
ABSTRAKT

Selective laser melting (SLM) je aditivní technologie, která umožňuje výrobu dílů z mikro-prutových struktur. Mikro-prutové struktury je velmi obtížné vyrobit pomocí běžných konvenčních metod. Hlavní využití mikro-prutových struktur je v leteckém průmyslu a lékařství pro výrobu kostních implantátů. V této práci je zkoumán vliv procesních parametrů (výkon laseru, skenovací rychlost) na vlastnostech (průměr, drsnost povrchu, porozita) prutů. Výběr procesních parametrů proběhl na základě testu jednotlivých drah. V prvním testu bylo použito programu ImageJ pro zjištění porozity prutů. Ve druhém testu byla porozita zkoumána přesnější technologií μ CT. U obou testů bylo použito technologie 3D skenování pro zjištění rozměrové přesnosti a drsnosti povrchu vzorků. Výsledky měření vedly ke zjištění okna procesních parametrů, kde měly vzorky nejlepší kombinaci drsnosti povrchu a porozity. Nejlepších výsledků bylo dosaženo výkonem laseru 225-275 W a skenovací rychlostí 1400-2000 mm·s⁻¹.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikro-prutová struktura, aditivní technologie, Selective laser melting, procesní parametry, drsnost, porozita, AlSi10Mg

ABSTRACT

Selective laser melting (SLM) in additive technology, which allows production of lattice structures. Lattice structures are very difficult to produce using conventional methods. The main use of lattice structures is in aerospace industry and medicine for bone implants production. In this work influence of processing parameters (laser power, scanning speed) on properties (diameter, surface roughness, porosity) of struts is investigated. The processing parameters selection was based on single tracks test. In the first test, ImageJ was used to determine porosity of struts. In the second test porosity was analyzed with more accurate μ CT technology. Both tests used 3D scanning technology to determine dimension accuracy and surface roughness of samples. The measurement results led to the detection of processing parameter „window“ where samples had the best combination of surface roughness and porosity. The best results were achieved with 225-275 W laser power and scanning speed of 1400-2000 mm·s⁻¹.

KEY WORDS

Lattice structure, additive technology, Selective laser melting, processing parameters, roughness, porosity, AlSi10Mg

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JAROŠ, J. *Vývoj procesních parametrů technologie 3D kovového risku se zaměřením na výrobu mikro-prutové struktury*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vrána.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Vývoj procesních parametrů technologie 3D kovového tisku se zaměřením na výrobu mikro-prutové struktury* vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Radka Vrány. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 18. května 2018

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Radku Vránovi za pomoc, důležité rady a ochotu, kterou projevil při jejím zpracování. Také bych chtěl poděkovat rodičům a přítelkyni za podporu.

OBSAH

OBSAH	11
1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1. Vliv procesních parametrů na jednotlivé dráhy	13
2.2. Vliv procesních parametrů na prutové struktury	19
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	25
3.1. Analýza problému	25
3.2. Cíle práce	26
4 MATERIÁL A METODY	27
4.1. Použitá zařízení a technologie	27
4.1.1. Technologie SLM (Selective Laser Melting)	27
4.1.2. Zařízení SLM 280HL	27
4.1.3. Práškový materiál AlSi10Mg	28
4.1.4. ATOS Triple Scan	29
4.2. Metody vyhodnocování vzorků	29
4.2.1. Vyhodnocení rozměrové přesnosti a drsnosti povrchu	29
4.2.2. Zalévání a broušení vzorků	30
4.2.3. Metodika vyhodnocení porozity	31
4.3. Návrh testů pro zjištění vlivu procesních parametrů na pruty	31
4.3.1. Test šířky jednotlivých návarů	31
4.3.2. První test prutů se sklonem 90° a 35,26°	32
4.3.3. Druhý test pro zpřesnění výsledků	34
5 VÝSLEDKY	36
5.1. Vyhodnocení testu jednotlivých návarů	36
5.2. Vyhodnocení vyrobených testů	37
5.2.1. Vyhodnocení použitých překryvů drah u prvního testu	37
5.2.2. Vyhodnocení šířky dráhy laseru	38
5.2.3. Vyhodnocení vlivu pískování na drsnost povrchu prutů	38
5.2.4. Vyhodnocení velikostí prutů	39
5.2.5. Vyhodnocení drsnosti povrchu prutů	40
5.2.6. Vyhodnocení porozity vyrobených prutů	41
5.2.7. Okna vhodných procesních parametrů	42
6 DISKUZE	47
7 ZÁVĚR	48
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	51
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	52
11 SEZNAM TABULEK	54
12 SEZNAM PŘÍLOH	55

1 ÚVOD

Aditivní technologie je proces výroby, který se v poslední době dostává do popředí díky možnostem výroby tvarově složitých součástí. Jedná se především o součásti, které je obtížné vyrobit pomocí běžných konvenčních technologií, nebo je jejich výroba finančně a časově náročná. Na rozdíl od konvenčních technologií, kde je materiál obráběn, je odebírán jeho objem, aditivní technologie pracuje na principu nanášení materiálu (přidávání) vrstvu po vrstvě, a tak je vyrobena celá součást. Dříve byla tato technologie využívána především k výrobě prototypů a modelů. [1]



Obr. 1.1 Použití prutových struktur v kosti [2]

Aditivní technologie má velké využití v mnoha průmyslových odvětvích. Například v automobilovém a leteckém průmyslu má uplatnění pro výrobu součástí s nižší hmotností, které je dosaženo nahrazením plného materiálu prutovými strukturami. V současné době je velký zájem o biomedicínské aplikace SLM (Selective Laser Melting), jako jsou implantáty a protézy vytvořené individuálně pro pacienta (obr. 1.1). Velkou výhodou je široké spektrum používaných materiálů, například hliníkové slitiny, nerezové oceli, nebo titan. [3]

Veliký vliv na vyrobenou součást technologií SLM mají procesní parametry jako jsou výkon laseru, skenovací rychlost, vzdálenost drah laseru atd. Vliv těchto procesních parametrů na objemové vzorky (návary, tenké stěny, kostky) je popsán v mnoha vědeckých článcích. Avšak nelze použít stejné procesní parametry pro objemové vzorky a prutové struktury, protože prutové vzorky vykazují rozdílné chování při výrobě. Kvůli této skutečnosti je potřeba se zabývat vlivem procesních parametrů na prutové struktury. Bakalářská práce je proto zaměřena na zjištění vlivu procesních parametrů na jednotlivé pruty a volbu vhodných procesních parametrů pro výrobu mikro-prutových struktur.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

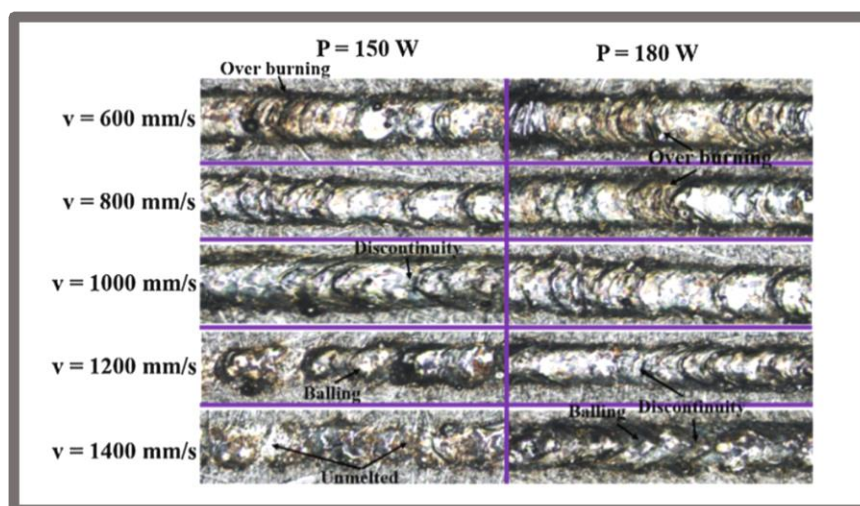
Vědecké články vybrané v přehledu současného stavu poznání se především zabývají volbou vhodných procesních parametrů pro objemové díly i prutové struktury. Použitým materiálem je především prášek AlSi10Mg, který je používán také v této práci.

2.1. Vliv procesních parametrů na jednotlivé dráhy

2.1

Wei et al. [4] zkoumali vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na tvorbu stabilních drah a drsnost povrchu. Výkon laseru byl nastaven na hodnoty 150 W a 180 W, skenovací rychlost byla nastavena od $600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ do $1400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ s krokem $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

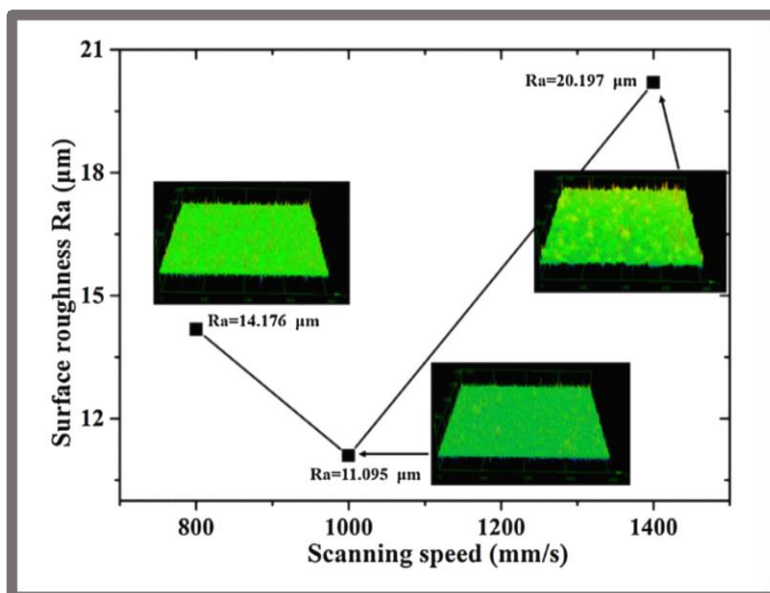
Při relativně nízké skenovací rychlosti $\leq 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkonu laseru 180 W, nebo při skenovací rychlosti $\leq 600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkonem laseru 150 W bylo zjištěno, že nadměrná energie působící na prášek snižuje kvalitu povrchu a dochází k přetavení (obr. 2.1 horní část). Naopak při vyšší skenovací rychlosti $\geq 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkonu laseru 150 W, nebo skenovací rychlosti $\geq 1400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkonu laseru 180 W menší množství energie působilo na prášek, a tím docházelo k neroztavení všech částic prášku. V těchto vzorcích je možné pozorovat nestabilitu dráhy, která se dělí na části, kde se prášek roztavil, a které nebyly roztaveny (obr. 2.1 spodní část).



Obr. 2.1 Vytvořené dráhy za použití daných procesních parametrů [4]

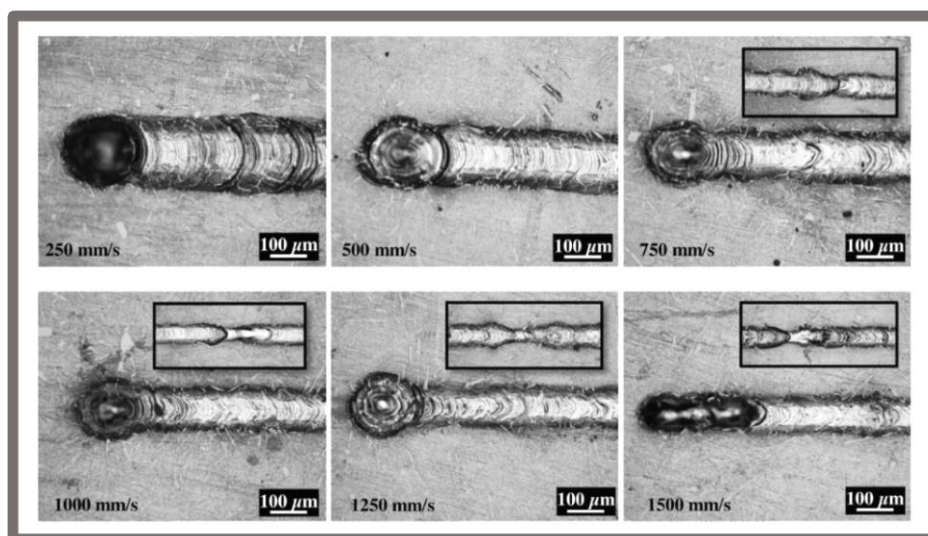
Nejlepší výsledky (obr. 2.1) byly dosaženy při použití výkonu laseru 150 W a skenovací rychlosti $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, nebo při výkonu laseru 180 W a skenovací rychlosti $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Dráhy vyrobené těmito procesními parametry jsou jednotné a nedochází u nich k přetavení, nebo neroztavení.

Na obr. 2.2 je zobrazena drsnost povrchu na objemových vzorcích pro jednotlivé skenovací rychlosti. Pomocí technologie SLM lze vyrobit součásti s relativně nízkou drsností povrchu použitím správného nastavení procesních parametrů. Například poměrně nízká drsnost povrchu $R_a = 11,095 \mu\text{m}$ byla získána u vzorku s využitím výkonu laseru 180 W a skenovací rychlosti $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Při použití větší, nebo menší skenovací rychlosti docházelo k zvýšení drsnosti povrchu.



Obr. 2.2 Závislost drsnosti povrchu na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 180 W [4]

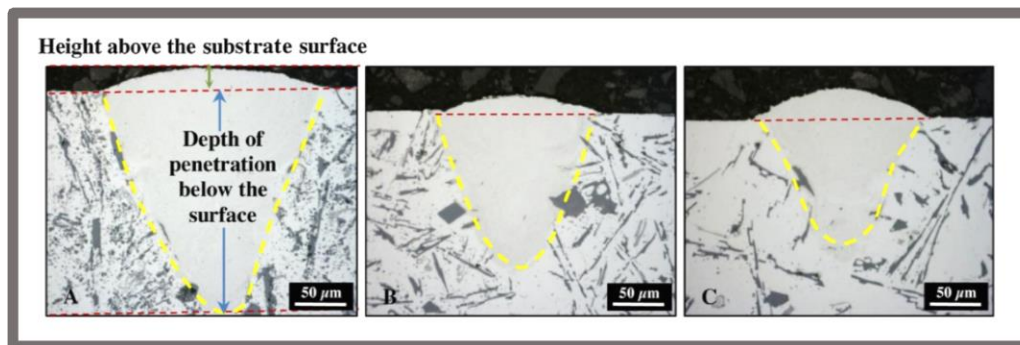
Aboulkhair et al. [5] zkoumali vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na vlastnosti drah. Konkrétně posouzením jednotnosti dráhy, hloubkou průvaru a tvorbou návaru. Použitý výkon laseru byl 100 W , skenovací rychlost se měnila v závislosti na testu. Tloušťka vrstvy byla $40 \mu\text{m}$. Také se zabývali použitím větší vrstvy prášku.



Obr. 2.3 Vliv zvyšování rychlosti skenování na šířku dráhy [5]

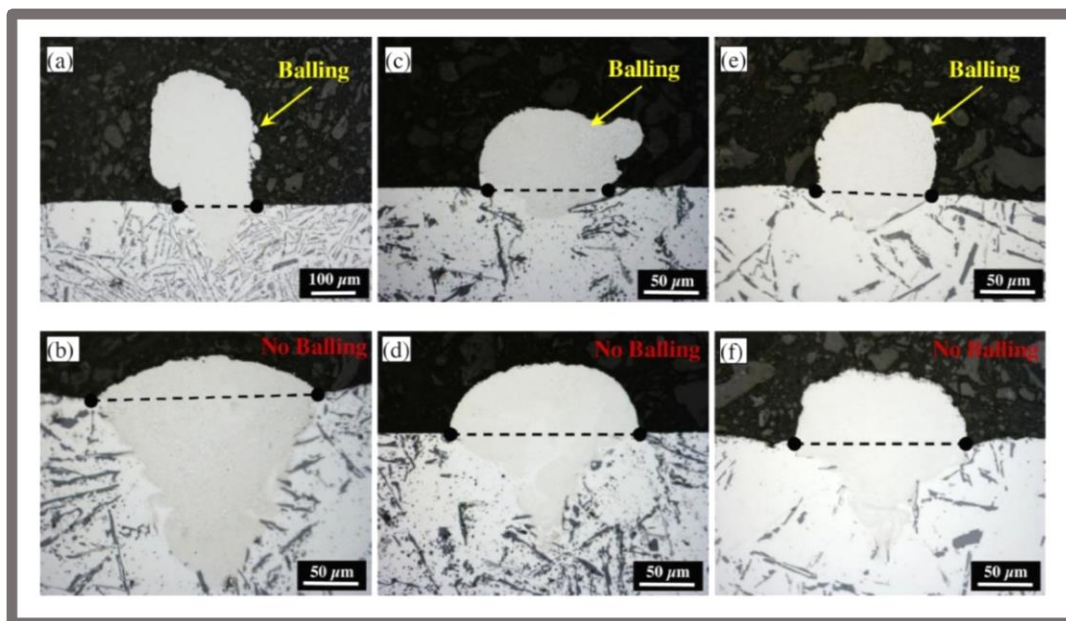
Použitím skenovací rychlosti menší než $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ docházelo k výraznému rozšíření dráhy vlivem působení vysoké energie na dráhu. Při zvýšení skenovací rychlosti nad $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ se objevily zúžené části v jednotlivých drahách. Vzorky prokázaly úbytek hustoty energie působící na stopu dráhy, což mělo za následek snížení objemu roztaveného prášku, a tím docházelo ke zmenšení šířky dráhy (obr. 2.3 spodní část).

