VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV CONTOUR LASEROVÉ STRATEGIE NA VÝROBU GRADIENTNÍCH MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ SLM

EFFECT OF CONTOUR LASER STRATEGY ON THE PRODUCTION OF GRADIENT LATTICE STRUCTURES BY SLM TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Štěpán Juránek

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Jan Jaroš

SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	**Štěpán Juránek**
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Jan Jaroš**
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv contour laserové strategie na výrobu gradientních mikro–prutových struktur vyrobených technologií SLM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Gradientní mikro–prutové struktury je možné použít jako náhradu plného materiálu pro výrobu kovových dílů pomocí 3D technologie aditivní výroby (SLM). Gradientní struktura umožňuje efektivní rozložení zatížení v dílu. Vzhledem k rozdílnému průměru prutů u gradientních struktur není jednoduché navrhnout procesní parametry pro jejich výrobu. Studium vlivu contour laserové strategie na gradientní struktury tak umožní stanovit limity jejího použití pro výrobu technologií SLM.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je experimentálně ověřit použití contour laserové strategie pro výrobu gradientních struktur 3D technologií aditivní výroby kovových dílů (SLM).
Dílčí cíle bakalářské práce:
– rešerše výroby gradientních struktur technologií SLM,
– návrh a provedení experimentů,
– analýza získaných výsledků.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace.
Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).
Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:
http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske–studium–ukonceni/

Seznam doporučené literatury:

VRÁNA, Radek, Jan JAROŠ, Daniel KOUTNÝ, Jakub NOSEK, Tomáš ZIKMUND, Jozef KAISER a David PALOUŠEK. Contour laser strategy and its benefits for lattice structure manufacturing by selective laser melting technology. Journal of Manufacturing Processes. 2022, 74, 640-657. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.12.006

SEHARING, Asliah, Abdul Hadi AZMAN a Shahrum ABDULLAH. A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts. Advances in Mechanical Engineering. 2020, 12(6). ISSN 1687-8140. Dostupné z: doi:10.1177/1687814020916951

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

V této práci je sledován vliv použití contour strategie při výrobě gradientních mikro-prutových struktur. Experimentální metodou za použití metalurgických výbrusů a 3D skenování je contour strategie porovnávána s meander strategií a jsou pozorovány různé jevy, které ovlivňují porozitu a rozměrovou přesnost struktur. Ačkoliv výsledky obou strategií byly velmi podobné, contour strategie se ukázala být více perspektivní pro výrobu gradientních struktur, stejně jako tomu je u výroby struktur s konstantním průměrem prutů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Gradientní mikro-prutové struktury, contour laserová strategie, meander laserová strategie, porozita, rozměrová přesnost

ABSTRACT

In this work, the effect of using the contour strategy in the fabrication of gradient micro-lattice structures is investigated. By an experimental method using metallurgical grinding and 3D scanning, the contour strategy is compared with the meander strategy and various phenomena that affect the porosity and dimensional accuracy of the structures are observed. Although the results of both strategies were very similar, the contour strategy proved to be more promising for the fabrication of gradient structures, as is the case for the fabrication of structures with constant diameter.

KEYWORDS

Gradient lattice structures, contour laser strategy, meander laser strategy, porosity, dimensional accuracy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JURÁNEK, Štěpán. *Vliv contour laserové strategie na výrobu gradientních mikro-prutových struktur vyrobených technologií SLM*. Brno, 2023. Dostupné také z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/148865. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Jan Jaroš.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval své přítelkyni Adéle a rodině za neomezenou podporu. Také bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Janu Jarošovi za skvělé provázení při psaní práce a hlavně za trpělivost.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

TITULNÍ STRANA 1

ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE 3

ABSTRAKT 5

KLÍČOVÁ SLOVA 5

ABSTRACT 5

KEYWORDS 5

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE 6

PODĚKOVÁNÍ 8

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE 8

OBSAH 10

1 ÚVOD 13

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 14

2.1 Selective laser melting 14

2.2 Hořčíkové slitiny 15

2.2.1 Slitina WE43 15

2.3 Výzvy při zpracování hořčíkových slitin 16

2.4 Mikro-prutové struktury 17

2.5 Proces výroby mikro-prutových struktur technologií SLM 18

2.5.1 Vlivy základních procesních parametrů SLM 18

2.5.2 Výkon laseru a skenovací rychlost 19

2.5.3 Vzdálenost drah a překryv 21

2.5.4 Závislost porozity na velikosti prutů 22

2.5.5 Teplotní vodivost 23

2.6 Skenovací strategie laseru 24

2.6.1 Contour strategie 25

2.7 Vliv sklonu prutů na rozměrovou přesnost a drsnost povrchu 27

2.8 Gradientní mikro-prutové struktury 28

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE 31
3.1 Analýza problému 31
3.2 Cíl práce 31
4 MATERIÁL A METODY 32
4.1 Návrh experimentu 32
4.2 Návrh modelů 33
4.3 Výroba vzorků 34
4.3.1 Výrobní zařízení 36
4.4 Zpracování vyrobených vzorků 37
4.5 Postup vyhodnocování 37
4.5.1 Metalurgické výbrusy 37
4.5.2 Pořizování snímků 38
4.5.3 Vyhodnocování porozity 38
4.5.4 3D skenování a vyhodnocování rozměrové přesnosti 39
5 VÝSLEDKY 41
5.1 Porozita 41
5.1.1 Kontrolní vzorky 41
5.1.2 Gradientní struktury 41
5.2 Rozměrová přesnost 43
5.2.1 Kontrolní vzorky 43
5.2.2 Gradientní struktury 43
6 DISKUZE 45
6.1 Překryv drah contour strategie 45
6.2 Porozita 47
6.2.1 Kontrolní vzorky 47
6.2.2 Porozita u contour strategie při procesních parametrech pro průměr prutů 0,5 mm 47
6.2.3 Porozita u contour strategie při procesních parametrech pro průměr prutů 1 mm 48
6.2.4 Porozita u contour strategie při procesních parametrech pro průměr prutů 2 mm 50
6.2.5 Vliv meander strategie na porozitu 52
6.3 Rozměrová přesnost 54
6.3.1 Kontrolní vzorky 54
6.3.2 Gradientní struktury 54
7 ZÁVĚR 57

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 58

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN 62

10 SEZNAM POUŽITÍCH OBRÁZKŮ A GRAFŮ 64

11 SEZNAM TABULEK 67

1 ÚVOD

Aditivní technologie umožňují rychle a efektivně vyrábět díly, které jsou díky své tvarové komplexnosti jen stěží vyrobitelné konvenčními metodami. Objemová tělesa tak mohou být nahrazena různými prostorovými strukturami. Příkladem jsou mikro-prutové struktury, které jsou tvořeny pravidelnou sítí prutů. Díky svému tvaru dobře absorbují kinetickou energii a za zachování dostatečné pevnosti a tuhosti výrazně snižují hmotnost dílů. Proto se využívají například v letectví, kosmonautice a biomedicíně.

Průměry prutů mikro-prutových struktur mohou být konstantní nebo proměnné. Používáním různých průměrů prutů v mikro-prutových strukturách můžeme lépe optimalizovat požadované mechanické vlastnosti. Takové struktury se nazývají gradientní.

Při technologii Selective laser melting se běžně používá tzv. meander laserová strategie. Touto strategií se vyrábí objemová tělesa. Geometrie mikro-prutových struktur je ovšem od objemových těles velmi odlišná, a proto je dle mnoha autorů meander strategie na jejich výrobu nevhodná a jsou vyvíjeny strategie nové.

Mezi nové strategie určené pro výrobu mikro-prutových struktur patří contour strategie. Výzkumy použití contour strategie při výrobě struktur s konstantním průměrem prutů dosahují skvělých výsledků, avšak použití této strategie při výrobě gradientních struktur stále nebylo probádáno, a tudíž nelze určit do jaké míry je contour strategie efektivní i v této oblasti.

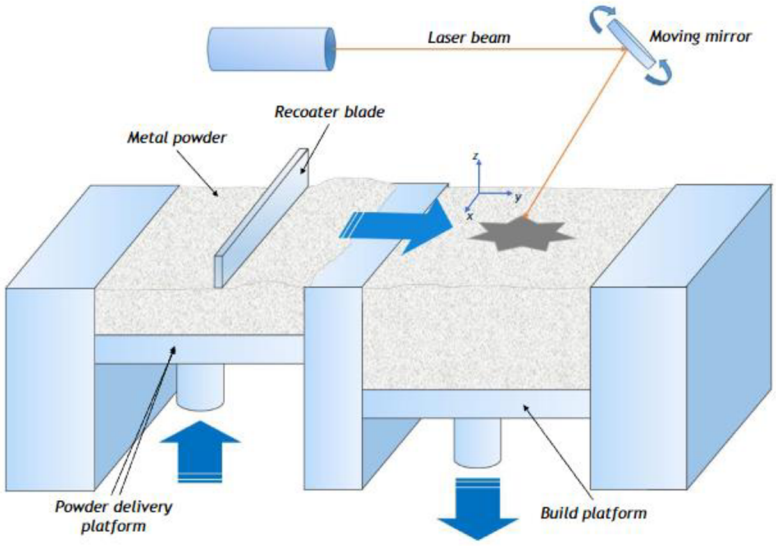
Tato práce může být pomyslnou vstupní branou do této problematiky. Cílem práce je experimentálně ověřit, zdali má použití contour strategie podobný vliv na výrobu gradientních mikro-prutových struktur jako u mikro-prutových struktur s konstantním průměrem prutů.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Selective laser melting

Selective laser melting (SLM) je aditivní technologií (AT) ze skupiny Laser Powder Bed Fusion (LPBF). V technologiích LPBF je materiál v podobě prášku po tenkých vrstvách nanášen na podložku a spékán působením energie. Výroba probíhá ve stavební komoře, která je zahřívána pro minimalizaci spotřeby energie nutné ke spékání materiálu.

Nejdříve je nutné vytvořit CAD model a převést ho do formátu STL. Následně je model nařezán tzv. slicerem do jednotlivých tenkých vrstev. U geometricky složitějších modelů je nutné použít podpěry. Samotný princip výroby začíná tak, že je na stavební platformu tzv. recoaterem nanesena vrstva kovového prášku, široká zpravidla 20-100 μm. Na vrstvu je následně působeno laserovou energií, která částice prášku roztaví a vytvoří geometrii dle modelu. Po uplynutí krátké doby, kdy natavená vrstva tuhne, se stavební platforma sníží a proces se opakuje, dokud není vyroben celý díl (viz Obr. 2-1).



Obr. 2-1 Schéma výroby technologií SLM. [1]

Výroba probíhá v neprodyšně uzavřené stavební komoře. Atmosféra komory je naplněna inertním plynem, který zabraňuje oxidaci materiálu. Nejčastěji se používá argon.

Po ukončení výrobního procesu je díl odřezán od základní plochy a případně opracován. Prášek, který není využit pro samotnou výrobu dílů, je možné použít znovu.

Mezi nejpoužívanější materiály při technologii SLM patří hliníkové a titanové slitiny nebo oceli. [1]

2.2 Hořčíkové slitiny

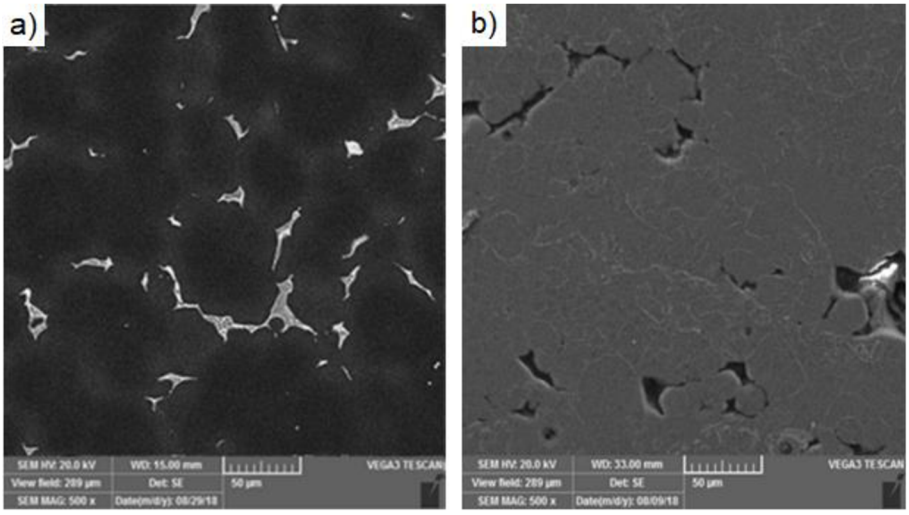
Hořčíkové slitiny mají i přes svou nízkou hustotu vysokou pevnost i tuhost. Pohlcují vibrace, dají se využít jako elektromagnetické izolanty a jsou biokompatibilní. Díky těmto vlastnostem nacházejí stále větší uplatnění v odvětvích jako je automobilový průmysl, letectví, kosmonautika a vojenství [2, 3]. S nástupem aditivních technologií se díky své dobré biokompatibilitě začínají uplatňovat v biomedicíně. Zde je lze použít ve formě různých kostních implantátů, které mají schopnost se v těle postupně biologicky rozložit a následně být nahrazeny novou kostní tkání. Další výhodou na rozdíl například od implantátů z titanu je to, že hořčík je v kostře přirozeně obsažený, Youngův modul a hustota jeho slitin je tak bližší kostem [4].

Aditivní technologie umožňují vyrábět komplikované geometrie, a proto otevírají další možnosti využití hořčíku. Ovšem zpracování hořčíku pomocí AT je díky jeho specifickým vlastnostem náročné a nese s sebou různá úskalí. Z těchto důvodů se v dnešní době objevuje stále více a více vědeckých prací a článků, které se zpracováním hořčíkových slitin zabývají.

2.2.1 Slitina WE43

WE43 (Mg-4Y-3Re-Zr) je vysokopevnostní slitina hořčíku a legujících prvků. Běžně obsahuje 3,7–4,3 hmotnostních % yttria; 2,3–3,5 hmotnostních % vzácných kovů; zejména neodymu a až 0,4 hmotnostních % zirkonia. Slitina se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi do teploty až 250 °C s výhodou značně nízké hustoty 1,82 · cm^{-3}. Například mez kluzu po lití dosahuje hodnot mezi 180 až 260 MPa a po následném tepelném zpracování až 370 MPa. Z těchto důvodů má WE43 mnoho specifických oblastí využití. Používá se v součástech převodových systémů vrtulníků a sportovních automobilů, ve vojenských raketách a dalších. V posledních letech se velmi rozvíjí uplatnění v biomedicíně, především díky biokompatibilitě hořčíkových slitin a možnosti jejich použití ve formě implantátů. Hlavní výhodou WE43 v tomto odvětví ve srovnání s jinými hořčíkovými slitinami je její korozivzdornost. Jiné slitiny hořčíku totiž v těle oxidují až příliš rychle a rozpustí se dříve, než se poškozená tkáň stihne obnovit. [5]

Autoři Krištofová et al. [6] s použitím elektronové mikroskopie a energiově disperzní spektrometrie porovnávají jednotlivé metody výroby WE43. Vzorek vyrobený technologií SLM měl oproti litým vzorkům či vzorkům protlačovaným za tepla mnohem jemnější mikrostrukturu (viz Obr. 2-2). Vzorky všech tří metod výroby měly velmi podobnou R_e, R_m i tvrdost [6, 7]. Jemnost mikrostruktury po zpracování vzorku technologií SLM je způsobena rychlostí ochlazování při výrobě (rychlost ochlazování se pohybuje v rozmezí 10^6 až 10^8 °C · s^{-1}).



Obr. 2-2 a) Litá WE43 s dendrity o velikosti 50 μm, b) WE43 vyrobená technologií SLM s kulatými segmenty o velikosti 30 až 50 μm. [6]

WE43 zpracovaná pomocí SLM je dle testů cytotoxicity biokompatibilní [7]. Pro použití v biomedicíně je zásadní tvarová přesnost, povrchová drsnost a porozita. Při výrobě technologií SLM se na povrchu součástí usazují neroztavená, či částečně roztavená zrna prášku, která mohou být pro živou tkáň velmi nebezpečná. Taková zrna prášku působí jako koncentrátory napětí při mechanickém namáhání a snižují únavovou životnost výrobků.

Póry v materiálu také působí jako koncentrátory napětí, a tak se s jejich přítomností značně snižují mechanické vlastnosti jako například pevnost v tahu a houževnatost [8]. Snaha u součástí dosáhnout co největší relativní hustoty je žádoucí nejen pro biomedicínu, ale i pro další oblasti využití. Oproti objemovým tělesům mají pruty mikro-prutových struktur velmi malé rozměry, jejich průměry se běžně pohybují mezi 0,5-2 mm. Z tohoto důvodu má jakákoliv míra imperfekcí u mikro-prutových struktur výrazný dopad na kvalitu finálního výrobku. Díky malým rozměrům prutů má na ně nejvíce negativní vliv právě porozita, která zmenšuje nosný průměr prutů. Příčiny vzniku porozity a jiných nežádoucích jevů budou probírány v následujících kapitolách.

2.3 Výzvy při zpracování hořčíkových slitin

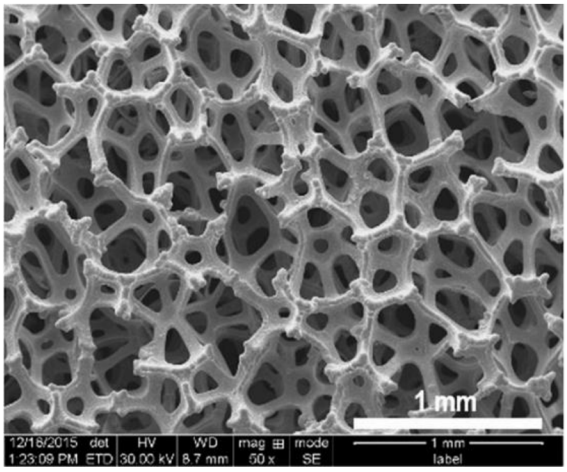
Vznik pórů závisí na nastavení procesních parametrů a mnoha dalších faktorech. Během zpracování hořčíkových slitin se potýkáme s několika problémy. Konkrétně jde o nízkou teplotu varu, oxidaci a balling efekt, který je popsán v kapitole 2.5.2. [9]

Hořčík má téměř totožnou teplotu tání (650 °C) jako u aditivních technologií běžně používaný hliník (660 °C), nicméně jeho teplota varu je mnohem nižší (1090 °C) [10]. Při výrobě se tak materiál za působení vysokých teplot snáz odpaří, a to vede ke vzniku pórů a zvýšení drsnosti povrchu. Příslušnými legujícími prvky se dá teplota varu zvýšit, ale i přesto jsou vlastnosti hořčíkových slitin více závislé na míře působící energie než u jiných materiálů. [11]

V hořčíkové slitině WE43 obsažený hořčík i yttrium jsou vysoce chemicky afinní vůči kyslíku [6]. Při procesu výroby ve stavební komoře reagují s residuálním kyslíkem a oxidují. Prášek se pokrývá vrstvou MgO a Y-Zr-O. Tyto vrstvy oxidů brání průniku energie laseru a napomáhají vzniku balling efektu. Jejich výpary navíc rozostřují laser, čímž zhoršují kvalitu výrobku [12]. Salehi et al. [13] zkoumali oxidaci hořčíkového prášku v prostředí argonu, jakožto nejčastěji používaného inertního plynu. Postupným zahříváním prášku zjistili, že od teploty 400 °C inertní atmosféra i přes velmi vysokou čistotu začíná ztrácet účinnost a hořčík začíná oxidovat. Na residuální kyslík je proto potřeba brát zřetel a je nutné ho maximálně omezit.

