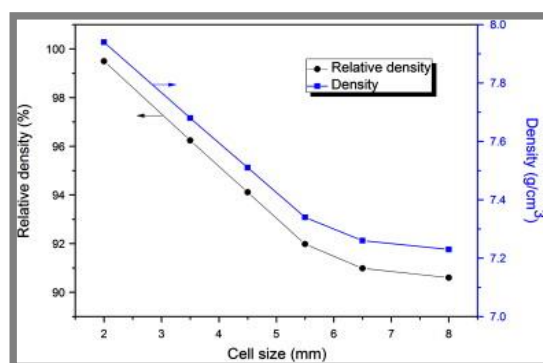
Yan et al. [10] se ve své práci věnovali vyrobiteľnosti a vlastnostmi gyroidních struktur vyrobených z materiálu 316L. Vyrobeno bylo 6 vzorků s konstantním objemovým podílem materiálu (15 %) a proměnlivou délkou strany základní buňky (2; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5 a 8 mm). Výrobní parametry byly následující – výkon laseru 95 W; průměr laserového paprsku 100 μm ; tloušťka vrstvy 75 μm ; scanning time per point 250 μs ; point distance 40 μm ; scan spacing 75 μm ; rozměry vzorků 25x25x15 mm.

Všechny vzorky byly vyrobeny úspěšně a ve shodě se svým CAD modelem, až na velké množství částečně nataveného prášku na povrchu prutů. Vznik tohoto jevu vysvětluje obr. 2.12.



Obr. 2.12 Schéma nalepování prášku na boční stranu prutů [10]

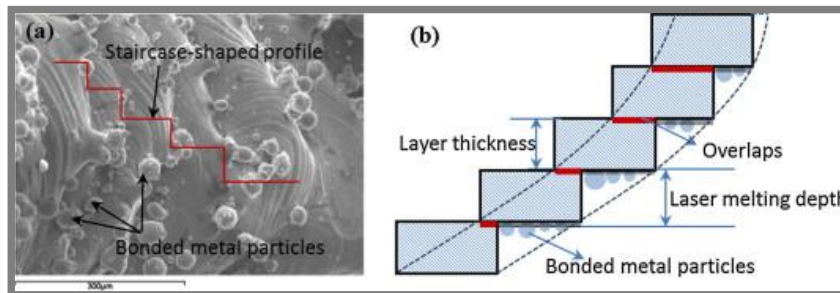
Pruty s kratší délkou strany mají větší relativní hustotu (obr. 2.13), což je vysvětleno kratšími drahami laseru při výrobě těchto struktur a tedy lepšími podmínkami při tuhnutí.



Obr. 2.13 Vliv délky strany na porozitu [10]

Stejní autoři ve své další práci [11] zkusí vyrobit gyroidní strukturu pod nulovým úhlem, tj. pruty vertikálně a horizontálně, což bylo dříve považováno za velmi složité až nemožné. Výsledek byl ale velmi dobrý a při testování mechanických vlastností se tato struktura ukázala lepší než struktura vyrobená standardně pod úhlem 45°. Výrobní parametry byly stejné jako v předchozí práci.

Také vysvětlují nalepování prášku na spodní stranu prutů. Rozřezáním CAD modelu na jednotlivé vrstvy při přípravě výroby a jejich následném položení na sebe vzniknou „schody“. Vzhledem k tomu, že při tavení každé vrstvy se nataví i materiál pod ní [9], přilnou ke spodnímu povrchu prutů částice prášku (obr. 2.14). Tento efekt by mohl být alespoň částečně potlačen ztenčením nanášené vrstvy prášku, tím by došlo k většímu překrytí jednotlivých vrstev a tento jev by nebyl tak výrazný. Zároveň by tím ale došlo k časovému prodloužení výroby.



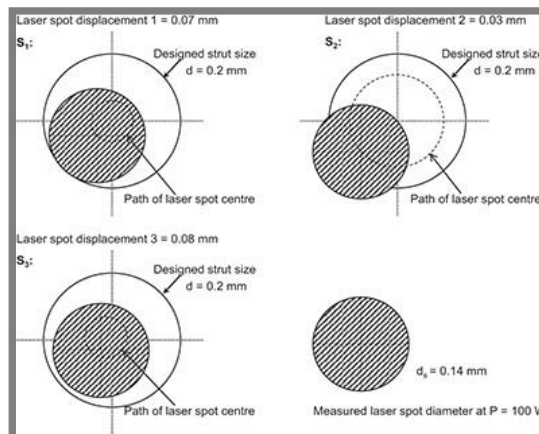
Obr. 2.14 Schéma nalepování prášku na spodní stranu prutů [11]

Abele et al. [12] hledají nejlepší výrobní parametry (skenovací rychlost a vychýlení dráhy laseru) pro výrobu lattice struktur metodou SLM. Konkrétně se zkoumá vliv změny těchto parametrů na průměr prutů. Hustota energie je tentokrát počítána podle vztahu (2.5).

$$E_m = \frac{P}{v} \quad (2.5)$$

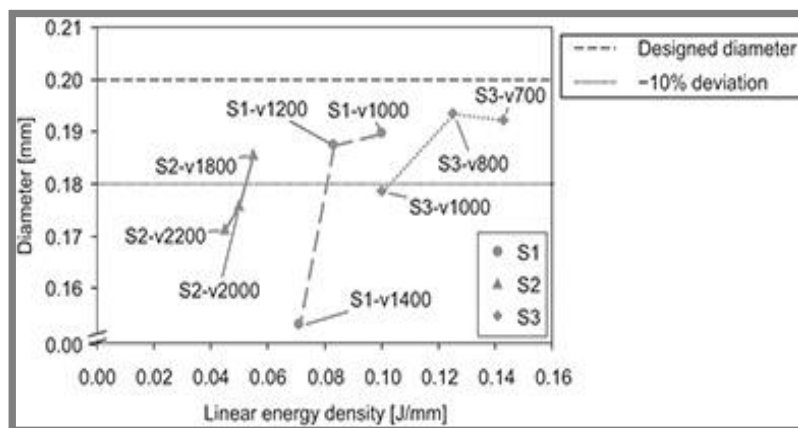
, kde E_v je hustota energie (J/mm), P je výkon laseru (W) a v je skenovací rychlost (mm/s).

Vychýlením dráhy laseru se rozumí posunutí středu působení laseru od okraje prutu. Navržený průměr prutů je 0,2 mm a průměr paprsku laseru je 0,14 mm. Za nulovou hladinu se považuje stav, kdy je střed laserového paprsku přesně na okraji prutu, tj. 0,1 mm od jeho středu. Posunutí má hodnotu 0,03 (S2), 0,07 (S1) a 0,08 (S3) mm ve směru do středu prutu (obr. 2.15).



Obr. 2.15 Vychýlení dráhy laseru [12]

Ze všech 9 kombinací má nejbližší k navrhovanému průměru prutů kombinace S3-v800 (S3 znamená míra vychýlení dráhy laseru a v800 značí skenovací rychlost 800 mm/s), rozdíl mezi navrženým a skutečným průměrem je asi 0,005 mm. Zajímavé je, že kombinace S3-v700, která má větší hustotu energie a stejné vychýlení dráhy laseru, dosáhla menšího průměru (obr. 2.16).



Obr. 2.16 Vliv vychýlení laseru a skenovací rychlosti na průměr prutů [12]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Z rešeršní části práce je vidět, že výrobní parametry mají na výsledné vlastnosti poréznych struktur velký vliv. Jen změnou výkonu laseru ze 150 W na 400 W je možné dosáhnout až dvojnásobného průměru prutů [6]. Prací, které popisují tyto jevy při výrobě poréznych struktur, není mnoho. Většina studií se věnuje vlivu geometrických vlastností struktur na jejich mechanické vlastnosti. Přehled použitých výrobních parametrů ze studovaných článků se nachází v tab. 3.1. Některé parametry v tabulce chybí, protože nebyly v člancích nalezeny. Pro porovnání jsou v posledním sloupci uvedené parametry použité v této práci.

