



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**ZPRACOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN 3D
TECHNOLOGIÍ SELECTIVE LASER MELTING**

PROCESSING OF ALUMINIUM ALLOYS USING 3D TECHNOLOGY SELECTIVE LASER MELTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Měchura

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Lukáš Měchura**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.**
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:

Zpracování hliníkových slitin 3D technologií selective laser melting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je experimentální zjištění vlivu procesních parametrů technologie selective laser melting na porozitu. Součástí práce kritické zhodnocení současného stavu poznání v oblasti 3D tisku kovů se zaměřením na šestou řadu hliníkových slitin.

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, laboratorní protokol, 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. LAP LAMBERT Academic Publishing.

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

Bakalářská práce se zabývá nalezením vhodných procesních parametrů z hlediska minimalizace porozity technologie SLM pro zpracování hliníkové slitiny 6061. Rešeršní část práce pojednává o problematice aditivní výroby hliníkových slitin a také o vyhodnocení porozity měřením relativní hustoty. Na základě získaných obecných poznatků byly navrženy testovací vzorky vyrobené spékáním metalurgického prášku, pomocí laseru s ytterbiový optickým vláknem. V práci byly použity vysoké výkony laseru, až 400 W, se kterou dosud nebyla slitina 6061 z hlediska porozity podrobně testována. Z výsledků práce byly stanoveny závislosti technologických parametrů na relativní hustotě a vypracován přehled o zpracování této slitiny SLM technologií.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, aditivní výroba, hliníková slitina 6061

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with finding of appropriate process parameters for minimizing porosity with SLM technology for processing aluminum alloy 6061. The search part deals about the issue of additive manufacturing aluminum alloys and evaluation of porosity measurements of relative density. Based on general knowledge were proposed test samples produced by sintering of metallurgical powder using a laser with ytterbium optical fiber. In this work was used high power of laser up to 400 W, with which 6061 alloy was not been in terms of porosity in detail tested yet. As the result, the technological parameters dependence on relative density and the overview of this alloy processing by SLM technology was determined.

KEYWORDS

Selective laser melting, additive manufacturing, aluminium alloy 6061

Bibliografická citace: MĚCHURA, L. Zpracování hliníkových slitin 3D technologií selective laser melting. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a čas strávený na konzultacích. Také bych chtěl poděkovat svojí rodině za podporu.

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci Zpracování hliníkových slitin 3D technologií selective laser melting jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 23. května 2016

.....
Lukáš Měchura

OSBAH

1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Aditivní technologie	13
2.1.1 Technologie SLM	13
2.1.2 Problémy aditivní výroby hliníkových slitin	13
2.1.3 Skenovací strategie	14
2.1.4 Procesní parametry	16
2.2 Minimalizace porozity v SLM	17
2.3 Měření hustoty	18
2.3.1 Archimedova metoda	18
2.3.2 Mikrofotografie řezu	19
2.3.3 Rentgenová počítačová mikrotomografie	19
2.4 Únava materiálu	20
2.5 Hliníková slitina 6061	21
2.6 Použití hliníkové slitiny 6061 v SLM	22
2.6.1 Vzdálenost šraf	22
2.6.2 Tvrdost	23
2.6.3 Druh laserového paprsku	23
2.6.4 Šířka a průvar taveniny	24
2.6.5 Drsnost povrchu	25
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	27
4 MATERIÁL A METODY	28
4.1 Materiál	28
4.2 Výrobní zařízení	28
4.3 Průběh experimentu	28
4.3.1 Tisk	28
4.3.2 Tvorba procesní mapy	29
4.3.3 Příprava metalografických výbrusů	29
5 VÝSLEDKY	30
5.1 Vyhodnocení povrchu vzorků	30
5.2 Vyhodnocení porozity	31
6 DISKUZE	34
7 ZÁVĚR	35
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	36
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	39
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	40
11 SEZNAM TABULEK	41
12 SEZNAM PŘÍLOH	42

1 ÚVOD

Význam aditivní technologie stále vzrůstá. Její použití je zejména k výrobě prototypů. Je proto nutné hledat materiály, které by byly pro tuto technologii vhodné. Jedna z metod aditivní výroby je selective laser melting. Výrobou dílů pomocí metody SLM se bylo zabýváno i v této práci.

Výroba součástí pomocí aditivní technologie selective laser melting je velmi závislá na mnoha procesních parametrech. Ty mají vliv na jejich výslednou vnitřní porozitu. Obvykle je možné najít takovou kombinaci procesních parametrů, při které porozita dosahuje hodnoty méně než 0,5 %. Kombinace je ovšem pro každý materiál jiná, a proto je nutné ji vždy při testování nového materiálu najít.

Hliníková slitina 6061 disponuje dobrou kombinací mechanických vlastností a její použití je v zejména letectví. Výroba dílů z této slitiny aditivní technologií by proto byla vhodná nejen v této aplikaci.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

2.1 Aditivní technologie

2.1

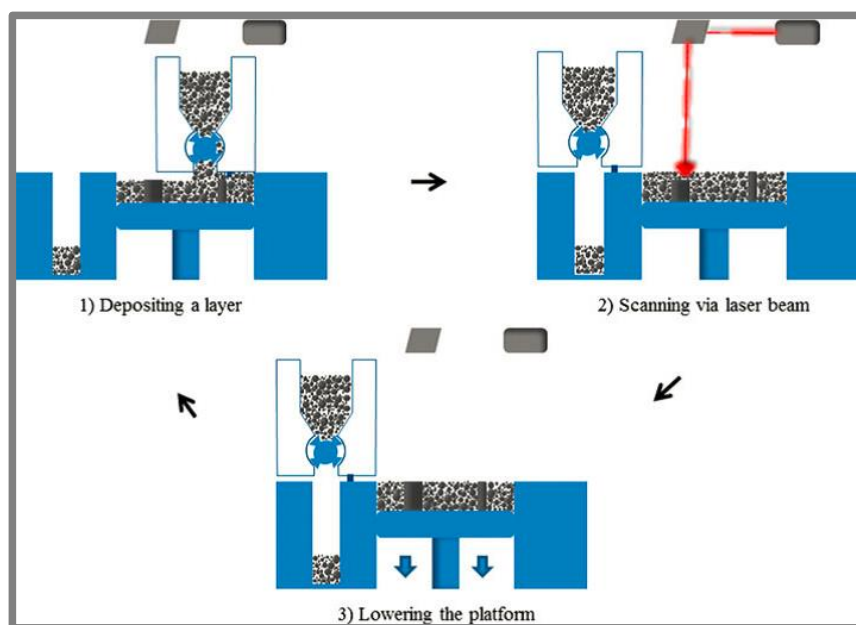
Aditivní výroba neboli 3D tisk je souhrn mnoha technologií sloužících k výrobě třídímenzionálních součástí. Počátky těchto technologií sahají až do roku 1984, kdy Hull [1] vyvinul systém tisku na bázi stereolitografie. Ta spočívá v rozdělení součásti na tenké vrstvy, po kterých se bude následně vyrábět pomocí litografických metod.

V dnešní době existuje mnoho rozdílných typů této výroby. V této práci bylo studováno zpracování slitin ve formě prášku. Jeho tavením a následným tuhnutím vznikne požadovaná součást. Tímto typem aditivní technologie se zabývají například metody selective laser sintering, fused deposition modeling či selective laser melting. Pro výrobu hliníkových slitin je vhodný pouze poslední jmenovaná metoda, a proto se jí bylo v této práci zabýváno.

2.1.1 Technologie SLM

2.1.1

Selective laser melting je aditivní metoda výroby součástí. Využívá se při ní laserového paprsku, jenž taví jednotlivé vrstvy kovového prášku a ten se po ztuhnutí spojí do požadovaného tvaru. Tyto vrstvy bývají obvykle silné 30 - 50 μm [2]. Před tiskem další vrstvy je nutné snížit platformu o výšku této vrstvy. Proces se pak opakuje až do úspěšného vytisknutí celé součásti.



Obr. 2.1 Schéma SLM procesu [3]

Jeho využití nalezneme především ve výrobě součástí, které nelze zhotovit konvenčními způsoby a ve výrobě prototypů například pro letectví či lékařskou ortopedii.

2.1.2 Problémy aditivní výroby hliníkových slitin

2.1.2

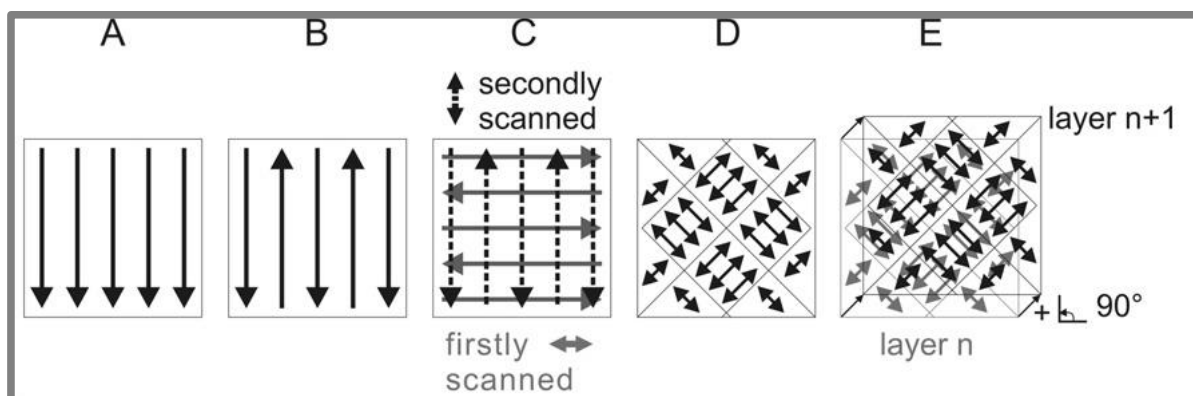
Ve své práci Louvis [4] zmínil několik problémů souvisejících s výrobou slitin hliníku. Prvním problémem je potřeba vytvoření tenké vrstvy prášku pro výrobu. Hliník je lehký, a proto se jeho prášek špatně pohybuje. To vede ke zpomalování nebo dokonce uváznutí materiálu v násypce a dopravních trubkách.

Dále je to vysoká odraznost čistého hliníku činící až 91 %. V důsledku toho ke nutné použít vyššího výkonu laseru k roztavení materiálu. To je požadováno i díky vysoké teplotní vodivosti hliníku vedoucí k rychlému rozptýlení tepla z místa tavení. Tento problém je nejvíce zřejmý při tisku první vrstvy, jelikož teplotní vodivost vrstev prášku je nižší než vodivost stavební platformy.

Ovšem největší překážkou ve výrobě je oxidace. V případě přítomnosti oxidů na povrchu částic brání difuzi a tenký přilnavý film oxidů přítomný na nataveném hliníku snižuje jeho smáčivost. Pokud dojde k jejich přimíchání do roztaveného kovu, způsobují nežádoucí pórovitost a zeslabují materiál. Tento problém je nejvíce zřejmý právě při výrobě technologií SLM, jestliže je vrstva oxidů začleněna do tavicí lázně. V tomto případě ovlivňuje smáčivost k okolním pevným částicím. Proto je možné, že vyššího výkonu laseru bude spíše potřeba k narušení tohoto filmu oxidů, než k samotnému roztavení kovu.