Pozorovali také vliv skenovací rychlosti na vzniklý návar. Řez vytvořenou drahou ukázal, že ji lze rozdělit do dvou částí, na návar a průvar, tedy výšku dráhy nad povrchem a hloubku dráhy pod povrchem. Výška návaru se zvětšovala se zvyšující se skenovací rychlostí, zatímco opačný jev byl pozorován u hloubky průvaru (obr. 2.4). To znamená, že vyšší skenovací rychlost vedla ke snížení hloubky průvaru, což může mít za následek nedostatečné spojení s předchozí vrstvou, takže vyrobená součást nemusí být dostatečně pevně spojena.



Obr. 2.4 Zobrazení návaru a průvaru při skenovacích rychlostech $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $750 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [5]

Byla posuzována také možnost použití větší šířky vrstvy prášku, a to konkrétně $400 \mu\text{m}$. Dráhy vyrobené při šířce vrstvy prášku $400 \mu\text{m}$ vykazovaly několik defektů. Při všech použitých skenovacích rychlostech byl pozorován vznik kuliček na povrchu a částí drah, které nebyly vůbec roztaveny. Přestože se $400 \mu\text{m}$ považuje za širokou vrstvu, při použití nejpomalejší skenovací rychlosti $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ nebyly pozorovány části drah, kde by prášek nebyl roztaven, byla tak vyrobena jednotná dráha. Nicméně při použití skenovacích rychlostí $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $750 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ vnikaly v drahách defekty, a to zejména ve formě kapiček, nebo koulí. Při vzniku koule působí mnohem méně energie směrem k prášku, což redukuje průvar a dochází k nedostatečnému spojení s předchozí vrstvou. Průřezy jednotlivých drah jsou zobrazeny na obr. 2.5, kde horní část je vyrobena při použití vrstvy prášku $400 \mu\text{m}$ a spodní část při použití vrstvy prášku $40 \mu\text{m}$.

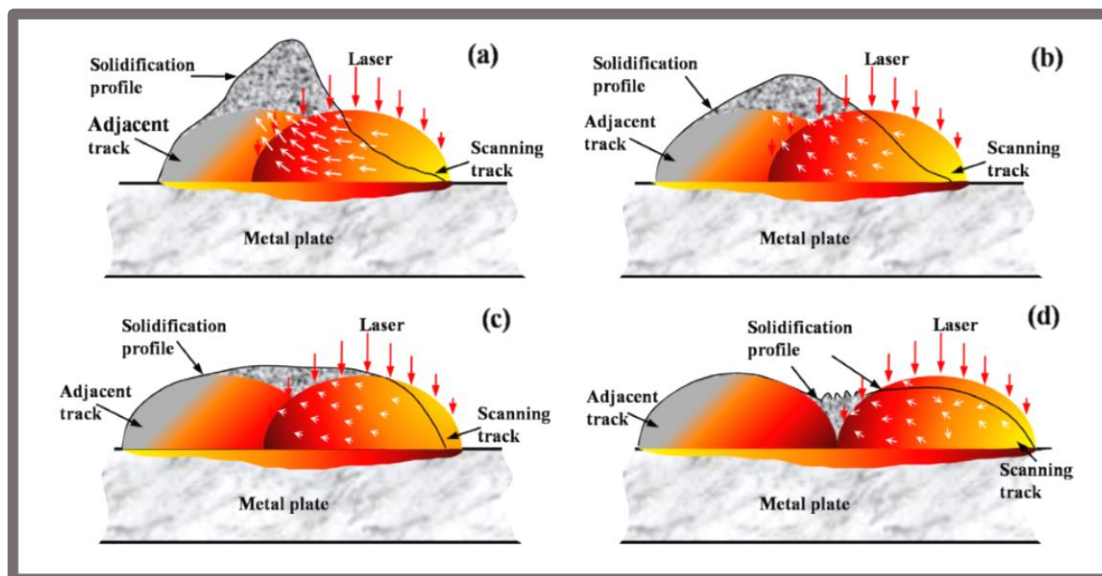


Obr. 2.5 Zobrazení průřezů drah s kuličkou a bez ní pro skenovací rychlosti: (a) a (b) $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, (c) a (d) $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, (e) a (f) $750 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [5]

Xia et al. [6] zkoumali vliv vzdálenosti drah laseru (H) na chování roztavené lázně a následné tuhnutí ve dvou sousedních drahách. Použitým materiálem byla slitina Inconel 718, výkon laseru byl nastaven na 110 W při skenovací rychlosti $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. V závislosti na použitých parametrech byl vytvořen model, který odpovídá chování roztavené lázně a zobrazuje možné způsoby chování lázně v závislosti na vzdálenosti drah laseru (obr. 2.6). Výsledky poskytnuté modelem byly ověřeny vyrobením sad vzorků.

Při relativně nízké hodnotě H 40 μm byla roztavená lázeň zahřátá na vyšší teplotu a ta způsobila nižší viskozitu. V tomto případě bylo vytvořeno silné povrchové napětí snížené větším teplotním gradientem blízko okraje roztavené lázně, což bylo hnací silou pro přesun taveniny. Za těchto podmínek má tavenina tendenci přesouvat se k okraji lázně. Za stejných procesních parametrů zmenšení H ukázalo, že převážná část sousedních drah byla znovu roztavena (obr. 2.6a). To způsobilo přesun značného množství taveniny k okraji roztavené lázně a následně ztuhnutí materiálu s podstatně větší výškou návaru.

Při zvýšení H na 50 μm byla teplota lázně snížena, ale viskozita a povrchové napětí se zvýšily (obr. 2.6b). Rychlost přesunu taveniny odtékající středem drah byla mírně zpomalena. Díky snížení této rychlosti došlo ke ztuhnutí materiálu s relativně nízkým výškových profilem.



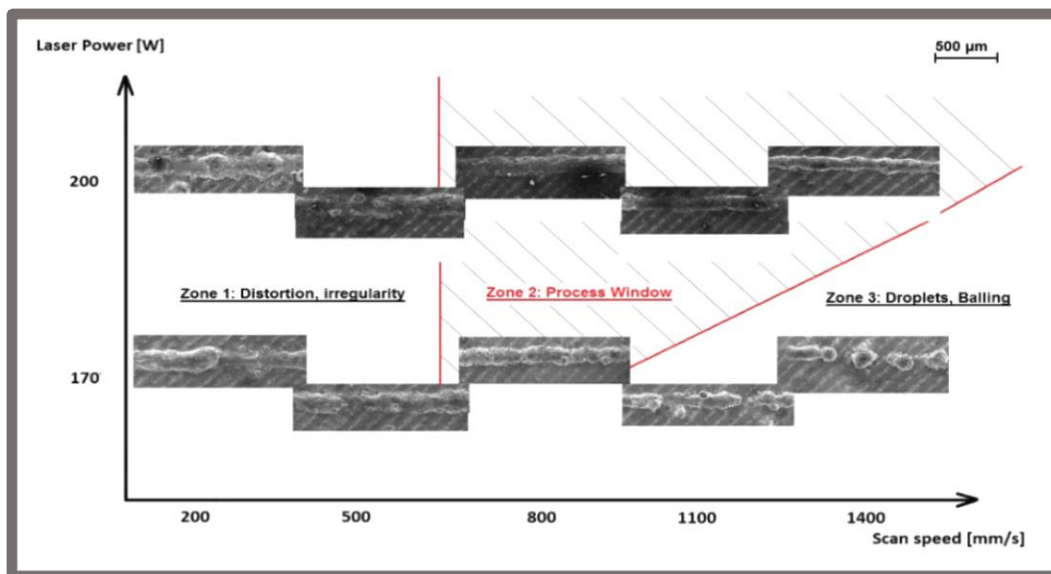
Obr. 2.6 Schéma chování roztavené lázně při zvyšující se vzdálenosti drah laseru: (a) 40 μm , (b) 50 μm , (c) 60 μm , (d) 70 μm [6]

Když se hodnota H zvýšila na 60 μm , došlo ke snížení teploty lázně a k dalšímu zvýšení viskozity a povrchového napětí, což mělo za následek snížení množství přesouvající se taveniny (obr. 2.6c). Určité množství taveniny pouze vyplnilo oblasti, které se nacházely mezi jednotlivými drahami, čímž došlo k vytvoření požadovaného vzhledu dvou sousedních drah.

Při dalším zvýšení H na hodnotu 70 μm byla vzdálenost mezi drahami příliš velká, takže nemohlo dojít k přesunu taveniny (obr. 2.6d). Kromě toho se tavenina nedokázala zcela rozptýlit a natavit sousední dráhu. Použitím velké vzdálenosti drah laseru dochází ke vzniku neroztavených částí uvnitř sousedních drah, což může u větších vzorků způsobit vnitřní porozitu.

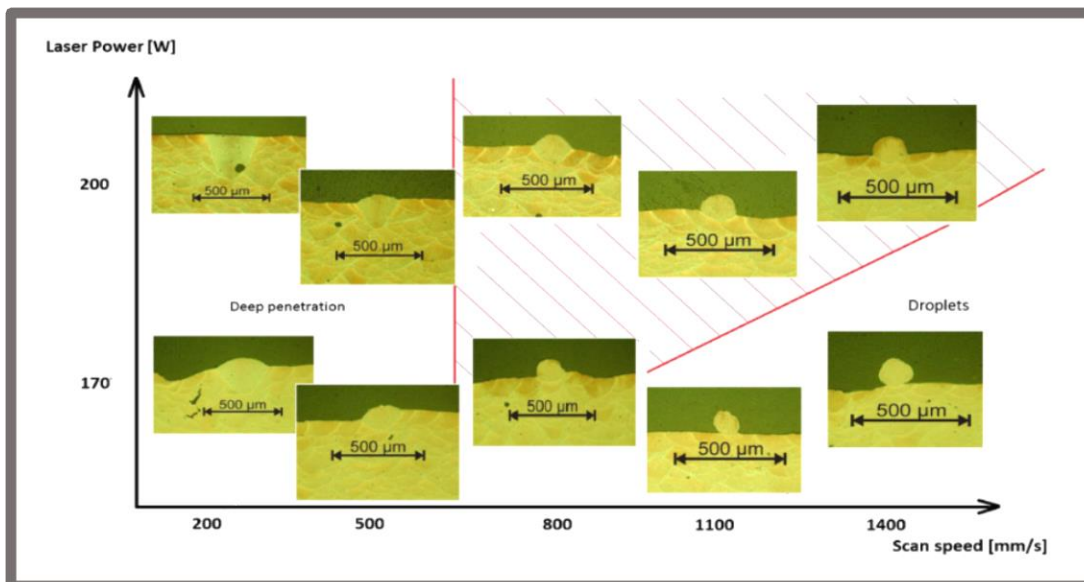
Kempen et. al. [7] zkoumali vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na vlastnosti dráhy. Výkon laseru byl volen od 170 W do 200 W. Skenovací rychlost se pohybovala od 200 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ do 1400 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Tloušťka vrstvy byla nastavena na 30 μm . Pomocí výsledků určili okno procesních parametrů, které vymezuje parametry pro vytvoření dráhy s ideálními vlastnostmi.

Výsledná dráha je považována za plochu, nebo objem, proto jsou výsledky analyzovány v závislosti na energii laseru na jednotku délky. Je-li intenzita energie laseru na jednotku délky příliš vysoká, což může být způsobeno zvýšením výkonu laseru, nebo snížením skenovací rychlosti, zvětšuje se objem roztaveného prášku a viskozita dráhy se snižuje. Vysoká intenzita energie laseru může vést ke vzniku defektů a velmi hlubokému protavení do dříve vytvořených vrstev. Tato situace je vidět vlevo nahoře na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Přehled drah vytvořených pomocí různého výkonu laseru a skenovací rychlosti [7]

Když je energie na jednotku délky příliš nízká, což může být způsobeno snižováním výkonu laseru, nebo zvyšováním skenovací rychlosti, vznikají neroztavené části drah, které jsou vidět vpravo dole na obr. 2.7. Při použití vysoké skenovací rychlosti ($1100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $1400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) a nízkého výkonu laseru (170 W) dochází ke vzniku dráhy, která je tvořena segmenty, které byly roztaveny a částmi, které nebyly roztaveny.



Obr. 2.8 Přehled průřezů drah vytvořených pomocí různého výkonu laseru a skenovací rychlosti [7]

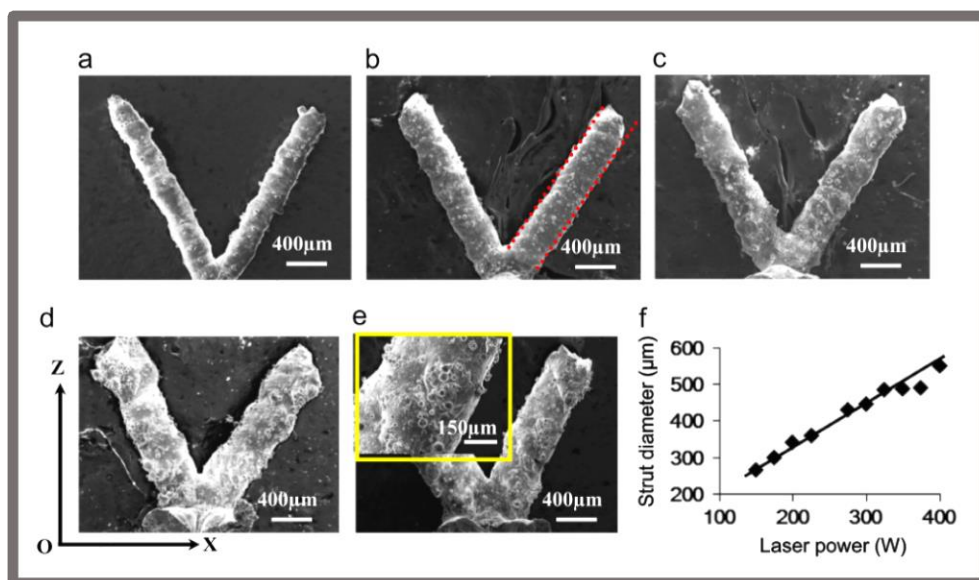
Vyhodnocením průřezů jednotlivých drah lze ověřit další požadavky na vlastnosti dráhy. Na obr. 2.8 můžeme vidět tyto průřezy pro různé sady procesních parametrů (výkon laseru, skenovací rychlost). Vpravo dole se nacházejí průřezy drah vyrobené při působení příliš nízké energie laseru na jednotku délky. Vliv nízké energie způsobuje vznik návarů ve tvaru kuliček a nedostatečné propojení s předchozími vrstvami.

Působením vysoké energie na dráhu (levý horní roh na obr. 2.8) dochází k velmi hlubokému pronikání do předchozích vrstev a také k částečnému odpařování. Když je intenzita laseru dostatečně vysoká, vytváří se uvnitř taveniny hluboko pronikající vzduchová dutina. Malá změna skenovací rychlosti, nebo teploty taveniny může způsobit nestabilitu, která by vedla ke zhroucení této taveniny a ponechala zachycený plyn v podobě malých pórů na dně taveniny. Jeden z těchto pórů je vidět v průřezu pro skenovanou dráhu vytvořenou při výkonu laseru 200 W a skenovací rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ na obr. 2.8. Pro tvorbu ideálních drah bylo definováno okno procesních parametrů. Tato zóna udává stabilní podmínky zpracování.

