



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

DRSNOST POVRCHU MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ SLM

SURFACE ROUGHNESS OF LATTICE STRUCTURES PRODUCED BY SLM TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Bóssi

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Jaroš

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Adam Bóssi**
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:

Drsnost povrchu mikro–prutových struktur vyrobených technologií SLM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zvýšená drsnost povrchu je jednou z hlavních imperfekcí vznikajících při výrobě kovových dílů pomocí 3D technologie aditivní výroby (SLM). V případě mikro–prutových struktur zvýšená drsnost povrchu významně omezuje jejich využití v praxi, a to zejména v případě hořčíkové slitiny WE43. Studium vlivu procesních parametrů na drsnost povrchu umožní identifikovat parametry, které drsnost povrchu nejvíce ovlivňují.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je objasnit vliv procesních parametrů na drsnost povrchu mikro–prutových struktur vyrobených 3D technologií aditivní výroby (SLM) z hořčíkové slitiny WE43.

Dílní cíle bakalářské práce:

- rešerše parametrů 3D technologie aditivní výroby kovových dílů ovlivňujících drsnost povrchu,
- 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:

MANAKARI, Vyasraj, Gururaj PARANDE a Manoj GUPTA. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloy Powders: A Review. Metals. 2017, 7(1), 35. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met7010002

TIAN, Yang, Dacian TOMUS, Paul ROMETSCH a Xinhua WU. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. Additive Manufacturing. 2017, 2017, 103-112. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2016.10.010

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

Selective laser melting (SLM) je aditívna technológia (AM), ktorá dovoľuje výrobu komplexnej geometrie, ktorú vieme nájsť aj v mikro-prútových štruktúrach. Spracovanie materiálov na báze horčíka je kvôli jeho vysokej reaktivite touto technológiou náročné. Táto bakalárska práca sa zaoberá objasnením vplyvu procesných parametrov (výkon laseru a skenovacia rýchlosť) na drsnosť povrchu prútových štruktúr. Teoretická časť práce sa zaoberá náhľadom do problematiky horčíkových zliatin a výroby prútových štruktúr. Praktická časť práce obsahuje návrh experimentu a jeho vyhodnotenie. Na základe vyhodnotenia experimentu boli zhotovené závislosti procesných parametrov na drsnosti povrchu a uhle sklonu prútov. Úžitok práce je v oboznámení čitateľa s problematikou procesných parametrov a ich vplyvom na drsnosti povrchu v mikro-prútových štruktúrach.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

mikro-prútová štruktúra, selective laser melting, aditívne technológie, WE43, procesné parametre, drsnosť povrchu

ABSTRACT

Selective laser melting (SLM) is an additive manufacturing technique (AM), that allows production of complex geometries that can be found in lattice structures. Processing of magnesium-based materials with this technology is difficult because of their high reactivity. This bachelor's thesis clarifies the effects of processing parameters (laser power and laser scan speed) on surface roughness of lattice structures. The theoretical part of this thesis deals with the issue of magnesium alloys and manufacturing of lattice structures. The practical part of this thesis contains the design of the experiment and evaluation of the given experiment. Based on the results of the experiment, the dependencies of process parameters were made on surface roughness and incline angle of struts. The main takeaway of this thesis for the reader is in familiarization with the issue of process parameters and their effect on surface roughness in lattice structures.

KEYWORDS

lattice structure, selective laser melting, additive technology, WE43, processing parameters, surface roughness

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BÓSSI, Adam. *Drsnost povrchu mikro-prutových struktur vyrobených technologií SLM*. Brno, 2023, 64 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Jaroš.

POĎAKOVANIE

Rád by som sa týmto poďakoval pánovi Ing. Janovi Jarošovi za cenné pripomienky a rady, ktoré mi boli nápomocné pri spracovaní tejto bakalárskej práce.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že bakalársku prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením pána Ing. Jana Jaroša. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	15
2.1	Horčik, horčikové zliatiny ich využitie a základná klasifikácia	15
2.2	Vplyv procesných parametrov na drsnosť povrchu	17
2.3	Vplyv procesných parametrov na prútové štruktúry	27
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	34
3.1	Analýza problému	34
3.2	Cieľ práce	36
4	MATERIÁL A METÓDY	37
4.1	Použitý materiál, technológie a zariadenia	37
4.1.1	Práškový materiál horčikovej zliatiny WE43	37
4.1.2	Technológia SLM	37
4.1.3	Zariadenie SLM 280HL	38
4.1.4	Digitálny mikroskop KEYENCE VHX-6000	39
4.1.5	3D skener ATOS Triple Scan III	40
4.2	Návrh experimentu	40
4.3	Metódy vyhodnocovania vzoriek	42
4.3.1	Vyhodnotenie drsnosti povrchu	42
4.3.2	Vyhodnotenie rozmerovej presnosti	44
5	VÝSLEDKY	45
5.1	Vyhodnotenie meraní drsnosti povrchu nepieskovaných vzoriek	45
5.2	Vyhodnotenie meraní drsnosti povrchu pieskovaných vzoriek	48
5.3	Vyhodnotenie rozmerovej presnosti nepieskovaných vzoriek	49
5.4	Vyhodnotenie rozmerovej presnosti pieskovaných vzoriek	51
6	DISKUSIA	54
7	ZÁVER	56
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	57
9	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	60

10	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	61
11	ZOZNAM TABULIEK	64

1 ÚVOD

Aditívne technológie (Additive manufacturing technology – AM) sú jednou z najnovších výrobných technológií využívaných v strojnom inžinierstve. Ide o proces, ktorý vychádza priamo z CAD dát. Do popredia sa dostávajú v posledných 30 rokoch a postupne sa začínajú využívať vo väčšine odvetviach priemyslu najmä v prípadoch kedy sa konvenčné metódy neoplatia alebo nedajú použiť z finančných, časových alebo technologických dôvodov. Všetky aditívne technológie fungujú na princípe nanášania jednotlivých tenkých vrstiev materiálov ako sú polyméry, kovy, keramika, kompozitné materiály a rôzne iné. [1,2]

Jednou z výhod aditívnych technológií je možnosť výroby súčastí, ktoré sú duté, vyplnené prútvou štruktúrou alebo dokonca samostatných prútvových štruktúr bez vonkajších stien, vďaka čomu sa dá výrazne znížiť hmotnosť súčastí, ovplyvniť ich správanie pri deformácii alebo zvýšiť plochu povrchu danej súčasti. Tieto vlastnosti sa dajú využiť v širokej škále priemyslov od tradičných ako je automobilový alebo letecký až po biomedicínsky priemysel pre výrobu kostných implantátov. [3]

Z rôznych metód aditívneho spracovania kovov sú najrozšírenejšie metódy Powder Bed Fusion (PBF), ktoré sú založené na selektívnom tavení alebo slinovaní tenkej vrstvy kovového prášku. Pod PBF metódy spadá aj metóda Selective Laser Melting (SLM), ktorá pomocou vysokovýkonných laserov taví kovový prášok. Metóda SLM využíva tradičné konštrukčné kovy ako sú hliník a jeho zliatiny, meď alebo nerezové ocele, ale aj menej tradičné konštrukčné kovy a ich zliatiny ako titán, horčík, niklové superzliatiny, vzácne kovy a mnohé iné. [4,5]

Kvalita vzniknutých súčastí je závislá na procesných parametroch, ktorých je mnoho, ale medzi procesné parametre s najväčším vplyvom patria skenovacia rýchlosť laseru (scan speed – LS), výkon laseru (laser power – LP), výška vrstvy, vzdialenosť dráh (hatch distance – HD) a skenovacej stratégie. Procesné parametre tradičných konštrukčných kovov a ich zliatin sú pomerne dobre preskúmané, ale procesné parametre pre horčík a jeho zliatiny sú preskúmané len okrajovo a výskum procesných parametrov pre prútvové štruktúry horčíkových zliatin je minimálny.

Horčíkové zliatiny sú jedným z najväčších kandidátov na biomedicínske využitie pre výrobu kostných implantátov kvôli jeho vysokej biokompatibilite. Horčík podporuje rast nového kostného tkaniva, je biodegradabilný, netoxický a zvyšný nepotrebný horčík ľudské telo vylúči pomocou moču. Horčík má taktiež modul pružnosti, ktorý je oveľa bližší k ľudskej kosti v porovnaní s používanými biokompatibilnými materiálmi ako sú nerezové ocele alebo titán, vďaka čomu oveľa lepšie prenáša mechanické zaťaženie z implantátu na kosť a tým takmer úplne odstraňuje potrebu viacerých operácií na výmenu implantátu. [6]

Táto práca sa zaoberá drsnosťou povrchu mikroprútových štruktúr horčíkovej zliatiny WE43. Horčíková zliatina WE43 je špecifická veľmi dobrou odolnosťou voči korózii, čo je dôležitá vlastnosť pri použití v ľudskom tele. Avšak práve vysoká drsnosť povrchu, túto vlastnosť výrazne zhoršuje, zhoršuje aj rozmerovú presnosť a taktiež zhoršuje mechanické vlastnosti. Preto je dôležité popísať vplyv procesných parametrov na drsnosť povrchu.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Prehľad súčasného stavu poznania sa zaoberá voľbou a vplyvom procesných parametrov na jednotlivé dráhy, tenké steny, objemové súčasti a prútové štruktúry. Vedecké články sa zaoberajú ako horčíkovými zliatinami, tak ostatným konštrukčnými materiálmi, keďže výskum tlače horčíkových zliatin je zatiaľ na začiatku oproti ostatným konštrukčným materiálom.

2.1 Horčík, horčíkové zliatiny ich využitie a základná klasifikácia

Z knihy od Drápala et al. [7] vieme, že horčík je najľahší netoxický konštrukčný kov. Ide o ôsmy najrozšírejší prvok v zemskej kôre, avšak nachádza sa len vo forme oxidov a chloridov čo znamená, že na jeho výrobu sa musia používať náročné technológie, ktoré výrazne zvyšujú jeho cenu. V technickej praxi sa čistý horčík vo väčšine prípadov používa ako legúra a len raritne ako konštrukčný materiál. Ako konštrukčný materiál sa nepoužíva najmä kvôli jeho nízkemu modulu pružnosti v ťahu (E), ktorý je pri 20 °C a čistote 99,98 % iba okolo 40 GPa, čo je pomerne typické pre kovy s hexagonálnou tesne usporiadanou (HCP) mriežkou a taktiež kvôli jeho vysokej reaktivite pri zvýšených teplotách. Tieto nepriaznivé vlastnosti sa však dajú výrazne zlepšiť pomocou legúr a vytvorením rôznych zliatin.

Podľa použitia horčíkovej zliatiny vyberáme vhodné legúry, ktoré zlepšujú konkrétne vlastnosti materiálu ako pevnosť, zlievateľnosť, odolnosť voči korózii, odolnosť voči creepu, zvýšenie Youngovho modulu pružnosti v ťahu, zvýšenie húževnatosti a pod. Avšak existujú 4 obmedzenia, na ktoré treba pri legovaní horčíku myslieť. Prvým obmedzením je fakt, že tak ako aj pri ostatných konštrukčných materiáloch, zlepšenie jednej vlastnosti môže zhoršiť vlastnosti iné. Druhým je rozpustnosť jedného prvku v druhom, ktorá sa riadi Hume-Rotheryho pravidlami, ktoré hovoria, že rozdiel atómového polomeru horčíku a legujúceho prvku musí byť menší ako 15 %. Tretí obmedzujúci faktor je nízka rozpustnosť monovalentných prvkov (prvky s jedným elektrónom vo valentnej vrstve ako vodík alebo chlór) v horčíku a posledným obmedzením je veľká chemická afinita horčíku, ktorá tvorí stabilné zlúčeniny ako napr. horčík-cín alebo horčík-kremík.

Základné vplyvy najpoužívanejších legovacích prvkov na horčík:

- **Hliník (Al)** – Ide o najčastejšie používanú legúru horčíku. Jeho maximum rozpustnosti je 12,7 hm. %. Hliník sa používa na zlepšenie zlievateľnosti, zvýšenie pevnosti a zlepšenie húževnatosti, pričom však výrazne zhoršuje odolnosť voči creepu.

- **Mangán (Mn)** – Spravidla sa nepoužíva samostatne, ale v dvojici s iným prvkom ako hliník. Mangán výrazne znižuje rozpustnosť železa, ktoré považujeme za škodlivú prímes, keďže znižuje odolnosť horčíkových zliatin proti korózii a zároveň vytvára zlúčeniny, ktoré zvyšujú medzu klzu a zvyšuje odolnosť proti korózii v slanej vode. Maximálny obsah mangánu je 1,2–2 hm. %.
- **Zinok (Zn)** – Jedna z najčastejšie používaných legúr, spravidla používaná spoločne s hliníkom. Ovplyvňuje veľkosť a tvar β fáze ($Mg_{17}Al_{12}$), ale tento jav výrazne závisí aj na obsahu hliníka. Spravidla však β fáza vytvorená za prítomnosti zinku zlepšuje pevnosť, ale zvyšuje tendenciu k tvoreniu pórov.
- **Kovy vzácnych zemín (KVZ)** – Zlepšujú vlastnosti horčíku za zvýšených teplôt, čo je jedna z najväčších slabín samotného horčíku a zvyšujú odolnosť voči creepu. Spravidla sú pridávané ako zmes Didymium (85 % Neodým a 15 % Prazeodým) alebo Mischmetal (približne 50 % Cér, 25 % Lantán, 15 % Neodým a zvyšok tvoria iné kovy vzácnych zemín a železo). Môžu sa používať aj iné zmesi vzácnych zemín, ak materiál spĺňa normované vlastnosti.
- **Ytrium (Y)** – Kov vzácnych zemín, ktorý sa označuje samostatne, aj keď sa spravidla používa v kombinácii s ostatnými KVZ. Zvyšuje pevnosť horčíku za zvýšených teplôt a zvyšuje creepovú odolnosť až do 300 °C.
- **Zirkónium (Zr)** – Výrazne zjemňuje zrná. Môže sa používať v zliatinách s väčšinou legúr (Y, KVZ, Zn, Th atď.), ale nesmie sa používať v zliatinách, ktoré obsahujú horčík, mangán alebo kremík, keďže s nimi tvorí stabilné zlúčeniny.