2.1.3 Skenovací strategie

Thijs et al. [5] studovali vliv skenovací strategie na hustotu materiálu změřenou Archimedovou metodou. Použili pět různých skenovacích strategií znázorněných na následujícím obrázku.



Obr. 2.2 Skenovací strategie [5]

Proměnnými parametry byly vektor skenování, rotace vektoru mezi jednotlivými vrstvami a použití rozdělení dílu na menší části, které byly skenovány postupně. Výkon laseru byl ve všech případech 200 W, skenovací rychlost 1400 mm/s a vzdálenost šraf 105 μm . Skenovací strategie E měla navíc ještě mezi vrstvami posunutí o 1 mm. Vektor skenování může být použit jednosměrný (Uni) a obousměrný (Bi).

Tab. 2.1 Závislost relativní hustoty na skenovací strategii [5]

	A	B	C	D	E
Vektor skenování	Uni	Bi	Bi	Bi	Bi
Rotace vektoru	0°	0°	90°	90°	90°
Rozdělení dílu	ne	ne	ne	ano	ano
Relativní hustota	99,0 %	98,9 %	99,4 %	98,2 %	98,7 %

Nejvyšší dosažené hustoty bylo dosaženo v případě obousměrného směru skenovacího vektoru a průběžného otáčení o 90° při tisku další vrstvy.

Vliv skenovací strategie na relativní hustotu zkoumali také *Aboulkhair et al.* [2]. Pro svou práci využili tří skenovacích rychlostí 500, 750 a 1000 mm/s. Ve své studii využili skenovací strategie popsané v následující tabulce.

Tab. 2.2 Přehled skenovacích strategií [2]

Strategie	Počet skenování jedné vrstvy	Vektor skenování	První skenování		Druhé skenování	
			Výkon	HD	Výkon	HD
X	1	Uni	100 W	50 μm	-	-
2X	2	Uni	100 W	50 μm	100 W	50 μm
Alternating	1	Bi	100 W	50 μm	-	-
X&Y 2HS	2	Bi	100 W	100 μm	100 W	50 μm
Pre-sinter	2	Uni	50 W	50 μm	100 W	50 μm
Overlap	2	Uni	100 W	50 μm	100 W	50 μm

Strategie X - pouze jednoduché jednosměrné skenování

Strategie 2X - každá vrstva je touto metodou skenována dvakrát

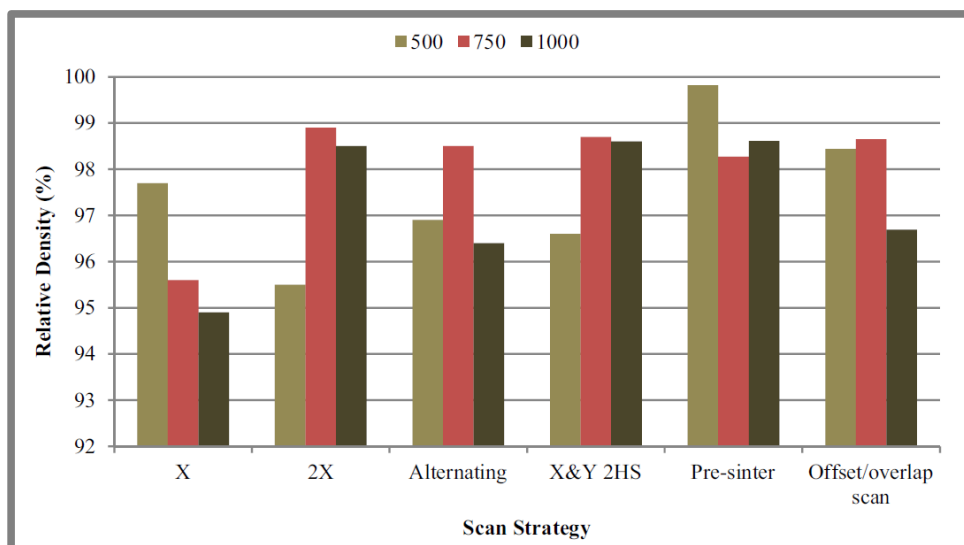
Alternating - vyznačuje se otočeným směrem skenování každé další vrstvy o 90°

X&Y 2HS - využívá opět dvojitého skenování každé vrstvy, ale tentokrát se mění nejen směr skenování, ale i vzdálenost šraf, která se zmenší na polovinu

Pre-sinter - nejprve se skenuje jednu vrstvu s polovičním výkonem a podruhé již s výkonem maximálním

Overlap - při druhém skenování dohází k překrytí mezi dvěma sousedícími tavíciemi lázněmi

Výsledky této práce jsou shrnuty v následujícím obrázku.



Obr. 2.3 Závislost relativní hustoty na strategii a rychlosti skenování [2]

Nejvyšší relativní hustoty bylo dosaženo skenovací strategií Pre-sinter při rychlosti skenování 500 mm/s.

Tiskárna SLM 280HL, na které byl výzkum prováděn je schopna tisknout těmito strategiemi:

Meandr – tak jako na obrázku 2.2 strategie B

Šachovnice – skenovaná plocha je rozdělena na jednotlivé čtvercové podoblasti, z nichž je ve dvou sousedících vždy potočený vektor skenování o 90°, tak jako na obrázku 2.2 strategie D

Přetavování – každá vrstva je se stejnými parametry skenována dvakrát

2.1.4 Procesní parametry

Výrobní proces SLM je ovlivňován mnoha procesními parametry. Ty jsou na sobě mnohdy závislé. Můžeme je rozdělit na parametry vztahující se k laseru, procesu skenování, prášku a teplotě. Jejich přehled je zpracován v následující tabulce.

Tab. 2.3 Přehled procesních parametrů [4]

Laser	Skenování	Prášek	Teplota
Výkon	Skenovací rychlost	Velikost částic	Teplota stavěcí platformy
Rozměr paprsku	Vzdálenost šraf	Tvar částic	Teplota podavače
Doba pulsu	Skenovací strategie	Distribuce částic	Teplotní stejnoměrnost
Frekvence pulsu	Tloušťka vrstvy	Materiálové vlastnosti	

Parametry stavby, které bylo možné ovlivnit:

Výkon - základní parametr použitého stroje, na kterém závisí mnoho dalších parametrů, jako je například rychlost skenování

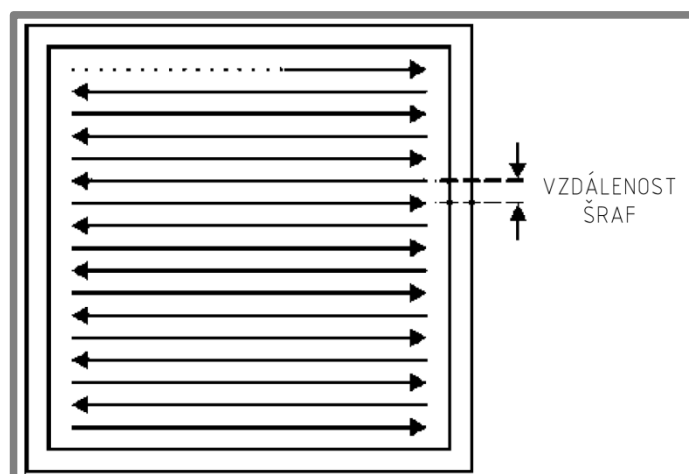
Rychlost skenování - je to rychlost, s jakou se laserový paprsek pohybuje

Skenovací strategie - má vliv na výslednou pórovitost, jsou popsány v kapitole 2.1.3

Tloušťka vrstvy - vzdálenost, o kterou klesne stavěcí platforma před tiskem následující vrstvy

Teplota stavěcí platformy - platformu je nutné před tiskem předeřhřát na teplotu, jejíž hodnotu lze nastavit

Vzdálenost šraf - vzdálenost mezi dvěma sousedícími průjezdy laseru (obrázek 2.4)



Obr. 2.4 Vzdálenost šraf [4]

Z těchto parametrů jsme schopni vypočítat objemovou hustotu energie, která nám pomůže lépe zhodnotit vliv závislých procesních parametrů na výslednou porozitu. Objemová hustota energie:

$$\psi = \frac{P}{v_s \cdot \Delta y_s \cdot D_s}$$

kde:

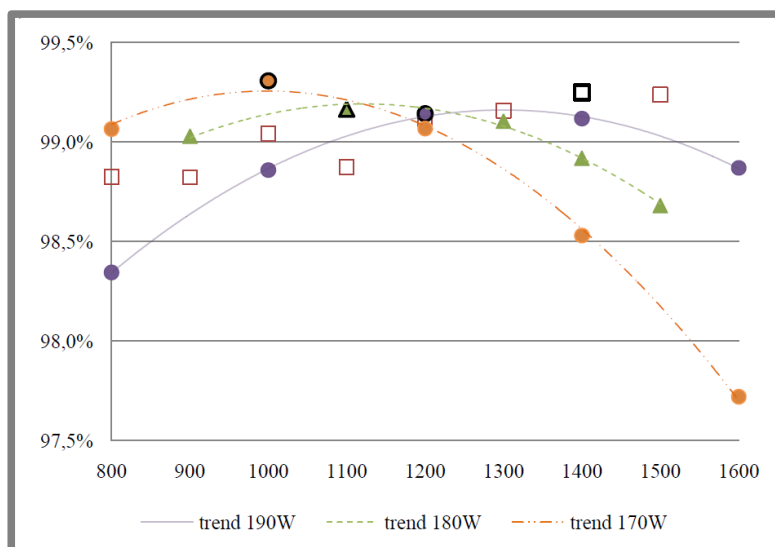
ψ	J/mm ³	je objemová hustota energie
P	W	- výkon
v_s	mm/s	- rychlost skenování
Δy_s	mm	- tloušťka vrstvy
D_s	mm	- vzdálenost šraf

2.2 Minimalizace porozity v SLM

2.2

Jelikož pro hliníkovou slitinu 6061 není dostupná studie, jejímž výsledkem by byly součásti o relativní hustotě blížíci se 100 % hodnotě, je nutné vybrat jiný podobný referenční materiál, na kterém bylo toto kritérium úspěšně dosaženo. Tímto materiálem je slitina AlSi10Mg. Ve výzkumech je běžně uváděna místo porozity relativní hustota.

Kempen et al. [6] ve své studii poukázali na nutnost přesného složení zpracovávaného prášku. V jejich případě měly od dvou různých dodavatelů velmi rozdílný obsah křemíku. Jeho normalizovaný obsah ve slitině je 9 – 11%. V případě jednoho dodavatele bylo toto množství 8,05 %, To se projevilo i na výsledné relativní hustotě, která byla o jedno procento menší než u prášku s obvyklým obsahem. Také vypožorovali závislost relativní hustoty na optimální skenovací rychlosti. Zjistili, že má vždy při různém výkonu laseru extrém v jiné hodnotě (obrázek 2.5).