2.2 Vliv procesních parametrů na prutové struktury

2.2

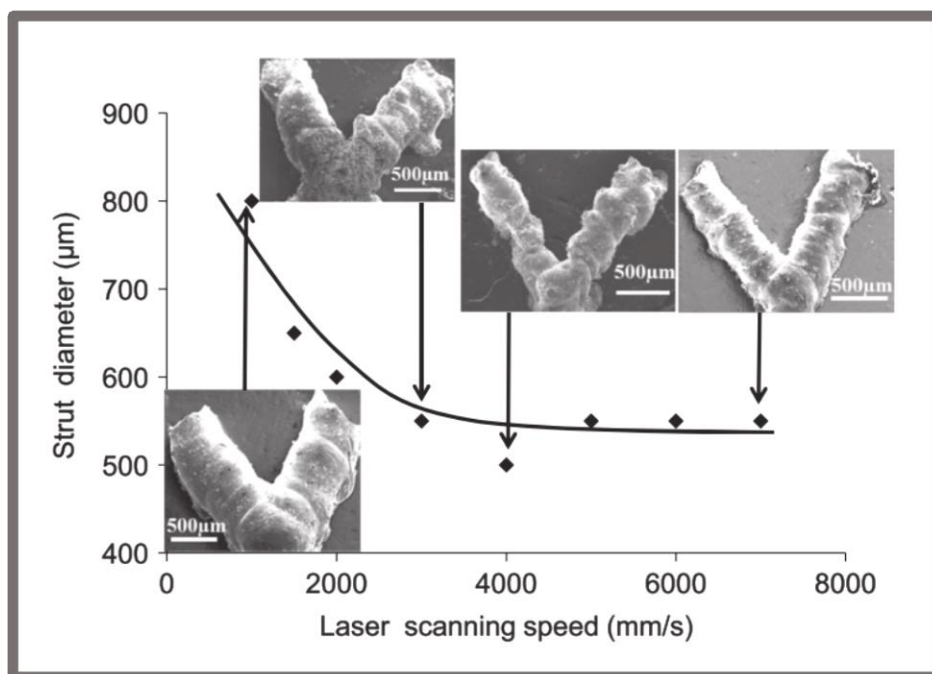
Qiu et. al. [8] se zabývali tvorbou prutů v mikro-prutové struktuře a porozitou při změnách výkonu laseru a skenovací rychlosti. Použitý výkon laseru byl od 150 W do 400 W, skenovací rychlost byla volena od $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ do $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Testovací vzorek měl délku jednoho prutu 2 mm a šířka byla nastavena na 0,3 mm.



Obr. 2.9 (a-e) série snímků znázorňující změnu průměru prutu při zvětšování výkonu laseru: (a) 150 W, (b) 200 W, (c) 275 W, (d) 300 W, (e) 375 W při pevné skenovací rychlosti $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Graf (f) zobrazuje závislost průměru prutu na výkonu laseru [8]

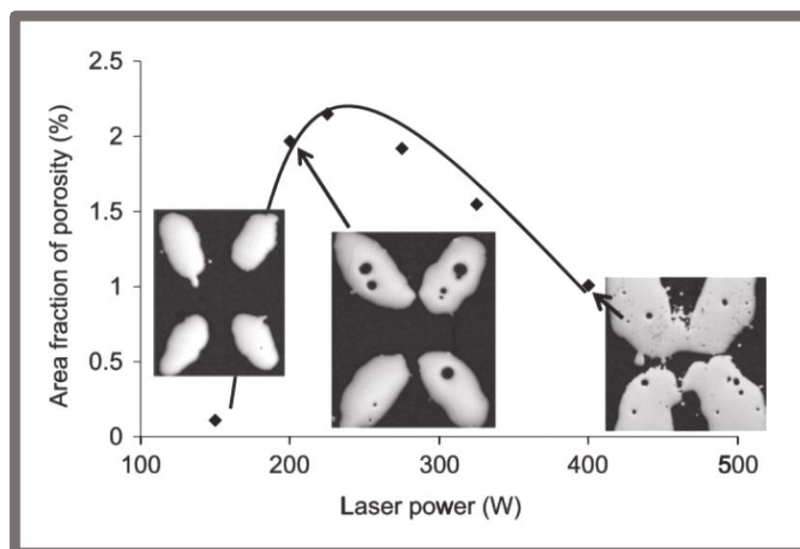
Na obr. 2.9 jsou znázorněny pruty vyrobené v mikro-prutové struktuře při použití různých výkonů laseru a pevné skenovací rychlosti $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Zvyšující se výkon laseru vede ke vzniku silnějších prutů s téměř lineárním vztahem. V důsledku toho se skutečné průměry prutů výrazně odchyľují od nominálního průměru ($300 \text{ } \mu\text{m}$). Při výkonu laseru 150 W o $-40 \text{ } \mu\text{m}$ a při výkonu laseru 400 W o $+200 \text{ } \mu\text{m}$. Působením vyššího výkonu laseru docházelo k částečnému natavení okolních zrn prášku, které se přichytávaly na stěny prutu a tím zvyšovaly rozměr prutu a drsnost jeho povrchu.

Na obr. 2.10 jsou znázorněny pruty vyrobené při výkonu laseru 400 W a použitím různé skenovací rychlosti. Na rozdíl od vlivu výkonu laseru, skenovací rychlost významně neovlivňuje průměry prutů při použití skenovacích rychlostí v rozsahu $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ až $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Všechny naměřené průměry byly větší, než nominální průměr $300 \text{ } \mu\text{m}$. Pruty vyrobené při skenovacích rychlostech $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ mají tendenci vykazovat více nepravidelných tvarů.



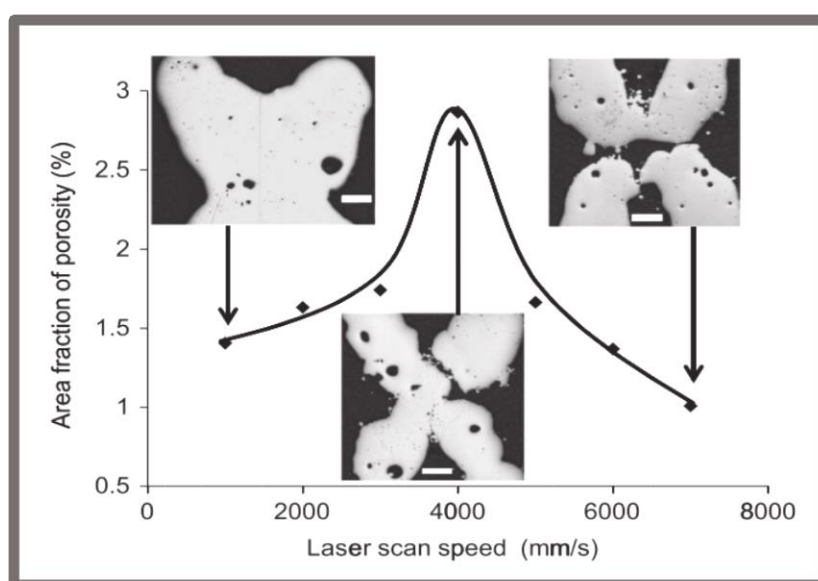
Obr. 2.10 Změna průměru vzpěry při výkonu laseru 400 W a proměnné skenovací rychlosti [8]

Na obr. 2.11 je znázorněna změna porozity uvnitř prutů jako funkce výkonu laseru při nastavení pevné skenovací rychlosti $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Při výkonu laseru 150 W jsou pruty husté a obsahují jen malý počet pórů. Při výkonu laseru nad 200 W a vyšším, bylo několik pórů přítomných ve všech prutech, což vedlo k větší úrovni porozity. Bylo zjištěno, že objem porozity klesá s rostoucím výkonem laseru. Póry jsou sférické a neobsahují znečištěné částice prášku, to znamená, že jejich tvorba nebyla způsobena neúplným roztavením prášku, nebo nedostatečným spojením s předchozími vrstvami, což obvykle vede k nepravidelným pórům.



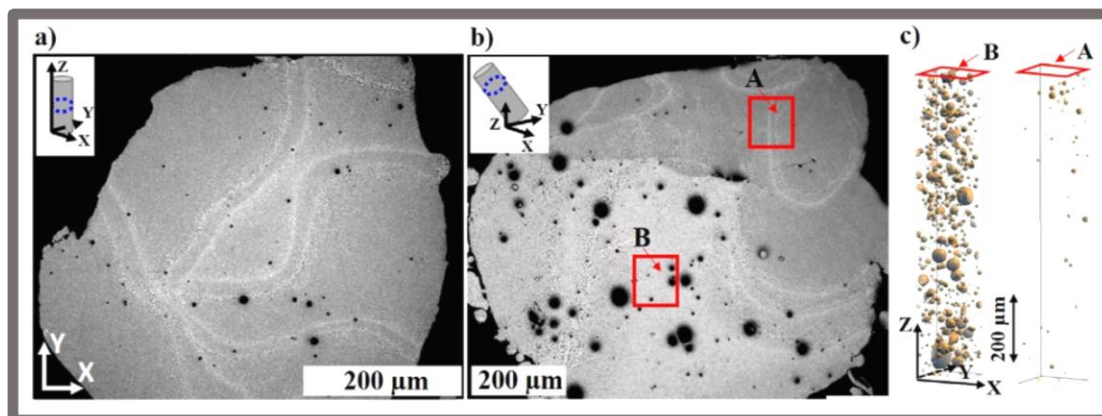
Obr. 2.11 Závislost porozity na změně výkonu laseru [8]

Na obr. 2.12 je znázorněna porozita v mikro-prutové struktuře vyrobené při použití různých skenovacích rychlostí a stejném výkonu laseru 400 W. Vzpěry vyrobené v rozmezí skenovacích rychlostí $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ až $5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ mají tendenci mít větší porozitu. Ostatní výsledky prokazovaly menší hodnoty porozity.



Obr. 2.12 Závislost porozity na skenovací rychlosti [8]

Delroisse et. al. [9] se zabývali vlivem sklonu prutu na odvod tepla a porozitu. Byly vyrobeny vzorky prutů se sklonem 90° a $35,5^\circ$. Použitý výkon laseru byl 250 W, skenovací rychlost $571 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a šířka vrstvy byla nastavena na $60 \mu\text{m}$. Vnitřní porozita prutů byla měřena metodou μCT (micro-computed tomography).



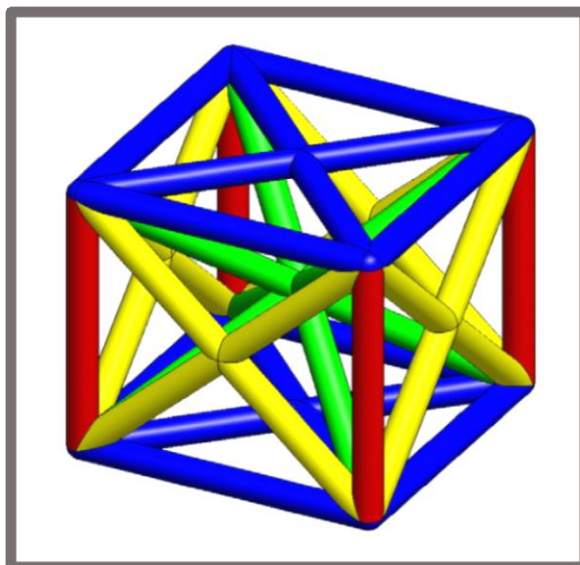
Obr. 2.13 Zobrazení porozity: (a) kolmý prut, (b) skloněný prut, (c) oblasti A, B u skloněného prutu [9]

Výsledky měření ukazují, že při použití stejných procesních parametrů dochází ke vzniku rozdílné porozity uvnitř prutu vertikálního a se sklonem. Prut vyrobený pod úhlem 90° vykazuje menší množství porozity způsobené malými póry (obr. 2.13a). Menší množství porozity bylo způsobeno odvodem tepla do předchozích roztavených vrstev materiálu.

Pruty vyrobené se sklonem $35,5^\circ$ obsahují větší množství porozity (obr. 2.13b), než vertikální pruty. Zvýšené množství porozity vzniklo delším působením vysoké teploty na roztavenou lázeň. Proto byly pruty rozděleny na dvě oblasti: oblast A, která se nachází v horní části prutu a oblast B, která se nachází ve spodní části prutu (obr. 2.13c). V horní části prutu probíhal odvod tepla směrem do plného materiálu a tím vznikla porozita srovnatelná s pruty pod úhlem 90° . Odvod tepla v dolní části prutu probíhal především do prášku, který slouží jako izolant, a tak byla roztavená lázeň udržována delší dobu na vysoké teplotě, což zapříčinilo vznik velkého množství pórů v této části prutu.

Leary et al. [10] zkoumali vyrobiteľnosť prutových struktur s rôznymi úhly naklonění a jejich odolnosť vůči zatěžování. Pro tyto účely byla navržena sada vzorků prutových struktur, která byla později analyzována. Použitým materiálem byl AlSi12Mg. Tloušťka vrstvy byla nastavena na $50\ \mu\text{m}$. Výkon laseru byl nastaven na $350\ \text{W}$, skenovací rychlost byla $921,05\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a vzdálenost drah laseru byla $190\ \mu\text{m}$.

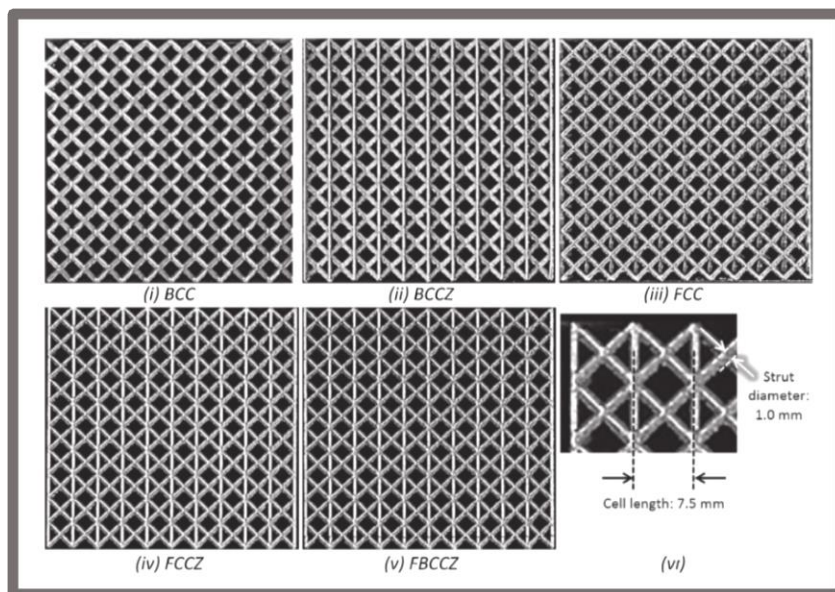
Na obr. 2.14 můžeme vidět jednotkovou buňku prutové struktury se stejnou délkou všech stran. Pro tuto buňku existují čtyři možné sklony prutů: 0° ; $35,26^\circ$; 45° ; 90° . Délka prutu byla navržena výrazně větší, než byl průměr prutu. Experimentálně bylo provedeno zjištění, že horizontální pruty (sklon 0°) nelze vyrobiť u žádného stanoveného průměru. V tomto případě prut nebyl schopen zůstat v kontaktu se součástmi. Proto nebylo nutné se dále zabývat horizontálními pruty, které tak nebyly zahrnuty do testování.