Tab. 3.1 Výrobní parametry

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5 a 6]	[7]	BP
výkon laseru [W]	150-400	350	 	280	95	100	100-400
skenovací rychlost [mm/s]	1000-4000	921	 	2000	 	700-2200	1000-10000
tloušťka vrstvy [μm]	 	50	30	30	75	20	50
hatch spacing [μm]	 	190	 	60	75	 	190
průměr laseru [μm]	50	 	100	100	100	140	80
materiál	hliník	hliník	hliník	hliník	ocel	ocel	hliník
typ buňky	lattice	různý	gyroid	gyroid	gyroid	lattice	lattice
průměr prutů [mm]	0,3	 	 	 	 	0,2	0,6
délka strany [mm]	2	 	 	 	 	1	4

Autoři [9] uvádějí, že výkon laseru vyšší než 200 W dokáže prorazit ochrannou vrstvu oxidů a vyrábět tak téměř dokonale husté pruty. Při pohledu na závislost porozity na výkonu laseru [6] lze opravdu vidět zhruba při 225 W zlom a následné snižování porozity. Zbývá ale ještě vysvětlit výrazný pokles porozity při nejnižších výkonech laseru.

Autoři [7] vyčíslují drsnost povrchu prutů. Z jejich výsledků je patrné, že nalepeného prášku na spodní straně prutů je více při menším úhlu stoupání prutu. To vysvětluje Yan et al. [11] schodovitým efektem, neboť při menším úhlu stoupání prutu se jednotlivé vrstvy překrývají méně a nalepeného prášku je tedy více. Výslednou strukturu povrchu tedy lze ovlivnit úhlem stoupání prutů, tloušťkou nanášené vrstvy prášku nebo tepelným zpracováním. [8]

Některé výrobní parametry jsou v člancích [7,12] shrnuty do jednoho s názvem hustota energie. Autoři těchto článků uvádějí dvě různé rovnice, jak k tomuto parametru dojít. Rovnice (2.1) je komplexnější a zahrnuje více výrobních parametrů než rovnice (2.5). Ani takto vypočítaná hustota energie ale nestačí k popisu výrobního procesu. Průměr prutů se dá ovlivňovat i vychýlením laserového paprsku, které není v tomto parametru nijak zahrnuto.

3.2 Cíl práce

3.2

Cílem práce je výzkum procesních parametrů pro výrobu strukturovaného materiálu technologií SLM. Vyšetřován bude konkrétně vliv výkonu laseru a rychlosti skenování na průměr prutů a strukturu jejich povrchu. Dále bude prověřena shoda vyrobených vzorků s CAD modelem a budou vyhledány nejčastější defekty vzniklé při procesu výroby.

4 MATERIÁL A METODY

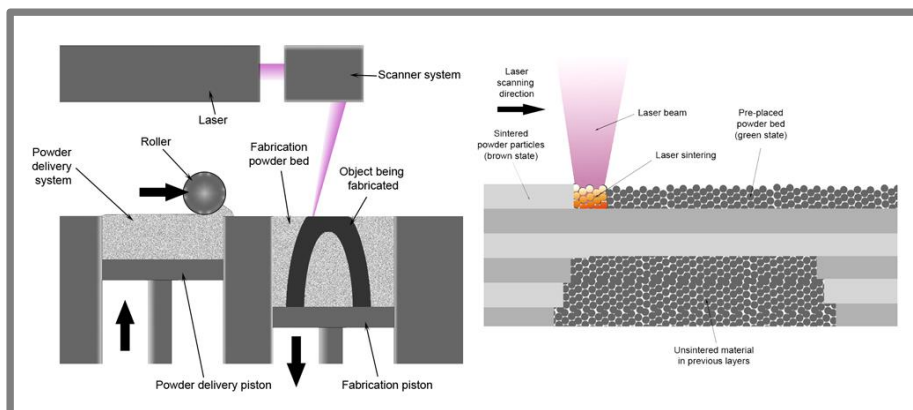
4.1 SLM 280 HL

SLM 280 HL je zařízení (obr. 4.1) pro výrobu kovových součástí metodou selective laser melting (SLM). Poskytuje výrobní prostor o rozměrech 280x280x350 mm a je vybaveno laserem o maximálním výkonu 400 W. Maximální skenovací rychlost je 10 000 mm/s a tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 20-75 μm . Tisk probíhá v ochranné atmosféře argonu nebo dusíku, aby nedocházelo k nežádoucím chemickým reakcím při výrobě. K výrobě může být použita celá řada materiálů, např. nerezové a nástrojové oceli, slitiny kobaltu, chromu, hliníku nebo titanu. [13]



Obr. 4.1 Stroj SLM 280 HL [14]

Technologie SLM spočívá v nanášení tenkých vrstev kovového prášku pomocí gumového břitu a jejich následné spékání výkonným laserem (obr. 4.2). Nespečený prášek zároveň při výrobním procesu částečně funguje jako podpora (powder bed system), po jeho ukončení se regeneruje a znovu používá, což vede k výraznému ušetření materiálu. Největší výhodou tohoto procesu je možnost výroby tvarově velmi složitých dílů, v našem případě porézních struktur. [1]

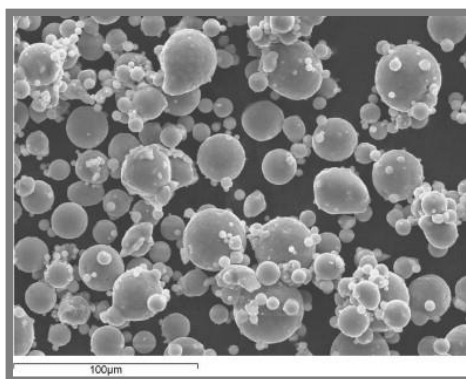


Obr. 4.2 Schéma SLM procesu [1]

4.2 Prášek AlSi10Mg

Kovový prášek pro technologii SLM se vyrábí metodou Gas Atomization. Při této metodě je do proudu roztavené slitiny přiváděn inertní plyn o vysoké kinetické energii, který roztavený kov rozprašuje na malé kapičky. Ty tuhnou v průběhu letu a dopadnou na dno nádoby jako malá zrnka prášku. Prášek se potom přesívá, což slouží k odstranění příliš velkých zrn, které poté absolvují celý proces znovu. [15]

Vlastnosti vyrobených součástí výrazně ovlivňují parametry použitého prášku (obr. 4.3). Hlavními parametry jsou zrnitost, kulovitost a tekutost prášku. Zrnitost vyjadřuje velikost jednotlivých zrn prášku. Výrobce vždy udává graf rozložení velikosti částic, jeho střední hodnotu a medián. Důležité je, aby střední hodnota a medián rozložení byly stále menší než tloušťka nanášené vrstvy. Kulovitost určuje, jak moc je tvar zrn odlišný od ideální koule. Tyto dvě vlastnosti prášku nejvíce ovlivňují výslednou pórovitost a drsnost povrchu vyrobených součástí. V této práci byl použit nový prášek od firmy TLS se střední hodnotou 41,4 μm ; mediánem 40,7 μm a směrodatnou odchylkou 12,9 μm . Doba sušení byla 6 hodin.



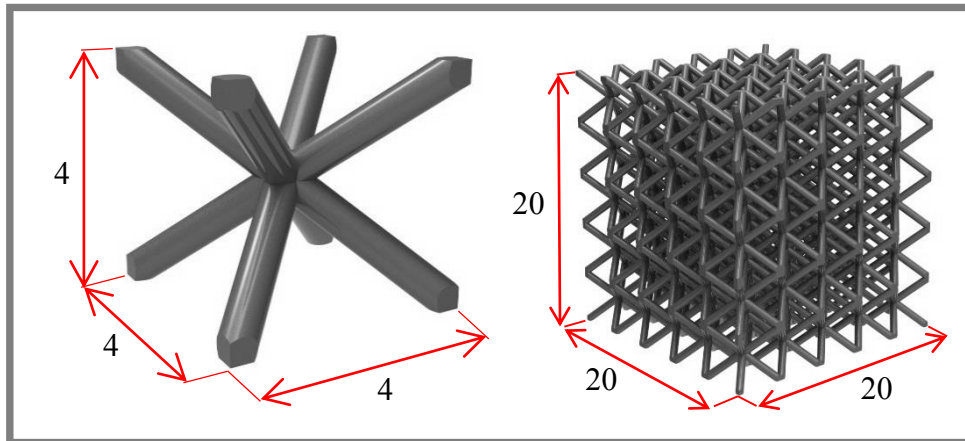
Obr. 4.3 Prášek AlSi10Mg [8]

4.3 Návrh vzorků

V první fázi bylo nutno vytvořit model vyráběných součástí, k čemuž byl použit program Inventor 2015, což je profesionální software pro strojírenské navrhování od společnosti Autodesk. Nejprve byly vymodelovány 4 pruty o průměru 0,6 mm svírající se základní rovinou úhel 45° a stýkající se v jednom uzlu, následně byly okraje prutů ořezány tak, aby bylo možné takto vzniklý základní tvar nakopírovat několikrát vedle sebe a vytvořit tak kompletní porézní strukturu o délce strany základní buňky $a = 4 \text{ mm}$ a rozměrech 20x20x20 mm (obr. 4.4).