Horčíkové zliatiny sa najčastejšie klasifikujú na základe legujúcich prvkov. Najpoužívanejšia norma, aj v Európe a Ázii, je americká norma ASTM B951-11(2018). Táto norma zloženie zliatin udáva podľa dvoch hlavných legujúcich prvkov (tab. 2-1) a ich percentuálneho obsahu v zliatine [8]. Napríklad názov horčíkovej zliatiny rozoberanej v tejto bakalárskej práci WE43 nám hovorí, že dve hlavné legúry sú ytrium s obsahom približne 4 % a kovy vzácnych zemín s obsahom približne 3 % a podľa toho, aký majú legúry vplyv na horčík vieme približne povedať, že ide o vysokopevnostnú zliatinu s dobrou odolnosťou proti creepu, ktorá môže byť používaná pri vyšších teplotách ako väčšina horčíkových zliatin.

Tab. 2-1 Označenie legujúcich prvkov v horčíkových zliatinách na základe normy ASTM B951-11(2018) [8]

Legujúci prvok	Označujúce písmeno
Hliník (Al)	A
Meď (Cu)	C
Kovy vzácnych zemín (KVZ)	E
Tórium (Th)	H
Zirkónium (Zr)	K
Lítium (Li)	L
Mangán (Mn)	M
Striebro (Ag)	Q
Kremík (Si)	S
Ytrium (Y)	W
Zinok (Zn)	Z
Vápnik (Ca)	X
Gadolínium (Gd)	V
Cín (Sn)	T
Stroncium (Sr)	J

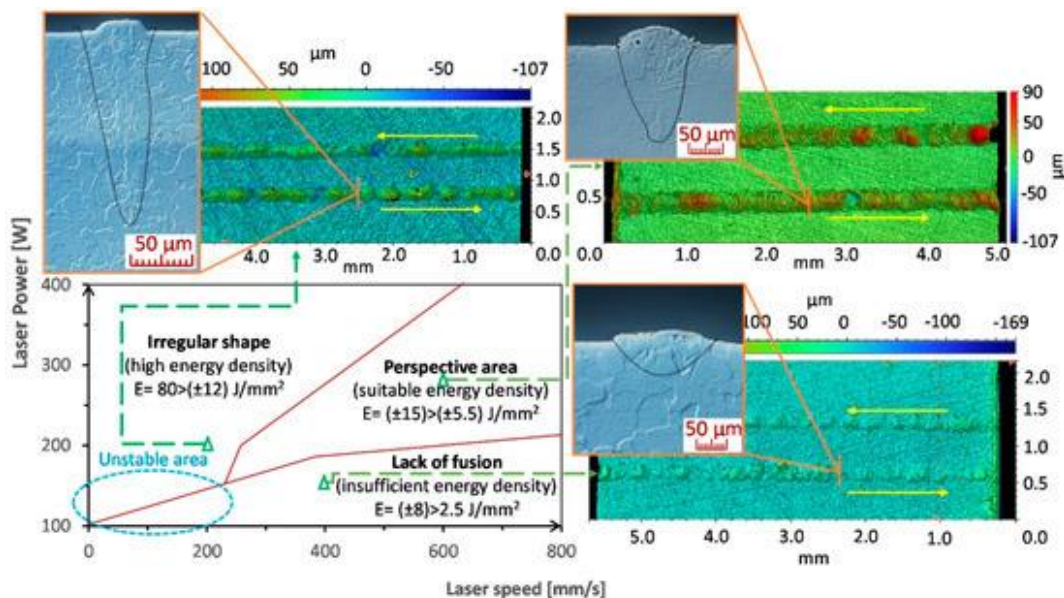
Ďalej sa horčíkové zliatiny označujú podľa rôznych parametrov ako technológia výroby, tepelné spracovanie a rôzne iné upresnenia, pričom tieto značky sa uvádzajú za primárnym názvom zliatiny podľa zloženia.

2.2 Vplyv procesných parametrov na drsnosť povrchu

Suchy et al. [9] skúmali kombináciu výkonu laseru (LP) a skenovacej rýchlosti (LS), ktorá viedla k stabilnému taveniu prášku horčíkovej zliatiny WE43. Testy boli vykonané v smere a proti smeru prúdenia inertnej atmosféry so skenovacou rýchlosťou od 100 do 800 mm/s a výkonom od 100 do 400 W s krokom 50 mm/s a 25 W.

Autori práce výsledky experimentu jednotlivých návarov rozdelili do troch kategórií (obr. 2-1) na základe plošnej energie:

- Prvá kategória ($2,5\text{--}8\text{ J/mm}^2$) boli návary s nedostatkom energie. Tieto návary preukázali iba čiastočné tavenie v dráhe laseru a nedostatočné privarenie k základnej horčíkovej doske. Tavenina sa kvôli vysokému povrchovému napätiu rozdeľovala. Veľká časť návarov taktiež vykazovala známky lokálneho guľôčkovania, ktoré nastáva pri malom výkone laseru, veľkej skenovacej rýchlosti alebo kombinácii týchto dvoch parametrov. Výsledkom bola nespojitá dráha s nedostatočnou hĺbkou prievaru.
- Druhá kategória ($13\text{--}80\text{ J/mm}^2$) boli návary s priveľkým prísunom energie. Tieto návary mali širokú, hlbokú a nestabilnú stopu a počas tlače nastávalo horenie materiálu, ktoré produkovalo hustý tmavý dym, ktorý rozostreje laser. Toto rozostrenie spôsobilo vyššie spomenutú nestabilitu stopy a následné rozdeľovanie taveniny, kvôli vysokému povrchovému napätiu. Horenie materiálu taktiež spôsobuje zvýšenú porozitu vzoriek.
- Tretia kategória ($7\text{--}13\text{ J/mm}^2$) obsahovala návary, ktoré boli vizuálne spojité a so stabilným tvarom, pričom rozmery daných návarov boli výrazne konzistentnejšie ako v predošlých dvoch kategóriách.

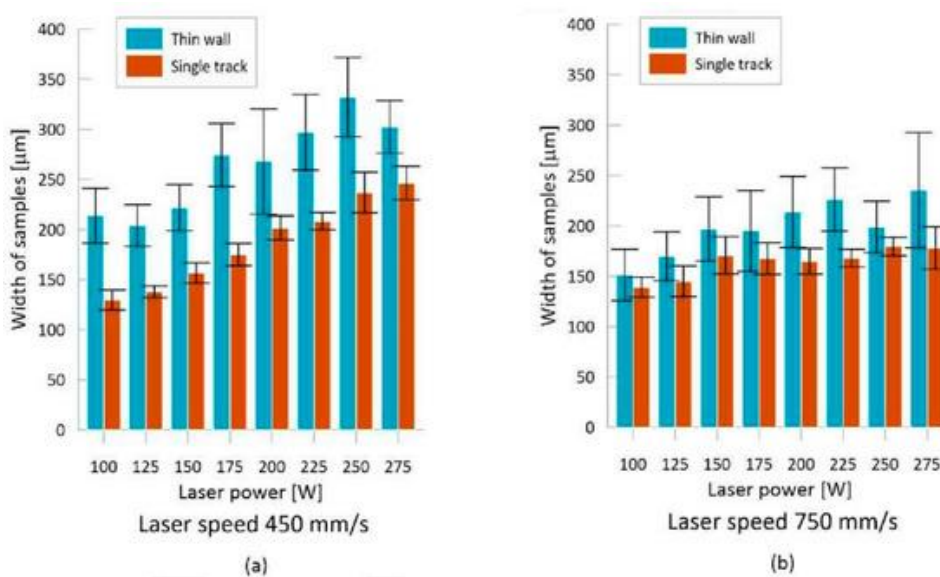


Obr. 2-1 Tri rôzne kategórie výsledkov a grafická závislosť LS-LP [9]

Nízka energia vedie k nespojitému návaru s nedostatočnou penetráciou, čo zhoršuje drsnosť povrchu a mechanické vlastnosti. Na druhej strane priveľké množstvo energie vedie k veľkej nestabilite návaru a k prepaľovaniu dráhy, čo taktiež výrazne negatívne ovplyvňuje drsnosť povrchu a mechanické vlastnosti.

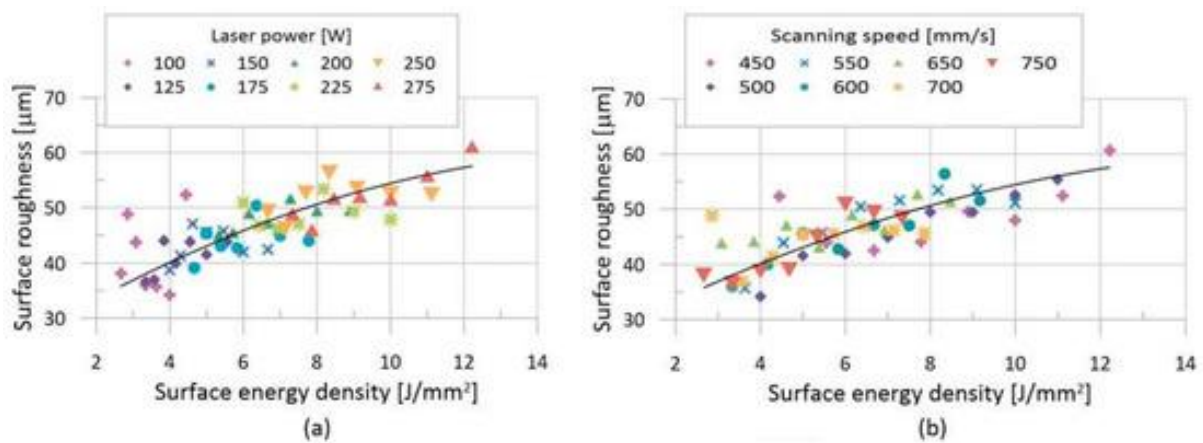
Suchy et al. [9] v danej práci taktiež skúmali drsnosť povrchu tenkých stien a rozdiel šírky steny oproti šírke návarku. Pri tavení jednej vrstvy, ktorá sa priamo dotýka horčíkovej základne je odvádzanie tepla od taveniny výrazne efektívnejšie, a preto vzniká tenšia dráha taveniny a tenší výsledný návar (veľký teplotný gradient), zatiaľ čo s nárastom výšky steny teplotný gradient výrazne klesá, a preto sa zväčšuje šírka taveniny a následne aj šírka zvaru (obr. 2-2). Na tento efekt mal najdominantnejší vplyv výkon laseru (LP), pričom priemerný nárast šírky steny v porovnaní so šírkou návarkov bol 18 % a maximálny až 30 %.

Týmto experimentom sa taktiež dalo posúdiť minimálne množstvo dodanej plošnej energie nutné na vytvorenie kvalitného zvaru medzi jednotlivými vrstvami. Nedostatočné zvarenie nastalo vo väčšine vzoriek pod hodnotou $4,5 \text{ J/mm}^2$. Pri takmer všetkých vzorkách nad $4,5 \text{ J/mm}^2$ bol zvar bez defektov vytvorených kvôli nedostatočnému nataveniu vrstiev s výnimkou dvoch sérii meraní s $LS = 700 \text{ mm}$ a $LS = 750$, pri ktorých sa dané defekty vytratili pri plošnej energii 6 J/mm^2 . Tento test poukázal na fakt, že kvalitné zvary bez defektov sa dajú vytvoriť aj pri kombináciách LS s LP , ktoré nedosiahli dostatočnú energetickú hustotu pri testovaní jednotlivých dráh.



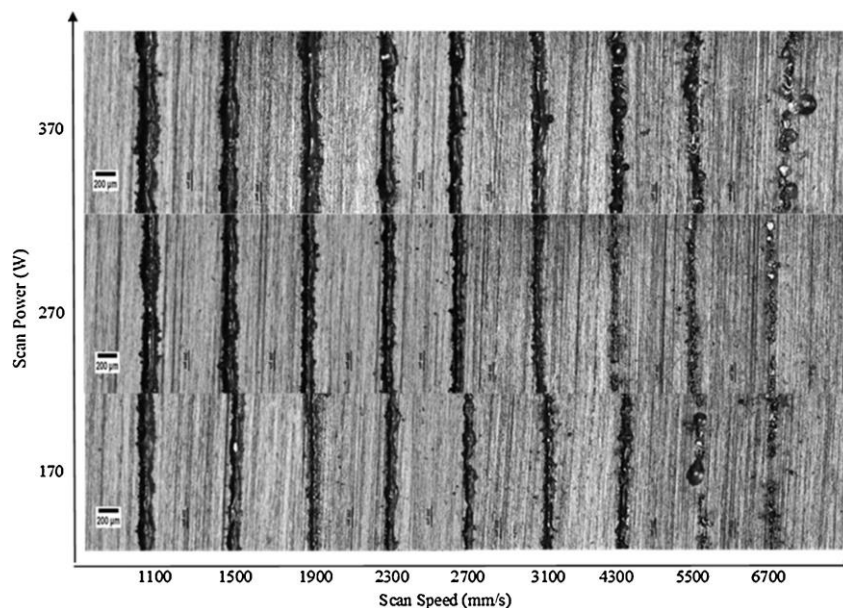
Obr. 2-2 Grafická vizualizácia rozdielu šírky tenkých stien voči návarkom pri rôznych procesných parametroch: (a) $LS = 450 \text{ mm/s}$; (b) $LS = 750 \text{ mm/s}$ [9]

Drsnosť povrchu tenkých stien bola výrazne ovplyvnená veľkým množstvom čiastočne privarených, ale neroztavených častíc na povrchu vzoriek a guľôčkovacím efektom. Z experimentu vychádza jednoznačná závislosť medzi rastúcou plošnou energiou, ktorá bola dodaná vzorka a rastúcou výslednou drsnosťou povrchu. Zmena hodnôt LS vytvára jemnejšiu zmenu drsnosti povrchu ako zmena hodnôt LP (obr. 2-3). Guľôčkovací efekt bol výrazný pri nižších hodnotách plošnej energie (2 až 4 J/mm²), kvôli nízkej zmáčanlivosti taveniny. S rastúcou energiou sa znížilo povrchové napätie, a preto sa zlepšila kontinuita taveniny, čo výrazne obmedzilo tvorenie guľôčok na povrchu. S rastúcimi hodnotami plošnej energie sa taktiež k povrchu privarilo väčšie množstvo prášku, čo taktiež výrazne znižovalo kvalitu výsledného povrchu.