Obr. 2.5 Závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti [6]

Aboulkhair et al. [2] zkoumali vliv změny skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 100 W. Nejvyšší relativní hustoty bylo dosaženo při hodnotě vzdálenosti šraf 50 μm a rychlosti skenování 500 mm/s. Její hodnota byla 99,77 %. To už je téměř hodnota dosažená konvenčním odléváním, která je 99,85 %.

Ve své práci použili *Buchbinder et al.* [7] laser o maximálním výkonu 1000 W. Nejlepších výsledků z hlediska minimalizace porozity dosáhli při výkonu 900 W, rychlosti skenování 1300 mm/s a hodnotou vzdálenosti šraf 150 μm . I v případě těchto vysokých hodnot bylo dosaženo relativní hustoty 99,8 %. Ideální procesní parametry z hlediska rychlosti výroby jsou 1700 mm/s a vzdálenost šraf 250 μm . Při těchto bylo dosaženo rychlosti výroby přibližně 21 mm^3/s , což už je poměrně dobrá hodnota. I při těchto procesních parametrech dosahovala relativní hustota 99,5 %. Vzhledem k výsledkům této práce bylo pro výrobu součástí použito výkonu laseru 100 - 400 W. Maximální tvrdosti 145 HV0.1 bylo dosaženo při skenovací rychlosti přibližně 500 mm/s. Také zjistili, že tvrdost nezávisí na relativní hustotě materiálu.

2.3 Měření hustoty

Spierings et al. [8] ve své práci shrnuli několik metod měření hustoty. Jsou to Archimedova metoda, mikrofotografie řezu a rentgenové skenování.

2.3.1 Archimedova metoda

Tato metoda spočívá ve vážení zkušební vzorku nejprve na vzduchu a poté v kapalině. Tou může být buď voda nebo aceton. Hustota vzorku se vypočítá podle následující rovnice:

$$\rho = \frac{m_v}{m_v - m_{kap}} \cdot \rho_{kap}$$

kde:

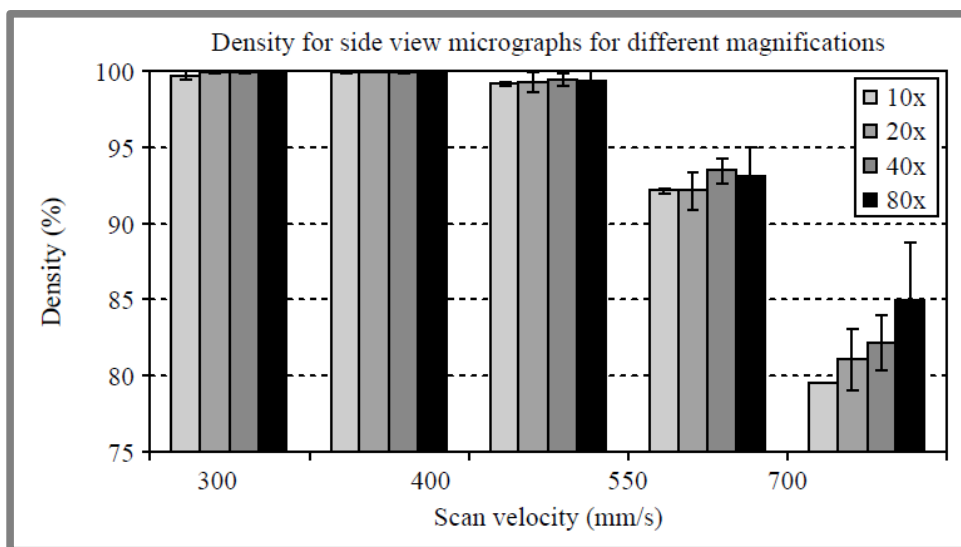
- ρ kg/m^3 je hustota vzorku
- m_v kg - hmotnost vzorku na vzduchu
- m_{kap} kg - hmotnost v kapalině
- ρ_{kap} kg/m^3 - hustota použité kapaliny

Pro zpřesnění měření byl použit ještě složitější vztah, ve kterém bylo počítáno i s hustotou vzduchu. Zanedbání této veličiny se projevilo zejména v případě použití vody, kdy byla odchylka i 0,3 %. Tato metoda je vhodná i v případě vyšší porozity.

2.3.2 Mikrofotografie řezu

2.3.2

V případě této metody se vzorek rozřízne a jeho mikrofotografie se poté analyzují pomocí vhodného grafického programu. Řez vzorku je možno vést ve vodorovné rovině, nebo rovině kolmé na původní stavěcí platformu. Následně je vzorek vybroušen a vyleštěn. Pro samotnou analýzu autoři použili zvětšení 10x – 80x, přičemž s rostoucím zvětšením se zvyšuje i počet nutných mikrofotografií z důvodu reprezentativního výběru vyfocené oblasti. Na obrázku 2.6 lze vidět výsledek měření.



Obr. 2.6 Analýza relativní hustoty pomocí mikrofotografie [8]

Z grafu vyplývá, že je tato metoda vhodná pouze pro měření součástí s nízkou porozitou. Pro její vyšší hodnotu je již znát velký rozptyl při použití rozdílných zvětšení.

2.3.3 Rentgenová počítačová mikrotomografie

2.3.3

Tato nedestruktivní metoda slouží k trojrozměrnému zobrazování vzorků a vyšetřování jejich vnitřních struktur. Její princip spočívá v zeslabení rentgenových paprsků při průchodu zkoumaným vzorkem. Paprsky poté dopadají na detektor a podle jejich změřené intenzity se vytvoří projekce daného vzorku. Ten se postupně při skenování otáčí, čímž je zjištěno rozložení pórovitosti v celém analyzovaném vzorku. Nakonec se virtuálně rozdělí na velice malé prostorové elementy, které mají vždy svou specifickou hodnotu intenzity změřeného záření.

Pokud je známo, jakou intenzitu mají vykazovat vzduchové póry, lze zjistit jejich rozložení v dané součásti. V tabulce 2.4 jsou porovnány výsledky měření s Archimedovou metodou.

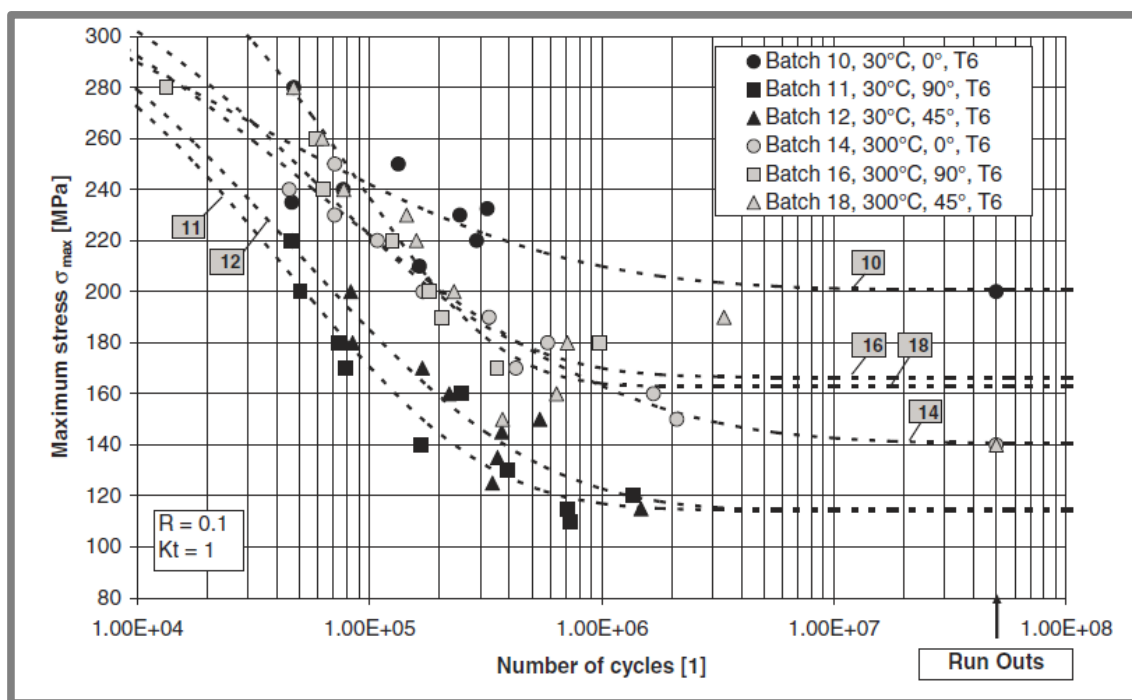
Tab. 2.4 Porovnání metod měření hustoty [8]

Rychlost skenování (mm/s)	300	400	550	700	850
Hustota změřená rentgenovou metodou (%)	99,967	99,924	99,524	92,85	90,98
Hustota změřená Archimedovou metodou (%)	99,23	99,03	98,61	94,86	90,24

V případě nízké porozity se hodnoty neshodují s výsledky Archimedovy metody. Je to z důvodu nevhodného rozdělení na prostorové elementy. Jejich počet byl z důvodu časové úspory pouze devět, čímž se nepodařilo detekovat malé póry. Výhoda této metody je ve zjištění rozložení pórovitosti v celém objemu součásti.

2.4 Únava materiálu

Cyklickým zatížením vzorků ze slitiny AlSi10Mg vyrobených pomocí metody SLM se zabývali *Brandl et al.* [9]. Únavové vzorky tiskli pod úhlem 0°, 45° a 90°. Dalším rozdílným parametrem byla teplota stavěcí platformy, která byla 30°C nebo 300°C. Některé vzorky byly dále tepelně zpracovány do stavu T6. Wöhlerovy křivky tepelně zpracovaných vzorků jsou na následujícím obrázku.



Obr. 2.7 Výsledek únavových zkoušek

Bylo zjištěno, že v případě nízké teploty platformy 30° mají nejlepší únavové vlastnosti vzorky stavěné pod úhlem 0°, tudíž ve vodorovné pozici. Při teplotě stavěcí platformy 300°C již únava vzorku příliš nezávisí na směru stavby. Únavová pevnost tepelně zpracované slitiny vyrobené konvenčním způsobem je 93 MPa, což je daleko méně, než se podařilo docílit metodou SLM.