Takto vytvořený model byl exportován ve formátu STL. Díky tomu je CAD model nahrazen polygonální trojúhelníkovou sítí, jejíž jemnost lze ovlivnit při exportu. Jemnější síť jsou přesnější, ale zabírají velký objem dat. Je tedy vhodné volit kompromis mezi oběma extrémami. Soubor STL byl poté nahrán do programu Autofab, což je software pro přípravu tisku. V tomto programu probíhá rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy a vygenerování drah laseru pro každou z nich. Zde je před vygenerováním vrstev pro jednotlivé díly přidělen materiálový soubor, který obsahuje

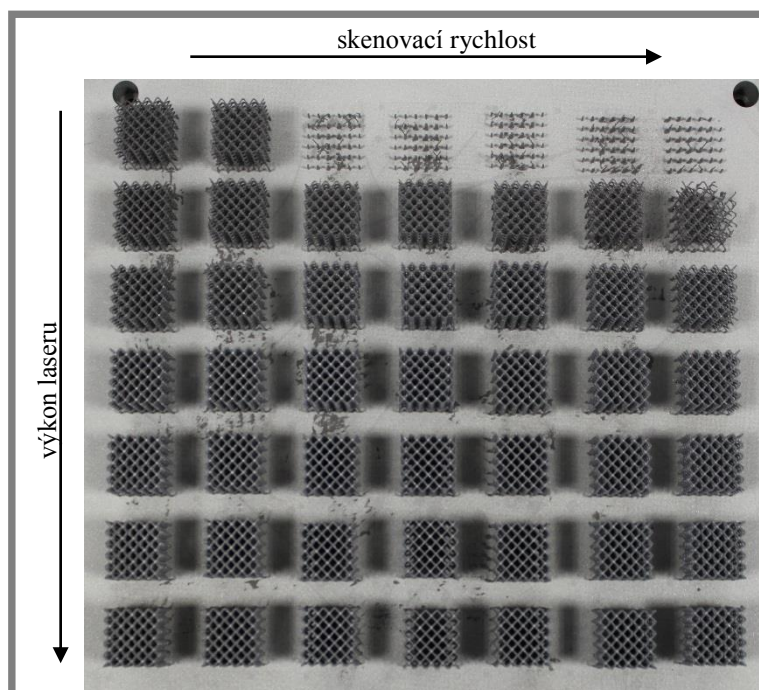
všechny procesní parametry pro jeho výrobu. Zařízení SLM 280 HL umožňuje najednou vyrábět díly s různými parametry, čehož bylo využito při výrobě procesní mapy.



Obr. 4.4 Geometrie porézních lattice struktur

4.4 Výroba vzorků

Již při prvním pohledu na vyrobené vzorky (obr. 4.5) si lze všimnout, že některé se vůbec nevyrobily. To je dáno nevhodnou kombinací procesních parametrů. Ostatní se vyrobily úspěšně. Na mapě směrem dolů roste výkon laseru a směrem doprava roste skenovací rychlost (tab. 4.1). V tabulce jsou červeně vyznačená čísla vzorků, které se nepodařilo vyrobit, zeleně jsou úspěšně vyrobené. Na obr. 4.5 jsou pouze vzorky vyrobené skenovací rychlostí do 7000 mm/s, ostatní byly vyrobeny v další sadě vzorků.



Obr. 4.5 První sada vyrobených vzorků

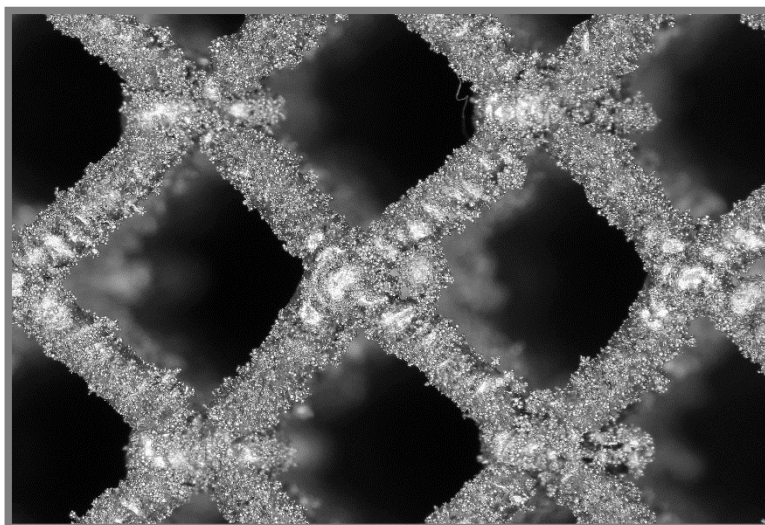
Tab. 4.1 Mapa vyrobených vzorků

		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	100	1	8	15	22	29	36	43	50	57	64
	150	2	9	16	23	30	37	44	51	58	65
	200	3	10	17	24	31	38	45	52	59	66
	250	4	11	18	25	32	39	46	53	60	67
	300	5	12	19	26	33	40	47	54	61	68
	350	6	13	20	27	34	41	48	55	62	69
	400	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70

4.5 Analýza vzorků

4.5

Pro analýzu povrchu prutů byly vytvořeny pomocí optického mikroskopu (Olympus SZX7) vždy 4 makroskopické snímky každého vzorku, které byly následně softwarově složeny do jednoho snímku s velkou hloubkou ostrosti (obr. 4.6). Použité přiblížení je 16x. Na obrázku je dobře vidět natavený prášek na povrchu prutů po celé jejich délce, nejvýrazněji v blízkosti uzlů, kde se pruty stýkají. Pro porovnání nalepených částic na prutech struktury byla vyrobena mapa fotek odpovídající mapě parametrů.

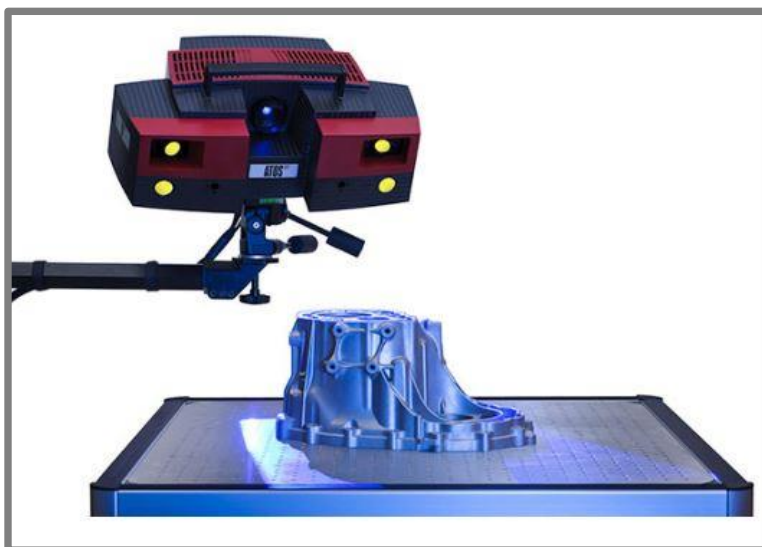


Obr. 4.6 Vzorek č. 20, snímek z optického mikroskopu

Vzhledem k měnícímu se průměru prutu při změně rychlosti a výkonu laseru [6] je předpokládáno, že i hmotnost vzorku se bude pro různá nastavení procesních parametrů měnit. Proto byla vytvořena mapa změny hmotnosti vzorku v závislosti na procesních parametrech. Hmotnost byla měřena na váze (Jadever JKH-500) s přesností 0,1 g.