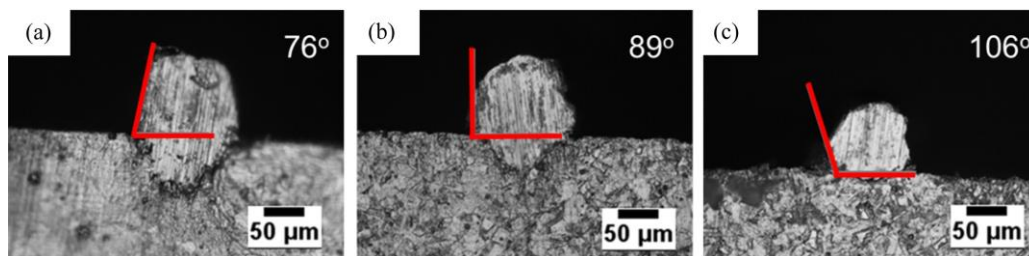
Obr. 2-3 Aritmetická deviácia drsnosti povrchu v závislosti na plošnej energii: (a) Delené LP; (b) Delené LS. [9]

Tian et al. [10] skúmali vplyv skenovacej rýchlosti a výkonu laseru na jednotlivé dráhy na niklovej superzliatine Hastelloy X, pričom priemer laserového lúču bol pri všetkých experimentoch 100 μm , s hrúbkou vrstvy 40 μm . Z experimentu na jednotlivých dráhach autori získali okno použiteľných procesných parametrov, v ktorom podobne ako Suchy et al. [9] vytýčili oblasti s nedostatkom, priveľkým a dostatočným množstvom energie. Autori však výrazne lepšie popísali guľôčkový efekt a nestabilitu dráhy, ktoré zásadne ovplyvňujú výslednú drsnosť povrchu a rozmerovú presnosť súčasti.



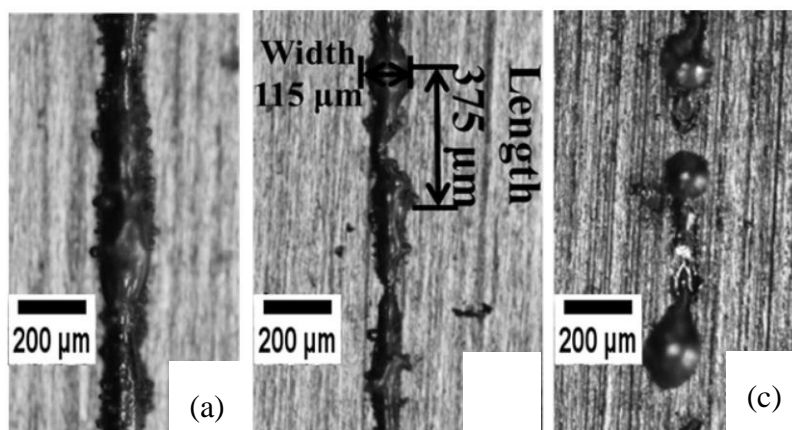
Obr. 2-4 Pohľad zhora na jednotlivé dráhy s LP = 170–370 W a LS = 1100–6700 mm/s [10]

Gul'ôčkovanie je spôsobené vysokým povrchovým napätím taveniny, pričom s vyššou teplotou povrchové napätie klesá a tavenina má výrazne menšiu tendenciu tvoriť nekonzistentné dráhy a gul'ôčky. Ako je vidieť na obrázku 2-4, práve pri vyšších rýchlostiach sa do taveniny nedostane dostatok tepelnej energie, a preto tvorí nekonzistentné dráhy alebo dráhy, ktoré sa kompletne rozpadajú a tvoria gul'ôčky, aby zmenšili svoj povrch, a tým pádom aj svoje povrchové napätie. Toto je vidieť na obrázku 2-5, kde zmáčací uhol je výrazne väčší pri vyšších rýchlostiach, čo znova dokazuje, že sa tavenina snaží zmenšiť svoj povrch.



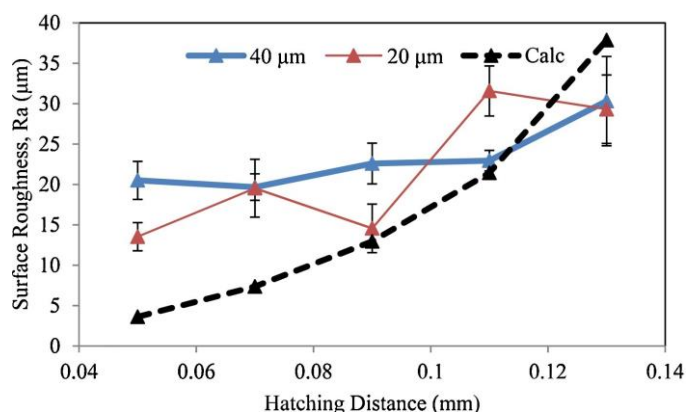
Obr. 2-5 Prierez jednotlivých dráh a ich uhly zmáčania pri konštantnom výkone laseru 170 W a meniacej sa skenovacej rýchlosti: (a) Veľmi dobrá zmáčavosť, LS = 1900 mm/s, (b) Zhoršená zmáčavosť, LS = 3100 mm/s, (c) Zlá zmáčavosť, LS = 4300 mm/s [10]

Autori taktiež uviedli podmienku z Rayleighovej nestability taveniny, ktorou sa dá určiť kedy nastane rozpad na gul'ôčky. Z analýzy vyšlo, že ak je pomer dĺžky roztavenej dráhy a šírky roztavenej dráhy väčší ako π , tak dochádza k nestabilite a následnému rozpadu na gul'ôčky. Ako je vidieť na obrázku 2-6, pri vyšších rýchlostiach je tavenina užšia, keďže do nej nebolo dodané dostatočné teplo, ale zároveň výrazne dlhšia, keďže nemala dostatok času na odovzdanie svojho tepla do okolitého prášku a základnej dosky. Toto spôsobí prekročenie kritickej hodnoty pomeru π a tým zneštábilnenie taveniny.



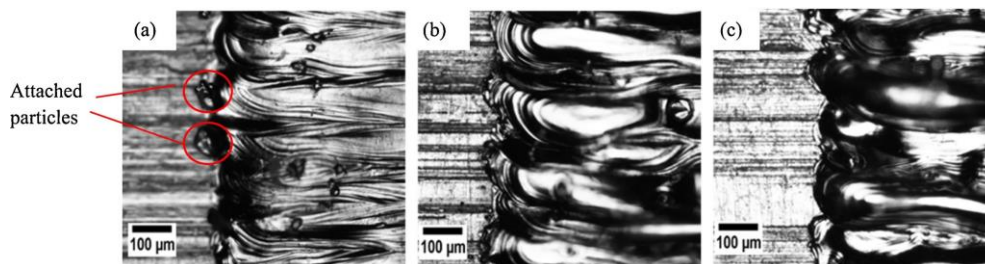
Obr. 2-6 Jednotlivé dráhy vyrobené pri výkone 170 W a rôznych skenovacích rýchlostiach: (a) Konzistentná, spojité dráha (1100 mm/s), (b) Nekonzistentná, rozpadajúca sa dráha (2700 mm/s), (c) Dráha rozpadnutá na guľôčky (5500 mm/s) [10]

Pri objemových súčiastiach autori skúmali vplyv vzdialenosti dráh (HD) a vplyv skenovacej stratégie na drsnosť povrchu. Pri testovaní vplyvu vzdialenosti dráh boli využité vzdialenosti od 0,05 do 0,13 mm s krokom 0,02 mm a s dvomi hrúbkami vrstvy 20 μm a 40 μm . Pri obidvoch hrúbkach vrstvy autori našli koreláciu medzi rastúcou vzdialenosťou dráh a rastúcou drsnosťou povrchu (obr. 2-7). Pri hrúbke vrstvy 40 μm stúpala drsnosť povrchu z 20 μm na 29 μm a pri hrúbke vrstvy 20 μm stúpala drsnosť výraznejšie, ale s väčšími odchýlkami z 13 μm na 30 μm . Toto sa dá vysvetliť pretavením zvýšených miest na jednotlivých dráhach a redistribúciou taveniny.



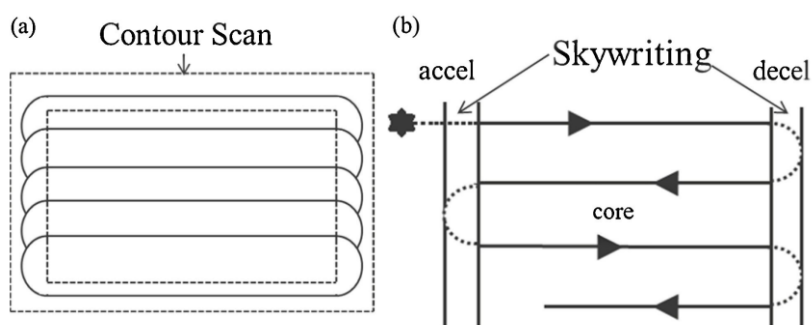
Obr. 2-7 Závislosť povrchovej drsnosti na vzdialenosti dráh [10]

Pri bližšej analýze povrchu bolo vidieť, že pri nižších vzdialenostiach dráh sa k tavenine pritavujú častice neroztaveného prášku, pričom pri vyšších vzdialenostiach sa ich množstvo znižuje, až vizuálne zmiznú pri vzdialenosti 0,13 mm (obr. 2-8). Tento jav sa dá vysvetliť extra energiou, ktorá je dodaná predošlej dráhe, kvôli veľkému presahu jednotlivých dráh. Tento presah dodá predošlej dráhe, ktorá nemala dostatok času vychladnúť, dostatok energie, aby sa znova čiastočne roztavila a na túto taveninu sa prichytia neroztavené častice prášku. Autori taktiež poznamenali, že tenšie vrstvy vo všeobecnosti tvoria nižšie drsnosti povrchu, kvôli väčšiemu pomeru plochy prášku a objemu prášku, čo zabezpečuje rovnomernejšiu distribúciu energie a následné rovnomernejšie tavenie.



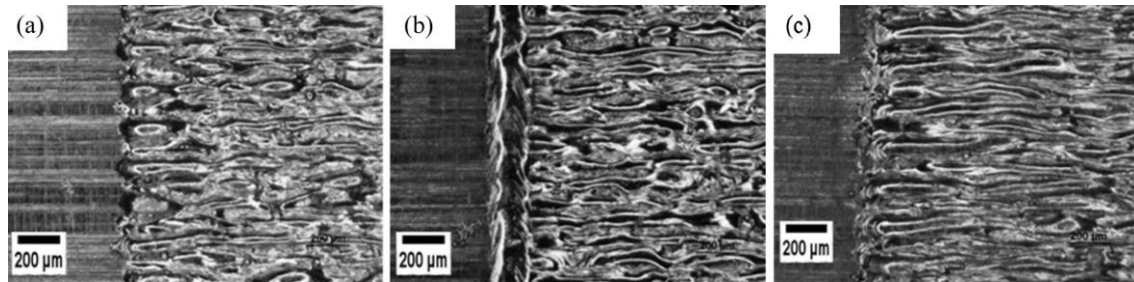
Obr. 2-8 Povrchová analýza viacvrstvových vzoriek s rozdielnymi dráhovými vzdialenostiam so zvýrazneným časticami neroztaveného prášku: (a) HD = 0,05 mm, (b) HD = 0,09 mm, (c) HD = 0,13 mm [10]

Ďalší procesný parameter a jeho vplyv na drsnosť povrchu, ktorý autori skúmali pri objemových súčastiach bola skenovacia stratégia. Autori skúmali dve skenovacie stratégie, a to contour a skywriting skenovacie stratégie (obr. 2-9). Contour skenovacia stratégia je špecifická tým, že skenuje vonkajší obvod samostatne, a tým výrazne obmedzuje nerovnosti na povrchu. Skywriting skenovacia stratégia sa snaží obmedziť nekonzistentné dodávanie energie na okrajoch vonkajšieho obvodu tlačenej súčasti, spôsobené zrýchľovaním a spomaľovaním laserovej hlavy, ktoré má nepriaznivé účinky na drsnosť povrchu. Docieli to zrýchľovaním a spomaľovaním hlavy laseru mimo súčast', pričom laser sa zapne resp. vypne v momente, keď už je laser nad súčast'ou resp. mimo súčast'.