2.5 Hliníková slitina 6061

Chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 2.5 Chemické složení [10]

(%)	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ostatní	Si	Ti	Zn
minimum	95,8	0,04	0,15	-	0,80	-	-	0,40	-	-
maximum	98,6	0,35	0,40	0,70	1,2	0,15	0,15	0,80	0,15	0,25

b

Tab. 2.6 Fyzikální vlastnosti [10]

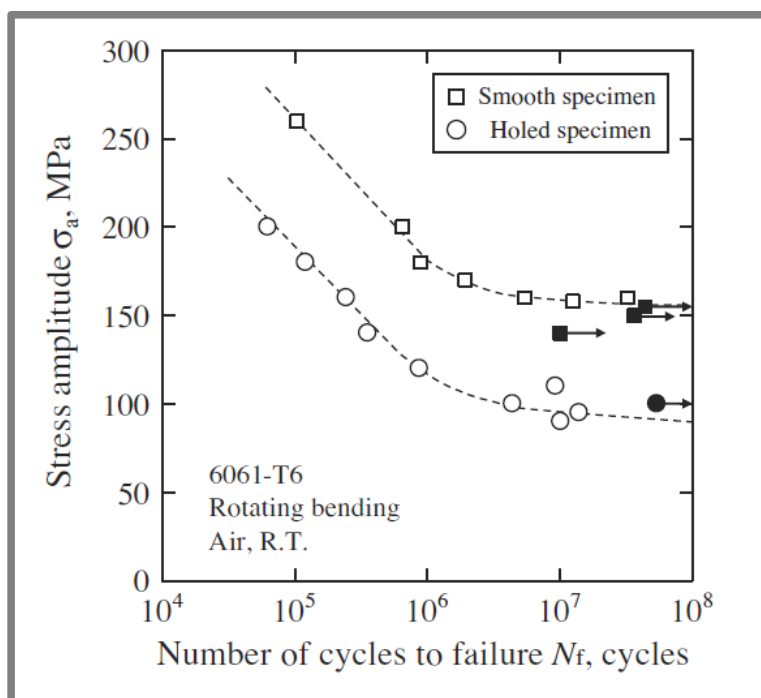
Hustota	Modul pružnosti E	Koeficient tepelné roztažnosti	Teplota tavení	Tepelná vodivost
2,70 g·cm ⁻³	68,9 GPa	23,6 10 ⁻⁶ K	582 - 651,7 °C	167 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

Tab. 2.7 Mechanické vlastnosti [2,10]

Tepelné zpracování	Tloušťka stěny (T6)	R _m	R _{p0,2}	A ₅	Tvrdost
T6	1,59 mm	310 MPa	276 MPa	12 %	107 HV

Slitina 6061-T6 byla solutionizována a uměle vystárnuta. Kombinuje relativně vysokou pevnost a dobrou zpracovatelnost. Má vynikající korozivzdornost i vůči mořské vodě [5]. Je vhodná pro výrobu armatur letadel a lodí, brzdových a hydraulických pístů, rámu kol či dílů ventilů.

Vzorky ze slitiny 6061 vyrobené metodou SLM nebyly doposud zkoumány na únavu materiálu. *Takahashi et al.* [11] zkoumali únavu tohoto materiálu na vzorcích vytvořených konvenčními metodami. V jejich práci se zaměřili nejen na hladké testovací vzorky, ale i vzorky s otvorem o průměru i hloubce 0,3 mm. Výsledky jejich experimentu jsou na následujícím obrázku.



Obr. 2.8 Wohlerovy křivky [11]

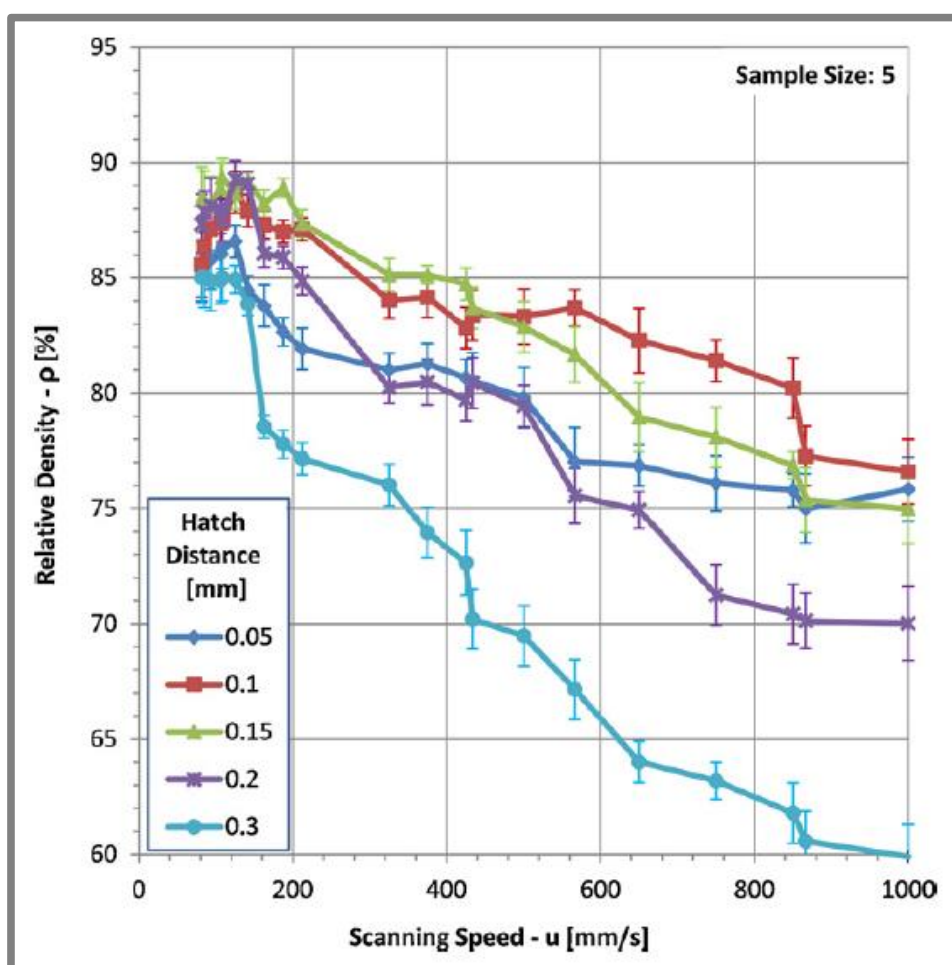
Lze pozorovat, že mez únavy nenarušeného vzorku dosahuje 150 MPa a vzorku s otvorem přibližně 80 MPa. To je velmi dobrá hodnota v porovnání s tabulkovou hodnotou [6], která je 96,5 MPa.

2.6 Použití hliníkové slitiny 6061 v SLM

Tato slitina byla již několikrát k 3D tisku metodou SLM testována. V následující části byly sledovány parametry, jež byly v dostupných pracích vyhodnocovány.

2.6.1 Vzdálenost šraf

Problematicku zpracování hliníkové slitiny 6061 metodou SLM nejlépe vypracoval *Louis et al.* [4]. Studovali výrobu na laserech o nižším výkonu 100 W. Na následujícím grafu je zobrazena závislost relativní hustoty na rychlosti skenování pro různou volbu vzdálenosti šraf.



Obr. 2.9 Závislost relativní hustoty na rychlosti skenování [4]

Jako optimální vzdálenost šraf z hlediska minimalizace porozity byla zjištěna hodnota 100 - 150 μm a to při skenovací rychlosti 100 - 200 mm/s. Pro vyšší rychlosti skenování relativní hustota velmi rychle klesá.

Tab. 2.8 Procesní parametry [4]

Výkon laseru	100 W
Druh laserového paprsku	-
Rychlost skenování	100 – 1000 mm/s
Skenovací strategie	-
Tloušťka vrstvy	50 μm
Vzdálenost šraf	50 – 300 μm
Průměr laserového paprsku	80 μm
Maximální relativní hustota	89,5 %
Objemová hustota energie	6,7 – 400 mm^3

V laboratořích NETME je k dispozici laser o maximálním výkonu 400 W. Úkolem je studovat problematiku redukce porozity, a proto je požadována hustota co nejvyšší. Tudiž je vhodné využít vyšších výkonů laseru, což je v této práci také navrhováno. S tím souvisí také vyšší volená skenovací rychlost. Nicméně díky této práci je možné určit optimální vzdálenost šraf, která by se měla pohybovat mezi 100 až 150 μm .

2.6.2 Tvrdost

Jerrard at al. [12] zkoumali tvrdost čisté hliníkové slitiny 6061 a také slitiny s přídavkem 6 a 30 % Cu. Pracovali s laserem pouze o maximálním výkonu 100 W. V případě čisté hliníkové slitiny 6061 bylo dosaženo tvrdosti pouze 50 HV, což je velmi nízká hodnota oproti konvenčně vyráběnému materiálu, jenž je 170 HV. S přibývajícím množstvím obsahu Cu se tvrdost zvyšovala a to na hodnotu 100 HV v případě 6 % Cu a 210 HV v případě 30 % Cu.

2.6.2

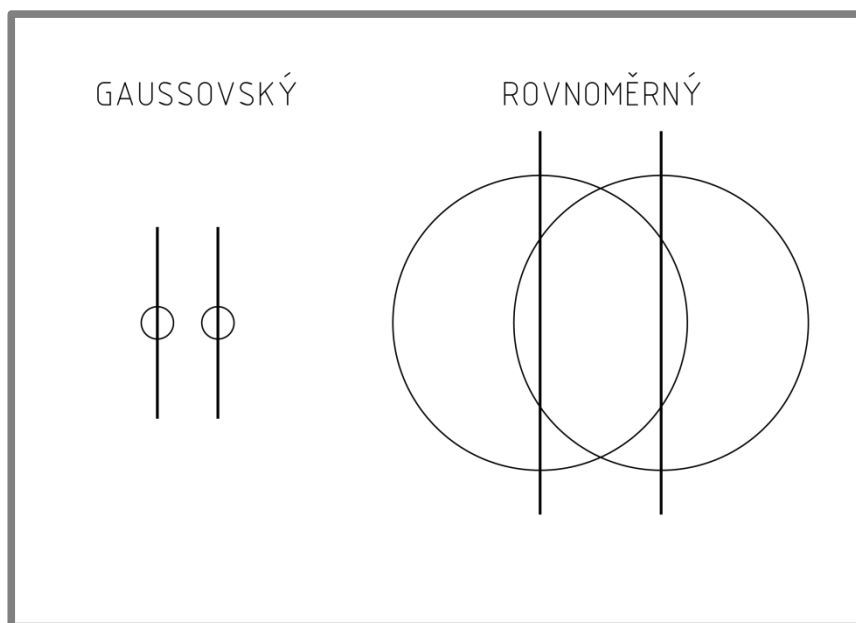
Tab. 2.9 Procesní parametry [12]

Výkon laseru	20 – 100 W
Druh laserového paprsku	-
Rychlost skenování	20 – 250 mm/s
Skenovací strategie	-
Tloušťka vrstvy	-
Vzdálenost šraf	25 μm
Průměr laserového paprsku	160 μm
Maximální relativní hustota	-
Objemová hustota energie	320 – 800 J/mm^3

2.6.3 Druh laserového paprsku

V další práci poukazuje *Loh at al.* [3] na rozdíl mezi rovnoměrným a Gaussovským rozložením laserového paprsku. Zkoumali vliv těchto parametrů na pronikání roztaveného materiálu mezi jednotlivými sousedícími průjezdy laseru. Rozložení průměru paprsku je v závislosti na vzdálenosti šraf zobrazeno na následujícím obrázku.