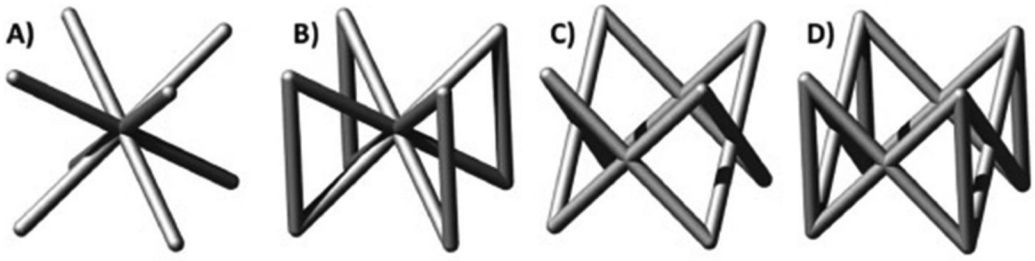
2.4 Mikro-prutové struktury

Přírodní porózní materiály jako jsou dřevo, korek nebo kosti jsou využívány již po tisíciletí. Přednostmi porózních materiálů jsou zejména nízká váha, dobrá tepelná vodivost, deformační a s nimi související absorpční vlastnosti a další. Jejich strukturou jsou inspirovány například umělé pěny. Existuje mnoho druhů umělých porézních materiálů, podle uspořádání jejich struktury se dají rozdělit na pravidelné a nepravidelné. Mezi ty s nepravidelnou strukturou se řadí například kovové pěny. Vyrábí se zpravidla tvorbou bublin v roztaveném kovu (viz Obr. 2-3). [14]



Obr. 2-3 Kovová pěna jako příklad porózního materiálu s nepravidelnou strukturou. [15]

Zástupcem porézních materiálů s pravidelnou strukturou jsou mimo jiné tzv. mikro-prutové struktury. Mikro-prutové struktury autoři Ashby et al. [16] definovali jako pravidelnou mřížkovou síť prutů kruhového profilu propojených uzly (spojení prutů). Svým vzhledem připomínají příhradové konstrukce. Slovo mřížka zde má několik kontextů, mikro-prutové struktury jsou inspirovány krystalografií a dělí se dle tvaru podle stejných názvů jako atomové mřížky (viz Obr. 2-4).



Obr. 2-4 Základní typy mikro-prutových struktur. a) BCC, b) BCCZ, c) FCC, d) FCCZ. [14]

2.5 Proces výroby mikro-prutových struktur technologií SLM

V této kapitole jsou popsány různé stránky procesu výroby mikro-prutových struktur pomocí SLM, které ovlivňují jejich kvalitu, zejména porozitu a rozměrovou přesnost. Jelikož se jedná o jevy spojené s technologií SLM, které se objevují nehledě na použitém materiálu, je čerpáno i z publikací, které se zabývají slitinou AlSi10Mg, jež byla probádána mnohem důkladněji.

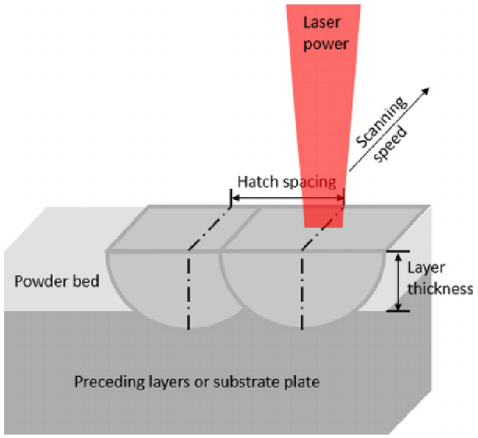
2.5.1 Vlivy základních procesních parametrů SLM

Základní procesní parametry mají velký vliv na kvalitu výrobku. Řadí se mezi ně výkon laseru (LP), skenovací rychlost (LS), tloušťka vrstvy (LT), vzdálenost drah laseru (HD) a s ní spojený překryv (OL), skenovací strategie. Jejich správná kombinace vede k minimalizaci imperfekcí, proto se jejich výzkumu věnuje mnoho vědeckých studií.

Základní procesní parametry (viz Obr. 2-5) vedou k určení objemové energie působící na materiál při výrobě dílů technologií SLM. Jedná se o energii vztaženou na jednotku objemu a je dána vztahem:

$$E = \frac{LP}{LS \cdot HD \cdot LT} \ (\mathrm{J \cdot mm^{-3}}) \qquad (1),$$

kde LP je výkon laseru (W), LS je skenovací rychlost ($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$), HD je vzdálenost drah laseru (μm) a LT je tloušťka vrstvy (μm). [17]



Obr. 2-5 Základní procesní parametry. [18]

2.5.2 Výkon laseru a skenovací rychlost

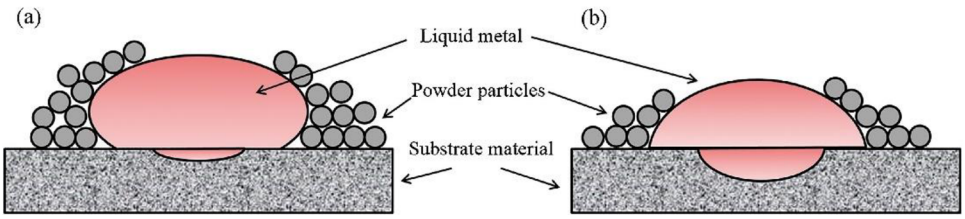
Poměr výkonu laseru LP (W) a skenovací rychlosti LS ($m \cdot s^{-1}$) se nazývá lineární energie.

$$E_l = \frac{LP}{LS} \ (J \cdot mm^{-1}) \tag{2}$$

Vliv E_l sledovali autoři Dongming et al. [17] na slitině AlSi10Mg. Jednou dráhou laseru tvořili horizontální pruty, vertikální pruty a pruty skloněné pod úhlem 45° s požadovaným průměrem 350 µm. Vyrobili 16 různých vzorků struktury FFCXYZ s různou kombinací LP v rozsahu od 200 W do 350 W a LS od 1000 mm · s^{-1} do 1600 mm · s^{-1}. Zvětšující se LP a konstantní LS vedly k roztavení většího množství prášku a tím rostla celková velikost návarů, což vedlo k větší šířce prutů. Naopak při konstantním LP se velikost prutů zmenšovala úměrně se snižováním LS. Prášek při vysokých rychlostech pohltil méně energie, roztavilo se menší množství částic a návar byl tak úzký. Velikost návaru úzce souvisí s množstvím přijaté energie.

Malé množství přijaté energie znamená vznik nebezpečných pórů. Prášek se nataví pouze částečně, vlivem relativně nízké teploty je velmi viskózní a nevytvoří správnou geometrii návaru. Vznikají tak mezery, které bývají v odborné literatuře označovány jako „keyholes." Jedná se o póry, které jsou díky svému nepravidelnému tvaru velkými koncentrátory napětí, a proto výrazně zhoršují mechanické vlastnosti.

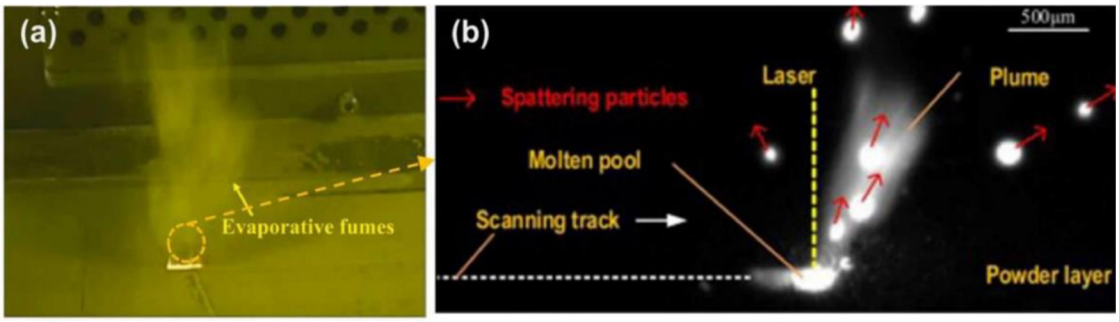
Dalším fenoménem je tzv. „balling efekt." Povrchové napětí roztaveného kovu způsobuje, že se návar smršťuje do kulatého tvaru a nedochází tak k dostatečnému spojení s předchozími vrstvami (viz Obr. 2-6). Tavenina se uzavře do tvaru drobných kapek, nedostatečně se rozprostře po návaru, což vede ke vzniku pórů. Balling efekt lze překonat zvyšováním energie laseru, což vede ke zvětšování průvaru a lepšímu spojení mezi vrstvami. [24, 25]



Obr. 2-6 Balling efekt a) nedostatečná energie, a) průvar vzniklý důsledkem větší energie. [20]

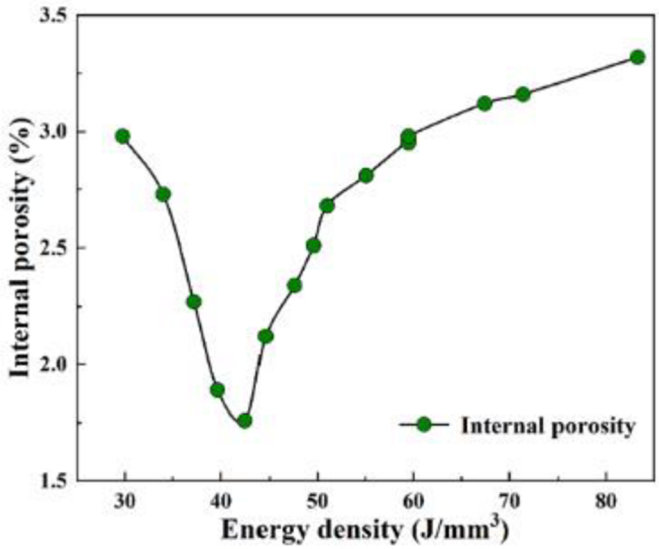
Vysoký LP však výrazně zvyšuje teplotu návaru. Například v práci autorů Dongming et al. [17] zmíněné výše měl návar při výkonu 200 W teplotu 1158 °C a při výkonu 350 W už 1956 °C a při takto vysoké teplotě docházelo ke vzniku pórů vlivem odpaření materiálu.

Autoři Kun et al. [9] sledovali vliv odpařování materiálu. Změnou skupenství kovu z kapaliny na plyn rapidně vzroste jeho vnitřní energie a prášek v okolí návaru je zpětným rázem, vyvolaným touto energií a LS, vymrštěn vysokou rychlostí do atmosféry komory. Rozstříknutá zrna prášku mají vliv na kvalitu prášku, tudíž i na tvorbu pórů a znehodnocují tak výrobu (viz Obr. 2-7). Snížením LS se dá tento efekt zmírnit.



Obr. 2-7 a) odpařený materiál a rozstříknutá zrna prášku v podobě kouře ve stavební komoře SLM, b) detail pořízený vysokorychlostní kamerou. [9]

Pro dosažení co nejlepších výsledků je proto nutné hledat ideální úroveň energie laseru, která zaručí dostatečné protavení prášku, ale zároveň není příliš vysoká, aby odpařila materiál. Příkladem může být práce autorů Dongming et al. [17], kteří minimalizovali porozitu skloněných prutů o průměru 0,35 mm z materiálu AlSi10Mg (viz Obr. 2-8).



Obr. 2-8 Příklad grafu závislosti velikosti energie na porozitě. [17]

2.5.3 Vzdálenost drah a překryv

Vzdálenost drah (HD) (μm) je vzdálenost mezi středy dvou sousedících návarů. Společně s šířkou návaru (TW) (μm) a překryvem (OL) dávají vrstvě návarů souvislý tvar. OL se běžně udává v procentuální hodnotě TW. TW je přímo závislá na lineární energii E_l. Vyjádříme-li OL v jednotkách délky (μm), platí mezi těmito veličinami jednoduchý vztah:

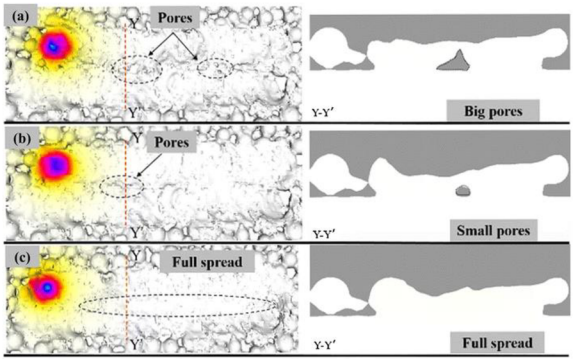
$$HD = TW - OL\ (\mu m) \tag{3}.$$

S HD souvisí také plošná energie. Jedná se o energii působící na plochu dvou sousedících drah a je dána vztahem:

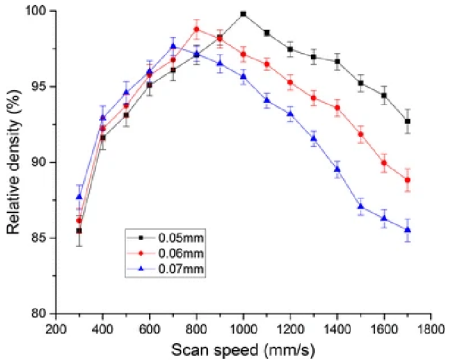
$$E_{ar} = \frac{LP}{LS \cdot HD}\ (J \cdot mm^{-2}) \tag{4},$$

kde LP je výkon laseru (W), LS je skenovací rychlost ($m \cdot s^{-1}$).

Když je E_{ar} moc malá, nedojde k překryvu návarů, které se tím pádem nespojí a dochází ke tvorbě pórů. Díky zmenšení HD, tedy přiblížení sousedících drah a zvětšení E_{ar}, absorbují okolní dráhy více energie, tím pádem se zvětší množství taveniny, která zaplní mezery mezi drahami (viz Obr. 2-9). Avšak při malé HD a tím pádem velké E_{ar} roste OL a vlivem velkého teplotního gradientu způsobeného LP se tok taveniny po návaru stává nestabilní, a to opět vede ke tvorbě pórů (viz Obr. 2-10). [26, 27]



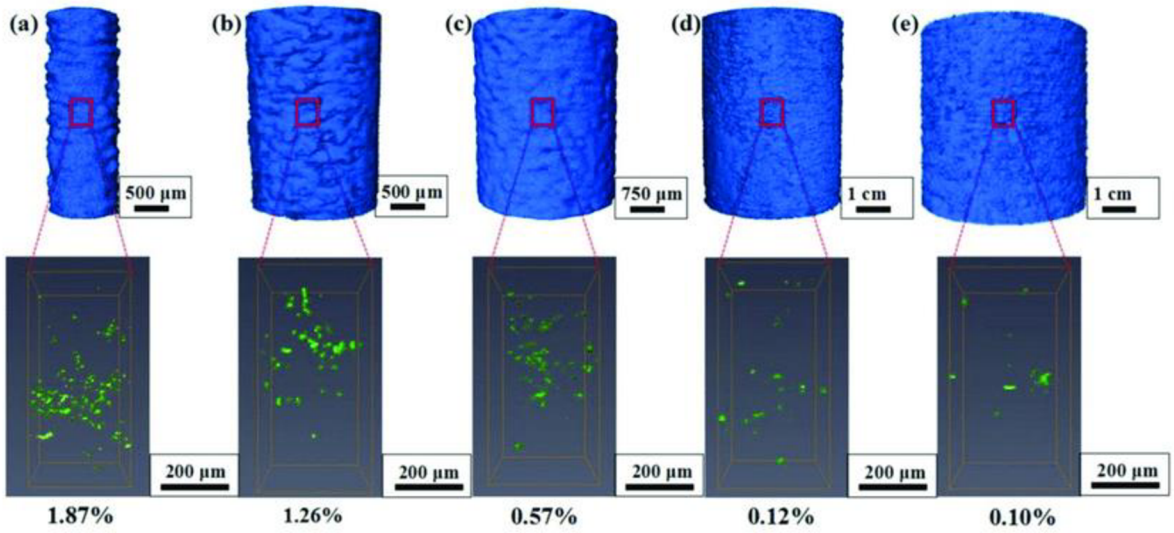
Obr. 2-9 Slitina AlSi10Mg. Vliv HD na vnitřní porozitu při konstantní LP a LS,
a) HD = 0,07 mm; b) HD = 0,06 mm;
c) HD = 0,05 mm. [21]



Obr. 2-10 Slitina AlSi10Mg. Vliv změny LS za konstantní LP na vnitřní porozitu. [22]

2.5.4 Závislost porozity na velikosti prutů

Kromě procesních parametrů závisí porozita i na samotné geometrii prutů. Jednotlivé dráhy v prutu se navzájem ovlivňují, část absorbované energie každé dráhy je odváděna směrem doprostřed prutu a prášek se dokonaleji speče. (viz Obr. 2-11) Při konstantní HD se spolu se snižujícím průměrem snižuje počet drah laseru v jedné vrstvě. Při malém počtu drah prášek přijímá menší množství energie, dochází k nedostatečnému protavení a ke vzniku pórů. Dong et al. [23] vyrobili vertikální pruty o průměru 5 mm z materiálu AlSi10Mg s porozitou 0,1 %, zato vertikální pruty s průměrem 1 mm při stejných procesních parametrech byly vyrobeny s porozitou 1,87 %. Od průměru 3 mm a méně se porozita rapidně zvyšovala.

