



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VÝVOJ SKENOVACÍ STRATEGIE LASERU PRO VÝROBU
MIKRO-PRUTOVÉ STRUKTURY TECHNOLOGIÍ SLM**

THE DEVELOPEMENT OF SLM LASER STRATEGY FOR LATTICE STRUCTURE FABRICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Jaroš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radek Vrána, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jan Jaroš**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radek Vrána, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 diplomové práce:

Vývoj skenovací strategie laseru pro výrobu mikro–prutové struktury technologií SLM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vhodnost použití procesních parametrů a skenovací strategie technologie SLM je výrazně závislá na geometrii vyráběného dílu, respektive schopnosti geometrie dílu odvádět tepelnou energii z aktuálně vyráběné vrstvy. V praxi se pro výrobu většiny dílů využívají univerzální procesní parametry pro všechny typy dílů, což vzhledem ke specifickému tvaru mikro–prutových struktur vede ke vzniku imperfekcí jako navyšování rozměrů jednotlivých prutů, vysoké drsnosti a porozitě. Při použití vhodné výrobní strategie pro mikro–prutové struktury je možné tyto imperfekce eliminovat.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je vývoj skenovací strategie laseru, která umožní výrobu mikro–prutové struktury s vysokou rozměrovou přesností, nízkou porozitou a drsností povrchu. Práce bude primárně zaměřena na hliníkovou slitinu AlSi10Mg a tvar základní buňky BCC (BCCz).

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat potřebné experimenty a rozsahy parametrů laseru na základě literární rešerše,
- navrhnout vzorky, metody jejich testování a způsob vyhodnocení,
- experimentálně stanovit optimální oblast parametrů laseru pro výrobu mikro–prutové struktury,
- stanovit vztahy pro závislosti drsnosti povrchu a porozity na procesních parametrech a velikosti vyráběných prutů,
- porovnat získané výsledky s původním univerzálním nastavením procesních parametrů technologie SLM,
- na základě získaných výsledků vytvořit software, který umožní uživateli navrhnout vhodné procesní parametry pro výrobu mikro–prutových struktur.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukončení/>

Seznam doporučené literatury:

VRANA, R., D. KOUTNY, D. PALOUSEK, L. PANTELEJEV, J. JAROS, T. ZIKMUND a J. KAISER. Selective Laser Melting Strategy for Fabrication of Thin Struts Usable in Lattice Structures. Materials. 2018, 11(9). DOI: 10.3390/ma11091763. ISSN 19961944.

PAULY, S., C. SCHRICKER, S. SCUDINO, L. DENG a U. KUHN. Processing a glass-forming Zr-based alloy by selective laser melting. Materials & Design. 2017, 135, 133-141. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.08.070. ISSN 02641275.

QIU, Ch., S. YUE, N.J.E. ADKINS, M. WARD, H. HASSANIN, P. D. LEE, P.J. WITHERS a M.M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. Materials Science and Engineering: A. 2015, 628, 188-197. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.031. ISSN 09215093.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Aditivní technologie (AT) je čím dál více využívána k návrhu unikátních dílů, a to především díky možnosti vyrábět tvarově složité prvky jako jsou např. mikro-prutové struktury. To nicméně zahrnuje i nutnost modifikace procesních parametrů případně výrobní strategie dané AT, která je obvykle nastavena na výrobu objemové geometrie.

Použitím vzorků odpovídajících geometrií mikro-prutovým strukturám byly naměřeny přesné vstupní hodnoty, které byly využity pro návrh procesu výroby SLM (Selective Laser Melting) pomocí contour strategie. Díky tomu byly vyrobeny vertikální a skloněné ($35,26^\circ$) pruty s nízkou porozitou (do 0,2 %), drsností povrchu a vysokou rozměrovou přesností. Porozita byla měřena na μ CT, drsnost povrchu a rozměrová přesnost byla měřena na STL datech. Z výsledků vyplývá, že pokud jsou správně nastaveny parametry SLM procesu, je možné vyrobit pruty s nízkou porozitou a drsností povrchu při použití různých kombinací výkonu laseru a skenovací rychlosti. Uvedené poznatky byly použity při tvorbě skriptu, který umožní výběr vhodných procesních parametrů pro výrobu mikro-prutových struktur.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, AlSi10Mg, mikro-prutová struktura, contour strategie, porozita, drsnost povrchu, rozměrová přesnost

ABSTRACT

Additive technology (AT) is increasingly used to design unique parts, mainly due to the ability to produce complex structures such as lattice structures. However, this also includes the need to modify the process parameters or the production strategy of the AT, which is usually set to produce volume geometry.

Using samples corresponding to the geometries of the lattice structures, the exact input values were measured, which were used to design the SLM (Selective laser melting) production process using a contour strategy. Thanks to this, vertical and angled (35.26°) struts with low porosity (up to 0.2 %), low surface roughness and high dimensional accuracy were produced. Porosity was measured on μ CT, surface roughness and dimensional accuracy were measured on STL data. The results show that if the parameters of the SLM process are set correctly, it is possible to produce struts with low porosity and surface roughness using different combinations of laser power and scanning speed. The above findings were used in the creation of script that allow the selection of suitable process parameters to produce lattice structures.

KEYWORDS

Selective laser melting, AlSi10Mg, lattice structure, contour strategy, porosity, roughness, dimensional accuracy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JAROŠ, Jan. *Vývoj skenovací strategie laseru pro výrobu mikro-prutové struktury technologií SLM*. Brno, 2020, 112 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Vrána, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Radku Vránovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady. Déle bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni za podporu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Radka Vrány, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Vliv základních procesních parametrů SLM	15
2.1.1	Výkon laseru a skenovací rychlost	15
2.1.2	Vzdálenost drah laseru	19
2.2	Defekty při výrobě technologií SLM	22
2.3	Materiálové vlastnosti mikro-prutových struktur	24
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	35
3.1	Analýza problému	35
3.2	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	36
3.3	Podstata a cíl diplomové práce	39
4	ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ METODY	41
4.1	Postup řešení	41
4.2	Parametry experimentů	42
4.3	Prášek AlSi10Mg	42
4.4	Použitá zařízení a postupy	43
4.4.1	SLM 280 HL	43
4.4.2	ATOS Triple Scan III	44
4.4.3	Phoenix v tome x L 240	44
4.4.4	Keyence VHX-6000	45
4.4.5	Příprava metalografických výbrusů	45
4.5	Popis experimentů	46
4.6	Iniciační experimenty	47
4.6.1	Návarový experiment	48
4.6.2	Skloněné pruty	49
4.7	Rozšiřující experimenty	50
4.7.1	Test geometrie návaru	50
4.7.2	Test šířky dráhy tenkých stěn	51
4.7.3	Test šířky dráhy prutových vzorků 1T (one track)	52
4.7.4	Experiment pro zjištění vhodného rozsahu překryvu drah laseru	53
4.8	Prutový experiment	54

4.8.1	Experiment pro ověření volby procesních parametrů	55
4.8.2	Experiment pro porovnání vlivu směru výroby contour strategie	55
4.8.3	Experiment pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface	56
4.8.4	Experiment pro ověření vhodného nastavení procesních parametrů	57
4.9	Metody vyhodnocení	58
4.9.1	Postup vyhodnocení geometrie návaru	59
4.9.2	Vyhodnocení šířky dráhy	59
4.9.3	Vyhodnocení porozity	60
4.9.4	Vyhodnocení drsnosti povrchu	62
4.9.5	Vyhodnocení rozměrové přesnosti	63
5	VÝSLEDKY	64
5.1	Ověření výsledků z literatury	64
5.2	Analýza geometrie návaru	66
5.2.1	Geometrie návaru	66
5.2.2	Šířka dráhy	68
5.2.3	Vnější a vnitřní šířka dráhy	68
5.2.4	Šířka dráhy u vertikálních a skloněných prutů 1T	70
5.2.5	Rozdílná šířka dráhy u skloněných prutů	71
5.2.6	DOE – response surface analýza pro šířku dráhy	72
5.3	Analýza překryvu drah	74
5.4	Analýza materiálových vlastností	75
5.4.1	Porozita	75
5.4.2	Drsnost povrchu	83
5.4.3	Geometrická přesnost	86
5.5	Skript pro výběr vhodných procesních parametrů	87
5.5.1	Instrukce pro uživatele	88
5.5.2	Nastavení procesních parametrů	89
5.5.3	Vizualizace	89
6	DISKUZE	91
6.1	Procesní parametry	91
6.2	Šířka dráhy	91
6.3	Překryv drah laseru	92
6.4	Porozita	93
6.5	Drsnost povrchu	93
6.6	Rozměrová přesnost	94

7	ZÁVĚR	95
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	97
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	100
	Příklady použitých fyzikálních veličin	100
	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	102
	SEZNAM TABULEK	105
	SEZNAM PŘÍLOH	106

1 ÚVOD

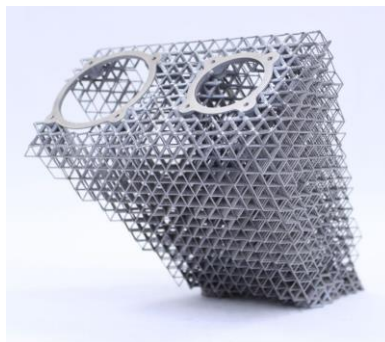
V leteckém průmyslu je v poslední době trendem redukce hmotnosti vyráběných dílů. Ta vede ke snížení hmotnosti letadla, a tím ke snížení provozních nákladů. Jednou z metod pro snížení hmotnosti komponent je topologická optimalizace (TO), jejímž speciálním typem je tzv. „lattice structure“ TO. Ta v rámci optimalizace využívá základní buňky mikro-prutové konstrukce tvořené tenkými pruty na místo objemového materiálu (obr. 1-1 b). To přináší další benefity v podobě vyšší úspory materiálu oproti „objemové“ TO (obr. 1-1 a), možnosti změny vlastní frekvence dílu, případně návrh medicínských implantátů, které umožňují přirozené spojení s kostí (prorůstání) [1].

Díky rozvoji v oblasti kovových aditivních technologií je možné navržené díly efektivně vyrábět přímo na základě 3D dat získaných z TO. Jednou z mnoha použitelných technologií je Selective Laser Melting (SLM), která pro výrobu využívá práškového materiálu a výkonného laseru. Nevýhodou této technologie je velké množství procesních parametrů, které je nutné přizpůsobit pro použitý práškový materiál, případně vyráběný tvar. Ty ovlivňují zejména stabilitu SLM procesu a finální mechanické a materiálové vlastnosti dílů. V praxi se tedy pro výrobu většiny komponentů používají univerzální nastavení doporučené dodavatelem práškového materiálu. Ta jsou přizpůsobena pro objemové komponenty s dobrým odvodem tepla během výrobního procesu, ale nejsou vhodné pro výrobu speciálních tvarů jako např. tenkostěnných mikro-prutových struktur.

Diplomová práce se zabývá vlivem procesních parametrů na výrobu mikro-prutových struktur různého průměru pomocí contour strategie. Aby bylo možné tento vliv popsat, byly navrženy nové typy vzorků, které odpovídají reálné situaci. Na základě získaných poznatků byly vyrobeny vzorky, které vedly k výraznému snížení porozity a zvýšení rozměrové přesnosti. Navíc byly získané výsledky použity při tvorbě návrhového skriptu, který usnadní výběr procesních parametrů s očekávanými materiálovými vlastnostmi.



(a)



(b)

obr. 1-1 Příklady topologické optimalizace: (a) objemová TO [2]; (b) lattice structure TO [3]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Vědecké studie uvedené v přehledu současného stavu poznání jsou zaměřené především na popis základních parametrů technologie Selective Laser Melting (SLM), tj. výkon laseru (**LP**), skenovací rychlost (**LS**), vzdálenost drah laseru (**HD**), skenovací strategii a vliv těchto parametrů na vyrobené vzorky, tj. porozitu, drsnost povrchu a rozměrovou přesnost. Cílem přehledu současného stavu poznání je získat obecné znalosti o procesu SLM, ty modifikovat pro výrobu specifické geometrie mikro-prutové struktury s dobrými mechanickými a materiálovými vlastnostmi.

V diplomové práci je použita slitina AlSi10Mg, která je dobře popsána v literatuře a zaručuje dobrou vyrobitelnost součástí metodou SLM. Proto jsou vědecké články použité v této kapitole zaměřeny především na tuto slitinu.

2.1 Vliv základních procesních parametrů SLM

Důležitými procesními parametry jsou výkon laseru (**LP**), skenovací rychlost (**LS**) a vzdálenost drah laseru (**HD**). Tyto parametry významně ovlivňují materiálové vlastnosti vyráběných součástí, a proto se jimi zabývá velké množství vědeckých studií. Vybrané studie byly více popsány v této kapitole.

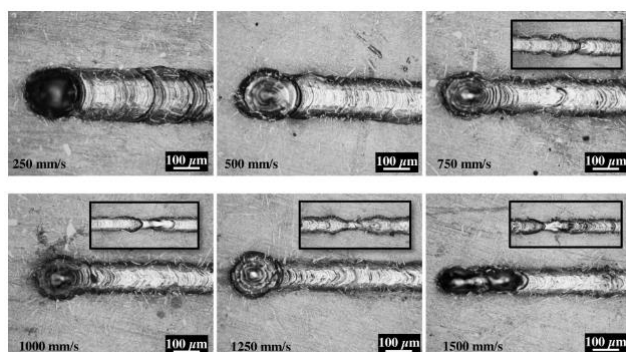
2.1.1 Výkon laseru a skenovací rychlost

Vlivem procesních parametrů na tvorbu návaru se zabývali Aboulkhair et al. [4]. Autoři použili konstantní hodnotu výkonu laseru **LP** 100 W a tloušťku vrstvy prášku 40 μm . **LS** byla volena v rozsahu 250 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až 1500 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ po kroku 250 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Byl použit prášek AlSi10Mg.

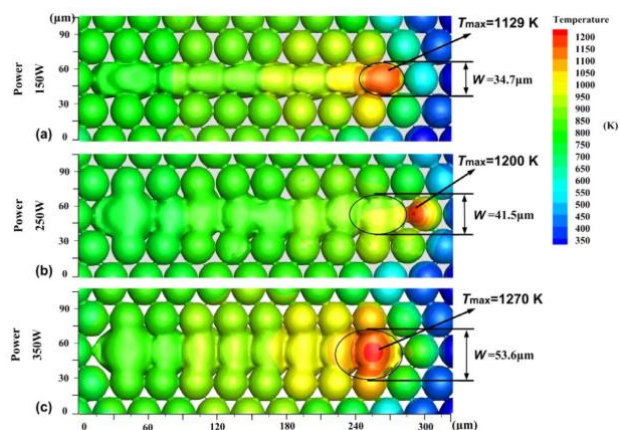
Výsledky (obr. 2-1 a) ukázaly, že šířka dráhy s rostoucí **LS** klesala. Navíc při zvýšení **LS** na hodnotu 750 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a vyšší, bylo v návaru viditelné lokální zúžení. Toto zúžení je dáno nízkou energií působící na dráhu a může vést ke vzniku porozity v součástech.

Yu et al. [5] predikovali chování taveniny v návaru pomocí matematického modelu, který byl ověřen reálnými testy. Použitým materiálem byla slitina AlSi10Mg. **LS** byla nastavena na 400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, tloušťka vrstvy na 50 μm . **LP** byl nastaven na 150 W, 250 W a 350 W.

Bylo zjištěno (obr. 2-1 b), že zvýšení **LP** při zachování hodnoty **LS** vede ke zvětšení šířky návaru. Došlo také ke zvýšení maximální teplota taveniny z 1129 K při **LP** 150 W na 1270 K při **LP** 350 W. Při **LP** 150 W měla tavenina vysokou viskozitu, což způsobilo její nedostatečné rozlití po návaru. Důsledkem toho je zvýšení drsnosti povrchu. Při použití **LP** 350 W došlo k natavení částic okolního prášku, což vedlo ke zvýšení drsnosti povrchu. Použití **LP** 250 W se ukázalo jako nejvhodnější. Tavenina měla dostatečně nízkou viskozitu, aby se rovnoměrně rozlila po návaru, a navíc nebyly výrazně teplotně ovlivněny okolní částice prášku.



(a)



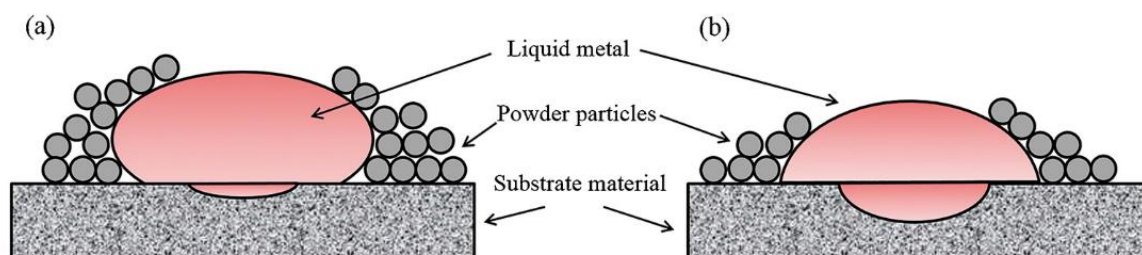
(b)

obr. 2-1 (a) vliv **LS** na šířku dráhy [4]; (b) vliv **LP** na šířku dráhy [5]

Zhang et al. [6] rozdělili dráhu laseru na horní část (návar) a spodní část (průvar). Toto rozdělení je vidět na obr. 2-2.

Při nedostatečné energii působící na dráhu má vzniklá tavenina tendenci minimalizovat svoji povrchovou energii a vytvořit tzv. „balling effect“ (obr. 2-2 a). Tento jev způsobuje malý průvar, který vede k nedostatečnému spojení dráhy s předchozí vrstvou. Navíc tvar návaru napomáhá vzniku porozity mezi jednotlivými drahami a vede ke zvýšení drsnosti povrchu.

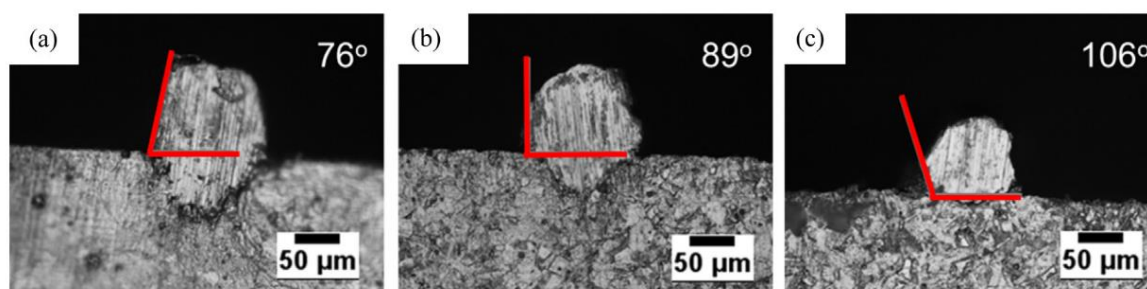
Zvýšení energie v dráze vede k tomu, že se netvoří „balling effect“, a navíc dochází ke zvýšení hloubky průvaru (obr. 2-2 b). Vyšší energie vede k větší tekutosti a dobré smáčivosti taveniny s předchozími vrstvami. Současně však mohou v dráze vznikat zbytková napětí, která vedou k praskání součástí.



obr. 2-2 Schéma návaru a průvaru; (a) „balling efekt“; (b) následek použití vyšší energie [6]

Přítomnost „balling effectu“ byla pozorována také v práci autorů Tian et al. [7], kteří tento jev pozorovali na výbrusech drah (obr. 2-3). Použili prášek Hastelloy X.

Výbrusy ukazují vliv energie na velikost kontaktního úhlu. Vysoký kontaktní úhel způsobuje vznik „balling effectu“ a snižuje velikost průvaru (obr. 2-3 c). V tomto případě je to způsobeno nízkou energií. Při zvýšení energie klesá kontaktní úhel, což vede k vymizení „balling effectu“ (obr. 2-3 a, b).

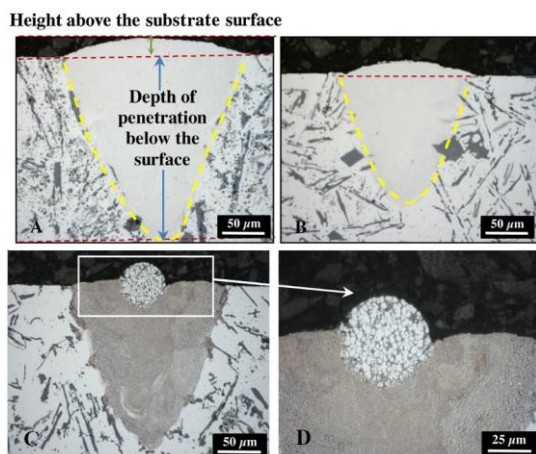


obr. 2-3 Výbrusy drah (a) kontaktní úhel 76°; (b) kontaktní úhel 89°; (c) kontaktní úhel 106° [7]

Pozorování kontaktního úhlu je jednou z možností, jak předejít „balling effectu“ a jeho nežádoucím vlivům.

Aboulkhair et al. [4] výbrusem jednotlivých návarů dokázali, že průřez dráhy je spíše kuželový, než oválný (obr. 2-4 A, B). Navíc je vidět větší hloubka průvaru, než je velikost návaru, což vede k lepšímu spojení s předchozí vrstvou.

Při použití nízké energie docházelo ke vzniku „satelitů“ (obr. 2-4 C, A). „Satelitem“ je částice přilepená k povrchu návaru. Je tvořena rozstříkem prášku, nebo jeho částečným natavením. „Satelity“ podporují tvorbu pórů a zvyšují drsnost povrchu.



obr. 2-4 Výbrusy drah (A); (B) kuželový tvar průvaru; (C); (D) satelity na povrchu dráhy [4]

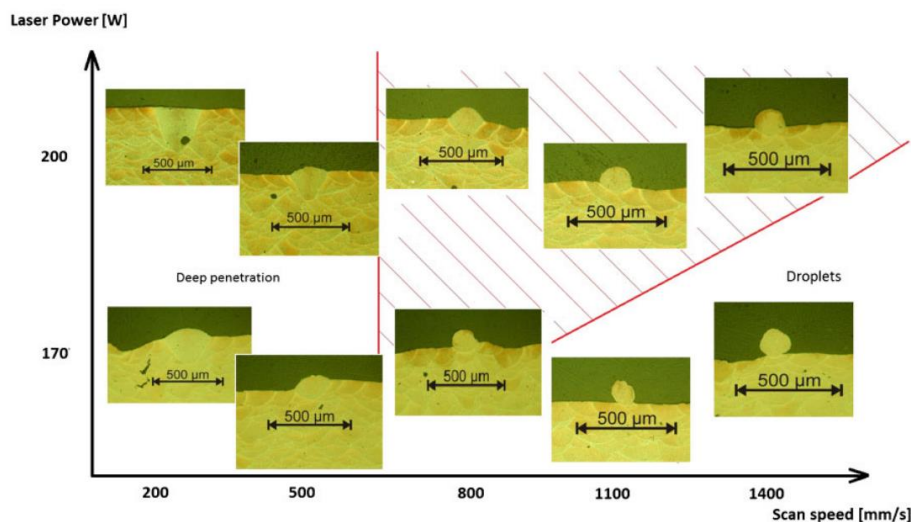
Pro vytvoření drah laseru s dobrou výškou návaru a hloubkou průvaru vytvořili Kempen et al. [8] okno optimálních procesních parametrů (obr. 2-5). Byl použit prášek AlSi10Mg. Výška vrstvy byla zvolena 30 μm . **LP** byl nastaven na 170 W a 200 W, **LS** byla volena v rozsahu 200 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až 1400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ po kroku 300 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pro analýzu byla použita lineární energie dána vzorcem:

$$E_{\text{lin}} = \frac{LP}{LS} \text{ (J} \cdot \text{mm}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

, kde E_{lin} je energie vztažená na jednotku délku ($\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$), LP je výkon laseru (W), LS je skenovací rychlost ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$).

V pravé části okna optimálních procesních parametrů působí na dráhu malá lineární energie, která způsobí „balling effect“. Když je vstupní lineární energie příliš vysoká (levá část) dochází k velkému zvýšení průvaru. Také hluboko v tavenině vznikají „keyhole“ póry (**LP** 200 W, **LS** 200 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$), které jsou způsobeny částečným odpařením taveniny vlivem vysoké teploty. Při vyloučení těchto nežádoucích vlivů vzniklo okno procesních parametrů ohraničené červenou čarou. Tato zóna označuje stabilní podmínky pro tvorbu drah a odpovídá použité lineární energii v rozsahu 0,15 – 0,25 $\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$.

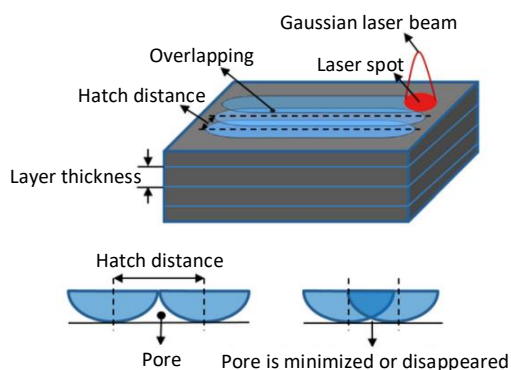


obr. 2-5 Okno optimálních procesních parametrů pro tvorbu drah [8]

V kapitole byly uvedeny vlivy základních parametrů (**LP**, **LS**) na taveninu. Ty výrazně ovlivňují její tvorbu, proto je možné už na základě jednotlivých návarů rozeznat vhodné procesní parametry. Z vhodných procesních parametrů je možné určit perspektivní oblast (okno vhodných procesních parametrů) pro výrobu součástí.

2.1.2 Vzdálenost drah laseru

Vzdálenost drah laseru je jedním z klíčových parametrů procesu SLM a v literatuře se nejčastěji popisuje jako Hatch Distance (**HD**) (obr. 2-6). Ta hraje významnou roli při výrobě součástí s nízkou porozitou. Při velké **HD** vzniká mezi drahami neprotavené místo, které vede ke vzniku pórů, ve kterých je zachycen neroztavený prášek. Na druhou stranu při malé **HD** dochází k přehřátí materiálu, což vede k tvorbě „keyhole“ pórů vznikajících přehřátím a odpařením materiálu.



obr. 2-6 HD a její vliv na vznik pórů [9]

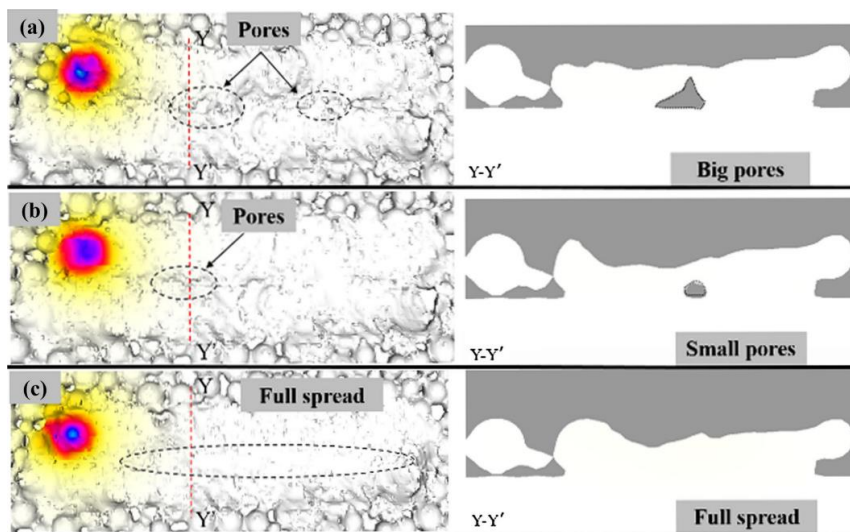
Pei et al. [9] vytvořili trojrozměrný numerický model pro zjištění vlivu procesních parametrů na chování taveniny. Model byl vytvořen pro slitinu AlSi10Mg, aby mohly být výsledky experimentálně ověřeny. **LP** byl nastaven na 180 W a **LS** na 1000 mm·s⁻¹, **HD** na 70 μm, 60 μm a 50 μm. Tloušťka vrstvy byla 35 μm.

Pro porovnání vlivu procesních parametrů na dvě dráhy vedle sebe byla použita plošná energie dána vztahem:

$$E_{ar} = \frac{LP}{LS \cdot HD} \text{ (J} \cdot \text{mm}^{-2}\text{)} \quad (2)$$

, kde E_{ar} je energie působící na plochu (J·mm⁻²), LP je výkon laseru (W), LS je skenovací rychlost (mm·s⁻¹), HD je vzdálenost drah laseru (mm).

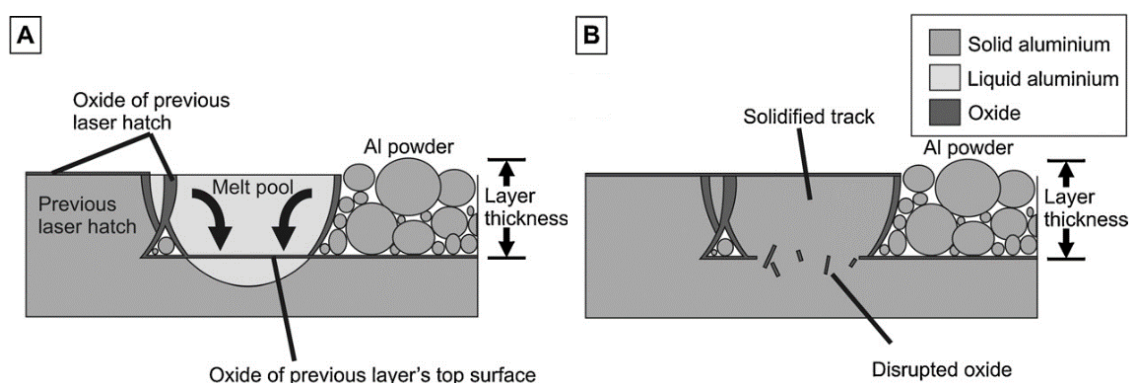
Výsledky ukazují vznik pórů uprostřed dvou drah (obr. 2-7). Při použití **HD** 70 μm ($E_{ar} = 2,57 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$) vznikl uprostřed dráhy velký pór (obr. 2-7 a). Použití **HD** 60 μm ($E_{ar} = 3 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$) vedlo ke zmenšení póru, ale povrch drah byl i nadále hrbokatý (obr. 2-7 b). Při použití **HD** 50 μm ($E_{ar} = 3,6 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$) byl pór úplně zaplněn taveninou a povrch drah byl více hladký (obr. 2-7 c). Snížení **HD** vedlo k absorpci většího množství energie do okolních drah, což způsobilo vznik většího množství taveniny, která zaplnila vzniklé mezery mezi drahami.



obr. 2-7 Vliv HD na vznik pórů při LP 180 W a LS 1000 mm·s⁻¹; (a) HD 70 μm; (b) HD 60 μm; (c) HD 50 μm [9]

Další způsob vzniku pórů mezi drahami popsali Louvis et al. [10], kteří použili hliníkovou slitinu 6061. Pro její naleptání a zvýraznění návarů použili roztok NaOH.

Výsledky ukázaly (obr. 2-8), že při procesu SLM s použitím hliníkové slitiny dochází ke vzniku oxidačního filmu na stranách taveniny. Působením laseru je odpařena horní oxidační vrstva, což způsobuje vznik výparů, které ovlivňují další tisk, protože dochází k rozostření laseru. Oxidační vrstva ve spodní části taveniny je rozložena smícháním taveniny s předchozí vrstvou. Vznikají tak vrstvy oxidů pouze na stěnách taveniny, kde ale snižují smáčivost taveniny a vyrobeného materiálu (obr. 2-8 A). Použitím vysokého **HD** může vznikat uzavřená oblast mezi drahami, ve které jsou uzavřeny neroztavené částice prášku, nebo nečistoty, které způsobují porozitu (obr. 2-8 B). Vzniku porozity tímto způsobem lze předcházet minimálním množstvím kyslíku v atmosféře při procesu SLM. Také by měl být prášek dostatečně vysušen, aby byl zbaven vlhkosti.

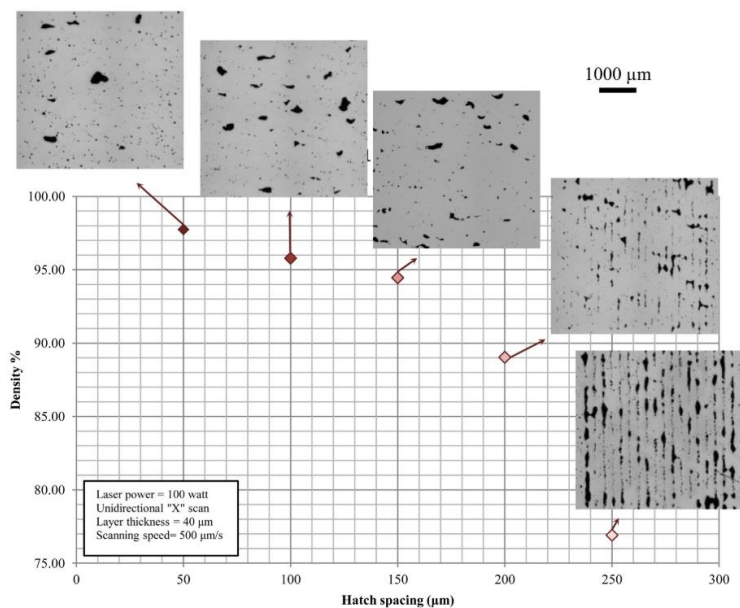


obr. 2-8 Tvorba návarů; (A) vznik oxidační vrstvy v tavenině; (B) vznik uzavřené oblasti mezi oxidačními vrstvami [10]

Snížením porozity ve vyráběných součástech technologií SLM se zabývali Aboulkhair et al. [11], kteří použili slitinu AlSi10Mg. Byla použita tloušťka vrstvy 40 μm , **LP** byl nastaven na 100 W, **LS** na 500 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Dále byla použita skenovací strategie, která protaví každou vrstvu pouze jednou, přičemž jsou vrstvy tvořeny rovnoběžnými návary v jednom směru. **HD** byla volena v rozsahu 50 μm až 250 μm po kroku 50 μm .

Výsledky jsou zobrazeny na obr. 2-9. Při použití **HD** v rozsahu od 50 μm do 150 μm byly ve vzorcích pozorovány póry, které byly způsobeny uzavřením zrn prášku v tavenině. Zrna prášku byla následně odstraněna při broušení a leštění. Při zvyšování **HD** byla více viditelná mezera mezi drahami, která byla způsobena jejich nedostatečným překrytím. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití překryvu 50 μm a 100 μm , kde nebyly pozorovány mezery mezi drahami.

Strategie rovnoběžných návarů se ukázala jako dobrá volba díky jednoduchému nastavení **HD**, můžeme předejít vzniku mezer mezi drahami. U prutových vzorků je možné využít její obdobu v podobě „Contour“ strategie, která je tvořena soustřednými drahami laseru.



obr. 2-9 Vliv zvyšující se HD na vznik porozity mezi drahami [11]

2.2 Defekty při výrobě technologií SLM

Galy et al. [12] se zabývali popisem defektů vznikajících při procesu SLM. Autoři zmiňují čtyři hlavní defekty a popisují mechanismy vzniku. Jsou to:

- Porozita
- Prasknutí součásti
- Anizotropie
- Zhoršená kvalita povrchu

Nejvýznamnější materiálovou vadou je porozita. Ta má negativní vliv především na pevnost součástí, protože jednotlivé póry lokálně oslabují nosný průřez dílů a fungují jako iniciátory trhliny. Tento fenomén je o to významnější u nízko objemových dílů typu lattice-structure.