Obr. 2-9 Schematické diagramy skenovacích stratégií: (a) Contour skenovacia stratégia, (b) Skywriting skenovacia stratégia [10]

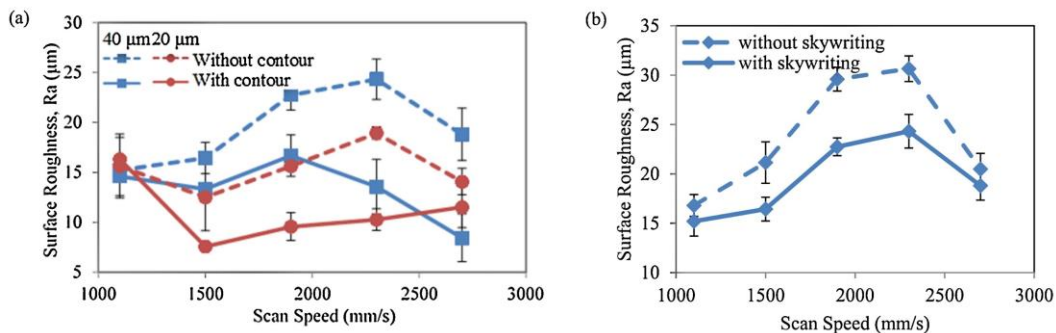
Autori našli výrazné zlepšenie drsnosti povrchu pri obidvoch skenovacích stratégiách (obr. 2-10), ale contour skenovacia stratégia mala drsnosť povrchu výrazne nižšiu ako skywriting skenovacia stratégia.



Obr. 2-10 Pohľad zhora na vzorky vyrobené pri LS = 2700 mm/s, LP = 300 W a HD = 0,09 mm: (a) Bez použitia contour alebo skywriting skenovacej stratégie, (b) Contour skenovacia stratégia, (c) Skywriting skenovacia stratégia [10]

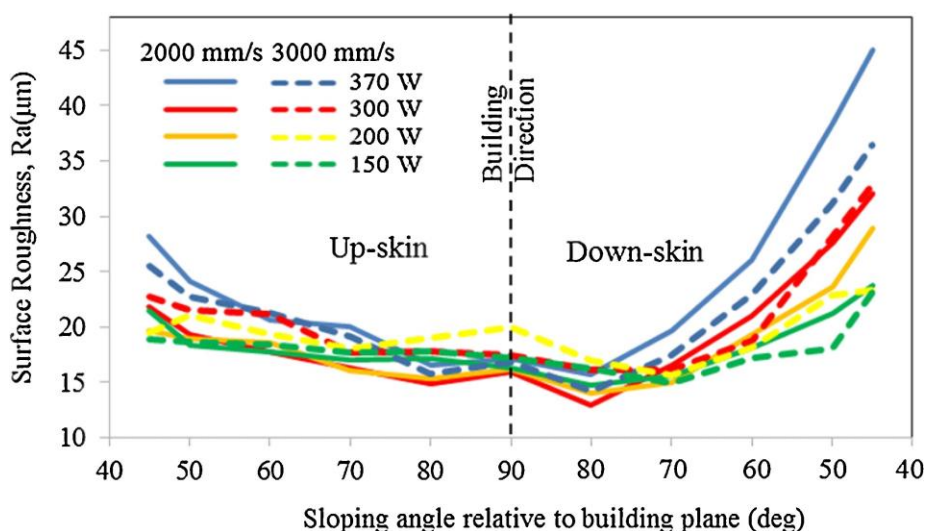
Contour skenovacia stratégia mala najnižšie hodnoty drsnosti povrchu 7 µm pri hrúbke vrstvy 20 µm a skenovacej rýchlosti 1500 mm/s a 9 µm pri hrúbke vrstvy 40 µm a skenovacej rýchlosti 2700 mm/s.

Skywriting skenovacia stratégia mala najnižšiu drsnosť povrchu 15 µm pri hrúbke vrstvy 40 µm a skenovacej rýchlosti 1100 mm/s, avšak najväčšie zlepšenie zaznamenala pri skenovacej rýchlosti 1900 mm/s, a to až 7 µm z drsnosti povrchu 29 µm na drsnosť povrchu 22 µm.

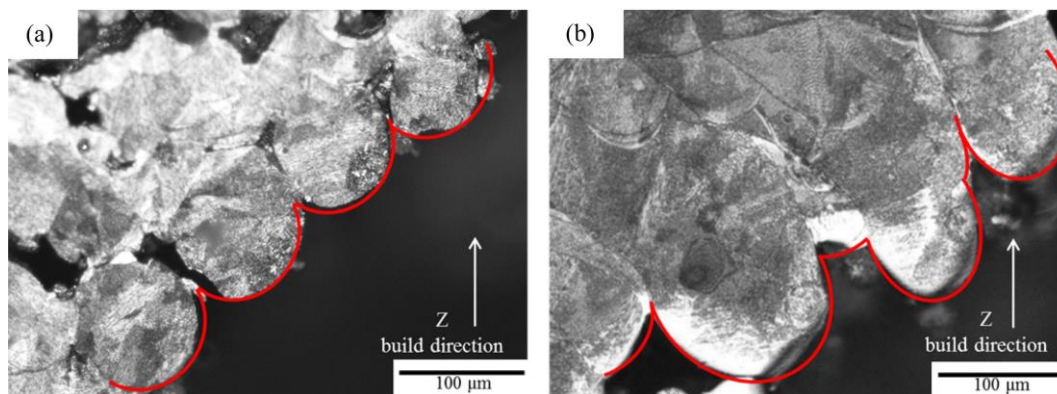


Obr. 2-11 Grafická závislosť : (a) Bez použitia contour alebo skywriting skenovacej stratégie, (b) Contour skenovacia stratégia, (c) Skywriting skenovacia stratégia [10]

Ako posledné autori skúmali drsnosti povrchu sklonených plôch pod rôznymi uhlami od 45° až 90°, s rôznymi skenovacími rýchlosťami od 2000 do 3000 mm/s a s rôznymi výkonmi od 150 až 370 W. Ako je vidieť na obrázku 2-12 s menším uhlom sa jednoznačne zvyšuje drsnosť ako vrchných, tak spodných plôch pre všetky kombinácie procesných parametrov. Najlepšie drsnosti boli na vzorkách pozorované pri priamych prútoch alebo 80° sklone, pričom najhoršie drsnosti boli v oboch prípadoch pozorované pri 45° sklone. Vrchný povrch nebol veľmi citlivý na zmeny uhlov, avšak spodný povrch prejavil vysokú citlivosť na zmenu uhlu plochy. Toto sa dá vysvetliť rozdielnym spôsobom odvádzania tepla pre vrchné a spodné plochy. Zatiaľ čo vrchná plocha odvádza väčšinu svojho tepla do už existujúcej pevnej súčasti, spodný povrch odvádza veľkú časť svojho tepla do prášku pod ním, čo spôsobuje výrazne pomalšie chladnutie a zväčšenú šancu na natavenie častíc kovového prášku k súčasti. Tento jav je jednoznačne vidieť na obrázku 2-13. V jednej vzorke bolo dodané menšie množstvo energie a tavenina, tak zatuhla rýchlejšie a má tvar v reze bližší očakávanému tvaru kruhu, zatiaľ čo druhej vzorke bolo dodané veľké množstvo energie, čo natoľko spomalilo tuhnutie, že tavenina v reze nadobúdala predĺžený tvar blízky elipse, čo výrazne zhoršilo drsnosť povrchu. Autori taktiež poznamenali, že zvyšovanie skenovacej rýchlosti znižuje drsnosť povrchu, zatiaľ čo zvyšovanie výkonu laseru má opačný efekt.

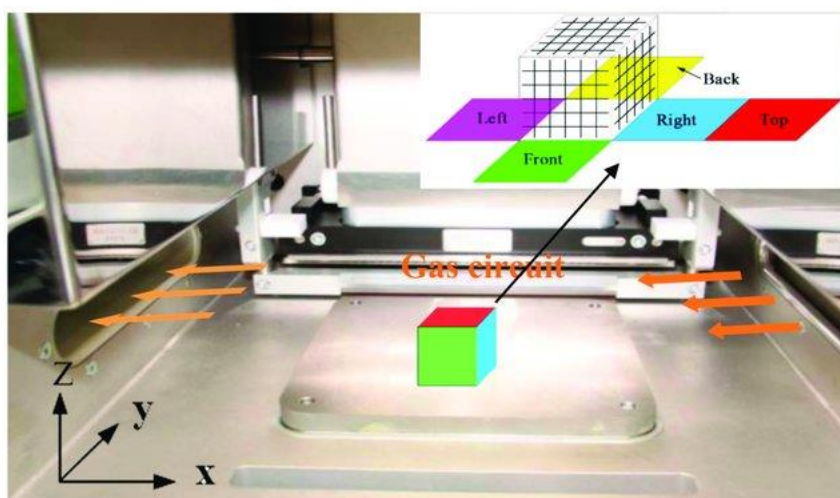


Obr. 2-12 Grafická závislosť uhlu sklonených vzoriek na drsnosti povrchu pri rôznych kombináciách parametrov [10]

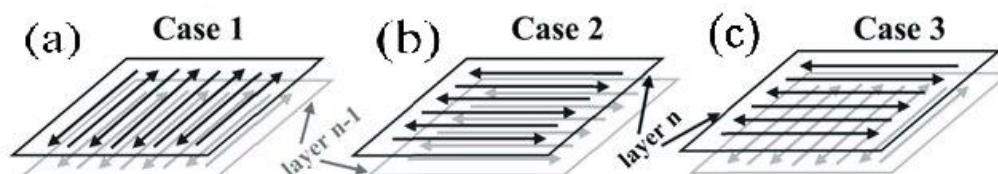


Obr. 2-13 Rez spodnej plochy objemových vzoriek vyrobených pod uhlom sklonu 45° pri dvoch rôznych kombináciách procesných parametrov: (a) LS = 3000 mm/s a LP = 200 W, (b) LS = 1900 mm/s a LP = 370 W [10]

Li et al. [11] skúmali vplyv prúdenia atmosféry a miesta začiatku procesu tavenia na drsnosť povrchu na kockách o veľkosti 10 × 10 × 10 mm uložených vo výrobnjej komore podľa obrázku 2-14, na ktorom je vyznačený aj smer prúdenia atmosféry. Kocky boli vyrobené z hliníkovej zliatiny AlSi10Mg pri argónovej atmosfére s obsahom kyslíka pod 0,2 %. Po získaní optimálnych procesných parametrov, pri ktorých autori získali najnižšie drsnosti povrchu boli vytvorené tri situácie s rôznymi smermi laseru (obr. 2-15).

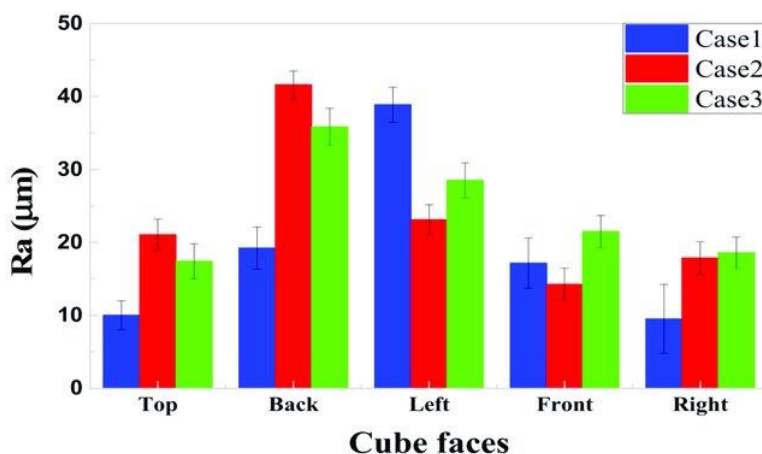


Obr. 2-14 Orientácia kocky vo výrobnjej komore a zvýraznenie smeru prúdenia atmosféry [11]



Obr. 2-15 Tri rôzne situácie s rôznymi smermi laseru: (a) Prvá situácia, tavenie začalo na ľavej strane kocky, (b) Druhá situácia, tavenie začalo na zadnej strane kocky, (c) Tretia situácia je kombinácia prvej a druhej situácie, ktoré sa navzájom striedajú [11]

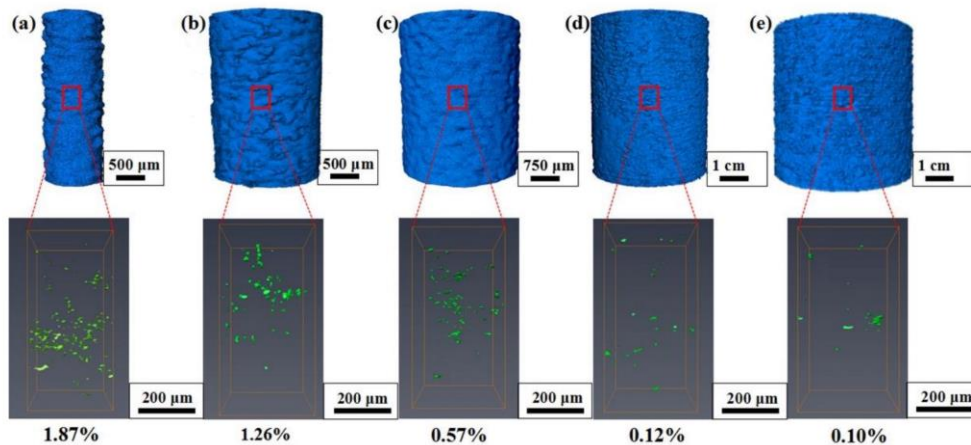
Pri prvej a druhej situácii vyšla najväčšia drsnosť na ľavej strane kocky, resp. na zadnej strane kocky (obr. 2-16). Toto je spôsobené horším odvodom tepla, keďže v okolí je veľa kovového prášku, ktorý pôsobí ako izolant, a ktorý sa taktiež k tavenine v takomto prípade pritavuje vo väčších množstvách. V momente, keď sa dostane laser na pravú stranu kocky, resp. na zadnú, tak je v okolí dráhy väčšie množstvo solídneho kovu a menšie množstvo prášku, čo spôsobí lepší odvod tepla, a tým pádom lepšiu drsnosť povrchu. V tretej situácii, kde sa prvá a druhá situácia striedajú, má ľavá a zadná strana väčšiu drsnosť povrchu, čo potvrdzuje predošlé vysvetlenie. V druhej situácii je však vidieť na obrázku 2-16, že ľavá strana má vyššiu drsnosť povrchu oproti pravej, ktorá nie je vysvetlená horším odvodom tepla. Toto zhoršenie drsnosti povrchu je spôsobené prúdením atmosféry. Pri tavení dochádza k rozstrekú taveniny pôsobením laseru, ktorá je prúdiacou inertnou atmosférou nesená do dráhy laseru, čo spôsobí rozostrenie laseru a neúplné tavenie prášku, ktoré zhorší drsnosť povrchu pri pohybe laseru v smere prúdenia atmosféry. Okrem toho táto tavenina neskôr padá naspäť na výrobnú podložku ešte v tekutej forme a môže sa prichytiť o ľavú stranu kocky, čo ešte viac zhoršuje drsnosť povrchu.