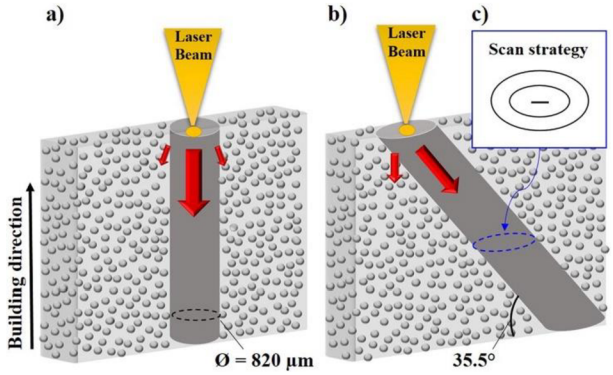


Obr. 2-11 Vliv průměru prutů na porozitu. a) průměr 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm, d) 4 mm, e) 5 mm. [23]

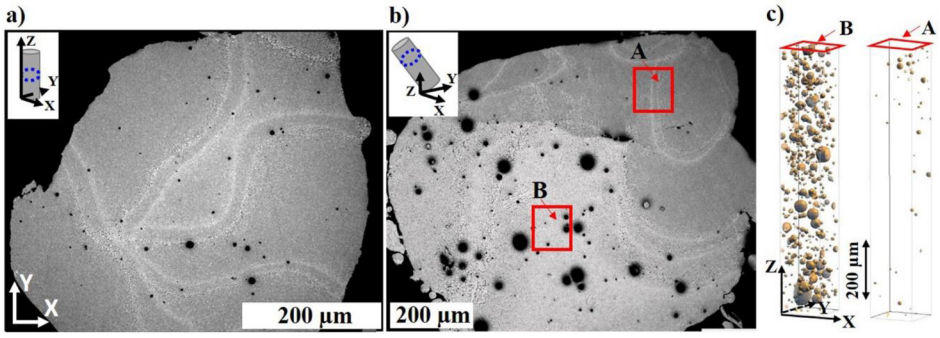
2.5.5 Teplotní vodivost

Delroisse et al. [24] zkoumali vliv sklonu prutu a teplotní vodivosti na vnitřní strukturu materiálu. Pracovali s materiálem AlSi10Mg a pomocí contour strategie (popsána v kapitole 2.6.1) vyráběli vertikální pruty o průměru 820 µm a pruty skloněné pod úhlem 35,5° o stejném průměru. Pruty skloněnými pod tímto úhlem je tvořena BCC mřížka, která má ze standartně používaných mřížek největší sklon prutů. Procesní parametry byly LP 250 W, LS 571 mm · s^{-1}, HD 150 µm, tloušťka vrstvy 60 µm a velikost zrn prášku 10–80 µm. Zjistili, že skloněné pruty mají horší mechanické vlastnosti než pruty vertikální. Skloněné pruty měly totiž heterogenní strukturou s velkou mírou porozity zejména ve dolní části profilu prutů. Zde je materiál vystaven vysokým teplotám delší dobu než ve vyšších částech prutu.

Odvod tepelné energie u vertikálních prutů probíhá směrem dolů přes nižší již vyrobené vrstvy materiálu. U skloněných prutů se díky jejich orientaci v důsledku vychýlení jednotlivých vrstev část tepla odvádí směrem přes okolní neroztavený prášek. (viz Obr. 2-12) Prášek má nižší teplotní vodivost a působí jako tepelný izolant, tudíž se v místech styku s okolním práškem skloněný prut ochlazuje pomaleji než v jiných místech a díky vysokým teplotám se zde okolní zrna prášku natavují na povrch prutu. Vnitřní struktura skloněných prutů se dá proto rozdělit do dvou oblastí s výrazně odlišnou mikrostrukturou. Mikrostruktura byla v dolní oblasti prutu (oblast B) až třikrát větší než ve zbytku prutu (oblast A) (viz Obr. 2-13). Vertikální pruty dosahovaly porozitu 0,4 % a jejich mikrostruktura byla homogenní. Skloněné pruty měly v oblasti A menší částice s porozitou 0,1 %. Ovšem oblast B byla heterogenní s velkými částicemi a porozitou až 4 %. Výraznější porozitu v oblasti B autoři přisuzují delšímu setrvání na vysokých teplotách. Nižší roztavené vrstvy se zahřívaly tak moc, že se část materiálu vypařila. To vedlo ke vzniku kulatých pórů uzavřených v materiálu, většinou vyplněných vodíkem, který pocházel z vlhkosti prášku, nebo argonem, kterým byla tvořena ochranná atmosféra v komoře SLM. Z geometrie skloněných prutů vyplívá, že čím je sklon prutu větší, tím je oblast B výraznější.



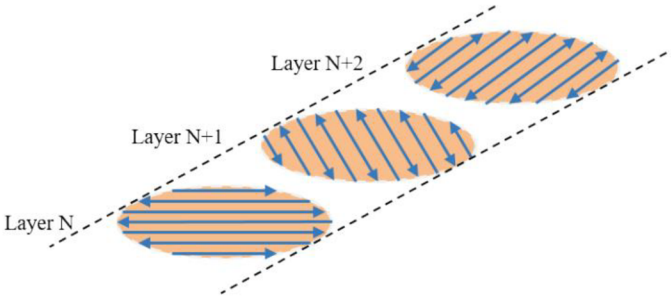
Obr. 2-12 Rozdílný odvod tepla a) vertikálního prutu, b) skloněného prutu, c) použitá skenovací strategie. [24]



Obr. 2-13 Rozdílná porozita v a) vertikálním prutu, b) ve skloněném prutu s oblastmi A a B, c) srovnání porozity v oblastech A a B. [24]

2.6 Skenovací strategie laseru

Pro tuto práci nejdůležitějším procesním parametrem technologie SLM je skenovací strategie laseru. Jedná se o podobu trajektorie drah laseru v jednotlivých vrstvách. Výchozí strategií technologie SLM je meander strategie. Skenování meander strategií probíhá po rovnoběžných vektorech opačného směru přes celou vrstvu profilu dílu. Natočení vektorů je mezi každou vrstvou posunuto o daný úhel, většinou 67° (viz Obr. 2-14). Pro tuto strategii pro různé materiály předepisují výrobci univerzální hodnoty procesních parametrů. [25]

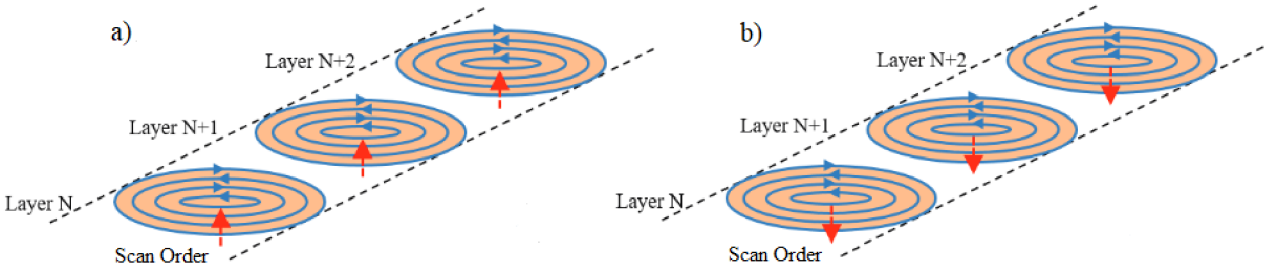


Obr. 2-14 Schéma meander strategie. [25]

Procesní parametry této strategie byly optimalizovány pro objemová tělesa. Zatím se běžně používají i při výrobě mikro-prutových struktur, ty na ni ovšem reagují jinak. Geometrie mikro-prutových struktur je totiž od objemových těles velmi odlišná. Pruty mají průměry v rámci jednotek až desetin milimetru, a to podporuje vznik nežádoucích jevů popsaných v kapitolách 2.5.4 a 2.5.5. Z toho důvodu je meander strategie podle mnoha autorů na výrobu mikro-prutových struktur nevyhovující a jsou vyvíjeny nové skenovací strategie. [31–34]

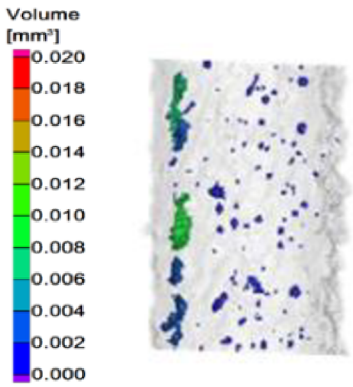
2.6.1 Contour strategie

Vrána et al. [33, 34] se zabývali tzv. contour strategií. Při této strategii jsou jednotlivé návary realizovány do kruhů či elips (kontur). Je možné skenovat buď metodou outside-in, kde je první návar vytvořen na obvodu a další návary jsou tvořeny postupně směrem doprostřed součásti (viz Obr. 2-15 a), nebo metodou inside-out, kde je první návar vytvořen uprostřed a poslední návar na obvodu součásti (viz Obr. 2-15 b).



Obr. 2-15 Schéma contour strategie. a) metoda outside-in, b) metoda inside-out. [25]

Autoři ve své první práci [27] experimentovali s procesními parametry pro výrobu prutů pod sklonem 35,26° (BCC pruty) z materiálu AlSi10Mg za použití contour strategie. Contour strategie byla označena jako perspektivní, jako její hlavní výhodu oproti meander strategii zmiňují možnost nastavení specifických procesních parametrů zvlášť pro struktury a rozměry prutů. Rovněž vytyčili výhledové procesní parametry pro další výzkum. Jednalo se o E_l v rozmezích mezi 0,25 a 0,4 J · mm^{-1}, LP mezi 225 a 300 W, LS mezi 1250 a 1750 mm · s^{-1} a OL mezi 20 a 30 %. Při nižší E_l docházelo ke vzniku velkých nepravidelných pórů na vrchní straně BCC prutů. Původcem vzniku těchto pórů byl opět přenos tepla, tepelná energie se obecně více akumuluje ve spodní části prutu, a proto jí ve vrchní části bylo nedostatek (viz Obr. 2-16).

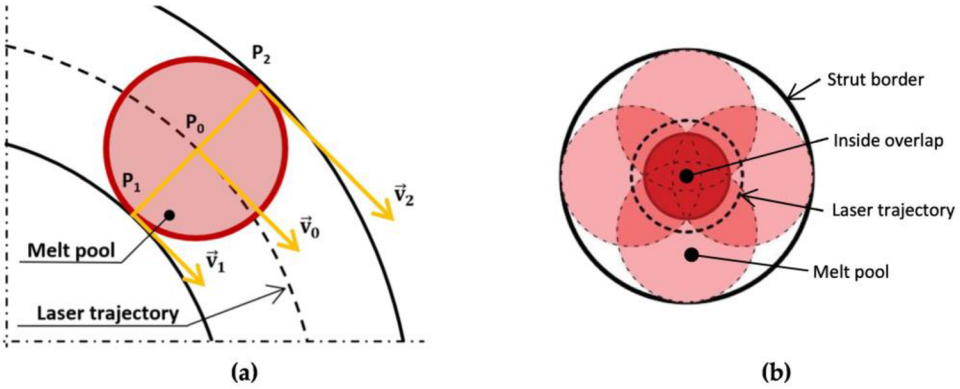


Obr. 2-16 Velké nepravidelné póry na vrchní straně BCC prutu při působení E_l 0,18 J · mm^{-1}. [27]

Ve své druhé práci autoři Vrána et al. [28] pomocí experimentů a stanovením rovnic určili konkrétní procesní parametry pro průměry BCC prutů 0,6 mm; 0,8 mm; 1,25 mm; 2 mm a 3 mm. Při praktickém ověření těchto parametrů ve všech případech dosáhli relativní hustoty nejméně 99,8 %. V porovnání s článkem autorů Dong et al. [23] uvedeném v kapitole 2.5.4 se jedná o výrazné zlepšení. Oproti meander strategii dosáhli také lepší povrchové drsnosti. Maximální hodnota Ra pro svislé pruty byla 16 μm a pro BCC pruty 80 μm. Contour strategie také přispěla rozměrové přesnosti, medián hodnot rozměrové úchylky všech zmíněných průměrů byl 0,04 mm pro svislé pruty a 0,03 mm pro BCC pruty.

Nejdříve vyráběli pruty metodou outside-in. Zde se potýkali s problémem nedostatku prášku pro tvorbu dalších návarů uvnitř prutu a vznikem porozity. Změnou skupenství z pevného prášku s menší objemovou hustotou na taveninu s větší objemovou hustotou je spotřebováno větší množství prášku na tvorbu návaru. Z tohoto důvodu označili autoři metodu inside-out za vhodnější.

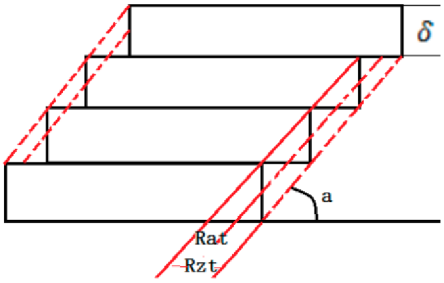
Překryv drah (OL) je dle Vrány et al. [28] jedním z klíčových parametrů contour strategie. Skenovací rychlost není v rámci návaru kvůli kruhovému charakteru drah laseru konstantní (viz Obr. 2-17 a). Změnou skenovací rychlosti se mění množství absorbované energie po šířce návaru, a to je nutné kompenzovat správným nastavením OL. Nejvýraznější je tento efekt u prvního návaru uprostřed prutu. Zde má dráha laseru nejmenší poloměr, a tudíž je skenovací rychlost nejmenší. Vlivem OL je navíc oblast přímo uprostřed prutu vystavena působení energie mnohem delší dobu než v jiných místech prutu (viz Obr. 2-17 b). Kvůli velkému množství absorbované energie uprostřed prutu může dojít k odpaření materiálu a vzniku pórů.



Obr. 2-17 Schéma vlivu OL u contour strategie. a) změna skenovací rychlosti po šířce návaru, b) OL uprostřed prutu. [28]

2.7 Vliv sklonu prutů na rozměrovou přesnost a drsnost povrchu

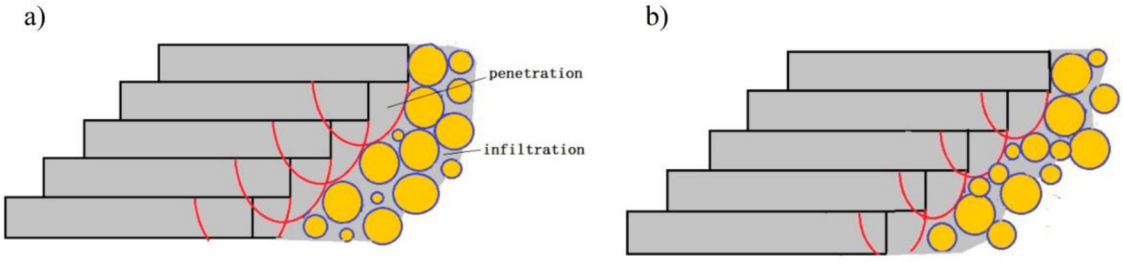
I samotný sklon prutů ovlivňuje výrobu mikro-prutových struktur. Kvůli charakteru technologie SLM, kde je materiál nanášen po vrstvách, dochází u skloněných prutů ke vzniku schodišťového efektu (viz Obr. 2-18). [29]



Obr. 2-18 Drsnost povrchu způsobená schodišťovým efektem. δ – šířka vrstvy, Ra_t – střední aritmetická úchylka profilu, Rz_t – nejvyšší výška profilu. [29]

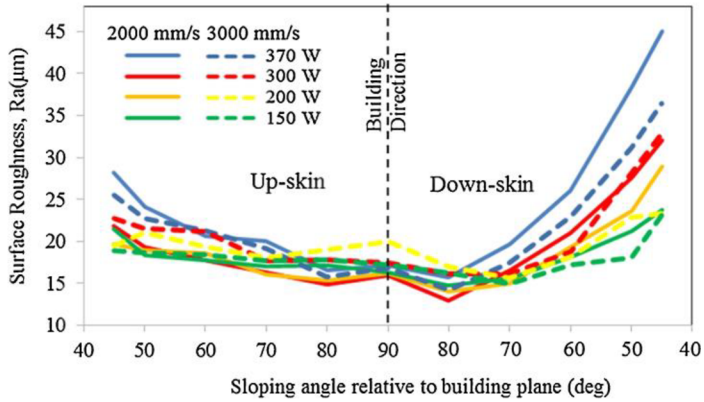
Vlivem schodišťového efektu je povrch skloněných prutů přirozeně drsnější než povrch vertikálních prutů. Podle autorů Han et al. [29] je drsnost povrchu horní části prutů ovlivněná hlavně schodišťovým efektem, ale na spodní část prutů je povrchová drsnost závislá také na velikosti LS. Prášek při nízké LS pohltil více energie a vzniklá tavenina byla velmi tekutá a smáčivá. (Obr. 2-19 a) Část taveniny zatekla do mezer v okolním neroztaveném prášku, a to způsobilo menší drsnost povrchu. Zvýšením LS (Obr. 2-19 b) se snížila tekutost taveniny, která se nedostala do mezer v okolním prášku a na povrchu prutu zůstala natavená zrna materiálu, která ho činila drsnějším.

Snížení LS vede ke zlepšení povrchové drsnosti, ale k zhoršení rozměrové přesnosti a zvýšení hmotnosti v důsledku velkého průvaru laseru. [30]



Obr. 2-19 Schématický diagram povrchové drsnosti spodní části prutů. a) nízká LS, b) vysoká LS. [29]

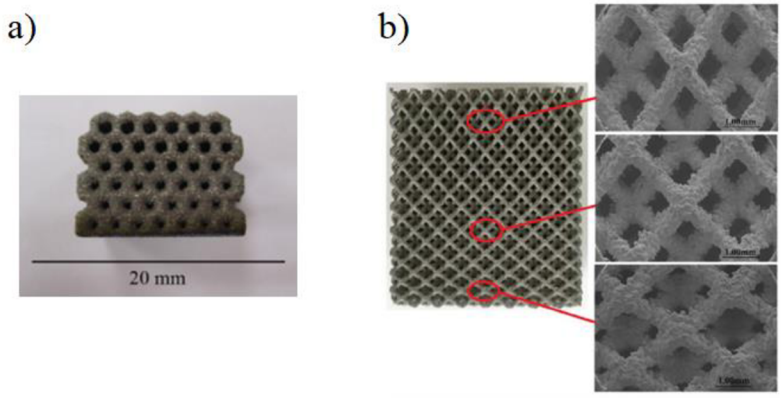
Schodišťovým efektem se zabývali také Tian et al. [30], kteří použili Hastelloy X. Zkoumali pruty se sklonem v rozsahu 45° až 90° a různou kombinací LS a LP a sledovali změnu drsnosti povrchu. (viz Obr. 2-20) U všech případů vyšlo najevo, že povrchová drsnost v horní části prutů je menší než v dolní části, kde se drsnost výrazně zvětšuje nepřímo úměrně k úhlu sklonu prutů.



Obr. 2-20 Závislost drsnosti povrchu prutů na úhlu sklonu v horní části (vlevo) a spodní části (vpravo). [30]

2.8 Gradientní mikro-prutové struktury

Gradientní mikro-prutové struktury jsou charakteristické tím, že některé z geometrických parametrů jejich buněk nejsou konstantní. Proměnný je buď průměr prutů nebo jiný z rozměrů buňky (viz Obr. 2-21).

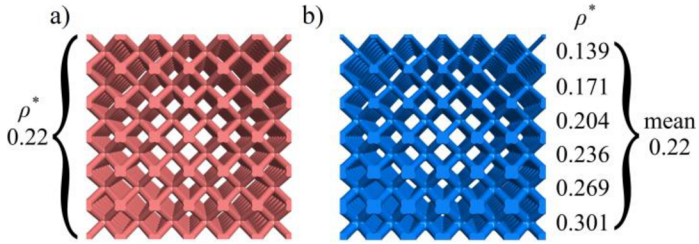


Obr. 2-21 Gradientní mikro-prutové struktury, a) postupná změna průměru prutů [31], b) postupná změna rozměrů buňky [32].