4.6 ATOS Triple Scan

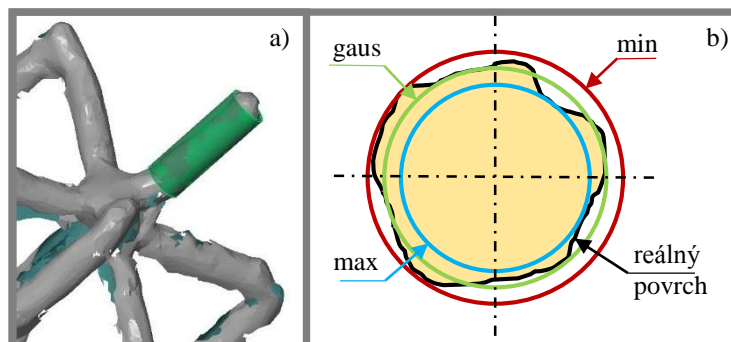
Struktury byly digitalizovány 3D skenerem ATOS Triple Scan od společnosti GOM (obr. 4.7). Tento skener je velmi flexibilní, lze jím měřit objekty od několika milimetrů do několika metrů. Po aplikaci titanového nebo křídového prášku naskenuje i lesklé nebo průhledné povrchy. Proces měření je založen na principu optické triangulace a fotogrammetrie. Na povrch objektu jsou promítány pruhy světla, které jsou snímány pomocí dvou kamer s CCD čipem. Skener pak vypočítá prostorové souřadnice jednotlivých bodů a složí je do jednoho modelu. 3D skenery se využívají hlavně při kontrole kvality, analýze poškození a reverzním inženýrství. [16]



Obr. 4.7 ATOS Triple Scan [17]

Při měření byly porézní struktury upevněny na rotační stolek a následně provedeno skenování čtyř rohových prutů, které byly dále analyzovány. Analýza byla provedena v programu GOM Inspect, což je software pro měření a analýzu polygonálních dat (obr. 4.8a). Do čtyř krajních prutů každé struktury byly „nařítovány“:

1. maximální vepsaný válec (max)
2. Gaussův střední válec (gaus)
3. nejmenší opsaný válec (min) (obr. 4.8b)



Obr. 4.8 a) měření v programu GOM Inspect; b) fitované válce

Jejich průměry byly změřeny a průměrná hodnota byla zapsána do tabulky. U slabších struktur některé krajní pruty chyběly a některým nebylo možné vepsat opsané válce z důvodu velmi členitého povrchu, který nebylo možné kvalitně digitalizovat. Měření čtyř rohových prutů bylo provedeno za účelem nalezení perspektivní oblasti pro další analýzu pomocí mCT.

4.7 Micro computer tomography

4.7

Micro computer tomography (mCT) bylo použito pro zmapování průměrů prutů uvnitř struktur. Využití rentgenového záření umožňuje popsat vzorky i v místech, která jsou nedostupná pro digitalizaci optickým skenerem.

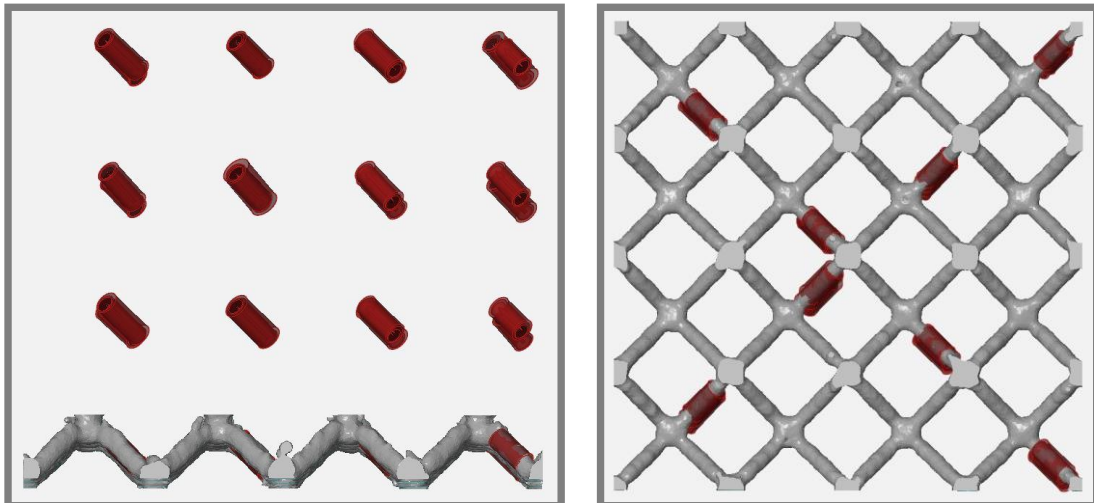
Pro analýzu pomocí mCT bylo vybráno 27 vzorků:

1. na základě nejmenší odchylky naměřených průměrů „nafitovaných“ válců z předchozího měření 3D skenerem od navrženého průměru
2. tak, aby pokryly téměř celou oblast výroby
3. vyrobené při konstantním výkonu laseru 350 W pro popis změny průměru při konstantním výkonu laseru a proměnné skenovací rychlosti
4. vyrobené při konstantní skenovací rychlosti 3000 mm/s pro popis změny průměru při konstantní rychlosti skenování a proměnném výkonu laseru

Výstupem z mCT měření byla data ve formátu STL. Díky tomu bylo možné pro analýzu průměrů prutů opět využít program GOM Inspect. Měření bylo provedeno vytvořeným skriptem, který umožňuje plně automaticky vybírat 32 míst uvnitř struktury a automaticky vkládat a měřit průměry „fitovaných“ válců.

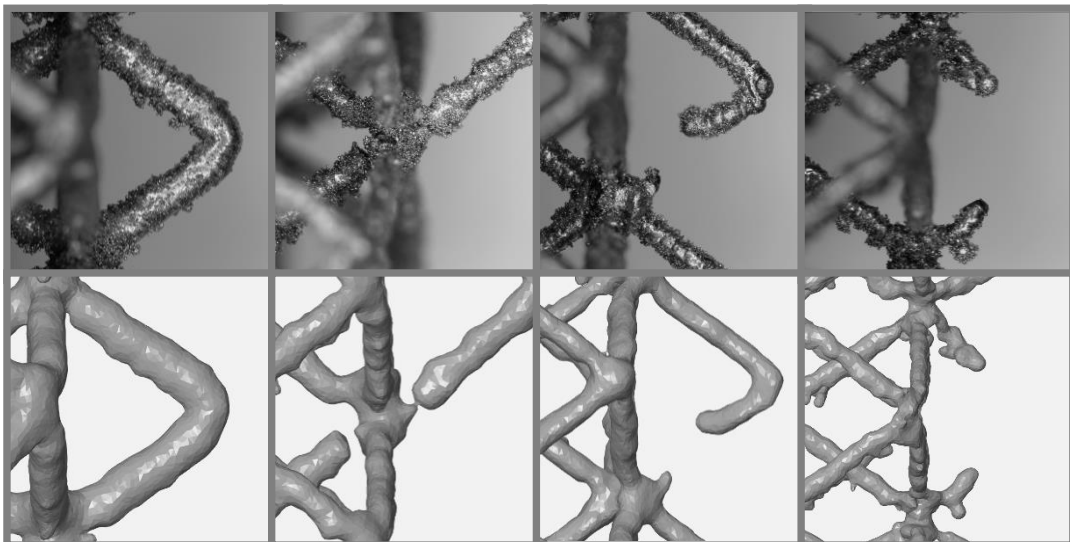
V první části skriptu byla vložena CAD data struktury. Na CAD datech bylo vytvořeno 6 rovin, každá 2 mm od okraje, pomocí kterých byla STL data každého vzorku posléze oříznuta. Posledním úkonem v této části skriptu byl import dat příslušného vzorku. Poté bylo nutno manuálně ustavit data vzorku na CAD model, k tomu byly využity funkce Pre-alignment a Alignment. Tyto funkce provedly ustavení STL a CAD dat na best fit (STL a CAD model jsou na sebe umístěny s nejmenšími odchylkami na celém objemu dat).