Obr. 2-16 Drsnosti povrchu pri troch situáciách s rôznymi smermi laseru na rôznych stranách kocky [11]

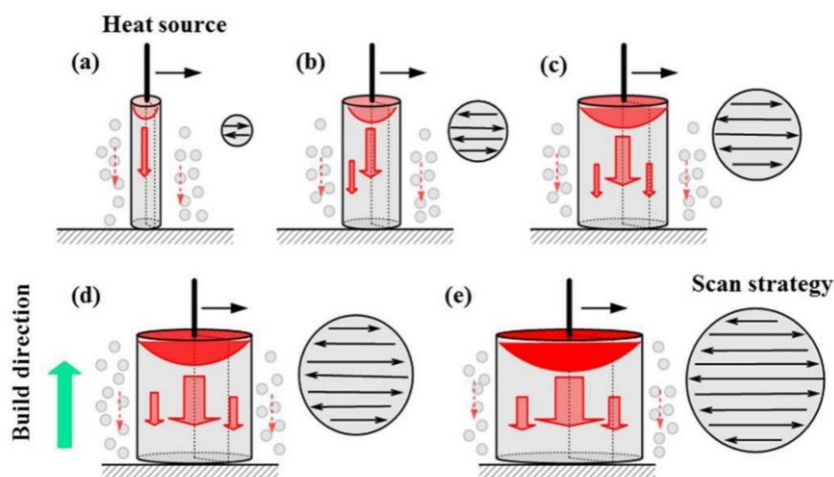
2.3 Vplyv procesných parametrov na prúťové štruktúry

Dong et al. [12] skúmali vplyv odvodu tepla na porozitu a rozmerovú presnosť prútov, ktoré priamo súvisia s drsnosťou povrchu. Priame prúty boli vyrobené z hliníkovej zliatiny AlSi10Mg s priermi od 1 do 5 mm.



Obr. 2-17 μ CT analýza porozity prútových štruktúr s rôznymi priermi: (a) $d = 1$ mm, (b) $d = 2$ mm, (c) $d = 3$ mm, (d) $d = 4$ mm, (e) $d = 5$ mm [12]

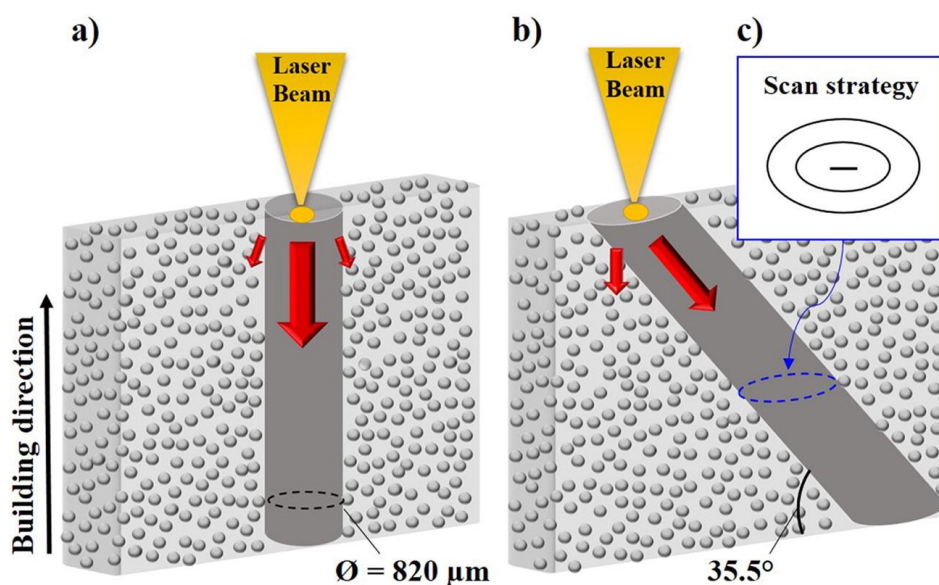
Z analýzy μ CT autori zistili, že pri tenších prútoch bola porozita výrazne väčšia ako pri hrubších prútoch a taktiež, že drsnosť povrchu bola výrazne väčšia ako pri prútoch hrubších (obr. 2-17). Najväčšia porozita sa objavila pri najtenšom prúte s priemerom 1 mm, a to 1,87 %, pričom najnižšiu porozitu mal prút s priemerom 5 mm a to 0,1 %. Táto porozita vzniká kvôli nedostatku a nerovnomernosti dodanej energie prútom, čo negatívne ovplyvňuje aj drsnosť povrchu a rozmerovú presnosť. Ako je vidieť na schematickom obrázku 2-18, tepelne ovplyvnená časť tenkých prútov je pomerne malá a energia, ktorá by pomohla pretaviť už existujúce plné časti prútov a znížiť tak porozitu uniká cez kovový prášok kvôli veľkej ploche prútu v porovnaní s jeho objemom. Pri väčších prútoch je množstvo dodanej energie výrazne vyššie a konzistentnejšie, čo spôsobuje menšie tvorenie pórov v prúte a napomáha k pretaveniu už existujúcich častí prútov, a tým pádom k ďalšiemu zníženiu porozity.



Obr. 2-18 Schematické zobrazenie odvodu tepla, tepelne ovplyvnených zón a skenovacej stratégie pri rôznych prieroch prútov: (a) $d = 1$ mm, (b) $d = 2$ mm, (c) $d = 3$ mm, (d) $d = 4$ mm, (e) $d = 5$ mm [12]

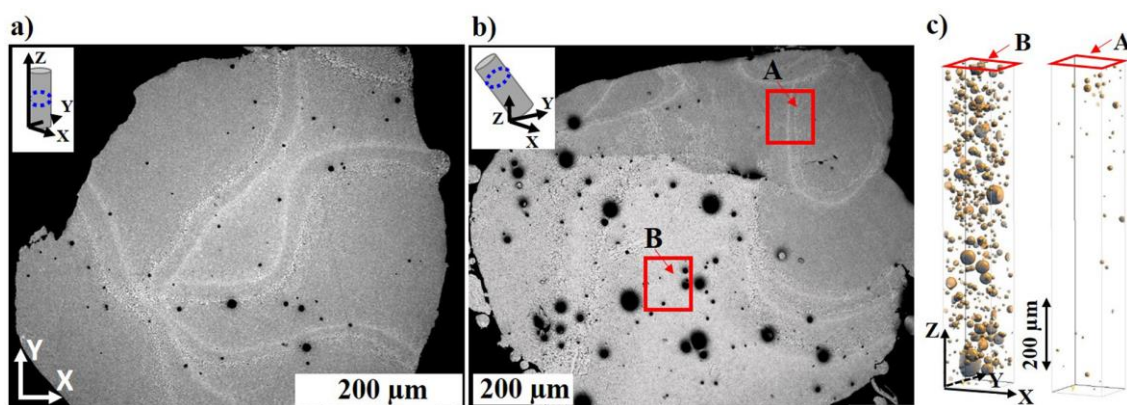
Autori taktiež poznamenali, že väčšie prúty, konkrétne s priermi 4 a 5 mm, mali oveľa lepšiu rozmerovú presnosť ako menšie, ktoré boli vo väčšine prípadov menšie ako navrhnuté CAD dáta. Zo všetkých týchto informácií sa dá povedať, že do priemeru 3 mm ide o prútové štruktúry, zatiaľ čo od 4 mm sa prúty dajú považovať za objemové súčasti, kvôli ich výrazne rozdielnemu správaniu.

Delroisse et al. [13] skúmali vplyv naklonenia prútov na mikroštruktúru spôsobenú rozdielnym odvodom tepla priamych a naklonených prútov, čo má aj priamy vplyv na drsnosť povrchu. Autori vyrábali prúty s priemerom $820\ \mu\text{m}$ z hliníkovej zliatiny AlSi10Mg. Autori vyrobili 2 rôzne skupiny prútov, a to vertikálne prúty a prúty naklonené pod uhlom $35,5^\circ$, ktorý približne zodpovedá uhlu naklonenia jedného z prútov v BCC mriežke.



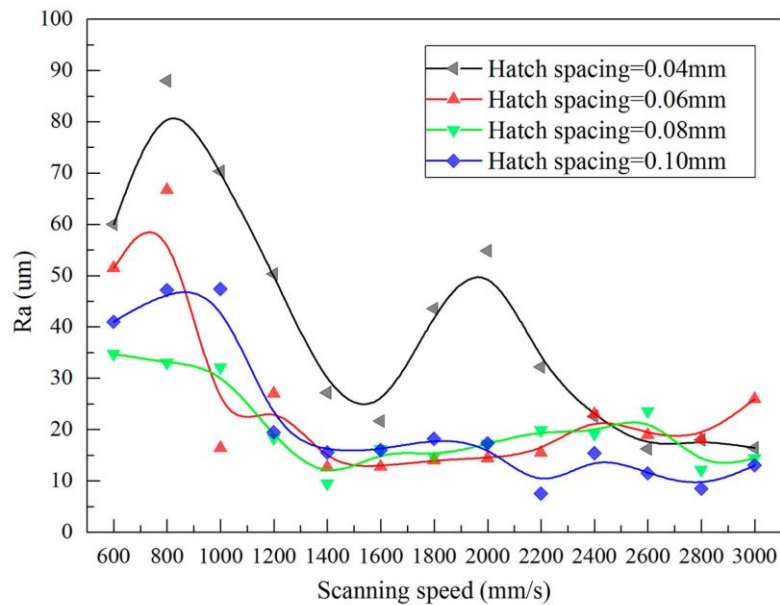
Obr. 2-19 Schematický nákres odvodu tepla prútov pod rôznymi uhlami sklonu: (a) Vertikálny prút (uhol sklonu 90°), (b) Prút s uhlom sklonu $35,5^\circ$, (c) Skenovacia stratégia použitá na výrobu prútov [13]

Ako je vidieť na schematickom obrázku 2-19 hypotéza autorov spočívala v rozdielnom odvode tepla pri prúte priamom, ktorý odvedie väčšinu svojho tepla cez už existujúce plné vrstvy a pri sklonenom prúte, ktorý odvedie výrazne väčšiu časť svojho tepla cez kovový prášok, ktorý však má výrazne nižšiu tepelnú vodivosť. Táto hypotéza sa im experimentálne podarila potvrdiť. Na obrázku 2-20 môžeme vidieť rezy dvoma rôznymi prútmi, jeden je vertikálny, zatiaľ čo druhý je sklonený prút pod uhlom $35,5^\circ$. Vo vertikálnom prúte (a) môžeme vidieť konzistentnú jemnú štruktúru s relatívne nízkou porozitou 0,4 %, zatiaľ čo pri sklonenom prúte (b) je vidieť jasnú hranicu medzi dvoma rozdielnymi mikroštruktúrnymi zónami s výrazne rozdielnymi porozitami. V zóne A bol odvod tepla podobný ako vo vertikálnom prúte, čo znamená, že väčšina tepla bola odvedená cez existujúce plné časti prútu, čo spôsobilo jemnú mikroštruktúru s nízkou porozitou 0,1 %. V zóne B môžeme však vidieť výrazný nárast porozity na 3,7 % a výrazne hrubšiu mikroštruktúru. Toto je spôsobené odvodom tepla cez kovový prášok, ktorý má výrazne nižšiu tepelnú vodivosť, a tak chladnutie taveniny trvá oveľa dlhšie, čo vysvetľuje hrubšiu mikroštruktúru a taktiež zvýšenú porozitu, kvôli odparovaniu vodíku, ktorý kontaminuje kovový prášok. Autori pre kontrolu vykonali tento experiment s tenšími prútmi s priemerom $600 \mu\text{m}$ a získali výsledky, ktoré korelovali s výsledkami pri hrubších prútoch. Ak sa pozrieme na výsledky od Tian et al. [10], ktoré sme spomenuli vyššie, tak aj pri objemových aj prútových štruktúrach má sklonenie vyrábanej súčasti podobný efekt na porozitu, drsnosť povrchu a mikroštruktúru.