Gradientní struktury umožňují regulovat místní hustotu struktury v objemu součásti. Regulováním místní hustoty lze mechanické vlastnosti součásti přizpůsobit provozním požadavkům. Například v místech koncentrace napětí při mechanickém namáhání lze místní hustotu struktury zvýšit a podobně (viz Obr. 2-22). [33]

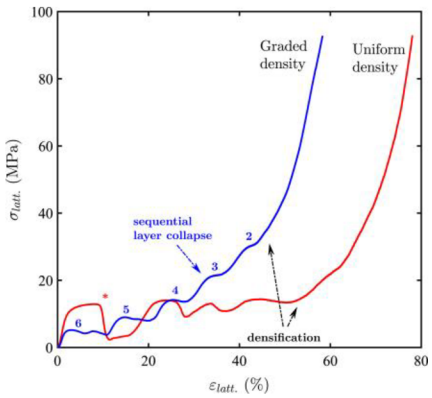
Obr. 2-22 Náhrada kyčelního kloubu s gradientní mikro-prutovou strukturou. [33]

Postupná změna rozměrů struktury také umožňuje řídit deformační charakteristiku mikro-prutových struktur. Autoři Maskery et al. [34] vyráběli z materiálu Ti-6Al-4V dva druhy vzorků. První druh byla mikro-prutová struktura s jednotným průměrem prutů a druhý druh byla gradientní mikro-prutová struktura s lineárně rostoucím průměrem prutů, tedy s lineárně rostoucí místní hustotou struktury. Oba druhy vzorků měly stejnou celkovou objemovou hustotu (viz Obr. 2-23).



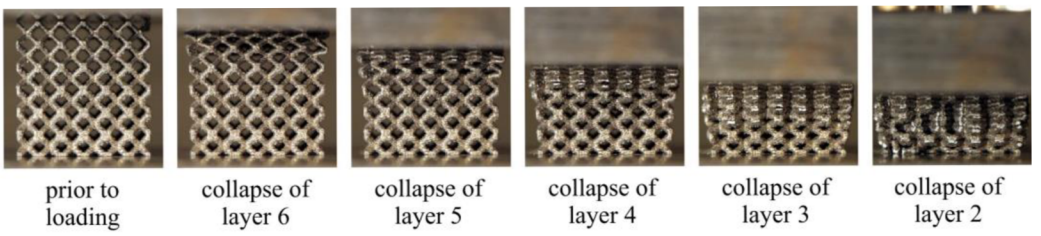
Obr. 2-23 a) Struktura s jednotným průměrem prutů, b) struktura s proměnným průměrem prutů. [34]

Vzorky byly podrobeny zkoušce tlakem a jejich deformační charakteristiky se výrazně lišily (viz Obr. 2-24). Plastické deformace gradientních struktur probíhaly vrstvu po vrstvě směrem od nejmenší místní hustoty po největší místní hustotu (viz Obr. 2-25). V deformační charakteristice byly zřetelné skoky napětí v souvislosti s kolapsem jednotlivých vrstev. U struktur s jednotným průměrem prutů byl kolaps vrstev nahodilý. Deformační charakteristika gradientních mikro-prutových struktur je tedy předvídatelnější. To je velkou výhodou, neboť při zachování nízké celkové objemové hustoty lze správným rozprostřením místní hustoty struktury dosáhnout progresivní odezvy na statické i dynamické mechanické namáhání.



Obr. 2-24 Deformační charakteristika gradientní struktury (modrá) a jednotné struktury (červená). [34]

Gradientní mikro-prutové struktury tak umožňují optimalizovat geometrii výrobků, a proto představují další stupeň vývoje mikro-prutových struktur.



Obr. 2-25 Kolaps gradientní mikro-prutové struktury po vrstvách. [34]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Z kapitoly 2.5 vyplívá, že kvalitní výroba mikro-prutových struktur s konstantním průměrem prutů není snadná. Na porozitu a rozměrovou přesnost má vliv velké množství faktorů. Patří mezi ně správné nastavení procesních parametrů, které brání vzniku různých nežádoucích jevů souvisejících například s odvodem tepla ve struktuře. Významným faktorem je dokonce samotný tvar struktury. Je očekáváno, že všechny faktory popsané ve zmíněné kapitole se projeví také při výrobě gradientních mikro-prutových struktur.

Byl objeven velký potenciál contour strategie, která by měla výrazně přispívat k nižší porozitě a vyšší rozměrové přesnosti. Z toho důvodu bude tato strategie dále pozorována.

3.2 Cíl práce

Pro výrobu mikro-prutových struktur s konstantním průměrem prutů je podle autorů Vrány et al. [34, 35] použití contour laserové strategie obecně velmi prospěšné. Ovšem v rámci výroby gradientních mikro-prutových struktur nebyla contour strategie probádána, a tudíž nelze určit do jaké míry je contour strategie efektivní i v této oblasti.

Hlavním cílem této práce je provést experiment, na jehož základě bude možné stanovit, zdali použití contour laserové strategie při výrobě gradientních mikro-prutových struktur pomocí technologie SLM vede k nízké porozitě. Bude proveden experiment, při kterém budou gradientní mikro-prutové struktury s proměnným průměrem prutů vyrobeny contour strategií i běžně používanou meander strategií při použití stejných procesních parametrů. Na vyrobených vzorcích bude následně sledována relativní hustota a rozměrová přesnost jako hlavní činitelé v rámci hodnocení kvality výroby. V závěru budou strategie porovnány.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Návrh experimentu

Na základě článků z kapitol 2.5.5 a 2.7 byly pro experiment vybrány mikro-prutové struktury s geometrií odpovídající mřížce BCC. Ta je složená z osmi prutů se sklonem 35,26°, což je u běžně používaných mřížek největší sklon a je tedy nejvíce náchylný na vznik defektů. Na výrobu vzorků byla použita hořčíková slitina WE43 popsaná v kapitole 2.2.1 s distribucí velikosti částic mezi 28 a 60 µm a průměrnou velikostí částic 39,8 µm. Na základě předchozího výzkumu byly pro tuto slitinu na pracovišti Odboru reverzního inženýrství a aditivních technologií určeny sady (konfigurace) procesních parametrů pro výrobu prutů s konstantním průměrem za použití contour strategie, které vedly při výrobě prutů k porozitě menší než 0,5 %. Podle poznatků z kapitoly 2.5.4 se stav vnitřní porozity zhoršuje nepřímo s velikostí průměru prutů, kde u prutů o průměru menším než 3 mm bylo pozorováno zvýšené množství pórů. Proto byla v experimentu zvolena konfigurace s průměrem 0,5 mm jakožto nejmenší uvažovaná možnost. Jako maximální průměr prutů gradientní struktury byla zvolena hodnota 2 mm. Pro experiment je rozpětí průměru prutů gradientní struktury 0,5-2 mm adekvátní, jelikož v tomto rozpětí má dle autorů Vrána et al. [28] volba skenovací strategie největší vliv na porozitu. Na základě předchozího výzkumu byly vybrány sady procesních parametrů pro průměry 0,5 mm; 1 mm a 2 mm. V experimentu byly použity právě tyto sady, jednotlivé procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Použité sady procesních parametrů.

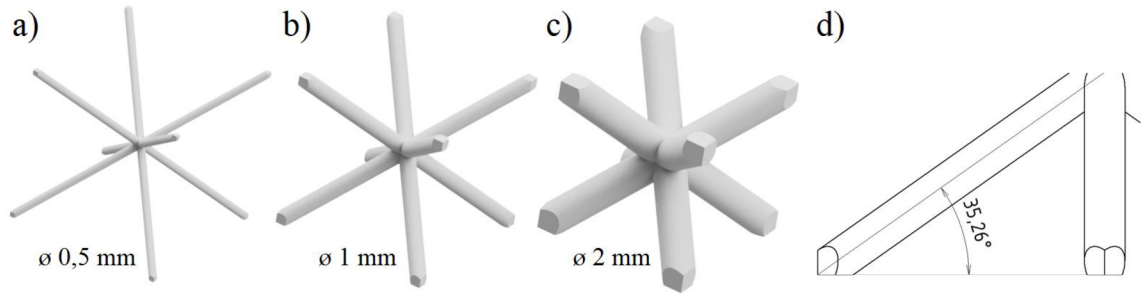
Průměr prutů (mm)	Výkon laseru (W)	Skenovací rychlost (mm · s^{-1})	Tloušťka vrstvy (µm)	Teplota stavební platformy (°C)	Lineární energie (J · mm^{-1})	Vzdálenost drah (mm)
0,5	79,29	882,84	50	120	0,09	0,0781
1	79,29	317,16	50	120	0,25	0,1540
2	220,71	317,16	50	120	0,70	0,2416

Kromě gradientních struktur byly vyrobeny také kontrolní vzorky BCC buňky s konstantním průměrem prutů se stejnými sadami procesních parametrů pro porovnání rozměrové přesnosti a ověření porozity.

Pro ověření vlivu použité skenovací strategie byla pomocí meander strategie vyrobena druhá sada vzorků se stejnými konfiguracemi procesních parametrů. Cílem experimentu je porovnání těchto dvou sad vzorků, kde každá byla vyrobena pomocí jiné skenovací strategie. Očekává se, že se contour strategie projeví jako vhodnější řešení. Podle výzkumů Vrány et al. [34, 35] by měly vzorky vyrobené touto strategií vykazovat obecně menší vnitřní porozitu a větší rozměrovou přesnost.

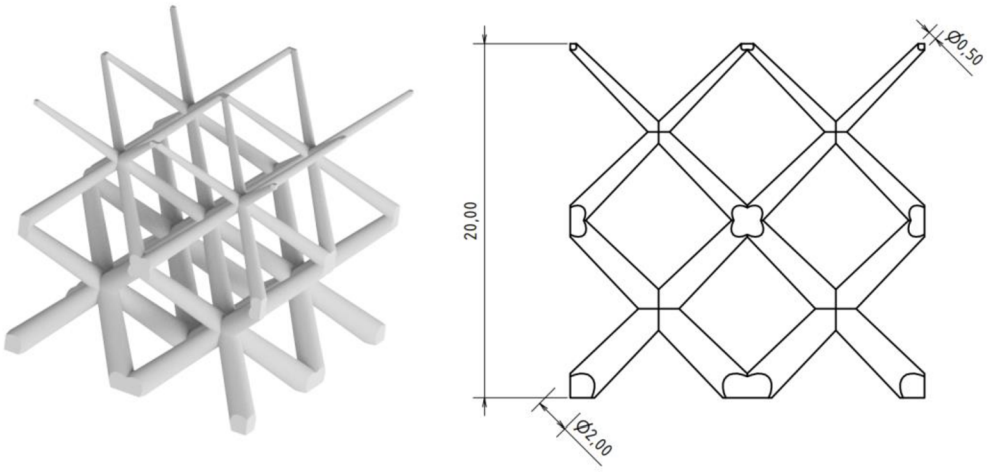
4.2 Návrh modelů

V programu Autodesk Inventor byly vytvořeny čtyři CAD modely mikro-prutových struktur, ze kterých byla následně vyexportována STL data. První tři modely v podobě jedné buňky BCC o rozměrech 10 × 10 × 10 mm s konstantním průměrem prutů 0,5 mm (K0,5); 1 mm (K1); respektive 2 mm (K2) (viz Obr. 4-1), byly určeny pro výrobu kontrolních vzorků.



Obr. 4-1 Modely pro výrobu kontrolních vzorků. a) model K0,5; b) model K1; c) model K2; d) detail úhlu sklonu.

Poslední model byl určen pro výrobu vzorků s gradientní strukturou. Jednalo se o 8 buněk BCC o rozměrech 10 × 10 × 10 mm spojených do mřížky tvaru krychle 2 × 2 × 2 buňky. Průměr prutů v těchto buňkách se lineárně zmenšoval z hodnoty 2 mm na spodní hraně modelu na hodnotu 0,5 mm na horní hraně modelu (viz Obr. 4-2).

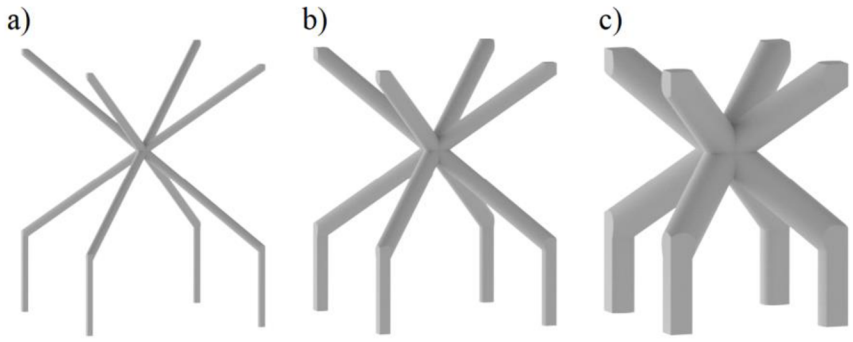


Obr. 4-2 Model G pro výrobu gradientních mikro-prutových struktur.

Lineární změna průměru z maxima na minimum v tomto modelu probíhá pozvolně přes dvě buňky, díky čemuž bylo možné sledovat vliv skenovací strategie i na prutové uzly, kde dochází ke změně geometrie dráhy laseru.

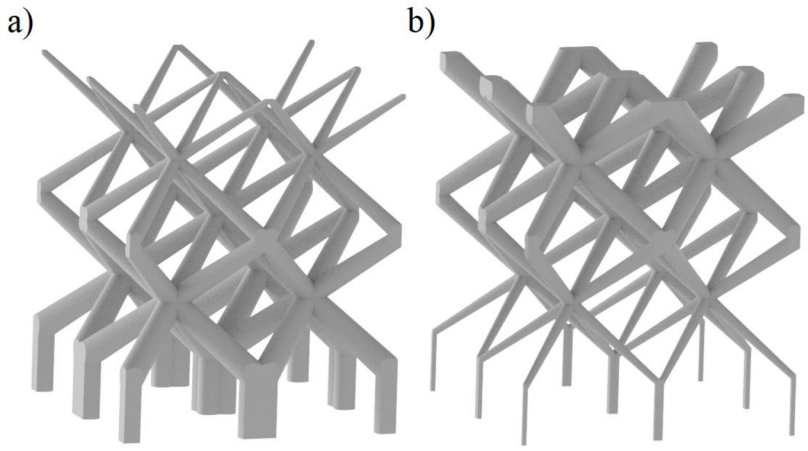
4.3 Výroba vzorků

Kontrolních vzorků bylo vyrobeno dohromady šest. Každou skenovací strategií byly vyrobeny tři vzorky s použitím procesních parametrů odpovídajících průměru prutu (viz Tab. 2). Aby bylo možné vyrobené vzorky oddělit od stavební platformy bez poškození, byly na spodní stranu modelů přidány podpěry vysoké 4 mm (viz Obr. 4-3).



Obr. 4-3 Konečná podoba modelů pro výrobu kontrolních vzorků. a) K0,5; b) K1; c) K2.

Obě skenovací strategie byly použity také na výrobu vzorků s gradientní strukturou. Model gradientní struktury není zrcadlově souměrný ve všech rovinách, proto byly zvoleny dvě varianty výroby. V první variantě (M1) je model postaven na hranu s maximálním průměrem prutů (viz Obr. 4-4 a) a ve druhé variantě (M2) je model postaven na hranu s minimálním průměrem prutů (viz Obr. 4-4 b). U obou variant byly opět přidány podpory vysoké 4 mm. Pomocí těchto variant bylo možné rozhodnout, zdali má orientace gradientní struktury v souvislosti s použitou skenovací strategií dopad na porozitu či rozměrovou přesnost výrobku.



Obr. 4-4 Konečná podoba modelů pro výrobu gradientních struktur. a) varianta M1, b) varianta M2.

Obě varianty byly vyrobeny pomocí meander strategie i contour strategie. Pro contour strategii byl použit směr výroby inside-out, který je dle autorů Vrána et al. [28] výhodnější.

Dohromady bylo vyrobeno 18 vzorků, které jsou přiblíženy v Tab. 2.

Tab. 2 Vyrobené vzorky

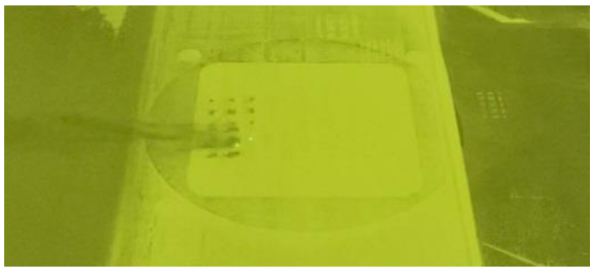
Označení vzorku	Skenovací strategie	Sada parametrů pro průměr prutů (mm)	Varianta modelu/orientace
KM0,5	Meander	0,5	K0,5
KM1	Meander	1	K1
KM2	Meander	2	K2
KC0,5	Contour	0,5	K0,5
KC1	Contour	1	K1
KC2	Contour	2	K2
M1M0,5	Meander	0,5	G1
M1M1	Meander	1	G1
M1M2	Meander	2	G1
M1C0,5	Contour	0,5	G1
M1C1	Contour	1	G1
M1C2	Contour	2	G1
M2M0,5	Meander	0,5	G2
M2M1	Meander	1	G2
M2M2	Meander	2	G2
M2C0,5	Contour	0,5	G2
M2C1	Contour	1	G2
M2C2	Contour	2	G2

4.3.1 Výrobní zařízení

Vzorky byly vyrobeny na zařízení SLM 280HL (SLM Solutions Group AG, Lübeck, Německo). Toto zařízení je vybaveno YLR-Faser-Laserem s výkonem až 400 W a skenovací rychlosti až 10000 mm · s^{-1}. Velikost pracovního prostoru 280 × 280 × 350 mm umožňuje kusovou výrobu středně velkých dílů. [40, 41]

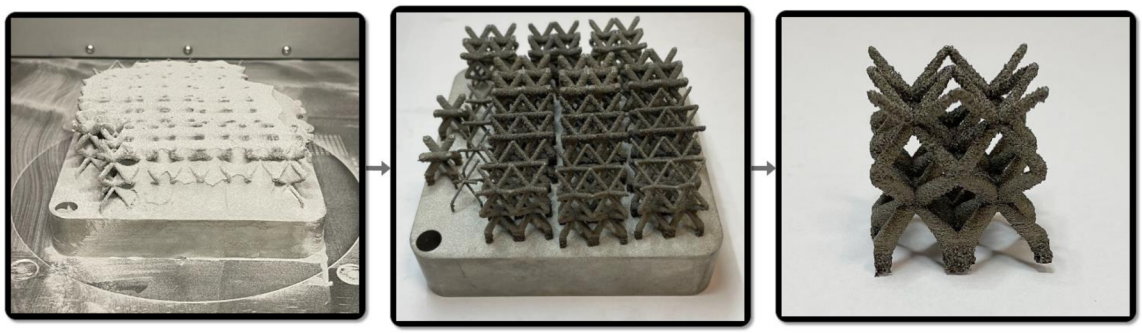
Obr. 4-5 SLM 280HL. [36]

Výroba probíhala v atmosféře argonu s hladinou kyslíku pod hodnotou 0,2 %. Po celou dobu výroby bylo jasně rozpoznatelné odpařování materiálu v podobě kouře popsané v kapitole 2.5.2 (viz Obr. 4-6).



Obr. 4-6 Odpařování materiálu v podobě kouře ve stavební komoře.

4.4 Zpracování vyrobených vzorků



Obr. 4-7 Postup zpracování vyrobených vzorků.