Existují čtyři hlavní důvody vzniku porozity. Jedním z důvodů je použití vlhkého prášku při výrobě součástí, což způsobuje výskyt vodíkových pórů usazených v tavenině. Tomu lze předcházet vysušením prášku před jeho použitím. Druhým důvodem je absorpce plynů (N, O, H) z okolní atmosféry do taveniny. To lze ovlivnit snížením objemu kyslíku ve stavební komoře použitím ochranné atmosféry. Třetím důvodem je odpaření některých legujících prvků (Mg) vlivem vysoké energie působící na taveninu. Čtvrtým důvodem zvýšení množství porozity v součásti je nízká energie, která neroztaví všechna zrna prášku, ta jsou uzavřena v materiálu, což vede ke vzniku ostrých „lack of fusion“ pórů. Obecně lze říct, že „makroporozita“ je považována za více škodlivou než „mikroporozita“, obzvláště pokud nejsou póry kulového tvaru. Materiál obsahující menší, nekulaté póry je mnohem křehčí než materiál s velkými kulatými póry.

K praskání součástí dochází při tavení hliníkových slitin. Důvodem vzniku trhlin je nedostatečné dodání taveniny do „interdendritických“ míst při tuhnutí. Tomu lze předejít zvýšením procentuálního zastoupení některých prvků, např. křemík, který snižuje teplotu tavení a rozsah tuhnutí, což vede k poklesu míry praskání součástí. Přidáním niklu lze rovněž snížit míru vzniku trhlin. Proto se většina prášků používá jako kombinace více přísad.

Anizotropie je závislost součásti na směru výroby a je dána orientací mikrostruktury. Součásti vyráběné ve směru, ve kterém jsou namáhány, mají vyšší tvrdost, ale dosahují menšího prodloužení až o 2 %. Bylo zjištěno, že anizotropní a izotropní oblasti lze v součásti vytvářet vhodnou volbou skenovací strategie. Další příklad anizotropie uvedli autoři [7], kteří ukázali vliv sklonu prutů na drsnost povrchu. Ta se s rostoucím sklonem zvyšovala (obr. 2-20).

Špatná kvalita povrchu může vést k potřebě dalších výrobních operací. Kvalita povrchu je úzce spjatá s porozitou a při jejím zlepšení může dojít ke zvýšení porozity a naopak. Největší vliv na drsnost povrchu má **LS**, kterou lze řídit vstupní energií. Použití nízké **LS** vede ke vzniku větší drsnosti povrchu z důvodu tzv. „balling efektu“. Obecně lze dosáhnout lepší drsnost povrchu zvolením vhodné kombinace **LP** a **LS**, a také vhodnou skenovací strategií.

Snížení vlivu těchto defektů je základním předpokladem ke vzniku součástí s požadovanými materiálovými a mechanickými vlastnostmi.

2.3 Materiálové vlastnosti mikro-prutových struktur

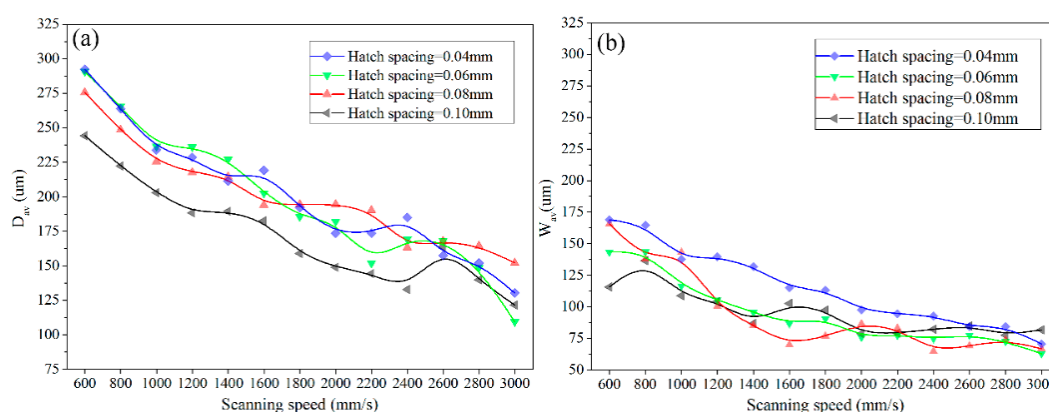
Při výrobě speciálních geometrií typu mikro-prutová struktura dochází k rozdílnému chování oproti objemovým dílům. To je dáno především malým objemem materiálu použitým pro výrobu mikro-prutových struktur, který má zásadní vliv na rychlost odvodu tepla ze součásti. Zároveň je používána prutová geometrie o rozměrech blízkým limitům technologie SLM. Proto je tomuto typu geometrie věnována samostatná část současného stavu poznání.

Pro popis jak materiálových, tak mechanických vlastností mikro-prutových struktur se používají zjednodušené vzorky ve tvaru prutů s kruhovým průřezem, nebo se využívá i jiných průřezů (obdélník). Důvodem je získání odpovídajících výrobních podmínek s mikro-prutovou strukturou.

U prutových vzorků byl zjištěn shodný vliv působící energie na jejich rozměry jako u návarů. Han et al. [13] vyrobili prutové vzorky se sklonem 45° a obdélníkovým průřezem $1 \text{ mm} \times \sqrt{2} \text{ mm}$. Byl použit prášek AlSi10Mg. **LP** byl nastaven na 200 W a **LS** byla měněna v rozmezí 600 až $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ po kroku $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, tloušťka vrstvy prášku byla nastavena na $20 \text{ }\mu\text{m}$ a **HD** byla volena od $40 \text{ }\mu\text{m}$ do $100 \text{ }\mu\text{m}$ po kroku $20 \text{ }\mu\text{m}$.

Byla zjištěna závislost hloubky průvaru (obr. 2-10 a) a průměrné šířky dráhy (obr. 2-10 b) na **LS**. Hodnoty byly získány měřením na vzorcích bez uvažování krajních návarů, aby nedošlo k ovlivnění výsledků v důsledku zvedání okrajů vzorků. Bylo zjištěno, že se zvyšující se **LS** klesá průměrná šířka dráhy a snižuje se průvar. Stejné chování způsobilo i zvyšování **HD**.

Toto chování bylo způsobeno snižováním energie v dráze, což vedlo ke snížení šířky návarů a následnému zmenšení velikosti prutových vzorků.



obr. 2-10 (a) závislost průvaru na LS; (b) závislost šířky dráhy na LS pro HD $40 \text{ }\mu\text{m}$, $60 \text{ }\mu\text{m}$, $80 \text{ }\mu\text{m}$ a $100 \text{ }\mu\text{m}$ [13]

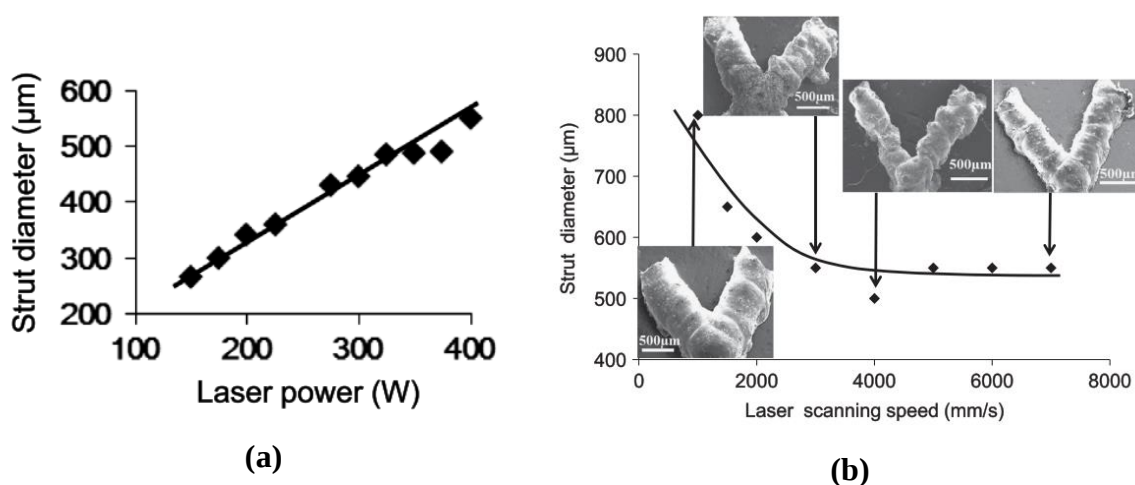
Tyto výsledky byly potvrzeny v práci od Qiu et al. [14], kteří se zabývali zjištěním vlivu procesních parametrů na rozměr prutu. Byl použit materiál AlSi10Mg, průměr prutů byl zvolen 0,3 mm. Pro zjištění vlivu **LP** na průměr prutu byla nastavena **LS** na hodnotu $7000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a **LP** byl měněn v rozsahu 150 W až 400 W po kroku 25 W.

Při konstantní **LS** a zvyšujícím se **LP** (obr. 2-11 a) se průměr prutů zvyšoval s lineární závislostí. Bylo dosaženo odchylky od průměru prutu v rozsahu $-40 \text{ }\mu\text{m}$ až $+200 \text{ }\mu\text{m}$, což odpovídá procentuální odchylce $-13 \text{ }\%$ až $+66 \text{ }\%$. Vlivem vyššího výkonu laseru se výrazně zvýšil i průměr prutu. To bylo způsobeno natavením okolních zrn prášku na povrch prutu, což vedlo ke zhoršení drsnosti povrchu.

V testu pro zjištění vlivu **LS** na průměr prutu byl nastaven **LP** na 400 W a byla volena **LS** v rozsahu $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až $7000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ po kroku $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Při konstantním **LP** a zvyšujícím se **LS** se průměr prutu snižoval (obr. 2-11 b). V žádném z výsledků nebylo dosaženo požadovaného průměru prutu 0,3 mm. Při použití **LS** $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $4000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ měly pruty nepravidelné tvary a při rychlostech nad $4000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ se průměr prutu výrazně neměnil.

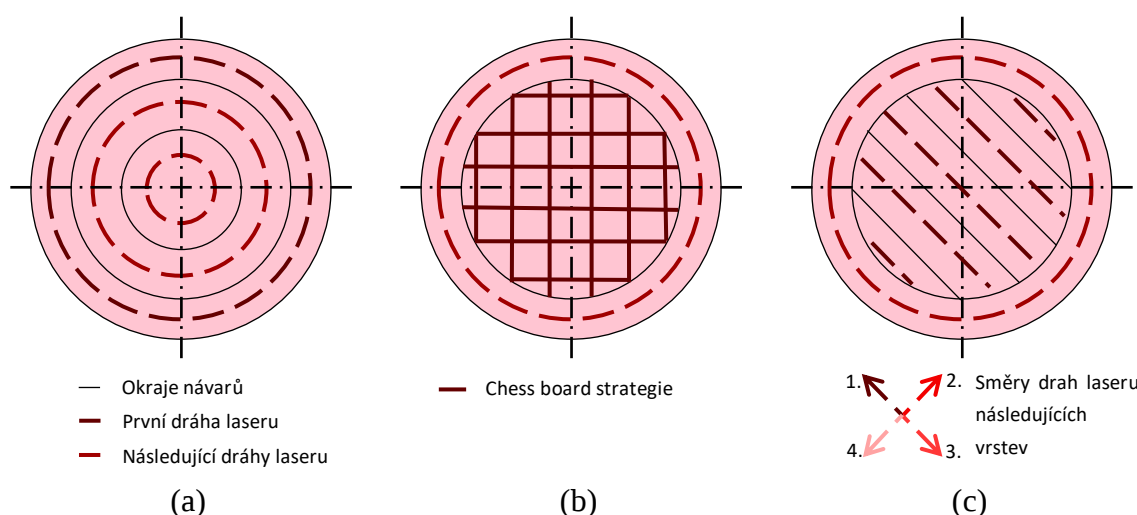
Dosažení přesného průměru prutů je důležité především pro výpočet MKP analýzy. Proto je nutné se tímto jevem dále v diplomové práci zabývat.



obr. 2-11 (a) Vliv výkonu laseru na průměr prutu; (b) vliv skenovací rychlosti na průměr prutu [14]

Skenovací strategie výrazně ovlivňuje vznik materiálových imperfekcí. Jejím vlivem se zabývali Pauly et al. [15], kteří použili slitinu Zr52,5Cu17,9Ni14,6Al10Ti5 pro výrobu prutů o průměru 3 mm. Byly použity tři skenovací strategie:

- Contour strategie tvořená drahami směrem do středu prutu (obr. 2-12 a)
- „Chess board“ strategie (obr. 2-12 b)
- Strategie s horní vrstvou pootočenou o 90° oproti spodní vrstvě (obr. 2-12 c)



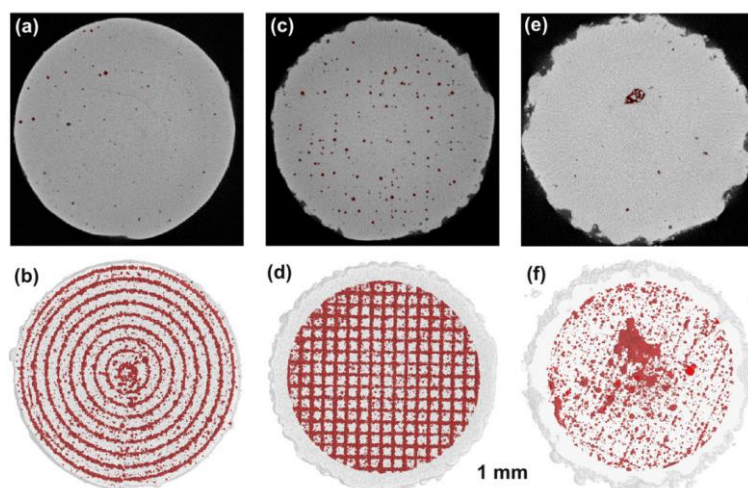
obr. 2-12 (a) contour strategie; (b) chess board strategie; (c) strategie s pootočenými vrstvami

Vzorky byly vyhodnocovány pomocí μ CT pro vizualizaci velikosti a rozložení pórů v prutu. Parametry pro výrobu vzorků byly voleny s ohledem na použitou objemovou energii, která byla u všech vzorků nastavena na $13 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$. Tato objemová energie se vypočítá pomocí vztahu:

$$E_b = \frac{LP}{LS \cdot HD \cdot S} (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}) \quad (3)$$

, kde E_b je objemová energie ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$), LP je výkon laseru (W), LS je skenovací rychlost ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$), HD je vzdálenost drah laseru (mm), S je tloušťka vrstvy prášku (mm).

Výsledky byly zobrazeny na obr. 2-13, kde jsou vidět snímky výbrusů jednotlivých prutů (obr. 2-13 a, c, e) a porozita v průřezu prutů (obr. 2-13 b, d, f) získaná z μ CT. Při použití contour strategie byla naměřena relativní hustota prutu 97,7 %. Použitím této skenovací strategie bylo dosaženo nejnižší drsnosti povrchu a porozita v prutu byla soustředěna kolem drah laseru (obr. 2-13 b). U vzorku vyráběného „Chess board“ strategií (horní vrstva pootočená o 180° oproti spodní) byla naměřena relativní hustota 97,2 %. Póry byly seskupeny do ortogonálních linií šachovnicového pole, kde každý měl délku hrany shodnou se zvolenou HD (obr. 2-13 d). Relativní hustota u vzorku vyráběného strategií s horní vrstvou pootočenou o 90° oproti spodní vrstvě dosahovala 98,5 %. Distribuce pórů však byla více náhodná a některé póry dosahovali větší velikosti a nepravidelných tvarů. Takovéto póry vedou k inicializaci trhliny při namáhání, což vede k lomu.



obr. 2-13 Výbrusy prutů v horní části, zobrazení porozity v celém prutu ve spodní části; (a), (b) contour strategie; (c), (d) „Chess board“ strategie; (e), (f) strategie s horní vrstvou pootočenou o 90° oproti spodní vrstvě [15]

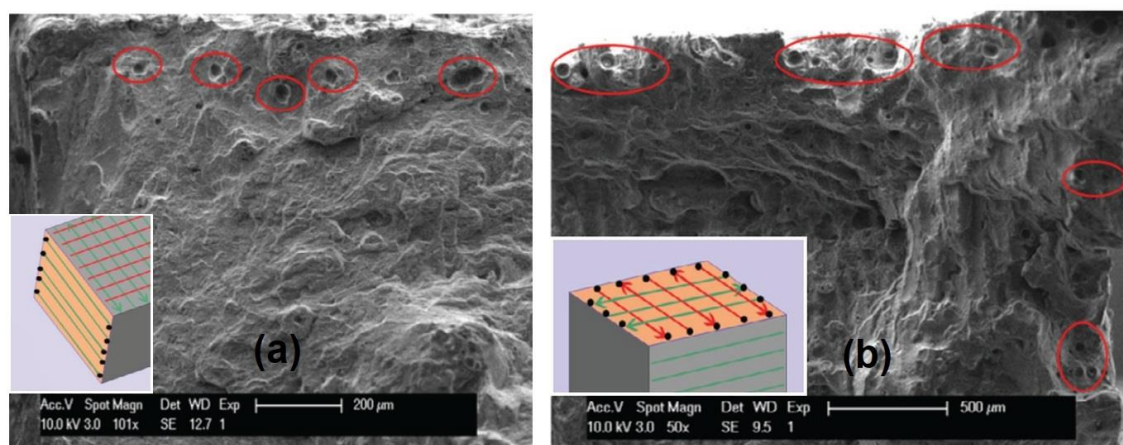
Contour strategie se jeví jako ideální volba pro tvorbu mikro-prutových struktur, protože jejím použitím byla dosažena vysoká relativní hustota prutu a nejnižší drsnost povrchu. Touto strategií lze také pomocí **HD** řídit vstupní energii v prutu. V uvedené studii byla použita velká **HD**, která způsobila vznik pórů mezi drahami. Při vhodném nastavení **HD** lze tyto množství těchto pórů minimalizovat.

Další výhodou contour strategie je malý počet drah laseru oproti jiným strategiím uvedeným výše. Na konci drah totiž dochází k brždění pohybu laseru a ten působí v těchto místech na taveninu delší dobu. Dochází tak ke vzniku porozity v důsledku lokálního přehřátí materiálu, jak popsali autoři Kempen et al. [16]. Ti se zabývali vlivem orientace výroby součásti na vlastnosti v tahu. Byl použit prášek **AlSi10Mg**, **LP** 200 W, **LS** 1400 mm·s⁻¹ a **HD** 105 μm. Byla použita „chess board“ strategie rozšířená o opětovné protavení každé vrstvy v pootočeném směru o 90° oproti prvnímu tavení.

Výsledky ukazují póry na konci drah (obr. 2-14), které vznikly bržděním laseru. Součást vyrobená v orientaci XY obsahovala póry na bočních stranách (obr. 2-14 a). V součásti orientované ve směru osy Z byla porozita na všech stranách (obr. 2-14 b). Rozmístění pórů bylo způsobeno orientací součásti. Tato porozita sloužila jako iniciátor trhliny kvůli její poloze pod povrchem součásti, což bylo důvodem lomu.

Vznik porozity na konci drah laseru byl také pozorován v práci od Thijs et al. [17]. Byl použit prášek **AlSi10Mg** k výrobě vzorků ve tvaru krychle o délce hrany 15 mm.

Autoři uvedli, že póry vznikly působením vysoké teploty na taveninu na konci drah laseru, což odpovídá tvrzením autorů Kempen et al. [16]. Navíc bylo zjištěno, že se jedná o tzv. „keyhole“ póry, které vznikají roztavením oxidační vrstvy na okrajích návaru (kap. 2.1.2), přičemž tyto výpary byly zachyceny v materiálu.

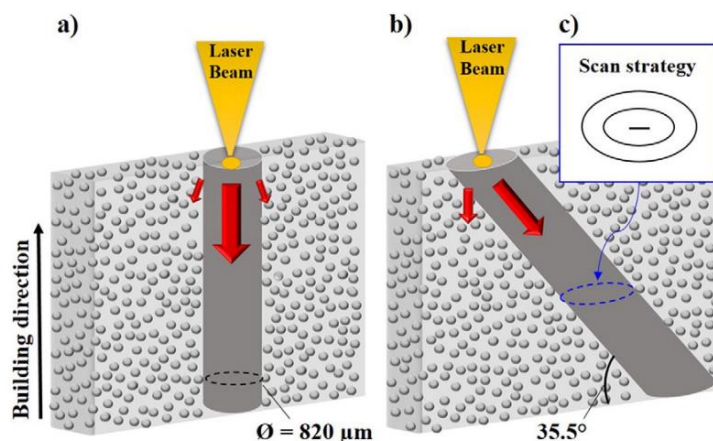


obr. 2-14 Porozita na konci drah laseru (a) orientace součásti v XY; (b) orientace součásti v Z [16]

Podpovrchová porozita je nebezpečná kvůli jejímu umístění, protože může sloužit jako iniciátor trhliny. Možným řešením, jak tomuto problému zamezit, je mechanické odstranění horní vrstvy materiálu. To ale není možné u mikro-prutové struktury, která je tvořena pruty malého průřezu. Nabízí se ale vhodnější řešení v podobě změny strategie laseru, která omezí počet zastavení laseru. Jednou z takových strategií je právě contour strategie.

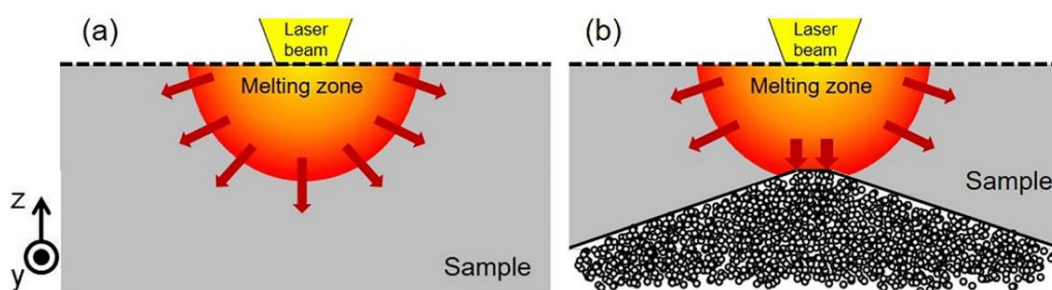
Dalším problémem je rozdílný odvod tepla u mikro-prutových struktur a objemového materiálu. Ten byl více popsán ve vědeckém článku od Delroisse et al. [18], kteří se zabývali vlivem odvodu tepla na porozitu prutů se sklonem 90° a $35,5^\circ$ (typických pro BCCZ mřížku).

U vertikálně orientovaných prutů (obr. 2-15 a) je většina tepelné energie odváděna skrze vyrobený materiál. To je dáno především teplotním gradientem, který směřuje dolů a také vyrobeným materiálem, který má větší tepelnou vodivost než okolní prášek (malé stykové plochy mezi zrny prášku). U skloněných prutů (obr. 2-15 b) je také většina tepelné energie odváděna přes plný materiál, avšak orientace prutu je rozdílná se směrem teplotního gradientu, což zpomaluje samotný odvod tepla. Z tohoto důvodu je vyráběná oblast prutu držena delší dobu na vyšší teplotě a část tepelné energie se přenáší do okolního prášku i přes jeho menší tepelnou vodivost.



obr. 2-15 Rozdílný odvod tepla (a) kolmý prut; (b) prut se sklonem 35,5°; (c) použitá „Contour“ strategie [18]

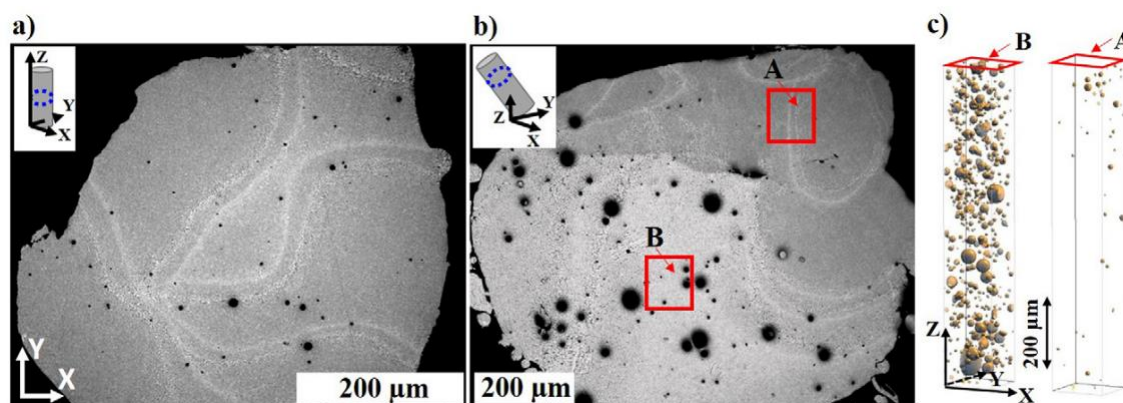
Rozdílným odvodem tepla se také zabývali Liu et al. [19], kteří použili materiál AlSi10Mg pro výrobu vzorků navržených tak, aby bylo možné pozorovat chování materiálu při různých sklonech vzorků. Rozdílný odvod tepla byl pozorován v horní části uzlu struktury (obr. 2-16 a), kde je tepelná energie odváděna rychleji přes vyrobený materiál. To má za následek vyšší rychlost chladnutí a rychlejší tuhnutí. Ve spodní části uzlu (obr. 2-16 b) dochází k odvodu tepelné energie částečně přes prášek a ve větší míře do stran vyrobeného materiálu. Rychlost odvodu tepla je nižší a součást tak tuhne pomaleji. Tento jev může mít za následek natavení zrn prášku na spodní část uzlu a vznik pórů.



obr. 2-16 Rozdílný odvod tepla v uzlu struktury (a) v horní části; (b) ve spodní části [19]

Jak bylo popsáno v předchozích studiích, rozdílný odvod a akumulace zbytkové tepelné energie má vliv na koncentraci porozity a rozdílnou mikrostrukturu ve spodní části prutů. Tím se zabývali Delroisse et al. [18], kteří použili materiál AlSi10Mg, **LP** 250 W, **LS** 571 mm·s⁻¹, **HD** 150 µm a tloušťka vrstvy byla nastavena na 60 µm. Použita byla contour strategie (obr. 2-12 a). Byly vyrobeny pruty se sklonem 90° a 35,5°.

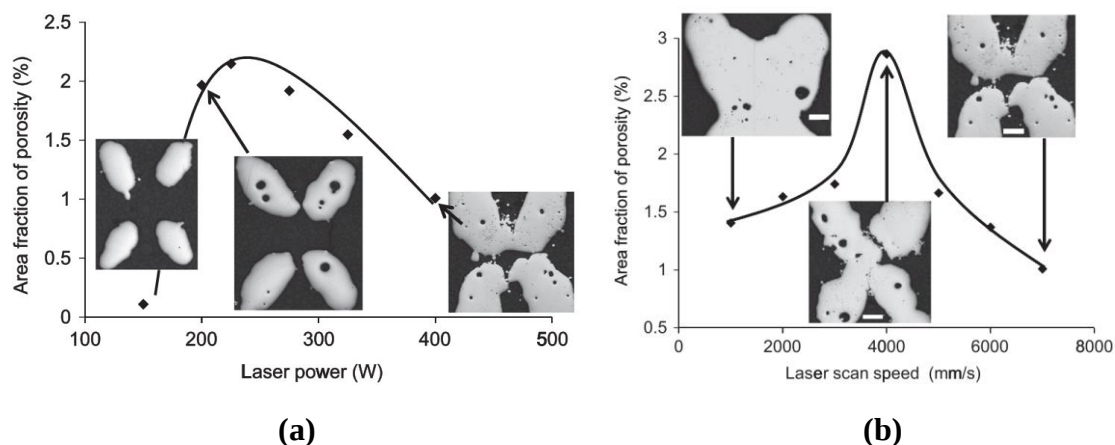
Výsledky ukazují rozdílnou porozitu u vertikálních a skloněných prutů (obr. 2-17 a, b). U prutů postavených ve vertikálním směru byla porozita 0,4 % a mikrostruktura byla homogenní (obr. 2-17 a). U prutů postavených se sklonem 35,5° byly zjištěny dvě oblasti s různou mikrostrukturou. V horní části prutu (obr. 2-17 b-A) byla mikrostruktura s menšími buňkami, ve které byla naměřena porozita 0,1 % (obr. 2-17 c-A). Ve spodní části prutu byla mikrostruktura s většími buňkami (obr. 2-17 b-B) a porozitou 3,7 % (obr. 2-17 c-B). Zvýšenou porozitu ve spodní části prutu (oblast B) autoři přisuzují delšímu setrvání spodní části prutu na vyšší teplotě. To vede ke zvýšení teploty už roztavených vrstev. Tím je materiál vypařen a vznikají tak vodíkové (převážně), nebo argonové póry uzavřené v materiálu. Při zvyšující se teplotě roste počet vodíkových pórů.



obr. 2-17 Rozdílná porozita v prutech (a) vertikální prut; (b) prut se sklonem 35,5°; (c) srovnání porozity v oblasti A a B [18]

Porozitou v mikro-prutových strukturách se dále zabývali Qiu et al. [14]. Byly použity stejné procesní parametry jako při měření průměrů prutů (strana 25). Porozita byla měřena v buňkách struktury BCC.

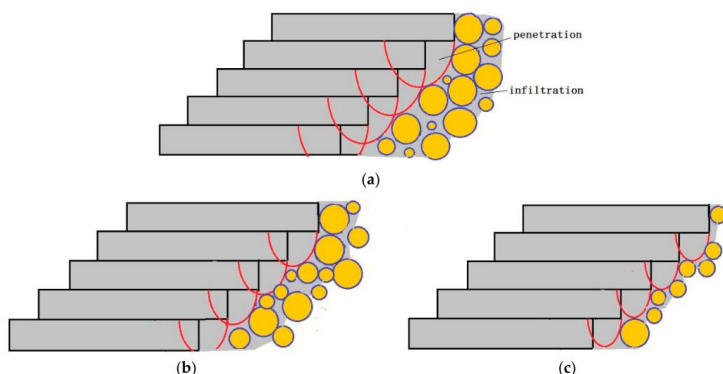
Při konstantní hodnotě **LS** a zvyšujícím se **LP** (obr. 2-18 a) docházelo k růstu porozity až do **LP** 200 mm·s⁻¹. Vyšší hodnoty **LP** vedly ke snížení porozity a tvorbě kulatějších pórů, což je výhodné při zatěžování. Při konstantní hodnotě **LP** a zvyšující se **LS** se porozita ve strukturách zvyšovala (obr. 2-18 b), až dosáhla maximální hodnoty při **LS** 4000 mm·s⁻¹, poté došlo k opětovnému snížení porozity.



obr. 2-18 Závislost množství porozity (a) na LP; (b) na LS [14]

Sklon prutů v mikro-prutové struktuře ovlivňuje nejenom porozitu, ale také drsnost povrchu. Což potvrdili Han et al. [13], kteří se zabývali vlivem **LS** na drsnost povrchu v horní a spodní části prutových vzorků (obdélníkový průřez). Použitý prášek byl AlSi10Mg.

Drsnost povrchu ve spodní části prutových vzorků byla ovlivněna průvarem laseru, který tvoří „schodišťový efekt“. Ten je typický u aditivních technologií, kde jsou součásti vyráběny vrstvu po vrstvě (obr. 2-19). Avšak větší vliv na drsnost povrchu mělo zatékání taveniny mezi zrna prášku. Když byla energie působící na prášek vysoká, tak tavenina zůstala delší dobu na vyšší teplotě, což vedlo k její dobré smáčivosti a tekutosti. Proto více taveniny zateklo do mezer mezi zrna prášku. To vedlo k výrobě prutů s nižší drsností povrchu na spodní straně (obr. 2-19 a). Snížení energie působící na prut vedlo k snížení tekutosti taveniny, a to způsobilo zvýšení drsnosti povrchu (obr. 2-19 b). Při velmi nízké energii byla drsnost povrchu nejvyšší (obr. 2-19 c). Použití nízké energie pro výrobu skloněných prutů vede k zhoršení drsnosti povrchu, ale zlepšení rozměrové přesnosti díky malému průvaru laseru.

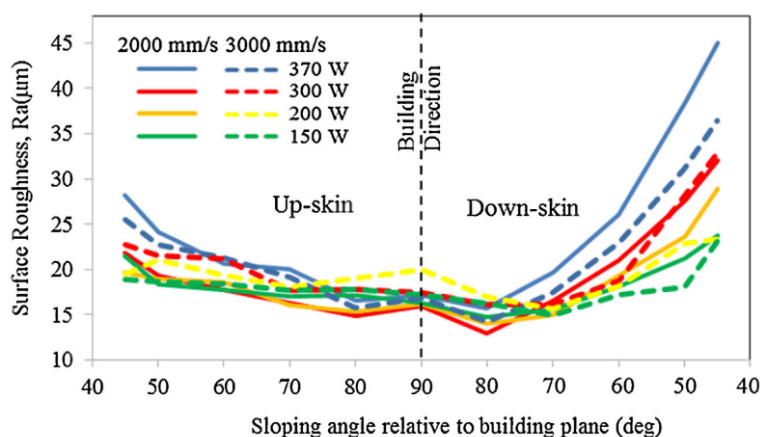


obr. 2-19 Schéma vlivu průvaru a zatékání taveniny na drsnost povrchu při působení energie (a) vysoké; (b) střední; (c) nízké [13]

Horších výsledků v drsnosti povrchu na spodní části prutových vzorků bylo také dosaženo ve studii od Tian et al. [7], kteří použili slitinu Hastelloy X. Zabývali se srovnáním drsnosti povrchu v horní a spodní části prutu při použití různých kombinací **LP** a **LS**.

Drsnost povrchu ve spodní části prutu dosahovala vyšších hodnot, než drsnost povrchu v horní části prutu (obr. 2-20). Z grafu je patrné, že drsnost povrchu se zvyšuje s větším sklonem součásti. To souvisí s odvodem tepelné energie z prutu, jak bylo uvedeno v předchozích studiích.

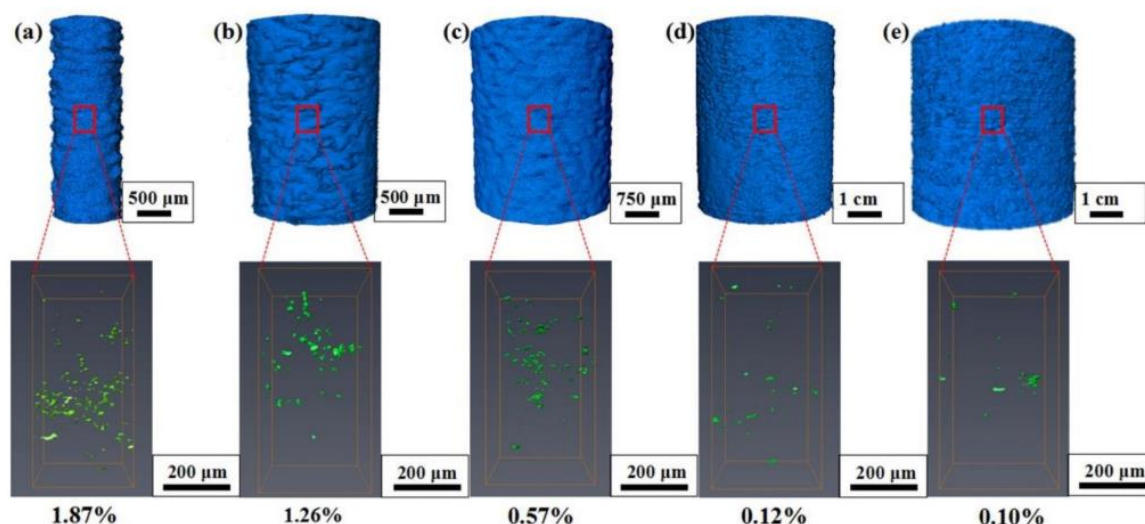
Autoři uvádí, že snížení drsnosti povrchu je možné vhodným nastavením velikosti průvaru odpovídajícímu tloušťce vrstvy. V reálných aplikacích by však nedošlo k dostatečnému spojení vrstev, což by snížilo pevnost vyráběných součástí.



obr. 2-20 Závislost drsnosti povrchu na sklonu prutů v horní část prutu (vlevo) a ve spodní část prutu (vpravo) [7]

Dosažené výsledky mohou být značně rozdílné při použití různých průměrů prutů. Touto problematikou se zabývali Dong et al. [20], kteří zkoumali vliv rozdílného průměru prutů na porozitu a drsnost povrchu. Byl použit materiál AlSi10Mg. **LP** byl nastaven na 370 W, **LS** 1500 mm·s⁻¹, **HD** 190 μm, tloušťka vrstvy byla 30 μm. Bylo vyrobeno 5 vzorků o průměrech 1 mm až 5 mm.