Obr. 2.14 Krichlová buňka se čtyřmi možnými sklony vzpěr. Modrá 0°; zelená 35,3°; žlutá 45°; červená 90° [10]

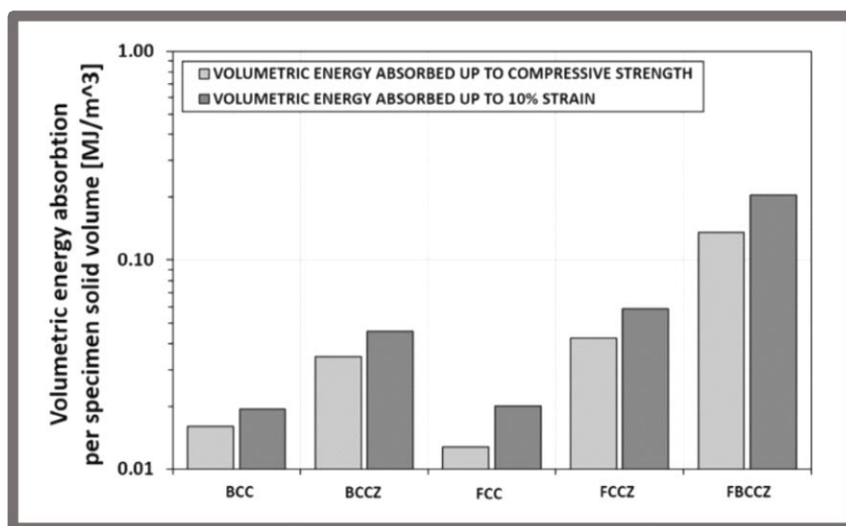
Na základě experimentálního zkoumání vyrobitelnosti prutů byla za účelem testování vybrána řada vyrobitelných prutových struktur s odlišnými parametry (jako je topologie a sklon vzpěr). Na vybraných prutových strukturách bylo provedeno měření pomocí zatěžující síly. Specifické prutové struktury (obr. 2.15) byly vybrány v důsledku následujícího rozsahu očekávaných vlastností:

- Kubická prostorově středěná (BCC): Vysoká shoda a relativně nízká hustota.
- Kucká plošně středěná (FCC): Vysoká shoda.
- Kubická prostorově středěná s pruty ve směru osy Z (BCCZ) a kubická plošně středěná s pruty ve směru osy Z (FCCZ): Teoreticky nepoddajná, ale vysoká kompresní pevnost a tuhost v podélných směrech.
- Kubická plošně a prostorově středěná s pruty ve směru osy Z (FBCCZ): Vysoká pevnost a tuhost v podélném směru, přičemž pruty ve středu buňky odolávají zatížením ve směrech x a y. Relativně vysoká hustota.



Obr. 2.15 Vyrobené prutové struktury: (i) kubická prostorově středěná, (ii) kubická prostorově středěná s pruty ve směru osy Z, (iii) kubická plošně středěná, (iv) kubická plošně středěná s pruty ve směru osy Z, (v) kubická plošně a prostorově středěná s pruty ve směru osy Z [10]

Výsledky (obr. 2.16) prokázaly, že nejlepší pevnostní vlastnosti byly dosaženy použitím struktury FBCCZ. Průměrné výsledky byly jak u struktury BCCZ, tak u struktury FCCZ, které dosáhly srovnatelných pevnostních hodnot. Mřížka BCC má ve srovnání s mřížkou FCC lepší absorpční vlastnosti, avšak tyto mřížky dosáhly nejhorších výsledků.



Obr. 2.16 Objemová absorpce energie (W) testovaných mikro-prutových struktur [10]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

3.1 Analýza problému

3.1

Wei et al. [4] volili různé procesní parametry tisku pro výzkum vlivu na jednotlivé návary. Výsledky prokázali, že vysoká energie působící na materiál vede k přetavení (zvětšení šířky dráhy). Nedostatečná energie způsobuje neroztavení částí dráhy, která tak není spojitá. Ideální parametry (výkon laseru 180 W, skenovací rychlost $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) vedly k tvorbě dráhy požadovaného tvaru.

Volbu procesních parametrů rozšířili Aboulkhair et al. [5] o požadavky na vhodnou hloubku průvaru a tvorbu návaru. Při snižující se skenovací rychlosti bylo dosaženo větší šířky dráhy, způsobené vlivem větší energie laseru. Zvyšování skenovací rychlosti vedlo ke zúžení šířky dráhy a při vysokých rychlostech (750 až $1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) vedlo ke vzniku částí drah s velmi malou šířkou. Použitím vysoké skenovací rychlosti nepůsobí na prášek dostatečná energie a dochází k nedostatečnému spojení s předchozí dráhou. Při použití tloušťky vrstvy $40 \text{ } \mu\text{m}$ vzniklo dostatečné spojení drah s předchozí vrstvou ve všech případech. Při použití tloušťky vrstvy $400 \text{ } \mu\text{m}$ docházelo k tvorbě kuliček, což má vliv na drsnost a přesnost součástí a omezuje výrobu na použití menších vrstev (40 - $100 \text{ } \mu\text{m}$).

Xia et al. [6] se zabývali tvorbou dvou drah, konkrétně chováním roztavené lázně při změně vzdálenosti drah laseru. Bylo zjištěno, že při použití malé vzdálenosti drah laseru (40 a $50 \text{ } \mu\text{m}$) dojde ke vzniku vyššího návaru. Tento jev je způsoben působením příliš vysoké energie. Naopak při použití velké vzdálenosti drah laseru ($70 \mu\text{m}$) nedojde k roztavení obou sousedních drah a vzniká tak neroztavená oblast mezi drahami. Vynikajících výsledků bylo dosaženo při použití vzdálenosti drah laseru $60 \text{ } \mu\text{m}$.

Výběrem vhodných procesních parametrů se také zabývali Kempen et al. [7]. Byla vyrobena sada vzorků s různými procesními parametry, která vedla ke zjištění vhodných kombinací procesních parametrů. Výsledky byly zpracovány do grafů, které udávají rozmezí procesních parametrů, ve kterém dochází ke vzniku drah požadovaného tvaru a vlastností. Toto parametrické okno může pomoci při výběru procesních parametrů pro vlastní výrobu.

Poznatky z předchozích prací byly využity při tvorbě prutových struktur, kterými se zabývali Qiu et al. [8]. Konkrétně zkoumali vliv skenovací rychlosti a výkonu laseru na šířku prutů a jejich pórovitost. Bylo zjištěno, že při neměnné skenovací rychlosti ($7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) a proměnném výkonu laseru se šířka vyrobených prutů lineárně zvětšuje vlivem dodávané energie. Pórovitost u takto vyrobených prutů byla nejnižší u malého výkonu laseru (méně než 200 W) a při jeho zvětšování rostla až do hodnoty výkonu laseru 250 W , kde dosáhla maxima. Po dosažení této hodnoty dále klesala. Při použití neměnného výkonu laseru (400 W) a proměnné skenovací rychlosti nemají pruty tendenci se výrazně zvětšovat, ale všechny vyrobené pruty měly větší rozměr, než byl zvolen. Pórovitost prutů byla rozložena do Gaussovy křivky, přičemž nejvyšší hodnotu měla při skenovací rychlosti $4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Delroisse et al. [9] popsali vliv sklonu prutu na odvod tepla a porozitu. Prut vyrobený se sklonem 90° vykazoval malé množství porozity kvůli odvodu tepla plným materiálem z předchozích vrstev. Použitím sklonu $35,5^\circ$ byl odvod tepla v horní části prutu shodný s odvodem tepla u vertikálního prutu, takže porozita v této části byla nízká. Ve spodní části prutu byla zjištěna vysoká koncentrace porozity, protože odvod tepla byl především veden přes prášek, který slouží jako izolant.

Leary et al. [10] posuzovali vyrobiteľnosť a mechanické vlastnosti vybraných prutových struktur. Bylo zjištěno, že nelze vyrobit vodorovné pruty, které neměly žádnou podporu. Dále bylo provedeno měření objemové absorpce energie na vyrobených prutových strukturách, které prokázalo výrazný vliv použití prutů ve svislém směru. Únosnost byla zvýšena zhruba o 50 %. Tento článek poukazuje na možnost zvýšení mechanických parametrů použitím přídavných prutů.

Výrobní strategie objemového materiálu a prutových struktur jsou odlišné. U objemových dílů dochází k lepšímu odvodu tepla materiálem, ale při použití prutové struktury s malými průměry prutů dochází k odvodu tepla přes prášek. Proto nelze použít stejné procesní parametry pro objemový materiál na výrobu prutových struktur.

3.2 Cíle práce

Cílem bakalářské práce je nalezení vhodné kombinace procesních parametrů (výkon laseru, skenovací rychlost) pro výrobu prutů s rozměrovou přesností, nízkou drsností povrchu a porozitou. Jednotlivé cíle bakalářské práce:

- Studium dané problematiky
- Navržení procesních parametrů pro výrobu první sady vzorků
- Výroba první sady vzorků
- Vyhodnocení naměřených dat
- Navržení procesních parametrů pro výrobu druhé sady vzorků
- Výroba druhé sady vzorků
- Vyhodnocení naměřených dat

4 MATERIÁL A METODY

4

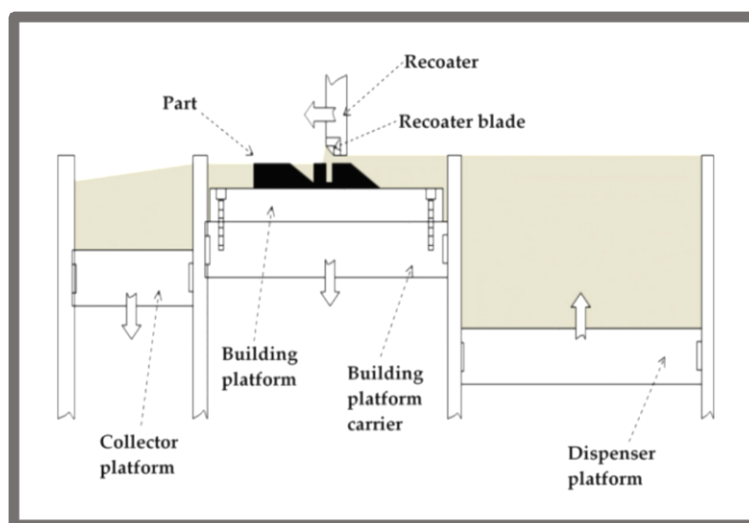
V této kapitole budou popsány zařízení a technologie se kterými bylo pracováno. Budou zde rozebrány metody vyhodnocování vyrobených vzorků a druhy testů, které byly použity v této bakalářské práci.

4.1 Použitá zařízení a technologie

4.1

4.1.1 Technologie SLM (Selective Laser Melting)

4.1.1



Obr. 4.1.1 Schématické znázornění procesu SLM [11]

Selective Laser Melting (SLM) je additivní technologie založená na procesu tavení jednotlivých vrstev prášku a vytvoření tak výsledné součásti. CAD model součásti je umístěn na základní desku, poté je rozdělen na jednotlivé vrstvy, které se budou vyrábět. Výroba je prováděna v inertní atmosféře, která omezuje vliv oxidace na součást. Vrstvy prášku (o tloušťce 20-100 μm) jsou nanášeny na základní desku, kde působením vysoce energetického laseru dochází k jeho roztavení a spojení materiálu do požadovaného tvaru součásti. Po dokončení vrstvy se tento proces opakuje, dokud není vyrobena kompletní součást (obr. 4.1.1). Tento typ výroby je efektivní pro výrobu tvarově složitých součástí, nebo prutových struktur. [11]

4.1.2 Zařízení SLM 280HL

4.1.2

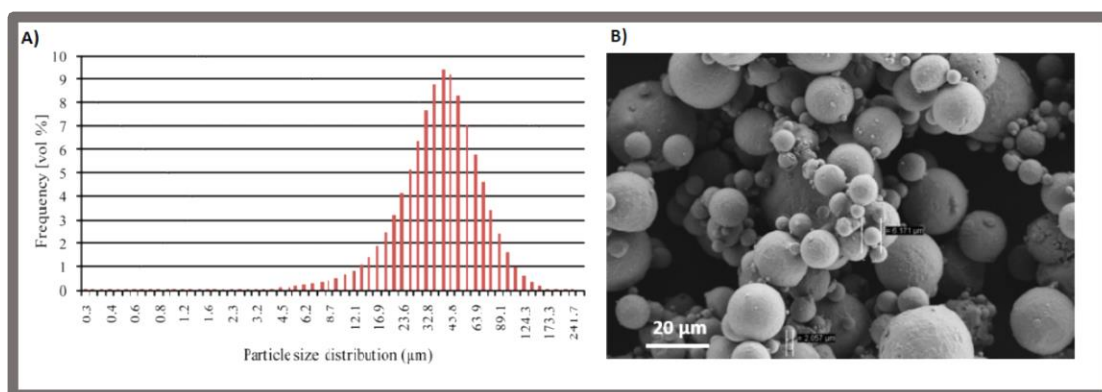
Pro výrobu vzorků bylo použito zařízení SLM 280HL (obr. 4.1.2). Je vybaveno laserem o výkonu 400 W a maximální skenovací rychlost dosahuje 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Velikost výrobního prostoru je 280 x 280 x 350 mm. Zařízení umožňuje nastavení tloušťky vrstvy od 20 μm do 100 μm . Výroba součástí probíhá v atmosféře dusíku, nebo argonu, který se používá především u materiálů citlivých na oxidaci. Proto zařízení umožňuje vyrábět součásti z materiálů, jako je hliník, titan, nebo nerezová ocel. [12]



Obr. 4.1.2 Zařízení SLM 280HL [12]

4.1.3 Práškový materiál AlSi10Mg

Práškový materiál AlSi10Mg má veliký vliv na vlastnosti vyráběných součástí. Zrna práškového materiálu by měla mít sférický tvar, aby bylo dosaženo dobré tekutosti a homogenního rozdělení vrstev. Výběr velikosti zrn prášku je ovlivněn požadovanou tloušťkou vrstvy a to tak, že průměrná velikost zrn práškového materiálu by neměla být větší, než je tloušťka vrstvy. Rozložení velikosti zrn (obr. 4.1.3 A) vytváří tvar Gaussovy křivky, přičemž průměrná velikost zrn je $40,7 \mu\text{m}$. Zobrazení práškového materiálu (obr. 4.1.3 B) pod mikroskopem poukazuje na rozdíl velikosti zrn. [13]



Obr. 4.1.3 A) Závislost četnosti na velikosti zrn, B) zobrazení práškového materiálu pod mikroskopem [13]

4.1.4 ATOS Triple Scan

4.1.4

Pro digitalizaci vyrobených vzorků byl použit 3D skener ATOS Triple Scan (obr. 4.1.4). Skenování je nedestruktivní metoda, která byla vybrána s ohledem na velikost a požadovanou přesnost měření vzorků. Na snímaný objekt je promítnuta proužková projekce, která se zaznamenává dvěma kamerami. Následně je dopočítávána 3D poloha povrchových bodů objektu. Pro větší přesnost skenování a nižší odrazivost skenovaných povrchů je vhodné na vzorky nanést vrstvu titanového prášku, kterým se povrch zmatní. Hlavní využití skenerů je při výstupní kontrole kvality a rozměrů součástí. [14]



Obr. 4.1.4 ATOS Triple Scan [15]

4.2 Metody vyhodnocování vzorků

4.2

4.2.1 Vyhodnocení rozměrové přesnosti a drsnosti povrchu

4.2.1

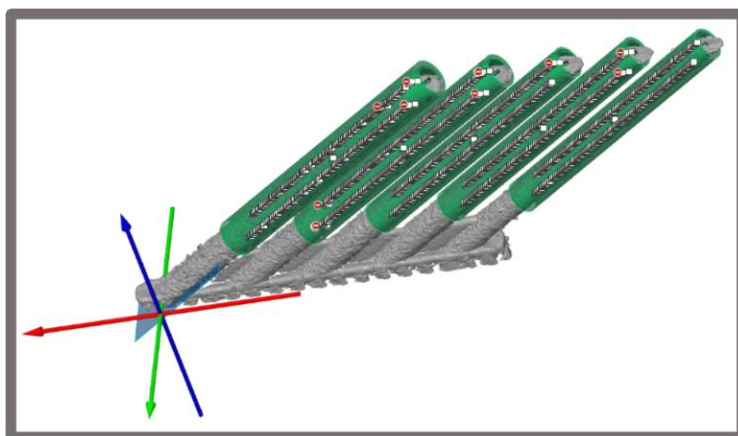
Na vyrobené vzorky byla nanесena vrstva titanového prášku pro zmatnění povrchu. Titanový prášek byl volen z důvodu vytváření malých vrstev (přibližně 5 μm), takže výrazně neovlivní povrch vzorků.

Následně byly vzorky skenovány 3D skenerem ATOS Triple Scan. Vzorky byly umístěny do svěráku, který se nacházel na rotačním stolku. Tento držák umožňuje náklon do stran a rotaci kolem své osy. Pro skenování vzorků byl nastaven náklon držáku 35° a 14 skenovacích poloh otáčením držáku kolem své osy v rozsahu 360°. Po automatickém skenování pruty nebyly dostatečně naskenovány, proto bylo dodatečně použito 6 manuálních skenování pro první test (12 manuálních skenování pro druhý test). Naskenované vzorky byly s vysokou přesností digitalizovány.

Po skenování byly vzorky pískovány korundem, aby byl zjištěn vliv pískování na drsnost povrchu. Poté byla na vzorky nanесena vrstva titanového prášku a proces skenování byl opakován stejným způsobem

Před i po pískování byly vzorky nafoceny mikroskopem Olympus pro zdokumentování povrchu a vlivu pískování.