2.6.3



Obr. 2.10 Velikost paprsku

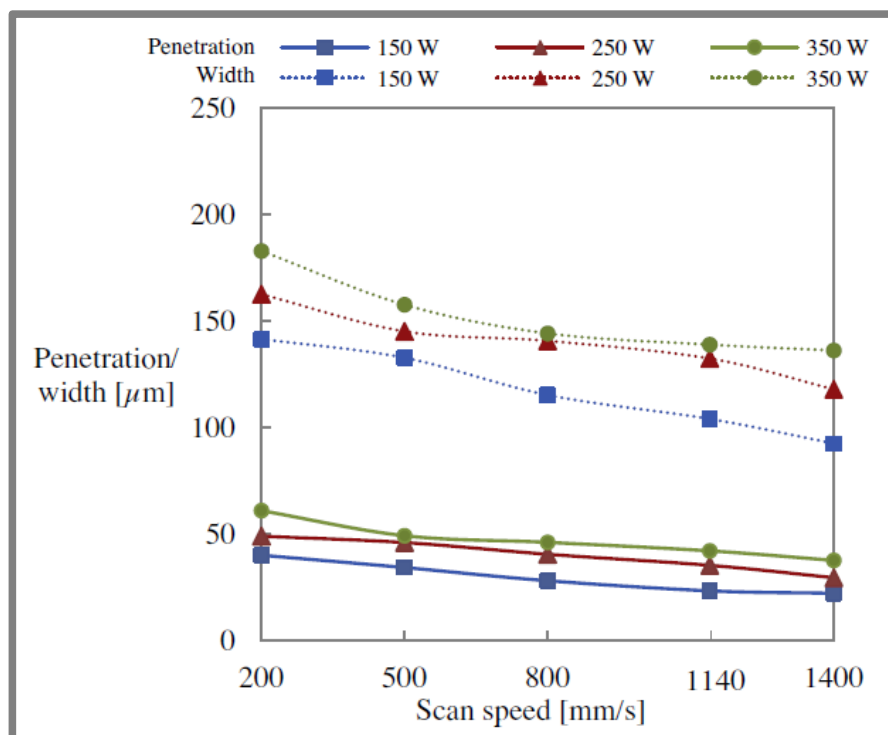
Relativní hustoty vyrobených dílů byly alespoň 95 %. Zjistili, že v případě uniformního tvaru laserového paprsku má na šířku taveniny velký vliv zvyšování rychlosti skenování a snižování vzdálenosti šraf. Pronikání roztaveného materiálu je podobné u obou druhů paprsků, takže je možné je kombinovat pro rychlejší zhotovení součástí.

Tab. 2.10 Procesní parametry [3]

Výkon laseru	400 W	1000 W
Druh laserového paprsku	Gaussovský	Uniformní
Rychlost skenování	800 mm/s	1300 mm/s
Skenovací strategie	-	-
Tloušťka vrstvy	50 μm	50 μm
Vzdálenost šraf	100 - 150 μm	200 - 300 μm
Průměr laserového paprsku	80 μm	730 μm
Minimální relativní hustota	95 %	95 %
Objemová hustota energie	66,7 J/mm ³	51,3 J/mm ³

2.6.4 Šířka a průvar taveniny

Loh *et al.* [13] sledovali šířku a průvar taveniny v závislosti na procesních parametrech. Bylo zjištěno, že oba parametry rostou s vyšším výkonem laseru a nižší skenovací rychlostí. Výsledky jsou shrnuty v následujícím grafu.



Obr. 2.11 Šířka a průvar taveniny [13]

Bylo použito stejné tiskárny jako v této práci. Nejvyšší sledovaný výkon byl 350 W a skenovací rychlost 1140 mm/s. To jsou procesní parametry, které by mohly být vhodné i v případě tohoto výzkumu.

Tab. 2.11 Procesní parametry [13]

Výkon laseru	150 – 350 W
Druh laserového paprsku	-
Rychlost skenování	200 – 1400 mm/s
Skenovací strategie	-
Tloušťka vrstvy	-
Vzdálenost šraf	-
Průměr laserového paprsku	80 μm
Maximální relativní hustota	-
Objemová hustota energie	-

Tuto domněnku potvrzují i ve své druhé práci [3], kde použili již výkonu laseru 400 W a skenovací rychlosti 800 mm/s.

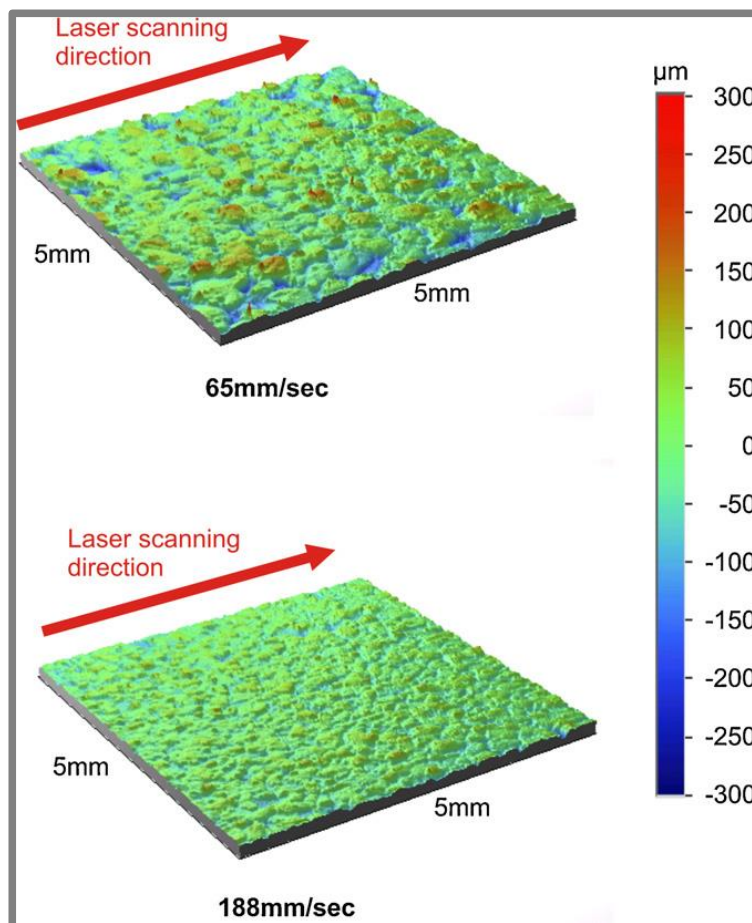
2.6.5 Drsnost povrchu

Wong *at al.* [14] zkoumali výsledky tisku z hlediska tepelné vodivosti pro využití přenosu tepla. Výsledkem jeho práce je také výsledná drsnost povrchu vyrobené součásti, jež dosahuje 20 μm. To je velmi špatný výsledek vzhledem ke skutečnosti, že odlitím se tato hodnota pohybuje kolem 3,2 μm.

Tab. 2.12 Procesní parametry [14]

Výkon laseru	100 W
Druh laserového paprsku	-
Rychlost skenování	-
Skenovací strategie	Dual - axis
Tloušťka vrstvy	-
Vzdálenost šraf	-
Průměr laserového paprsku	45 μm
Maximální relativní hustota	-
Objemová hustota energie	-

Tuto problematiku nastínili ve své práci také *Louvis et al.* [2]. Zjistili, že lepší struktury povrchu je dosaženo v případě nižšího výkonu laseru a vyšší rychlosti skenování. Na následujícím obrázku je zobrazena drsnost povrchu při použití laseru o výkonu 50 W a vzdálenosti šraf 150 μm . Rychlost skenování byla 65 a 188 mm/s.



Obr. 2.12 Drsnost povrchu [2]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

Hlavním cílem práce je experimentální zjištění vlivu procesních parametrů technologie selective laser melting na porozitu. V této práci byla zkoumána výroba vzorků z hliníkové slitiny 6061. Ta je využívána zejména v letectví pro konstrukci křídel i trupů.

Mezi procesní parametry, které mají vliv na porozitu patří výkon laseru, rychlost skenování a vzdálenost šraf.

Jednu z prací zabývajících se problematikou porozity slitiny 6061 napsal *Louvis at al.* [4]. Bylo dosaženo maximální relativní hustoty 89,5% v případě laseru o výkonu 100 W. Rychlost skenování byla volena 60 – 1000 mm/s. Nejvyšší relativní hustoty bylo dosaženo při rychlosti skenování 100 mm/s a vzdálenosti šraf 150 μm , a to 89,5 %.

Loh at al. [3] ve své práci využil laserů o výkonech 400 a 1000 W. V případě laseru o nižším výkonu zvolil skenovací rychlost 800 mm/s a vzdálenost šraf také 150 μm . Výsledné vzorky měly vyšší relativní hustotu než 95 %.

Lze předpokládat, že při použití výkonu laseru 400 W lze najít kombinaci procesních parametrů, která povede k materiálu s relativní hustotou blížíící se téměř 100 %. To se podařilo v práci kolektivu *Koukal at al.* [15] pro slitinu hliníku 2618. V tomto případě bylo dosaženo lepší relativní hustoty než 99,5 % při výkonu laseru 300 W, skenovací rychlosti 200 mm/s a vzdálenosti šraf 110 μm .

Vedlejší cíle práce jsou:

- rešerše současného stavu poznání problematiky
- tisk objemových vzorků
- příprava vzorků k vyhodnocení porozity
- analýza porozity

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Materiál

Hliníková slitina 6061 byla dodána ve formě prášku o velikost částic 20 až 80 μm . To je vhodné rozložení pro tisk dílů o výšce vrstvy 50 μm . Podrobnou analýzu velikosti částic lze nalézt v [příloze 1](#).

4.2 Výrobní zařízení

Výroba vzorků proběhla na 3D tiskárně SLM 280HL od firmy SLM Solutions GmbH. Její parametry jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 4.1 Parametry tiskárny [16]

Objem stavěcího prostoru v mm (x/y/z)	280 x 280 x 350
Výkon laseru a druh paprsku	400 W Yb
Rychlost stavby	20 cm^3/h
Tloušťka vrstvy	20 – 75 μm
Minimální tloušťka stěny	150 μm
Průměr laserového paprsku	82 μm
Maximální skenovací rychlost	15 m/s
Spotřeba inertního plynu Ar/N ₂	Ar/N ₂ , 2,5 l/min – 3,0 l/min
Požadavky na kvalitu stlačeného vzduchu	ISO 8573-1, 18 l/min při 1,5 bar
Vnější rozměry zařízení v mm	1800 x 1900 (2400) x 1000
Hmotnost	1000 kg
Elektrická přípojka a spotřeba	400 V 3NPE, 32A, 50-60 Hz, 8kW/h

Tiskárna je schopna zpracovávat velkou škálu materiálů jako je nerezová a nástrojová ocel, chrom-kobalt, hliník a titan.