Bylo zjištěno, že se zvyšující se velikostí prutů klesá jejich porozita (obr. 2-21). Tento jev je způsoben větším množstvím energie působící na prut. U prutu s malým průměrem může dojít k nedostatečnému roztavení prášku a tvorbě pórů. S rostoucí velikostí prutu roste i počet drah a ty poskytují větší energetické vstupy do prutu.

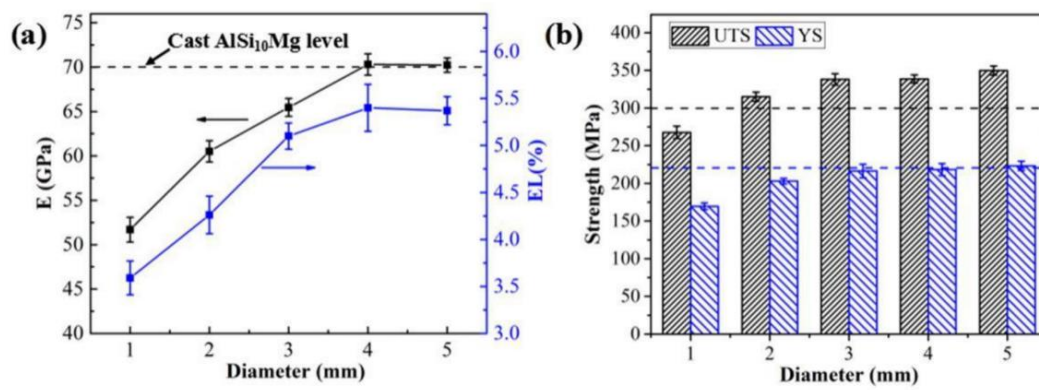


obr. 2-21 Vliv různých průměrů prutů na porozitu (a) 1 mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm [20]

Dále autoři vyrobili tahové vzorky o shodných průměrech a procesních parametrech jako v předchozím testu. Přičemž vzorek s průměrem 5 mm je standartní pro tahové testy objemového materiálu a sloužil tak k porovnání výsledků.

Výsledky získané z jednoosých tahových zkoušek jsou uvedeny na obr. 2-22. Z prvního grafu (obr. 2-22 a) lze stanovit modul pružnosti (**E**) a prodloužení (**EL**). Z druhého grafu (obr. 2-22 b) lze vyčíst mez pevnosti v tahu (**UTS**) a mez kluzu (**YS**) v závislosti na průměru tahových vzorků. V grafech jsou viditelné značné rozdíly mechanických vlastností v důsledku změny velikosti testovacích těles. Tělesa o průměru 4 mm a 5 mm dosáhly ~ **E** 70 GPa, **EL** 5,5 %, **UTS** 345 MPa a **YS** 220 MPa. Tělesa s průměrem vyšším než 4 mm mají mechanické vlastnosti konstantní. Při průměru tělesa 1 mm výrazně poklesly mechanické vlastnosti, konkrétně **E** a **EL** o více než 30 % a **UTS** a **YS** přibližně o 24 %.

Autoři uvádějí jako příčinu poklesu mechanických vlastností zvýšenou porozitu a neroztavené částice na povrchu těles s malým průměrem. Proto je nutné se zabývat výrobou prutů o průměru nižším než 4 mm.



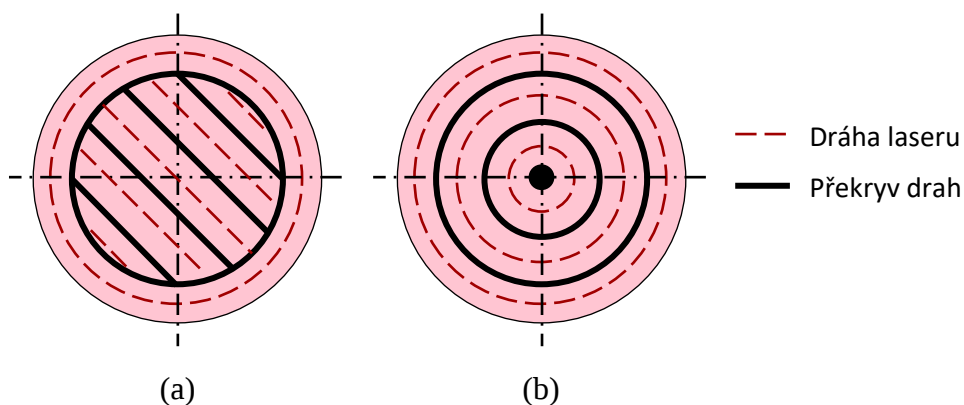
obr. 2-22 Vliv velikosti prutů na mechanické vlastnosti (a) E , EL ; (b) UTS , YS [20]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Jak vyplývá z předchozí rešerše, výrobní strategie pro výrobu objemových dílů z materiálu AlSi10Mg je velmi dobře popsána. Samotní výrobci prášků uvádějí doporučené procesní parametry a skenovací strategii (obr. 3-1 a) pro výrobu objemových dílů. Ta je tvořena jednou drahou laseru na obvodu a objem je vyšrafován. To vede k výrobě objemových dílů s nízkou porozitou. Avšak použitím této strategie pro výrobu mikro-prutových struktur dochází ke vzniku imperfekcí (porozita, drsnost povrchu) vlivem malého objemu materiálu (pruty s malým průměrem). Neexistují tak doporučené procesní parametry a skenovací strategie pro výrobu mikro-prutových struktur.

Jednou z nabízených možností, jak zlepšit materiálové vlastnosti mikro-prutových struktur tvořených pruty malého průřezu je změna skenovací strategie, aby byla výhodnější pro geometrii prutů. Tou je právě contour strategie, která je tvořena soustřednými drahami laseru v objemu prutu (obr. 3-1 b). Ta při vhodném nastavení procesních parametrů umožňuje zlepšit materiálové vlastnosti mikro-prutových struktur [15].



obr. 3-1 (a) obecná objemová strategie, (b) contour strategie

Použití contour strategie pro výrobu mikro-prutových struktur vyžaduje vhodné nastavení procesních parametrů, aby se zamezilo vzniku imperfekcí u malých průměrů prutu. To, díky rozdílné trajektorii drah laseru, vede k použití odlišných procesních parametrů než u objemové strategie.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Rozdíl mezi objemovým materiálem a prutem byl uveden v práci od Dong et al. [20]. Autoři porovnávali porozitu a drsnost povrchu u prutů s průměrem od 1 mm do 5 mm. Bylo zjištěno, že s nižším průměrem prutu roste porozita a drsnost povrchu. Následně byly vzorky o stejném průměru testovány na tahové zkoušce. Z výsledků (obr. 2-22 a) vyplývá, že pruty s průměrem vyšším než 4 mm lze považovat za objemový materiál. Zároveň (obr. 2-22 b) však byla naměřena u prutů s průměrem 3 mm a 4 mm téměř shodná mez pevnosti v tahu (UTS) a mez kluzu (YS). Vzorky s nižším průměrem vykazují nižší mechanické vlastnosti v závislosti na konkrétním průměru prutu. Proto jsou v práci uvažovány pruty o průměru do 3 mm.

Jednou z možností, jak zlepšit materiálové vlastnosti prutů je použití vhodné skenovací strategie. Její vliv ukázali Pauly et al. [15], kteří porovnávali tři různé skenovací strategie. Použití objemové strategie u prutů vedlo ke vzniku většího množství pórů (obr. 2-13 c,d), nebo ke vzniku velkých a ostrých pórů (obr. 2-13 e,f), které mohou sloužit jako iniciátory trhliny. Použití contour strategie vedlo k redukci množství pórů, které navíc měly příznivý kulatý tvar. Další výhodou contour strategie je redukce počtu drah laseru. Thijs et al. [17] uvedli, že na začátku a na konci drah laseru vznikají póry. Ty jsou způsobeny delší expozicí laseru při jeho zpomalení na konci dráhy, materiál absorbuje větší množství tepelné energie, což vede k odpaření některých prvků materiálu. Právě tyto výpary jsou při tuhnutí taveniny v materiálu uzavřeny ve formě pórů. Contour strategie se tedy jeví jako vhodná volba při výrobě mikro-prutových struktur.

Pruty, které tvoří mikro-prutovou strukturu mají odlišné výrobní podmínky než objemový materiál. Proto je nutné upravit nastavení procesních parametrů SLM, k čemuž slouží níže popsané experimenty (jednotlivé návary, překryv drah laseru). Základním experimentem je test jednotlivých drah laseru, kterým je možné získat velké množství dat. Ty umožní určit vhodné procesní parametry na základě parametrů jediné dráhy, což bylo popsáno v článcích [4–8]. Aboulkhair et al. [4] a Yu et al. [5] popsali vliv výkonu laseru (**LP**) a skenovací rychlosti (**LS**) na šířku dráhy. Bylo zjištěno, že se šířka dráhy zvětšuje s rostoucím **LP** a klesající **LS**. Zhang et al. [6] a Aboulkhair et al. [4] rozdělili dráhu na návar a průvar. Návar ovlivňuje výšku nanesené vrstvy a průvar ovlivňuje spojení s předchozí vrstvou. Tian et al. [7] se zabývali měřením kontaktního úhlu. Bylo zjištěno, že kontaktní úhel větší než 90° vede k výrobě návarů s „balling“ efektem, který negativně ovlivňuje porozitu. Na jednotlivých návarech je také možné zjistit, zda daná kombinace procesních parametrů zajišťuje stabilní výrobu objemových dílů. To bylo popsáno v práci od Kempen et al. [8], kde bylo zobrazeno okno vhodných procesních parametrů (obr. 2-5). To vymezuje oblast procesních parametrů, ve které je možné stabilně vyrábět objemové díly. Rozmezí je dáno rozsahem lineární energie (vzorec 1), která spojuje výkon laseru a skenovací rychlost. Z rešerše v této oblasti vyplývá, že základní test jednotlivých drah laseru umožňuje získat široký přehled o vhodných kombinacích procesních parametrů. Zároveň je možné z něj získat šířku dráhy, která je důležitá pro výrobu contour strategií. Dále je výhodné používat lineární energii, která spojuje dva základní procesní parametry (**LP** a **LS**).

Další důležitý parametr je vzdálenost drah laseru (**HD**). Autoři [9–11] se zabývali vlivem **HD** na porozitu. Bylo zjištěno, že velká **HD** vede k vzniku pórů mezi drahami, protože nedojde ke spojení sousedních drah. Zároveň příliš nízká **HD** vede ke vzniku pórů vlivem vypařování materiálu. Louvis et al. [10] popsali chování hliníkové slitiny, ta na okraji dráhy vytváří oxidační vrstvu (obr. 2-8), která brání smáčivosti taveniny. Aby došlo ke spojení sousedních drah je nutné působit na materiál dostatečně vysokou energií, která dokáže oxidační vrstvu znovu roztavit. V literatuře je mnoho informací o působení **HD** na proces SLM, avšak není zde uvedena konkrétní **HD**, kterou by bylo možné použít. Proto je nutné se zabývat rozsahem **HD** pro různé procesní parametry, která povede k výrobě dílů s nízkou porozitou.

Mikro-prutové struktury jsou tvořeny pruty o malém průměru a malém objemu materiálu. Díky této geometrii, dochází k přestupu tepelné energie do okolního prášku (obr. 2-15) i přesto, že jeho koeficient přestupu tepla je výrazně nižší než u plného materiálu, což uvedli autoři [18, 19]. U skloněných prutů je tepelná energie hlavním iniciátorem vzniku porozity, protože ve spodní části prutu dochází k její akumulaci, což podporuje tvorbu porozity vlivem vypaření materiálu. Právě ve skloněných prutech proto vznikají dvě rozdílné části (obr. 2-17 *b-A,B*). Horní část skloněného prutu (*A*) se vyznačuje menší porozitou. Ve spodní části skloněného prutu (*B*) je zvýšená porozita kvůli vyšší teplotě, která se zde vyskytuje, protože prášek nemůže odvést dostatečné množství tepelné energie. Vliv **LP** a **LS** na porozitu v buňkách BCC byl popsán v práci od Qiu et al. [14]. Bylo zjištěno, že pouze v určitém rozsahu **LP** a **LS** je možné vyrábět buňky BCC s nízkou porozitou. Tyto hodnoty však mohou být ovlivněny odvodem tepla v uzlu buňky, jak uvedli Liu et al. [19]. Ve spodní části uzlu totiž dochází k přestupu tepelné energie přes prášek (obr. 2-16), což opět vede k akumulaci tepelné energie a vzniku pórů. Kvůli geometrii mikro-prutové struktury je nutné nejprve určit vhodnou oblast procesních parametrů pro výrobu prutů s nízkou porozitou a drsností povrchu. Zároveň je potřeba zabývat se jak vertikálními, tak skloněnými pruty díky rozdílnému odvodu tepla, který u nich nastává. Vertikální a skloněné pruty také tvoří různé typy buněk (BCCZ, FCCZ) a jsou tak hodně používány.

Vyšší teplota ve spodní části prutů má také vliv na drsnost povrchu. Han et al. [13] uvedli dva možné jevy, které zvyšují drsnost povrchu na spodní straně skloněných vzorků (obr. 2-19). Jedním jevem je samotná teplota taveniny. Při vyšší teplotě má tavenina větší tekutost, a tak dokáže lépe zatékat mezi zrna prášku, což vede ke vzniku nižší drsnosti povrchu. Při menší teplotě, a tedy tekutosti taveniny vzniká vyšší drsnost povrchu, protože tavenina jen částečně zateče k zrnům prášku. Druhým jevem je „schodišťový efekt“, který je typický pro aditivně vyráběné součásti. Vliv sklonu vzorků na drsnost povrchu uvedli Tian et al. [7], kteří zjistili, že vyšší úhel sklonu vzorku vede ke zhoršení drsnosti povrchu ve spodní části (obr. 2-20). Nízká drsnost povrchu je u mikro-prutových struktur důležitá, protože po vyrobení ji není možné jednoduše snížit. Vysoká drsnost povrchu také vede k nepřesným rozměrům prutů. Vzhledem k tomu, že struktura BCC je tvořena pruty se sklonem $35,26^\circ$ je předpokládána zvýšená drsnost povrchu na spodní straně prutů. Ta by měla být nižší u parametrů s vyšší energií vlivem nižší viskozity taveniny, která zateče mezi zrna prášku.

Dosažení přesného průměru prutu je důležité pro výpočet MKP (metoda konečných prvků) analýz, které pracují s přesným rozměrem prutů. Tím se zabývali Qiu et al. [14], kteří chtěli vyrobit prut o průměru 0,3 mm. Tento průměr byl vyroben jen jednou kombinací procesních parametrů. Další kombinace vedly k vyrobení rozdílného průměru prutu (obr. 2-11). Obecně lze říct, že vyšší vstupní energie vedla k vyrobení prutu s větším průměrem. Lze tedy předpokládat, že použitím contour strategie a nízké energie bude možné vyrobit pruty o velmi malém průměru s dobrou rozměrovou přesností. Proto budou do výroby zařazeny vzorky, které tento předpoklad ověří.

3.3 Podstata a cíl diplomové práce

Podstatou této diplomové práce je výzkum základních procesních parametrů pro SLM výrobu BCC mikro-prutové struktury a vytvoření závislosti těchto hlavních parametrů na vstupní energii a použitém průměru prutu. Získané poznatky budou dále použity pro vývoj skriptu, který bude sloužit jako nástroj pro návrh vhodných procesních parametrů pro dosažení požadovaných vlastností mikro-prutové struktury.

Hlavní cíl práce:

- Získání závislostí materiálových vlastností (porozita, drsnost povrchu) a rozměrové přesnosti na procesních parametrech ve vhodném rozsahu procesních parametrů při použití „Contour“ strategie a různých průměrů prutů (od 0,6 mm do 3 mm)

Dílčí cíle práce:

- Určení rozsahu procesních parametrů pro výrobu mikro-prutových struktur
- Návrh experimentů pro získání SLM procesních parametrů (šířka dráhy, vhodná vzdálenost drah laseru, překryv drah) pro výrobu mikro-prutových struktur contour strategií
- Návrh testů pro zjištění vlivu procesních parametrů na porozitu a drsnost povrchu
- Určení závislostí porozity a drsnosti povrchu na velikosti prutů
- Použití získaných poznatků k tvorbě skriptu, který umožní výběr vhodných procesních parametrů podle vstupních požadavků (porozita, drsnost povrchu)

V práci jsou stanoveny vědecké otázky, které vyplývají z řešerše v návaznosti na téma výroby mikro-prutových struktur contour strategií:

- Je možné používat jednotnou vzdálenost drah laseru?

V literatuře se ve velké míře objevuje jednotná vzdálenost drah laseru, se kterou autoři dále pracují. Jak ale bylo uvedeno, šířka dráhy se s různými procesními parametry mění a tím by se měla měnit i vzdálenost drah laseru.

- Je možné pomocí contour strategie zlepšit materiálové vlastnosti (porozita, drsnost povrchu) oproti prutům vyrobeným objemovou strategií?

V literatuře většina autorů používá právě objemovou strategii pro výrobu mikro-prutové struktury. Ta však vede ke zvýšení porozity a drsnosti povrchu především u prutů malého průměru (menší než 2 mm). Je proto nutné ověřit možnost použití contour strategie především u těchto průměrů.

- Je možné vyrábět pruty do průměru 1 mm s přesným rozměrem s pomocí contour strategie?

V literatuře autoři uvádí, že je možné vyrábět pruty s průměrem menším než 1 mm. Dochází však ke značným odchylkám od požadovaného rozměru, protože vyrobené pruty bývají často mnohem větší, než je jejich nominální velikost. Je proto nutné ověřit výrobu menších průměrů prutů, které mohou být použity například při topologické optimalizaci.

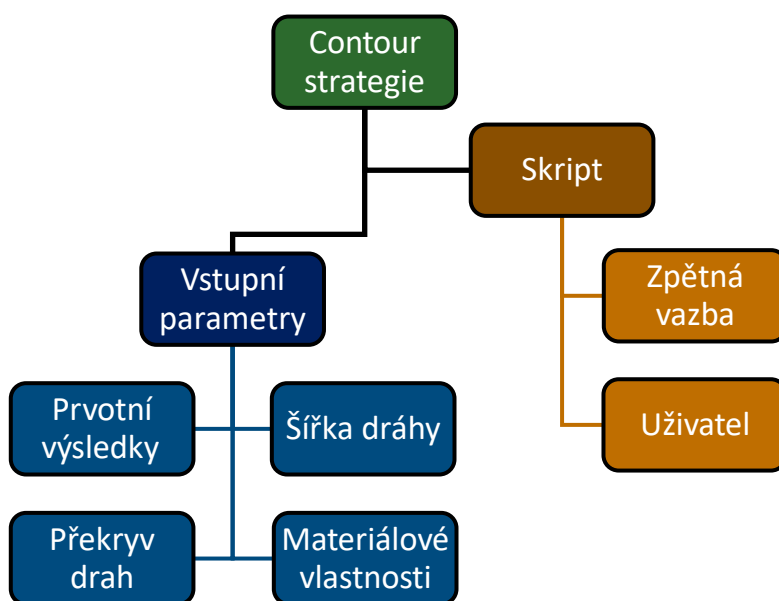
Přínosem diplomové práce je rozšíření základního poznání v oblasti mikro-prutových struktur vyrobených contour strategií. Popis jevů vyskytujících se při výrobě mikro-prutových struktur a vytvoření unikátního skriptu, který bude sdružovat dosažené výsledky a s jejich využitím umožní uživateli navrhnout vhodné procesní parametry pro výrobu mikro-prutový struktur s požadovanými materiálovými vlastnostmi.

4 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ METODY

V této kapitole je uveden způsob řešení a technologie, které byly použity při řešení diplomové práce. Také jsou zde popsány experimenty, které byly navrženy s ohledem na výsledky současného stavu poznání a předchozího výzkumu [21].

4.1 Postup řešení

Průběh řešení diplomové práce je schematicky zobrazen na obr. 4-1. Byly použity základní experimenty, které byly identifikovány v současném stavu poznání. Tyto experimenty byly dále modifikovány, aby odpovídaly situaci při výrobě „nízko objemového“ strukturovaného materiálu. Při návrhu experimentů byly identifikovány důležité parametry contour strategie, které byly použity při tvorbě skriptu. Ten umožní výběr a návrh vhodných procesních parametrů. Uživatel zadá parametry contour strategie (**LP**, **LS**, **OL**, průměr prutu), které budou korigovány pomocí skriptu. Skript tyto informace ověří, popřípadě dá uživateli zpětnou vazbu ve formě doporučených procesních parametrů.

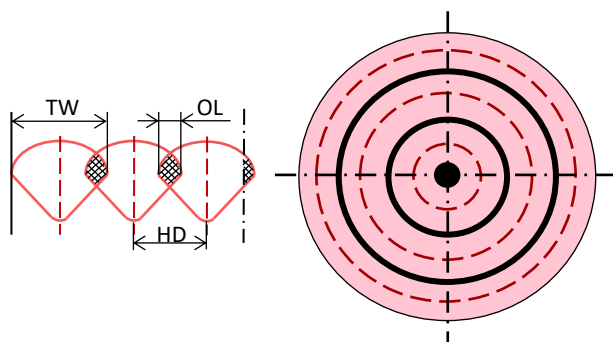


obr. 4-1 Postup řešení

4.2 Parametry experimentů

SLM proces je definován desítkami procesních parametrů, které ovlivňují výslednou kvalitu vyrobených komponent. Proto je nutné identifikovat hlavní parametry, které umožňují řídit proces výroby contour strategií. Z rešerše vyplývá, že většina autorů se zabývá vlivem výkonu laseru (**LP**), skenovací rychlostí (**LS**), překryvem drah (**OL**), výškou vrstvy prášku a skenovací strategií [5, 9, 10, 12, 13, 16, 18–20]. Tyto procesní parametry mají významný vliv na kvalitu vyráběných součástí. V této práci bude zkoumán především vliv **LP**, **LS** a **OL**. Jako stavební materiál bude použit prášek AlSi10Mg, tloušťka vrstvy bude nastavena na 50 μm a bude použita contour skenovací strategie, která je tvořena drahami laseru ve formě soustředných kružnic (obr. 4-2).

Tyto návary tvoří jednoduchou geometrii, kterou je možné popsat pomocí základních rovnic. Jde tak stanovit přesná délka trajektorií a na jejím základě je možné určit vstupní energii působící na prut. Ta se vypočítá jako lineární energie $\cdot$ délka dráhy laseru. Navíc v contour strategii nedochází k velkému množství zastavení laseru na začátku a na konci drah, což omezuje vznik pórů z důvodu přetavení materiálu [17]. Contour strategie je tedy vhodná pro výrobu mikro-prutových struktur, což bylo potvrzeno autory [15, 18, 21].

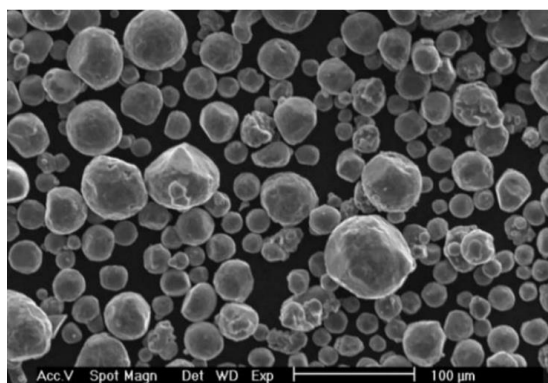


obr. 4-2 (a) contour strategie – červeně dráha laseru, černě okraje dráhy

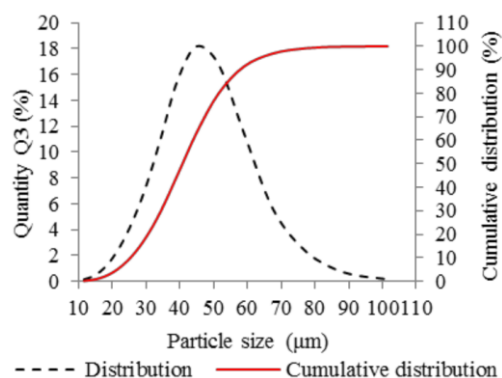
4.3 Prášek AlSi10Mg

Použitým práškem byl AlSi10Mg od firmy TLS Technik GmbH, který je vyráběn atomizací plynem v atmosféře dusíku. Prášek má sférická zrna (obr. 4-3 a). Rozložení velikosti zrn prášku bylo analyzováno přístrojem Horiba LA-960 (obr. 4-3 b). Zjištěné parametry: střední velikost zrn 41,41 μm , medián 40,7 μm a standartní odchylka 12,9 μm . Zrna o velikosti 25,2 μm představují 10 % a zrna do velikosti 58 μm představují 90 % rozložení velikostí zrn prášku. Prášek je tedy možné použít na nanášení vrstvy 50 μm [21].

Před každým testem bylo nutné prášek přesát, aby byla oddělena natavená zrna prášku. K tomu bylo použito prosévací zařízení PSM 100, které je vybaveno sítím o velikosti ok 0,035 mm. Následně byl prášek sušen po dobu cca 10 hodin na 70 °C před testem, aby z něj byla odstraněna přebytečná vlhkost, která způsobuje vznik pórů.



(a)



(b)

obr. 4-3 (a) zobrazení zrn prášku pod mikroskopem; (b) rozložení velikosti zrn v prášku [21]

4.4 Použitá zařízení a postupy

4.4.1 SLM 280 HL

Zařízení SLM 280 HL (obr. 4-4) funguje na principu aditivní technologie, kde je nanášena tenká vrstva prášku, která je selektivně tavena vysoce výkonným laserem. [22]

Při výrobě vzorků byla použita ochranná atmosféra dusíku. Byla použita platforma o velikosti 100 x 100 x 180 mm. Tato velikost platformy zaručuje relativně stabilní podmínky cirkulace vzduchu a rozložení tepla na platformě v zařízení SLM. Prášek byl nanášen v obou směrech a teplota platformy byla 150 °C. Proces výroby byl nastaven v programu Materialise Magics, který společně s post procesorem slouží k přípravě dat do výroby. Z procesních parametrů byl měněn **LP** v rozsahu 175–400 W, **LS** v rozsahu 200–2000 mm·s⁻¹. Dále byla měněna vzdálenost jednotlivých drah od sebe (**HD**). Z důvodu rozdílného času výroby jednotlivých vrstev byla nastavena časová prodleva na každou vrstvu 15 sekund. Ta zaručí jednotné podmínky pro různý počet vzorků na platformě.



obr. 4-4 Zařízení SLM 280 HL [22]

4.4.2 ATOS Triple Scan III

ATOS Triple Scan III využívá technologie 3D skenování, která slouží k nedestruktivnímu měření rozměrové přesnosti součástí. Skener je vybaven projekční jednotkou, která je založena na principu „Blue Light“, kde je vysílána proužková projekce na skenovaný objekt za použití úzkopásmového modrého světla. Dráhy paprsků obou kamer a projektoru jsou předem kalibrovány, proto je možné vypočítat 3D polohu povrchových bodů.

Vzhledem k velikosti vzorků byla použita optika MV60 (rozlišení 17 μm), která umožňuje naskenovat oblast o velikosti 38 mm² na jeden snímek, přičemž vzdálenost naskenovaných bodů je 0,01 mm. Pro lepší kvalitu naskenovaných dat byl na vzorky nanesen titanový prášek TiO₂, který zmatnil jejich povrchu, což vedlo k zamezení vlivu lesklého povrchu, který není možné skenovat.

K další práci s naskenovanými daty byl použit software GOM Inspect, ve kterém byla data digitalizována pomocí možnosti „more detailed“. Zároveň v něm byla vyhodnocena drsnost povrchu a rozměrová přesnost. [23]

4.4.3 Phoenix v|tome|x L 240

Zařízení Phoenix v|tome|x L 240 pracuje na principu μCT (Micro Computed Tomography). Emituje rentgenové paprsky, které prochází vzorkem a ty jsou zaznamenány detektorem. Vzorek se následně otáčí po zlomcích stupně, dokud nedosáhne otočení 180°, nebo 360°. Projekční obrazy jsou pak zpracovány softwarem, který zrekonstruuje celkový 3D objekt s vnitřními vadami. Na základě μCT lze získat rozložení a velikost pórů v součásti. [24]

Vzhledem k velikosti vzorků bylo možné použít nanofokusovou trubici s napětím 130 kV, proudem 100 μ A a 0,5 mm širokým měděným filtrem. Vzhledem k vysokému počtu prutů bylo snímáno více vzorků v jednom měření najednou, na kterých bylo získáno lineární voxelové rozlišení 16 μ m. Naměřená data byla zrekonstruována a vyhodnocena v programu VGStudio MAX 3.1. Byla tak získána procentuální hodnota vnitřní porozity v prutech. Následně byly vzorky převedeny s použitím vysokého rozlišení do STL formátu pro vyhodnocení porozity povrchu a rozměrové přesnosti. K tomu byl využit program GOM Inspect.

4.4.4 Keyence VHX-6000

Digitální mikroskop Keyence VHX-6000 je vybaven objektivem Z250R se zoomem 250 x až 2500 x. Zařízení dokáže pořizovat plně zaostřené snímky z libovolného úhlu a měřit tak objekty jak ve 2D, tak ve 3D.

Při měření parametrů návaru a snímání metalografických vzorků bylo použito nejmenší zvětšení 250. Proto musel být jeden snímek vzorku složen z více skenů. Pro vyhodnocení bylo použito jak 3D měření, kterým byla měřena výška návaru, tak 2D měření, které sloužilo pro získání parametrů návaru (kap. 4.7.1).

4.4.5 Příprava metalografických výbrusů

Metalografické výbrusy jsou základní metodou vyhodnocení materiálu. Jde o velmi přesnou, nicméně časově velmi náročnou metodu. Další nevýhodou je, že je možné vzorky/metalografické výbrusy analyzovat pouze v jednom průřezu.

Nejprve byly vzorky zality tvrdnoucí hmotou do tvaru puku, který umožňuje použití automatického broušení na brusce. Byla použita tvrdnoucí hmota EpoKwick, která se míchá v hmotnostním poměru 44:10 pryskyřice a tvrdidla. Výhodou této zalévací hmoty je její dostatečná tvrdost a dobrá zatékavost, která byla využita zejména při výbrusech vzorků tvořených jednou drahou, kde uprostřed prutu vnikala neprotavená oblast o průměru do 0,2 mm. Špatná zatékavost zalévací hmoty ovlivňuje přesnost vyhodnocených výsledků v důsledku uvolňování částic prášku při broušení. Po zalití byly vzorky umístěny do vakuové komory po dobu 10 min, aby byly zbaveny vzduchových bublin v zalévací hmotě. Po vakuování vzorek tvrdnul 2 hodiny.

Vzorky byly dále zpracovány na brusce a leštičce Saphir 250 A2-ECO od firmy Advanced Metallography. Příprava metalografických výbrusů se skládá z několika kroků, které jsou časově náročné. Jedná se především o broušení, dále potom leštění a leptání. V závislosti na typu vzorku byly pro broušení použity brusné papíry se zrnitostí 300–4000 a lešticí pasty s velikostí zrn 3 μ m a 1 μ m. Tím byl povrch vzorků zbaven všech nerovností vzniklých při broušení. Následně byly určité vzorky naleptány, aby bylo možné rozeznat hranice návaru.

Po vybroušení a vyleštění vzorků byly metalografické výbrusy nasnímány na mikroskopu KEYENCE, který umožňuje vyhodnocení analyzovaných parametrů.

4.5 Popis experimentů

Použité experimenty je možné rozdělit do dvou skupin. První skupina experimentů byla navržena pro získání základních procesních parametrů contour skenovací strategie. Druhá skupina experimentů sloužila k ověření získaných poznatků na geometrii prutu reprezentující mikro-prutové struktury.

V první skupině byly použity tyto experimenty:

- Iniciační experimenty – návarový experiment + skloněné pruty
- Test geometrie návaru
- Test šířky dráhy tenkých stěn
- Text šířky dráhy prutových vzorků 1T
- Experiment pro zjištění vhodného rozsahu překryvu drah laseru

Pro ověření poznatků uvedených v současném stavu poznání byly navrženy iniciační experimenty. Návarový experiment byl použit pro ověření vlivu výkonu laseru (**LP**) a skenovací rychlosti (**LS**) na návar. Byla tak získána závislost šířky dráhy na lineární energii ($E_{lin} = LP/LS$) procesních parametrů. Tato závislost byla využita při návrhu skloněných prutů, které reprezentují mikro-prutové struktury. Ty byly navrženy pro ověření vlivu lineární energie a rozdílného překryvu drah laseru (**OL**) na porozitu a drsnost povrchu. Výsledkem iniciačních experimentů byl rozsah lineární energie, který vedl k výrobě skloněných prutů s nízkou porozitou a drsností povrchu.

Vybraný rozsah lineární energie byl použit při návrhu testu geometrie návaru. Tento experiment vedl k ověření rozsahu lineární energie na základě poznatků z rešerše. Také na něm byla měřena šířka dráhy, která byla ovlivněna vyrobenou destičkou, na kterou byly návary umístěny. Ta zvýšila rychlost odvodu tepelné energie, který neodpovídal situaci v mikro-prutových strukturách. Proto byl navržen test šířky dráhy tenkých stěn. Ten odpovídá odvodu tepelné energie, protože jsou tenké stěny tvořeny malým objemem materiálu a obklopeny práškem (menší tepelná vodivost). Aby bylo možné porovnat i vliv geometrie, byly vyrobeny prutové vzorky 1T tvořené jednou drahou laseru, které odpovídají jak odvodem tepelné energie, tak geometrií mikro-prutovým strukturám. Jsou tvořeny jednou drahou laseru po obvodu prutu a umožňují tak ověřit vliv průměru prutu na šířku dráhy. Vzhledem k tomu, že se šířka dráhy měnila v závislosti na průměru prutu a použité lineární energii, byla použita analýza Response surface, která z těchto výsledků vytvořila trojrozměrný model. Pro získání rozsahu vhodného **OL** byly použity prutové vzorky 2T tvořené dvěma drahami laseru.