Digitalizované vzorky byly porovnávány s CAD modelem pro získání rozměrové přesnosti a drsnosti povrchu v programu GOM Inspect. První test byl vyhodnocován po jednotlivých vzorcích (vzorek byl složen z pěti prutů). Druhý test byl vyhodnocován po prutech pro zvýšení přesnosti naměřených hodnot.



Obr. 4.2.1 Analýza prutů v programu GOM Inspect

Na pruty byl nastaven maximální vepsaný válec, Gaussův válec a minimální opsaný válec pro zjištění celkových rozměrů prutů. Pomocí příkazu single section byla vybrána oblast na bocích prutů, protože tato oblast byla dokonale naskenována a neobsahovala vysoký počet nalepených zrn prášku, jaký byl na spodní straně prutu. Na bocích bylo provedeno měření odchylek naskenovaného prutu od požadovaného rozměru (obr.4.2.1). Naměřené odchylky byly porovnávány s Gaussovým průměrem a byly použity ke zjištění drsnosti povrchu, která byla počítána podle vzorce (4.1).

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \text{ (}\mu\text{m)} \quad (4.1)$$

, kde y je odchylka od nominálního rozměru prutu (μm).

4.2.2 Zalévání a broušení vzorků

Zalévání a broušení vzorků bylo prováděno u prvního testu a ve druhém testu u prutů vyrobených jednou drahou.

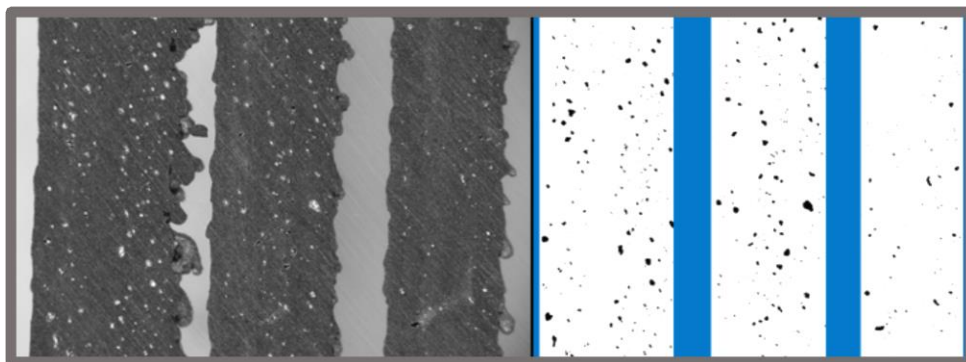
Po skenování byly vzorky zality tvrdnoucí hmotou EpoThin do nádob tvaru puků. Složení tvrdnoucí hmoty bylo namícháno tak, aby obsahovalo 65 % podílu pryskyřice a 35 % podílu tvrdidla. Zalité vzorky byly umístěny na 10 minut do vakuové komory, kde pomocí nízkého tlaku docházelo k vytlačování bublin vzduchu z hmoty. Následně vzorky tvrdly přibližně 9 hodin.

Vytvrdlé vzorky byly broušeny brusnými papíry se zrnitostí 120, 600, 1000 a 2000. Broušení bylo provedeno do půlky prutů. Výbrusy byly nafoceny na mikroskopu Olympus pro vyhodnocení porozity.

4.2.3 Metodika vyhodnocení porozity

4.2.3

Porozita u prvního testu byla vyhodnocována pomocí programu ImageJ (obr. 4.2.2). Snímky vzorků byly zmenšeny na 8-bitovou velikost. Následně byl vybrán vyhodnocovaný prut vždy tak, aby nebyla zahrnuta spodní a horní část prutu. U černých fotek s bílou porozitou musela být použita konverze barev. Následně bylo nastaveno filtrování černé barvy na hodnotu 100, které zaručovalo opakovatelnost měření. Výsledkem byl procentuální podíl černé a bílé barvy na snímku, což udává přibližnou porozitu v prutu. Tato porozita nebyla brána jako přesná, ale byla použita při vyhodnocování prvního testu.



Obr. 4.2.2 Měření porozity v programu ImageJ

Porozita prutů ve druhém testu byla vyhodnocována použitím metody μ CT (micro-computed tomography). Toto vyhodnocení vedlo k přesným hodnotám porozity.

4.3 Návrh testů pro zjištění vlivu procesních parametrů na pruty

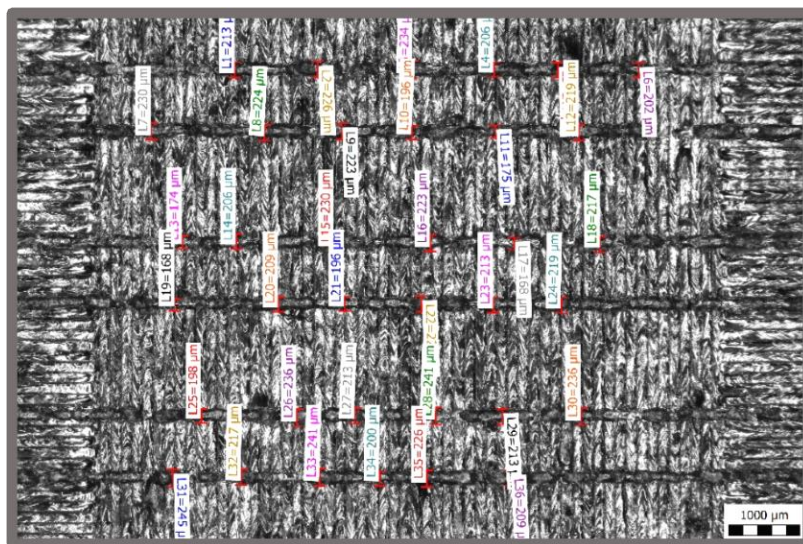
4.3

4.3.1 Test šířky jednotlivých návarů

4.3.1

Cílem testu jednotlivých návarů bylo získat šířku dráhy vytvořenou kombinací různých procesních parametrů a na jejím základě vybrat sady procesních parametrů pro první test.

Základem pro návrh hlavních dvou testů bylo orientační měření šířek návarů. Byly vyrobeny vzorky návarů použitím různé kombinace výkonu laseru a skenovací rychlosti. Vyrobené vzorky byly nafoceny pod mikroskopem Olympus. Snímky byly použity pro orientační měření šířek návarů. Celkem bylo naměřeno šest hodnot v každém směru laseru (obr. 4.3.1), protože jeden směr mohl být ovlivněn dýmem vzniklým při tavení materiálu. Výroba tohoto testu a měření šířek návarů nebylo součástí bakalářské práce.



Obr. 4.3.1 Měření šířek návarů

Naměřené šířky návarů byla zprůměrovány. Dále byla pro každý vzorek počítána objemová energie podle vzorce (4.2). Tyto dva parametry sloužily jako základ pro navržení prvního testu.

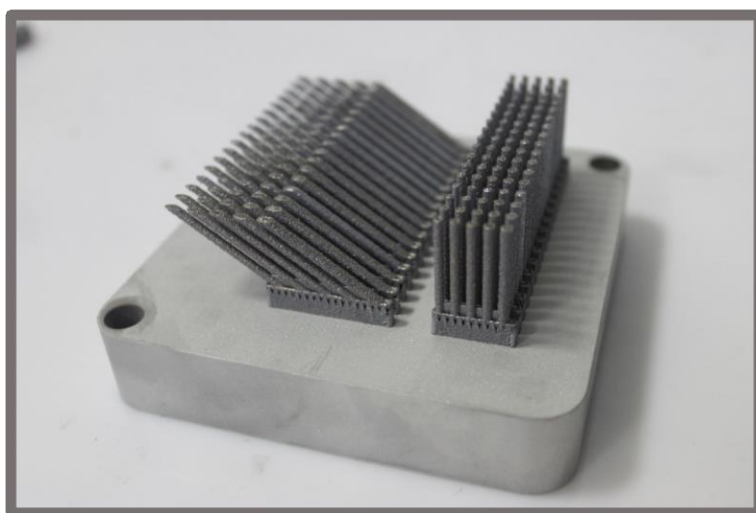
$$E = \frac{P}{v \cdot H \cdot t} \text{ (J} \cdot \text{mm}^{-3}\text{)} \quad (4.2)$$

, kde P je výkon laseru (W), v je skenovací rychlost ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$), H je vzdálenost drah laseru (mm) počítána z průměrné šířky návaru pro 50 % překryv sousedních drah, t je tloušťka vrstvy (mm), která byla nastavena na 0,05 mm.

4.3.2 První test prutů se sklonem 90° a 35,26°

Cílem prvního testu bylo ověřit správnost zvolené šířky dráhy v testu jednotlivých návarů. Ověřit vliv rozdílného odvodu tepla u vertikálních a skloněných prutů. Ověřit vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na rozměrovou přesnost, drsnost povrchu a porozitu prutů. Následně získat okna procesních parametrů pro dosažení nejlepší drsnosti povrchu a porozity.

Parametry prvního testu byly vybrány tak, aby bylo možné sledovat rozměrovou přesnost, drsnost povrchu a porozitu vertikálních a skloněných prutů s použitím různé vzdálenosti drah laseru. Byl vybrán sklon prutu 90° a $35,26^\circ$. Sklon $35,26^\circ$ je typický pro kubickou prostorově středěnou mřížku (BCC). Sklon prutu 90° byl vybrán z důvodu porovnání rozdílného odvodu tepla, který byl popsán autory Delroisse et al. [9]. Dále byl nastaven přesah drah laseru na 50 %, 25 %, 0 %, -25 %, -50 %, pro ověření správného výběru šířky drah a zjištění vlivu působící energie na prut. Vliv přesahu drah laseru byl popsán autory Xia et al. [6]. Celkem bylo navrženo 17 sad procesních parametrů, ze kterých bylo vyrobeno 170 prutů. Vzorky byly umístěny na základní desku o rozměrech 100 x 100 x 10 mm (obr. 4.3.2).



Obr. 4.3.2 První test prutů se sklonem 90° a $35,26^\circ$

Pro výrobu prutů byla navržena nová strategie. Strategie je tvořena jednotlivými kruhovými (pro sklon prutu 90°), nebo eliptickými (pro sklon prutu $35,26^\circ$) drahami laseru (obr. 4.3.3). Tato strategie umožní lépe porovnat vhodnost překryvu drah laseru.



Obr. 4.3.3 Použitá strategie pro tvorbu prutů

Výroba vzorků probíhala v inertoní atmosféře dusíku s hladinou kyslíku maximálně 0,2 %, teplota základní desky byla nastavena na 120° , tlak v komoře byl udržován na 12 Mbar.

Vyrobené vzorky byly skenovány pro zjištění rozměrové přesnosti a drsnosti povrchu. Také byly pískovány pro zjištění vlivu pískování na drsnost povrchu. Dále byly vzorky zality a vybroušeny. Po vybroušení byly nafoceny mikroskopem a byla zjištěna orientační porozita u každého prutu.

4.3.3 Druhý test pro zpřesnění výsledků

Cílem druhého testu bylo zpřesnit vybranou oblast procesních parametrů. Pro tyto účely byla u prutů měřena rozměrová přesnost, drsnost povrchu a porozita.

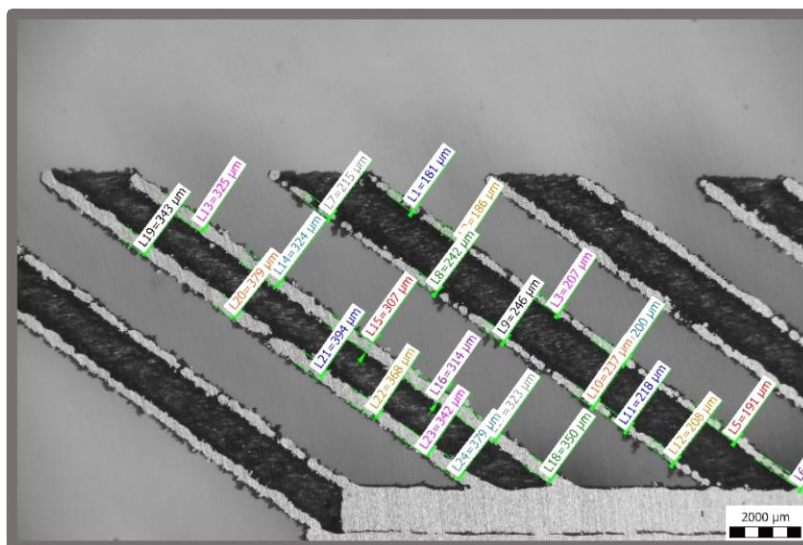
Na základě prvního testu byly navrženy sady procesních parametrů pro zpřesnění výsledků se zaměřením na vybranou oblast z prvního testu (obr. 5.2.8). Sklon prutů byl zvolen $35,26^\circ$. Překryv drah laseru byl nastaven na 25 %, protože tato hodnota vedla k nejlepším výsledkům. S tímto nastavením bylo vyrobeno 40 prutů při použití různé kombinace výkonu laseru a skenovací rychlosti (PŘÍLOHA I). Výrobní strategie prutů byla stejná jako v prvním testu. Dále bylo vyrobeno 20 prutů, které byly tvořeny jednou drahou (PŘÍLOHA II). Geometrie těchto prutů byla navržena tak, aby bylo možné pruty vybrousit na osu a zjistit tak šířku návaru. Jednotlivé vzorky byly složeny z pěti prutů. Vzorky byly umístěny na základní desku o rozměrech 100 x 100 x 10 mm (obr. 4.3.4).



Obr. 4.3.4 Druhý test pro zpřesnění výsledků

Vzorky vyrobené jednou drahou byly vyhodnocovány pro zjištění šířky návaru. Vzorky byly zality a po vytvrzení broušeny. Následně byly nafoceny mikroskopem a ze snímků byla měřena šířka návarů.

Šířka stěn prutů byla měřena ze snímků nastavením správného měřítka. Bylo měřeno vždy 6 hodnot ve spodní a horní straně prutu. Byl zvolen větší počet měření, aby se předcházelo případným chybám ve výběru místa, kde bylo měření prováděno (obr. 4.3.5).



Obr. 4.3.5 Měření šířky stěn prutů

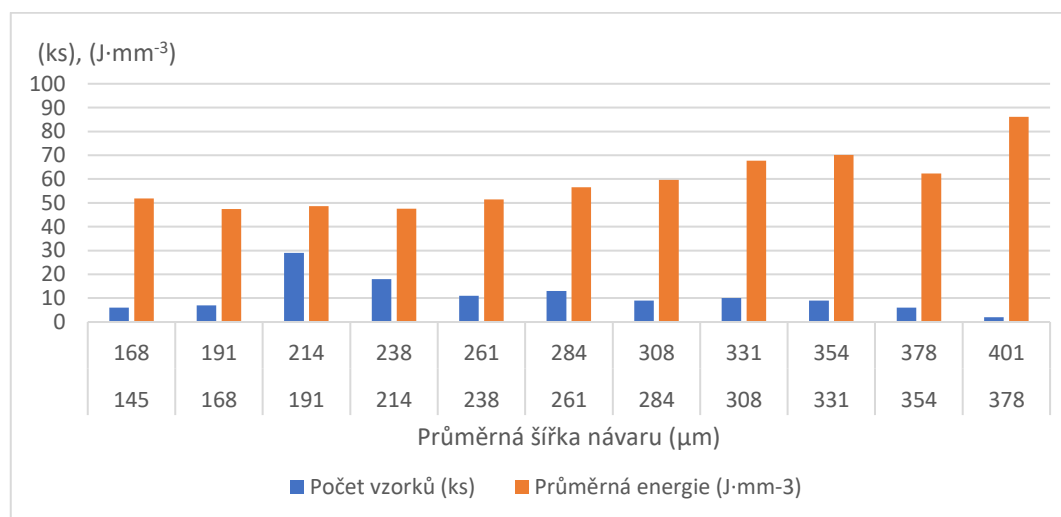
Vzorky vyrobené z různých sad procesních parametrů byly skenovány 3D skenerem, aby byly zjištěny skutečné rozměry a drsnost povrchu prutů. Následně byly pruty pískovány a bylo provedeno skenování a vyhodnocení vlivu pískování na drsnost povrchu. Poté byly vzorky analyzovány použitím metody μ CT pro zjištění přesné hodnoty porozity.

5 VÝSLEDKY

5.1 Vyhodnocení testu jednotlivých návarů

Tento test byl použit jako základ pro navržení vhodných procesních parametrů prvního testu. Byla měřena šířka dráhy a počítána energie působící na dráhu. Z těchto hodnot byly navrženy sady procesních parametrů pro první test.