Obr. 2-20 Porovnanie mikroštruktúry a porozity v reze pre prúty s rôznymi uhlami sklonu: (a) Vertikálny prút (uhol sklonu 90°), (b) Prút s uhlom sklonu $35,5^\circ$, (c) Porovnanie porozity dvoch rôznych zón v prúte so sklonom $35,5^\circ$ [13]

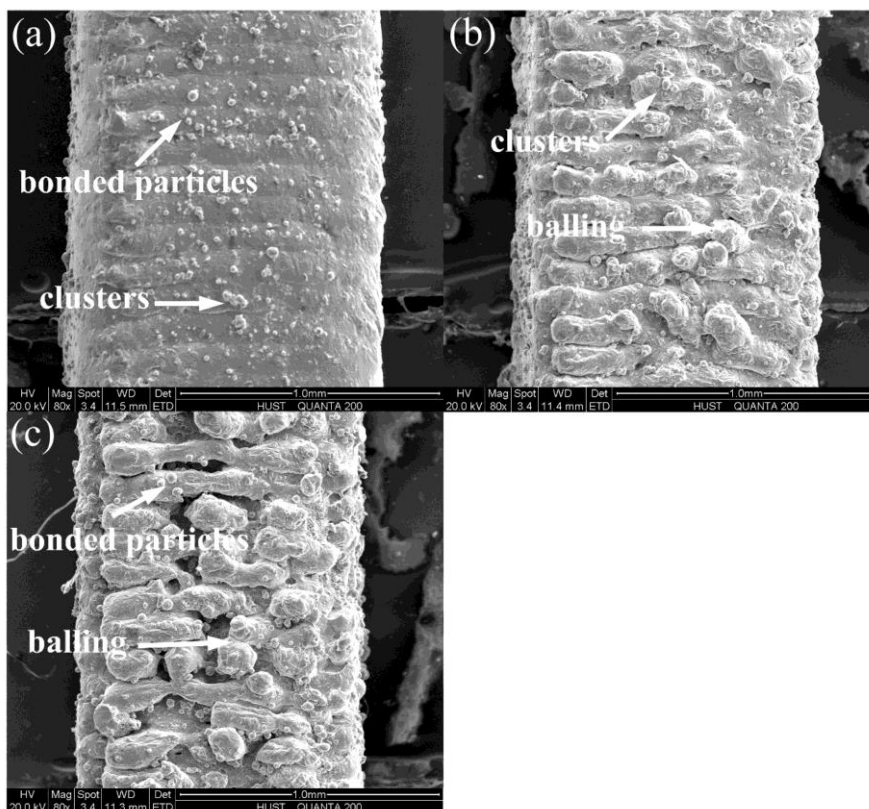
Han et al. [14] skúmali drsnosť povrchu a rozmerovú presnosť sklonených prútových štruktúr pod uhlom 45° vyrobených z hliníkovej zliatiny AlSi10Mg v argónovej atmosfére s výkonom laseru (LP) 200 W, skenovacou rýchlosťou (LS) od 600 až 3000 mm/s, hrúbkou vrstvy $20 \mu\text{m}$ a vzdialenosťou dráh (HD) od 0,04 až 0,10 mm.



Obr. 2-21 Priemerná drsnosť povrchu Ra spodnej plochy v závislosti na LS a HD [14]

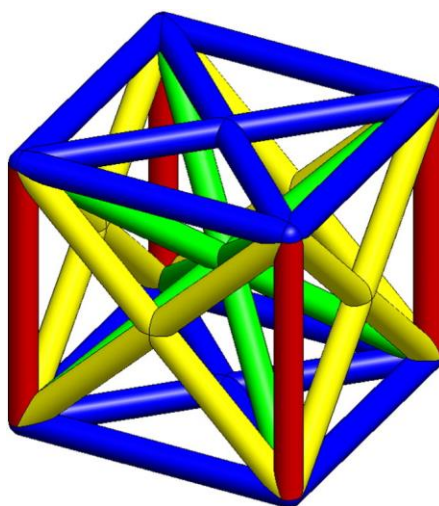
Pri meraní drsnosti povrchu autori použili dva druhy drsnosti povrchu, klasickú priemernú drsnosť povrchu R_a a teoretickú priemernú drsnosť povrchu R_{a_i} spôsobenú iba schodovým efektom na spodnej a vrchnej ploche prútu. Na obrázku 2-21 je vidieť priebeh priemernej drsnosti povrchu pri rôznych kombináciách procesných parametrov, pričom najnižšie priemerné drsnosti povrchu R_a sa pohybujú v okolí $10 \mu\text{m}$. Avšak priemernú teoretickú drsnosť povrchu R_{a_i} autori uviedli ako $3,536 \mu\text{m}$. Tento rozdiel znamená, že drsnosť povrchu spodnej a vrchnej plochy ovplyvňujú aj iné faktory ako len schodový efekt a dokonca schodový efekt ani nie je dominantný faktor drsnosti povrchu na vrchných a spodných plochách vzoriek, ako veľké množstvo literatúry uvádza. Pri bližšej analýze autori poznamenali, že najväčší vplyv na drsnosť povrchu spodnej a vrchnej plochy má takzvaný infiltračný efekt. Tento efekt popisuje vtekajúce tekutej taveniny do medzier medzi časticami kovového prášku a medzier vzniknutých schodovým efektom. Pri nízkych rýchlostiach dostala tavenina veľké množstvo energie, čo spôsobilo dobrú tekutosť a zmáčavosť, vďaka čomu sa tavenina dobre dostala medzi častice prášku a minimalizovala tak drsnosť povrchu. Pri zväčšovaní LS sa tekutosť a zmáčavosť taveniny zhoršujú, a tým pádom sa zhoršuje aj drsnosť povrchu, keďže tavenina nedokáže tak dobre vyplniť medzery vzniknuté schodovým efektom, taktiež nedokáže tak dobre obtiecť častice prášku a zainkorporovať ich do povrchu a taktiež začne kvôli zlej zmáčanlivosti tvoriť guľôčky (obr. 2-22).

Taktiež sa oplatí poznamenať, že závislosť drsnosti povrchu na vzdialenosti dráh je opačná ako pri výskume od Tian et al. [10], ktorí skúmali túto závislosť na objemových súčiastiach. Toto je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené rozdielnym správaním taveniny pri prútoch a objemových vzorkách.



Obr. 2-22 Porovnanie drsnosti povrchu sklonených prútov vyrobených s LP = 200 W a HD = 0,08 mm a rôznymi skenovacími rýchlosťami: (a) LS = 600 mm/s, (b) LS = 1800 mm/s, (c) LS = 3000 mm/s [14]

Leary et al. [15] skúmali drsnosť povrchu prútov vyrobených v rôznych kubických prútových bunkách. Vzorky boli vyrobené z hliníkovej zliatiny AlSi12Mg s výkonom laseru 350 W, skenovacou rýchlosťou 921,05 mm/s, vzdialenosťou dráh 0,19 mm a hrúbkou vrstvy 50 μm .



Obr. 2-23 Kubická bunka so štyrmi možnými orientáciami prútov: Modrá 0°; Zelená 35,26°; Žltá 45°; Červená 90° [15]

Obrázok 2-23 ukazuje jednotkovú bunku všetkých možných kubických prúťových štruktúr (BCC, FCC, BCCZ, FCCZ a FBCCZ) a farebne označuje uhly, pod ktorými môžu prúty v týchto kubických prúťových štruktúrach existovať, a to 0°; 35,26°; 45° a 90°. Jednotlivé prúty mali priemer 1 mm a dĺžka strany bunky bola 7,5 mm. Pri experimentoch autori zistili, že horizontálne prúty (sklonené pod uhlom 0°) nešlo konzistentne vyrobiť, a preto sa nimi autori v ďalšej analýze drsnosti povrchu nezaoberali.

Tab. 2-2 Drsnosť povrchu (Ra) prúťov pod rôznymi uhlami [15]

Drsnosť povrchu [μm]	Uhol sklonu [°]		
	35,26	45	90
Spodná plocha	120,2	43,5	-
Vrchná plocha	8,8	8,9	-
Bočné plochy	8,1	9,2	8,2

Pri analýze drsnosti povrchu autori manuálne oddelili jednotlivé skúmané prúty od ich buniek a analyzovali spodné, vrchné a bočné plochy prúťov (vertikálny prút s uhlom sklonu 90° nemá spodné a vrchné plochy prúťov, preto sa u neho uvádzali všetky merania ako bočná plocha prútu). Ako je vidieť v tabuľke 2-2, spodné plochy mali o niekoľko rádov väčšie drsnosti povrchu ako bočné a vrchné plochy sklonených prúťov, ktoré mali drsnosti povrchov virtuálne identické, čo potvrdzuje tvrdenia od Han et al. [14], že schodový efekt má minimálny vplyv na výslednú drsnosť povrchu. Zlú drsnosť povrchu na spodných plochách autori pripisujú najmä horšiemu odvodu tepla cez prášok, čo spôsobilo vtekanie taveniny do neroztavených častíc prášku a jeho inkorporáciu do povrchu, čo má negatívny vplyv aj na rozmerovú presnosť prúťov.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3.1 Analýza problému

Suchy et al. [9] volili rôzne kombinácie skenovacej rýchlosti a výkonu laseru, pričom skúmali ich vplyv na jednotlivé dráhy a tenké steny. Pri jednotlivých dráhach autori našli oblasť dodanej plošnej energie (7 až 13 J/mm²) so stabilnými dráhami, pričom pri nedostatku plošnej energie dochádzalo ku guľôčkovaniu a nestabilite dráh a pri priveľkom množstve plošnej energie dochádzalo k pretaveniu, ktoré spôsobilo horenie materiálu a výrazné nežiadúce zväčšenie dráhy (šírka a hĺbka). Pri stenách autori objavili, že so zhoršujúcim sa odvodom tepla pri náraste vzdialenosti od základnej dosky klesá rozmerová presnosť stien a zhoršuje sa drsnosť povrchu. Taktiež našli minimálnu hodnotu plošnej energie (4,5 J/mm²), pri ktorej sa vrstvy natavia bez defektov.

Tian et al. [10] najprv skúmali vplyv vzdialenosti dráh na drsnosť povrchu, pričom prišli k jasnému záveru, že so znižujúcou sa vzdialenosťou dráh sa zlepšuje drsnosť povrchu, pričom tenšie vrstvy (20 μm) sú na zmenu vzdialenosti dráh citlivejšie ako hrubšie vrstvy (40 μm). Ďalej skúmali vplyv skenovacej stratégie (SS) na drsnosť povrchu. Skúmané boli contour SS a skywriting SS. Z výsledkov bolo jasné, že obidve skenovacie stratégie zlepšujú drsnosť povrchu, ale contour SS (9 μm) bola v porovnaní so skywriting SS (22 μm) výrazne lepšia. Ako posledné skúmali vplyv sklonu objemových súčastí na drsnosť povrchu spodnej a vrchnej plochy. Z výsledkov experimentov bolo jednoznačné, že od uhlu sklonu 80° sa s klesajúcim uhlom zhoršuje drsnosť povrchu, pričom spodná plocha je na zmenu uhlu výrazne citlivejšia ako plocha vrchná.

Li et al. [11] skúmali vplyv prúdenia atmosféry a vplyv miesta začiatku procesu tavenia kovového prášku na drsnosť povrchu objemových súčastí. Z experimentov autorom vyšla jasná korelácia zhoršenia drsnosti povrchu na strane, na ktorej sa začal proces tavenia prášku, pričom toto zhoršenie autori pripísali zhoršenému odvodu tepla. Taktiež však poznamenali, že aj pri kontrolnom experimente, kde sa miesto začiatku tavenia menilo, vyšla zhoršená drsnosť povrchu na ploche, ktorá je v „závetrí“ prúdenia atmosféry. Toto je spôsobené, zhoršeným chladením taveniny od atmosféry a „prskaním“ taveniny, ktorá sa na túto plochu prílepuje.

Dong et al. [12] volili rôzne priemery priamych prútov (1 až 5 mm s krokom 1 mm) a skúmali ich vplyv na porozitu a rozmerovú presnosť. Pri analýze prútov boli autori jednoznačne schopný určiť, že tenšie prúty majú výrazne väčšiu porozitu, ktorá klesala s nárastom priemeru, pričom veľký skok nastal medzi priemerami 3 mm a 4 mm. Taktiež autori uviedli, že aj voľným okom bolo vidieť výrazný rozdiel medzi drsnosťami povrchu tenších prútov (1 až 3 mm) a hrubšími prútmi (4 mm a 5 mm), pričom tenšie prúty mali drsnosť povrchu výrazne horšiu. Rovnaké výsledky získali aj pri analýze rozmerovej presnosti, kde tenké prúty spravidla vychádzali rozmerovo tenšie ako boli navrhnuté v CAD dátach, pričom hrubé prúty boli výrazne presnejšie. Z týchto výsledkov sa dá určiť, že do prútových štruktúr môžeme klasifikovať prúty s priemerom do 3 mm a väčšie priemery sa správajú skorej ako objemové súčasti.

Delroisse et al. [13] skúmali rozdielnosť odvodu tepla pri dvoch rôznych sklonoch prútov s priemerom 0,82 mm. Vertikálny prút (sklon 90°) vykazoval jemnú mikroštruktúru s nízkou porozitou, vďaka dobrému odvodu tepla cez plný materiál prútu. Prút sklonený pod uhlom $35,5^\circ$ mal v reze dve zreteľne odlišné zóny s jasnou hranicou. Vrchná zóna bola virtuálne identická vertikálnemu prútu s nízkou porozitou a jemnou štruktúrou, zatiaľ čo spodná mala výrazne hrubšie zrná a relatívne vysokú porozitu. Tento rozdiel spôsobuje rozdielna rýchlosť odvodu tepla. Vrchná časť odvádzala teplo rovnako ako priamy prút cez plný materiál prútu, zatiaľ čo spodná časť odvádzala teplo cez kovový prášok, ktorý je v porovnaní s plným materiálom prútu v podstate izolant.

Han et al. [14] pozorovali drsnosť povrchu na sklonenom prúte pod uhlom 45° s meniacou sa skenovacou rýchlosťou (LS) a vzdialenosťou dráhy (HD). Drsnosť povrchu je výrazne ovplyvnená pri nízkych hodnotách LS, pričom pri vyšších hodnotách sa drsnosť povrchu ustáli okrem jedného prípadu, kedy bolo HD moc nízke (0,04 mm), čo spôsobilo nestabilitu taveniny a kolísavosť nameraných drsností povrchu. Autori taktiež vyvrátili tvrdenie, že jedným z najväčších negatívnych faktorov drsnosti povrchu sklonených prútov je schodový efekt.