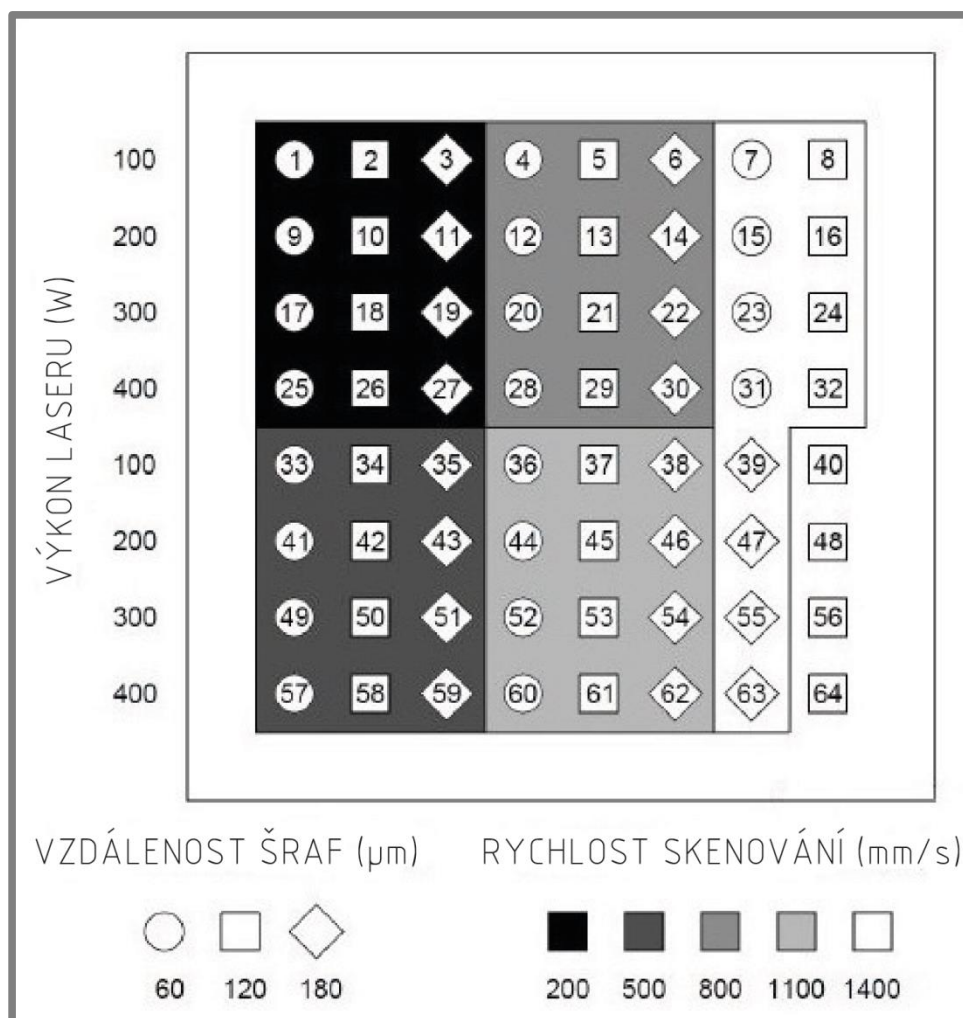
4.3 Průběh experimentu

4.3.1 Tisk

Problematickou tisku testovacích vzorků se zabýval *Ahuja et al.* [17]. Provedl tisk nejprve jednotlivých linií, poté tenkých stěn a nakonec na základě těchto vzorků i tisk objemových krychlí. Vzhledem k rozsahu práce jsme se rozhodli experimentální část omezit pouze na tisk objemových krychlových vzorků o hraně 5 mm.

Rychlost skenování byla zvolena s ohledem na [3] v rozsahu 200 až 1400 mm/s, přičemž by mělo být dosaženo nejvyšší porozity přibližně v polovině tohoto rozsahu. Vzhledem k [4] a [3] jsme zvolili tři hodnoty vzdálenosti šrafi: 60, 120 a 180 μm . Výkon laseru byl vzhledem k požadavku prozkoumat co největší škálu kombinací procesních parametrů volen 100, 200, 300 a 400 W. Teplota stavěcí platformy byla v průběhu stavby 80°C. Byla použita obousměrná skenovací strategie s pootočením jednotlivých vrstev o 73°.

Kombinací těchto procesních parametrů bylo dosaženo počtu šedesáti testovacích vzorků. Přehled procesních parametrů vzorků je k dispozici v [příloze 2](#). Rozmístění vzorků na desce je zobrazeno na následujícím obrázku:



Obr. 4.1 Rozvržení tisku

4.3.2 Tvorba procesní mapy

Vzorky byly dále vyfotografovány pomocí fotoaparátu Canon EOS 1200D, který byl připojen na optický mikroskop Olympus SZX7. Fotografie byly zpracovány programem QuickPHOTO MICRO 3.1. Nejprve byly pořízeny fotografie horní strany vzorků a po uřezání na drátové řezače CHMER i boční a spodní strana vzorků.

4.3.2

4.3.3 Příprava metalografických výbrusů

Vzorky byly dále uloženy do formy a zality materiálem Duracryl Plus. Po vytvrzení této směsi byly vzorky broušeny na brusce SINOWON GP - 2 pomocí brusných papírů o zrnitosti 120, 1000 a 2500. Na závěr byly vzorky vyleštěny v laboratořích NETME Centre.

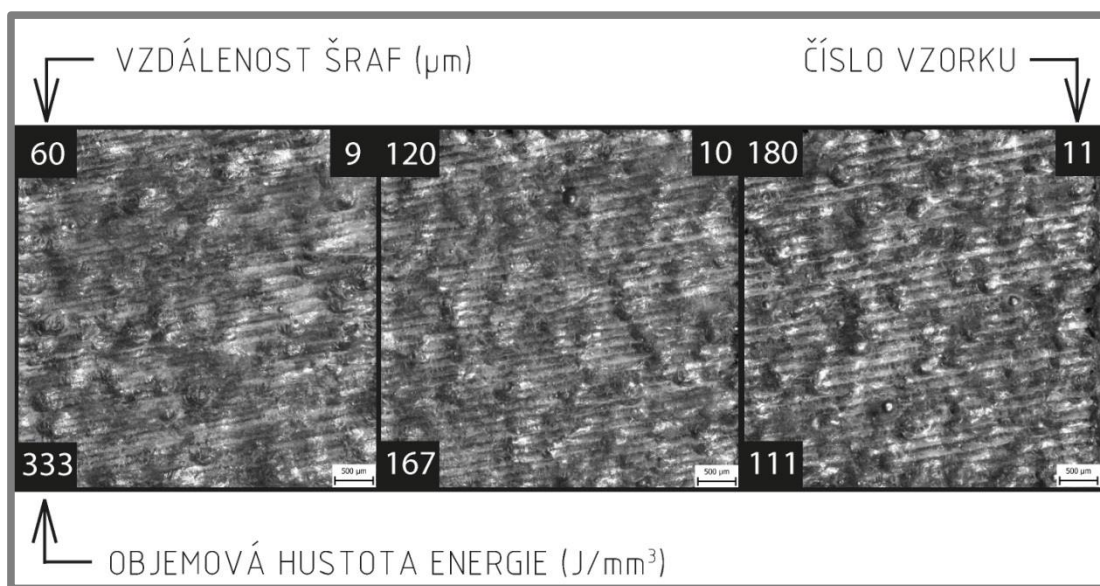
4.3.3

5 VÝSLEDKY

5.1 Vyhodnocení povrchu vzorků

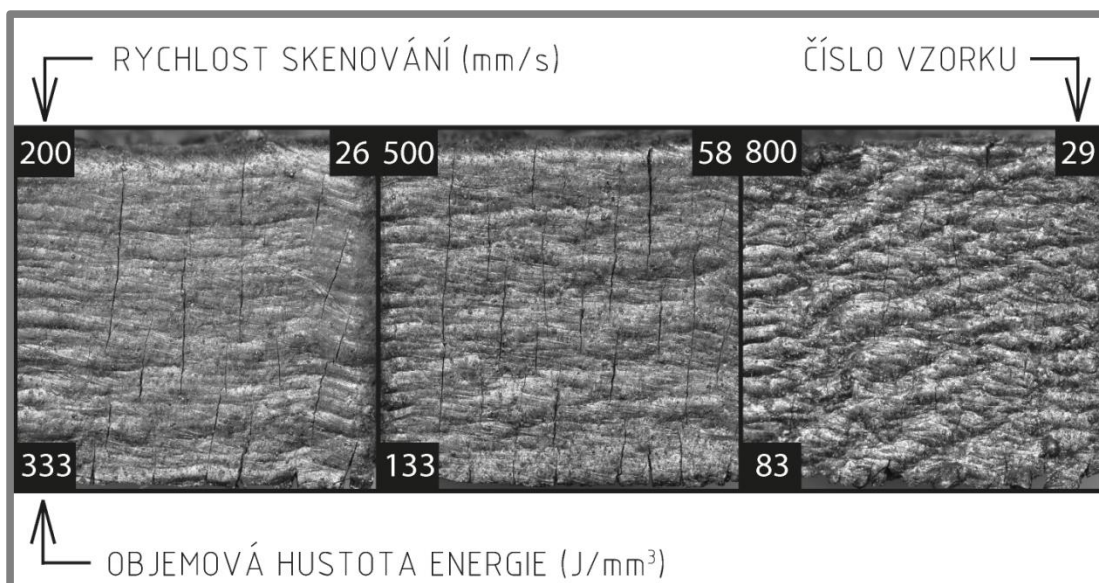
Vzorky byly po tisku vyfoceny na optickém mikroskopu. Byly pořízeny fotografie horní i boční stěny vzorků. Po odřezání byla také vyfocena i uříznutá stěna. Zvolená kombinace procesních parametrů laseru umožnila vytvořit procesní mapu, ze které je možno vyhodnotit změny struktury povrchu vzorků. Výsledné mapy lze nalézt v přílohách 2, 3 a 4.

Na fotografiích horních stran vzorků byla velmi dobře patrná změna vzdálenosti šraf vzniklých při posledním průjezdu laseru. Všechny tři vzorky byly vyrobeny při výkonu laseru 200 W a rychlosti skenování 200 mm/s.