Z první skupiny experimentů byl získán vhodný rozsah lineární energie pro výrobu mikro-prutových struktur. Dále byla zjištěna závislost šířky dráhy na lineární energii a průměru prutu. Z té byl vytvořen trojrozměrný model pomocí analýzy Response surface, který umožnil získat šířku dráhy na základě lineární energie procesních parametrů a průměru prutu. Byl také určen vhodný rozsah **OL**. Tyto výsledky byly použity při návrhu dalších experimentů.

V druhé skupině byly použity tyto experimenty:

- Experiment pro ověření volby procesních parametrů
- Experiment pro porovnání vlivu směru výroby contour strategie
- Experiment pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface
- Experiment pro ověření vhodného nastavení procesních parametrů

V experimentu pro ověření volby procesních parametrů byla pro návrh šířky dráhy použita závislost šířky dráhy na průměru prutu pro konkrétní lineární energii. Byl použit směr výroby „Outside-in“, který byl primárně nastaven pro tuto strategii. U prutů většího průměru docházelo ke vzniku ostrých pórů. Proto byl navrhnout experiment pro porovnání vlivu směru výroby contour strategie, kde byl použit směr výroby „Inside-out“. Ten snížil počet ostrých pórů. V experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface, tak byl použit směr výroby „Inside-out“. Šířka dráhy vycházela z analýzy Response surface, aby se ověřilo její možné použití. Výsledky ukázaly velmi nízké hodnoty porozity, ale v některých případech navržené parametry způsobily vznik pórů v ose prutu vlivem nízkého **OL** uprostřed prutu. Proto byl navržen experiment pro ověření vhodného nastavení procesních parametrů, kde byl **OL** v celém prutu sjednocen.

4.6 Iniciační experimenty

Na základě současného stavu poznání byly identifikovány základní experimenty, které slouží k popisu procesu SLM. Jedná se především o návarový experiment a prutový experiment. Ty umožňují popis vlivu procesních parametrů (**LP**, **LS**, **OL**) na kvalitu materiálu. Proto byl navržen experiment, ve kterém jsou použity jak návary, tak pruty. Ten zohledňuje mikro-prutovou geometrii a umožňuje získat velké množství informací ve velkém rozsahu procesních parametrů za krátký čas.

4.6.1 Návarový experiment

Základním testem (obr. 4-5 a) je návarový experiment [4–8]. Vzhledem k velkému počtu vzorků, bylo prvním krokem vizuální posouzení kontinuity dráhy. Dalším měřeným parametrem byla šířky dráhy, která je důležitý vstupní parametr pro výrobu součástí pomocí contour strategie. Vzhledem k tomu, že je rozdílná pro různé kombinace procesních parametrů, je možné z ní určit minimální výrobitelný průměr prutu. Na jejím základě lze také určit procesní parametry, které v průřezu prutu zaručí vhodný překryv drah.

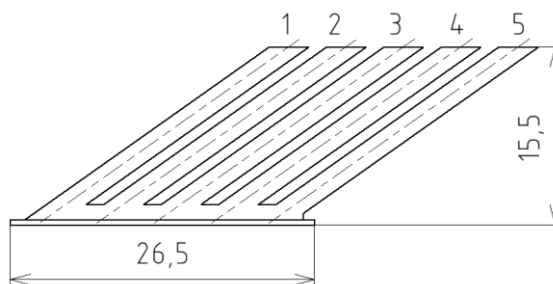
Vzhledem k možnostem zařízení SLM 280 HL a informacím získaným v současném stavu poznání byly vybrány procesní parametry v širokém rozsahu **LP** 175–400 W a **LS** 200–2000 mm·s⁻¹ (Příloha 1). Tyto procesní parametry odpovídají rozsahu lineární energie $E_{lin} = 0,175 - 1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ (vzorec 1). Celkem tak bylo vybráno 120 kombinací procesních parametrů.

Jednotlivé návary byly umístěny na destičku o tloušťce 5 mm. Aby nedocházelo k ovlivnění sousedních návarů, byla nastavena mezera mezi návary 1 mm. Každý návar byl vyroben jak ve směru, tak proti směru proudění atmosféry v komoře. Naměřené hodnoty obou návarů byly průměrovány, aby byl do výsledků zanesen vliv výparů vznikajících tavením prášku laserem.

Kontinuita návaru byla vizuálně hodnocena na snímcích pořízených na mikroskopu Olympus. Na jejich základě byly nekontinuální návary vznikající při nízké energii vyraženy. Snímky byly také použity pro měření šířky dráhy a na základě získaných informací byly stanoveny závislosti.



(a)



(b)

obr. 4-5 (a) foto jednotlivých návarů; (b) vzhled prutového vzorku skloněného o 35,26°

4.6.2 Skloněné pruty

Z literatury vyplývá, že výsledky se liší v závislosti na geometrii použitých vzorků. Aby bylo možné vyhodnotit chování u tenkostěnných vzorků, byly použity skloněné pruty (obr. 4-5 b). Ty odpovídají situaci v buňce BCC, kdy je prut skloněn pod úhlem $35,26^\circ$. To umožnilo simulovat reálné podmínky a získat tak přesné výsledky.

Porozita

Hlavní imperfekcí vznikající při výrobě součástí technologií SLM je porozita. Jedním z rychlých a efektivních způsobů měření porozity je použití metalografických výbrusů. Tím je možné v jednom průřezu vzorku naměřit i velmi malé póry a získat tak představu o množství porozity v celém vzorku.

Byly použity skloněné pruty ($35,26^\circ$) o průměru 2 mm odpovídají geometrií mikroprutovým strukturám.

Vzhledem k sofistikovanějšímu vyhodnocení byly vybrány reprezentativní vzorky. Celkem tak bylo vybráno 17 sad procesních parametrů. V rozsahu **LP** 225–400 W, **LS** 400–2000 mm·s⁻¹ a lineární energie 0,175–0,7 J·mm⁻¹ (Příloha 2). Byl použit **OL** 0 %, 25 %, 50 % vycházející z šířky dráhy naměřené v návarovém experimentu (kapitola 4.6.1). Celkem bylo vyrobeno 51 prutů.

Na metalografických snímcích byla měřena porozita v programu ImageJ.

Drsnost povrchu

Další imperfekcí v procesu SLM je drsnost povrchu. Ta je zvýšena především na spodní straně skloněných vzorků [7, 13]. Vysoká drsnost povrchu také může způsobit vznik trhliny přímo na povrchu součásti při jejím namáhání. Proto je nutné se drsností povrchu zabývat a minimalizovat ji.

Pro měření drsnosti povrchu byly použity shodné vzorky jako v přechozím experimentu.

K vyhodnocení byl použit optický skener ATOS Triple Scan III. Na naměřených datech byla vyhodnocena porozita pomocí programu GOM Inspect. Detailní postup je popsán v kapitole 4.9.4.

Z návarového experimentu byla získána závislost šířky dráhy na lineární energii. Na skloněných prutech byla naměřena závislost porozity a drsnosti povrchu na lineární energii pro různé hodnoty **OL**. Na základě těchto výsledků byl určen rozsah lineární energie 0,25–0,4 J·mm⁻¹, který byl použit v dalších experimentech.

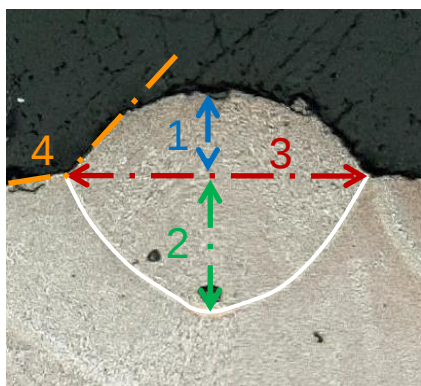
4.7 Rozšiřující experimenty

Na základě výsledků iniciačního experimentu, který vedl k určení perspektivní oblasti procesních parametrů, bylo potřeba se na tuto oblast více zaměřit. Proto byly použity vzorky, které více popisují chování mikro-prutových struktur. Zároveň byly použity sofistikovanější metody vyhodnocení.

4.7.1 Test geometrie návaru

Původní iniciační experiment neumožňoval měření všech parametrů návaru, jak je popsáno v literatuře. Proto byl navrhnut tento experiment, který umožní analyzovat všechny parametry návaru. [4, 6–8]. Na základě naměřené geometrie je možné určit, zda jsou vybrané rozsahy procesních parametrů vhodné pro výrobu mikro-prutových struktur.

Parametry geometrie návaru jsou: výška návaru (obr. 4-6 1), hloubka průvaru (2), šířka dráhy (3) a kontaktní úhel (4). Výška návaru se v procesu SLM značně mění. To způsobuje nanesení rozdílné tloušťky vrstvy prášku, které může vést k neprotavení zrn prášku, a tedy ke vzniku porozity. Hloubka průvaru je důležitá pro dostatečné spojení drah s předchozí vrstvou. Šířka dráhy ovlivňuje vstupní energii procesu, proto je důležitá pro tvorbu součástí bez pórů. Díky kontaktnímu úhlu je možné odhalit parametry, u kterých dochází k „balling“ efektu. Ten způsobuje vznik porozity.

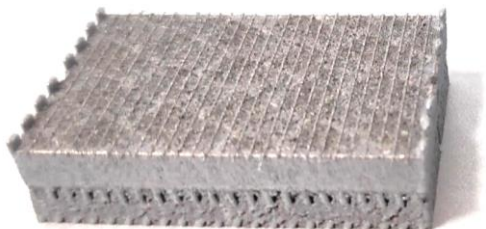


obr. 4-6 Parametry dráhy

Pro tento experiment byly vybrány procesní parametry, které jsou uvedeny v Příloha 3. Celkem bylo vybráno 28 kombinací procesních parametrů. Na základě výsledků z iniciačního experimentu (kap. 5.1) byl použit rozsah lineární energie $0,25 - 0,4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$. Rozsah **LP** 200–350 W a rozsah **LS** 500–1400 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Jednotlivé návary byly umístěny na destičku, viz. kapitola 4.6.1 (obr. 4-7).

Experiment byl použit pro ověření vybraného rozsahu lineární energie. Šířka dráhy byla měřena se shora na mikroskopu KEYENCE. Ostatní parametry geometrie návaru byly měřeny na metalografických výbrusech. Aby bylo získáno více hodnot z metalografických výbrusů byl vzorek uprostřed rozdělen na dvě poloviny, které byly následně zpracovány.



obr. 4-7 Návary umístěné na destičce

4.7.2 Test šířky dráhy tenkých stěn

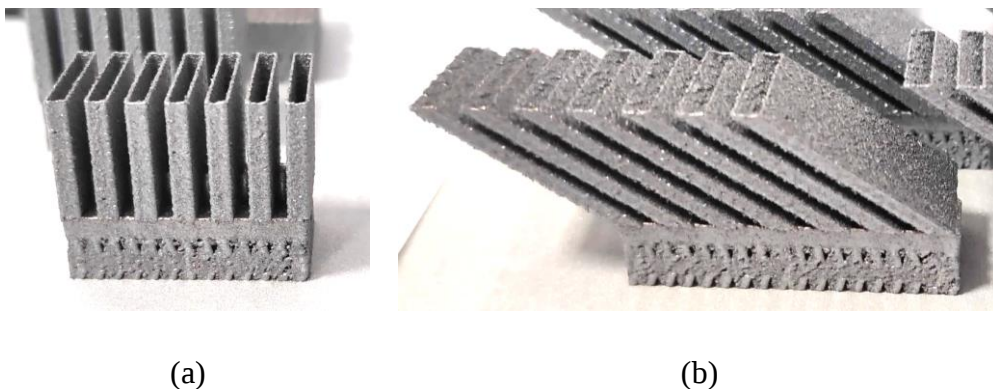
Z rešerše vyplývá, že rozdílný odvod tepla u objemových a tenkostěnných těles má zásadní vliv na jejich kvalitu [20]. V předchozím experimentu byly analyzované návary umístěny na destičku, tedy objemové těleso, které významně ovlivnilo odvod tepla z návarů. Zatímco tenkostěnná tělesa, na která je práce zaměřena, jsou tvořena malým objemem materiálu, který je obklopen práškem. Ten má horší tepelné vlastnosti a značně tak omezuje odvod tepla z tenkostěnných těles. To ovlivňuje především jejich parametry, mezi kterými je i šířka dráhy.

Aby bylo možné určit vliv odvodu tepla a vrstvení návarů na sebe byl navrhnut test tenkých stěn. Ty jsou tvořeny jednou drahou laseru vrstvenou na sebe. Byly vyrobeny jak vertikální (obr. 4-8 a), tak skloněné tenké stěny (obr. 4-8 b), které reprezentují sklon v buňce BCC ($35,26^\circ$).

Vzorky byly navrženy jako obdélníky vyráběné jednou konturou. Tím byly vyrobeny dvě tenké stěny vedle sebe. Jedna byla vyráběna ve směru proudění atmosféry a druhá proti směru (kap. 4.6.1). Vzdálenost stěn od sebe byla u kolmých prutů 1,5 mm a u šikmých prutů 2 mm. Tak bylo zaručeno, že nedojde k tepelnému ovlivnění sousedních stěn.

Pro výrobu těchto vzorků byly použity shodné procesní parametry jako v předchozím testu geometrie návarů (Příloha 3).

Šířka dráhy tenkých stěn byla měřena na snímcích metalografických výbrusů pořízených na mikroskopu KEYENCE.



obr. 4-8 Vzorek (a) vertikálních; (b) skloněných tenkých stěn

4.7.3 Test šířky dráhy prutových vzorků 1T (one track)

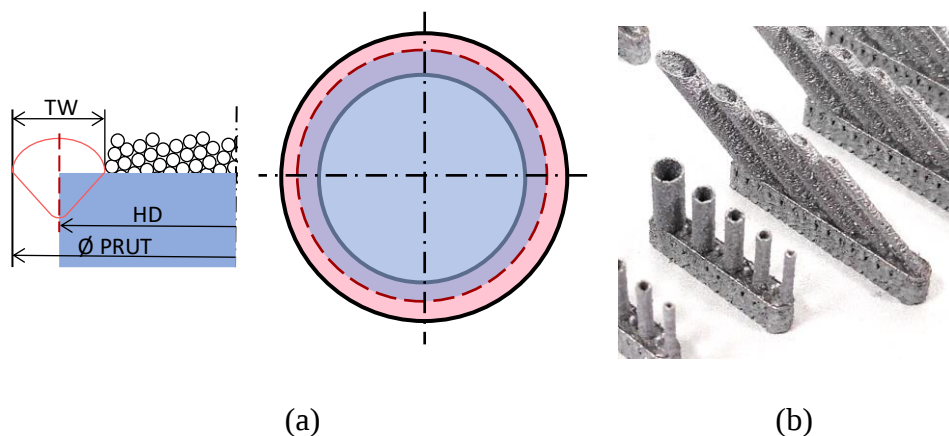
Podle literatury [20] má významný vliv na kvalitu mikro-prutových struktur také použitý průměr prutů. Proto byl stanoven předpoklad, že průměr prutů bude mít vliv i na šířku dráhy. Aby bylo možné tento předpoklad ověřit, bylo nutné navrhnout nové vzorky 1T.

Prutový vzorek 1T je tvořen jednou drahou laseru po obvodu prutu (obr. 4-9 b), proto střed trajektorie laseru odpovídá vzdálenosti drah laseru (obr. 4-9 a-HD). Takto byly vyrobeny pruty ve dvou orientacích.

Celkem bylo vybráno 6 sad procesních parametrů (Příloha 4). Průměr trajektorie laseru byl zvolen v rozsahu 0,7–3 mm. Spodní hranice 0,7 mm byla zvolena na základě získaných výsledků, kde nejmenší vyrobitelný kompletně protavený prut měl průměr 0,6 mm. Horní hranice 3 mm byla zvolena ze studie [20], ze které vychází, že průměr prutu 4 mm lze považovat za objemový materiál.

K měření šířky dráhy byl použit mikroskop KEYENCE a měření bylo prováděno na snímcích metalografických výbrusů.

Z výsledků byla získána závislost šířky dráhy na lineární energii a průměru trajektorie laseru. Tyto hodnoty byly následně použity pro vytvoření trojrozměrného modelu pomocí analýzy Response surface, která umožní výběr šířky dráhy na základě lineární energie a průměru prutu.



obr. 4-9 (a) návrh prutového vzorku 1T; (b) vzhled vzorků

4.7.4 Experiment pro zjištění vhodného rozsahu překryvu drah laseru

V literatuře se nejčastěji při návrhu procesních parametrů používá konkrétní hodnota vzdálenosti drah laseru (**HD**), která je určena autory [9, 11]. Ta je jednotná pro všechny používané procesní parametry. Jak ale bylo zjištěno (kap. 5.2.2; kap. 5.2.3), šířka dráhy je rozdílná pro různé procesní parametry a různé průměry prutů, takže při použití jednotné **HD** je dosaženo různého překryvu drah laseru (**OL**). Proto byl zařazen experiment pro určení rozsahu překryvu drah laseru vhodného pro výrobu mikro-prutových struktur. Výpočet **OL**:

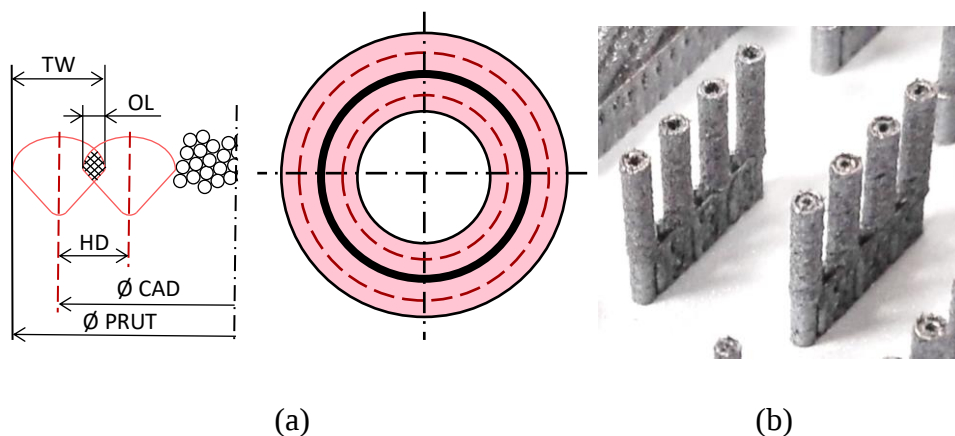
$$OL = 1 - \left(\frac{HD}{TW/100} \right) (\%) \quad (4)$$

, kde **OL** je překryv drah laseru (%), **HD** je vzdálenost drah laseru (mm), **TW** je šířka dráhy (mm).

Prutový vzorek 2T, je navržen jako modifikace 1T vzorku. Je tvořen dvěma sousedními drahami laseru (obr. 4-10 a). Byl navržen tak, aby bylo možné určit vhodný **OL** pro různé průměry prutu s použitím různých kombinací procesních parametrů. Vzorky byly vyrobeny ve vertikální orientaci.

Celkem byly vybrány 3 sady procesních parametrů, které reprezentují lineární energii v rozsahu 0,2–0,38 J·mm⁻¹. Průměry vnější dráhy laseru (obr. 4-10 Ø CAD) byly 0,8; 1,2; 1,6 a 2 mm. **OL** byl náhodně volen v rozsahu -10–65 % a byl počítán ze závislostí vnější a vnitřní šířky dráhy (obr. 5-6 a) získané z testu šířky dráhy prutových vzorků 1T.

Zjištění vhodného rozsahu **OL** bylo prováděno měřením porozity z metalografických výbrusů v programu ImageJ (kap. 4.6.2).



obr. 4-10 (a) schéma prutového vzorku 2T; (b) vzhled prutových vzorků 2T

Zpřesňující experiment pro zjištění vhodného překryvu drah laseru

Výsledky předchozího experimentu ukázaly, že perspektivní oblast je v rozmezí **OL** 20–60 %. Tato oblast však nebyla popsána dostatečným množstvím hodnot, proto ji bylo potřeba ověřit. Z tohoto důvodu byl navržen zpřesňující experiment.

Byly použity shodné vzorky s předchozím experimentem (obr. 4-10). **OL** byl nastaven v rozsahu 20–50 %, ve kterém byla naměřena nízká porozita. Jelikož se zvyšujícím se **OL** dochází ke zvýšení vstupní energie do prutu, byla horní hranice **OL** nastavena na 50 %. To vychází z informací uvedených v rešerši, kde vysoká energie působící na taveninu vedla ke vzniku „keyhole“ pórů (obr. 2-5; obr. 2-14). Byly použity shodné procesní parametry s předchozím experimentem.

OL byl vyhodnocen na základě naměřené porozity mezi drahami laseru z metalografických výbrusů v programu ImageJ (kap. 4.6.2).

Na základě výsledků experimentu byl stanoven rozsah **OL** 30–40 % jako vhodný pro výrobu mikro-prutových struktur.

4.8 Prutový experiment

V literatuře se pro ověření vhodnosti vybraných procesních parametrů používá měření porozity, drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti. Jako vzorky jsou použity jak vertikální, tak skloněné pruty, které reprezentují geometrii prutů v mikro-prutové struktuře (např. BCCZ). Aby bylo možné tyto pruty vyrobit, je potřeba nastavit procesní parametry důležité pro konkrétní skenovací strategii (contour). Ty byly získány na základě provedených experimentů popsáných výše.

4.8.1 Experiment pro ověření volby procesních parametrů

Na základě provedených experimentů byl navržen tento experiment. Byly použity pruty o průměru 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,25; 1,5; 2 a 3 mm. Pruty byly vyrobeny ve vertikální a skloněné (35,26°) orientaci (obr. 4-11).

Celkem bylo vybráno 5 sad procesních parametrů uvedených v Příloha 5. Šířka dráhy byla volena na základě rovnic rozdílné šířky dráhy naměřená na prutových vzorcích 1T (obr. 5-6 a). Tím byla zvolena rozdílná šířka dráhy pro různé procení parametry a průměry prutů. „Beam compensation“ (odsazení první dráhy od požadovaného průměru prutu) byla zvolena jako $\frac{1}{2}$ navrhované šířky dráhy, aby byl vyroben co nejpřesnější rozměr prutu. Byl použit směr „Outside-in“ contour skenovací strategie (obr. 4-12 a), který odpovídá základnímu nastavení SLM pro tuto strategii. Překryv drah laseru (**OL**) byl zvolen na základě prvotních výsledků experimentu pro zjištění vhodného překryvu drah jako hodnota 30 % z šířky dráhy pro konkrétní procesní parametry a průměr prutu (obr. 5-11 a). Celkem bylo vyrobeno 90 prutů.



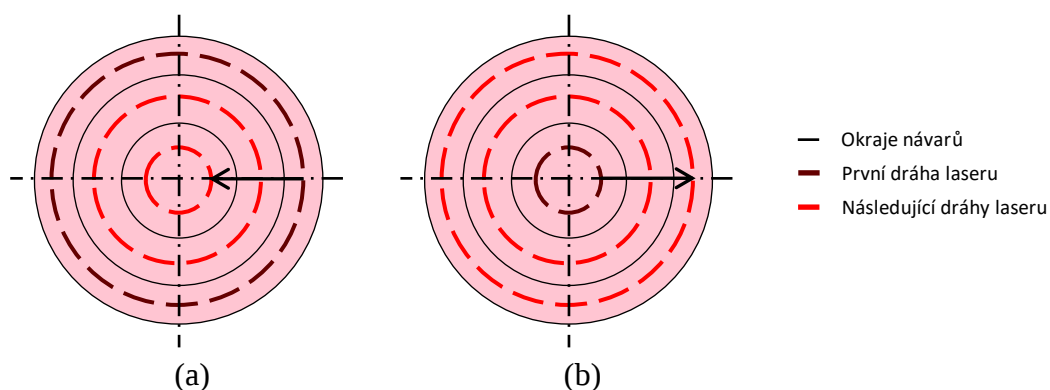
obr. 4-11 Pruty vyrobené v přehledovém experimentu I

Na vyrobených prutech byla vyhodnocována porozita na μ CT. Zároveň byla naskenovaná data převedena na STL a byl na nich měřen průměr prutu.

Výsledky ukázaly, že pruty většího průměru vedly ke vzniku ostrých pórů. Jednou z možných příčin byl použitý směr výroby „Outside-in“, proto byl navržen experiment pro porovnání vlivu směru výroby contour strategie, který tento vliv ověří.

4.8.2 Experiment pro porovnání vlivu směru výroby contour strategie

Jelikož se v předchozím experimentu u prutů o průměru větším než 1 mm vyskytovala „lack of fusion“ porozita (ostré póry), byl pro ověření vlivu směru výroby contour strategie zařazen tento experiment, který porovná směr výroby „Outside-in“ (obr. 4-12 a) a „Inside-out“ (obr. 4-12 b).



obr. 4-12 Porovnání směru výroby contour strategie (a) „Outside-In“; (b) „Inside-Out“

Byly vyrobeny pruty o průměru 1,25; 1,5; 2 a 3 mm na kterých bylo pozorováno vysoké množství ostrých pórů. Pruty byly vyrobeny ve dvou orientacích.

Byly použity procesní parametry odpovídající lineární energii $0,25 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$. Výkon laseru 225 W a skenovací rychlost $900 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Ty byly vybrány z důvodů nízké energie, u které se nejvíce vyskytovaly ostré póry. Pruty byly vyrobeny pomocí směru „Inside-out“, aby bylo možné porovnat rozdíly s předchozím experimentem. Šířka dráhy, překryv drah laseru a „beam compensation“ byly zvoleny shodně s předchozím experimentem. Celkem bylo vyrobeno 5 prutů.

K vyhodnocení vlivu směru výroby byla měřena porozita na CT.

Výsledky ukázaly, že použití směru „Inside-out“ vedlo k redukci ostrých pórů. Proto byl tento směr výroby použit při návrhu dalšího experimentu.

4.8.3 Experiment pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface

Tento experiment byl zařazen pro ověření získaných poznatků z předchozích experimentů. Bude tak možné určit, zda vybrané procesní a nastavení jsou vhodné pro výrobu mikro-prutových struktur.

Jako vzorky byly použity vertikální a skloněné ($35,26^\circ$) pruty (obr. 4-13). Průměry prutů byly v rozsahu 0,6–3 mm a byly shodné s předchozím experimentem (kap. 4.8.1).



obr. 4-13 Vyrobené pruty

Celkem bylo vybráno 5 sad procesních parametrů (Příloha 5), které odpovídají lineární energii v rozsahu $0,25\text{--}0,4\text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$. Z výsledků předchozího experimentu byla vybrána contour strategie „Inside-Out“, která vedla ke snížení množství ostrých pórů v prutech (kap. 5.4.1). Na základě zpřesňujícího experimentu pro zjištění vhodného překryvu drah byl **OL** zvolen 35 %. Tato hodnota vedla ke snížení porozity mezi dvěma drahami laseru (obr. 5-11 b). Šířka dráhy byla volena na základě výsledků získaných z analýzy Response surface (obr. 5-10), která popisuje vývoj šířky dráhy v závislosti na lineární energii a průměru prutu. Tím bude ověřena možnost použití této analýzy. „Beam compensation“ byla zvolena jako 1/3 šířky dráhy na základě výsledků předchozího experimentu (kap. 5.4.3), kde byly vyrobeny pruty s nižším průměrem, než byl nominální. Celkem bylo vyrobeno 90 prutů.

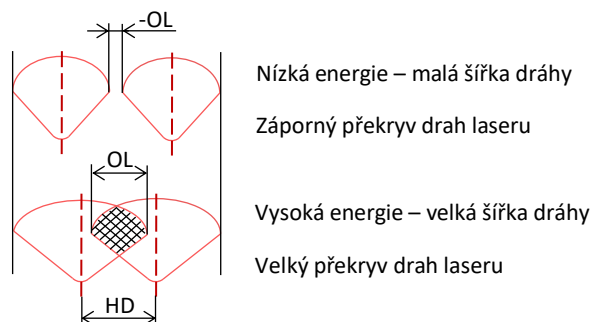
Porozita byla měřena na μCT . Ze skenů z μCT byla vytvořena STL data, která byla použita pro vyhodnocení velikosti prutů a měření drsnosti povrchu v programu GOM Inspect.

Z naměřených hodnot byly vytvořeny závislosti porozity, drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti na lineární energii a průměru prutu.

4.8.4 Experiment pro ověření vhodného nastavení procesních parametrů

Výsledky experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě Response surface ukázaly, že je možné vyrobit pruty s nízkou úrovní porozity. Avšak u některých prutů byla naměřena porozita v ose, která vznikla nedostatečným překryvem drah (**OL**) uvnitř prutu. Aby se zamezilo jejímu vzniku a zároveň se ověřila možnost použití různých procesních parametrů ve vybraném rozsahu lineární energie byl zařazen tento experiment.

Nedostatečný **OL** uvnitř prutu vzniká z důvodu nastavení procesních parametrů SLM, kde je vytvořen určitý počet drah laseru pro konkrétní průměr prutu na základě zadané vzdálenosti drah laseru (**HD**). Ta je počítána z šířky dráhy a zvoleného **OL** mezi jednotlivými drahami. Příkladem může být prut malého průměru (obr. 4-14), který je vyroben jednou drahou laseru. Nízká energie vede k tvorbě malé šířky dráhy, což je důvodem vzniku záporného **OL** uvnitř prutu. Nemůže zde být přidána další dráha, která by sice zápornému **OL** zabránila, ale vznikl by tak mnohem větší **OL**, který by způsobil přehřívání materiálu (vznik pórů). Při vyšší energii vzniká větší šířka dráhy, která způsobí větší **OL**, který vede ke kompletnímu protavení prutu.



obr. 4-14 Zobrazení vlivu různé šířky dráhy v prutu

Byly vyrobeny pruty ve dvou orientacích. Průměry prutů byly 0,6; 0,8; 1,25; 2 a 3 mm.

Návrh procesních parametrů probíhal na základě výsledků šířky dráhy z response surface (obr. 5-10) tak, aby byl v prutu jednotný **OL** 35 % (viz. předchozí kapitola). Jelikož šířka dráhy je závislá na lineární energii (vzorec 1), bylo potřeba stanovit pevný **LP**, ke kterému byla dopočítána **LS**. Byl vybrán **LP** 262,5 W, který odpovídá stření hodnotě výkonů laseru používané v práci a uvedené ve studii [21]. Druhá sada procesních parametrů byla stanovena na základě pevné **LS** a dopočítaného **LP**. Byla vybrána **LS** 950 mm·s⁻¹, která také odpovídá střední hodnotě **LS** v používaném rozsahu a uvedené ve studii [21]. Vznikly tak dvě sady procesních parametrů pro jednu orientaci prutů (Příloha 6). Celkem bylo vyrobeno 20 prutů.

Vyhodnocení porozity, drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti bylo provedeno jako v přechozím experimentu.

4.9 Metody vyhodnocení

V této kapitole je popsán postup vyhodnocení jednotlivých experimentů. Pro získání přehledu o kvalitě materiálu byly použity destruktivní metody jako jsou metalografické výbrusy. Pro získání materiálových vlastností byly použity nedestruktivní metody jako je μ CT. Pro získání představy o geometrii byly použity metody typu 3D skenování.

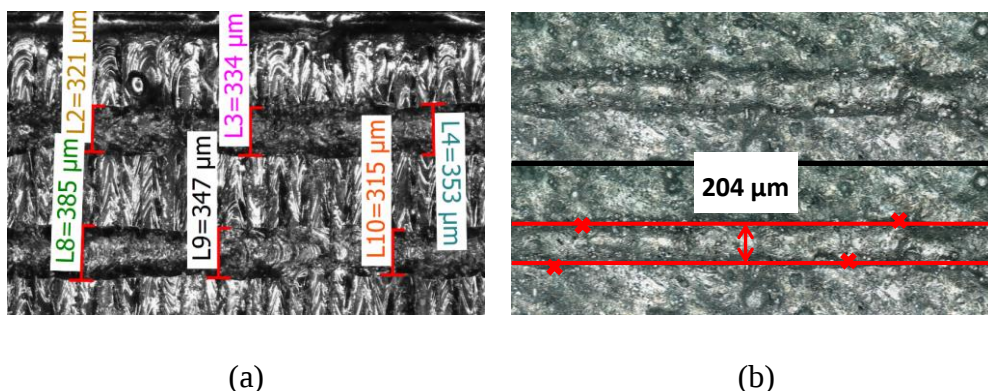
4.9.1 Postup vyhodnocení geometrie návaru

Geometrie návaru byla vyhodnocena na mikroskopu KEYENCE dvěma přístupy. Jedním z nich je měření parametrů na snímcích metalografických výbrusů 2D, kde byla měřena výška dráhy, kontaktní úhel a hloubka dráhy, kterou je možné získat pouze touto metodou (obr. 4-6). Druhým přístupem je použití 3D měření, kde byl vzorek nasnímán a vnikl tak 3D obraz, který umožnil měření parametrů návaru (výška dráhy, šířka dráhy). Výhodou měření z 3D obrazu je rychlejší získání dat a také získání statistické hodnoty napříč návarem. Zatímco metalografické výbrusy poskytují informaci v jednom místě, která je ale mnohem přesnější.

4.9.2 Vyhodnocení šířky dráhy

Iniciační experiment

Iniciační experiment byl zaměřen na vyhodnocení velkého množství vzorků, proto byla pro jeho vyhodnocení použita optická mikroskopie. Na základě pořízených snímků na mikroskopu (Olympus, Zoom 8x) byla měřena šířka návaru se shora (obr. 4-15 a). Ta byla měřena v pěti místech dráhy. Naměřené hodnoty byly průměrovány.

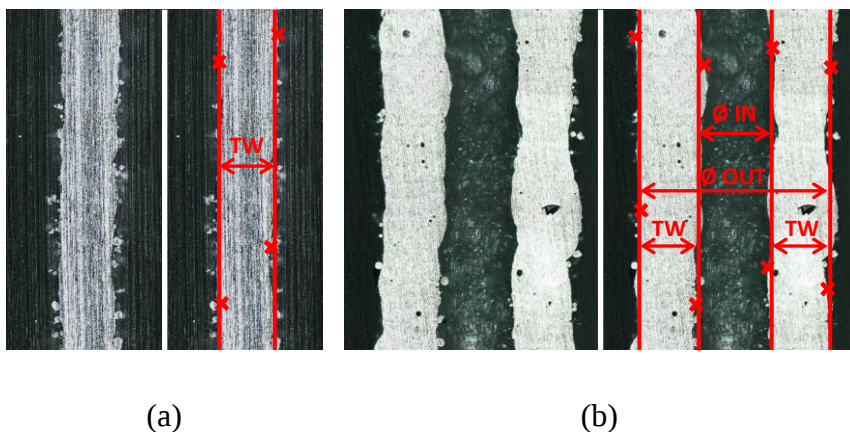


obr. 4-15 (a) měření šířky dráhy na mikroskopu Olympus; (b) měření šířky dráhy na mikroskopu KEYENCE

Rozšiřující experimenty

Šířka dráhy v rozšiřujících experimentech byla měřena pomocí mikroskopu KEYENCE. Na snímcích byl určen okraj návaru pomocí pěti bodů, kterými byla proložena přímka. Tento postup byl opakován na druhém okraji návaru. Následně byla zaznamenána střední vzdálenost obou přímek jako hodnota šířky návaru.

V testu geometrie návaru byla měřena šířka dráhy se shora (obr. 4-15 b). Šířka dráhy u tenkých stěn (obr. 4-16 a-TW) a prutových vzorků 1T (obr. 4-16 b-TW) byla měřena na snímcích metalografických výbrusů. Navíc byl u prutových vzorků měřen vnější a vnitřní průměr (obr. 4-16 b-Ø OUT; Ø IN).