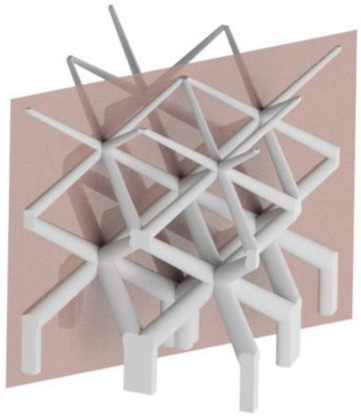
Na Obr. 4-7 je schéma procesu zpracování vzorků. Po ukončení výroby a vychladnutí byla stavební platforma vysunuta zpět do výchozí polohy, odmontována ze stavební komory a byl z ní odstraněn zbylý prášek. Postupně z ní byly odřezány všechny vyrobené vzorky.

4.5 Postup vyhodnocování

4.5.1 Metalurgické výbrusy

Metalografický výbrus je základní metodou pro vyhodnocování vnitřní struktury materiálu a lze při něm dosáhnout velmi přesných výsledků. Nevýhodami je časová náročnost, destruktivní charakter a možnost analýzy pouze v jedné rovině vzorku.

Vzorky byly nejdříve ručně hrubě předbroušeny do blízkosti hlavní diagonální roviny podle Obr. 4-8.



Obr. 4-8 Rovina metalurgického výbrusu

Poté byly zality tvrdnoucí hmotou do tvaru puků. Byla použita hmota EpoThin 2 (Buehler ITW, Lake Bluff, Illinios, USA), která se používá ve hmotnostním poměru 100:45 pryskyřice a tvrdidla. Tato hmota se vyznačuje velmi nízkou viskozitou a dobrou zatékavostí, díky tomu je vhodná pro porózní materiály. Hmoty s vyšší viskozitou mohou ovlivnit výbrus v důsledku uvolňování částic materiálu při broušení. Po zalití byly puky po dobu 10 minut umístěny do vakuové komory s absolutním tlakem 4000 Pa, aby byla tvrdnoucí hmota zbavena vzduchových bublin. Puky následně tvrdly 9 hodin.

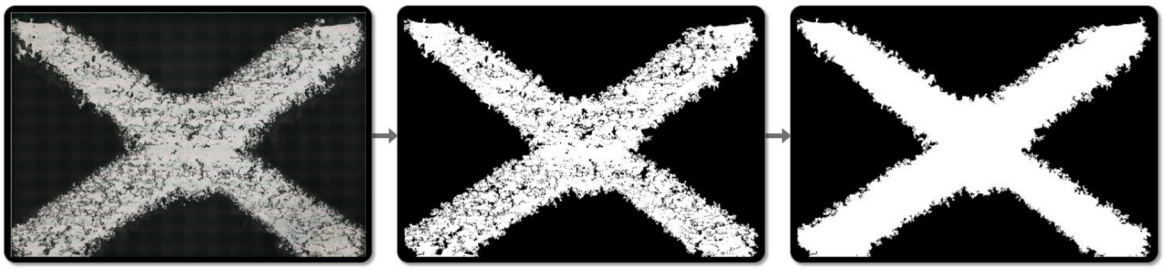
Po ztvrdnutí zalévací hmoty byly ručně dokončeny metalografické výbrusy na brusce Saphir 250 A2-ECO (ATM Qness GmbH, Mammelzen, Německo). Postupně byly použity brusné papíry s brusným materiálem SiC od firmy ATM Qness GmbH se zrnitostí P800, P2500 a P4000.

4.5.2 Pořizování snímků

Při experimentu byl použit digitální mikroskop Keyence VHX-6000 (Keyence, Osaka, Japan) vybaven objektivem Z250R. Tento mikroskop dokáže pořizovat plně zaostřené snímky. Na pořízení snímků bylo použito nejnižší zvětšení 250. Kvůli větší velikosti vzorků gradientních struktur byly jejich konečné snímky vytvořeny spojením několika snímání.

4.5.3 Vyhodnocování porozity

Pomocí skriptu v programu Matlab R2020b byla na snímcích pořízených mikroskopem Keyence vyhodnocena porozita. Nejdříve je originální snímek binarizován, následně jsou odstraněny všechny částice, které nejsou spojeny s hlavním povrchem buňky. Poté jsou lokalizovány černé póry a na základě porovnání snímku s póry a snímku bez pórů je určena relativní hustota vzorku.



Obr. 4-9 Postup skriptu na vyhodnocení porozity

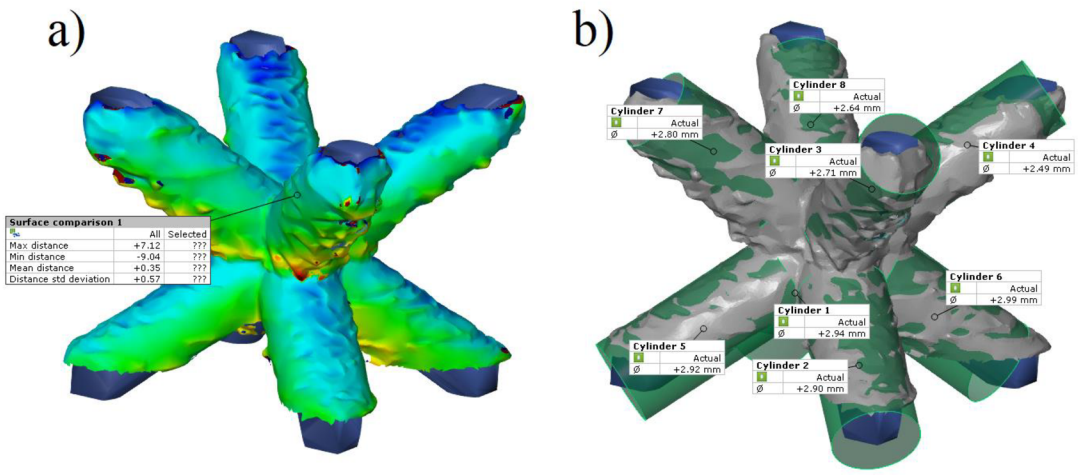
4.5.4 3D skenování a vyhodnocování rozměrové přesnosti

Pro účely měření rozměrové přesnosti bylo použito nedestruktivní 3D měření. Vzorky byly před metalurgickými výbrusy nasnímány a byly vytvořeny jejich 3D obrazy. 3D skenování probíhalo na zařízení ATOS Triple Scan III (GOM GmbH, Braunschweig, Německo).

Obr. 4-10 ATOS Triple Scan III. [37]

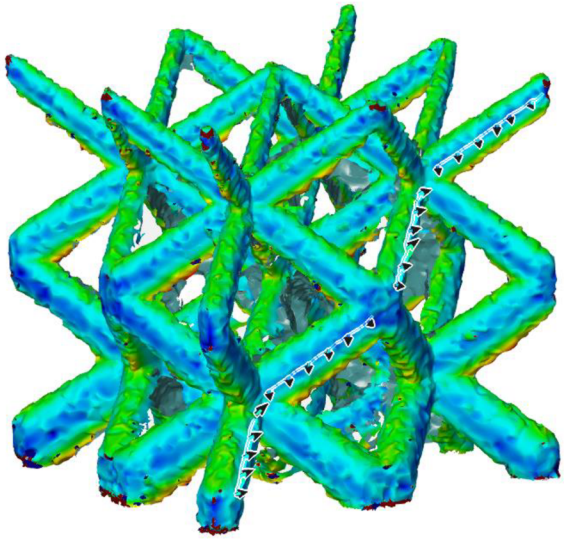
3D obrazy byly digitalizovány v softwaru GOM Inspect. Kontrolní vzorky byly nástrojem CAD Comparison proloženy CAD modelem metodami 3-point alignment a Local best fit. Pomocí této funkce byly vyjádřeny úchylky poloměrů prutů vzorku od modelu, jejich průměrná hodnota a směrodatná odchylka (viz Obr. 4-11 a).

Pro porovnání různých způsobů analýzy v GOM Inspect byl na kontrolní vzorky použit také nástroj Fitting Elements. Do geometrie prutů byly vloženy válce metodou Best Fit. Do každého prutu mikro-prutové struktury byl vložen jeden válec, celkově bylo tedy u každého vzorku použito osm válců (viz Obr. 4-11 b). Z průměrů těchto válců byl spočítán aritmetický průměr.



Obr. 4-11 Měření geometrie kontrolních vzorků. a) CAD Comparison, b) Fitting Elements.

U gradientních struktur byla rozměrová přesnost měřena v softwaru GOM Inspect nástrojem CAD Comparison vytvořením Single Section a použitím Values from Surface Analysis. Gradientní struktury byly proloženy CAD modelem stejným způsobem jako u kontrolních vzorků. Nástroj Single Secion byl použit pro znázornění rozměrových úchylek po celém průběhu změny průměru prutů (viz Obr. 4-12).



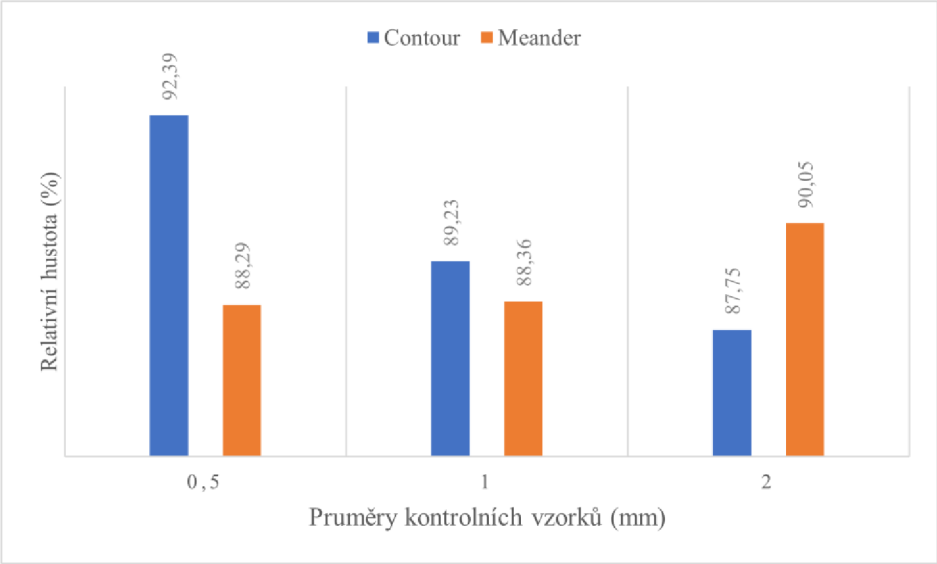
Obr. 4-12 CAD Comparison a Single Section u gradientní struktury.

5 VÝSLEDKY

5.1 Porozita

5.1.1 Kontrolní vzorky

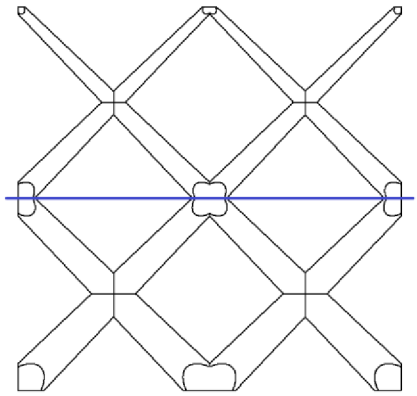
V grafu na Obr. 5-1 jsou relativní hustoty vypočtené Matlab skriptem. U vzorků vyrobených contour strategií vyšla relativní hustota menší než dle předpokladu. Bylo očekáváno, že vzorky vyrobené pomocí contour strategie budou mít výrazně vyšší relativní hustoty než vzorky vyrobené pomocí meander strategie. Tak tomu bylo pouze u vzorků s průměry prutů 0,5 mm.



Obr. 5-1 Graf relativních hustot kontrolních vzorků.

5.1.2 Gradientní struktury

U všech vzorků byly pomocí Matlab skriptu zvlášť určeny hodnoty pro oblast s širším průměrem prutů a oblast s užším průměrem prutů (viz Obr. 5-2)



Obr. 5-2 Rozdělení gradientní struktury

Tab. 3 Relativní hustota gradientních struktur (%).

	M1C0,5	M1M0,5	M1C1	M1M1	M1C2	M1M2
Širší	88,85	95,47	91,37	97,28	98,84	97,81
Užší	91,13	97,83	95,85	97,65	97,55	97,11

	M2C0,5	M2M0,5	M2C1	M2M1	M2C2	M2M2
Širší	91,00	98,08	94,27	98,91	98,63	98,60
Užší	91,19	95,53	89,54	98,60	97,31	95,43

Aritmetickým průměrem z těchto hodnot byla vyjádřena celková hustota vzorků (viz Tab. 4). Krom vzorků vyrobených pomocí contour strategie s procesními parametry pro průměr prutu 0,5 vyšla relativní hustota vzorků gradientních struktur vždy vyšší než u kontrolních vzorků, a to jak u contour strategie, tak i u meander strategie. U vzorků vyrobených sadou procesních parametrů pro průměr prutů 2 mm byla relativní hustota vyšší až o 10 %.

Tab. 4 Celková relativní hustota gradientních struktur (%).

M1C0,5	M1M0,5	M1C1	M1M1	M1C2	M1M2	M2C0,5	M2M0,5	M2C1	M2M1	M2C2	M2M2
89,99	96,65	93,61	97,46	98,20	97,46	91,10	96,81	91,90	98,76	97,97	97,02

5.2 Rozměrová přesnost

5.2.1 Kontrolní vzorky

Při použití CAD Comparison vyšly tyto hodnoty:

Tab. 5 Průměrná úchylka průměru prutů vzorku od modelu určená pomocí nástroje CAD comparison (mm).

KC0,5	KM0,5	KC1	KM1	KC2	KM2
0,36	0,32	0,44	0,32	0,70	0,74

Tab. 6 Směrodatná odchylka úchylky průměru prutů vzorku od modelu (mm).

KC0,5	KM0,5	KC1	KM1	KC2	KM2
0,47	1,02	0,61	0,85	0,81	0,77

Při použití Fitting Elements vyšly tyto hodnoty:

Tab. 7 Úchylka průměru prutů vzorku od modelu určená pomocí nástroje Fitting Elements (mm).

KC0,5	KM0,5	KC1	KM1	KC2	KM2
0,32	0,35	0,40	0,38	0,80	0,77

Výsledky obou analýz byly téměř shodné. Oba nástroje se tak dají považovat za vhodné pro analýzu rozměrové přesnosti mikro-prutových struktur. Průměrná úchylka rostla s rostoucím průměrem prutů, hodnoty úchylek obou strategií se od sebe příliš nelišily.

5.2.2 Gradientní struktury

V Tab. 8 je uvedena průměrná úchylka a směrodatná odchylka poloměru prutů vzorku od modelu.

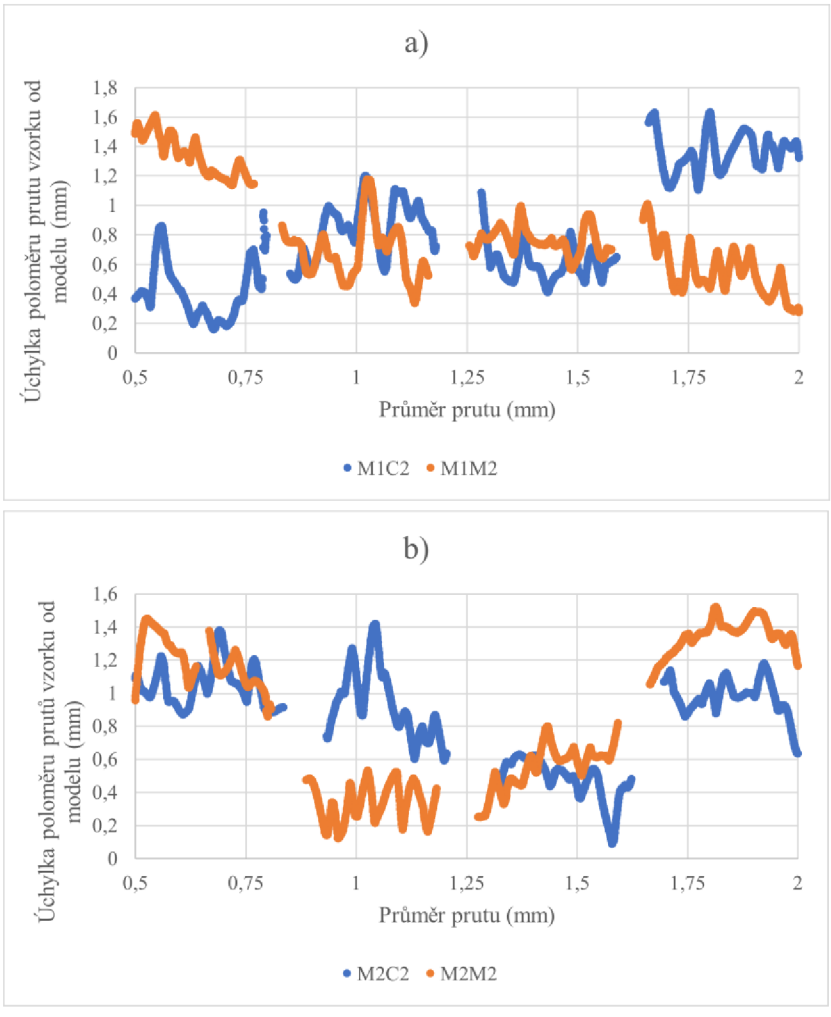
Tab. 8 Průměrná úchylka a směrodatná odchylka průměru prutů gradientních struktur (mm).

	M1C0,5	M1M0,5	M1C1	M1M1	M1C2	M1M2
Průměrná úchylka	0,2117	0,2205	0,4254	0,4306	0,8255	0,8068
Směrodatná odchylka	0,0500	0,0573	0,1740	0,0932	0,2757	0,2296

	M2C0,5	M2M0,5	M2C1	M2M1	M2C2	M2M2
Průměrná úchylka	0,3214	0,2807	0,3950	0,4853	0,8635	0,8575
Směrodatná odchylka	0,1502	0,0564	0,1431	0,2371	0,1895	0,3113

U obou strategií byly průměrné úchylky průměru prutů gradientních struktur vyšší než úchylky průměrů kontrolních vzorků. U obou strategií byl také rozdíl mezi variantami orientace vzorku při stavbě. Průměrné úchylky variant M1, kde vzorky stály na hraně s maximálním průměrem prutů, byly téměř vždy menší než průměrné úchylky variant M2, kde vzorky stály na hraně s minimálním průměrem prutů.

Ačkoliv se průměrné úchylky při srovnání strategií zásadně nelišily, velký rozdíl byl v jejich průbězích v rámci celých struktur. Například u vzorků M1C2 a M1M2 byl průběh úchylek obrácený a u dvojice vyrobené se stejnými procesními parametry, ale s opačnou orientací vzorku při stavbě, byly průběhy zcela odlišné (viz grafy na Obr. 5-3).