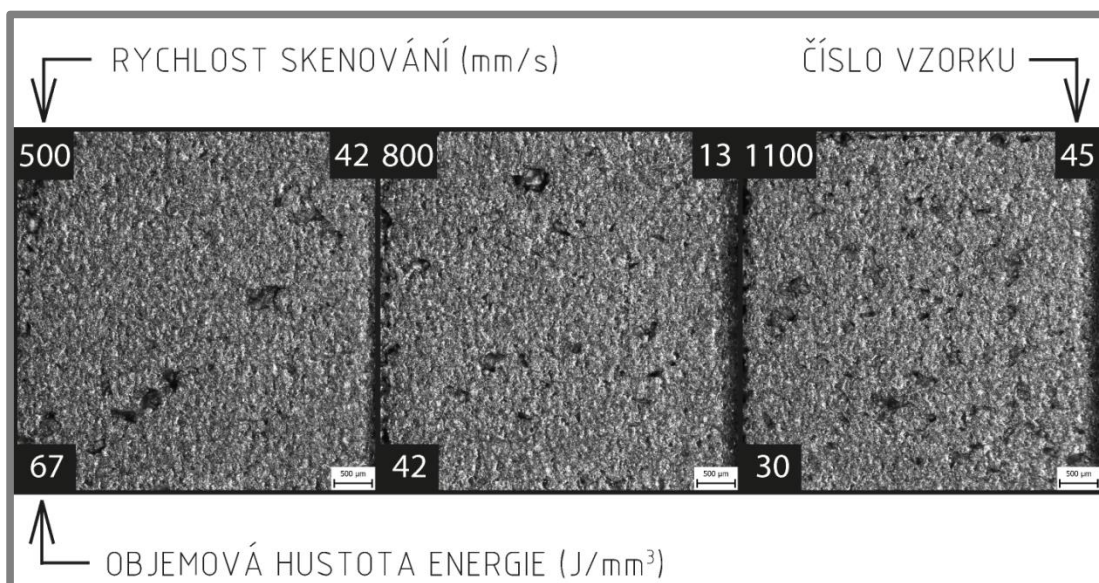
Obr. 5.1 Horní stěny vzorků

Z fotografií bočních stran vzorků bylo možné pozorovat postupné přibývání jednotlivých vrstev materiálu. Drsnost povrchu se se zvyšující objemovou hustotou energie lepší. Na vzorcích 26 a 58 jsou také velmi dobře patrné povrchové trhliny. Ty mohou být způsobené velmi vysokým teplotním gradientem v průběhu výroby. Laser měl v tomto případě výkon 400 W a vzdálenost šraf byla 120 μm .



Obr. 5.2 Boční stěny vzorků

Již z fotografií odřezaných vzorků bylo patrné, že některé kombinace procesních parametrů jsou nevhodné. Zejména kombinace nízkého výkonu laseru a vysokých rychlostí skenování. Následující vzorky byly vyrobeny při výkonu laseru 200 W.

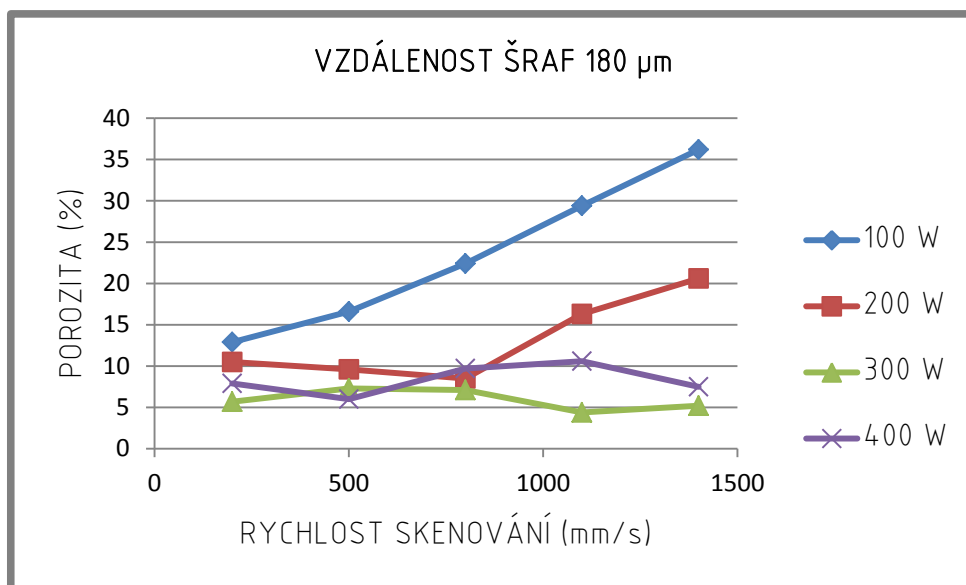


Obr. 5.3 Uřezané stěny vzorků

5.2 Vyhodnocení porozity

Primárním cílem experimentu bylo ovšem vyhodnocení porozity. Metalografické výbrusy vzorků byly nafoceny pod mikroskopem a následně byla vyhodnocena porozita pomocí programu ImageJ.

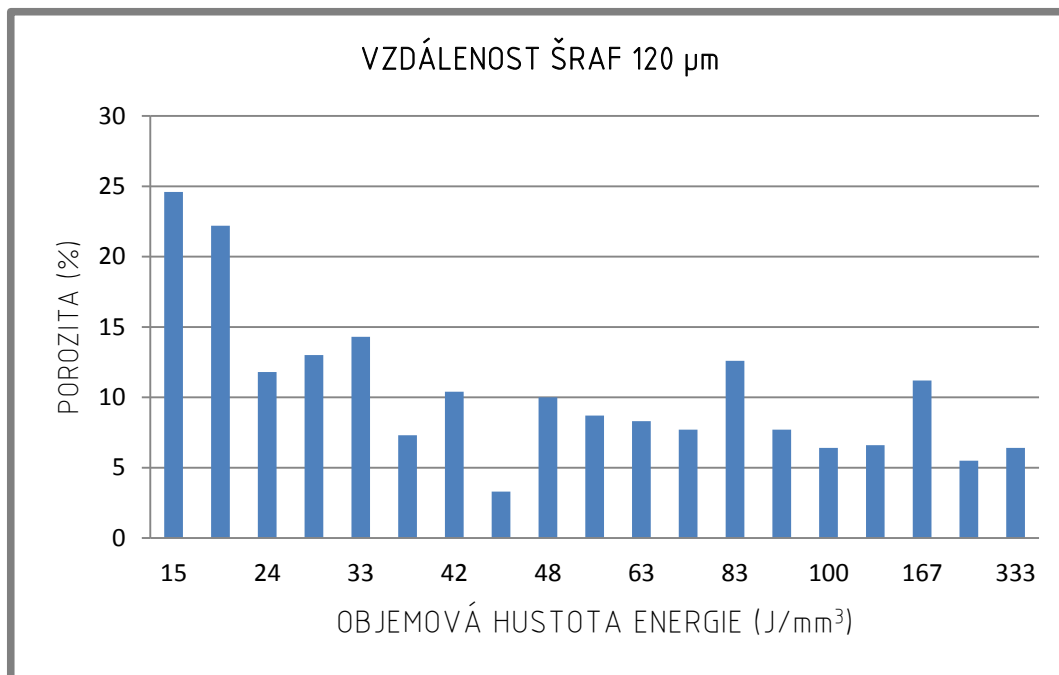
Výsledné fotografie byly rozděleny podle odlišné vzdálenosti šraf. Vytvořené procesní mapy metalografických výbrusů jsou v [příloze 5](#). Byly také vytvořeny grafy závislosti porozity na rychlosti skenování, které jsou k dispozici v [příloze 6](#).



Obr. 5.4 Závislost porozity na rychlosti skenování

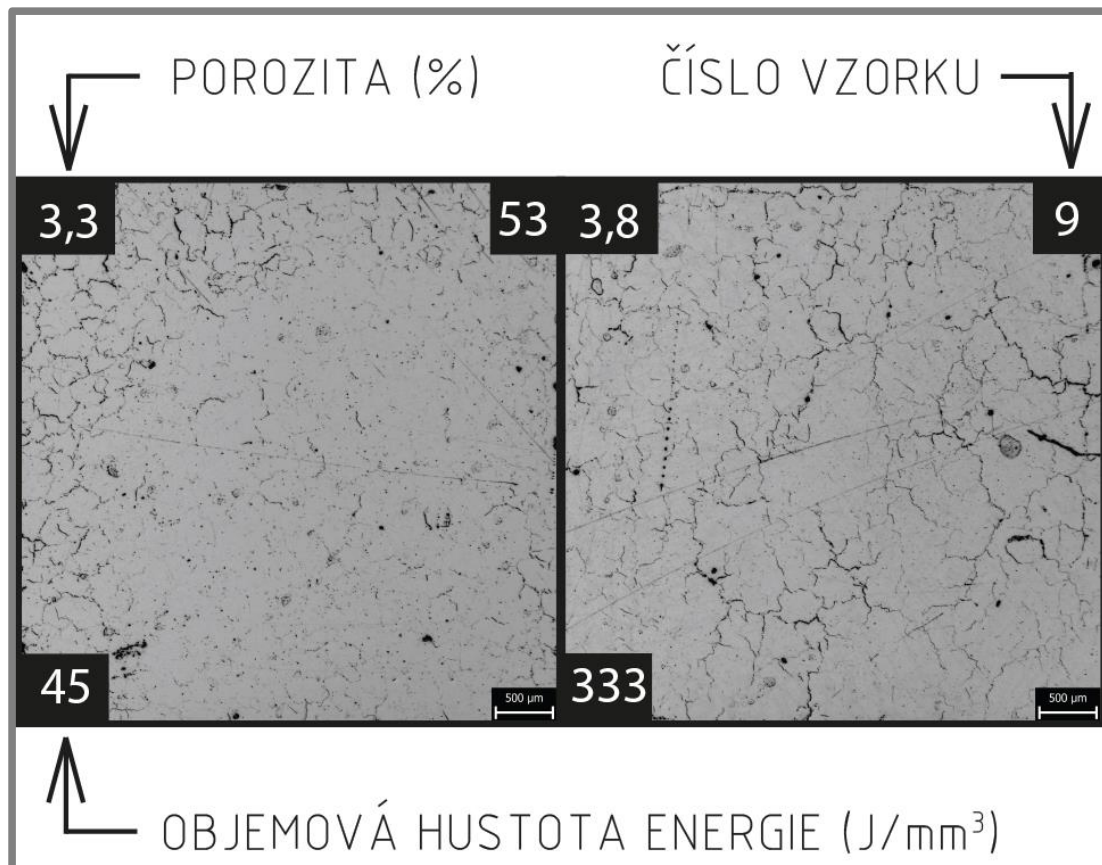
Při nízkých výkonech laseru bylo možné pozorovat se vzrůstající rychlostí skenování velký nárůst porozity. Kombinací vhodných procesních parametrů bylo dosaženo při použití výkonu laseru 300 W porozity menší než 5%.

Byla vytvořena také grafy závislosti porozity na objemové hustotě energie. Ty je možno nalézt v příloze 7. Z nich je možno v případě velmi nízké objemové hustoty energie pozorovat vysokou hodnotu porozity. Je možné si také povšimnout, že v případě hustoty energie 45 J/mm³ porozita razantně klesne oproti sousedním hodnotám. Při této hodnotě objemové hustoty energie byla nalezena vhodná kombinace procesních parametrů pro vzdálenost šraf 120 µm.



Obr. 5.5 Závislost porozity na objemové hustotě energie

Nejnižší porozity 3,3 % bylo dosaženo při výkonu laseru 300 W a rychlosti skenování 1100 mm/s. Vzdálenost šraf byla 120 μm . Dobrá kombinace procesních parametrů byla nalezena také pro vzdálenost šraf 60 μm , při výkonu laseru 200 W a rychlosti skenování 200 mm/s. Porozita byla v tomto případě 3,8 %.



Obr. 5.6 Nejnížší dosažená porozita

6 DISKUZE

V práci byl ověřen vliv procesních parametrů technologie selective laser melting na porozitu dílů z hliníkové slitiny 6061. Zvolená kombinace procesních parametrů laseru umožnila vytvořit procesní mapu, ze které bylo možno jejich vliv na porozitu vyhodnotit. Nejnižší dosažená hodnota porozity byla 3,3 %. Ve všech vzorcích se vyskytly trhliny.