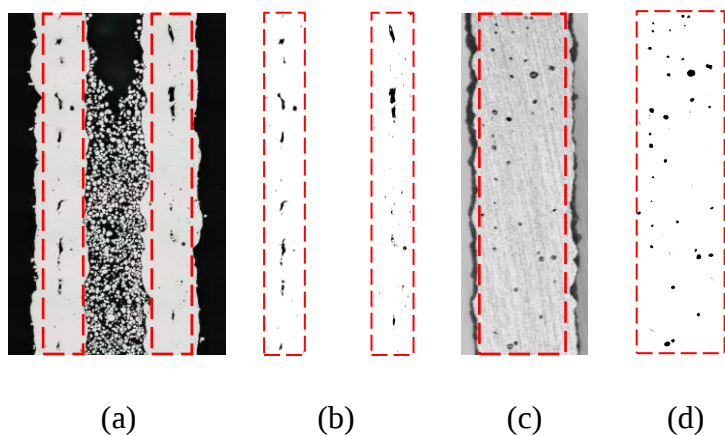
obr. 4-16 Měření šířky dráhy (a) tenkých stěn; (b) prutových vzorků 1T

4.9.3 Vyhodnocení porozity

Pro měření porozity byly použity dvě metody. První metodou je vyhodnocení porozity z metalografických výbrusů. Jedná se o poměrně přesnou metodu, kterou je možné odhalit i malé póry v materiálu. Nevýhodou je určení porozity pouze v jednom místě (řezu), a navíc je tato metoda destruktivní. Další použitou metodou je vyhodnocení vzorků na CT. Výhodou je především zobrazení pórů v celém objemu materiálu a nedestruktivnost metody. Nevýhodou je rozlišení, které je tisícinou maximálního rozměru skenovaného předmětu. Nemusí tak být zobrazeny nejmenší póry. Navíc se jedná o finančně nákladnou metodu.

Postup vyhodnocení porozity z metalografických výbrusů

Porozita byla měřena na metalografických výbrusech vzorků. Ty byly vybroušeny a následně vyleštěny, aby byly odstraněny rýhy po broušení a byla viditelná pouze samotná porozita (kap. 4.4.5). Na takto upravených vzorcích (obr. 4-17 a) byla měřena porozita ve vybrané oblasti v programu ImageJ. Kde byl použit monochromatický snímek, threshold byl nastaven na hodnotu 100, čímž byla zaručena opakovatelnost měření. Následně byla získána procentuální hodnota porozity (obr. 4-17 b-černá barva).

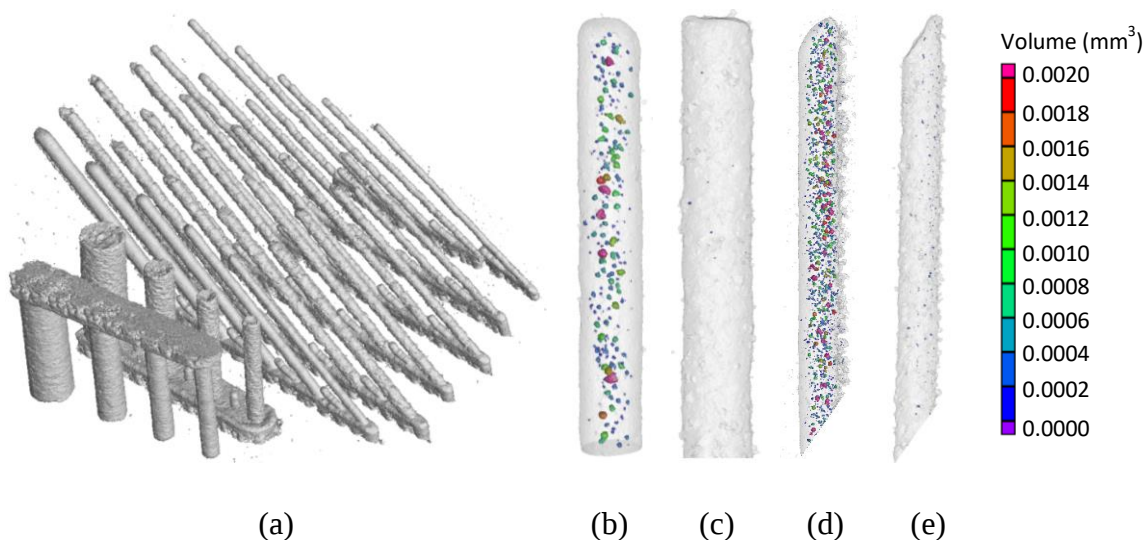


obr. 4-17 Snímek metalografického výbrusu (a) prutového vzorku 2T, (c) prutu; (b);(d) analyzovaná oblast

Tímto způsobem byla měřena porozita na prutových vzorcích 2T (kap. 4.7.4). V iniciačním experimentu byly pruty pouze vybroušeny (obr. 4-17 c) a byla na nich měřena porozita v celém objemu (obr. 4-17 d).

Postup vyhodnocení porozity na μ CT

Porozita byla měřena na zařízení Phoenix v|tome|x L 240, následně byla naskenovaná data zrekonstruována a vyhodnocena v programu VGStudio MAX 3.1. Zde byly naskenované vzorky (obr. 4-18 a) rozděleny na jednotlivé pruty, ve kterých byla vyhodnocena porozita (obr. 4-18 b, c, d, e). Byla zaznamenána procentuální hodnota porozity a byly vytvořeny snímky prutů.



obr. 4-18 (a) rozložení vzorků na jednom skenu; snímky prutů o průměru 1,25 mm (b); (c) vertikální; (d); (e) skloněné

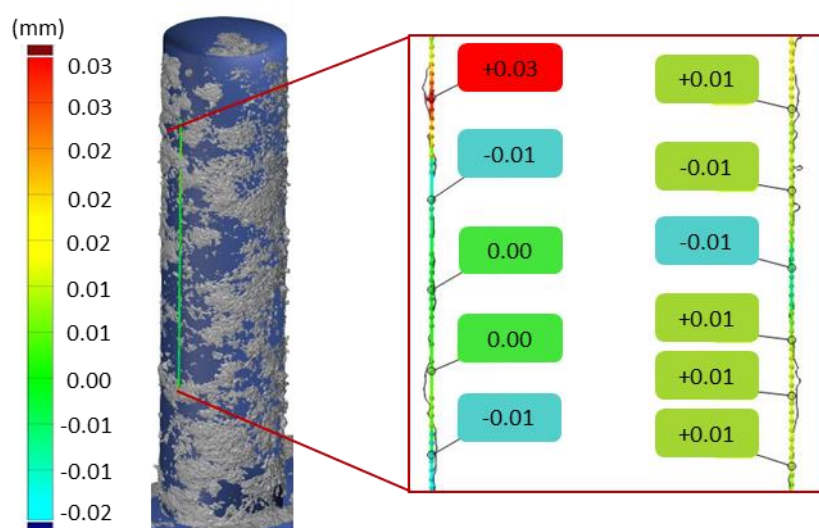
4.9.4 Vyhodnocení drsnosti povrchu

K vyhodnocení drsnosti povrchu byly použity dva přístupy. V prvním přístupu byly vzorky naskenovány na skeneru ATOS Triple Scan III, naměřená data byla digitalizována a byla na nich měřena drsnost povrchu v programu GOM Inspect. V druhém přístupu byla vytvořena STL data vzorků z měření na μ CT. Ta byla použita pro vyhodnocení drsnosti povrchu v programu GOM Inspect.

Postup vyhodnocení drsnosti povrchu

Drsnost povrchu v iniciačním experimentu byla vyhodnocována z dat pořízených na 3D skeneru. Jelikož byly jednotlivé pruty umístěny za sebe do jednoho vzorku (obr. 4-5 b), nebylo tak možné plně naskenovat spodní část skloněných prutů, proto byla drsnost povrchu vyhodnocována na stranách prutů.

V přehledovém experimentu byla drsnost povrchu vyhodnocována z STL dat získaných na μ CT. Na těchto vzorcích bylo využito jejich plně digitalizovaného povrchu a byla na nich měřena drsnost povrchu v horní a spodní části skloněných prutů. U vertikálních prutů byla drsnost povrchu měřena na dvou stranách pro získání většího množství dat.



obr. 4-19 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu probíhalo ve třech krocích. Nejprve byl použit program GOM Inspect, ve kterém byla na získaná data umístěna CAD data pomocí metody „Best-Fit“. Následně byla na vzorcích měřena odchylka skutečného povrchu od CAD dat pomocí příkazu „Section“ (obr. 4-19). Ta byla přepočítána tak, aby byla brána od průměru Gaussova válce, protože vyrobené pruty neměly přesné rozměry jako CAD data. Získané hodnoty byly použity pro výpočet drsnosti povrchu podle vzorce:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \text{ (}\mu\text{m)} \quad (5)$$

, kde R_a je drsnost povrchu (μm), N je počet naměřených hodnot (-), y je naměřená odchylka povrchu (μm).

Tato nestandartní metoda vyhodnocení drsnosti povrchu byla zvolena pro porovnání jednotlivých stavů. Na jejím základě lze zjistit kde je drsnost povrchu větší a kde je menší, ale není možné získané hodnoty považovat za přesné.

4.9.5 Vyhodnocení rozměrové přesnosti

Pro vyhodnocení rozměrové přesnosti byla použita STL data získaná z měření na μCT . V programu GOM Inspect byl na prutech vytvořen Gaussův válec, který udává střední hodnotu průměru prutu.

5 VÝSLEDKY

Výsledky uvedené v této kapitole rozšiřují základní poznání o procesu SLM při výrobě mikro-prutových struktur. Zobrazují odlišnosti ve výrobě mikro-prutových struktur a objemového materiálu a popisují vzniklé anomálie. Zároveň slouží jako vstupní informace do skriptu, který umožňuje návrh vhodných procesních parametrů.

Základní procesní parametry, které byly analyzovány jsou výkon laseru (**LP**) a skenovací rychlost (**LS**). Pro popis výsledků proto byla použita lineární energie, která tyto procesní parametry spojuje do vztahu: $E_{\text{lin}} = \text{LP} \cdot \text{LS}^{-1} \text{ (J} \cdot \text{mm}^{-1}\text{)}$.

5.1 Ověření výsledků z literatury

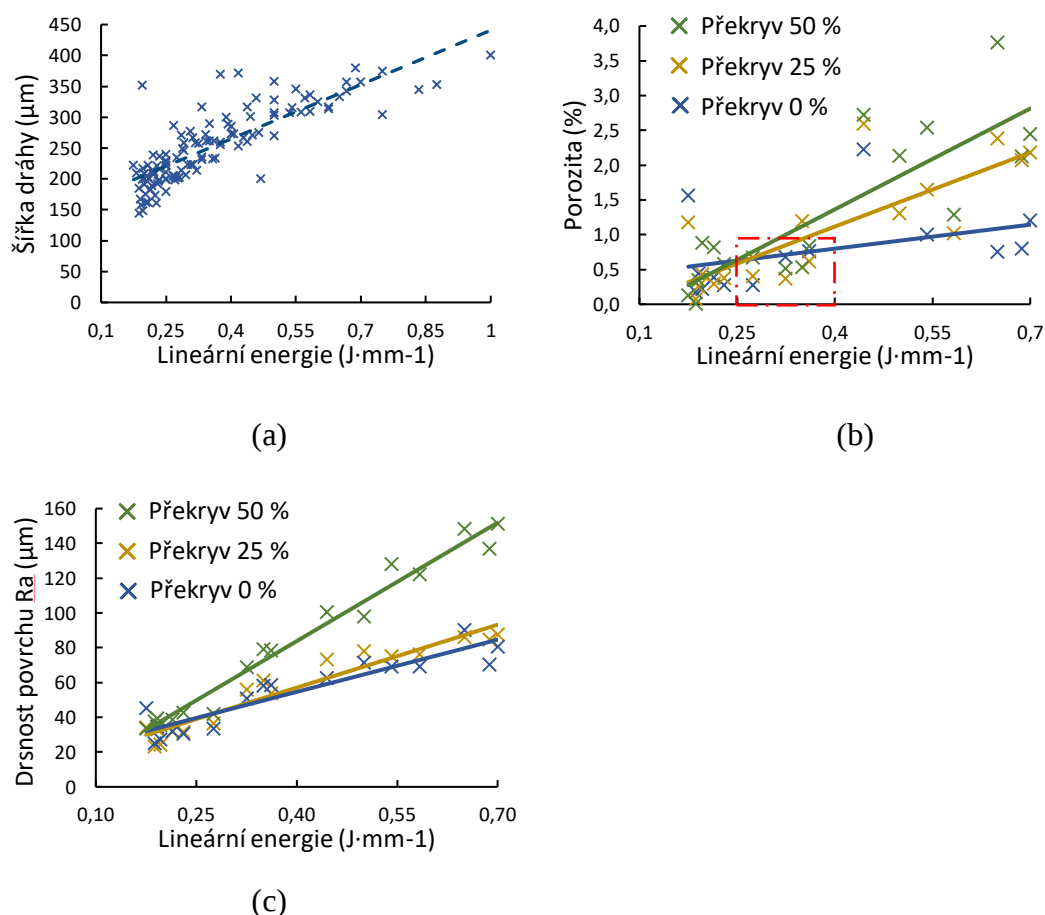
Prvotní výsledky šířky dráhy, porozity a drsnosti povrchu (obr. 5-1) byly získány na velkém rozsahu procesních parametrů dle literatury. Dávají tak dostatečný vhled do problematiky výroby mikro-prutových struktur technologií SLM.

Jako první byla hodnocena vizuální podoba návarů na destičce. Hodnocením bylo zjištěno, že návary vyrobené s lineární energií do $0,25 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ jsou nekontinuální. To je způsobeno nedostatečnou energií laseru, které neroztavila zrna prášku. Proto byly kombinace procesních parametrů s lineární energií nižší než $0,25 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ vyřazeny z dalších experimentů.

Šířka dráhy byla měřena na jednotlivých návarech se shora (kapitola 4.9.2). Její hodnoty byly v rozmezí od $145 \text{ } \mu\text{m}$ při použití lineární energie $0,2 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$, do $401 \text{ } \mu\text{m}$ při použití lineární energie $1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$. Výsledky byly vyneseny do grafu (obr. 5-1 a). Z trendu výsledků je patrné, že vyšší energie vede ke zvýšení šířky dráhy.

Porozita (obr. 5-1 b) byla měřena na snímcích metalografických výbrusů skloněných prutů (kap. 4.9.3). Výsledné hodnoty byly vyneseny do grafu. V grafu je patrný rostoucí trend porozity v závislosti na lineární energii u všech hodnot překryvů drah laseru (**OL**). Z výsledků byla stanovena úroveň porozity 0,5 % jako dosažitelná hranice při výrobě prutů různými překryvy drah. Této hranice bylo dosaženo při použití procesních parametrů, které měly lineární energii v rozsahu $0,25 - 0,35 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$. Tato oblast nevykazovala velké odchylky naměřených hodnot porozity a jeví se tak jako stabilní. Při hodnotě lineární energie pod $0,25 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ dochází ke zvýšení rozptylu naměřených hodnot. To je způsobeno tím, že při nedostatečné energii dochází ke špatnému spojení sousedních drah. To způsobí vznik porozity. Podobná situace nastala u lineární energie $0,35 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$, kde byla naměřena vyšší hodnota porozity. To je důsledek velkého množství energie v dráze, které vede na vypařování materiálu a vzniku plynových pórů uzavřených ve vzorku. Lineární energie větší než $0,5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ vedla ke zvýšení porozity v prutech nad hodnotu 1 %.

Drsnost povrchu (obr. 5-1 c) byla měřena na stranách skloněných prutů (kap. 4.9.4). Naměřená drsnost povrchu byla v rozsahu R_a 23–151 μm pro všechny úrovně překryvu drah laseru. Vyšší energie laseru zvýšila drsnost povrchu, což bylo především dáno natavením okolních zrn prášku taveninou. Zrna prášku pak zůstala na povrchu prutu, a to bylo hlavním důvodem zvýšení drsnosti povrchu. Nejnížší drsnosti povrchu bylo dosaženo při **OL** 0 %, při větším překryvu drah byla drsnost povrchu vyšší.



obr. 5-1 Prvotní výsledky: (a) šířka dráhy; (b) drsnost povrchu; (c) porozita v závislosti na lineární energii

Na základě výsledků byl stanoven rozsah lineární energie $0,25 - 0,35 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$ pro další experimenty, který vede na výrobu prutů s nízkou porozitou a drsností povrchu. Spodní hranice byla stanovena získanými výsledky kontinuity a porozity, které určují stejnou hodnotu $0,25 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$, tím se potvrzují a je tak možné předpokládat, že se jedná o validní výsledek. Vzhledem k benefitům vyšší energie procesních parametrů, jako je rychlost výroby a potenciál ve zvýšení mechanických vlastností, byla horní hranice porozity stanovena na hodnotu 1 %. Navíc při vyšších hodnotách porozity dochází k většímu ovlivnění mechanických vlastností. Proto byl rozsah lineární energie používáný v dalších experimentech rozšířen od hodnoty $0,25$ do $0,40 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$.

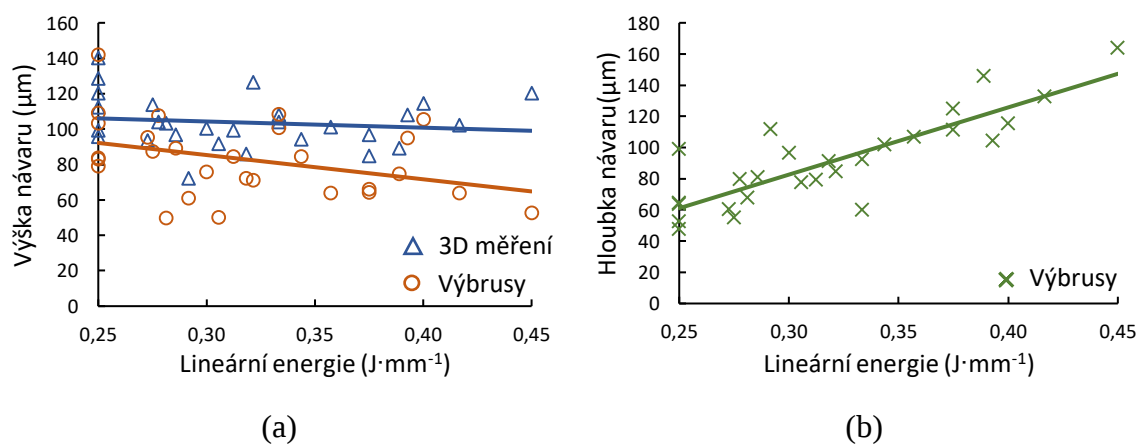
Z výsledků vyplývá, že snižující se překryv drah laseru (**OL**) vede k lepším hodnotám porozity a drnosti povrchu. Nízké hodnoty překryvu drah jsou tedy perspektivní. Nicméně na základě prvotních výsledků nelze přesně stanovit hodnotu vhodného překryvu drah, a proto bude vytvořen experiment, který se tím bude více zabývat.

5.2 Analýza geometrie návaru

5.2.1 Geometrie návaru

Geometrie návarů byla měřena na jednotlivých návarech. Získané výsledky byly primárně určeny pro ověření vybraného rozsahu lineární energie. Ověření vychází z literatury a bylo provedeno pomocí tří parametrů.

Výška návaru byla měřena na jednotlivých návarech a dosahovala hodnot v rozsahu 50–142 μm . Spodní hodnota odpovídá nanášené tloušťce vrstvy (50 μm) a horní hodnota je trojnásobkem používané tloušťky vrstvy. Výrazné výkyvy naměřené výšky návaru poukazují na nestabilitu procesu. S tímto jevem je tedy nutné počítat při návrhu procesních parametrů. Po vynesení hodnot do grafu (obr. 5-2 a) a jejich proložení přímkou, byl zjištěn mírně klesající trend. Ten značí, že při působení vyšší energie dochází ke snížení výšky návaru, což je vidět na obr. 5-3 b. Výsledky získané ze snímku metalografických výbrusů dosahují menších hodnot, než výsledky získané z měření návarů pomocí 3D obrazu (kap. 4.9.1). To je způsobeno rozdílnou metodou měření, kde měření z 3D obrazu je prováděno v průběhu celého návaru a dává tak statisticky lepší přehled o výšce dráhy.

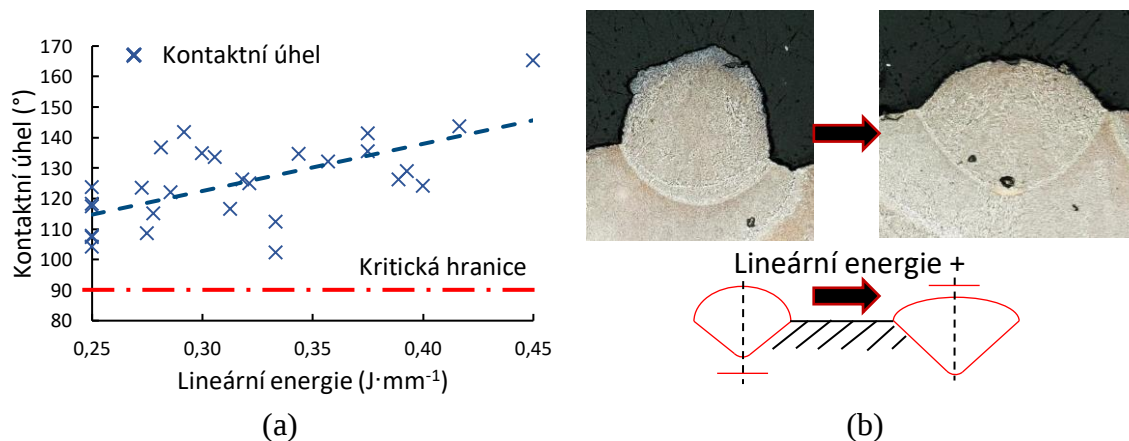


obr. 5-2 (a) závislost výšky; (b) hloubky návaru na lineární energii

Hloubka dráhy (obr. 5-2 b) má rostoucí trend. To je způsobeno zvyšujícím se množstvím energie, která na dráhu působí. Rozdíl v působení energie na dráhu je vidět na obr. 5-3 b. S větší energií dochází ke zvětšení hloubky dráhy. To potvrzuje poznatky uvedené ve studiích [4–8]. Nejmenší naměřená hloubka dráhy je 48 μm . To odpovídá tloušťce používané vrstvy (50 μm). Největší hloubka dráhy byla 164 μm , což je trojnásobek tloušťky vrstvy. V obou případech tak dochází k dostatečnému spojení vrstev. Avšak ve druhém případě dochází k nežádoucímu přetavení materiálu, což vede ke vzniku pórů vlivem vysoké teploty (obr. 5-3 b). Zároveň se ale jedná o výbrus v jednom místě dráhy, kde mohla tato situace ojediněle nastat.

Na vybraném rozsahu procesních parametrů bylo použito kritérium hodnotící stabilitu procesu SLM. Jedná se o výpočet poměru hloubky dráhy / šířky dráhy uvedené ve studii [4]. Když je poměr hloubky / šířky dráhy menší než 0,5, jedná se o stabilní procesní parametry. Pokud je tento poměr vyšší než 0,5, dochází ke vzniku nestabilních oblastí v dráze a porozity způsobené vypařováním materiálu. To vede k výrobě součástí s vysokou porozitou a drsností povrchu. Na vybraném rozsahu procesních parametrů (kap. 4.7.1) bylo toto kritérium splněno, proto je možné celý rozsah použitých procesních parametrů využít pro výrobu mikro-prutových struktur.

Měření kontaktního úhlu na metalografických snímcích (obr. 5-3 a) byl potvrzen vhodný výběr procesních parametrů. Průměrné hodnoty kontaktního úhlu jsou nad kritickou hranicí 90°. Hodnoty pod kritickou hranicí by znamenaly vznik „balling“ efektu, který vede ke zvýšení porozity v součásti. Ze získaného průběhu je patrné, že vyšší energie snižuje výšku návaru a tím zvyšuje kontaktní úhel (obr. 5-3 b).



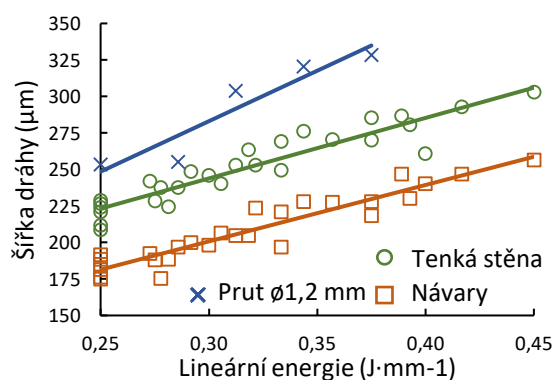
obr. 5-3 (a) závislost kontaktního úhlu na lineární energii; (b) Změna návaru s lineární energií

Jelikož použité experimenty potvrdily, že vybraný rozsah procesních parametrů je vhodný pro výrobu mikro-prutových struktur. Byl tento rozsah použit v následujících experimentech.

5.2.2 Šířka dráhy

Šířka dráhy je významný parametr zejména při výrobě mikro-prutových struktur pomocí contour strategie. Ovlivňuje vstupní energii působící na pruty a tím ovlivňuje materiálové vlastnosti jako jsou porozita a drsnost povrchu.

Na obr. 5-4 jsou zobrazeny naměřené hodnoty šířky dráhy z testu návarů, tenkých stěn a prutových vzorků 1T (s průměrem 1,2 mm). Šířka dráhy byla naměřena v rozsahu 175–328 μm v závislosti na použité lineární energii a geometrii vzorku. Po proložení naměřených hodnot přímkou bylo zjištěno, že šířka dráhy má rostoucí trend se zvyšující se lineární energií. Tento trend je stejný u všech typů vzorku, lze tedy předpokládat, že u nich nastává stejná situace jako u návarů (obr. 5-3 b). Nejmenší hodnoty šířky dráhy byly naměřeny na návarech se shora. O 21 % vyšší hodnoty oproti návarům byly naměřeny na tenkých stěnách a nejvyšší hodnoty (o 47 % oproti návarům) byly naměřeny na prutových vzorcích 1T.



obr. 5-4 Závislost šířky dráhy na lineární energii vertikálních vzorků

Výsledky poukazují na vliv odvodu tepla a geometrie vzorku, kde návary byly umístěny na destičku, tedy objemový materiál (vysoká tepelná vodivost), tenké stěny byly obklopeny práškem (nízká tepelná vodivost) a prutové vzorky 1T reprezentovaly i tvar prutu. Z výsledků tedy vyplývá, že je nutné pro návrh výroby mikro-prutových struktur uvažovat hodnotu z prutových vzorků 1T, protože tyto vzorky nejvíce odpovídají prutům v geometrii a odvodu tepla.

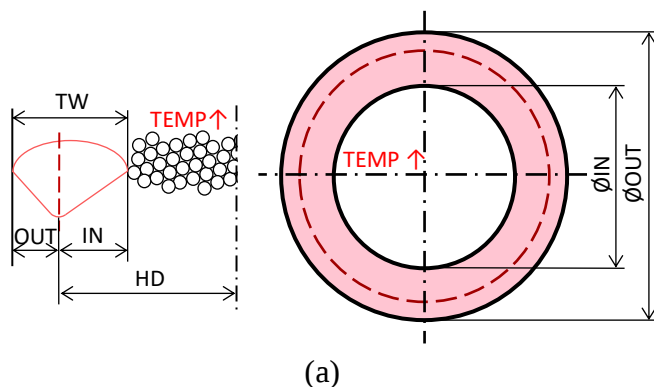
5.2.3 Vnější a vnitřní šířka dráhy

Prutové vzorky 1T vedly k identifikaci dvou oblastí návaru. Jedná se o vnější (TW_{OUT}) a vnitřní (TW_{IN}) šířku dráhy. Ty byly vypočítány na základě průměru trajektorie laseru odpovídající navržené vzdálenosti drah laseru (HD ; obr. 5-5 a) a naměřených hodnot vnějšího ($\varnothing_{\text{OUT}}$) a vnitřního průměru ($\varnothing_{\text{IN}}$) prutového vzorku 1T (obr. 5-5 a). TW_{OUT} a TW_{IN} byly vypočítány podle vzorců:

$$TW_{OUT} = \frac{\emptyset OUT - HD}{2} (\mu m) \quad (6)$$

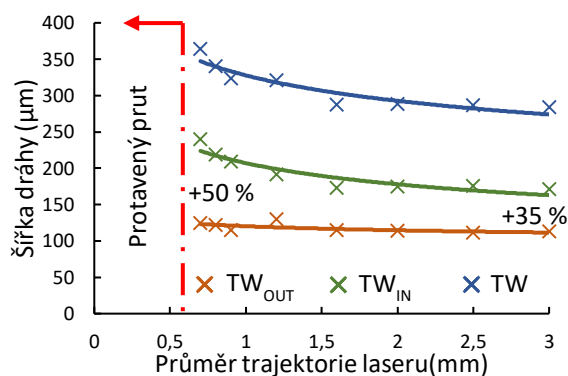
$$TW_{IN} = \frac{HD - \emptyset IN}{2} (\mu m) \quad (7)$$

, kde TW_{OUT} je vnější šířka dráhy (μm), TW_{IN} je vnitřní šířka dráhy (μm), $\emptyset OUT$ je vnější průměr prutu (μm), $\emptyset IN$ je vnitřní průměr prutu (μm), HD je vzdálenost drah laseru (μm).

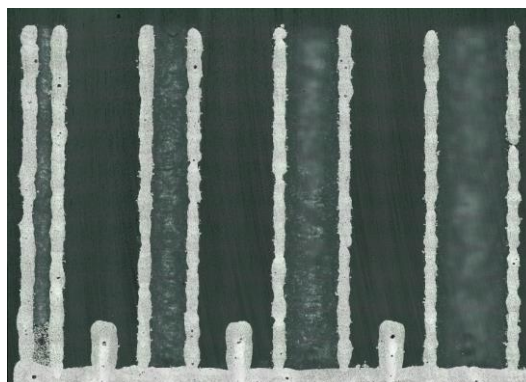


obr. 5-5 (a) schematické zobrazení vnější a vnitřní šířky dráhy

Naměřené hodnoty šířky dráhy (obr. 5-6 *a-TW*) jsou v rozmezí 283–364 μm v závislosti na velikosti prutu (*průměr trajektorie laseru*, viz. kap. 4.7.3). Proložením bodů pomocí mocninné funkce byla získána klesající závislost. Největší šířka dráhy byla naměřena na prutech malého průměru. Se zvětšující se velikostí prutu klesala šířka dráhy (obr. 5-6 *b*). To může být způsobeno tepelným ovlivněním prášku uvnitř prutu. Ten je udržován na vyšší teplotě a je tak možné ho roztavit pomocí nižší energie. Tato myšlenka vedla k objevení TW_{OUT} a TW_{IN} . Jejich hodnoty byly vyneseny do grafu (obr. 5-6 *a*) a proloženy mocninnou funkcí, která má v obou případech klesající trend. TW_{IN} dosahovala vyšších hodnot oproti TW_{OUT} , a to až o 50 % u prutů malých průměrů a o 35 % u prutů vyšších průměrů. To podpořilo hypotézu, která vedla k rozdělení šířky dráhy na vnitřní (TW_{IN}) a vnější (TW_{OUT}).



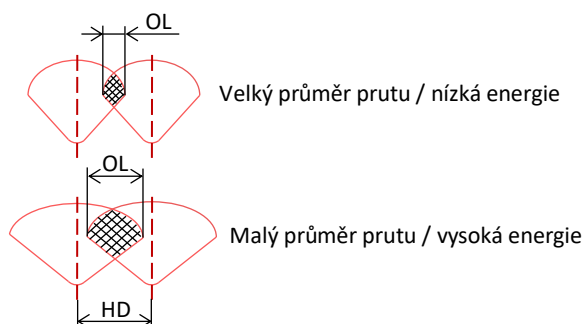
(a)



(b)

obr. 5-6 (a) závislost šířky dráhy na průměru trajektorie laseru; (b) zobrazení rozdílné šířky dráhy u prutů s průměrem 0,8; 1,2; 1,6 a 2 mm

Rozdílná šířka dráhy vede k specifickému návrhu vzdálenosti drah laseru (**HD**) podle velikosti prutu a lineární energie procesních parametrů. Při použití jedné hodnoty **HD**, kterou použili autoři [20], by docházelo ke zvětšení procentuálního překryvu drah (**OL**) u prutů s malým průměrem (obr. 5-7). To by vedlo na přehřívání materiálu v prutu a ke vzniku většího množství porozity přesně tak, jak bylo uvedeno ve studii.



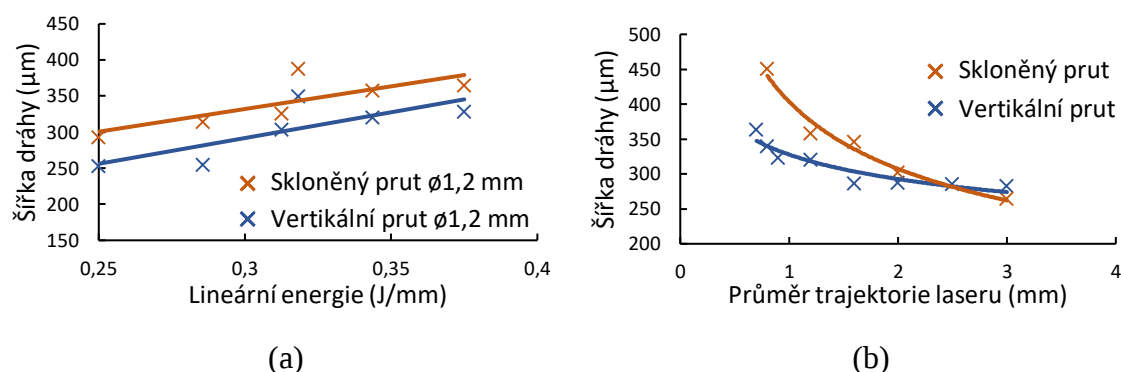
obr. 5-7 Rozdílná šířka prutu v závislosti na průměru prutu a vstupní energii

Proto byla použita rozdílná šířka dráhy pro různé procesní parametry a průměry prutů v experimentu pro ověření volby procesních parametrů (kap. 4.8.1).

5.2.4 Šířka dráhy u vertikálních a skloněných prutů 1T

Šířka dráhy je různá nejenom u různých typů vzorků (kap. 5.2.2), ale je také ovlivněna jejich sklonem. Tato informace se tak stává důležitou při návrhu mikro-prutových struktur, které jsou z velké části tvořeny právě skloněnými pruty. Aby byl tento rozdíl ověřen, byla porovnána šířka dráhy u vertikálních a skloněných prutů 1T tvořených jednou drahou laseru.

Naměřené hodnoty šířky dráhy byly vyneseny v závislosti na lineární energii (obr. 5-8 a) a v závislosti na průměru trajektorie laseru (viz. kap. 4.7.3, obr. 5-8 b). Po proložení výsledků na obr. 5-8 a přímkou je vidět, že u skloněných prutů byla naměřena vyšší šířka dráhy než u vertikálních prutů. Zároveň je směrnice přímek téměř shodná. Na obr. 5-8 b byla šířka dráhy proložena mocninovou funkcí, která nejvíce popisuje průběh šířky dráhy v závislosti na průměru trajektorie laseru. Z tohoto trendu je patrné, že malý průměr prutu vede k většímu rozdílu šířky dráhy (o 32 %). Se zvyšující se průměrem prutu se rozdíl šířky dráhy zmenšuje a při průměru prutu 3 mm je šířka dráhy u vertikálních a skloněných prutů shodná.