Následně byla spuštěna druhá část skriptu, kde proběhlo nejdříve ořezání dat vytvořenými rovinami a měření objemu vyplněného materiálem. To nahrazuje a zpřesňuje vážení vzorků. Díky ořezání okrajů vzorků byla eliminována chyba měření vzniklá tím, že některé vzorky mohly být mechanicky poškozeny při odstraňování ze základní desky, např. ulomením krajních prutů. V dalším kroku byly vloženy válce (max, gaus, min) na všech 32 vybraných míst (obr. 4.9). K tomuto účelu byla data ještě jednou ořezána, tentokrát rovinami kolmými na směr výroby vzdálenými od sebe 2 mm. Všechny hodnoty (32 míst x 3 válce x 27 struktur = 2592 hodnot) byly exportovány do programu Microsoft Excel a vyhodnoceny.



Obr. 4.9 Rozložení měřených míst ve struktuře

Data z mCT všech vzorků byla vizuálně prozkoumána a byly nalezeny vady vzniklé v průběhu výroby. Vypozorovány byly 3 druhy defektů – ztenčování prutu v napojení na uzel, prasknutí prutu v témže místě a nepřítomnost celého prutu mezi dvěma uzly. Vady byly nalezeny jak v naskenovaných datech z mCT, tak i na reálných strukturách, kde byly vyfoceny opět pomocí optického mikroskopu s funkcí Deep focus. Obrázky z GOMu a snímky z mikroskopu byly položeny vedle sebe pro porovnání reálných a naskenovaných dat (obr. 4.10).



Obr. 4.10 Typy defektů, zleva: ideální spojení, zúžení v místě napojení, lom prutu, chybějící prut

Na základě všech předchozích analýz byly vybrány 2 vzorky, které byly znovu naskenovány pomocí mCT s vyšším rozlišením. Díky tomu mohla být zkoumána porozita uvnitř materiálu vzorků. Vybrané vzorky byly vzorek č. 6 (reprezentuje standardně používané parametry SLM) a vzorek č. 20 (reprezentuje nejvíce perspektivní oblast na základě analýz).

5 VÝSLEDKY

V této kapitole budou prezentovány výsledky měření popsanych v kapitole předchozí. K vyhodnocování výsledků byl použit program Microsoft Excel.

5.1 Předběžné výsledky

5.1

Tyto výsledky jsou pouze orientační a sloužily k vybrání perspektivní oblasti pro analýzu na mCT

5.1.1 Měření hmotnosti

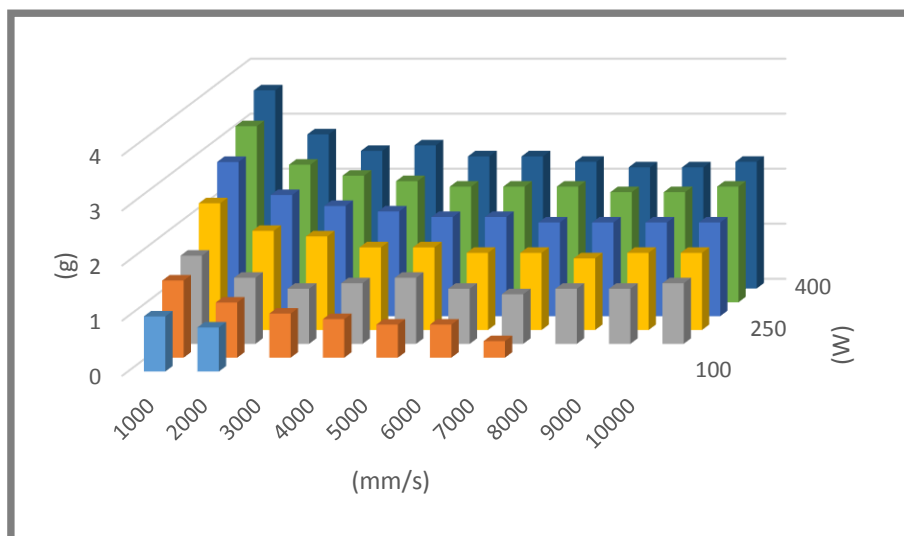
5.1.1

Jako první byla měřena hmotnost. Výsledky v gramech jsou uvedeny v tab. 5.1. Teoretická hmotnost jedné struktury získaná z CAD softwaru je 2,3 g. Lze zde vidět jasný trend zmenšování hmotnosti s klesajícím výkonem laseru i skenovací rychlostí, ten ale od rychlosti 3000 mm/s výše není tak výrazný. Pro lepší orientaci v datech byl vytvořen graf (obr. 5.1).

Tab. 5.1 Hmotnost vzorků

		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	100	1	0,8								
	150	1,4	1	0,8	0,7	0,6	0,6	0,3			
	200	1,6	1,2	1	1,1	1,2	1	0,9	1	1	1,1
	250	2,3	1,8	1,7	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4
	300	2,8	2,2	2	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7
	350	3,2	2,5	2,3	2,2	2,1	2,1	2,1	2	2	2,1
	400	3,6	2,8	2,5	2,6	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,3

Pozn.: zelená 2,3±25 %; oranžová 2,3±50 %; červená ostatní



Obr. 5.1 Hmotnost vzorků

5.1.2 Měření průměru prutů na datech z 3D skeneru

Dalším v pořadí bylo měření pomocí 3D skeneru. Průměry Gaussova středního válce v milimetrech jsou vyčísleny v tab. 5.2 Tyto hodnoty byly vypočítány jako aritmetický průměr hodnot ze 4 měřených rohových prutů. Vzhledem k tomu, že jde pouze o předběžné výsledky pro výběr perspektivních kandidátů, je možné problémy s průměrováním malého množství hodnot zanedbat. Některé struktury nebyly kvalitně naskenovány, proto společně s těmi nevyrobenými v tabulce chybí. Modře vyznačené vzorky byly vybrány pro analýzu na mCT podle kritérií uvedených v předchozí kapitole. Aritmetické průměry pro maximální vepsaný i minimální opsaný válec vykazují stejné trendy, proto jsou uvedeny v PŘÍLOZE I.

Tab. 5.2 Průměry Gaussova středního válce na datech z 3D skeneru

		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	100	0,45									
	150	0,47	0,41								
	200	0,49	0,44	0,39	0,42	0,44	0,39	0,38	0,42	0,43	0,41
	250	0,62	0,54	0,52	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47
	300	0,66	0,58	0,57	0,54	0,56	0,54	0,55	0,54	0,52	0,53
	350	0,73	0,63	0,59	0,59	0,59	0,57	0,59	0,56	0,56	0,57
	400	0,77	0,66	0,63	0,63	0,63	0,62	0,62	0,63	0,60	0,65

5.2 Výsledky z mCT

5.2.1 Měření objemu

Výsledky měření v mm³ jsou zaznamenány v tab. 5.3. Teoretický objem ořezané struktury zjištěný z CAD softwaru je 434 mm³. Hodnoty objemů velmi dobře odpovídají hodnotám hmotností, z čehož lze usuzovat, že naskenovaná data jsou v dobré shodě s reálnými vzorky.