Výběr procesních parametrů pro první test byl proveden na základě šířky dráhy a energie laseru. Získané výsledky šířky návaru byly rozděleny do 11 tříd (obr 5.1.1), tím došlo k roztřizení velkého množství výsledků do jedenácti nejběžněji vyskytujících se zástupců. V každé třídě byla počítána průměrná objemová energie. Tato průměrná energie byla řídicí hodnotou při výběru každé sady procesních parametrů. Vždy byla vybrána sada procesních parametrů, která svojí objemovou energií v dané třídě nejvíce odpovídala průměrné objemové energii třídy. Tímto způsobem bylo vybráno 11 sad procesních parametrů.



Obr. 5.1.1 Histogram pro výběr procesních parametrů pro první test

Navržená sada byla rozšířena o doporučené parametry výrobce zařízení (výkon laseru 350 W a skenovací rychlost 500, 1000 a 2000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$). Dále byla u zvolených procesních parametrů (výkon laseru 350 W, skenovací rychlost 500 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a 1000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) a vzorku z rešerše (výkon laseru 200 W, skenovací rychlost 1400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) vybrána odpovídající sada procesních parametrů podle vypočítané objemové energie.

Celkem bylo vybráno 17 sad procesních parametrů (tab. 5.1.1).

Tab. 5.1.1 Vyhrané procesní parametry pro první test

Číslo vzorku	Výkon laseru (W)	Skenovací rychlost ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Průměrná šířka návaru (μm)
BP-AI10-CRW-01-01	225	1200	145
BP-AI10-CRW-01-11	275	1400	149
BP-AI10-CRW-01-21	275	1000	235
BP-AI10-CRW-01-31	275	400	380
BP-AI10-CRW-01-41	300	1400	183
BP-AI10-CRW-01-51	300	1300	193
BP-AI10-CRW-01-61	325	1700	168
BP-AI10-CRW-01-71	325	1000	258
BP-AI10-CRW-01-81	325	900	263
BP-AI10-CRW-01-91	325	600	316
BP-AI10-CRW-01-101	325	500	334
BP-AI10-CRW-01-111	350	600	336
BP-AI10-CRW-01-121	400	900	301
BP-AI10-CRW-01-131	400	800	358
BP-AI10-CRW-01-141	350	500	358
BP-AI10-CRW-01-151	350	1000	261
BP-AI10-CRW-01-161	350	2000	180

5.2 Vyhodnocení vyrobených testů

5.2

5.2.1 Vyhodnocení použitých překryvů drah u prvního testu

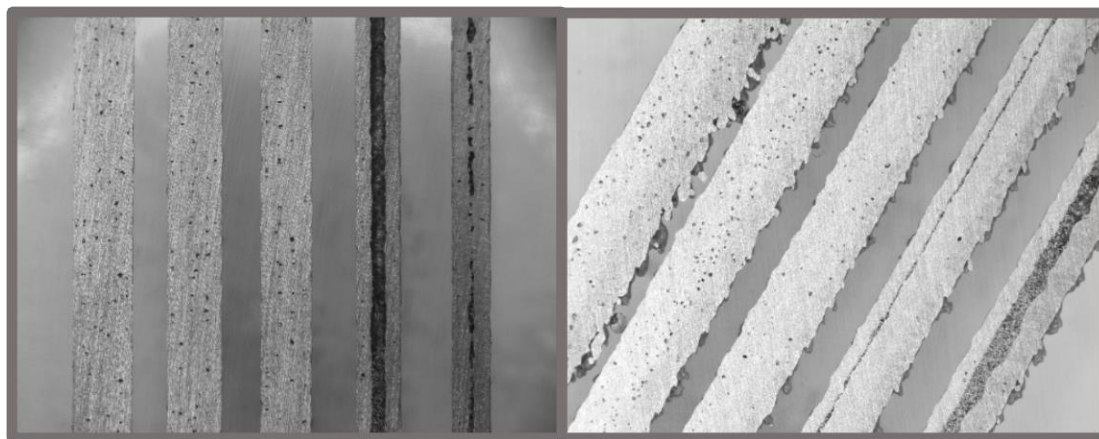
5.2.1

Na základě rozdílného odvodu tepla u vertikálních a skloněných prutů, který byl popsán autory Delroisse et al. [9], byly pruty vizuálně kontrolovány.

Pruty vyrobené se sklonem 90° u prvního testu vykazovali neroztavená místa mezi drahami s překryvem -25 %, -50 %. U prutů s překryvem $35,26^\circ$ bylo vidět ve většině vzorků neroztavené místo v horní části prutu (obr. 5.2.1).

Tento fakt poukazuje na rozdílný odvod tepla prutem, kde spodní část prutu je déle udržována na vysoké teplotě kvůli izolačním schopnostem práškového materiálu.

Z tohoto důvodu nebyly pruty vyrobené s překryvem -25 % a -50 % vyhodnocovány.



Obr. 5.2.1 Vliv rozdílného odvodu tepla. Překryv u prutů zleva: 50 %, 25 %, 0 %, -25 %, -50 %

5.2.2 Vyhodnocení šířky dráhy laseru

Bylo ověřováno, jestli vybraná šířka dráhy na základě tetu jednotlivých drah odpovídala šířkám drah u vyrobených prutů v prvním a druhém testu.

Šířka dráhy, která byla naměřena při testu jednotlivých návarů se ukázala poměrně přesná pro pruty se sklonem 90° . U prutů se sklonem $35,26^\circ$ vliv rozdílného odvodu tepla způsobil, že spodní část prutu byla roztavená, ale v horní části vznikla neroztavená oblast.

Naměřené hodnoty šířky dráhy u prutů se sklonem $35,26^\circ$ ve druhém testu byly průměrně o 17 % větší než zvolená šířka dráhy na základě výsledků z testu jednotlivých drah. Šířka dráhy v horní části prutu byla průměrně o 10 % menší než ve spodní části prutu.

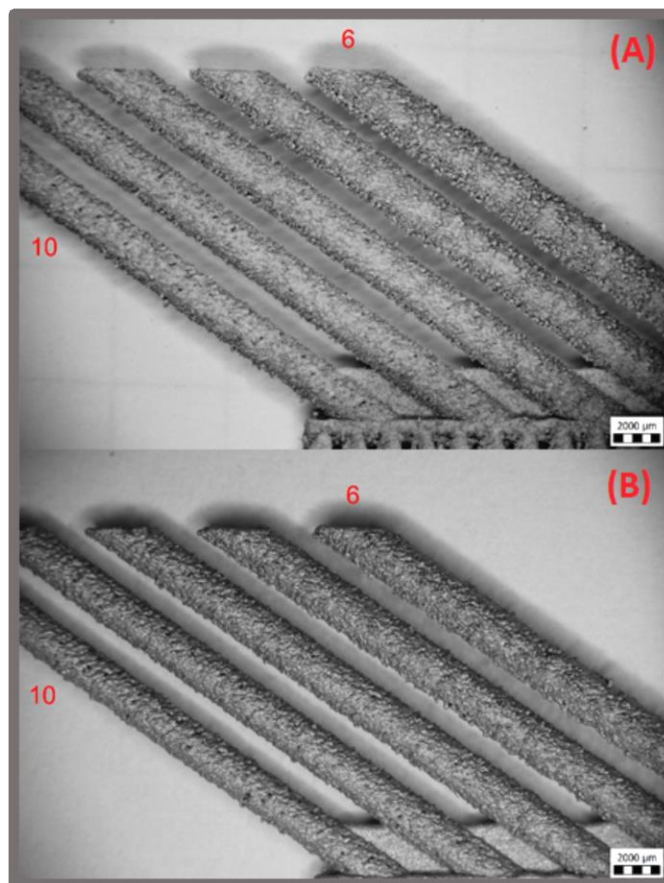
Naměřené výsledky poukazují na to, že šířky drah naměřené v testu jednotlivých drah lze použít u kolmých prutů. Šikmé pruty však vykazují rozdílný odvod tepla, a proto je u nich šířka dráhy rozdílná.

5.2.3 Vyhodnocení vlivu pískování na drsnost povrchu prutů

Vliv pískování byl vyhodnocován pro možnost případného použití na součástech, kde je potřebné dosáhnout nižší drsnosti povrchu, než je drsnost povrchu po výrobě.

Vyhodnocení drsnosti povrchu prvního testu ukázalo, že u třech čtvrtin prutů byla drsnost povrchu zlepšena průměrně o 24 %. U zbylých prutů bylo zjištěno zhoršení drsnosti povrchu, což bylo pravděpodobně způsobeno nepřesností v ustavení a ve vyhodnocování vzorků v programu GOM Inspect.

Drsnost povrchu u druhého testu po pískování byla zlepšena průměrně o 32 %. Vlivem přesnější metody měření nebylo zjištěno žádné zhoršení drsnosti povrchu prutu. Tím byla ověřena předchozí domněnka.



Obr. 5.2.2 (A) pruty před pískováním; (B) pruty po pískování

Pískování je povrchová úprava, která vede ke snížení drsnosti povrchu. Bylo prokázáno, že výrazně sníží drsnost povrchu prutů, což je způsobeno především odstranění částečně roztavených zrn práškového materiálu přilepených na stranách prutů (obr. 5.2.2). Nevýhodou pískování je nemožnost pískovat rozsáhlé prutové struktury.

5.2.4 Vyhodnocení velikostí prutů

5.2.4

Z rešerše vyplývá, že použitím nevhodných kombinací výkonu laseru a skenovací rychlosti dochází k zvětšování, nebo zmenšování šířky dráhy laseru. Na základě tohoto zjištění byl porovnáván průměr vyrobených prutů s nominálním průměrem.

Vyhodnocení velikosti prutů probíhalo na vyrobených vzorcích před pískováním. Ve vyhodnocení bylo počítáno s průměrem Gaussova válce naměřeného u prutů. Průměrné hodnoty odchylky průměru Gaussova válce od nominálního průměru v μm jsou uvedeny v tabulce 5.2.1. Záporné hodnoty udávají menší průměr prutů, kladné hodnoty větší průměr prutů, než byl nominální průměr.

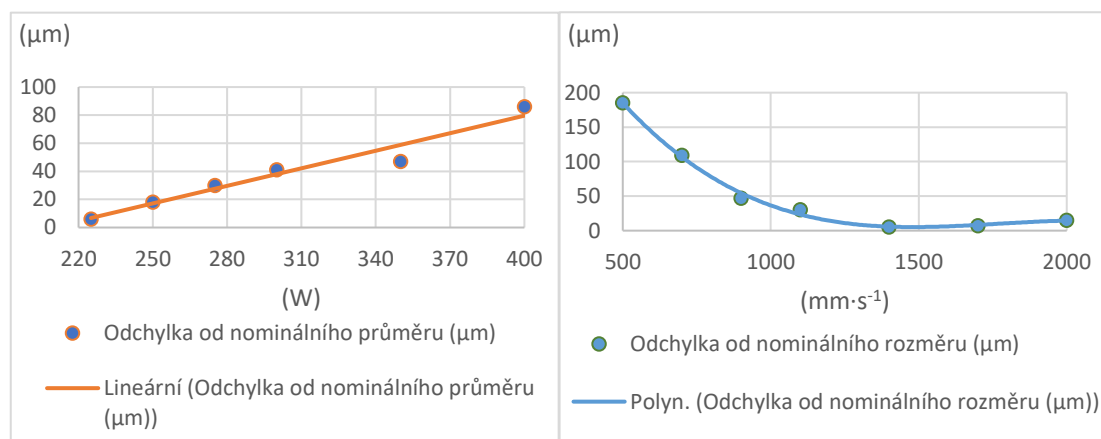
Tab. 5.2.1 Odchylky Gaussova průměru od nominálního průměru v μm

První test				
Překryv		50 %	25 %	0 %
Sklon prutů	90°	-135	-140	-128
	35,26°	18	-28	-20
Druhý test				
Překryv		25 %		
Sklon prutů	35,26°	46		

Naměřené hodnoty prvního testu poukazují na větší odchylku Gaussova průměru od nominálního průměru u prutů se sklonem 90°. Tyto pruty vykazovaly zmenšení průměru o 6,7 %. Nejmenší odchylky od požadovaného průměru bylo dosaženo použitím překryvu 0 % (-128 μm) a největší odchylky bylo dosaženo použitím překryvu 25 % (-140 μm).

V prvním testu pruty se sklonem 35,26° dosahovaly rozdílu průměru o 1,8 %. Pro pruty s překryvem 50 % bylo zjištěno průměrné zvětšení prutu o 18 μm . Nejvýraznějšího zmenšení prutů bylo dosaženo použitím překryvu 25 %, kde byl průměr zmenšen o 28 μm .

Ve druhém testu, který byl vyhodnocován přesněji bylo zjištěno, že při použití sklonu prutů 35,26° a překryvu 25 % byl průměr prutů zvětšen o 46 μm .



Obr. 5.2.3 Vlevo: závislost odchylky od nominálního průměru na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti 900 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Vpravo: závislost odchylky od nominálního průměru na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W.

Výsledky druhého testu byly porovnávány s výsledky získanými z rešerše. Pro porovnání byly vytvořeny grafy (obr. 5.2.3), které popisují závislost chování průměru prutu na výkonu laseru a skenovací rychlosti. Byla zjištěna shoda s výsledky ve vědeckém článku autorů Qiu et al. [8].

Při nastavení skenovací rychlosti na $900 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a zvyšováním výkonu laseru se zvětšovala šířka prutů (obr. 5.2.3 vlevo). Při nastavení výkonu laseru na 350 W a zvyšováním skenovací rychlosti klesala šířka prutů (obr. 5.2.3 vpravo).

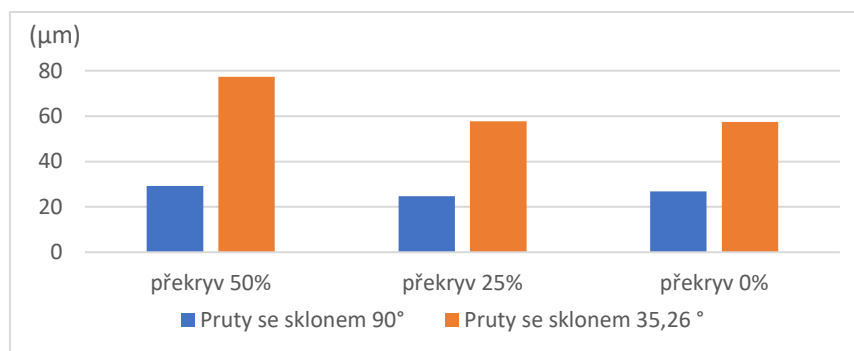
Naměřené hodnoty ukázaly, že průměry prutů se sklonem 90° nedosahují nominálního průměru a významně se od něj odchylují. Tento jev je způsoben odvodem tepla směrem do spodních částí prutu. Prut chladnul rychleji, a to způsobilo zmenšení jeho průměru. Pro vyrobení přesného rozměru by bylo potřeba zavést korekci průměru prutu. Pruty se sklonem $35,26^\circ$ byly vyrobeny poměrně přesně.

5.2.5 Vyhodnocení drsnosti povrchu prutů

5.2.5

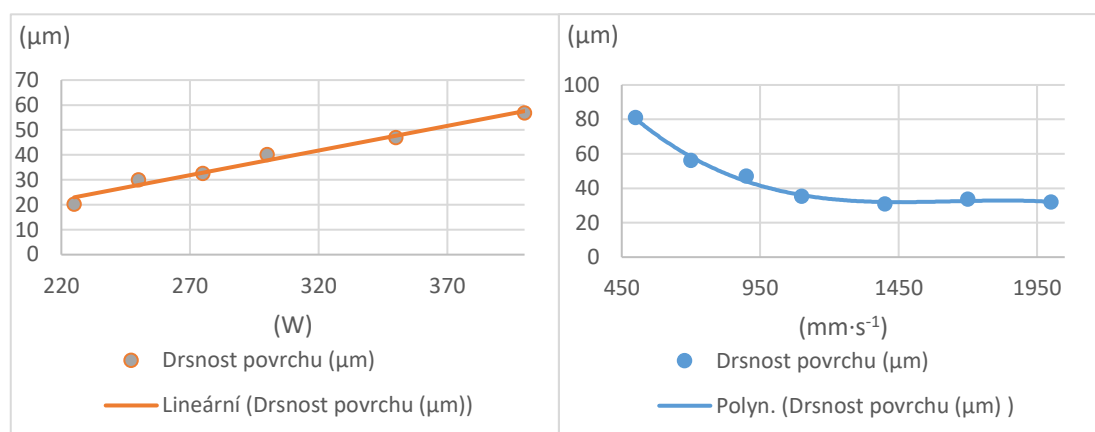
Na vyrobených prutech bylo provedeno měření drsnosti povrchu pro zjištění vlivu výkonu laseru a skenovací rychlosti. Drsnost povrchu snižuje funkční průměr prutů, proto je důležité se jí zabývat.