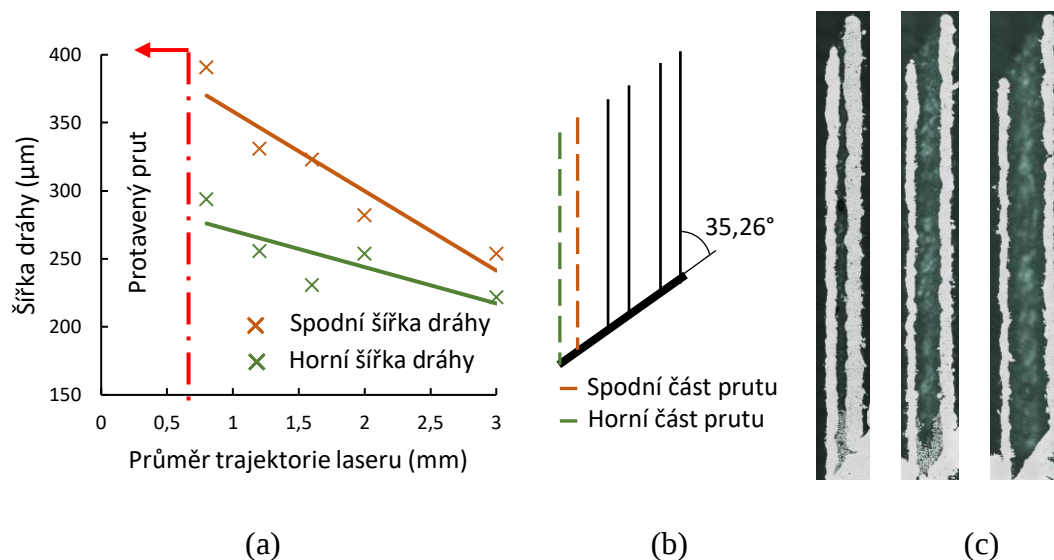
obr. 5-8 Závislost šířky dráhy (a) na lineární energii; (b) na průměru trajektorie laseru

Rozdíl v šířce dráhy u vertikálních a skloněných prutů je výrazný. Proto není možné použít při návrhu procesních parametrů pro pruty jak vertikální, tak skloněné stejnou šířku dráhy. U skloněných prutů musí být použita větší šířka dráhy, aby bylo možné zajistit stejnou vstupní energii do prutu. Tato informace je důležitá především u prutů malého průměru, kde vysoká energie vede k přehřívání materiálu a ke vzniku pórů.

5.2.5 Rozdílná šířka dráhy u skloněných prutů

Skloněné pruty mají rozdílný odvod tepla oproti vertikálním prutům, jak uvedli autoři [18]. Příkladem je rozdílná šířka dráhy v horní a spodní části prutu, která byla pozorována na skloněných prutových vzorcích 1T tvořených jednou drahou laseru.

Naměřené hodnoty šířky dráhy v horní a spodní části prutu (obr. 5-9 b) byly vyneseny v závislosti na průměru trajektorie laseru do grafu (obr. 5-9 a). Větší hodnoty šířky dráhy byly naměřeny na spodní straně prutových vzorků 1T. Konkrétně u průměru prutu 0,8 mm byl rozdíl mezi spodní a horní šířkou dráhy 100 μm . U prutů s průměrem 3 mm byl tento rozdíl 30 μm . Po proložení hodnot přímkou byl získán klesající trend, kde se s rostoucím průměrem prutu rozdíl mezi šířkami drah snižuje. Příčinou takového chování může být zvýšená teplota uvnitř prutu, jak bylo uvedeno v kap. 5.2.3. Rozdíl mezi horní a spodní šířkou dráhy při zvyšujícím se průměrem prutu je také viditelný na metalografických výbrusech (obr. 5-9 c).



obr. 5-9 (a) Rozdílná horní a spodní šířka dráhy u skloněných prutů 1T v závislosti na průměru trajektorie laseru; (b) schéma rozložení vzorku při snímání; (c) snímky prutových vzorků 1T s průměrem trajektorie laseru 0,8; 1,2; 1,6 mm

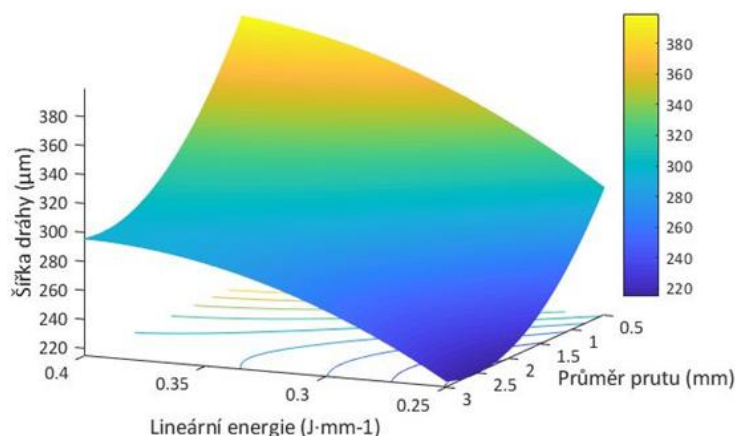
Větší šířka dráhy na spodní straně prutu může vysvětlovat vznik vyšší porozity ve spodní části prutu, která byla naměřena autory [18]. Větší šířka dráhy odpovídá větší akumulaci tepelné energie, která může vést ke vzniku porozity vlivem vypařování prvků materiálu. Zároveň může mít dopad i na drsnost povrchu, protože větší množství tepelné energie více ovlivňuje okolní prášek, který se nataví na prut a zvýší drsnost povrchu. To má za následek zvýšení hmotnosti součásti a riziko iniciace trhliny při mechanickém zatěžování kvůli vysoké drsnosti povrchu.

Pro další experimenty byla uvažována naměřená šířka dráhy na prutových vzorcích 1T tvořených jednou drahou laseru. Ty odpovídají jak odvodem tepelné energie, tak geometrií prutů. Zároveň bude pro vertikální a skloněné pruty použita rozdílná šířka dráhy. Hodnota uvažované šířky dráhy je tedy závislá na lineární energii, sklonu a průměru prutu.

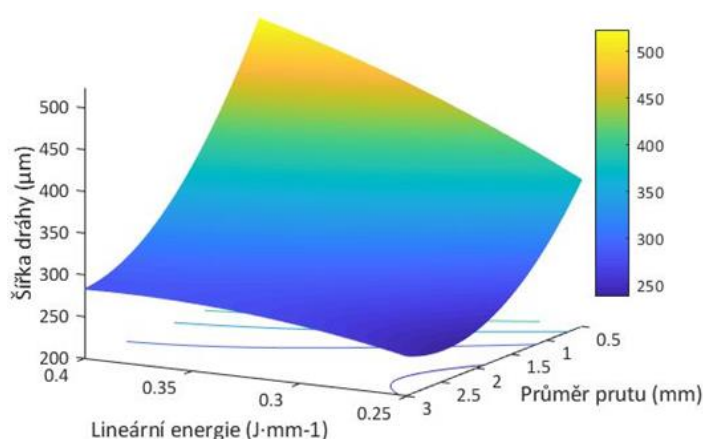
5.2.6 DOE – response surface analýza pro šířku dráhy

Na základě naměřených hodnot šířky dráhy na prutových vzorcích 1T, byla použita analýza Response surface spadající pod Design of Experiments (**DOE**). Ta umožňuje proložit naměřené hodnoty šířky dráhy plochou pomocí kvadratického modelu. Na základě rovnice plochy je následně možné určit hodnoty šířky dráhy mimo naměřené body.

Vytvořené plochy mají hodnotu spolehlivosti R^2 85 %. Jak u plochy pro vertikální (obr. 5-10 a), tak u plochy pro skloněné pruty (obr. 5-10 b) byl získán podobný trend. Vertikální pruty dosahují maximální šířky dráhy 380 μm při hodnotě lineární energie 0,4 $\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$ a průměru prutu 0,5 mm. Zatímco u skloněných prutů maximální hodnota šířky dráhy dosahuje 500 μm při stejné lineární energii a průměru prutu. Šířka dráhy dosahuje minimální hodnoty jak u vertikálních prutů (220 μm), tak u skloněných prutů (250 μm) při lineární energii 0,25 $\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$ a průměru prutu 3 mm.



(a)



(b)

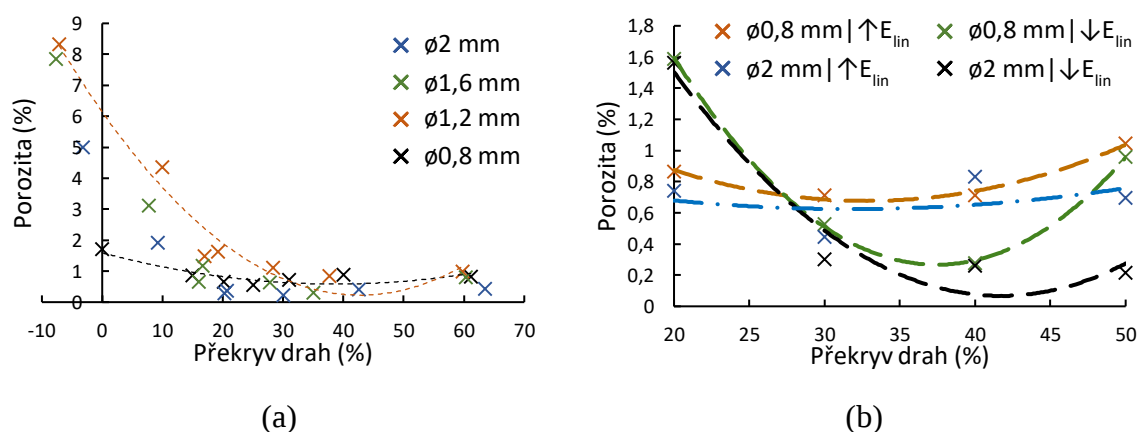
obr. 5-10 Šířka dráhy v závislosti na lineární energii a průměru prutu (a) 90°; (b) 35,26° sklon

Použitím výsledků analýzy Response surface je možné určit šířku dráhy pro různé kombinace procesních parametrů (v rozsahu lineární energie 0,25–0,4 $\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$) a průměrů prutů (0,5–3 mm). Toho bylo využito při návrhu experimentu pro ověření vhodného nastavení procesních parametrů (kap.4.8.4), kde byly vybírány procesní parametry, které vedly na zachování jednotného překryvu drah laseru v prutu.

5.3 Analýza překryvu drah

Překryv drah laseru (**OL**) má významný vliv na energii vstupující do prutu. Ze studií uvedených v současném stavu poznání [9–11] vyplývá, že malý **OL** vede ke vzniku porozity vlivem neroztavených zrn prášku. Vysoký **OL** vede k odpaření prvků taveniny. Výpary jsou následně uzavřeny v materiálu a vzniká tak porozita. Aby bylo možné určit **OL**, při kterých k těmto jevům dojde, byly použity prutové vzorky 2T (obr. 4-10).

Naměřené hodnoty porozity byly vyneseny do grafu v závislosti na **OL** (obr. 5-11 a) pro různé průměry vnější dráhy laseru. Vysoké hodnoty porozity (2 %) byly naměřeny při **OL** 20 % a menším, což bylo způsobeno neroztaveným práškem. V rozsahu 20–65 % **OL** byla naměřena porozita nižší než 1,5 %. Po proložení naměřených hodnot porozity polynomem druhého stupně, byl u průměrů vnější dráhy laseru 0,8 mm a 1,2 mm získán klesající trend. Zároveň bylo zjištěno, že u prutových vzorků 2T s vnějším průměrem 0,8 mm naměřené hodnoty porozity v rozsahu **OL** 0–60 % nepřesáhly úroveň 2 %. To může být způsobeno větším tepelným ovlivněním prutů s nižším průměrem.



obr. 5-11 Závislost porozity na překryvu drah laseru (a) prvotní výsledky; (b) zpřesňující experiment

Hodnoty porozity naměřené ve zpřesňujícím experimentu překryvu drah laseru (kap. 4.7.4) byly vyneseny do grafu (obr. 5-11 b), kde jsou zobrazeny dvě sady procesních parametrů a dva rozměry prutu. V použitém rozsahu **OL** (20–50 %) byla naměřena porozita v rozmezí od 0,2 % do 1,6 %. V rozsahu **OL** 30–40 % byla naměřena porozita do 1 %. Po proložení naměřených hodnot polynomem druhého stupně byly získány podobné trendy při rozdílné velikosti vzorků a shodném množství lineární energie. U procesních parametrů s lineární energií $0,38 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ ($\uparrow$) bylo zjištěno nejmenší množství porozity u hodnoty **OL** 30 %. U procesních parametrů s lineární energií $0,25 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ ($\downarrow$) byla zjištěna minimální hodnota porozity u **OL** 40 %.

Z výsledků vyplývá, že porozitu nejvíce ovlivňuje lineární energie procesních parametrů. Zároveň však u **OL** 30–40 % nedošlo k překročení úrovně porozity 1 %, tudíž je možné uvažovat tento rozsah jako vhodný pro výrobu mikro-prutových struktur. Proto byl při návrhu experimentu pro ověření volby procesních parametrů (kap. 4.8.1) použit **OL** 30 %, který vycházel jako nejvhodnější z obr. 5-11 a. V experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface (kap. 4.8.3) byl použit **OL** 35 %, který vychází z výsledků zpřesňujícího experimentu překryvu drah laseru.

5.4 Analýza materiálových vlastností

5.4.1 Porozita

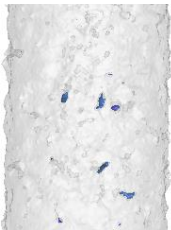
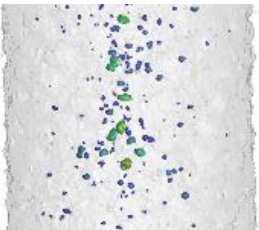
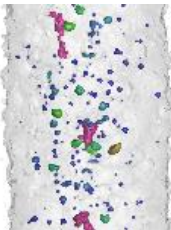
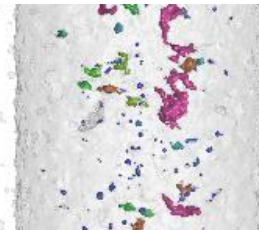
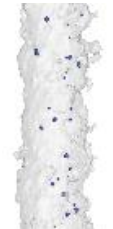
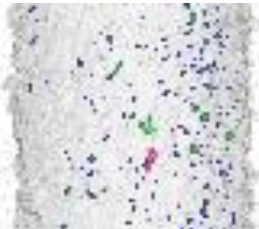
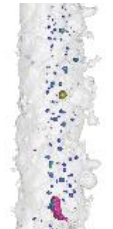
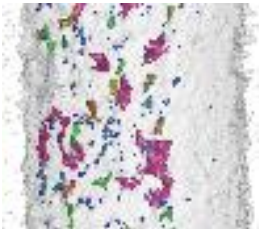
Jelikož jsou mikro-prutové struktury tvořené malým objemem materiálu, tak porozita výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Pro snížení porozity je nutné použít správné nastavení procesních parametrů, které přivedou vhodné množství energie do materiálu. Jak bylo uvedeno v literatuře[14, 16–18], nižší množství energie vede ke vzniku „lack of fusion“ porozity z důvodu neroztavení zrn prášku, naopak vysoké množství energie vede k vypařování prvků slitiny a uzavření výparů v tavenině.

Experiment pro ověření volby procesních parametrů

Snímky prutů se zobrazenou vnitřní porozitou byly vyneseny do tabulky (tab. 5-1). Tabulka je rozdělena na dvě části, přičemž v horní části jsou umístěny vertikální pruty a ve spodní skloněné pruty. Jak u vertikálních, tak u skloněných prutů jsou zobrazeny pruty s nejnižší porozitou (horní řádek) a nejvyšší porozitou (spodní řádek). U každého prutu je uvedena hodnota porozity a lineární energie použité k jeho výrobě. Ta vede na konkrétní procesní parametry uvedené v Příloha 5.

Vertikální pruty byly vyrobeny s nízkou porozitou (do 0,18 %) při rozlišení μCT 16 μm , což jsou velice dobré výsledky. Především u prutů malého průměru (do 1 mm), kde byly pouze malé póry kulatého tvaru. U vertikálních prutů s vyšší porozitou byla naměřena maximální hodnota porozity 1,14 % u průměru prutu 0,8 mm. Tato hodnota se nezdá být vysoká, ale průměr největších pórů v prutu dosahoval 0,2 mm, což ve srovnání s průměrem prutu vede k velkému oslabení nosného průřezu a tím ke snížení mechanických vlastností. U větších průměrů prutů nebyla porozita tak vysoká, ale póry měli ostré tvary, což může vést k iniciaci trhliny.

tab. 5-1 Porovnání porozity v prutech vyrobených v experimentu pro ověření volby procesních parametrů

Průměr prutu:		0,6 mm	0,8 mm	1 mm	2 mm	3 mm
Lineární energie:		0,29 J·mm ⁻¹	0,34 J·mm ⁻¹	0,25 J·mm ⁻¹	0,29 J·mm ⁻¹	0,34 J·mm ⁻¹
Volume (mm ³) 0.0020 0.0018 0.0016 0.0014 0.0012 0.0010 0.0008 0.0006 0.0004 0.0002 0.0000	Vertikální pruty					
		Por. 0,02 %	Por. 0,18 %	Por. 0,18 %	Por. 0,04 %	Por. 0,10 %
		0,38 J·mm ⁻¹	0,32 J·mm ⁻¹	0,34 J·mm ⁻¹	0,32 J·mm ⁻¹	0,25 J·mm ⁻¹
						
		Por. 0,82 %	Por. 1,14 %	Por. 0,86 %	Por. 0,43 %	Por. 0,22 %
		0,25 J·mm ⁻¹	0,32 J·mm ⁻¹	0,29 J·mm ⁻¹	0,38 J·mm ⁻¹	0,34 J·mm ⁻¹
Volume (mm ³) 0.0020 0.0018 0.0016 0.0014 0.0012 0.0010 0.0008 0.0006 0.0004 0.0002 0.0000	Skloněné pruty					
		Por. 0,06 %	Por. 0,19 %	Por. 0,09 %	Por. 0,43 %	Por. 0,15 %
		0,32 J·mm ⁻¹	0,29 J·mm ⁻¹	0,34 J·mm ⁻¹	0,25 J·mm ⁻¹	0,25 J·mm ⁻¹
						
		Por. 0,47 %	Por. 0,54 %	Por. 0,55 %	Por. 1,18 %	Por. 0,50 %

U skloněných prutů s nízkou úrovní porozity (do 0,43 %) dosahovaly dobrých výsledků především pruty do průměru 1 mm, kde byla naměřena porozita do 0,19 %. V těchto prutech byly malé kulaté póry. U průměrů vyšších než 1 mm se objevovaly ostré póry i v prutech, které dosahovaly nízké úrovně porozity. U skloněných prutů do průměru 1 mm s vyšší porozitou (do 1,18 %) byly naměřeny velké póry a u větších průměrů byly naměřeny ostré póry.

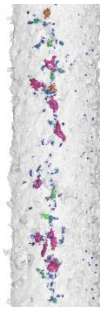
Celkově byly získány velice dobré hodnoty porozity jak pro vertikální (do 0,18 %), tak pro skloněné pruty (do 0,43 %). Avšak u prutů s vyšší úrovní porozity se vyskytovaly póry s velkým průměrem (0,2 mm), které oslabují nosný průřez prutu a vedou ke snížení mechanických vlastností. U prutů s vyšším průměrem (od 1 mm) byly ostré póry, které mohou vést k iniciaci trhliny při mechanickém zatěžování. Jejich tvorba je podle literatury [12] způsobena nízkou energií, které dostatečně neroztaví prášek. To však nebylo potvrzeno, protože i prutů vyrobených pomocí vyšší energie $0,38 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$ byly tyto póry detekovány. Další možností vzniku těchto pórů je samotný směr „Outside-in“, kterým byly pruty vyrobeny. Tavenina má tendenci nasávat okolní prášek [25] a to u prutů velkého průměru může vést ke vzniku míst bez prášku, které laser pouze protaví, ale nevedou k tvorbě plného materiálu prutu.

Porovnání vlivu směru výroby contour strategie

Výsledky porozity na skloněných prutech ukázaly (tab. 5-2), že směr strategie „Outside-in“ vede ke vzniku většího množství ostrých pórů, které jsou nebezpečné hlavně při mechanickém zatěžování (viz. předchozí kapitola). Použitím „Inside-out“ došlo ke snížení množství ostrých pórů a u prutů do průměru 1,5 mm se ostré póry nevyskytovaly vůbec. U větších průměrů se tyto póry objevily a nejvýraznější byly u průměru 2 mm, kde k jejich tvorbě došlo z důvodu nízkého překryvu drah uprostřed prutu (kap. 4.8.4), který byl příčinou neroztavení zrn prášku. U vertikálních prutů vyrobených pomocí směru „Inside-out“ nebyly ostré póry pozorovány.

Množství porozity (do 0,26 %) u prutů vyrobených contour strategií se směrem „Inside-out“ je na velice nízké úrovni a jedná se tedy o vhodné procesní parametry pro výrobu mikro-prutových struktur. Zároveň měl směr strategie „Inside-out“ pozitivní vliv na porozitu, a proto byl použit při návrhu dalšího experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě výsledků z analýzy Response surface (kap.4.8.3).

tab. 5-2 Porovnání vlivu směru contour strategie na skloněných prutech

Průměr prutu:		1,25 mm	1,5 mm	2 mm	3 mm
Volume (mm ³)	Outside-in				
		Por. 0,67 %	Por. 1,02 %	Por. 1,18 %	Por. 0,5 %
Volume (mm ³)	Inside-out				
		Por. 0,07 %	Por. 0,12 %	Por. 0,26 %	Por. 0,08 %

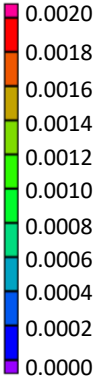
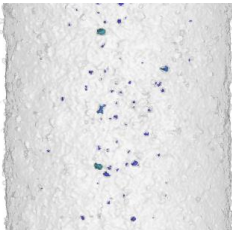
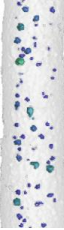
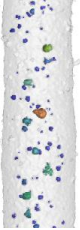
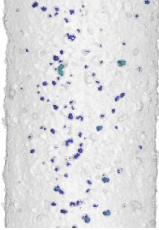
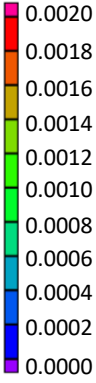
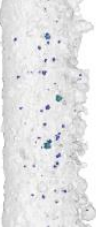
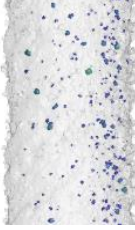
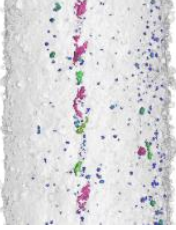
Experiment pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface

Oproti předchozímu experimentu pro ověření volby procesních parametrů byla pro návrh šířky dráhy použita analýza Response surface. Směr strategie byl „Inside-out“ a „beam compensation“ byla zvolena jako 1/3 šířky dráhy. Tyto kroky vedly k dosažení lepších výsledků.

Vybrané snímky zobrazující rozložení vnitřní porozity v prutech byly uvedeny v tab. 5-3. V horní části tabulky jsou zobrazeny vertikální pruty a pro porovnání byly do spodní části tabulky přidány skloněné pruty. Celkem bylo uvedeno 20 prutů, které mají průměr 0,6; 0,8; 1; 2 a 3 mm. U každého prutu je uvedena lineární energie, která byla k jeho výrobě použita. Ta odpovídá konkrétním procesním parametrům, které jsou uvedeny v Příloha 5. Pro srovnání jsou pro jednotlivé sklony prutů v horní části uvedeny pruty s nízkým množstvím porozity a ve spodní části pruty s vysokým množstvím porozity.

Vertikální pruty dosahovaly velice nízké úrovně porozity (do 0,02 %) a jednotlivé póry měly malý průměr a kulatý tvar, který je výhodný z hlediska zatěžování. U vertikálních prutů s vyšším podílem porozity (do 0,6 %) měly jednotlivé póry kulatý tvar a velikost do průměru 0,2 mm. Tato velikost pórů výrazně oslabuje nosný průřez prutu.

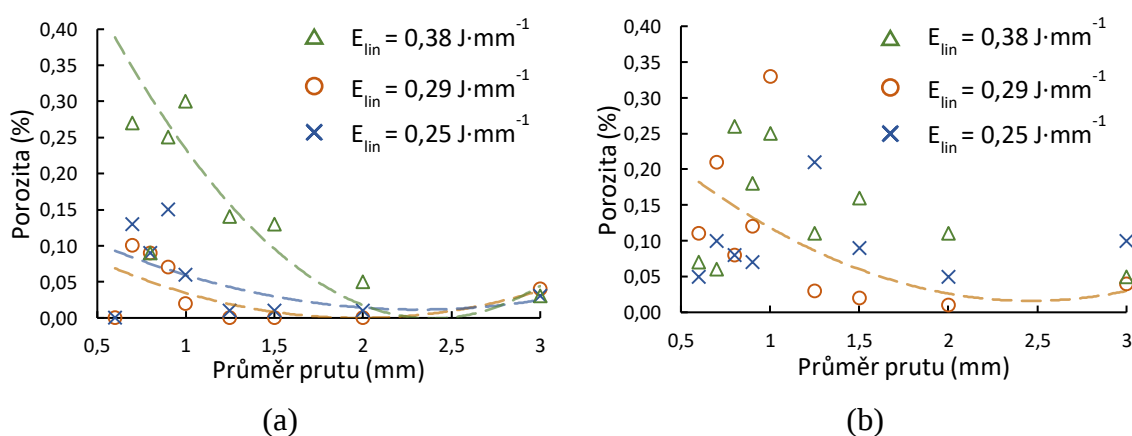
tab. 5-3 Porovnání porozity ve vyrobených prutech

Průměr prutu:	0,6 mm	0,8 mm	1 mm	2 mm	3 mm
Lineární energie:	0,25 J·mm ⁻¹	0,34 J·mm ⁻¹	0,29 J·mm ⁻¹	0,29 J·mm ⁻¹	0,34 J·mm ⁻¹
Vertikální pruty					
Volume (mm ³) 					
	Por. 0,01 %	Por. 0,02 %	Por. 0,02 %	Por. 0,01 %	Por. 0,02 %
	0,38 J·mm ⁻¹	0,32 J·mm ⁻¹	0,32 J·mm ⁻¹	0,32 J·mm ⁻¹	0,29 J·mm ⁻¹
					
	Por. 0,60 %	Por. 0,56 %	Por. 0,44 %	Por. 0,08 %	Por. 0,04 %
Skloněné pruty					
Volume (mm ³) 					
	Por. 0,03 %	Por. 0,08 %	Por. 0,16 %	Por. 0,01 %	Por. 0,02 %
	0,29 J·mm ⁻¹	0,34 J·mm ⁻¹	0,25 J·mm ⁻¹	0,32 J·mm ⁻¹	0,32 J·mm ⁻¹
					
	Por. 0,11 %	Por. 0,56 %	Por. 0,77 %	Por. 0,14 %	Por. 0,11 %

U skloněných prutů byly póry situovány ve spodní části, což je dáno geometrií a teplotním gradientem, jak bylo popsáno ve studii [18]. Avšak u některých prutů s malým množstvím porozity tento jev nenastává, nebo je minimalizován z důvodu vhodně zvolení vstupní energie. Pruty s nízkou porozitou (do 0,16 %) měly malé kulaté póry. U prutů s vyšší porozitou (do 0,77 %) se vyskytovala porozita v ose prutu, což bylo způsobeno malým vnitřním překryvem drah laseru (kap. 4.8.4), proto nedošlo k roztavení všech zrn prášku.

Hodnoty porozity pro vertikální (obr. 5-12 a) a skloněné (obr. 5-12 b) pruty byly vyneseny do grafů. U vertikálních prutů (obr. 5-12 a) bylo naměřeno množství porozity v rozmezí 0,01–0,6 %. Po proložení naměřených hodnot polynomem druhého stupně jsou viditelné rozdíly pro různé úrovně lineární energie. Při vysoké lineární energii ($0,38 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$) je u prutů malého průměru patrně zvýšené množství porozity. To je dáno malým objemem materiálu, který nedokáže rychle odvádět přijatou energii ve formě tepla. Vzniká tak porozita vlivem odpaření části materiálu. U nižších energií (do $0,3 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$) byla porozita u menších prutů pod úrovní 0,2 %. U větších prutů (od $\varnothing 1 \text{ mm}$) bylo naměřeno množství porozity pod 0,2 % pro všechny úrovně lineární energie. To je dáno větším množstvím materiálu, který prut tvoří a dokáže tak odvést tepelnou energii rychleji.

U skloněných prutů (obr. 5-12 b) byla naměřena porozita v rozmezí 0,01–0,77 %. Větší množství porozity u jednotlivých prutů bylo způsobeno především malým vnitřním OL, který vedl ke vzniku neprotavené oblasti v ose prutu (tab. 5-3). Proto bylo možné proložit polynomem druhého stupně pouze hodnoty porozity pro lineární energii $0,29 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$, kde se malý překryv drah laseru v ose prutu nevyskytoval. Získaná závislost má podobný trend jako u vertikálních prutů, kde s rostoucím průměrem prutu klesá množství porozity. Výjimku tvoří pruty s průměrem 0,6 a 0,7 mm, kde byla naměřena úroveň porozity do 0,21 % pro všechny úrovně lineární energie. Z vynesení hodnot je možné předpokládat podobné chování jako u vertikálních prutů, tedy že vysoká energie povede k vyšší porozitě u prutů nižších průměrů (od $\varnothing 0,8 \text{ mm}$ do $\varnothing 1,5 \text{ mm}$). U větších průměrů (od $\varnothing 1,5 \text{ mm}$) byla naměřena porozita pod 0,2 % pro všechny hodnoty lineární energie.

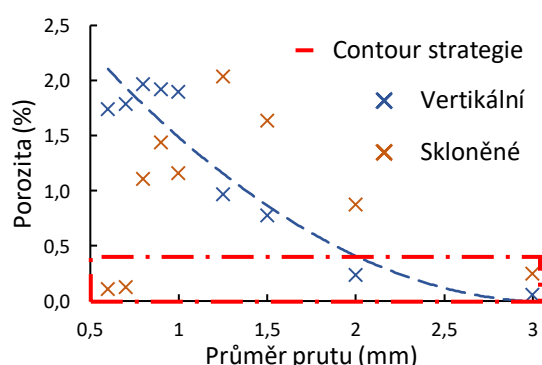


obr. 5-12 Závislost porozity na průměru (a) vertikálních; (b) skloněných prutů

Naměřená porozita je na velice nízké úrovni (do 0,77 %). Napříč všemi použitými procesními parametry byly průměry prutů vyrobeny s porozitou do 0,02 % u vertikálních prutů a do 0,16 % u skloněných prutů. U vertikálních prutů měly póru kulatý tvar, který je vhodný pro mechanické zatěžování. U skloněných prutů se projevil nízký **OL** uvnitř prutu, který vedl ke vzniku porozity v ose prutu. Tomuto jevu lze zabránit výběrem procesních parametrů, které povedou k většímu vnitřnímu **OL** (kap. 4.8.4), což bylo použito při návrhu experimentu s vhodným nastavením procesních parametrů. Zároveň bylo zjištěno, že nízká energie (do $0,3 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$) je vhodnější pro výrobu prutů do průměru 1,5 mm. U větších průměrů byla naměřena porozita do 0,2 % pro všechny úrovně lineární energie a z hlediska úspory času při výrobě je vhodnější použít procesní parametry s vyšší energií.

Pruty vyrobené s použitím procesních parametrů SLM

Pro porovnání získaných výsledků byly použity pruty vyrobené pomocí SLM procesních parametrů. Hodnoty porozity jak u vertikálních, tak u skloněných prutů vyrobených SLM procesními parametry byly vyneseny do grafu (obr. 5-13). Maximální hodnoty porozity se pohybovaly kolem 2 %. Vertikální i skloněné pruty malého průměru (do 1,5 mm) dosahovaly většího množství porozity, což je dáno vysokou energií, která na pruty působí. Díky malému množství materiálu prut není schopen rychle tuto energii ve formě tepla odvádět, což vede ke vzniku porozity vlivem vypaření prvků slitiny. Výjimkou byly skloněné pruty o průměru 0,6 a 0,7 mm, které byly tvořeny pouze jednou drahou laseru. Tím byla významně snížena vstupní energie do prutu, a proto byla naměřená úroveň porozity nízká. Vyšší průměry prutů (od 2 mm) už mají dostatečné množství materiálu, aby mohly teplo efektivně odvádět, a proto je u nich porozita nižší. Pro porovnání byla v grafu vyznačena oblast, která reprezentuje hodnoty naměřené v experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface. Z toho je patrné, že contour strategie vedla především v případě malých průměrů k několikanásobnému snížení porozity.



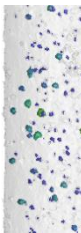
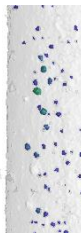
obr. 5-13 Závislost porozity na průměru vertikálních a skloněných prutů vyrobených SLM strategií

Vybrané snímky prutů ve dvou orientacích byly vyneseny do tabulky (tab. 5-4). V horní části jsou uvedeny vertikální pruty a ve spodní jsou skloněné pruty.

U vertikální prutů malého průměru (do 1 mm) byla naměřena vyšší úroveň porozity (do 2 %) s průměry pórů i 0,4 mm, což výrazně oslabuje nosný průměr prutu. Naopak u prutů s větším průměrem (od 1 mm) byly naměřeny nižší hodnoty porozity, kvůli lepšímu odvodu tepelné energie z prutu.

U skloněného prutu o průměru 0,6 jde vidět vliv jedné dráhy laseru, kterou byl prut vyroben. U vyšších průměrů skloněných prutů byla naměřena větší porozita (až 1,16 %) s průměrem některých pórů 0,4 mm. Póry byly převážně situovány ve spodní části, což potvrdilo výsledky studie [18].

tab. 5-4 Pruty vyrobené pomocí SLM procesních parametrů

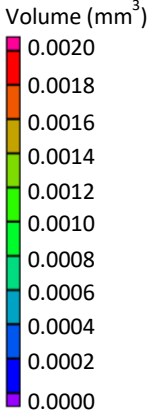
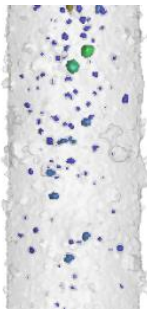
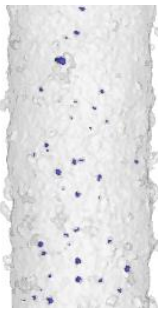
Průměr prutu:		0,6 mm	0,8 mm	1 mm	2 mm	3 mm
Volume (mm ³)	Vertikální pruty					
		Por. 1,74 %	Por. 1,97 %	Por. 1,9 %	Por. 0,24 %	Por. 0,06 %
Volume (mm ³)	Skloněné pruty					
		Por. 0,11 %	Por. 1,11 %	Por. 1,16 %	Por. 0,88 %	Por. 0,25 %

Pruty vyrobené SLM procesními parametry dosahují mnohonásobně vyšší porozity, než je tomu v případě contour strategie. To je způsobeno především vysokou energií, kterou nejsou pruty malého průměru schopny dostatečně rychle odvádět. Navíc byly v prutech naměřeny póry s průměrem 0,4 mm, což výrazně oslabuje jejich nosný průřez. U větších průměrů (od 2 mm) byla naměřena nižší porozita z důvodu většího množství materiálu v prutu.