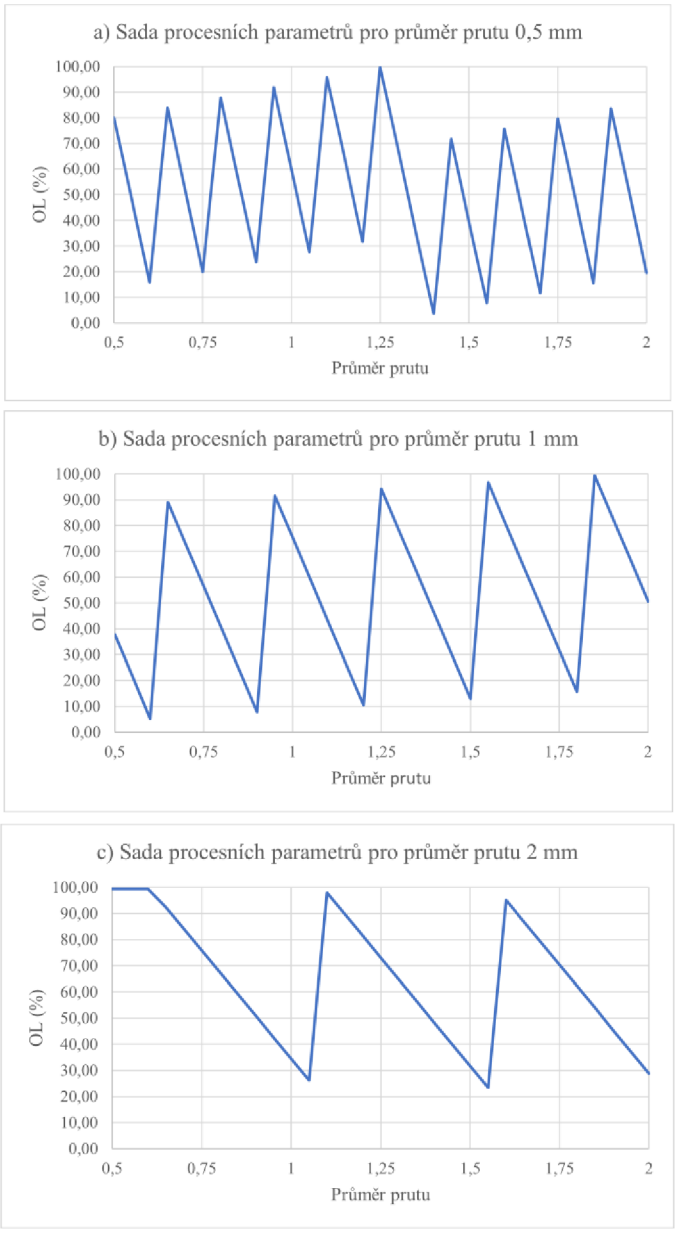


Obr. 5-3 Grafy průběhů průměrné úchylky v rámci gradientních struktur. a) M1C2 a M1M2, b) M2C2 a M2M2.

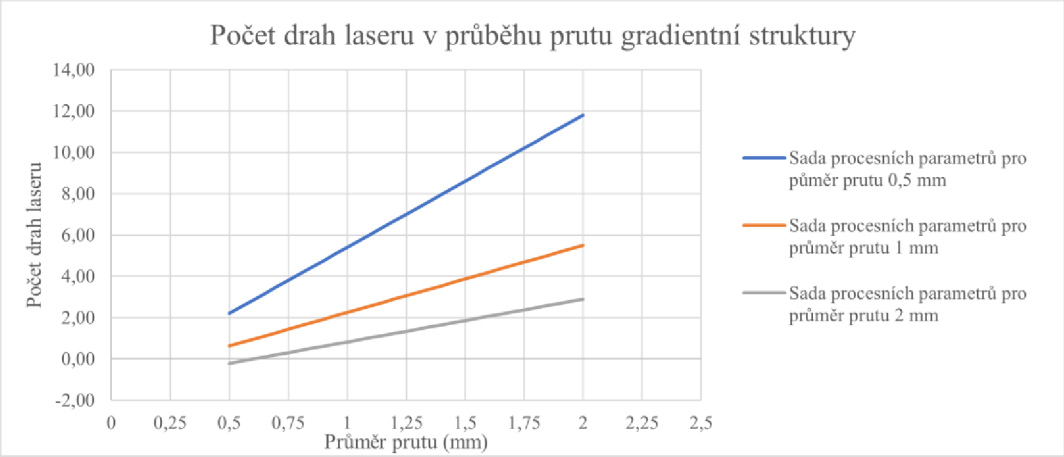
6 DISKUZE

6.1 Překryv drah contour strategie

Podle autorů Vrána et al. [28] má u contour strategie na porozitu velký vliv překryv drah (OL) uprostřed prutu. Jelikož u gradientních struktur s každou vrstvou návarů dochází ke změně průměru prutů a ostatní parametry zůstávají konstantní, mění se počet drah laseru v jedné vrstvě (viz graf na Obr. 6-2) a rovněž se mění OL uprostřed prutu, který se tak odklání od ideální hodnoty. Teoretické průběhy OL jednotlivých sad procesních parametrů jsou uvedeny v grafech na Obr. 6-1.

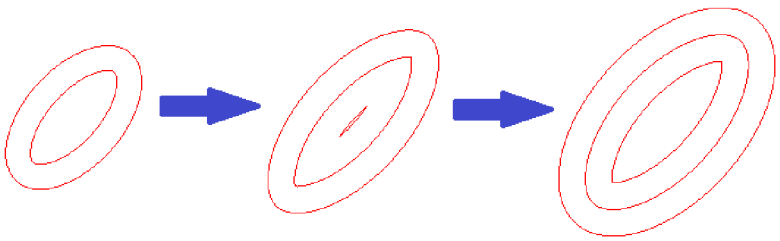


Obr. 6-1 Grafy průběhů OL uprostřed prutů pro jednotlivé sady procesních parametrů.



Obr. 6-2 Graf Počtů drah laseru jednotlivých sad procesních parametrů.

OL je uprostřed prutů u gradientních struktur vysoce nestabilní, ale předvídatelný. V průběhu osciluje z lokálních maxim do lokálních minim. Tyto oblasti jsou kritické ke vzniku porozity. V oblastech minima mohou póry vznikat v důsledku nedostatku plošné energie E_{ar} popsané v kapitole 2.5.3. Nedojde tedy ke spojení návarů a vzniká tak oblast s neroztaveným práškem. V oblastech maxima mohou póry vznikat naopak vlivem velkého množství absorbované energie popsané v kapitole 2.6.1. Dojde tedy vlivem vysoké teploty k vypaření části materiálu a výpary jsou následně uzavřeny v materiálu prutu. Vrstvování contour strategie probíhá tak, že se s rozšiřujícím se průměrem nové dráhy laseru přibývají uprostřed prutu (viz Obr. 6-3). Čím je šířka návarů menší, tím více drah laseru je potřeba na vytvoření celého profilu prutu. Počet oblastí extrémů v průběhu gradientní struktury je proto přímo závislý na velikosti návarů a počtu drah.



Obr. 6-3 Schéma vzniku nové dráhy návaru v průběhu prutu gradientní struktury.

6.2 Porozita

Podle článků z kapitoly 2.5.2 porozitu výrazně ovlivňuje lineární energie E_l. Hodnoty E_l jednotlivých sad procesních parametrů jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Lineární energie E_l sad procesních parametrů.

Průměr prutů (mm)	E_l (J · mm^{-1})
0,5	0,09
1	0,25
2	0,70

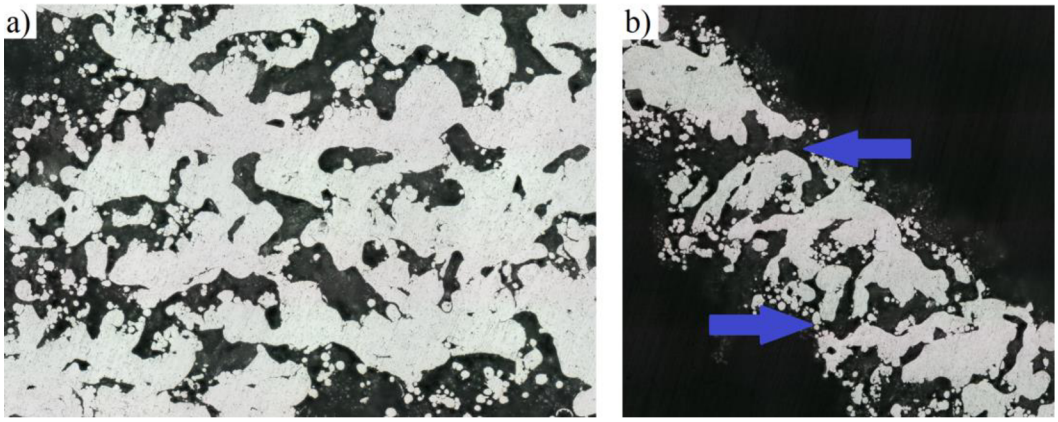
6.2.1 Kontrolní vzorky

Ačkoliv byly sady procesních parametrů optimalizované právě pro výrobu kontrolních vzorků pomocí contour strategie, jejich porozita byla výrazně vyšší, než bylo očekáváno. Možnými důvody mohla být zvýšená vlhkost prášku nebo jeho přesívání před stavbou. Porozity vzorků vyrobených contour strategií a meander strategií se proto zásadně nelišily.

6.2.2 Porozita u contour strategie při procesních parametrech pro průměr prutů 0,5 mm

Do této kategorie spadaly vzorky M1C0,5 a M2C0,5; které se lišily pouze orientací vzorku při stavbě. U vzorku M1C0,5 model stál na hraně s maximálním průměrem prutů a u vzorku M2C0,5 naopak.

Lineární energie zde byla příliš malá. Vlivem nedostatečného působení tepelné energie nedošlo k protavení prášku. Nebyla vytvořena správná geometrie návarů a sousedící dráhy se nespojily. Obě struktury tak byly plné ostrých pórů nepravidelného tvaru s částicemi neroztaveného prášku. (viz Obr. 6-4 a). Ve struktuře byly dlouhé horizontální póry, protože nedocházelo ke spojení návarů v rámci vrstev (viz Obr. 6-4 b). Je možné, že na vznik těchto pórů měl vliv také balling efekt popsaný v kapitole 2.5.2. I přes vysoký počet drah laseru v oblasti s širším průměrem prutů nebyla akumulovaná energie dostatečná, a i zde je porozita výrazná. Vliv OL uprostřed prutu nebylo možné prokázat z důvodu velké porozity.



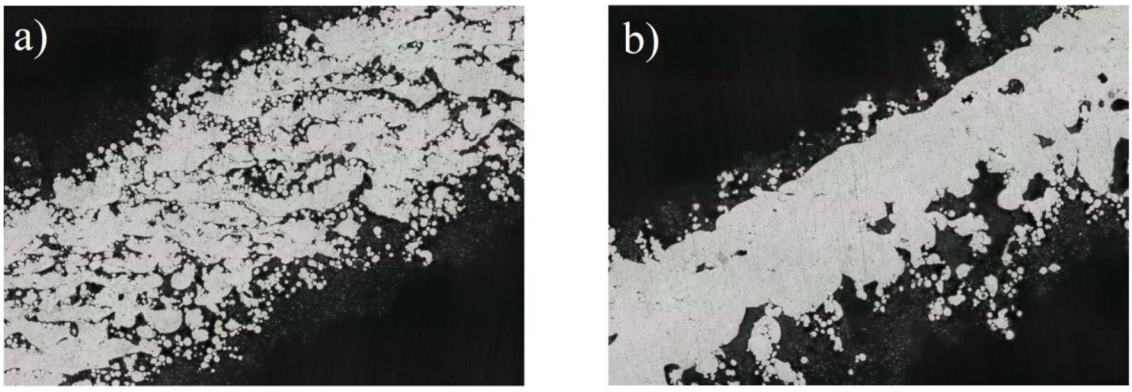
Obr. 6-4 Detaily M1C0,5. a) Ostré póry nepravidelného tvaru se částicemi neroztaveného prášku, b) vliv balling efektu.

6.2.3 Porozita u contour strategie při procesních parametrech pro průměr prutů 1 mm

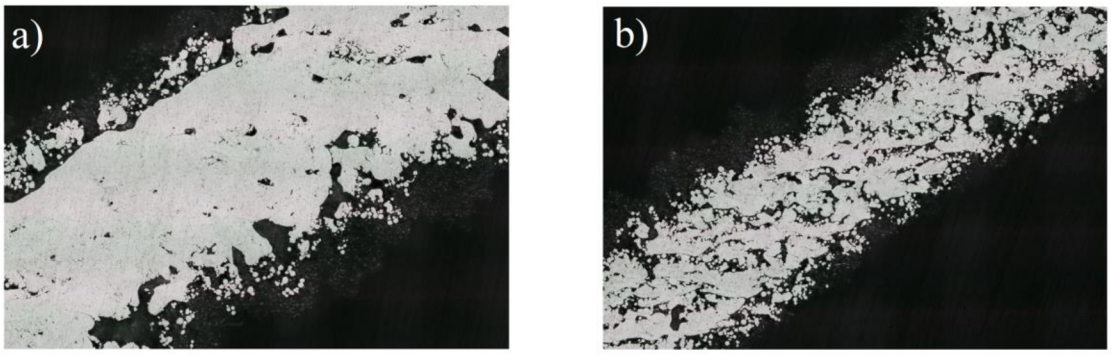
Do této kategorie spadaly vzorky M1C1 a M2C1, které se lišily pouze orientací vzorku při stavbě.

Díky menší skenovací rychlosti u této sady procesních parametrů je E_l vyšší. Návary stihly pohltit více energie, tavenina byla méně viskózní a smáčivější a vytvořila se lepší geometrie návaru. Z tohoto důvodu je zde výrazně vyšší relativní hustota než u M1C0,5 a M2C0,5.

U M1C1 je v oblasti s širším průměrem prutů menší relativní hustota než v oblasti s užším průměrem. U M2C1 je tomu naopak. Oba vzorky tak vykazují nižší relativní hustotu v místech blízkých stavební platformě při výrobě. Je pravděpodobné, že tento jev souvisí s teplotní vodivostí popsanou v kapitole 2.5.5. Přes stavební platformu je teplo odváděno v jiné míře než přes neroztavené částice prášku nebo taveninu. Avšak použité vzorky byly stavěny na podporách, proto byla předpokládána spíše nižší rychlost odvodu tepelné energie. V tomto případě se však zdá, že odvod tepla probíhal příliš rychle a prášek se v těchto místech nestihl protavit. Ve větších výškách staveb je relativní hustota prutů vyšší. Je možné že se zde odvod tepla ve struktuře více stabilizoval. Vzhledem k použité geometrii vzorků je takový průběh však nepravděpodobný, a proto je tomuto jevu potřeba věnovat pozornost i v budoucnu.

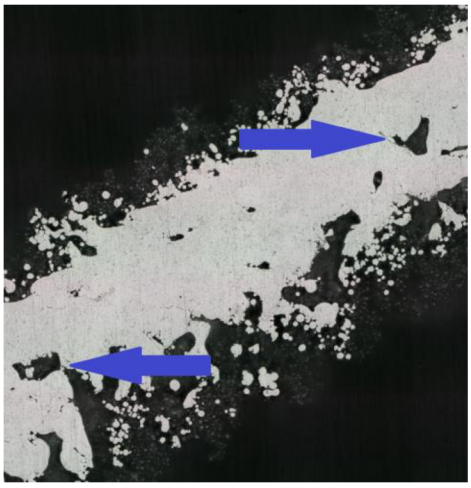


Obr. 6-5 Detail M1C1. a) Prut s větším průměrem, který byl při stavbě níže, b) prut s menším průměrem, který byl při stavbě výše.



Obr. 6-6 Detail M2C1. a) Prut s větším průměrem, který byl při stavbě výše, b) prut s menším průměrem, který byl při stavbě níže.

U těchto vzorků je možné identifikovat póry, které pravděpodobně vznikly v souvislosti s OL uprostřed prutu. V oblastech lokálních minim podle grafu na Obr. 6-1 a) nedošlo ke spojení dvou sousedících návarů, což mohlo vést ke vzniku nepravidelných ostrých pórů na Obr. 6-7.



Obr. 6-7 Detail M1C1. Vznik pórů v souvislosti s nízkým OL uprostřed prutu.

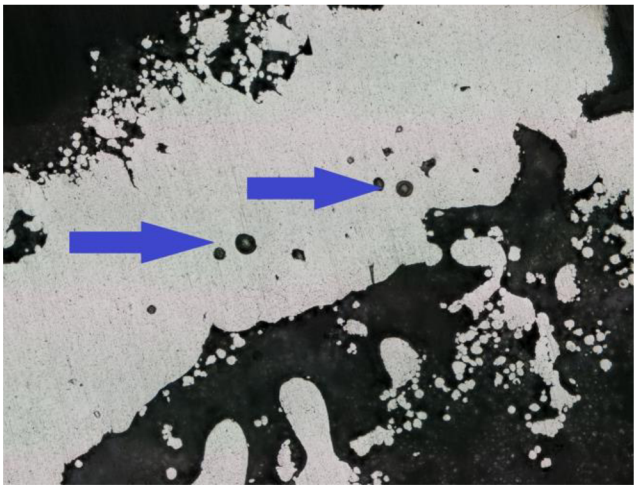
6.2.4 Porozita u contour strategie při procesních parametrech pro průměr prutů 2 mm

Do této kategorie spadaly vzorky M1C2 a M2C2, které se opět lišily pouze orientací vzorku při stavbě.

Oproti předchozí sadě byl použit násobně vyšší LP, tudíž zde byla E_l nejvyšší. Relativní hustota byla také nejvyšší. OL byl nejstabilnější, zato měl jasný dopad na vznik pórů. U M1C2 mezi průměry prutu 1,25 mm až 1,55 mm kde dochází k průběžnému snižování OL je velké množství pórů uprostřed prutu vzniklých nedokonalým spojením sousedících návarů (viz Obr. 6-8).

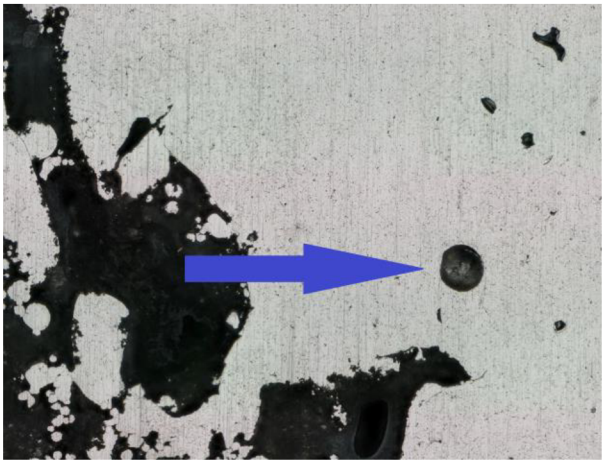
Obr. 6-8 Detail M1C2. Póry vzniklé nedokonalým překryvem.

V nejužší části struktury byly vrstvy tvořeny pouze jednou drahou laseru. Kvůli extrémnímu překryvu zde vznikly póry vlivem absorbování přílišného množství tepelné energie a odpaření materiálu (viz Obr. 6-9). U meander strategie se dle autorů Dong et al. [23] z kapitoly 2.5.4 sousední návary navzájem ovlivňují, což s sebou při větším množství drah přináší větší akumulaci tepelné energie. Zdá se, že u contour strategie má na akumulaci tepelné energie ještě větší dopad právě překryv, protože k odpaření materiálu došlo i při jedné dráze.