Tab. 5.3 Objem vzorků

		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	200			198		218		181			
	250		339	314			270		254		264
	300			404	346	346		338		326	
	350	612	475	434	425	410	404	393	374	378	388
	400			479		464		447		424	

Pozn.: zelená 434±25 %; oranžová 434±50 %; červená ostatní

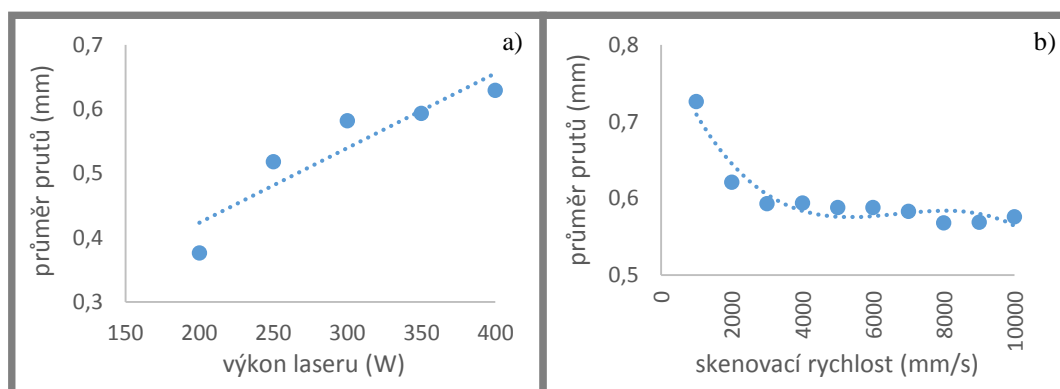
5.2.2 Měření průměru prutů na datech z mCT

Průměry Gaussova střední válce v mm jsou uvedeny v tab. 5.4. Tyto hodnoty byly spočítány jako aritmetický průměr ze všech 32 měřených míst. Odchytky od měření pomocí 3D skeneru se pohybují v setinách milimetru. Toto měření už ale není zatíženo chybou danou malým počtem hodnot nebo špatným naskenováním, proto jsou tyto hodnoty brány jako přesnější.

Tab. 5.4 Průměry Gaussova středního válce na datech z mCT

		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	200			0,38		0,44		0,38			
	250		0,54	0,52			0,47		0,46		0,47
	300			0,58	0,53	0,53		0,53		0,52	
	350	0,73	0,62	0,59	0,59	0,59	0,59	0,58	0,57	0,57	0,58
	400			0,63		0,63		0,62		0,60	

Obr. 5.3a dokumentuje vliv výkonu laseru na průměr prutů při konstantní skenovací rychlosti 3000 mm/s, průběh je přibližně lineární. Na obr. 5.3b je závislost průměru prutů na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W. Při rychlostech 1000 mm/s a 2000 mm/s je průměr prutů výrazně větší než v ostatních případech. Naopak od rychlosti 3000 mm/s se průměr prutů mění pouze v řádech setin milimetru.



Obr. 5.2 Vliv a) výkonu laseru, b) skenovací rychlosti na průměr prutů

Aritmetické průměry maximálních vepsaných a minimálních opsaných válců jsou uvedeny v PŘÍLOZE II. Průměr max je asi o 0,1 mm nižší než gaus. Až na jednu výjimku vždy klesá se snižujícím se výkonem laseru a rostoucí skenovací rychlostí. Průměr min je asi o 0,15 mm vyšší než gaus. Jeho závislost na vyšetřovaných výrobních parametrech výrazněji kolísá, je totiž ovlivněn množstvím nataveného prášku na povrchu prutů.

K vyčíslení množství nataveného prášku na povrchu byl zaveden parametr struktury povrchu (tab. 5.5). Ten byl vypočítán jako rozdíl min a max. Nejnižší hodnoty parametru se nacházejí uprostřed tabulky, tedy při středním výkonu laseru i skenovací rychlosti.

Tab. 5.5 Parametr struktury povrchu

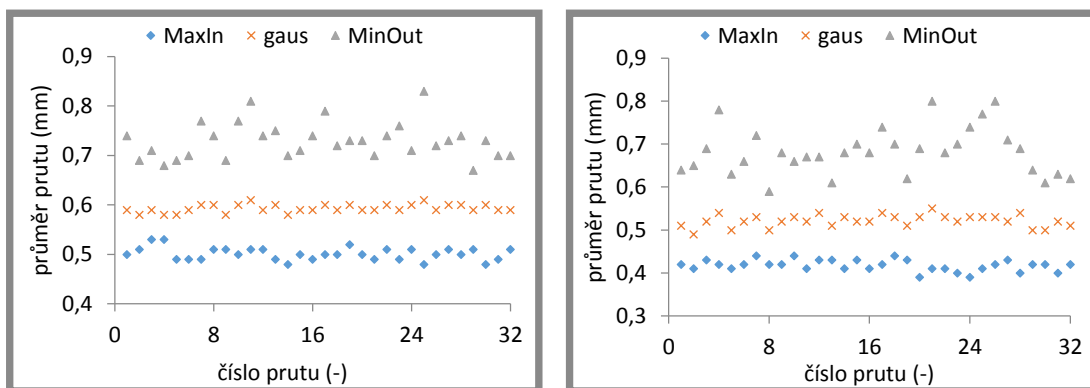
		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	200			0,22		0,40		0,24			
	250		0,33	0,33			0,17		0,22		0,28
	300			0,28	0,20	0,21		0,24		0,27	
	350	0,33	0,28	0,23	0,27	0,25	0,27	0,31	0,29	0,29	0,33
	400			0,23		0,33		0,35		0,39	

Dalším kritériem byla odchylka od navrhnutého průměru 0,6 mm. Aritmetické průměry hodnot všech 3 válců (max, gaus, min) byly odečteny od navrhnutého průměru 0,6 mm a v absolutní hodnotě poté sečteny. Výsledky jsou zaznamenány v tab. 5.6. Nejlepších výsledků dosahují vzorky, jejichž gaus je nejbližší navrženému průměru. Připočítáním průměrů max a min je do tohoto parametru vnesena ale i nepravidelnost povrchu prutů.

Tab. 5.6 Odchylka od navrženého průměru

		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	200			0,63		0,56		0,59			
	250		0,40	0,41			0,36		0,38		0,41
	300			0,30	0,27	0,28		0,31		0,34	
	350	0,47	0,30	0,23	0,28	0,26	0,28	0,33	0,32	0,32	0,35
	400			0,26		0,35		0,37		0,40	

Na obr. 5.3 jsou všechny změřené průměry pro jednu strukturu. Lze vidět, že průměry prutů jsou téměř stejné a nezávisí na jejich poloze ve struktuře.



Obr. 5.3 Všechny změřené průměry pro vzorky č. 20 (vlevo) a č. 61 (vpravo)

V tab. 5.7 je vyhodnocení struktur podle napojení prutů na uzly. Lze říci, že kvalita napojení klesá s průměrem prutů, ale není tomu tak zcela. Například vzorky vyrobené při výkonu laseru 350 W od skenovací rychlosti 3000 mm/s mají téměř stejný průměr prutů, ale kvalita napojení se zvyšující se skenovací rychlostí klesá.

Tab. 5.7 Napojení prutů na uzly

		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	200	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	250	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	300	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	350	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	400	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕

- zelená barva nejkvalitnější napojení, málo častá zúžení, žádné lomy
- fialová barva velké množství nataveného materiálu v uzlech
- oranžová barva častější zúžení, žádné lomy
- červená barva častá zúžení, výskyt lomů
- černá barva velké množství lomů, výskyt chybějících prutů

5.3 Vyhodnocení

5.3

Vzorky byly vyhodnoceny na základě těchto parametrů:

1. objem vzorků (tab. 5.3), zeleně označené vzorky 3 body, oranžové 2 body, červené 1 bod
2. parametr struktury povrchu (tab. 5.5), nejlepších 9 vzorků 3 body, dalších 9 vzorků 2 body, nejhorších 9 vzorků 1 bod
3. odchylka od navrženého průměru (tab. 5.6), nejlepších 9 vzorků 3 body, dalších 9 vzorků 2 body, nejhorších 9 vzorků 1 bod
4. rozptylu všech naměřených hodnot (obr. 5.3), vzorky s nejmenšími rozdíly mezi hodnotami 3 body, větší rozdíly 2 body, největší rozdíly 1 bod
5. kvalita napojení prutů na uzly (tab. 5.7), zeleně označené vzorky 3 body, fialově a oranžově 2 body, červeně 1 bod, černě 0 bodů