Analýza vhodného nastavení procesních parametrů

Při použití vhodného nastavení procesních parametrů (kap. 4.8.4) byla porozita u vyrobených prutů pod úrovní 0,2 % a to jak u vertikálních, tak u skloněných prutů. Pro porovnání byly některé pruty zobrazeny v tabulce (tab. 5-5). Z výsledků vyplývá, že je možné použít obě sady procesních parametrů založené na střední hodnotě výkonu laseru (LP) a skenovací rychlosti (LS) používané v práci, protože porozita dosahuje nízkých hodnot, a v některých případech je u obou případů téměř shodná.

tab. 5-5 Porovnání prutů vyrobených vhodnými procesními parametry

Průměr prutu:		0,6 mm	0,6 mm	1,25 mm	1,25 mm
Procesní parametry:		LP	LS	LP	LS
Volume (mm³) 	Vertikální pruty				
		Por. 0,03 %	Por. 0,02 %	Por. 0,17 %	Por. 0,09 %
	Skloněné pruty				
		Por. 0,16 %	Por. 0,02 %	Por. 0,12 %	Por. 0,14 %

Výsledky ukázaly důležitost návrhu procesních parametrů s jednotným překryvem drah laseru v prutu. Ten zaručil konstantní množství energie napříč prutem, což vedlo k dobrému protavení celého prutu a k snížení vzniku porozity. To bylo docíleno procesními parametry s různou úrovní lineární energie, což potvrdilo, že je možné pro výrobu prutů s nízkou úrovní porozity použít vybraný rozsah lineární energie. Při návrhu procesních parametrů je tedy vhodné použít jednotný překryv drah v prutu a vycházet z šířky dráhy získané z analýzy Response surface.

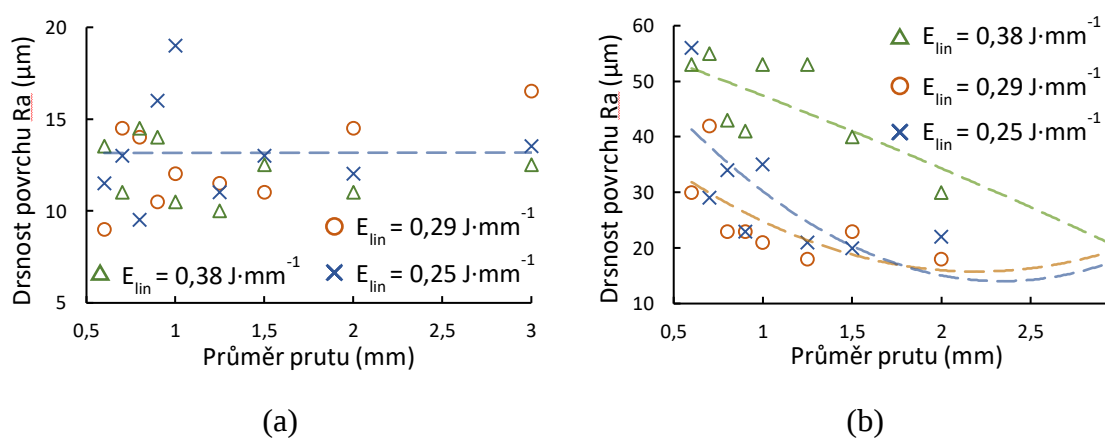
5.4.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu u mikro-prutových struktur hraje významnou roli, protože kvůli jejich geometrii není možné použít konvenční metody úpravy povrchu. Zvýšená drsnost povrchu tak může způsobit nárůst hmotnosti součásti a v některých případech může vést ke vzniku trhliny při mechanickém zatěžování. Proto byla analýza drsnosti povrchu provedena na vyrobených vzorcích.

Drsnost povrchu prutů z experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface

Hodnoty drsnosti povrchu měřené na prutech v experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface byly vyneseny do grafů (obr. 5-14). V prvním grafu (obr. 5-14 a) je zobrazena drsnost povrchu na vertikálních prutech. Ta dosahuje hodnot Ra od 9 do 19 μm a je shodná u všech průměrů prutu a hodnot lineární energie.

Vyšší drsnost povrchu byla naměřena na horní straně skloněných prutů (obr. 5-14 b) a dosahovala hodnot Ra od 16 do 56 μm . Naměřené hodnoty Ra byly proloženy polynomickou funkcí druhého stupně. Z trendu je patrné, že vyšší drsnost povrchu byla naměřena na prutech menších průměrů. Se zvyšujícím se průměrem prutu drsnost povrchu klesala. Také vyšší lineární energie vedla ke zvýšení drsnosti povrchu.

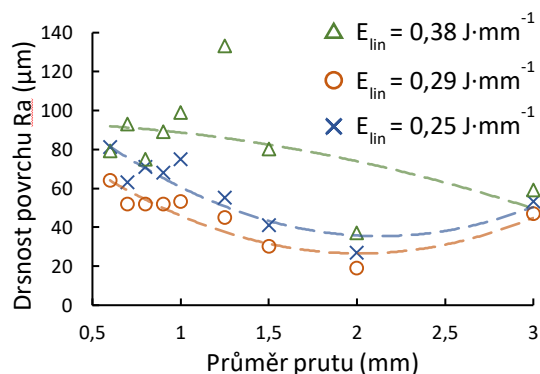


obr. 5-14 Závislost drsnosti povrchu R_a na průměru prutu pro (a) vertikální; (b) skloněné pruty

Drsnost povrchu na vertikálních prutech byla nižší než v horní části skloněných prutů. To může být způsobeno „schodišťovým efektem“, který vzniká na skloněných prutech z důvodu výroby součástí vrstvu po vrstvě, jak uvedli autoři [13]. Zároveň vyšší lineární energie vedla ke zvýšení drsnosti povrchu, je tedy vhodné používat procesní parametry s nižší lineární energií.

Drsnost povrchu na spodní straně skloněných prutů

Hodnoty drsnosti povrchu na spodní straně skloněných prutů byly vyneseny do grafu (obr. 5-15). Na rozdíl od horní strany, kde bylo maximum R_a 56 μm , na spodní straně prutů se hodnoty drsnosti povrchu pohybují v rozmezí R_a 19–133 μm . To je dáno natavením zrn prášku na spodní část skloněných prutů (tab. 5-3) z důvodu zatékání taveniny mezi zrna prášku. Po proložení naměřených hodnot polynomickou funkcí druhého stupně byly získány klesající trendy, kde se zvyšujícím se průměrem prutu klesá drsnost povrchu. Na drsnost povrchu má vliv i použitá energie, kdy vyšší drsnosti povrchu bylo dosaženo při použití vyšší lineární energie. Při použití nižší lineární energie byla drsnost povrchu naopak nižší.



obr. 5-15 Drsnost povrchu na skloněných prutech

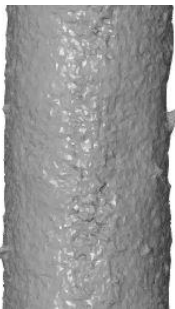
Naměřené hodnoty ukázaly výrazný vliv sklonu prutu na drsnost povrchu zejména ve spodní části skloněných prutů. Zároveň bylo zjištěno, že s vyšší lineární energií roste drsnost povrchu, což je v rozporu s tvrzením autorů [13], kteří uvedli, že vyšší lineární energie způsobí nižší viskozitu taveniny, která zateče mezi jednotlivá zrna prášku a sníží se tak drsnost povrchu. Zároveň je patrné, že měřicí metoda nemůže určit přesné hodnoty drsnosti povrchu, protože hodnota 133 μm spíše odpovídá tvarové odchylce. Proto byly tyto hodnoty použity pouze pro porovnání.

Porovnání drsnosti povrchu s pruty vyrobenými SLM procesními parametry

Pro porovnání drsnosti povrchu prutů vyrobených contour a SLM procesními parametry byly vybrány snímky STL dat (tab. 5-6). Uvedené pruty měly průměr 1,25 mm. U vertikálních prutů (tab. 5-6 vlevo) vyrobených SLM procesními parametry byla naměřena drsnost povrchu do Ra 12 μm , zatímco pruty vyrobené contour strategií měly drsnost povrchu Ra až 20 μm . To je dáno především natavenými zrny prášku na prutu z důvodu nižší lineární energie (do 0,4 J·mm^{-1}) procesních parametrů, kterou byly pruty vyrobeny. U SLM procesních parametrů je na první konturu použita vyšší energie (0,5 J·mm^{-1}), která vede k získání hladšího povrchu, protože roztaví okolní prášek.

Skloněné pruty vykazují stejné chování na horní straně, kde SLM procesní parametry vedly k naměření drsnosti povrchu Ra do 25 μm a u contour procesních parametrů s nízkou lineární energií byla naměřena drsnost povrchu Ra 30 μm . Avšak na spodní straně skloněných prutů zvýšená energie první kontury SLM procesních parametrů vedla ke zvýšení drsnosti povrchu (Ra 187 μm) z důvodu natavení většího množství zrn prášku. Zatímco u contour procesních parametrů s nízkou lineární energií nebyl tento jev tak výrazný (Ra 60 μm).

tab. 5-6 Porovnání drsnosti povrchu contour a SLM procesních parametrů

	SLM	Contour strategie		SLM	Contour strategie
Vertikální pruty			Skloněné pruty		

Procesní parametry s vyšší lineární energií vedly k naměření nižší drsnosti povrchu u vertikálních prutů. U skloněných prutů bylo dosaženo téměř shodné drsnosti povrchu na horní straně prutů a na spodní straně dosahovala contour strategie nižší drsnosti povrchu díky nižší lineární energii procesních parametrů.

5.4.3 Geometrická přesnost

Geometrická přesnost má významnou roli především v návrhu mikro-prutových struktur pomocí topologické optimalizace. Aby návrhu odpovídala i reálná součást, musí být jednotlivé pruty vyrobeny s vysokou rozměrovou přesností, která zaručí přenos požadovaného zatížení.

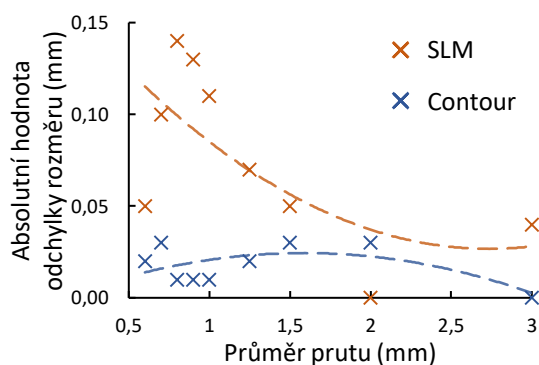
Výsledky experimentu pro ověření volby procesních parametrů

V experimentu pro ověření volby procesních parametrů bylo zjištěno, že hodnoty průměru proloženého Gaussova válce byly nižší, než byl nominální průměr prutu. Konkrétně byly pruty menší o 32 % použité šířky dráhy. Tato informace byla zahrnuta při návrhu druhého přehledového experimentu, kdy se hodnota „beam compensation“ snížila z $\frac{1}{2}$ šířky dráhy na $\frac{1}{3}$ šířky dráhy, což vedlo ke zlepšení rozměrové přesnosti.

Porovnání prutů vyrobených contour a SLM procesními parametry

Pro porovnání byly použity pruty vyrobené v experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface. U vertikálních prutů byla naměřena absolutní hodnota odchylky Gaussova válce a nominálního průměru prutu do 0,09 mm, a to jak pro SLM procesní parametry, tak pro contour procesní parametry. Do průměru prutu 1 mm byla odchylka do 0,07 mm. Bylo tedy dosaženo dobré rozměrové přesnosti.

Absolutní hodnoty odchylky povrchu u SLM a contour procesních parametrů ($E_{lin} = 0,29 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$) pro skloněné pruty byly vyneseny do grafu (obr. 5-16). Vynesené hodnoty jsou v rozsahu 0–0,14 mm. Po proložení hodnot polynomem druhého stupně je patrné, že u contour procesních parametrů se odchylka od rozměru neliší v závislosti na průměru prutu a je udržována pod hodnotou 0,04 mm. To poukazuje na vhodnou volbu „beam compensation“, která vychází z šířky dráhy, která je rozdílná pro různé hodnoty lineární energie a průměry prutů. Zatímco SLM procesní parametry vedly u menších průměrů ke zvýšení rozměru prutu až o 0,14 mm, což je při průměru 0,8 mm výrazný nárůst na 0,94 mm.



obr. 5-16 Závislost absolutní hodnoty odchylky rozměru na průměru skloněných prutů

U vertikálních prutů byla zjištěna dobrá rozměrová přesnost jak u contour, tak u SLM procesních parametrů. U skloněných prutů dosahovaly SLM procesní parametry vysoké odchylky od přesného rozměru zejména z důvodu směru odvodu tepelné energie, což způsobilo zvětšení prutů v důsledku natavení zrn prášku na jejich spodní část (tab. 5-6). V případě contour procesních parametrů nebyla pozorována výrazná odchylka od nominálního průměru skloněných prutů a byly vyrobeny velice přesné rozměry.

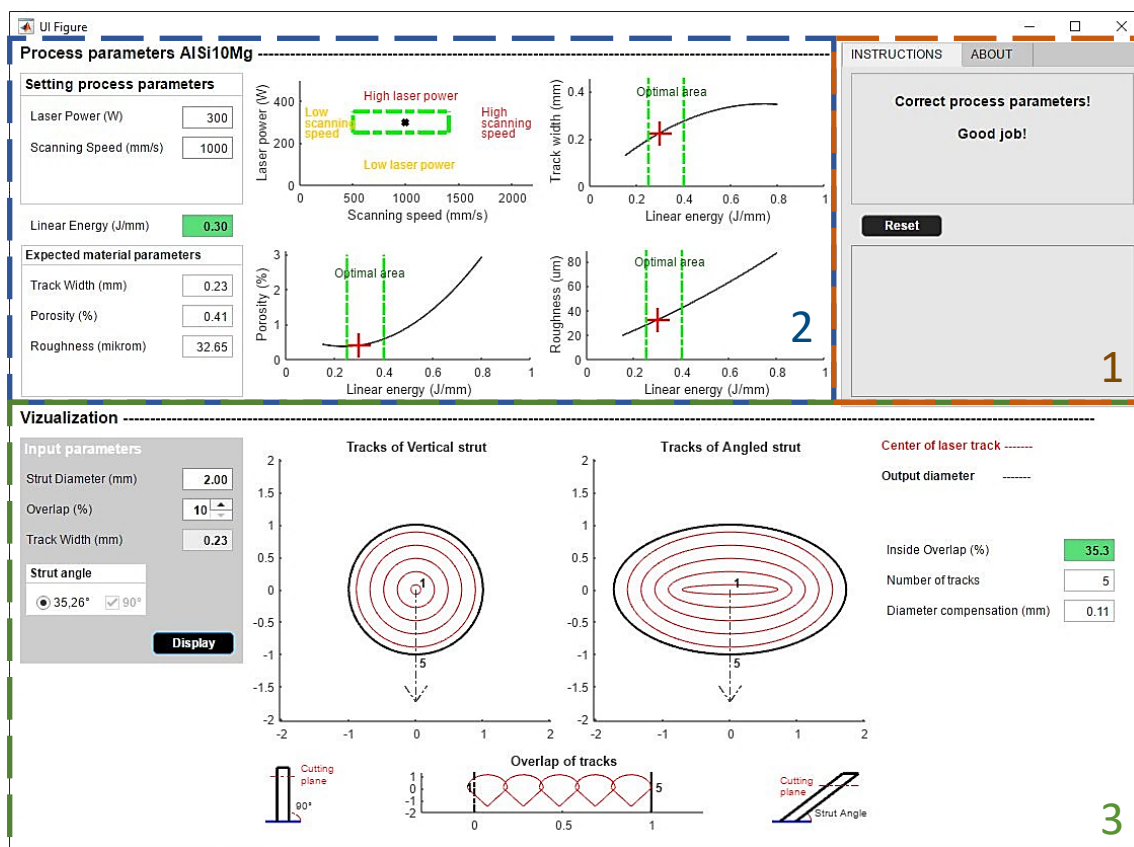
5.5 Skript pro výběr vhodných procesních parametrů

Vzhledem ke složitosti procesu výroby mikro-prutových struktur technologií SLM byl vytvořen skript, který uživateli umožní vybrat vhodné procesní parametry na základě naměřených dat.

Skript byl vytvářen v programu Matlab R2017b v prostředí App Designer (ukázka kódu v Příloha 7). Pro tvorbu skriptu byly použity výsledky vycházející z článku [21], které byly měřeny na skloněných prutech ($35,26^\circ$) o průměru 2 mm vyrobených z materiálu AlSi10Mg. Hodnoty šířky dráhy byly měřeny v testu jednotlivých návarů. Hodnoty porozity byly měřeny na μCT a hodnoty drsnosti povrchu byly vyhodnocovány v programu GOM Inspect na datech měřených na 3D skeneru.

Hodnoty jsou do skriptu zavedeny ve formě excelu, ze kterého jsou načítány. Uživatel je tak schopen použité hodnoty modifikovat pro různá zařízení SLM. Také to umožňuje použít hodnoty pro různé materiály. Tím se skript stává univerzálním nástrojem pro návrh procesních parametrů na základě výběru uživatele.

Skript je rozdělen do 3 částí (obr. 5-17), přičemž první část (oranžová) obsahuje instrukce pro uživatele, druhá část (modrá) slouží pro výběr procesních parametrů a třetí část (zelená) slouží pro vizualizaci drah laseru v prutu.



obr. 5-17 Skript

5.5.1 Instrukce pro uživatele

První část obsahuje dvě záložky, přičemž na záložce ABOUT se nachází popis skriptu. Na záložce INSTRUCTIONS je v horní části uveden postup, jak má uživatel v daném kroku postupovat a ve spodní části je doporučené nastavení hodnot právě volených parametrů. (Příloha 8)

5.5.2 Nastavení procesních parametrů

V druhé části se v levém horním rohu nachází okno pro nastavení výkonu laseru a skenovací rychlosti, jejichž hodnoty zadává uživatel. Po zadání hodnot je z procesních parametrů vypočtena hodnota lineární energie, která když je v doporučeném rozsahu $0,25\text{--}0,4\text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$, tak okno s hodnotou zezelená, pokud je mimo tento rozsah okno zčervená a uživatel je formou vyskakovacího oznámení upozorněn na nebezpečnou hodnotu lineární energie, která může vést ke zvýšení porozity a drsnosti povrchu. (Příloha 9)

Na pravé straně druhé části skriptu se nachází čtyři grafy. V levém horním grafu je zobrazena vhodná oblast procesních parametrů, ve které by se uživatel měl nacházet. V pravém horním grafu je zobrazena závislost šířky dráhy na lineární energii. V levém dolním grafu je zobrazena závislost porozity na lineární energii a v pravém dolním grafu je závislost drsnosti povrchu na lineární energii. Ve všech grafech je umístěn kurzor (bod, červený kříž), který na základě lineární energie vybraných procesních parametrů zobrazuje předpokládané hodnoty šířky dráhy, porozity a drsnosti povrchu. Uživatel je tak schopný vizuálně ověřit, zda jde dosáhnout lepších výsledků zvolením jiných procesních parametrů. (Příloha 10)

V levém dolním rohu druhé části skriptu jsou situovány předpokládané hodnoty šířky dráhy, porozity a drsnosti povrchu pro zvolené procesní parametry. Ty vychází z naměřených hodnot a odpovídají hodnotě, na které se nachází kurzor v grafech. (Příloha 11)

5.5.3 Vizualizace

Po výběru procesních parametrů musí uživatel jejich výběr potvrdit, tím se uzavře okno pro výběr procesních parametrů a přenesou se hodnoty šířky dráhy do vizualizační části skriptu. Na levé straně je okno, kde uživatel zadává průměr prutu v rozmezí $0,5\text{--}4\text{ mm}$, což odpovídá prutům [20]. Dále zadává procentuální hodnotu překryvu drah laseru v rozmezí $10\text{--}40\%$. (Příloha 12)

Po stisknutí tlačítka Display se ze zadaných hodnot vykreslí vizuální podoba drah laseru v řezu vertikálního (obr. 5-17 *levý graf*) a skloněného prutu (obr. 5-17 *pravý graf*) odpovídajícím buňce BCCZ. Pod těmito grafy je zobrazen řez drah podél čerchované čáry zakončené šipkou. Ten vizuálně zobrazuje, jak vypadá nastavený procentuální překryv drah. (Příloha 13)

Na pravé straně třetí části skriptu jsou zobrazeny hodnoty vnitřního překryvu, který když je v rozsahu $10\text{--}40\%$ tak okno s hodnotou zezelená, naopak když je mimo tento rozsah, tak okno zčervená a uživatel je upozorněn formou vyskakovacího oznámení na nebezpečnou hodnotu překryvu drah laseru. Uživatel tak může zadané hodnoty korigovat a docílit vhodného překryvu drah. Dále je zde zobrazen celkový počet drah potřebný pro výrobu prutů a „beam compensation“, což je odsazení první kontury od požadovaného průměru prutu, který odpovídá $\frac{1}{2}$ šířky dráhy. (Příloha 14)

Skript tedy vede uživatele výběrem procesních parametrů, aniž by uživatel musel hlouběji znát problematiku výroby mikro-prutových struktur. Uživatel tak může vybrat vhodné procesní parametry na základě svých požadavků na porozitu, drsnost povrchu a zároveň zajistit stabilitu výroby volbou vhodného vnitřního překryvu drah laseru. Uživatel tak nemusí provádět všechny experimenty, které jsou potřebné pro výběr vhodných procesních parametrů, pouze vybere tyto procesní parametry pomocí skriptu. Skript vyžaduje pouze zadání hodnoty výkonu laseru, skenovací rychlosti, průměru prutu a překryvu drah laseru.

6 DISKUZE

6.1 Procesní parametry

Na základě iniciačního experimentu, kde byly použity návary a skloněné pruty, byl vybrán rozsah lineární energie $0,25\text{--}0,4\text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$ jako potencionálně vhodný pro výrobu mikro-prutových struktur. Výběr rozsahu lineární energie byl potvrzen studií [8], kde autoři uvedli, že lineární energie v rozsahu $0,15\text{--}0,25\text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$ je vhodná pro výrobu technologií SLM při použití vrstvy $30\text{ }\mu\text{m}$. Jelikož je v práci použita vrstva $50\text{ }\mu\text{m}$, musí být vhodná lineární energie vyšší, aby došlo k protavení větší vrstvy prášku.

6.2 Šířka dráhy

Vzorky jednotlivých drah laseru, tenkých stěn a prutové vzorky 1T měly stejný trend šířky dráhy v závislosti na lineární energii. To odpovídá poznatkům autorů [4, 5], kde se zvyšujícím se výkonem laseru (**LP**) a klesající skenovací rychlostí (**LS**) docházelo ke zvětšování šířky dráhy.

Naměřené hodnoty šířky dráhy se pro jednotlivé vzorky lišily. To je způsobeno především rozdílnou geometrií použitých vzorků a odvodem tepelné energie. Vyrobené návary umístěné na destičku dosahují srovnatelných výsledků s literaturou [4–8], ale byla na nich naměřena nejmenší šířka dráhy ze všech použitých vzorků. To je dáno především odvodem tepelné energie přes objemový materiál destičky, na které byly návary umístěny. Vzhledem k vyšší tepelné vodivosti objemového materiálu došlo k odvodu tepla z návaru rychleji, což vedlo k rychlejšímu tuhnutí taveniny a ovlivnění šířky dráhy. U vzorků tenkých stěn byla naměřena větší šířka dráhy o 21 %. To je dáno malým objemem materiálu, který tenké stěny tvoří. Ten nedokáže tepelnou energii dostatečně rychle odvést a tavenina je tak držena na vyšší teplotě. Vlivem vysoké teploty dochází k roztavení okolních zrn prášku, i přes to, že prášek má výrazně nižší tepelnou vodivost vlivem bodového kontaktu mezi jednotlivými zrny. To vede k zvětšení šířky dráhy. U prutových vzorků 1T tvořených jednou drah laseru byla naměřena šířka dráhy o 47 % vyšší oproti jednotlivým návarům. Vzhledem k tomu, že prut je tvořen jednou drahou laseru, dochází k obdobné situaci jako u tenkých stěn. Další roli ale hraje geometrie prutu, protože vlivem vysoké teploty taveniny dochází k zahřívání okolních zrn prášku. Ve středu prutu tak dojde k zahřátí zrn prášku, protože teplo nemůže jinam přestoupit. Vyšší teplota zrn prášku ve středu prutu umožňuje jejich roztavení při nižší působící vstupní energii.

Tuto myšlenku potvrdily výsledky naměřené vnější a vnitřní šířky dráhy na prutových vzorcích 1T. Vnitřní šířka dráhy byla až o 50 % větší, než vnější šířka dráhy. To poukazuje na tendenci taveniny se rozšiřovat především do středu prutu, což koresponduje s uvedenou myšlenkou.

U skloněných prutových vzorků 1T tvořených jednou drahou laseru byla naměřena větší šířka dráhy až o 32 % v porovnání s vertikálními prutovými vzorky 1T. Toto chování může být vysvětleno vyšší akumulací tepelné energie u skloněných prutů, jak uvedli autoři [18]. Vzhledem ke směru teplotního gradientu $-Z$, který je rozdílný s orientací skloněného prutu, dochází k akumulaci tepelné energie ve spodní části prutu. Tím je tavenina držena delší dobu na vysoké teplotě a dochází k roztavení okolních zrn prášku, což zvětší šířku dráhy. Zároveň ale byla na těchto vzorcích naměřena větší šířka dráhy ve spodní části vzorků oproti horní části. Jelikož se situace zdá být stejná jak v horní, tak ve spodní části skloněného prutu, bylo by potřeba tento jev dále ověřit.

6.3 Překryv drah laseru

Pro návrh vhodné vzdálenosti drah laseru (**HD**) byl použit rozdílný přístup oproti literatuře [9–11]. V literatuře autoři používají konkrétní hodnotu **HD** a zabývají se vlivem rozdílných hodnot. Nebezpečí tohoto přístupu spočívá v tom, že pro parametry s nízkou energií (malá šířka dráhy) bude **HD** vysoká a bude tak docházet ke vzniku porozity vlivem nespojení sousedních drah. Naopak pro parametry s vysokou energií (velká šířka dráhy) bude **HD** příliš malá, což způsobí vznik porozity mezi drahami z důvodu vysoké teploty a odpaření materiálu. V diplomové práci byla hodnota **HD** vypočítána z šířky dráhy pro konkrétní procesní parametry a z hodnoty překryvu drah laseru (**OL**). Tento přístup měl zajistit rovnoměrné rozložení energie v prutu pro různé procesní parametry.

6.4 Porozita

V experimentu pro ověření volby procesních parametrů docházelo u prutů o průměru 1,25 mm a větším ke vzniku ostrých pórů. V literatuře [12] je vznik ostrých pórů připisován nedostatečné vstupní energii procesních parametrů, která může být způsobena velkou **HD**. Avšak ostré póry byly pozorovány i u procesních parametrů s vyšší energií a **HD**, která byla volena na základě šířky dráhy a **OL**. Možným vysvětlením vzniku ostrých pórů tedy může být použitý směr výroby „Outside-in“. Díky povrchovému napětí taveniny [25] dochází ke vzniku oblasti kolem návaru, kde se nenachází prášek. Když jsou návary v prutu vyráběny směrem dovnitř prutu, mohou tak vznikat místa bez prášku, které laser pouze protaví, aniž by vznikl návar. V další vrstvě je na tyto místa nanášena vyšší vrstva prášku, kterou nejsou procesní parametry schopny protavit. To může být příčinou tvorby ostrých pórů. Podpořením této myšlenky mohou být pruty vyráběné ve směru „Inside-out“. U nich se ostré póry téměř nevyskytovaly, což bylo způsobeno směrem výroby, kde v okolí prutu se nachází dostatečné množství prášku.

Jak v experimentu pro ověření volby procesních parametrů, tak v experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface byly naměřeny dlouhé póry v ose prutu. To bylo způsobeno malým (až záporným) **OL** uprostřed prutu. Ten vznikl při návrhu prutů, protože z nastavených parametrů výroby SLM byl vytvořen určitý počet trajektorií laseru, který v některých případech vedl ke vzniku nedostatečného **OL** uprostřed prutu. Ten způsobil nedostatečné spojení sousedních drah laseru, což způsobilo vznik pórů v ose prutu. Tento problém byl vyřešen v experimentu pro ověření vhodného nastavení procesních parametrů, kde byl použit jednotný **OL** 35 % v celém prutu. Tím bylo docíleno rovnoměrného působení energie po celém prutu a nevznikaly tak oblasti s neroztaveným práškem. V prutech tak byla naměřena nízká hodnota porozity (do 0,2 %) pro všechny vybrané procesní parametry.

6.5 Drsnost povrchu

Z výsledků drsnosti povrchu na vertikálních prutech bylo zjištěno, že vyšší lineární energie ($0,5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$) u první kontury SLM procesních parametrů vedla k výrobě vertikálních prutů s nízkou drsností povrchu (max R_a 12 μm). Pruty vyrobené contour strategií (lineární energie do $0,38 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$) přitom dosahovaly hodnot až R_a 20 μm . Možnou příčinou zhoršení povrchu jsou natavené částice na bocích prutu. Ty v případě nižší lineární energie nemusí být vždy zcela roztaveny a mohou tak být pouze přilepené na stranách prutu. Vyšší energii může vést k jejich kompletnímu roztavení, čímž vznikne povrch s nižší drsností povrchu. Vyšší energie je tedy lepší pro získání nižší drsnosti povrchu, ale vede na vyšší porozitu vlivem vypařování materiálu.

U skloněných prutů na spodní straně měla vyšší energie SLM procesních parametrů ($E_{lin} = 0,5 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$) naopak negativní vliv na drsnost povrchu (max Ra 187 μm). U contour procesních parametrů (max $E_{lin} = 0,38 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$) byl naměřena maximální hodnota Ra 133 μm . Vlivem akumulace tepelné energie ve spodní části skloněných prutů byla tavenina držena na vysoké teplotě. Teplo tak bylo odváděno i přes okolní prášek a vzhledem k vysoké teplotě taveniny docházelo k roztavení/natavení zrn prášku. Čím byla energie použitých procesních parametrů vyšší, tím více se tento jev projevil. Tato myšlenka byla potvrzena autory [7]. Naopak autoři [13] uvedli, že vyšší energie procesních parametrů povede k nižší viskozitě taveniny, která zateče mezi zrna prášku, čímž dojde ke snížení drsnosti povrchu. Tento jev však nebyl na získaných výsledcích pozorován.

Také byla naměřena vyšší drsnost povrchu na horní straně skloněných prutů oproti vertikálním prutům. To může být způsobeno „schodišťovým“ efektem, který je typický pro aditivní technologie, jak uvedli autoři [13].

6.6 Rozměrová přesnost

V experimentu pro ověření volby procesních parametrů byly vyrobeny pruty s průměrem o 32 % nižším oproti nominálnímu průměru. To bylo způsobeno nastavením „beam compensation“ na hodnotu $\frac{1}{2}$ šířky dráhy pro dané procesní parametry. Jak ale bylo zjištěno v prutovém experimentu 1T, vnější šířka dráhy je menší než $\frac{1}{2}$ celkové šířky dráhy. Při použití „beam compensation“ $\frac{1}{3}$ šířky dráhy v experimentu pro ověření volby šířky dráhy na základě analýzy Response surface byla naměřena maximální odchylka u vertikálních prutů 0,09 mm a u skloněných prutů 0,04 mm. Tyto hodnoty poukazují na velmi dobrou rozměrovou přesnost, která potvrdila výběr hodnoty „beam compensation“ na základě rozdílné šířky dráhy pro různé procesní parametry a průměry prutu.

Použití vhodného nastavení parametrů contour strategie vedlo k výrobě prutů s nízkou porozitou (0,16 %) a dobrou rozměrovou přesností. U procesních parametrů s lineární energií do $0,3 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$ byla naměřena také nízká drsnost povrchu u vertikálních prutů do hodnoty Ra 16 μm . Na spodní straně skloněných prutů nejlepší drsnost povrchu dosahovala hodnot max Ra 60 μm . Jedná se o vysokou hodnotu drsnosti povrchu, která je spojena s technologií výroby SLM.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na výzkum základních procesních parametrů pro SLM výrobu BCC mikro-prutové struktury pomocí contour skenovací strategie. Jelikož jsou mikro-prutové struktury tvořeny malým objemem materiálu, dochází k rozdílné situaci v odvodu tepla oproti objemovému materiálu, a proto nelze použít doporučené procesní parametry a skenovací strategii.

Aby bylo možné získat vstupní parametry (rozsah lineární energie, šířka dráhy, překryv drah laseru, směr výroby) pro výrobu mikro-prutových struktur, bylo provedeno velké množství experimentů. Z iniciačních experimentů byl získán vzhled do problematiky výroby mikro-prutových struktur (závislosti šířky dráhy, porozity a drsnosti povrchu na lineární energii) a byly ověřeny poznatky ze současného stavu poznání. Zároveň byl vybrán rozsah lineární energie 0,25–0,4 J·mm⁻¹. Tento rozsah byl ověřen v návarovém experimentu, kde pro ověření byly použity parametry návaru. Šířka dráhy byla měřena na návarech, tenkých stěnách a prutových vzorcích 1T tvořených jednou drahou laseru. Návary byly ovlivněny vyšší tepelnou vodivostí destičky, na které byly vyrobeny. Tenké stěny byly tvořeny malým objemem materiálu, a tak více reprezentovaly mikro-prutové struktury. Avšak největší shody s odvodem tepelné energie a geometrií mikro-prutových struktur dosahovaly prutové vzorky tvořené jednou drahou. Byla na nich zjištěna závislost šířky dráhy na průměru prutu a lineární energii. Naměřené hodnoty byly použity při tvorbě analýzy Response surface, která umožnila návrh šířky dráhy na základě průměru prutu a lineární energie. Pro zjištění vhodného překryvu drah laseru byly použity prutové vzorky 2T tvořené dvěma drahami laseru. Vyhodnocením porozity mezi drahami byl zjištěn vhodný rozsah překryvu drah laseru 30–40 %, ve kterém byla porozita pod 1 %. V experimentu pro ověření volby procesních parametrů byly vyrobeny pruty na základě dosavadního zjištění. Avšak u prutů větších průměrů se vyskytovaly ostré póry. Proto byl navrhnout experiment pro ověření vlivu směru výroby contour strategie, kde směr výroby „Inside-out“ výrazně snížil množství ostrých pórů v prutu.

Získané poznatky byly použity pro výrobu vertikálních skloněných prutů. Byly vyrobeny vertikální pruty s porozitou do 0,02 % a skloněné pruty s porozitou do 0,16 %. Bylo dosaženo velmi dobré rozměrové přesnosti u vertikálních prutů 0,09 mm a u skloněných 0,04 mm. Drsnost povrchu byla u vertikálních prutů Ra 16 μm a u skloněných Ra 60 μm.

Při použití vhodného nastavení procesních parametrů vycházejícího z rozsahu lineární energie 0,25–0,4 J·mm⁻¹, šířky dráhy z analýzy Response surface, konstantního překryvu drah v prutu 35 % byly vyrobeny jak vertikální, tak skloněné pruty s porozitou do 0,2 %. To poukazuje na nutnost vhodného nastavení procesních parametrů, což získané poznatky umožňují.

Zároveň byly výsledky porovnány s pruty vyrobenými SLM procesními parametry, které dosahovaly mnohonásobně vyšší porozity a obsahovaly póry, které ve velké míře ovlivnily velikost nosného průřezu. Díky vyšší lineární energii první kontury ale dosahovaly lepší drsnosti povrchu u vertikálních prutů. U skloněných prutů vysoká energie kontury způsobila vznik větší drsnosti povrchu. Pruty také dosahovaly odchylky až 0,14 mm od požadovaného průměru.