V prvním testu byla zjištěna rozdílná drsnost povrchu u prutů se sklonem 90° a $35,26^\circ$. Výsledky měření prokázaly, že pruty se sklonem $35,26^\circ$ vykazují větší drsnost povrchu (obr. 5.2.4).



Obr. 5.2.4 Rozdíl drsnosti povrchu u prutů s překryvem 90° a $35,26^\circ$

Z výsledků druhého testu byly vytvořeny závislosti drsnosti povrchu na výkonu laseru a skenovací rychlosti. Bylo zjištěno, že drsnost povrchu roste se zvyšujícím se výkonem laseru (obr. 5.2.5 vlevo). Naopak se zvětšující se skenovací rychlostí drsnost povrchu prutů klesala (obr. 5.2.5 vpravo).



Obr. 5.2.5 Vlevo: závislost drsnosti povrchu prutů na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti 900 mm·s⁻¹. Vpravo: závislost drsnosti povrchu prutů na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W

Podobné charakteristiky byly naměřeny při zjišťování vlivu výkonu laseru a skenovací rychlosti na rozměru prutu. Se zvyšujícím se výkonem laseru a snižující se skenovací rychlostí stoupá množství energie působící na prut, což způsobuje zhoršení drsnosti povrchu. Větší množství energie způsobuje částečné roztavení většího počtu částic práškového materiálu kolem taveniny a způsobuje jeho přilepení na okraje prutu, což zvyšuje výslednou drsnost povrchu.

5.2.6 Vyhodnocení porozity vyrobených prutů

Porozita je jedním z hlavních faktorů, který vede ke vzniku deformace uvnitř materiálu, proto je nutné, aby vyrobené pruty měly nejmenší porozitu. V prvním testu byla porozita měřena z vybroušených vzorků, což vedlo ke zjištění pouze odhadní hodnoty porozity v prutu. Ve druhém testu byla na vyhodnocení porozity použita metoda μ CT, což vedlo k naměření správné hodnoty porozity v prutech.

Průměrné hodnoty porozity jsou zobrazeny v tabulce 5.2.2.

Tab. 5.2.2 Průměrné hodnoty porozity v %

První test				
Překryv		50 %	25 %	0 %
Sklon prutů	90°	0,93	0,96	1,47
	35,26°	1,31	1,08	1,55
Druhý test				
Překryv		25 %		
Sklon prutů	35,26°	0,68		

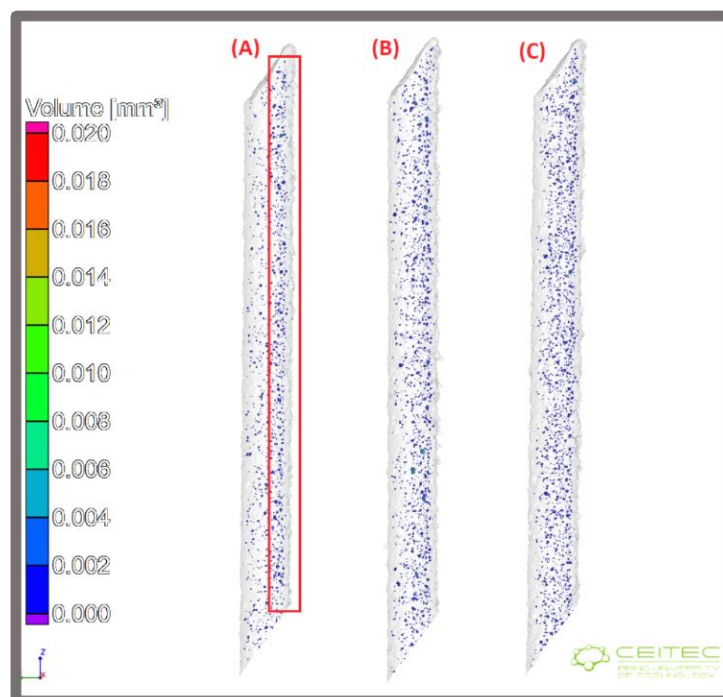
Z výsledků prvního testu je patrné, že pruty se sklonem prutů 90° mají menší porozitu. Přičemž nejmenší hodnoty porozity bylo dosaženo použitím překryvu 50 %. Největší obsah porozity měly pruty vyrobené s překryvem 0 %. Pruty se sklonem $35,26^\circ$ dosahovaly nejmenší porozity s překryvem 25 % a nejvyšší porozita byla naměřena u prutů s překryvem 0 %. Pruty vyrobené v druhém testu měly výrazně menší obsah vnitřní porozity, což potvrzuje správný výběr oblasti pro výrobu druhého testu.

Rozdíl v použité metodě měření porozity je zobrazen v tabulce 5.2.3. U prvního testu byla porozita měřena z výbrusů pomocí programu ImageJ. Ve druhém testu bylo použito přesnější metody μ CT. Z výsledků prutů vyrobených stejnými procesními parametry bylo zjištěno, že ve dvou případech (výkon laseru 225 W a 400 W) byla naměřená porozita výrazně odlišná. Z tohoto důvodu bylo použití přesnější metody pro zjištění porozity opodstatněné. Ve zbývajících třech případech nebyla porozita příliš rozdílná, což potvrdilo vhodnost výběru procesních parametrů na základě měření porozity z výbrusů.

Tab. 5.2.3 Rozdíl porozity prvního a druhého testu, porozita je v %

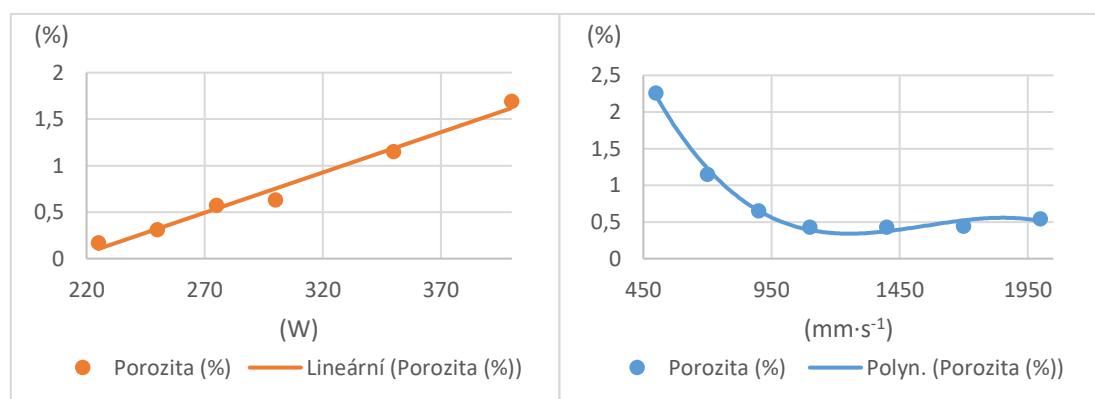
Test		První	Druhý
Výkon laseru (W)	225	0,07	0,9
Skenovací rychlost ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	1200		
Výkon laseru (W)	275	0,43	0,36
Skenovací rychlost ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	1400		
Výkon laseru (W)	300	0,29	0,41
Skenovací rychlost ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	1400		
Výkon laseru (W)	350	2,18	2,26
Skenovací rychlost ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	500		
Výkon laseru (W)	400	2,59	0,81
Skenovací rychlost ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	900		

Ze snímků z vyhodnocování porozity metodou μ CT je patrné, že porozita je soustředěna na spodní straně prutů se sklonem $35,26^\circ$ (obr. 5.2.6 červená oblast). Tento fakt koresponduje s výsledky rešerše zjištěnými autory Delroisse et al. [9]. V horní části prutu probíhal odvod tepla směrem do předchozího materiálu. Ve spodní části prutu probíhal odvod tepla přes práškový materiál (izolant), takže spodní část byla držena na vyšší teplotě delší dobu, a to mělo vliv na vznik porozity.



Obr. 5.2.6 Vyhodnocení porozity metodou μ CT, (A) výkon laseru 250 W, skenovací rychlost $700 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (B) výkon laseru 300 W, skenovací rychlost $900 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (C) výkon laseru 350 W, skenovací rychlost $1100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Dále byly vytvořeny závislosti porozity na výkonu laseru a skenovací rychlosti (obr. 5.2.7). Ze závislostí vyplývá, že se zvyšujícím se výkonem laseru docházelo ke zvyšování porozity. Se zvyšující se skenovací rychlostí klesala porozita. Průběhy těchto závislostí odpovídají průběhům drsnosti povrchu a průměru prutu.



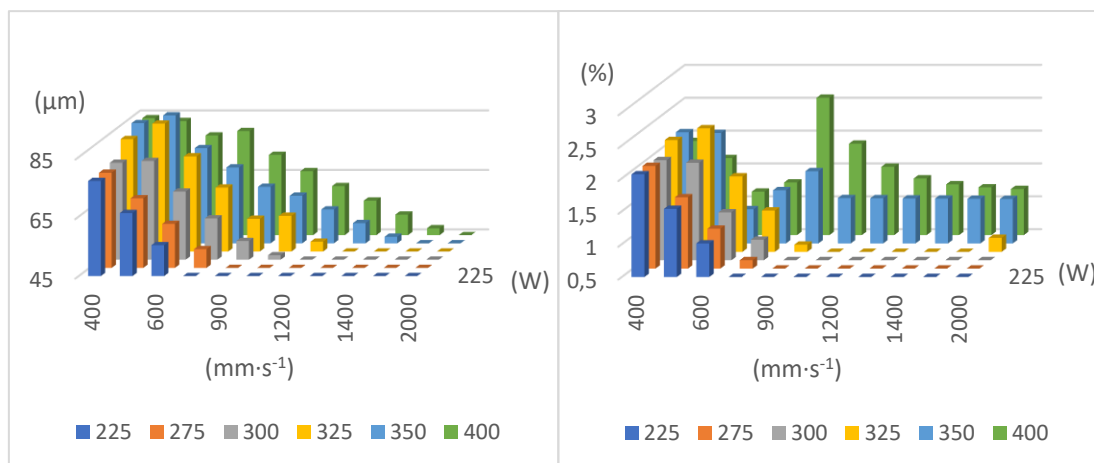
Obr. 5.2.7 Vlevo: závislost porozity na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti $700 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Vpravo: závislost porozity na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W

Naměřené závislosti porozity na výkonu laseru a skenovací rychlosti neodpovídají předpokladům z rešerše. Závislosti mají opačný průběh, než bylo zjištěno ve vědeckém článku od autorů Qiu et al. [8].

5.2.7 Okna vhodných procesních parametrů

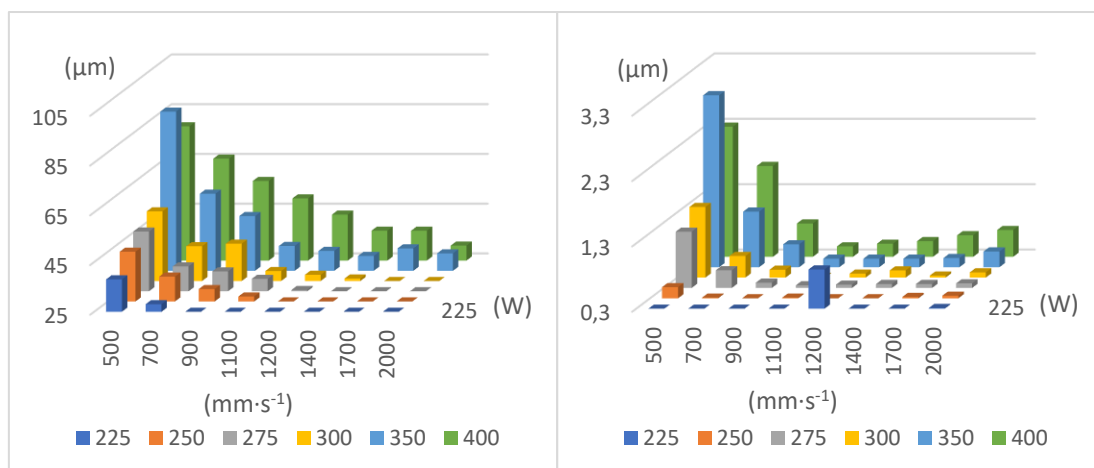
5.2.7

Výsledky měření byly použity pro tvorbu přehledových grafů. Při návrhu druhého testu byly použity grafy (obr. 5.2.8) pro navržení sad procesních parametrů.



Obr. 5.2.8 Výsledky prvního testu. Vlevo: okno procesních parametrů pro drsnost povrchu prutů, vpravo: okno procesních parametrů pro porozitu

Pro pruty se sklonem $35,26^\circ$ a překryvem 25 % z prvního testu byla vytvořena okna procesních parametrů. Nejvyšší hodnota drsnosti povrchu byla nastavena na $45\text{ }\mu\text{m}$ a nejvyšší hodnota porozity na 0,5 %. Kombinace procesních parametrů, které nesplňovaly tyto podmínky zůstávají na grafech vystouplé (obr. 5.2.8).



Obr. 5.2.9 Výsledky druhého testu. Vlevo: okno procesních parametrů pro drsnost povrchu prutů, vpravo: okno procesních parametrů pro porozitu

Pro druhý test byla vytvořena stejná okna procesních parametrů. Maximální hodnota drsnosti povrchu byla nastavena na $25\text{ }\mu\text{m}$ a nejvyšší hodnota porozity byla nastavena na 0,3 %. Kombinace procesních parametrů, které tyto podmínky nesplňují zůstaly vystouplé (obr. 5.2.9)

Tyto okna procesních parametrů zobrazují rozmezí výkonu laseru a skenovací rychlosti při kterých bylo dosaženo nejlepších výsledků drsnosti povrchu a porozity. Z výsledků je patrné, že druhý test oblast vhodných procesních parametrů zpřesnil. Výsledkem je oblast výkonu laseru (225 až 275 W) a skenovací rychlosti (1400 až 2000 mm·s⁻¹) ve které bylo dosaženo nejlepších výsledků.

Díky aditivní technologii jsme schopni vyrábět tvarově složité součásti jako jsou prutové struktury. Pro výrobu prutové struktury je důležité zvolit vhodnou kombinaci procesních parametrů, která se liší pro objemové a tenkostěnné díly (např. strukturovaný materiál). Procesní parametry výrazně ovlivňuje skutečný průměr, drsnost povrchu a vnitřní porozitu prutů. Proto je důležité zabývat se výzkumem vlivu procesních parametrů na tyto vlastnosti. Tato práce je zaměřena na analýzu vlivu procesních parametrů na skutečný průměr, drsnost povrchu a porozitu prutů.

Pro návrh prvního testu byly použity šířky návarů testu jednotlivých drah. První test byl navržen pro srovnání prutů se klonem 90° a $35,26^\circ$. Pro zjištění vlivu odvodu tepla byl navržen překryv drah 50 %, 25 %, 0 %, -25 %, -50 %. Byla nastavena speciální geometrie drah laseru.

Na vyrobených prutech byl hodnocen vliv vzdálenosti drah laseru, výsledné hodnoty korespondují s vědeckým článkem z rešerše Xia et al. [6], přičemž nejvhodnější vzdálenosti laseru bylo dosaženo použitím překryvu 25 % a 0 %.

Závislost skutečné velikosti prutů na výkonu laseru a skenovací rychlosti prokázala shodné hodnoty s vědeckými články [4,5,7,8]. Průměry prutů byly zvětšovány s rostoucím výkonem laseru a klesající skenovací rychlostí. Z těchto výsledků je patrné, že větší množství energie působící na prut vede ke zvyšování průměrů prutů.

Závislost drsnosti povrchu prutů na výkonu laseru a skenovací rychlosti měla podobné charakteristiky jako u skutečné velikosti prutů. Se zvyšujícím se výkonem laseru a snižující skenovací rychlostí se zvyšovala drsnost povrchu. Velký rozdíl v drsnosti prutů byl zaznamenán mezi pruty se sklonem 90° a $35,26^\circ$. Rozdílný odvod tepla způsobil u šikmých prutů částečné roztavení okolních částic práškového materiálu, které se lepily na okraj prutu a tím zvyšovaly drsnost povrchu.