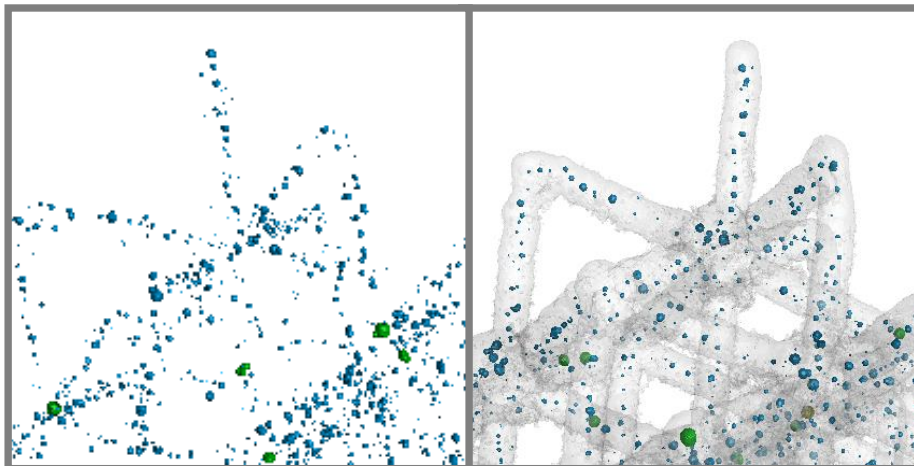
Bodové hodnocení všech vzorků je v tab. 5.8. Nejlépe z hodnocení vyšel vzorek č. 20, který byl vyroben při výkonu laseru 350 W a skenovací rychlosti 3000 mm/s. Získal maximální počet bodů, což znamená, že ve všech sledovaných parametrech dopadl výborně. Velmi dobře dopadly také vzorky vyrobené za výkonu laseru 300-400 W a skenovací rychlosti 2000-6000 mm/s. Ostatní vzorky dosáhly výrazně nižšího bodového hodnocení.

Tab. 5.8 Bodové hodnocení vzorků

		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	200			8		6		6			
	250		8	7			11		8		6
	300			13	14	14		11		11	
	350	8	12	15	14	12	13	11	9	9	8
	400			13		10		9		9	

5.4 Test porozity

Rozložení pórů pro obě vyšetřované struktury bylo velmi podobné (obr. 5.4). Drtivá většina pórů má objem menší než $0,003 \text{ mm}^3$ a jsou rozloženy rovnoměrně v celé struktuře v uzlech i mimo ně. Větší póry se vyskytují pouze v uzlech. Největší nalezený pór má objem $0,015 \text{ mm}^3$. Standardní parametry reprezentovány vzorkem č. 6 mají porozitu 0,6 %, struktura č. 20 se vykazuje pórovitostí 0,7 %.



Obr. 5.4 Porozita vzorku č. 6 (vlevo) a č. 20 (vpravo)

6 DISKUZE

K určení mechanických vlastností porézních struktur je zapotřebí znát skutečný průměr, tvar, defekty a vnitřní porozitu prutů ve struktuře. Ty se výrazně mění v závislosti na použitých procesních parametrech, proto je důležité zabývat se jejich optimalizací.

Tato práce je zaměřena na nalezení optimálního výkonu laseru a skenovací rychlosti pro výrobu lattice struktur metodou SLM. Testované struktury měly BCC geometrii, která byla v nalezených člancích nejpoužívanější. Délka strany základní buňky byla 4 mm a průměr prutů 0,6 mm. Na základě rešerše a možnostech použitého stroje SLM 280 HL byla vyrobena procesní mapa v rozsahu výkonu laseru 100–400 W a skenovací rychlosti 1000–10000 mm/s.

Při daných ostatních parametrech se struktury při výkonech 100 W a 150 W kvůli nedostatečné energii laseru vůbec nevyrobily nebo jsou velmi křehké. Výběr optimálních parametrů byl tedy omezen výkonem 200 W. Podle předpokladů [6] se střední průměr prutů zvyšuje s rostoucím výkonem laseru přibližně lineárně, zatímco s rostoucí skenovací rychlostí nejprve výrazně klesá a od rychlosti 3000 mm/s se téměř nemění. To je dáno rozdílnou energií laseru při výrobě.

Nejvíce nataveného prášku se nachází na spodním povrchu prutů (z pohledu výroby), což potvrzuje i [7]. Tento fakt si lze vysvětlit schodovitým efektem při rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy při přípravě výroby [11]. Byl vypočítán parametr struktury povrchu, který ale navzdory předpokladům neroste se zvyšující se energií laseru.

Pro mechanické vlastnosti struktur je velmi důležitá kvalita napojení prutů v uzlech, neboť právě tam dochází při zatížení k jejich porušení [6]. Oproti očekávání byly na naskenovaných datech i na vyrobených vzorcích nalezeny různé druhy defektů vzniklých při procesu výroby. S klesající energií laseru se defekty objevují častěji a mají vážnější charakter, neboť právě při nižší energii laseru hrozí nedostatečné roztavení prášku a s tím související vznik defektů.

Jako nejvíce vyhovující byl vyhodnocen vzorek, který byl vyroben při výkonu laseru 350 W a skenovací rychlosti 3000 mm/s. Jeho porozita byla podle očekávání [6,7] nepatrně vyšší než při standardně používaných výrobních parametrech (350 W, 3000 mm/s).

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na hledání optimálních výrobních parametrů (výkon laseru a skenovací rychlost) pro výrobu porézních struktur metodou SLM. Byla zvolena nejběžnější BCC geometrie struktur s délkou strany základní buňky 4 mm a průměrem prutů 0,6 mm. Sada vzorků byla vyrobena v rozsahu výkonu laseru 100–400 W a skenovací rychlosti 1000–10000 mm/s.

Vyrobené vzorky byly podrobeny orientačnímu měření za účelem vybrání perspektivních vzorků pro analýzu pomocí mCT. Nejprve byly vzorky pomocí optického mikroskopu fotograficky zdokumentovány a na pořízených snímcích bylo sledováno množství nataveného prášku na povrchu prutů. Dále byla u všech vzorků změřena hmotnost a porovnána s teoretickou hmotností získanou z CAD modelu. Nakonec byly vzorky naskenovány optickým skenerem ATOS Triple Scan. Na naskenovaných datech byly změřeny průměry 4 rohových prutů každého vzorku a porovnány s navrženým průměrem z CAD modelu. Na základě těchto analýz bylo vybráno z původních 70 vzorků 27, které byly naskenovány pomocí mCT.

Na datech z mCT mohly být změřeny díky použití rentgenového záření průměry prutů i uvnitř struktur. K tomu byl vytvořen skript v programu GOM Inspect, který automaticky měřil průměry na 32 prutech napříč celou strukturou a také objem materiálu. Kvůli měření objemu byla STL data oříznuta z každé strany rovinami vzdálenými od kraje 2 mm, aby byl eliminován vliv chybějících krajních prutů, které byly poškozeny nebo ulomeny při manipulaci se vzorky. Z hodnot průměrů byly vytvořeny parametry struktury povrchu a odchylky od CAD dat. Data z mCT byla vizuálně prozkoumána a byly na nich nalezeny defekty vzniklé v průběhu výroby. Na základě jejich četnosti byla vyhodnocena kvalita jednotlivých vzorků. Stejně defekty byly nalezeny i na vyrobených strukturách a vyfoceny pomocí optického mikroskopu, čímž byla prokázána shoda dat z mCT s reálnými vzorky.

Do závěrečného hodnocení se promítly pouze výsledky z analýz na datech z mCT. Jako nejlepší byla vyhodnocena struktura vyrobená při výkonu laseru 350 W a skenovací rychlosti 3000 mm/s. Ta byla pak, společně se vzorkem reprezentujícím standardně používané parametry pro výrobu lattice struktur, naskenována na mCT s vyšším rozlišením za účelem zjištění vnitřní porozity prutů. Standardní parametry se vykazovaly porozitou 0,6 %, optimalizované pouze o 0,1 % vyšší.

Optimalizace výrobních parametrů přinesla výrazné zrychlení procesu a přesnější výrobu při zachování téměř stejné porozity vyrobených struktur. K lepším výsledkům je zapotřebí prozkoumat v budoucnu vliv ostatních parametrů výroby (tloušťka nanášené vrstvy, vzdálenost drah laseru, velikost částic prášku).