Při vhodném nastavení procesních parametrů contour skenovací strategie je možné vyrábět pruty s nízkou porozitou. Při použití objemové strategie byla u tenkých prutů naměřena mnohonásobně vyšší porozita. Její využití je především u prutů větších průměrů (> 3 mm), které se dají považovat za objemový materiál. Contour strategie také dosahuje dobré rozměrové přesnosti a při použití procesních parametrů s nízkou lineární energií dosahuje i nízké drsnosti povrchu.

Navíc byl v práci vytvořen skript, který umožňuje uživateli výběr procesních parametrů na základě naměřených dat. Navede uživatele na vhodnou volbu výkonu laseru, skenovací rychlosti a překryvu drah laseru a zobrazí uživateli předpokládané hodnoty porozity a drsnosti povrchu vycházející z lineární energie procesních parametrů. Navíc umožňuje změnu vstupních dat pro různé zařízení a materiály. Uživatel je tak schopný si skript kalibrovat pro vlastní potřeby.

Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

V dalším kroku bych se chtěl zabývat vlivem procesních parametrů na buňky mikro-prutové struktury zejména z důvodu uzlu, kde dochází ke změně geometrie a trajektorií drah laseru a ověřit, zda je možné pomocí tohoto nastavení zlepšit mechanické vlastnosti mikro-prutových struktur. Zároveň bych chtěl do skriptu implementovat dosažené výsledky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HARUN, W. S.W., M. S.I.N. KAMARIAH, N. MUHAMAD, S. A.C. GHANI, F. AHMAD a Z. MOHAMED. A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials. *Powder Technology*. 2018, roč. 327, s. 128–151. ISSN 1873328X.
- [2] *Frustum's Topology Optimization Comes to Siemens' NX Software in a Partnership Bringing Design Innovation to Additive Manufacturing | 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing*. [vid. 20. únor 2019]. Dostupné z: <https://3dprint.com/169099/frustum-siemens-nx/>
- [3] „Vypečená“ konzola míří z tiskárny do vesmíru - Nápady a objevy – Zprávy z VUT. [vid. 18. březen 2019]. Dostupné z: <https://zvut.cz/napady-objevy/napady-a-objevy-f38103/vypecena-konzola-miri-z-tiskarny-do-vesmiru-d103894>
- [4] ABOULKHAIR, Nesma T., Ian MASKERY, Chris TUCK, Ian ASHCROFT a Nicola M. EVERITT. On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016, roč. 230, s. 88–98. ISSN 09240136.
- [5] YU, Guanqun, Dongdong GU, Donghua DAI, Mujian XIA, Chenglong MA a Qimin SHI. On the role of processing parameters in thermal behavior, surface morphology and accuracy during laser 3D printing of aluminum alloy. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016, roč. 49, č. 13, s. 135501. ISSN 0022-3727.
- [6] ZHANG, Jinliang, Bo SONG, Qingsong WEI, Dave BOURELL a Yusheng SHI. A review of selective laser melting of aluminum alloys : Processing , microstructure , property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019, roč. 35, č. 2, s. 270–284. ISSN 1005-0302.
- [7] TIAN, Yang, Dacian TOMUS, Paul ROMETSCH a Xinhua WU. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2017, roč. 13, s. 103–112. ISSN 22148604.
- [8] KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation. *Materials Science and Technology*. 2015, roč. 31, č. 8, s. 917–923. ISSN 0267-0836.
- [9] PEI, Wei, Wei ZHENGYING, Chen ZHEN, Li JUNFENG, Zhang SHUZHE a Du JUN. Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2017, roč. 123, č. 8, s. 1–15. ISSN 14320630.
- [10] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J. SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, roč. 211, č. 2, s. 275–284. ISSN 09240136.
- [11] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2014, roč. 1, s. 77–86. ISSN 22148604.

- [12] GALY, Cassiopée, Emilie LE GUEN, Eric LACOSTE a Corinne ARVIEU. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences. *Additive Manufacturing*. 2018, roč. 22, č. July 2017, s. 165–175. ISSN 22148604.
- [13] HAN, Xuesong, Haihong ZHU, Xiaojia NIE, Guoqing WANG a Xiaoyan ZENG. Investigation on selective laser melting AlSi10Mg cellular lattice strut: Molten pool morphology, surface roughness and dimensional accuracy. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 3. ISSN 19961944.
- [14] QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J E ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*. 2015, roč. 628, s. 188–197. ISSN 09215093.
- [15] PAULY, S., C. SCHRICKER, S. SCUDINO, L. DENG a U. KÜHN. Processing a glass-forming Zr-based alloy by selective laser melting. *Materials and Design*. 2017, roč. 135, s. 133–141. ISSN 18734197.
- [16] KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J. P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 2012, roč. 39, s. 439–446. ISSN 18753892.
- [17] 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*. 2013, roč. 61, č. 5, s. 1809–1819. ISSN 13596454.
- [18] DELROISSE, Pauline, Pascal J. JACQUES, Eric MAIRE, Olivier RIGO a Aude SIMAR. Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting. *Scripta Materialia*. 2017, roč. 141, s. 32–35. ISSN 13596462.
- [19] LIU, Mulin, Naoki TAKATA, Asuka SUZUKI a Makoto KOBASHI. Microstructural characterization of cellular AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Materials and Design*. 2018, roč. 157, s. 478–491. ISSN 18734197.
- [20] DONG, Zhichao, Xiaoyu ZHANG, Wenhua SHI, Hao ZHOU, Hongshuai LEI a Jun LIANG. Study of size effect on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg samples made by selective laser melting. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 12. ISSN 19961944.
- [21] VRÁNA, Radek, Daniel KOUTNÝ, David PALOÚŠEK, Libor PANTĚLEJEV, Jan JAROŠ, Tomáš ZIKMUND a Jozef KAISER. Selective laser melting strategy for fabrication of thin struts usable in lattice structures. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 9. ISSN 19961944.
- [22] SLM Solutions Group AG: SLM®280 2.0. [vid. 3. duben 2019]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/products/machines/slmr280-20/>
- [23] ATOS Triple Scan | GOM. [vid. 3. duben 2019]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>
- [24] How does a micro-CT scanner work? | Micro Photonics. [vid. 3. duben 2019]. Dostupné z: <https://www.microphotonics.com/how-does-a-microct-scanner-work/>

- [25] METEL, Alexander, Michael STEBULYANIN, Sergey FEDOROV a Anna OKUNKOVA. Power Density Distribution for Laser Additive Manufacturing (SLM): Potential, Fundamentals and Advanced Applications. *Technologies*. 2018, roč. 7, č. 1, s. 5. ISSN 2227-7080.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Příklady použitých fyzikálních veličin

<i>AT</i>		Aditivní technologie
<i>SLM</i>		Selective Laser Melting
<i>TO</i>		Topology Optimization
<i>CAD</i>		Computer Aided Design
<i>STL</i>		Stereolithography
μCT		Micro Computed Tomography
<i>3D</i>		Třírozměrné
<i>2D</i>		Dvourozměrné
<i>Ra</i>		Střední aritmetická úchylka profilu
<i>BCC</i>		Kubická prostorově středěná struktura
<i>BCCZ</i>		Kubická prostorově středěná struktura s výztuhami v ose Z
<i>LP</i>	W	Výkon laseru
<i>LS</i>	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Skenovací rychlost
<i>HD</i>	mm	Vzdálenost drah laseru
<i>OL</i>	%	Překryv drah
<i>TW</i>	mm	Šířka dráhy
<i>1T</i>		One track
<i>2T</i>		Two tracks
TW_{IN}	mm	Vnitřní šířka dráhy
TW_{OUT}	mm	Vnější šířka dráhy
E_{lin}	$\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$	Lineární energie
E_{ar}	$\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$	Plošná energie
E_b	$\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$	Objemová energie

<i>E</i>	GPa	Modul pružnosti v tahu
<i>EL</i>	%	Prodloužení
<i>UTS</i>	MPa	Mez pevnosti v tahu
<i>YS</i>	MPa	Mez kluzu

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 1-1 Příklady topologické optimalizace: (a) objemová TO [2]; (b) lattice structure TO [3]	14
obr. 2-1 (a) vliv LS na šířku dráhy [4]; (b) vliv LP na šířku dráhy [5]	16
obr. 2-2 Schéma návaru a průvaru; (a) „balling efekt“; (b) následek použití vyšší energie [6]	17
obr. 2-3 Výbrusy drah (a) kontaktní úhel 76°; (b) kontaktní úhel 89°; (c) kontaktní úhel 106° [7]	17
obr. 2-4 Výbrusy drah (A); (B) kuželový tvar průvaru; (C); (D) satelity na povrchu dráhy [4]	18
obr. 2-5 Okno optimálních procesních parametrů pro tvorbu drah [8]	19
obr. 2-6 HD a její vliv na vznik pórů [9].....	19
obr. 2-7 Vliv HD na vznik pórů při LP 180 W a LS 1000 mm·s ⁻¹ ; (a) HD 70 μm; (b) HD 60 μm; (c) HD 50 μm [9].....	20
obr. 2-8 Tvorba návarů; (A) vznik oxidační vrstvy v tavenině; (B) vznik uzavřené oblasti mezi oxidačními vrstvami [10]	21
obr. 2-9 Vliv zvyšující se HD na vznik porozity mezi drahami [11]	22
obr. 2-10 (a) závislost průvaru na LS; (b) závislost šířky dráhy na LS pro HD 40 μm, 60 μm, 80 μm a 100 μm [13]	24
obr. 2-11 (a) Vliv výkonu laseru na průměr prutu; (b) vliv skenovací rychlosti na průměr prutu [14]	25
obr. 2-12 (a) contour strategie; (b) chess board strategie; (c) strategie s pootočenými vrstvami	26
obr. 2-13 Výbrusy prutů v horní části, zobrazení porozity v celém prutu ve spodní části; (a), (b) contour strategie; (c), (d) „Chess board“ strategie; (e), (f) strategie s horní vrstvou pootočenou o 90° oproti spodní vrstvě [15]	27
obr. 2-14 Porozita na konci drah laseru (a) orientace součásti v XY; (b) orientace součásti v Z [16].....	28
obr. 2-15 Rozdílný odvod tepla (a) kolmý prut; (b) prut se sklonem 35,5°; (c) použitá „Contour“ strategie [18].....	29
obr. 2-16 Rozdílný odvod tepla v uzlu struktury (a) v horní části; (b) ve spodní části [19]	29

obr. 2-17 Rozdílná porozita v prutech (a) vertikální prut; (b) prut se sklonem 35,5°; (c) srovnání porozity v oblasti A a B [18]	30
obr. 2-18 Závislost množství porozity (a) na LP; (b) na LS [14]	31
obr. 2-19 Schéma vlivu průvaru a zatékání taveniny na drsnost povrchu při působení energie (a) vysoké; (b) střední; (c) nízké [13]	31
obr. 2-20 Závislost drsnosti povrchu na sklonu prutů v horní část prutu (vlevo) a ve spodní část prutu (vpravo) [7]	32
obr. 2-21 Vliv různých průměrů prutů na porozitu (a) 1 mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm [20]	33
obr. 2-22 Vliv velikosti prutů na mechanické vlastnosti (a) E, EL; (b) UTS, YS [20]	34
obr. 3-1 (a) obecná objemová strategie, (b) contour strategie.....	35
obr. 4-1 Postup řešení	41
obr. 4-2 (a) contour strategie – červeně dráha laseru, černě okraje dráhy	42
obr. 4-3 (a) zobrazení zrn prášku pod mikroskopem; (b) rozložení velikosti zrn v prášku [21]	43
obr. 4-4 Zařízení SLM 280 HL [22].....	44
obr. 4-5 (a) foto jednotlivých návarů; (b) vzhled prutového vzorku skloněného o 35,26°	48
obr. 4-6 Parametry dráhy.....	50
obr. 4-7 Návary umístěné na destičce.....	51
obr. 4-8 Vzorek (a) vertikálních; (b) skloněných tenkých stěn	52
obr. 4-9 (a) návrh prutového vzorku 1T; (b) vzhled vzorků	53
obr. 4-10 (a) schéma prutového vzorku 2T; (b) vzhled prutových vzorků 2T.....	54
obr. 4-11 Pruty vyrobené v přehledovém experimentu I.....	55
obr. 4-12 Porovnání směru výroby contour strategie (a) „Outside-In“; (b) „Inside-Out“ .	56
obr. 4-13 Vyrobené pruty	57
obr. 4-14 Zobrazení vlivu různé šířky dráhy v prutu	58
obr. 4-15 (a) měření šířky dráhy na mikroskopu Olympus; (b) měření šířky dráhy na mikroskopu KEYENCE.....	59
obr. 4-16 Měření šířky dráhy (a) tenkých stěn; (b) prutových vzorků 1T.....	60
obr. 4-17 Snímek metalografického výbrusu (a) prutového vzorku 2T, (c) prutu; (b);(d) analyzovaná oblast	61

obr. 4-19 (a) rozložení vzorků na jednom skenu; snímky prutů o průměru 1,25 mm (b); (c) vertikální; (d); (e) skloněné	61
obr. 4-20 Vyhodnocení drsnosti povrchu.....	62
obr. 5-1 Prvotní výsledky: (a) šířka dráhy; (b) drsnost povrchu; (c) porozita v závislosti na lineární energii.....	65
obr. 5-2 (a) závislost výšky; (b) hloubky návaru na lineární energii.....	66
obr. 5-3 (a) závislost kontaktního úhlu na lineární energii; (b) Změna návaru s lineární energií.....	67
obr. 5-4 Závislost šířky dráhy na lineární energii vertikálních vzorků	68
obr. 5-5 (a) schematické zobrazení vnější a vnitřní šířky dráhy	69
obr. 5-6 (a) závislost šířky dráhy na průměru trajektorie laseru; (b) zobrazení rozdílné šířky dráhy u prutů s průměrem 0,8; 1,2; 1,6 a 2 mm.....	70
obr. 5-7 Rozdílná šířka prutu v závislosti na průměru prutu a vstupní energii	70
obr. 5-8 Závislost šířky dráhy (a) na lineární energii; (b) na průměru trajektorie laseru ..	71
obr. 5-9 (a) Rozdílná horní a spodní šířka dráhy u skloněných prutů 1T v závislosti na průměru trajektorie laseru; (b) schéma rozložení vzorku při snímání; (c) snímky prutových vzorků 1T s průměrem trajektorie laseru 0,8; 1,2; 1,6 mm	72
obr. 5-10 Šířka dráhy v závislosti na lineární energii a průměru prutu (a) 90°; (b) 35,26° sklon.....	73
obr. 5-11 Závislost porozity na překryvu drah laseru (a) prvotní výsledky; (b) zpřesňující experiment	74
obr. 5-12 Závislost porozity na průměru (a) vertikálních; (b) skloněných prutů	80
obr. 5-13 Závislost porozity na průměru vertikálních a skloněných prutů vyrobených SLM strategií.....	81
obr. 5-14 Závislost drsnosti povrchu Ra na průměru prutu pro (a) vertikální; (b) skloněné pruty	84
obr. 5-15 Drsnost povrchu na skloněných prutech	85
obr. 5-16 Závislost absolutní hodnoty odchylky rozměru na průměru skloněných prutů .	87
obr. 5-17 Skript	88

SEZNAM TABULEK

tab. 5-1 Porovnání porozity v prutech vyrobených v experimentu pro ověření volby procesních parametrů	76
tab. 5-2 Porovnání vlivu směru contour strategie na skloněných prutech	78
tab. 5-3 Porovnání porozity ve vyrobených prutech.....	79
tab. 5-4 Pruty vyrobené pomocí SLM procesních parametrů	82
tab. 5-5 Porovnání prutů vyrobených vhodnými procesními parametry	83
tab. 5-6 Porovnání drsnosti povrchu contour a SLM procesních parametrů	86

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – procesní parametry iniciačního návarového experimentu	107
Příloha 2 – procesní parametry iniciačního prutového testu.....	108
Příloha 3 – procesní parametry testu geometrie návaru	109
Příloha 4 – procesní parametry pro test prutových vzorků 1T	110
Příloha 5 – procesní parametry v přehledovém prutovém experimentu	110
Příloha 6 – procesní parametry v experimentu pro ověření vhodného nastavení procesních parametrů.....	111
Příloha 7 – Skript: ukázat použitého kódu	112
Příloha 8 – Skript: instrukce – (a) ABOUT; (b) INSTRUCTIONS.....	113
Příloha 9 – Skript: nastavení procesních parametrů – (a) vhodné; (b) nevhodné procesní parametry; (c) vyskakovací oznámení.....	113
Příloha 10 – Skript: nastavení procesních parametrů – grafy	114
Příloha 11 – Skript: nastavení procesních parametrů – předpokládané hodnoty šířky dráhy, porozity a drsnosti povrchu	114
Příloha 12 – Skript: vizualizace – nastavení průměru prutu a překryvu drah laseru	114
Příloha 13 – Skript: vizualizace – procesní parametry (a) s malým; (b) s velkým překryvem drah laseru.....	115
Příloha 14 – Skript: vizualizace – (a) vhodné; (b) nevhodné procesní parametry; (c) vyskakovací oznámení.....	116

Příloha 1 – procesní parametry iniciačního návarového experimentu

		Výkon laseru (W)									
Vybrané parametry		175	200	225	250	275	300	325	350	375	400
Skenovací rychlost (mm·s ⁻¹)	200	X	X								
	300	X	X	X	X						
	400	X	X	X	X	X	X				
	500	X	X	X	X	X	X	X	X		
	600	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	700	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	800	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	900	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	1000	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	1100		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	1200			X	X	X	X	X	X	X	X
	1300				X	X	X	X	X	X	X
	1400					X	X	X	X	X	X
	1500						X	X	X	X	X
	1600						X	X	X	X	X
	1700							X	X	X	X
	1800								X	X	X
	1900									X	X
	2000										X

Příloha 2 – procesní parametry iniciačního prutového testu

Sample No.	Laser power (W)	Scanning speed ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Linear energy ($\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$)
01	225	1200	0,19
02	275	400	0,69
03	275	1000	0,28
04	275	1400	0,20
05	300	1300	0,23
06	300	1400	0,21
07	325	500	0,65
08	325	600	0,54
09	325	900	0,36
10	325	1000	0,33
11	325	1700	0,19
12	350	500	0,70
13	350	600	0,58
14	350	1000	0,35
15	350	2000	0,18
16	400	800	0,50
17	400	900	0,44

Příloha 3 – procesní parametry testu geometrie návaru

Sample No.	Laser power (W)	Scanning speed (mm·s⁻¹)	Linear energy (J·mm⁻¹)
01	200	500	0,40
02	200	600	0,33
03	200	700	0,29
04	200	800	0,25
05	225	500	0,45
06	225	600	0,38
07	225	700	0,32
08	225	800	0,28
09	225	900	0,25
10	250	600	0,42
11	250	700	0,36
12	250	800	0,31
13	250	900	0,28
14	250	1000	0,25
15	275	700	0,39
16	275	800	0,34
17	275	900	0,31
18	275	1000	0,28
19	275	1100	0,25
20	300	800	0,38
21	300	900	0,33
22	300	1000	0,30
23	300	1100	0,27
24	300	1200	0,25
25	350	900	0,39
26	350	1100	0,32
27	350	1200	0,29
28	350	1400	0,25

Příloha 4 – procesní parametry pro test prutových vzorků 1T

Sample No.	Laser power (W)	Scanning speed ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Linear energy ($\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Ø CAD / Hatch distance(mm)
01	200	700	0,29	0,7
02	225	900	0,25	0,8
03	250	800	0,31	0,9
04	275	800	0,34	1,2
05	300	800	0,38	1,6
06	350	1100	0,32	2,0
—	—	—	—	2,5
—	—	—	—	3,0

Příloha 5 – procesní parametry v experimentu pro ověření volby procesních parametrů

Sample No.	Laser power (W)	Scanning speed ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Linear energy ($\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Sample diameter (mm)
01	200	700	0,29	0,60
02	225	900	0,25	0,70
03	275	800	0,34	0,80
04	300	800	0,38	0,90
05	350	1100	0,32	1,00
—	—	—	—	1,25
—	—	—	—	1,50
—	—	—	—	2,00
—	—	—	—	3,00

Příloha 6 – procesní parametry v experimentu pro ověření vhodného nastavení procesních parametrů

Orientation	Sample No.	Laser power (W)	Scanning speed (mm·s ⁻¹)	Linear energy (J·mm ⁻¹)	Sample diameter (mm)
Vertical	01	262,5	1167	0,225	0,60
	02	262,5	768	0,342	0,80
	03	262,5	1025	0,256	1,25
	04	262,5	864	0,304	2,00
	05	262,5	861	0,305	3,00
	06	213,75	950	0,225	0,60
	07	324,9	950	0,342	0,80
	08	243,2	950	0,256	1,25
	09	288,8	950	0,304	2,00
	10	289,75	950	0,305	3,00
Angled	11	262,5	1458	0,180	0,60
	12	262,5	994	0,264	0,80
	13	262,5	833	0,315	1,25
	14	262,5	665	0,395	2,00
	15	262,5	928	0,283	3,00
	16	171	950	0,180	0,60
	17	251	950	0,264	0,80
	18	299	950	0,315	1,25
	19	375	950	0,395	2,00
	20	269	950	0,283	3,00

Příloha 7 – Skript: ukázka použitého kódu

```

p3 = (offset/2) - (app.sirka_drahy/2);
p4 = (offset/2);

p6 = [-1.5,0];
p7 = [p4,p3];
p8 = [p4,p2];

plot(app.UIAxes3,p7,p6,'r')
plot(app.UIAxes3,p8,p6,'r')
plot(app.UIAxes3,x5,y5,'r')

offset=offset-2*app.HD;
end
xlim(app.UIAxes,[-a2-0.3,a2+0.3]);
ylim(app.UIAxes,[-a2-0.3,a2+0.3]);
xlim(app.UIAxes3,[-0.3,a+0.3]);
ylim(app.UIAxes3,[-2,1.35]);

plot(app.UIAxes,[0,0],[0,-a2],'k-.'); % zobrazení místa řezu
plot(app.UIAxes,[-d/12,0],[-(a2-a2/7),-a2],'k-.');
plot(app.UIAxes,[0,d/12],[-a2,-(a2-a2/7)],'k-.');

text(app.UIAxes,0.05,(d/18),'1','FontWeight','bold'); %
zobrazení počtu drah
text(app.UIAxes,0.05,(-(d/2+d/15)),txt,'FontWeight','bold');

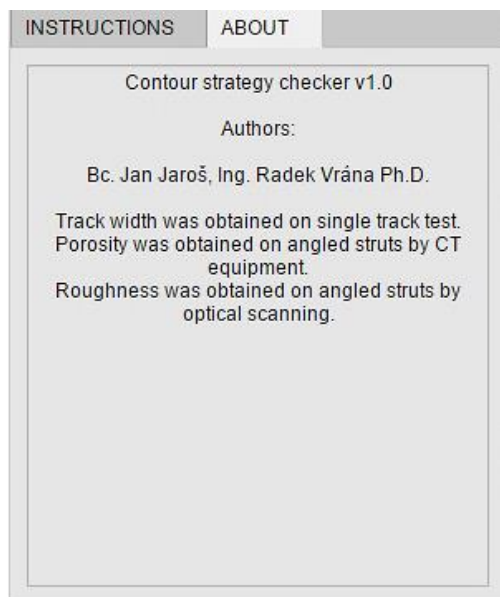
text(app.UIAxes3,(-(d/40)),0.1,'1','FontWeight','bold'); %
zobrazení počtu drah
text(app.UIAxes3,((d/2+d/80)),0.1,txt,'FontWeight','bold');

app.offset4 = offset+2*app.HD;

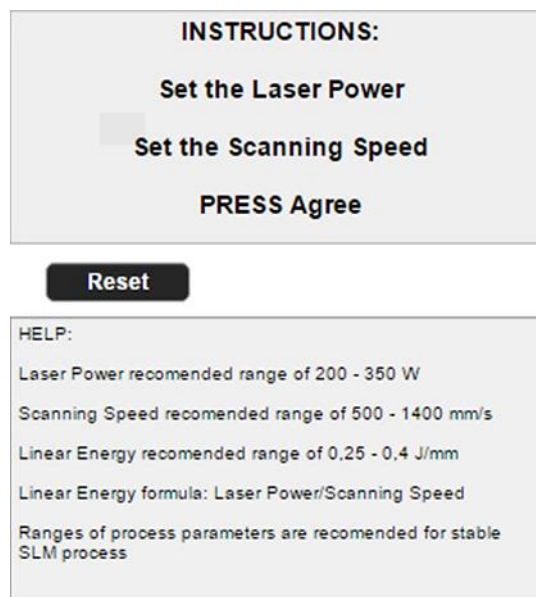
% výpočet vnitřního overlapu / přidání další dráhy - při
nedotavení středu prutu

while ((offset+2*app.HD)/2)-(app.sirka_drahy/2)>0;
    prekryv = (((offset+2*app.HD)*(-
1)))/(app.sirka_drahy/100))+100;
    app.OverlapEditField.Value = prekryv;
    app.OverlapEditField.BackgroundColor = [0.8 0 0.2];
    app.OverlapEditField.FontColor = 'w';
    message3 = sprintf('Unmelted centre of the Strut! \n Check
INSTRUCTIONS');
    f3 = warndlg(message3,'Warning');
```

Příloha 8 – Skript: instrukce – (a) ABOUT; (b) INSTRUCTIONS

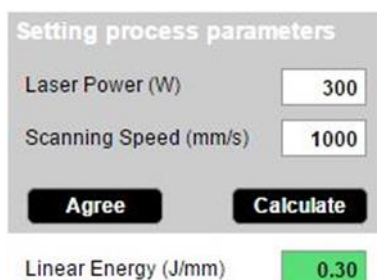


(a)

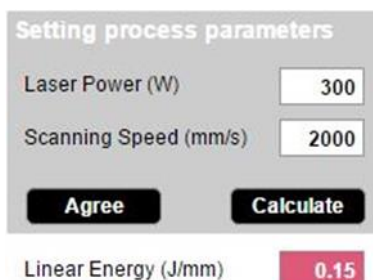


(b)

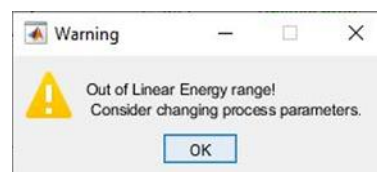
Příloha 9 – Skript: nastavení procesních parametrů – (a) vhodné; (b) nevhodné procesní parametry; (c) vyskakovací oznámení



(a)

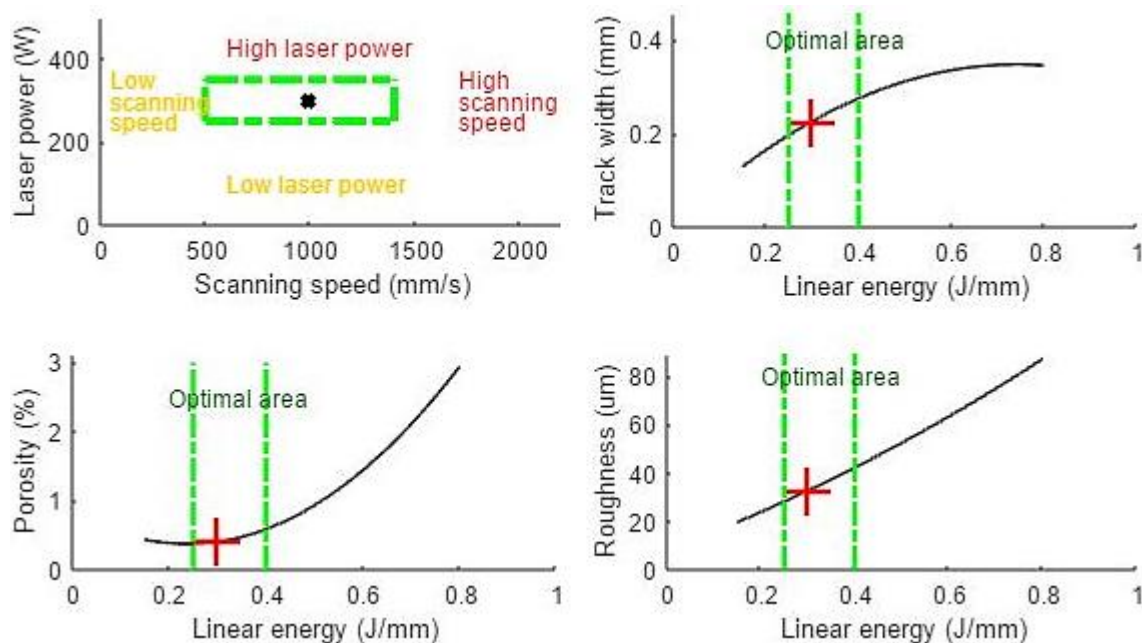


(b)



(c)

Příloha 10 – Skript: nastavení procesních parametrů – grafy



Příloha 11 – Skript: nastavení procesních parametrů – předpokládané hodnoty šířky dráhy, porozity a drsnosti povrchu

Expected material parameters	
Track Width (mm)	0.23
Porosity (%)	0.41
Roughness (mikrom)	32.65

Příloha 12 – Skript: vizualizace – nastavení průměru prutu a překryvu drah laseru

Input parameters

Strut Diameter (mm)

Overlap (%)

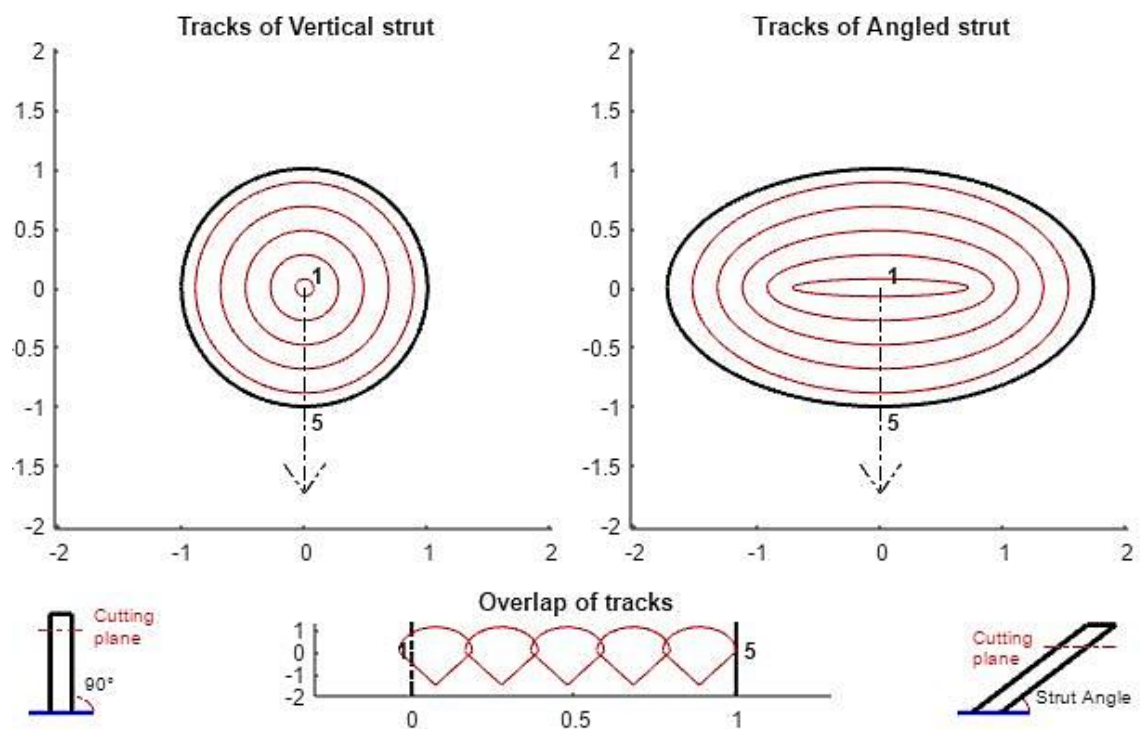
Track Width (mm)

Strut angle

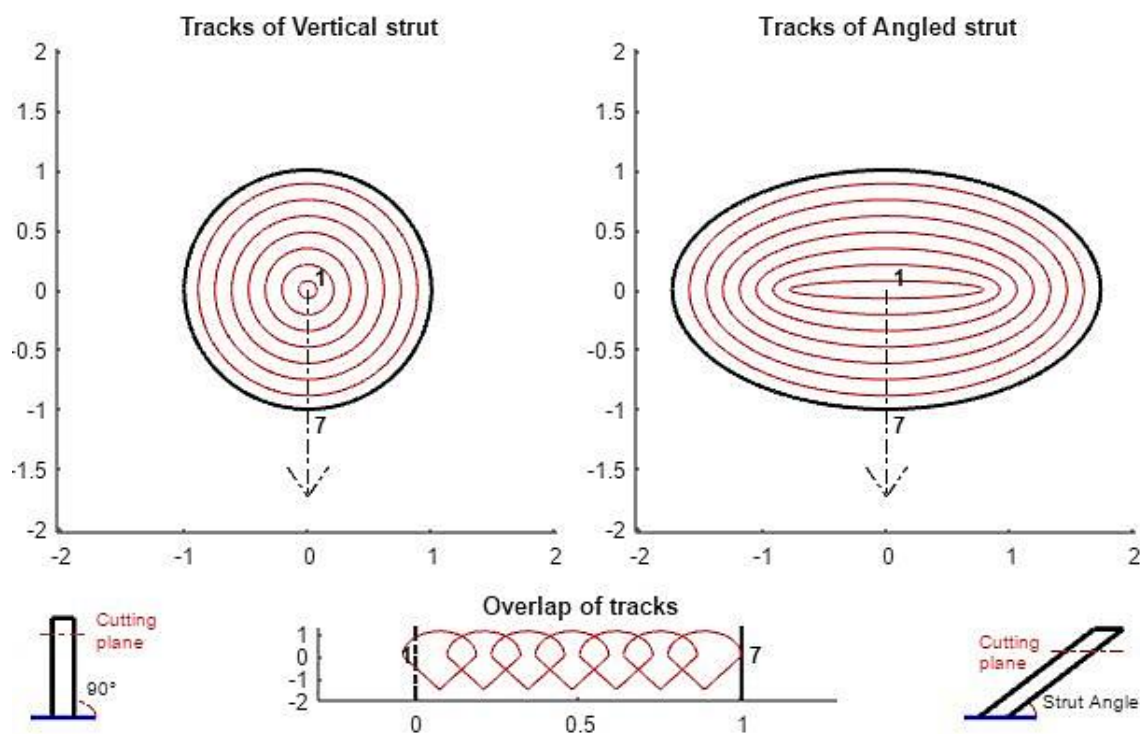
☒ 35,26°
 ☒ 90°

Display

Příloha 13 – Skript: vizualizace – procesní parametry (a) s malým; (b) s velkým překryvem drah laseru



(a)



(b)

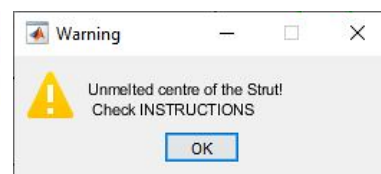
Příloha 14 – Skript: vizualizace – (a) vhodné; (b) nevhodné procesní parametry; (c) vyskakovací oznámení

Inside Overlap (%) 35.3
Number of tracks 5
Diameter compensation (mm) 0.11

(a)

Inside Overlap (%) -44.7
Number of tracks 5
Diameter compensation (mm) 0.11

(b)



(c)