Minimální hodnota porozity koresponduje s výsledky práce [3], ve které byla popsána výroba pomocí laserů o výkonu 400 a 1000 W. Porozita byla v tomto případě maximálně 5 %. Také bylo dosaženo shodné hodnoty porozity 13 % při použití laseru o výkonu 100 W a rychlosti skenování 200 mm/s tak jako v práci [4].

V žádné prostudované literatuře ale nebyla provedena klasifikace pórů. Bez toho vyhodnocený výsledek porozity neposkytuje informace ohledně mechanických vlastností vyrobeného dílu. Pokud jsou ve vzorcích nalezeny trhliny, má to velmi negativní vliv na únavu materiálu.

Vyhodnocovací metoda založená na analýze mikrofotografie řezu je závislá na typu vzorku a zkušenosti operátora. Data mohou být zkreslená. Odhad chyby je 5%. Přesnějšího výsledku by bylo dosaženo vyhodnocením pomocí rentgenové počítačové tomografie. Odchylka se ovšem projevuje pouze u výsledků vzorků s vysokou porozitou [8], které jsou pro tisk vzorků nevhodné.

U žádného ze vzorků nebylo dosaženo porozity menší než 0,5 %, tak jako se to podařilo pro slitinu hliníku EN AW 2618 v práci [15]. Tato hliníková slitina má ale jiné chemické složení a proto jsou pro ni vodné jiné procesní parametry.

7 ZÁVĚR

V této práci byl zkoumán vliv procesních parametrů při výrobě hliníkové slitiny 6061. Výroba byla provedena na 3D tiskárně SLM 280HL od firmy SLM Solutions GmbH.

Proměnné procesní parametry byly výkon laseru, vzdálenost šraf a rychlost skenování. Výkon laseru byl zvolen od 100 W až do maximální hodnoty zařízení, která je 400 W. Rychlost skenování měla rozsah 200 – 1400 mm/s. Byly zvoleny tři různé vzdálenosti šraf: 60, 120 a 180 μm .

Vyrobené vzorky byly následně vyfoceny z horní a boční strany a uřezány. Poté byly vyfoceny i uřezané stěny vzorků. Dále byly vytvořeny metalografické výbrusy, ze kterých byla vyhodnocena výsledná porozita. Cíl práce byl splněn v celém rozsahu.

Nejnižší porozity bylo dosaženo 3,3 % při výkonu laseru 300 W a rychlosti skenování 1100 mm/s. Vzdálenost šraf byla v tomto případě 120 μm . Předpokládalo se, že bude nalezena kombinace procesních parametrů, při kterých bude porozita menší než 0,5 %. Ta ovšem nalezena nebyla.

Ve všech vzorcích byly objeveny trhliny, které mají negativní vliv na únavu materiálu. Ty v prostudované literatuře nebyly prokázány.

V práci nebyla prozkoumána oblast pro hodnoty rychlosti skenování menší než 200 mm/s. Podle [4] se při výkonu laseru 100 W a snižování rychlosti skenování pod tuto hodnotu porozita snižuje. Bylo by proto vhodné prozkoumat tuto oblast i pro vyšší výkony laseru. Také by bylo vhodné ověřit vliv procesních parametrů pro laser o výkonu 1000 W.

Vliv na porozitu má i teplota platformy, která byla při výrobě předehřátá na 80°C. Vyšší hodnoty této teploty nebyly zkoumány.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HULL, Charles W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Přihlášeno 8. srpen 1984. Uděleno 11. březen 1986.
- [2] 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, 77-86 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.001. ISSN 22148604. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860414000062>
- [3] LOH, L.E., Z.H. LIU, D.Q. ZHANG, M. MAPAR, S.L. SING, C.K. CHUA a W.Y. YEONG. Selective Laser Melting of aluminium alloy using a uniform beam profile. Virtual and Physical Prototyping. 2014, 9(1): 11-16. DOI: 10.1080/17452759.2013.869608. ISSN 1745-2759. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2013.869608>
- [4] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J. SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology. 2011, 211(2): 275-284. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013610003018>
- [5] 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 také z: http://www.researchgate.net/publication/257541088_Finestructured_aluminium_products_with_controllable_texture_by_selective_laser_melting_of_preallayed_AlSi10Mg_powder
- [6] KEMPEN, K., L. THIJS, E. YASA, M. BADROSSAMAY, W. VERHEECKE a J.-P. KRUTH. Process optimalization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. [online]. 2011 [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsarchive/pubs/manuscripts/2011/2011-37-kempen.pdf>
- [7] BUCHBINDER, D., H. SCHLEIFENBAUM, S. HEIDRICH, W. MEINERS a J. BÜLTMANN. High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. Physics Procedia [online]. 2011, 12, 271-278 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.035. ISSN 18753892. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389211001143>
- [8] SPIERINGS, A.B., M. SCHNEIDER a R. EGGENBERGER. Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. Rapid Prototyping Journal [online]. 2011, 17(5), 380-386 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1108/13552541111156504. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552541111156504>

- [9] BRANDL, E., U. HECKENBERGER, V. HOLZINGER a D. BUCHBINDER. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior [online]. 2012 [cit. 2015-12-13]. DOI:10.1016/j.matdes.2011.07.067. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911005590>
- [10] Datasheet Aluminum 6061-T6; 6061-T651: MatWeb.com. [online]. [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1b8c06d0ca7c456694c7777d9e10be5b&ckck=1>
- [11] TAKAHASHI, Yoshimasa, Takahiro SHIKAMA, Shinji YOSHIHARA, Tadashi AIURA a Hiroshi NOGUCHI. Study on dominant mechanism of high-cycle fatigue life in 6061-T6 aluminum alloy through microanalyses of microstructurally small cracks. Acta Materialia[online]. 2012, 60(6-7), 2554-2567 [cit. 2016-01-26]. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.01.023. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645412000614>
- [12] JERRARD, P. G. E., L. HAO, S. DADBAKHS a K. E. EVANS. Consolidation behaviour and microstructure characteristics of pure aluminium and alloy powders following Selective Laser Melting processing. Proceedings of the 36th International MATADOR Conference [online]. London: Springer London, 2010, s. 487 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1007/978-1-84996-432-6_108. ISBN 978-1-84996-431-9. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-1-84996-432-6_108
- [13] LOH, Loong-Ee, Chee-Kai CHUA, Wai-Yee YEONG, Jie SONG, Mahta MAPAR, Swee-Leong SING, Zhong-Hong LIU a Dan-Qing ZHANG. Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061. International Journal of Heat and Mass Transfer [online]. 2015, 80, 288-300 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.014. ISSN 00179310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931014008060>
- [14] WONG, Matthew, Sozon TSOPANOS, Chris J. SUTCLIFFE a Ieuan OWEN. Selective laser melting of heat transfer devices. Rapid Prototyping Journal [online]. 2007, 2015-11-13, 13(5): 291-297 [cit. 2015-11-13]. DOI: 10.1108/13552540710824797. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552540710824797>
- [15] KOUKAL, O.; KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; VRÁNA, R.; ZIKMUND, T.; PANTĚLEJEV, L. Research about the Influence of Process Parameters of Selective Laser Melting on Material EN AW 2618. In Euro PM2015 Proceedings. Reims, France: 2015. s. 1-6. ISBN: 978-1-899072-47- 7.
- [16] SLM Solutions [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://slm-solutions.com/products/machines/slmr280hl>

- [17] AHUJA, Bhrgu, Michael KARG, Konstantin Yu. NAGULIN a Michael SCHMIDT. Fabrication and Characterization of High Strength Al-Cu Alloys Processed Using Laser Beam Melting in Metal Powder Bed. Physics Procedia [online]. 2014, 56, 135-146 [cit. 2016-01-25]. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.156. ISSN 18753892. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389214003010>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**9**

Zkratka

3D

Bi

HD

HV

NETME

SLM

Uni

Popis

Třidimenzionální

Bidirectional

Hatch Distance

Hardness Vickers

New Technologies for Mechanical Engineering

Selective Laser Melting

Unidirectional

Symbol D_s m_v m_{kap} P v_s Δy_s ρ ρ_{kap} Ψ **Rozměr**

mm

kg

kg

W

mm/s

mm

kg/m³kg/m³J/mm³**Popis**

vzdálenost šraf

změřená hmotnost vzorku na vzduchu

hmotnost v kapalině

výkon

rychlost skenování

tloušťka vrstvy

hustota vzorku

hustota použité kapaliny

objemová hustota energie

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2.1 Schéma SLM procesu [3]	13
Obr. 2.2 Skenovací strategie [5]	14
Obr. 2.3 Závislost relativní hustoty na strategii a rychlosti skenování [2]	15
Obr. 2.4 Vzdálenost šraf [4]	17
Obr. 2.5 Závislost relativní hustoty na skenovací rychlosti [6]	18
Obr. 2.6 Analýza relativní hustoty pomocí mikrofotografie [8]	19
Obr. 2.7 Výsledek únavových zkoušek	20
Obr. 2.8 Wohlerovy křivky [11]	21
Obr. 2.9 Závislost relativní hustoty na rychlosti skenování [4]	22
Obr. 2.10 Velikost paprsku	24
Obr. 2.11 Šířka a průvar taveniny [13]	25
Obr. 2.12 Drsnost povrchu [2]	26
Obr. 4.1 Rozvržení tisku	29
Obr. 5.1 Horní stěny vzorků	30
Obr. 5.2 Boční stěny vzorků	31
Obr. 5.3 Uřezané stěny vzorků	31
Obr. 5.4 Závislost porozity na rychlosti skenování	32
Obr. 5.5 Závislost porozity na objemové hustotě energie	32
Obr. 5.6 Nejnižší dosažená porozita	33

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Závislost relativní hustoty na skenovací strategii [5]	14
Tab. 2.2 Přehled skenovacích strategií [2].....	15
Tab. 2.3 Přehled procesních parametrů [4]	16
Tab. 2.4 Porovnání metod měření hustoty [8]	20
Tab. 2.5 Chemické složení [10]	21
Tab. 2.6 Fyzikální vlastnosti [10]	21
Tab. 2.7 Mechanické vlastnosti [2,10].....	21
Tab. 2.8 Procesní parametry [4].....	23
Tab. 2.9 Procesní parametry [12].....	23
Tab. 2.10 Procesní parametry [3].....	24
Tab. 2.11 Procesní parametry [13].....	25
Tab. 2.12 Procesní parametry [14].....	26
Tab. 4.1 Parametry tiskárny [16]	28

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Přehled procesních parametrů a výsledné porozity

Příloha 2 Analýza velikosti částic prášku

Příloha 3 Procesní mapa horních stěn

Příloha 4 Procesní mapa bočních stěn

Příloha 5 Procesní mapa uřezaných stěn

Příloha 6 Procesní mapa metalografických výbrusů

Příloha 7 Závislost porozity na rychlosti skenování

Příloha 8 Závislost porozity na objemové hustotě energie