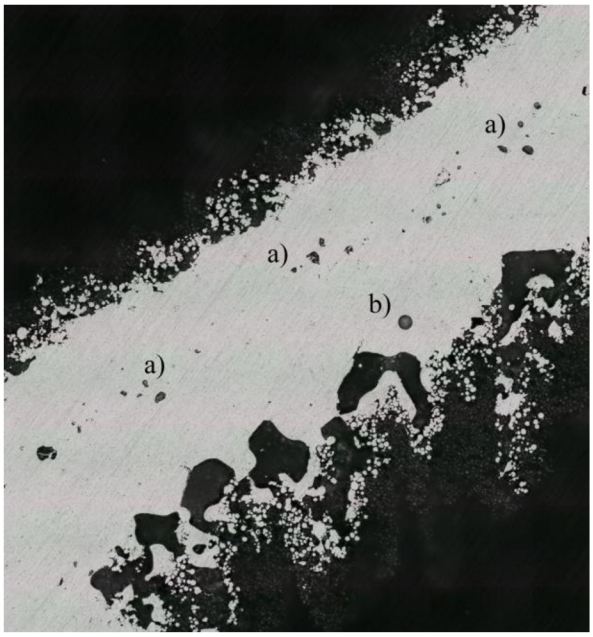
Obr. 6-9 Detail M1C2. Vznik pórů v důsledku extrémního překryvu drah.

Dle autorů Vrána et al. [28] z kapitoly 2.6.1 u skloněných prutů může dojít ke vzniku pórů ve spodní části prutů. Tepelná energie díky sklonu není dostatečně odváděna přes materiál prutu, a proto zde může dojít k přehřátí a odpaření materiálu. K tomuto došlo i díky většímu množství návarů a vysoké E_l v nejširších prutech struktur (viz Obr. 6-10).



Obr. 6-10 Detail M1C2. Vznik pórů vlivem odpařením materiálu ve spodní části prutu.

Zajímavý je taky různý charakter pórů v nejširších prutech vzorku M2C2. Na Obr. 6-11 lze vidět póry způsobené malým OL uprostřed prutu (a) a zároveň pór způsobený odpařením materiálu v důsledku přílišné akumulace energie (b). Z toho vyplívá, že tyto jevy vznikají současně. Proto je u contour strategie důležité určení správné energie procesních parametrů a zároveň správné nastavení překryvu.

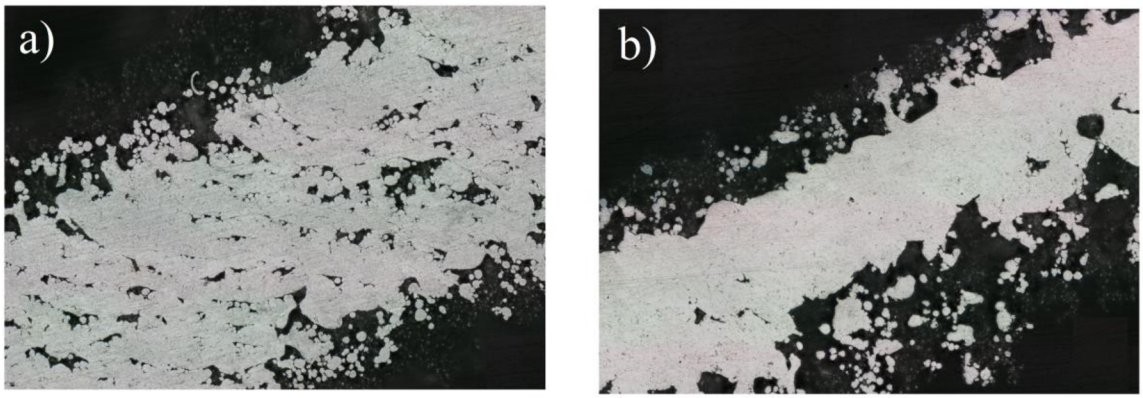


Obr. 6-11 Detail M2C2. Různý charakter pórů při podobných podmínkách. a) póry způsobené OL uprostřed prutu, b) pór způsobený přílišnou akumulací energie.

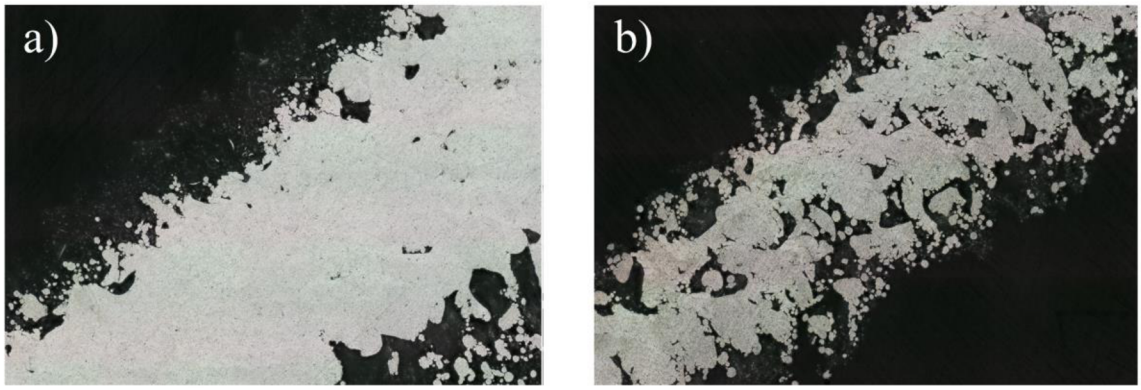
6.2.5 Vliv meander strategie na porozitu

Meander strategie má vždy konstantní OL, proto průběh porozity v gradientní struktuře závisí pouze na počtu drah laseru ve vrstvě návarů a případné orientaci modelu struktury. Rozložení pórů ve struktuře je více nahodilé.

U vzorků vyrobených pomocí meander strategie a sad procesních parametrů pro průměr prutů 0,5 a 1 mm byla naměřena vyšší relativní hustota oproti vzorkům vyrobených contour strategií. U M1M0,5 a M2M0,5 byla struktura mnohem více homogenní než u jejich protějšků vyrobených contour strategií. Byl zřetelný vliv orientace vzorku při stavbě stejným způsobem, jako tomu bylo u contour strategie při procesních parametrech pro průměr prutů 1 mm (viz Obr. 6-12 a Obr. 6-13).

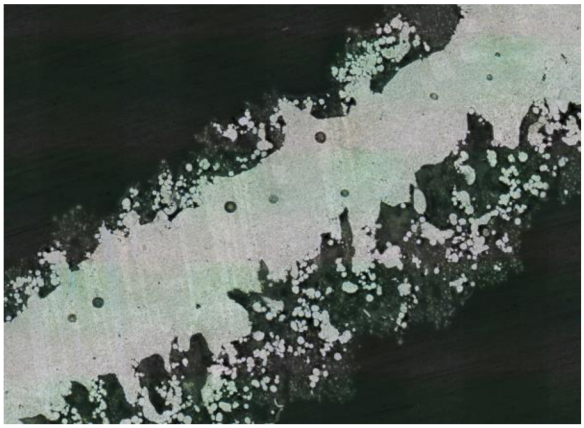


Obr. 6-12 Detail M1M0,5. a) Prut s větším průměrem, který byl při stavbě níže, b) prut s menším průměrem, který byl při stavbě výše.



Obr. 6-13 Detail M2M0,5. a) Prut s větším průměrem, který byl při stavbě výše, b) prut s menším průměrem, který byl při stavbě níže.

U vzorků vyrobených sadou procesních parametrů pro průměr prutů 1 mm, tedy M1M1 a M2M1, docházelo k tvorbě pórů v důsledku odpařování materiálu v průběhu celé struktury (viz Obr. 6-14), protože pro meander strategii byl nastavený překryv až příliš velký.



Obr. 6-14 Detail M1M1. Vznik pórů v důsledku odpařování materiálu.

U vzorků vyrobených sadou procesních parametrů pro průměr prutů 2 mm, tedy M1M2 a M2M2, byl počet pórů vzniklých v důsledku odpařování materiálu ještě větší vlivem větší E_l (viz Obr. 6-15). Opět byl také znát vliv orientace vzorku při stavbě. Části struktury, které byly vyrobeny dříve vykazují zhoršenou relativní hustotu v důsledku nedokonalého protavení materiálu.

Obr. 6-15 Detail M2M2. Zvýšená porozita v důsledku odpařování materiálu.

Je zřejmé, že orientace gradientní struktury při stavbě ovlivňuje porozitu při obou skenovacích strategiích. Vliv orientace se projevuje u každé strategie v jiných rozmezí E_l, protože díky rozdílnému charakteru tvorby návarů se u každé strategie akumuluje energie jiným způsobem a odvod tepla také probíhá různě.

6.3 Rozměrová přesnost

6.3.1 Kontrolní vzorky

Vzorky vyrobené contour strategií měly proti očekáváním vyšší rozměrové úchylky, podobně jako tomu bylo s porozitou. U obou strategií rostla průměrná úchylka průměru prutů s rostoucí E_l, což odpovídá poznatkům z práce autorů Dongming et al. [17] uvedené v kapitole 2.5.2.

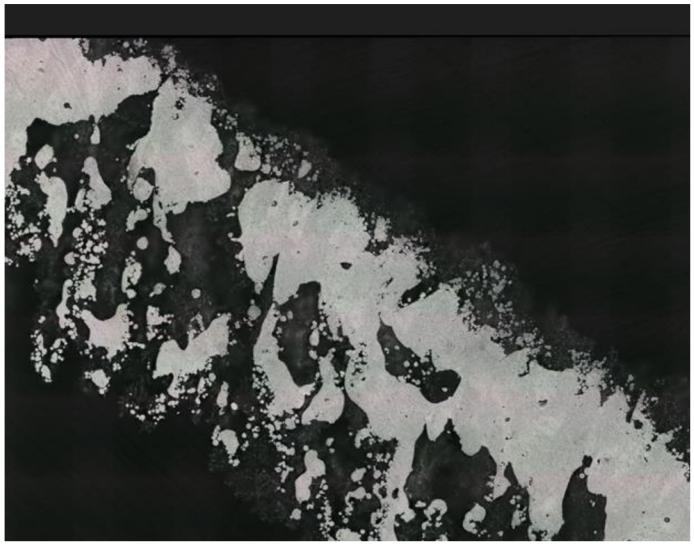
6.3.2 Gradientní struktury

Působením vyšší E_l se rozměrová přesnost zhoršovala vlivem větších průvarů na okraji prutů a přitavení zrn na povrch.

Na průběhy průměrných úchylek měla vliv použitá skenovací strategie i orientace vzorku při stavbě. Hlavním důvodem budou opět různý odvod tepla jednotlivých konfigurací.

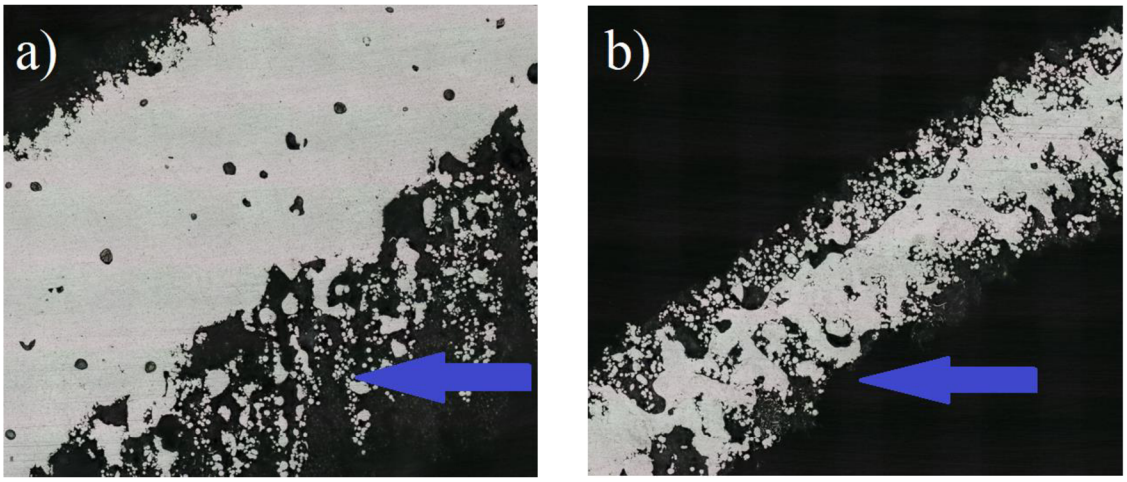
Ukázalo se, že meander strategie kvůli svému charakteru není vhodná pro výrobu prutů velmi malých průměrů. U vzorků M1M2 a M2M2 byla mezi průměry 0,5 až 0,75 mm úchylka vysoká vlivem malého počtu návarů a nemožnosti vytvořit kruhovou geometrii profilu prutu (viz Obr. 6-16). V metalurgickém výbrusu na Obr. 6-17 je díky tomu vidět zdeformovaný prut v daném rozmezí průměru prutů ve vzorku M1M2.

Obr. 6-16 Dráhy laseru meander strategie u malého průměru prutu.

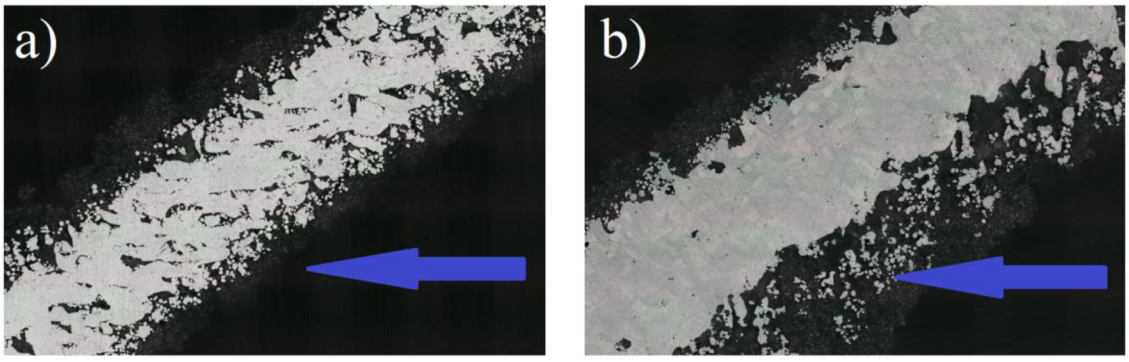


Obr. 6-17 Detail M1M2. Prut zdeformovaný vlivem nevhodného charakteru drah návarů.

Ve článku od autorů Delroisse et al. [24] v kapitole 2.5.5 byl probírán vliv sklonu prutů na porozitu a vznik oblasti s velkým množstvím pórů mezi částečně natavenými částicemi prášku v důsledku delšího setrvání na vysokých teplotách. Tento jev se projevil i u gradientních struktur, velikost nežádoucí oblasti ve spodní části prutů rostla s rostoucí E_l, největší byla u vzorků vyrobených pomocí sad procesních parametrů pro průměr prutu 2 mm. Velikost nežádoucí oblasti nezáleží pouze na velikosti E_l, ale i na průměru prutu a s ním souvisejícím počtem drah laseru. Díky vyššímu počtu drah laseru se v návarech akumuluje více energie, která způsobuje vyšší teplotní gradient a delší setrvání na vysokých teplotách. V rámci jednotlivých vzorků se tak nežádoucí oblast ve spodní části prutů zvětšovala přímo úměrně s průměrem prutů (viz Obr. 6-18). Tento jev byl mnohem výraznější u vzorků vyrobených pomocí meander strategie (viz Obr. 6-19). U vzorků vyrobených pomocí contour strategie bylo množství nataveného prášku na povrchu prutu menší, z čehož vyplívá vyšší rozměrová přenosnost v tomto směru a menší hmotnost struktury.



Obr. 6-18 Detail M2H2, porovnání velikosti nežádoucích oblastí na spodní straně prutů struktury. a) Nejširší pruty struktury, b) nejužší struktury.



Obr. 6-19 Porovnání nežádoucích oblastí ve spodní části prutu vzorků ve stejném místě gradientních struktur vyrobených pomocí různých strategií. a) M1C1, b) M2M2.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo ověřit vliv contour laserové strategie na výrobu gradientních mikro-prutových struktur vyrobených technologií SLM. Byl proveden experiment, ve kterém byly pomocí contour strategie s procesními parametry určenými pro struktury s konstantním průměrem prutů vyrobeny vzorky s gradientními strukturami. Na vzorcích byla sledována vnitřní porozita a rozměrová přesnost a jejich příčiny. Tyto vzorky byly dále porovnávány se vzorky vyrobenými pomocí běžně používané meander strategie a s kontrolními vzorky s konstantním průměrem prutů.

Tato práce přinesla souhrn poznatků o různých jevech, které mají vliv na výrobu gradientních struktur, a proto je na ně potřeba brát zřetel.

Patří mezi ně například tvar návarů. Tvar návarů meander strategie byl vyhodnocen jako nevhodný, protože při malém počtu návarů deformuje tvar prutů malých průměrů. Dále velikost lineární energie E_l, která ovlivňuje jak porozitu, tak rozměrovou přesnost výrobků. U vzorků gradientních struktur vyrobených pomocí contour strategie byla relativní hustota při působení E_l 0,70 J · mm^{-1} až o 10 % větší, než při působení E_l 0,09 J · mm^{-1}. Dále pak vliv orientace gradientní struktury při stavbě, který měl překvapivé důsledky. Zdá se, že odvod tepla stabilizuje až v určité výšce struktury, a tak spodní části vzorků dosahovaly až o 5 % menší relativní hustoty než horní části. Bylo ověřeno, že u contour strategie má na vznik pórů zásadní vliv překryv drah uprostřed prutů, který se v gradientních strukturách neustále mění. V neposlední řadě byl pozorován vznik oblastí s vysokou porozitou ve spodní části prutů, které negativně ovlivňují kvalitu výrobků. U meander strategie tyto oblasti byly výraznější než u contour strategie.

Contour strategie je v různých studiích pro výrobu mikro-prutových struktur považována za perspektivní, protože umožňuje nastavení specifických procesních parametrů pro různé struktury a průměry prutů. Meander strategie je univerzálnější, a proto se komerčně používá při výrobě objemových těles a dalších tvarů. Procesní parametry použité v experimentu byly optimalizované pro výrobu struktur s konstantními průměry prutů pomocí contour strategie. Ukázalo se, že gradientní struktury na ně reagují jinak, a to zvláště z důvodu rozdílného odvodu tepla v prutech. Kvůli větší univerzálnosti meander strategie vykazovala velmi podobné, často i lepší výsledky než contour strategie. Díky poznatkům uvedeným v této práci je ovšem pravděpodobné, že při vhodnějším nastavení procesních parametrů contour strategie meander strategii překoná, stejně jako tomu bylo u struktur s konstantními průměry.

Z práce vyplívá, že contour strategie je perspektivní i pro výrobu gradientních struktur a budoucí výzkum contour strategie v této oblasti je relevantní.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] V. Griffiths, J. P. Scanlan, M. H. Eres, A. Martinez-Sykora, a P. Chinchapatnam, „Cost-driven build orientation and bin packing of parts in Selective Laser Melting (SLM)", *Eur J Oper Res*, roč. 273, č. 1, s. 334–352, úno. 2019, doi: 10.1016/J.EJOR.2018.07.053.

[2] S. You, Y. Huang, K. U. Kainer, a N. Hort, „Recent research and developments on wrought magnesium alloys", *Journal of Magnesium and Alloys*, roč. 5, č. 3, s. 239–253, zář. 2017, doi: 10.1016/J.JMA.2017.09.001.