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *3D Printing from scratch* [online]. c2016 [cit 2016-05-15]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/>
- [2] HEINL, Peter, Lenka MÜLLER, Carolin KÖRNER, Robert F. SINGER a Frank A. MÜLLER. Cellular Ti–6Al–4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting. *Acta Biomaterialia* [online]. 2008, **4**(5), 1536-1544 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/j.actbio.2008.03.013. ISSN 17427061.
- [3] KIM, Taek Bo, Sheng YUE, Ziyu ZHANG, Eric JONES, Julian R. JONES a Peter D. LEE. Additive manufactured porous titanium structures: Through-process quantification of pore and strut networks. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2014, **214**(11), 2706-2715 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.006. ISSN 09240136.
- [4] REINHART, Gunther a Stefan TEUFELHART. Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures. *Physics Procedia*[online]. 2011, **12**, 385-392 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.049. ISSN 18753892.
- [5] Europe's 3-D printer set for Space Station. *Phys.org - News and Articles on Science and Technology* [online]. c2003-2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://phys.org/news/2014-11-europe-3d-printer-space-station.html>
- [6] 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, **628**, 188-197 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.031. ISSN 09215093.
- [7] LEARY, Martin, Maciej MAZUR, Joe ELAMBASSERIL, et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials & Design*[online]. 2016, **98**, 344-357 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.127. ISSN 02641275.
- [8] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Simon Lawrence BUBB, Philippe YOUNG a David RAYMONT. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2014, **214**(4), 856-864 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.004. ISSN 09240136.

- [9] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Philippe YOUNG, Juntong HUANG a Wei ZHU. Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2015, **628**, 238-246 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.063. ISSN 09215093.
- [10] 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, **62**, 32-38 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002. ISSN 08906955.
- [11] 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, **55**, 533-541 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.027. ISSN 02613069.
- [12] ABELE, Eberhard, Hanns A. STOFFREGEN, Klaus KLIMKEIT, Holger HOCHÉ a Matthias OECHSNER. Optimisation of process parameters for lattice structures. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2015, **21**(1), 117-127 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1108/RPJ-10-2012-0096. ISSN 1355-2546.
- [13] *SLM Solutions* [online]. c2016 [cit 2016-05-15].
Dostupné z: <http://slm-solutions.com/>
- [14] *Additive manufacturing* [online]. c2016 [cit 2016-05-15].
Dostupné z: <http://www.additivemanufacturing.media>
- [15] *ALD Vacuum Technologies* [online]. c2010-2013 [cit 2016-05-15].
Dostupné z: <http://web.ald-vt.de/cms>
- [16] *GOM* [online]. c2016 [cit 2016-05-15].
Dostupné z: <http://www.gom.com>
- [17] *Aniwaa* [online]. c2016 [cit 2016-05-15].
Dostupné z: <http://www.aniwaa.com>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

mCT		micro computer tomography
SLM		selective laser melting
FDM		fused deposition modeling
SLS		selective laser sintering
SLA		stereolitography
DMLS		direct metal laser sintering
CAD		computer aided design
SEM		skenovací elektronový mikroskop
STL		stereolitography
CCD		charge-coupled device
max		maximální vepsaný válec
gaus		Gaussův střední válec
min		minimální opsaný válec
E_v	J/mm ³	měrná energie
P	W	výkon laseru
v	mm/s	skenovací rychlost
h	mm	hatch spacing
t	mm	tloušťka vrstvy
R_a	μm	střední aritmetická drsnost povrchu
N	1	počet měření
y	μm	vzdálenost nominálního povrchu od aktuálního
R_t	μm	maximální rozdíl mezi všemi y
R_z	μm	výška nerovnoměrnosti povrchu
j	1	počet měření
E_m	J/mm	měrná energie

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1 Držák antény vesmírné stanice	12
Obr. 2.1 Vliv výkonu laseru na průměr prutů	13
Obr. 2.2 Vliv výkonu laseru na porozitu	14
Obr. 2.3 Vliv skenovací rychlosti a) na průměr prutů; b) na porozitu prutů	14
Obr. 2.4 Stoupání prutů	15
Obr. 2.5 Struktura povrchu prutů při různém úhlu stoupání	15
Obr. 2.6 Vliv úhlu stoupání prutů na R_a a R_z	16
Obr. 2.7 Buňka typu gyroid	16
Obr. 2.8 Snímky ze SEM a) před TZ, b) po TZ	17
Obr. 2.9 Snímky návarů z optického mikroskopu	18
Obr. 2.10 Schéma návarů	18
Obr. 2.11 Mikrostruktura prutů, snímky ze SEM	18
Obr. 2.12 Schéma nalepování prášku na boční stranu prutů	19
Obr. 2.13 Vliv délky strany na porozitu	19
Obr. 2.14 Schéma nalepování prášku na spodní stranu prutů	20
Obr. 2.15 Vychýlení dráhy laseru	20
Obr. 2.16 Vliv vychýlení laseru a skenovací rychlosti na průměr prutů	21
Obr. 4.1 Stroj SLM 280 HL	24
Obr. 4.2 Schéma SLM procesu	24
Obr. 4.3 Prášek AlSi10Mg	25
Obr. 4.4 Geometrie porézních lattice struktur	26
Obr. 4.5 První sada vyrobených vzorků	26
Obr. 4.6 Vzorek č. 20, snímek z optického mikroskopu	27
Obr. 4.7 ATOS Triple Scan	28
Obr. 4.8 a) měření v programu GOM Inspect; b) fitované válce	28
Obr. 4.9 Rozložení měřených míst ve struktuře	30
Obr. 4.10 Typy defektů	30
Obr. 5.1 Hmotnost vzorků	31
Obr. 5.2 Vliv a) výkonu laseru, b) skenovací rychlosti na průměr prutů	33
Obr. 5.3 Všechny změřené průměry	34
Obr. 5.4 Porozita vzorků	36

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Výrobní parametry	22
Tab. 4.1 Mapa vyrobených vzorků	27
Tab. 5.1 Hmotnost vzorků	31
Tab. 5.2 Průměry Gaussova středního válce na datech z 3D skeneru	32
Tab. 5.3 Objem vzorků	32
Tab. 5.4 Průměry Gaussova středního válce na datech z mCT	33
Tab. 5.5 Parametr struktury povrchu	34
Tab. 5.6 Odchylka od navrženého průměru	34
Tab. 5.7 Napojení prutů na uzly	35
Tab. 5.8 Bodové hodnocení vzorků	36

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA I – Hodnoty průměrů max a min měřených na datech z 3D skeneru

PŘÍLOHA II – Hodnoty průměrů max a min měřených na datech z mCT

Hodnoty průměrů max a min měřených na datech z 3D skeneru

max (mm)		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	100										
	150	0,35	0,29								
	200	0,39	0,33				0,31	0,31	0,33	0,31	0,29
	250	0,48	0,45	0,43	0,41	0,41	0,43	0,39	0,39	0,31	0,36
	300	0,60	0,51	0,49	0,47	0,46	0,45	0,46	0,35	0,40	0,40
	350	0,63	0,56	0,51	0,50	0,50	0,50	0,48	0,45	0,45	0,45
	400	0,62	0,57	0,56	0,55	0,54	0,52	0,50	0,46	0,47	0,47

min (mm)		Skenovací rychlost [mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru [W]	100	0,58									
	150	0,65	0,56								
	200	0,72	0,64	0,55	0,65	0,68	0,51	0,56	0,58	0,61	0,61
	250	0,81	0,74	0,71	0,66	0,68	0,62	0,63	0,66	0,66	0,66
	300	0,87	0,75	0,75	0,66	0,77	0,71	0,70	0,72	0,67	0,72
	350	0,96	0,77	0,76	0,78	0,76	0,73	0,80	0,77	0,76	0,81
	400	1,01	0,87	0,78	0,84	0,89	0,84	0,87	0,89	0,85	0,93

Hodnoty průměrů max a min měřených na datech z mCT

max (mm)		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	200			0,29		0,28		0,29			
	250		0,43	0,41			0,40		0,37		0,36
	300			0,47	0,45	0,45		0,44		0,42	
	350	0,60	0,52	0,50	0,50	0,49	0,48	0,46	0,45	0,44	0,44
	400			0,54		0,50		0,49		0,45	

min (mm)		Skenovací rychlost (mm/s)									
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Výkon laseru (W)	200			0,51		0,68		0,53			
	250		0,76	0,74			0,57		0,59		0,65
	300			0,76	0,65	0,66		0,68		0,68	
	350	0,94	0,80	0,73	0,77	0,74	0,75	0,77	0,73	0,74	0,77
	400			0,76		0,83		0,84		0,84	