Leary et al. [15] skúmali drsnosť povrchu sklonených prútov so všetkými uhlami sklonenia nachádzajúcich sa v kubických bunkách. Horizontálny prút (sklon 0°) sa autorom nepodarilo vyrobiť, a preto u neho drsnosť povrchu neanalyzovali. Pri ostatných uhloch sklonenia ($35,26^\circ$; 45° a 90°) autorom vyšli virtuálne identické drsnosti povrchu na bočných a vrchných plochách, ale na spodných plochách bola drsnosť povrchu o niekoľko rádov horšia, pričom prút s uhlom sklonu $35,26^\circ$ mal skoro trojnásobne horšiu drsnosť povrchu spodnej plochy ako prút s uhlom sklonu 45° .

Pri prútoých štruktúrach nejde použiť rovnaké procesné parametre ako pri výrobe objemových súčastí kvôli ich rozdielnemu odvodu tepla. Zatiaľ čo objemové súčasti odvádzajú väčšinu tepla cez plný materiál už existujúcich vrstiev, prúty odvádzajú veľkú časť tepla cez kovový prášok, ktorý pôsobí ako izolant, pričom tento jav sa ešte zvyrazňuje ak nejde o priamy, ale o sklonený prút. Tento rozdielny odvod tepla negatívne ovplyvňuje drsnosť povrchu prútov a ich rozmerovú presnosť. Navyše sa v tejto práci používa horčíková zliatina WE43, ktorá má veľmi nízku teplotu tavenia a varu, čo ešte výraznejšie komplikuje situáciu s odvodom tepelnej energie. Preto je v práci skúmaný vplyv procesných parametrov na drsnosť povrchu prútov vyrobených z horčíkovej zliatiny WE43.

3.2 Cieľ práce

Cieľom bakalárskej práce je nájdenie kombinácie procesných parametrov (skenovacej rýchlosti a výkonu laseru) pre výrobu prútov s nízkou drsnosťou povrchu a vysokou rozmerovou presnosťou. Čiastkové ciele bakalárskej práce sú:

- Rešerš danej problematiky
- Návrh vzoriek a procesných parametrov pre výrobu
- Výroba vzoriek
- Vyhodnotenie nameraných dát

4 MATERIÁL A METÓDY

Prvá časť tejto kapitoly zahŕňa popis materiálov, zariadení a technológií, ktoré sme využili pri výrobe a vyhodnotení experimentu. Druhá časť sa zaoberá návrhom experimentu a tretia sa zaoberá metódami vyhodnocovania vyrobených vzoriek.

4.1 Použitý materiál, technológie a zariadenia

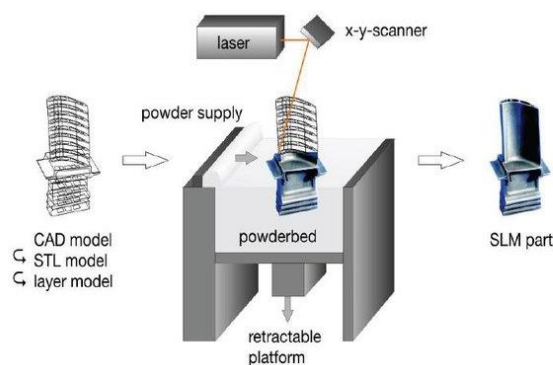
4.1.1 Práškový materiál horčíkovej zliatiny WE43

Použitý práškový materiál horčíkovej zliatiny WE43 bol vyrobený metódou plynovej atomizácie od firmy Luxfer MEL Technologies Ltd, Manchester, Spojené Kráľovstvo. Častice prášku majú veľkosť 28 až 60 μm a priemernou veľkosťou častice 39,8 μm .

4.1.2 Technológia SLM

Technológia SLM (Selective Laser Melting) je jedným z mnohých druhov aditívnych technológií. Tlač nastáva priamo z CAD dát, ktoré spracuje špeciálny software, ktorý rozdelí model na jednotlivé vrstvy. Následne vysoko-výkonný laser lokálne taví jednotlivé vrstvy materiálu. Pri SLM tlači sa vo väčšine prípadov používajú jemné kovové prášky, z ktorých sa môžu vyrábať objemové súčasti s porovnateľnými alebo lepšími fyzikálnymi vlastnosťami ako objemové súčasti vyrobené tradičnými technológiami alebo štruktúry, ktoré nejde tradičnými technológiami vyrobiť, kvôli ich komplexnej geometrii. [16]

Tlač pomocou SLM technológie prebieha rovnako ako ostatné kovové aditívne technológie, a to nanášaním prášku vrstvu po vrstve (obr. 4-1). Nanášač prášku naniesie tenkú vrstvu prášku, ktoré sú väčšinou hrubé 20 až 50 μm . Ako však poukázali Shi et al. [17], v špeciálnych prípadoch sa môžu využívať aj výrazne hrubšie vrstvy až do 200 μm , pričom sa však takéto hrubé vrstvy využívajú najmä s cieľom skrátiť čas tlače a môžu výrazne zhoršiť niektoré vlastnosti vyrobenej súčasti ako jej pevnosť alebo drsnosť povrchu. Vysoko-výkonný laser následne na základe CAD dát roztaví určený prášok, stavebná platforma poklesne o hrúbku vrstvy a nanášač znova naniesie ďalšiu vrstvu prášku. Tento cyklus sa opakuje až do dokončenia celej súčasti.



Obr. 4-1 Základný princíp technológie SLM [18]

Tlač spravidla prebieha v inertnej atmosfére argónu (Ar) alebo dusíku (N₂) a raritne sa používa aj atmosféra hélia (He). Atmosféra sa vyberá na základe reaktivity daného kovu, pričom reaktívne kovy ako horčík využívajú argónovú atmosféru, zatiaľ čo menej reaktívne kovy, ktoré netvoria nitridy, používajú najmä dusík. Ako však poukázali Wang et al. [19] v špeciálnych prípadoch môže byť do inertnej atmosféry naschvál primiešaný plyn, s ktorým daný kov reaguje a zlepšiť tak niektoré jeho vlastnosti. V tomto konkrétnom prípade bol do argónovej atmosféry primiešavaný dusík, ktorý tvoril s titánovou zliatinou CP-Ti nitridy, ktoré do určitého pomeru dusíku v atmosfére výrazne zlepšovali výslednú pevnosť vyrobených vzoriek.

4.1.3 Zariadenie SLM 280HL

Na výrobu vzoriek bolo využité zariadenie SLM 280HL (obr. 4-2) od firmy SLM Solutions Group AG, Lübeck, Nemecko. Tabuľka 4-1 uvádza základné parametre tohoto zariadenia. [20]

Tab. 4-1 Základné parametre zariadenia SLM 280HL [20]

Rozmery výrobného priestoru	280 × 280 × 365 mm ³
Rozmery zariadenia (D × Š × V)	2600 × 1200 × 2760 mm
Celková hmotnosť zariadenia (bez prášku)	1300 kg
Laser	Yterbiový vláknový laser s max. výkonom 400 W
Priemer laserového lúča	80 až 115 μm
Hrúbka vrstvy	20 až 100 μm
Maximálna skenovacia rýchlosť	10 m/s
Plyny inertnej atmosféry	Argón (Ar) alebo Dusík (N ₂)

V našom experimente sme museli pri výrobe horčíkovej zliatiny používať výkonnejší filtračný systém a pumpu kvôli vysokej reaktivite horčíku. Použitý výkon laseru bol v rozmedzí 50 až 200 W s krokom 50 W, skenovacia rýchlosť v rozmedzí 200 až 1100 mm/s s krokom 300 mm/s, výška vrstvy mala 50 μm a teplota platformy mala 120°C.



Obr. 4-2 Zariadenie SLM 280HL [20]

1.1.1 Digitálny mikroskop KEYENCE VHX-6000

Pri meraní drsnosti povrchu sme použili digitálny mikroskop KEYENCE VHX-6000 s objektívom VH-Z250R so zväčšením od 250x až po 2500x od firmy Keyence Corporation, Osaka, Japonsko. Pri vyhodnocovaní drsnosti sme použili najmenšie 250x zväčšenie, keďže bolo dostačujúce pre naše účely. Motorizovaná kamera a objektív dodáva mikroskopu veľmi dobrú hĺbku ostrosti, funkcie 2D a 3D merania a natáčanie kamery s objektívom, vďaka čomu má mikroskop funkciu určenia drsnosti povrchu, ktorú sme využili. [21, 22]



Obr. 4-3 Digitálny mikroskop KEYENCE VHX-6000 [21]

4.1.5 3D skener ATOS Triple Scan III

Na digitalizáciu vyrobených a následne pieskovaných vzoriek bol použitý 3D skener ATOS Triple Scan III (obr. 4-4) s 8 Mpx objektívmi od firmy GOM Metrology GbmH, Braunschweig, Nemecko. Rozmerovú presnosť kontrolujeme kvôli jej blízkeho vzťahu s drsnosťou povrchu, keďže sa navzájom výrazne ovplyvňujú. Metódu 3D skenovania sme využili vďaka jej vysokej presnosti a jej nedeštruktívnemu charakteru. Oproti iným dotykovým meriacim technológiám má 3D skenovanie spravidla vyššiu presnosť a nehrozí zničenie jemných súčastí. Princíp 3D skenovania je založený na premietaní rôznych rastrových vzorov na skenovaný objekt, ktoré sú zaznamenávané dvoma kamerami. Vďaka znalosti vzdialenosti kamier od seba vie skener vypočítať 3D polohu povrchových objektov a vytvoriť tak mračno bodov, ktoré sa následne prepočíta na CAD model. V prípade, že je skenovaný objekt lesklý, kamery skeneru môžu mať problém určiť presnú polohu bodov. V takom prípade sa nanáša na povrch objektu tenká vrstva matného titánového prášku. [23]



Obr. 4-4 3D skener ATOS Triple Scan [23]

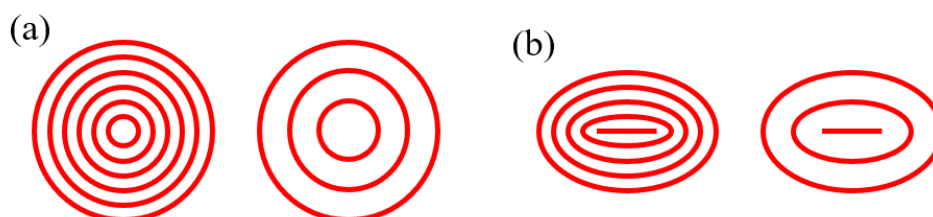
4.2 Návrh experimentu

Pri experimente bol dôležitý návrh geometrie vzoriek. Ako prvé sme museli zohľadniť uhly, pod ktorými sa sklonené prúty nachádzajú v kubických mriežkach. Kvôli tomu sme použili uhly sklonu $35,26^\circ$; 45° ; 65° a 90° . Uhol sklonu $35,26^\circ$ je typický pre priestorovo centrovanú mriežku (BCC). Uhol sklonu 45° sa vyskytuje v kubicky plošne centrovanej mriežke (FCC). Uhol sklonu 90° sa vyskytuje vo veľkej časti mriežok ako FCCZ, BCCZ a pod. Ako posledný sme zvolili uhol sklonu 65° , ktorý sa síce v žiadnej mriežke nevyskytuje, ale zvolili sme ho, aby sme mohli posúdiť správanie prútov medzi uhlami sklonu 90° a 45° . Ďalší faktor, ktorý sme museli zohľadniť, boli rozmery prútov. Z práce Dong et al. [12] vieme, že sa jedná o prútové štruktúry do priemeru 3 mm, avšak táto hodnota nám prišla hraničná a preto sme sa rozhodli použiť priemer (D) 1,5 mm, pri ktorom sme si istí, že sa prúty nebudú správať ako objemové súčasti. Dĺžku prútov sme zvolili 10 mm.

Procesné parametre na výrobu vzoriek boli navrhnuté, tak aby sme pokryli čo najväčšie množstvo kombinácií výkonu laser a skenovacej rýchlosti. Celkovo sme navrhli 16 sád procesných parametrov, z ktorých bolo vyrobených 64 prútov. Použitý výkon laseru (LP) bol v rozmedzí 50 až 200 W s krokom 50 W, skenovacia rýchlosť (LS) v rozmedzí 200 až 1100 mm/s s krokom 300 mm/s, výška vrstvy mala 50 μm , presah dráh laseru bol pri všetkých vzorkách 50%, stavebná platforma bola predhriata na 120 °C. Lineárna energia (LE) je pomer výkonu laseru a skenovacej rýchlosti a pohybovala sa v rozmedzí od 0,045 do 1 J/mm. Ako posledné sme určili vzdialenosť dráh (HD), ktorá bola vypočítaná z nižšie uvedenej empirickej rovnice, ktorá pri predošlých experimentoch dosahovala relatívne nízku drsnosť povrchu a nízku porozitu.

$$HD = 0,3739 - 0,003049 \cdot LP - 0,000456 \cdot LS + 0,416 \cdot LE - 0,02278 \cdot D - 0,000018 \cdot LP^2 - 1,325 \cdot LE^2 + 0,000006 \cdot LP \cdot LS + 0,01208 \cdot LP \cdot LE$$

Ako je vidieť na schematickom obrázku 4-5, pri výrobe sme použili špeciálnu skenovaciu stratégiu, ktorá je tvorená jednotlivými kruhovými (pre vertikálny prút) alebo eliptickými (pre sklonené prúty) dráhami laseru, pričom tavenie začalo na najmenšom priemere a pokračovalo až k vonkajšiemu priemeru. Táto metóda je výhodná pre prútové štruktúry, lebo umožňuje dobre kontrolovať vzdialenosť dráh a množstvo dodanej tepelnej energie.