Závislost porozity na výkonu laseru a skenovací rychlosti vedly ke zjištění rozdílných výsledků, než byly uvedeno autory Qiu et al. [8]. Porozita rostla se zvyšujícím se výkonem laseru a snižující skenovací rychlostí. Působení větší energie laseru na pruty mohlo udržovat pruty na vyšší teplotě delší dobu, takže byl materiál kompletně roztaven a porozita vytlačena směrem nahoru. Ve spodní části skloněných prutů byla zjištěna zvýšená koncentrace porozity, což odpovídá předpokladům autorů Delroisse et al. [9].

Nejvíce vyhovující kombinace procesních parametrů byly zaznamenány do grafů závislostí výkonu laseru na skenovací rychlosti pro vykreslení mapy procesních parametrů. Tyto oblasti by bylo potřeba podrobit dalšímu výzkumu. Provést testy mechanických vlastností (tahové zkoušky), vyrobit z nich prutové struktury a dále se jimi zabývat.

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na zjištění vlivu výkonu laseru, skenovací rychlosti a vzdálenosti drah laseru na vlastnosti prutů jako jsou skutečný rozměr, drsnost povrchu a porozita. Výstupem je okno procesních parametrů, ve kterém bylo dosaženo nejlepších vlastností prutů.

Výsledky testu jednotlivých drah sloužily jako základ pro výběr perspektivních procesních parametrů, které byly použity v prvním testu. V testu jednotlivých drah byla měřena šířka dráhy ze snímků pořízených na mikroskopu Olympus.

V prvním testu byl vyhodnocován vliv pískování korundem na drsnost povrchu prutů. Vzorky byly skenovány přístrojem ATOS Triple Scan. Dále byly vzorky vyhodnocovány v programu GOM Inspect, pro zjištění skutečného průměru a drsnosti povrchu prutů. Následně byly vzorky zality a broušeny na osu prutů. Vzorky byly vyfoceny pod mikroskopem a jejich vnitřní porozita byla vyhodnocována v programu ImageJ. Tato metoda neudává přesnou hodnotu porozity, ale sloužila jako odhadní pro výběr vzorků s nejlepšími vlastnostmi. Na základě této analýzy bylo vytvořeno okno nejlepších procesních parametrů (obr. 5.2.8), které bylo zpřesněno ve druhém testu.

Ve druhém testu byl ověřen pozitivní vliv pískování korundem na drsnost povrchu. Byla vyhodnocována drsnost povrchu jako v prvním případě, ale měření probíhalo po jednotlivých prutech, čímž byly naměřené výsledky zpřesněny. Následně byly vzorky naskenovány pomocí μ CT pro zjištění vnitřní porozity. Výsledky byly použity k vytvoření přesnějšího okna procesních parametrů (obr. 5.2.9). Dále byl popsán vliv sklonu prutu na šířku dráhy měřením vzorků vyrobených jednou drahou.

Vlivy výkonu laseru, skenovací rychlosti a vzdálenosti drah na šířku dráhy, průměr prutu, drsnost povrchu byly shodné s předpoklady z rešerše. Vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na porozitu neodpovídal předpokladům.

Některé sady procesních parametrů vykazovali velice dobrou drsnost povrchu a porozitu. Tyto kombinace procesních parametrů by musely být použity na výrobu prutových struktur, který by byly podrobeny dalším zkouškám pro zjištění jejich vhodnosti pro výrobu součástí.

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**8**

- [1] What is 3D printing? How does a 3D printer work? Learn 3D printing. 3D Printing - Additive Manufacturing [online]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [2] Renishaw to Attend Orthopedic Surgeons' Annual Meeting - Robotics Business Review. Robotics Business Review - the leading source of business analysis and events around the global robotics ecosystem [online]. Copyright © 2018 Robotics Business Review [cit. 16.05.2018]. Dostupné z: <https://www.roboticsbusinessreview.com/health-medical/renishaw-to-attend-orthopedic-surgeons-annual-meeting/>
- [3] I. Yadroitsev, I. Smurov, Surface morphology in selective laser melting of metal powders, *Phys. Procedia*. 12 (2011) 264–270. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.034.
- [4] P. Wei, Z. Wei, Z. Chen, J. Du, Y. He, J. Li, Y. Zhou, The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior, *Appl. Surf. Sci.* 408 (2017) 38–50. doi:10.1016/j.apsusc.2017.02.215.
- [5] N.T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, N.M. Everitt, On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties, *J. Mater. Process. Technol.* 230 (2016) 88–98. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.11.016.
- [6] M. Xia, D. Gu, G. Yu, D. Dai, H. Chen, Q. Shi, Influence of hatch spacing on heat and mass transfer, thermodynamics and laser processability during additive manufacturing of Inconel 718 alloy, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 109 (2016) 147–157. doi:10.1016/j.ijmachtools.2016.07.010.
- [7] K. Kempen, L. Thijs, J. Van Humbeeck, J.-P. Kruth, Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation, *Mater. Sci. Technol.* 31 (2015) 917–923. doi:10.1179/1743284714Y.00000000702.
- [8] C. Qiu, S. Yue, N.J.E. Adkins, M. Ward, H. Hassanin, P.D. Lee, P.J. Withers, M.M. Attallah, Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting, *Mater. Sci. Eng. A*. 628 (2015) 188–197. doi:10.1016/j.msea.2015.01.031.
- [9] P. Delroisse, P.J. Jacques, E. Maire, O. Rigo, A. Simar, Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting, *Scr. Mater.* 141 (2017) 32–35. doi:10.1016/j.scriptamat.2017.07.020.
- [10] M. Leary, M. Mazur, J. Elambasseril, M. McMillan, T. Chirent, Y. Sun, M. Qian, M. Easton, M. Brandt, Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures, *Mater. Des.* 98 (2016) 344–357. doi:10.1016/j.matdes.2016.02.127.
- [11] F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso, J. Pakkanen, A. Aversa, E.P. Ambrosio, M. Lombardi, P. Fino, D. Manfredi, On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: Process, microstructure, and mechanical properties, *Materials (Basel)*. 10 (2017). doi:10.3390/ma10010076.
- [12] Selective Laser Melting Machine SLM®280 2.0 | SLM Solutions. SLM Solutions | [online]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slmr280-20>

- [13] R. Canali, Study, development and characterization of aluminum based materials by additive manufacturing Part 1, (2015) 0–58.
doi:10.6092/polito/porto/2598770.
- [14] ATOS Triple Scan | GOM. [online]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>
- [15] High-end 3D scanner | ATOS Triple Scan | Flexiable industrial scanner. Zebicon | 3D måleteknik | 3D scanning | Opmåling og inspektion [online]. Dostupné z: <http://zebicon.com/en/metrology-systems/3d-scanner/atos-triple-scan.html>

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

<i>SLM</i>	- selective laser melting
μCT	- micro-computed tomography
<i>BCC</i>	- body-centred cubic
<i>FCC</i>	- face-centred cubic
<i>BCCZ</i>	- body-centred cubic with Z struts
<i>FCCZ</i>	- face-centred cubic with Z struts
<i>FBCCZ</i>	- face and body-centred with Z struts
<i>CAD</i>	- computer aided design
<i>3D</i>	- three-dimensional
<i>Ra</i> [μm]	- průměrná aritmetická úchylka profilu
<i>H</i> [μm]	- vzdálenost drah laseru
<i>y</i> [μm]	- odchylka od nominálního rozměru prutu
<i>E</i> [$J \cdot mm^{-3}$]	- objemová energie
<i>P</i> [W]	- výkon laseru
<i>v</i> [$mm \cdot s^{-1}$]	- skenovací rychlost
<i>t</i> [mm]	- tloušťka vrstvy

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1 Použití prutových struktur v kosti [2]	12
Obr. 2.1 Vytvořené dráhy za použití daných procesních parametrů [4]	13
Obr. 2.2 Závislost drsnosti povrchu na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 180 W [4]	14
Obr. 2.3 Vliv zvyšování rychlosti skenování na šířku dráhy [5]	14
Obr. 2.4 Zobrazení návaru a průvaru při skenovacích rychlostech $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $750 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [5]	15
Obr. 2.5 Zobrazení průřezů drah s kuličkou a bez ní pro skenovací rychlosti: (a) a (b) $250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, (c) a (d) $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, (e) a (f) $750 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [5]	16
Obr. 2.6 Schéma chování roztavené lázně při zvyšující se vzdálenosti drah laseru: (a) $40 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m}$, (c) $60 \mu\text{m}$, (d) $70 \mu\text{m}$ [6]	17
Obr. 2.7 Přehled drah vytvořených pomocí různého výkonu laseru a skenovací rychlosti [7]	18
Obr. 2.8 Přehled průřezů drah vytvořených pomocí různého výkonu laseru a skenovací rychlosti [7]	18
Obr. 2.9 (a-e) série snímků znázorňující změnu průměru prutu při zvětšování výkonu laseru: (a) 150 W, (b) 200 W, (c) 275 W, (d) 300 W, (e) 375 W při pevné skenovací rychlosti $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Graf (f) zobrazuje závislost průměru prutu na výkonu laseru [8]	19
Obr. 2.10 Změna průměru vzpěry při výkonu laseru 400 W a proměnné skenovací rychlosti [8]	20
Obr. 2.11 Závislost porozity na změně výkonu laseru [8]	21
Obr. 2.12 Závislost porozity na skenovací rychlosti [8]	21
Obr. 2.13 Zobrazení porozity: (a) kolmý prut, (b) skloněný prut, (c) oblasti A, B u skloněného prutu [9]	22
Obr. 2.14 Krychlová buňka se čtyřmi možnými sklony vzpěr. Modrá 0° ; zelená $35,3^\circ$; žlutá 45° ; červená 90° [10]	23
Obr. 2.15 Vyrobené prutové struktury: (i) kubická prostorově středěná, (ii) kubická prostorově středěná s pruty ve směru osy Z, (iii) kubická plošně středěná, (iv) kubická plošně středěná s pruty ve směru osy Z, (v) kubická plošně a prostorově středěná s pruty ve směru osy Z [10]	24
Obr. 2.16 Objemová absorpce energie (W) testovaných mikro-prutových struktur [10]	24
Obr. 4.1.1 Schématické znázornění procesu SLM [11]	27
Obr. 4.1.2 Zařízení SLM 280HL [12]	28
Obr. 4.1.3 A) Závislost četnosti na velikosti zrn, B) zobrazení práškového materiálu pod mikroskopem [13]	28
Obr. 4.1.4 ATOS Triple Scan [15]	29
Obr. 4.2.1 Analýza prutů v programu GOM Inspect	30
Obr. 4.2.2 Měření porozity v programu ImageJ	31
Obr. 4.3.1 Měření šířek návarů	32
Obr. 4.3.2 První test prutů se sklonem 90° a $35,26^\circ$	33
Obr. 4.3.3 Použitá strategie pro tvorbu prutů	33
Obr. 4.3.4 Druhý test pro zpřesnění výsledků	34
Obr. 4.3.5 Měření šířky stěn prutů	35
Obr. 5.1.1 Histogram pro výběr procesních parametrů pro první test	36

Obr. 5.2.1 Vliv rozdílného odvodu tepla. Překryv u prutů zleva: 50 %, 25 %, 0 %, -25 %, -50 %	38
Obr. 5.2.2 (A) pruty před pískováním; (B) pruty po pískování	39
Obr. 5.2.3 Vlevo: závislost odchylky od nominálního průměru na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti 900 mm·s ⁻¹ . Vpravo: závislost odchylky od nominálního průměru na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W.	40
Obr. 5.2.4 Rozdíl drsnosti povrchu u prutů s překryvem 90° a 35,26°	41
Obr. 5.2.5 Vlevo: závislost drsnosti povrchu prutů na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti 900 mm·s ⁻¹ . Vpravo: závislost drsnosti povrchu prutů na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W	42
Obr. 5.2.6 Vyhodnocení porozity metodou μ CT, (A) výkon laseru 250 W, skenovací rychlost 700 mm·s ⁻¹ ; (B) výkon laseru 300 W, skenovací rychlost 900 mm·s ⁻¹ ; (C) výkon laseru 350 W, skenovací rychlost 1100 mm·s ⁻¹	44
Obr. 5.2.7 Vlevo: závislost porozity na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti 700 mm·s ⁻¹ . Vpravo: závislost porozity na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W	44
Obr. 5.2.8 Výsledky prvního testu. Vlevo: okno procesních parametrů pro drsnost povrchu prutů, vpravo: okno procesních parametrů pro porozitu	45
Obr. 5.2.9 Výsledky druhého testu. Vlevo: okno procesních parametrů pro drsnost povrchu prutů, vpravo: okno procesních parametrů pro porozitu	45

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1.1 Vyhrané procesní parametry pro první test	37
Tab. 5.2.1 Odchylky Gaussova průměru od nominálního průměru v μm	40
Tab. 5.2.2 Průměrné hodnoty porozity v %	42
Tab. 5.2.3 Rozdíl porozity prvního a druhého testu, porozita je v %	43

12 SEZNAM PŘÍLOH

12

PŘÍLOHA I – Navržené procesní parametry pro výrobu druhého testu

PŘÍLOHA II – Navržené procesní parametry pro výrobu prutů jednou drahou

Navržené procesní parametry pro výrobu druhého testu

Číslo vzorku	Výkon laseru (W)	Skenovací rychlost (mm·s ⁻¹)	Šířka návaru (μm)
BP-AI10-CRW-03-01	225	500	294
BP-AI10-CRW-03-02	225	700	257
BP-AI10-CRW-03-03	225	900	220
BP-AI10-CRW-03-04	225	1100	183
BP-AI10-CRW-03-05	225	1400	127
BP-AI10-CRW-03-06	250	500	300
BP-AI10-CRW-03-07	250	700	266
BP-AI10-CRW-03-08	250	900	232
BP-AI10-CRW-03-09	250	1100	198
BP-AI10-CRW-03-10	250	1400	147
BP-AI10-CRW-03-11	275	500	307
BP-AI10-CRW-03-12	275	700	275
BP-AI10-CRW-03-13	275	900	245
BP-AI10-CRW-03-14	275	1100	213
BP-AI10-CRW-03-15	275	1400	166
BP-AI10-CRW-03-16	275	1700	119
BP-AI10-CRW-03-17	300	500	313
BP-AI10-CRW-03-18	300	700	285
BP-AI10-CRW-03-19	300	900	256
BP-AI10-CRW-03-20	300	1100	228
BP-AI10-CRW-03-21	300	1400	185
BP-AI10-CRW-03-22	300	1700	142
BP-AI10-CRW-03-23	300	2000	99
BP-AI10-CRW-03-24	350	500	327
BP-AI10-CRW-03-25	350	700	304
BP-AI10-CRW-03-26	350	900	281
BP-AI10-CRW-03-27	350	1100	258
BP-AI10-CRW-03-28	350	1400	223
BP-AI10-CRW-03-29	350	1700	189
BP-AI10-CRW-03-30	350	2000	154
BP-AI10-CRW-03-31	400	500	340
BP-AI10-CRW-03-32	400	700	322
BP-AI10-CRW-03-33	400	900	305
BP-AI10-CRW-03-34	400	1100	288
BP-AI10-CRW-03-35	400	1400	262
BP-AI10-CRW-03-36	400	1700	235
BP-AI10-CRW-03-37	400	2000	209
BP-AI10-CRW-03-38	350	500	358
BP-AI10-CRW-03-39	225	1200	145
BP-AI10-CRW-03-40	300	1300	193

Navržené pro výrobu prutů jednou drahou

Číslo vzorku	Výkon laseru (W)	Skenovací rychlost (mm/s)	Šířka návaru (μm)
BP-AI10-CRW-03-01	225	500	294
BP-AI10-CRW-03-03	225	900	220
BP-AI10-CRW-03-05	225	1400	127
BP-AI10-CRW-03-06	250	500	300
BP-AI10-CRW-03-08	250	900	232
BP-AI10-CRW-03-10	250	1400	147
BP-AI10-CRW-03-11	275	500	307
BP-AI10-CRW-03-13	275	900	245
BP-AI10-CRW-03-15	275	1400	166
BP-AI10-CRW-03-17	300	500	313
BP-AI10-CRW-03-19	300	900	256
BP-AI10-CRW-03-21	300	1400	185
BP-AI10-CRW-03-24	350	500	327
BP-AI10-CRW-03-26	350	900	281
BP-AI10-CRW-03-28	350	1400	223
BP-AI10-CRW-03-32	400	700	322
BP-AI10-CRW-03-34	400	1100	288
BP-AI10-CRW-03-36	400	1700	235
BP-AI10-CRW-03-38	350	500	500
BP-AI10-CRW-03-40	300	1300	1300