[3] T. Kurzynowski, A. Pawlak, a I. Smolina, „The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, roč. 20, č. 1, s. 1–13, bře. 2020, doi: 10.1007/S43452-020-00033-1/TABLES/3.

[4] Y. Wang *et al.*, „Challenges and Solutions for the Additive Manufacturing of Biodegradable Magnesium Implants", *Engineering*, roč. 6, č. 11, s. 1267–1275, lis. 2020, doi: 10.1016/J.ENG.2020.02.015.

[5] J. Kubásek, D. Dvorský, M. Čavojský, M. Roudnická, a D. Vojtěch, „WE43 magnesium alloy - material for challenging applications", *Kovove Materialy*, roč. 57, č. 3, s. 159–165, 2019, doi: 10.4149/KM_2019_3_159.

[6] P. Krištofová, J. Kubásek, D. Vojtěch, D. Paloušek, a J. Suchý, „Microstructure of the Mg-4Y-3RE-Zr (WE43) Magnesium Alloy Produced by 3D Printing", roč. 19, č. 1, 2019.

[7] P. Lovašiová *et al.*, „Biodegradable WE43 Magnesium Alloy Produced by Selective Laser Melting: Mechanical Properties, Corrosion Behavior, and In-Vitro Cytotoxicity", *Metals (Basel)*, roč. 12, č. 3, bře. 2022, doi: 10.3390/MET12030469.

[8] T. Hirata, T. Kimura, a T. Nakamoto, „Effects of hot isostatic pressing and internal porosity on the performance of selective laser melted AlSi10Mg alloys", *Materials Science and Engineering A*, roč. 772, led. 2020, doi: 10.1016/J.MSEA.2019.138713.

[9] K. Li, C. Ji, S. Bai, B. Jiang, a F. Pan, „Selective laser melting of magnesium alloys: Necessity, formability, performance, optimization and applications", *J Mater Sci Technol*, roč. 154, s. 65–93, 2023, doi: 10.1016/j.jmst.2022.12.053.

[10] „Magnesium (Mg) - Atomic Number 12". https://www.breakingatom.com/elements/magnesium (viděno 15. duben 2023).

[11] B. Zhang, H. Liao, a C. Coddet, „Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9%Al powder mixture", *Mater Des*, roč. 34, s. 753–758, úno. 2012, doi: 10.1016/J.MATDES.2011.06.061.

[12] W. neng Zhang, L. zhi Wang, Z. xue Feng, a Y. ming Chen, „Research progress on selective laser melting (SLM) of magnesium alloys: A review", *Optik (Stuttg)*, roč. 207, s. 163842, dub. 2020, doi: 10.1016/J.IJLEO.2019.163842.

[13] M. Salehi, S. Maleksaeedi, H. Farnoush, M. L. S. Nai, G. K. Meenashisundaram, a M. Gupta, „An investigation into interaction between magnesium powder and Ar gas: Implications for selective laser melting of magnesium", *Powder Technol*, roč. 333, s. 252–261, čer. 2018, doi: 10.1016/J.POWTEC.2018.04.026.

[14] T. Maconachie *et al.*, „SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges", *Mater Des*, roč. 183, pro. 2019, doi: 10.1016/J.MATDES.2019.108137.

[15] R. Alavi, A. Trenggono, S. Champagne, a H. Hermawan, „Investigation on mechanical behavior of biodegradable iron foams under different compression test conditions", *Metals (Basel)*, roč. 7, č. 6, čer. 2017, doi: 10.3390/MET7060202.

[16] M. F. Ashby, „The properties of foams and lattices", *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, roč. 364, č. 1838, s. 15–30, led. 2006, doi: 10.1098/RSTA.2005.1678.

[17] D. Li, X. Zhang, R. Qin, J. Xu, D. Yue, a B. Chen, „Influence of processing parameters on AlSi10Mg lattice structure during selective laser melting: Manufacturing defects, thermal behavior and compression properties", *Opt Laser Technol*, roč. 161, čer. 2023, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2023.109182.

[18] C. Y. Yap *et al.*, „Review of selective laser melting: Materials and applications", *Appl Phys Rev*, roč. 2, č. 4, pro. 2015, doi: 10.1063/1.4935926.

[19] S. Liu a H. Guo, „Balling Behavior of Selective Laser Melting (SLM) Magnesium Alloy", *Materials 2020, Vol. 13, Page 3632*, roč. 13, č. 16, s. 3632, srp. 2020, doi: 10.3390/MA13163632.

[20] J. Zhang, B. Song, Q. Wei, D. Bourell, a Y. Shi, „A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends", *J Mater Sci Technol*, roč. 35, č. 2, s. 270–284, úno. 2019, doi: 10.1016/J.JMST.2018.09.004.

[21] W. Pei, W. Zhengying, C. Zhen, L. Junfeng, Z. Shuzhe, a D. Jun, „Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder", *Appl Phys A Mater Sci Process*, roč. 123, č. 8, s. 1–15, srp. 2017, doi: 10.1007/S00339-017-1143-7/FIGURES/17.

[22] Z. Chen *et al.*, „Experimental Research on Selective Laser Melting AlSi10Mg Alloys: Process, Densification and Performance", *J Mater Eng Perform*, roč. 26, č. 12, s. 5897–5905, pro. 2017, doi: 10.1007/S11665-017-3044-5/TABLES/3.

[23] Z. Dong, X. Zhang, W. Shi, H. Zhou, H. Lei, a J. Liang, „Study of Size Effect on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Samples Made by Selective Laser Melting", *Materials 2018, Vol. 11, Page 2463*, roč. 11, č. 12, s. 2463, pro. 2018, doi: 10.3390/MA11122463.

[24] P. Delroisse, P. J. Jacques, E. Maire, O. Rigo, a A. Simar, „Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting", *Scr Mater*, roč. 141, s. 32–35, pro. 2017, doi: 10.1016/j.scriptamat.2017.07.020.

[25] M. Sairaiji, H. Yoshizaki, H. Iwaoka, S. Hirosawa, a S. Maruo, „Effect of Scan Strategy on Mechanical Properties of AlSi12 Lattice Fabricated by Selective Laser Melting", *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, roč. 15, č. 1, 2020, doi: 10.2961/jlmn.2020.01.2002.

[26] S. Pauly, C. Schricker, S. Scudino, L. Deng, a U. Kühn, „Processing a glass-forming Zr-based alloy by selective laser melting", *Mater Des*, roč. 135, s. 133–141, pro. 2017, doi: 10.1016/J.MATDES.2017.08.070.

[27] R. Vrána *et al.*, „Selective laser melting strategy for fabrication of thin struts usable in lattice structures", *Materials*, roč. 11, č. 9, zář. 2018, doi: 10.3390/MA11091763.

[28] R. Vrána *et al.*, „Contour laser strategy and its benefits for lattice structure manufacturing by selective laser melting technology", *J Manuf Process*, roč. 74, s. 640–657, úno. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.12.006.

[29] X. Han, H. Zhu, X. Nie, G. Wang, a X. Zeng, „Investigation on selective laser melting AlSi10Mg cellular lattice strut: Molten pool morphology, surface roughness and dimensional accuracy", *Materials*, roč. 11, č. 3, bře. 2018, doi: 10.3390/MA11030392.

[30] Y. Tian, D. Tomus, P. Rometsch, a X. Wu, „Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting", *Addit Manuf*, roč. 13, s. 103–112, led. 2017, doi: 10.1016/J.ADDMA.2016.10.010.

[31] S. Y. Choy, C. N. Sun, K. F. Leong, a J. Wei, „Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting", *Mater Des*, roč. 131, s. 112–120, říj. 2017, doi: 10.1016/J.MATDES.2017.06.006.

[32] L. Xiao a W. Song, „Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments", *Int J Impact Eng*, roč. 111, s. 255–272, led. 2018, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2017.09.018.

[33] A. Seharing, A. H. Azman, a S. Abdullah, „A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts", *Advances in Mechanical Engineering*, roč. 12, č. 6, čer. 2020, doi: 10.1177/1687814020916951.

[34] I. Maskery *et al.*, „A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting", *Materials Science and Engineering A*, roč. 670, s. 264–274, čvc. 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.06.013.

[35] „3D laboratoř | NETME Centre". http://netme.cz/cs/3d-laboratory/ (viděno 15. květen 2023).

[36] „Mid and High Volume Metal Additive Manufacturing | SLM Solutions". https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-280/ (viděno 15. květen 2023).

[37] „3D-scanner-Gom-ATOS-III-Triple-Scan-in-use - Scan-Xpress". https://www.scan-xpress.com.au/services/3d-scanning/3d-scanner-gom-atos-iii-triple-scan-in-use/ (viděno 18. květen 2023).

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

SLM	Selective laser melting
AT	Aditivní technologie
LPBF	Laser powder bed fusion
CAD	Computer aided design
STL	Stereolitography (formát souborů)
R_e	Mez kluzu v tahu
R_m	Mez pevnosti v tahu
BCC	Body centred cubic
BCCZ	Body centred cubic se vzpěrami v ose z
FCC	Face centred cubic
FCCZ	Face centred cubic se vzpěrami v ose z
LP	Výkon laseru
LS	Skenovací rychlost
LT	Tloušťka vrstvy
HD	Vzdálenost drah laseru
OL	Překryv drah
E	Objemová energie
E_l	Lineární energie
FFCXYZ	Face centred cubic se vzpěrami v osách x, y a z
TW	Šířka návaru
E_{ar}	Plošná energie
BCC pruty	Pruty skloněné pod úhlem 35,26°
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu
K0,5; K1; K2	Modely kontrolních vzorků s průměrem prutů 0,5 mm; 1 mm; respektive 2 mm
M1	Varianta orientace vzorku při stavbě, při které byl model postaven na hranu s maximálním průměrem prutů

M2	Varianta orientace vzorku při stavbě, při které byl model postaven na hranu s maximálním průměrem prutů
KM0,5; KM1; KM2	Kontrolní vzorky vyrobené pomocí meander strategie a sady procesních parametrů pro průměr prutů 0,5 mm; 1 mm; respektive 2 mm
KC0,5; KC1; KC2	Kontrolní vzorky vyrobené pomocí contour strategie a sady procesních parametrů pro průměr prutů 0,5 mm; 1 mm; respektive 2 mm
M1M0,5; M1M1; M1M2	Vzorky gradientních struktur orientované podle první varianty vyrobené pomocí meander strategie a sady procesních parametrů pro průměr prutů 0,5 mm; 1 mm; respektive 2 mm
M1C0,5; M1C1; M1C2	Vzorky gradientních struktur orientované podle první varianty vyrobené pomocí meander strategie a sady procesních parametrů pro průměr prutů 0,5 mm; 1 mm; respektive 2 mm
M2M0,5; M2M1; M2M2	Vzorky gradientních struktur orientované podle druhé varianty vyrobené pomocí meander strategie a sady procesních parametrů pro průměr prutů 0,5 mm; 1 mm; respektive 2 mm
M2C0,5; M2C1; M2C2	Vzorky gradientních struktur orientované podle druhé varianty vyrobené pomocí meander strategie a sady procesních parametrů pro průměr prutů 0,5 mm; 1 mm; respektive 2 mm
3D	Trojrozměrný

10 SEZNAM POUŽITÍCH OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Schéma výroby technologií SLM. [1] 14

Obr. 2-2 a) Litá WE43 s dendrity o velikosti 50 μm, b) WE43 vyrobená technologií SLM s kulatými segmenty o velikosti 30 až 50 μm. [6] 16

Obr. 2-3 Kovová pěna jako příklad porózního materiálu s nepravidelnou strukturou. [15]17

Obr. 2-4 Základní typy mikro-prutových struktur. a) BCC, b) BCCZ, c) FCC, d) FCCZ. [14] 18

Obr. 2-5 Základní procesní parametry. [18] 19

Obr. 2-6 Balling efekt a) nedostatečná energie, a) průvar vzniklý důsledkem větší energie. [20] 20

Obr. 2-7 a) odpařený materiál a rozstříknutá zrna prášku v podobě kouře ve stavební komoře SLM, b) detail pořízený vysokorychlostní kamerou. [9] 20

Obr. 2-8 Příklad grafu závislosti velikosti energie na porozitě. [17] 21

Obr. 2-9 Slitina AlSi10Mg. Vliv HD na vnitřní porozitu při konstantní LP a LS, a) HD = 0,07 mm; b) HD = 0,06 mm; c) HD = 0,05 mm. [21] 22

Obr. 2-10 Slitina AlSi10Mg. Vliv změny LS za konstantní LP na vnitřní porozitu. [22].. 22

Obr. 2-11 Vliv průměru prutů na porozitu. a) průměr 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm, d) 4 mm, e) 5 mm. [23] 22

Obr. 2-12 Rozdílný odvod tepla a) vertikálního prutu, b) skloněného prutu, c) použitá skenovací strategie. [24] 23

Obr. 2-13 Rozdílná porozita v a) vertikálním prutu, b) ve skloněném prutu s oblastmi A a B, c) srovnání porozity v oblastech A a B. [24] 24

Obr. 2-14 Schéma meander strategie. [25] 24

Obr. 2-15 Schéma contour strategie. a) metoda outside-in, b) metoda inside-out. [25] 25

Obr. 2-16 Velké nepravidelné póry na vrchní straně BCC prutu při působení E_l 0,18 J · mm^{-1}. [27] 25

Obr. 2-17 Schéma vlivu OL u contour strategie. a) změna skenovací rychlosti po šířce návaru, b) OL uprostřed prutu. [28] 26

Obr. 2-18 Drsnost povrchu způsobená schodišťovým efektem. δ – šířka vrstvy, Ra_t – střední aritmetická úchylka profilu, Rz_t – nejvyšší výška profilu. [29] 27

Obr. 2-19 Schématický diagram povrchové drsnosti spodní části prutů. a) nízká LS, b) vysoká LS. [29] 27

Obr. 2-20 Závislost drsnosti povrchu prutů na úhlu sklonu v horní části (vlevo) a spodní části (vpravo). [30] 28

Obr. 2-21 Gradientní mikro-prutové struktury, a) postupná změna průměru prutů [31], b) postupná změna rozměrů buňky [32]. 28

Obr. 2-22 Náhrada kyčelního kloubu s gradientní mikro-prutovou strukturou. [33] 29

Obr. 2-23 a) Struktura s jednotným průměrem prutů, b) struktura s proměnným průměrem prutů. [34] 29

Obr. 2-24 Deformační charakteristika gradientní struktury (modrá) a jednotné struktury (červená). [34] 29

Obr. 2-25 Kolaps gradientní mikro-prutové struktury po vrstvách. [34] 30

Obr. 4-1 Modely pro výrobu kontrolních vzorků. a) model K0,5; b) model K1; c) model K2; d) detail úhlu sklonu. 33

Obr. 4-2 Model G pro výrobu gradientních mikro-prutových struktur. 34

Obr. 4-3 Konečná podoba modelů pro výrobu kontrolních vzorků. a) K0,5; b) K1; c) K2. 34

Obr. 4-4 Konečná podoba modelů pro výrobu gradientních struktur. a) varianta M1, b) varianta M2. 35

Obr. 4-5 SLM 280HL. [36] 36

Obr. 4-6 Odpařování materiálu v podobě kouře ve stavební komoře. 37

Obr. 4-7 Postup zpracování vyrobených vzorků. 37

Obr. 4-8 Rovina metalurgického výbrusu 38

Obr. 4-9 Postup skriptu na vyhodnocení porozity 39

Obr. 4-10 ATOS Triple Scan III. [37] 39

Obr. 4-11 Měření geometrie kontrolních vzorků. a) CAD Comparison, b) Fitting Elements. 40

Obr. 4-12 CAD Comparison a Single Section u gradientní struktury. 40

Obr. 5-1 Graf relativních hustot kontrolních vzorků. 41

Obr. 5-2 Rozdělení gradientní struktury 42

Obr. 5-3 Grafy průběhů průměrné úchylky v rámci gradientních struktur. a) M1C2 a M1M2, b) M2C2 a M2M2. 44

Obr. 6-1 Grafy průběhů OL uprostřed prutů pro jednotlivé sady procesních parametrů. .. 45

Obr. 6-2 Graf Počtů drah laseru jednotlivých sad procesních parametrů. 46

Obr. 6-3 Schéma vzniku nové dráhy návaru v průběhu prutu gradientní struktury. 46

Obr. 6-4 Detaily M1C0,5. a) Ostré póry nepravidelného tvaru se částicemi neroztaveného prášku, b) vliv balling efektu. 48

Obr. 6-5 Detail M1C1. a) Prut s větším průměrem, který byl při stavbě níže, b) prut s menším průměrem, který byl při stavbě výše. 49

Obr. 6-6 Detail M2C1. a) Prut s větším průměrem, který byl při stavbě výše, b) prut s menším průměrem, který byl při stavbě níže. 49

Obr. 6-7 Detail M1C1. Vznik pórů v souvislosti s nízkým OL uprostřed prutu..... 49

Obr. 6-8 Detail M1C2. Póry vzniklé nedokonalým překryvem. 50

Obr. 6-9 Detail M1C2. Vznik pórů v důsledku extrémního překryvu drah. 51

Obr. 6-10 Detail M1C2. Vznik pórů vlivem odpařením materiálu ve spodní části prutu. . 51

Obr. 6-11 Detail M2C2. Různý charakter pórů při podobných podmínkách. a) póry způsobené OL uprostřed prutu, b) pór způsobený přílišnou akumulací energie..... 52

Obr. 6-12 Detail M1M0,5. a) Prut s větším průměrem, který byl při stavbě níže, b) prut s menším průměrem, který byl při stavbě výše. 52

Obr. 6-13 Detail M2M0,5. a) Prut s větším průměrem, který byl při stavbě výše, b) prut s menším průměrem, který byl při stavbě níže. 53

Obr. 6-14 Detail M1M1. Vznik pórů v důsledku odpařování materiálu. 53

Obr. 6-15 Detail M2M2. Zvýšená porozita v důsledku odpařování materiálu. 54

Obr. 6-16 Dráhy laseru meander strategie u malého průměru prutu. 55

Obr. 6-17 Detail M1M2. Prut zdeformovaný vlivem nevhodného charakteru drah návarů. 55

Obr. 6-18 Detail M2H2, porovnání velikosti nežádoucích oblastí na spodní straně prutů struktury. a) Nejširší pruty struktury, b) nejužší struktury. 56

Obr. 6-19 Porovnání nežádoucích oblastí ve spodní části prutu vzorků ve stejném místě gradientních struktur vyrobených pomocí různých strategií. a) M1C1, b) M2M2. 56

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Použité sady procesních parametrů. 32

Tab. 2 Vyrobené vzorky 36

Tab. 3 Relativní hustota gradientních struktur (%). 42

Tab. 4 Celková relativní hustota gradientních struktur (%). 42

Tab. 5 Průměrná úchylka průměru prutů vzorku od modelu určená pomocí nástroje CAD comparison (mm). 43

Tab. 6 Směrodatná odchylka úchylky průměru prutů vzorku od modelu (mm). 43

Tab. 7 Úchylka průměru prutů vzorku od modelu určená pomocí nástroje Fitting Elements (mm). 43

Tab. 8 Průměrná úchylka a směrodatná odchylka průměru prutů gradientních struktur (mm). 43

Tab. 9 Lineární energie E_l sad procesních parametrů. 47