Obr. 4-5 Použitá skenovacia stratégia pre výrobu prútov, väčšie množstvo dráh znamená menšie HD:
(a) Dráhy laseru pre sklon prútu 90°, (b) Dráhy laseru pre sklony prútu iné ako 90°

Po vyrobení (obr. 4-6) boli vzorky odrezané zo stavebnej dosky a následne boli jednotlivé prúty s rovnakými procesnými parametrami oddelené od spoločnej podstavy, aby sme mohli vyhodnotiť ich drsnosť povrchu. Drsnosť povrchu (R_a) sa pozorovala na bokoch prútov, keďže nie sú ovplyvnené schodovým efektom. Drsnosť povrchu (R_a) sa kontrolovala na strane prútu, ktorá bola vystavená prúdiacej argónovej inertnej atmosfére a následne sme vykonali aj merania pri vybraných prútoch v závetří atmosféry, aby sme boli schopní porovnať vplyv atmosféry na drsnosť povrchu. Následne boli prúty naskenované na 3D skeneri, aby sme mohli overiť ich rozmerovú presnosť.



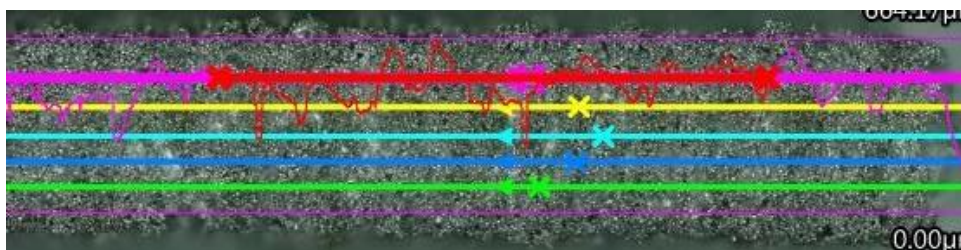
Obr. 4-6 Vyrobených 64 prútov s uhlami sklonu 90°; 65°; 45° a 35,26°

Po naskenovaní boli všetky vzorky, vyrobené s výkonom laseru 150 W, resp. 100 W, mechanicky opracované balotinou so zrnitosťou 200 – 300 μm , resp. korundom so zrnitosťou 425 – 500 μm .

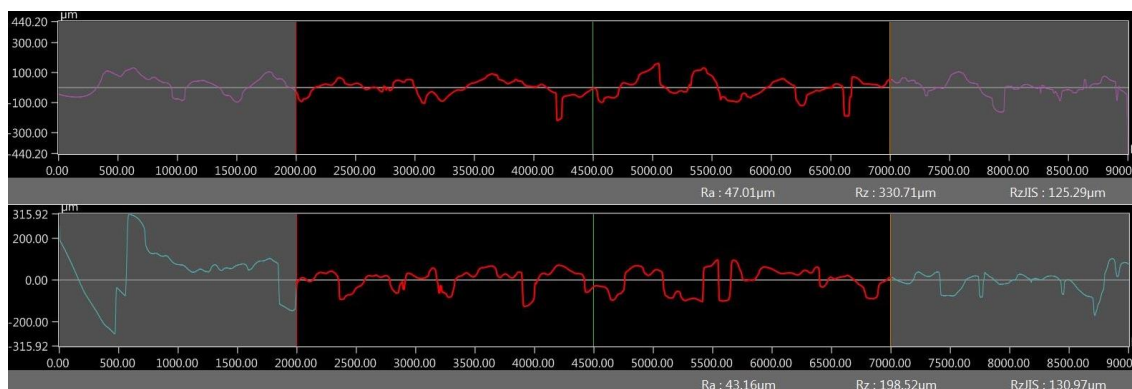
4.3 Metódy vyhodnocovania vzoriek

4.3.1 Vyhodnotenie drsnosti povrchu

Vyhodnocovanie drsnosti povrchu prebiehalo na digitálnom mikroskope KEYENCE VHX-6000 s 250x priblížením a maximálnym osvietením. Po uložení prútu pod objektív mikroskopu sme manuálne nastavili hranice prútu (šírka a dĺžka) a rozmedzie hĺbky ostrosti, ktorú sme chceli, aby mikroskop vyhodnotil. Ako je vidieť na obrázku 4-7, po „naskenovaní“ prútu sme zvolili 5 priamok rovnobežných s osou prútu, na ktorých sme skúmali drsnosť povrchu, pričom priamky sme sa snažili ukladať čo najbližšie k stredu prútu, aby sme merania nemali ovplyvnené zakrivením prútu na jeho krajoch. Predtým ako sme získali drsnosť povrchu (R_a), sme museli použiť dva korekčné súčinitele λ_s a λ_c . Korekčný súčiniteľ λ_s napravuje vlnitosť prútu a pri všetkých prútoch sme používali korekciu 8 μm . Druhý korekčný súčiniteľ λ_c skrátil vyhodnocovanú dĺžku prútu o 2,5 mm z oboch strán, aby sme minimalizovali vplyv rozdielneho odvodu tepelnej energie pri stavebnej doske a na konci prútu. Ako je vidieť na obrázku 4-8, získali sme drsnosť povrchu (R_a) pre jednotlivé priamky uložené na prúte aj s ich priebehom a následne sme z piatich hodnôt na danom prúte získali priemernú drsnosť povrchu.



Obr. 4-7 Príklad uloženia priamok pri vyhodnocovaní drsnosti povrchu prútu

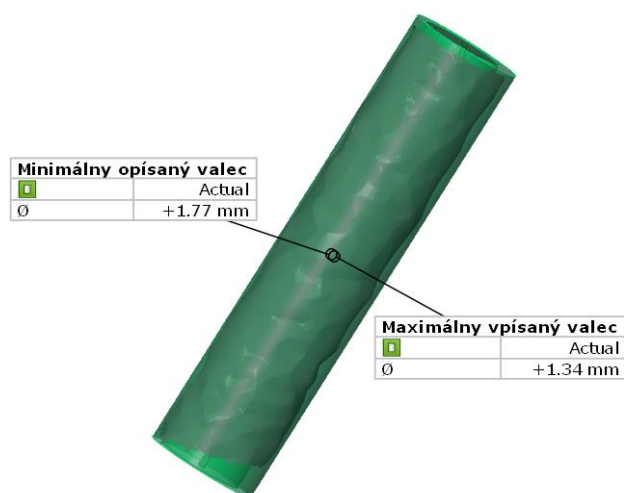


Obr. 4-8 Príklad vyhodnotenia drsnosti povrchu dvoch priamok na jednom prúte, pričom vyšedivená časť priebehu je spôsobená korekčným súčiniteľom λ_c

Všetky prúty mali drsnosť povrchu (R_a) vyhodnotenú na bočnej strane, ktorá bola vystavená prúdiacej inertnej atmosfére. Následne sme vykonali ďalšie merania na vyhodnotenie vplyvu prúdiacej atmosféry na drsnosť povrchu. Tieto merania boli vykonané na vzorkách s konštantným výkonom laseru 150 W a na vzorkách s konštantnou skenovacou rýchlosťou 800 mm/s, pričom sme merali drsnosť na opačnej strane ako hlavné merania (strana prútu v závetrí). Ako posledné boli vykonané merania po pieskovaní balotinou o zrnitosti 200 – 300 μm a po pieskovaní korundom o zrnitosti 425 – 500 μm , pričom merania boli vykonané na bočnej strane prútu, ktorá bola vystavená prúdiacej inertnej atmosfére.

4.3.2 Vyhodnotenie rozmerovej presnosti

Na vyhodnotenie rozmerovej presnosti sme použili 3D skener ATOS Triple Scan III a vyhodnocovací software GOM Inspect. Pri 3D skenovaní bol prút zachytený do zveráku, ktorý bol na automatickom rotačnom stole. Vyrobené vzorky nepotrebovali vrstvu titánového prášku, keďže neboli lesklé, ale na mechanicky opracované vzorky musel byť nanosený titánový prášok, aby sme zmatnili povrch, ktorého hrúbka vrstvy je do 5 μm , takže len minimálne ovplyvňuje presnosť meraní. Pre skenovanie vzoriek sme použili 10 skenovacích polôh otáčaných okolo osi rotačného stola v rozsahu 360°. Po vykonaní skenu sme skontrolovali, či bola celá vzorka naskenovaná, pričom ak nastala situácia, že vzorka nebola celá naskenovaná, tak sme manuálne doskenovali dané časti vzorky. Naskenované vzorky boli následne s veľkou presnosťou digitalizované. Ako je vidieť na obrázku 4-9 na digitalizované vzorky sme následne nastavili minimálny opísaný valec a maximálny vpísaný valec, aby si zistili rozmerové odchýlky prútov.

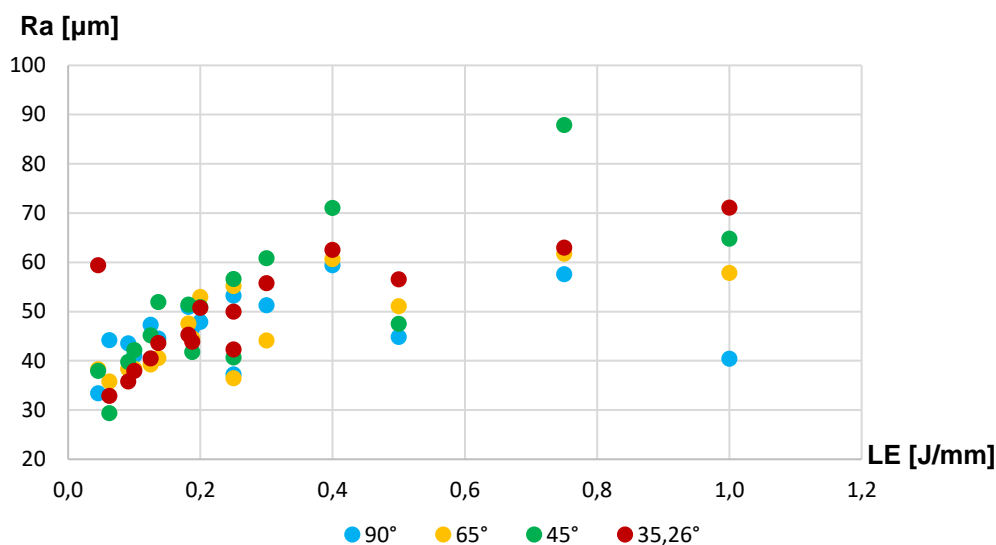


Obr. 4-9 Príklad analýzy rozmerovej presnosti skloneného prútu pod uhlom 65° po opieskovaní korundom v programe GOM Inspect

5 VÝSLEDKY

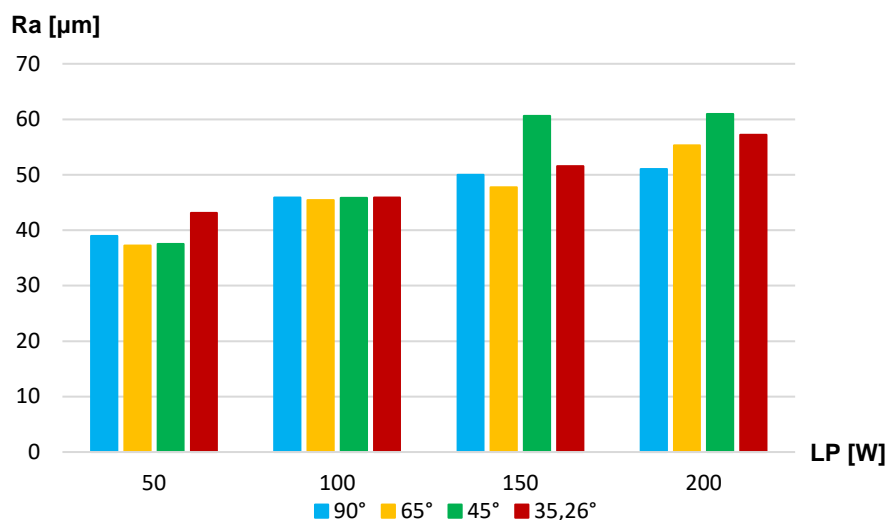
5.1 Vyhodnotenie meraní drsnosti povrchu nepieskovaných vzoriek

Pri vizuálnej kontrole prútov bolo očividné, že všetky prúty vykazovali výrazne veľké množstvo pritavených častíc prášku na povrchu. Kontaminácia povrchu časticami prášku bola tak vážna, že ani na jednom prúte nebolo vidieť plnú kovovú časť prútu, čo má výrazne negatívny vplyv na drsnosť povrchu.



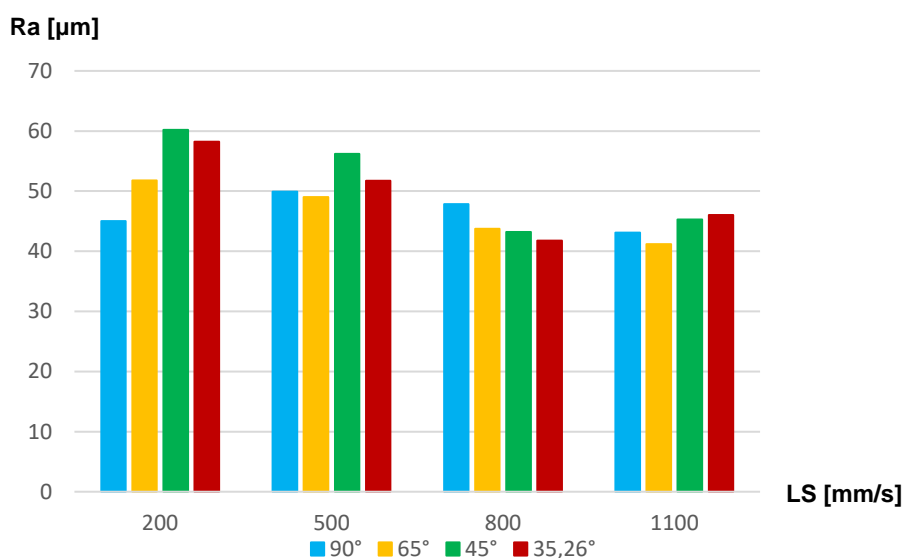
Obr. 5-1 Závislosť drsnosti povrchu na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu prútu

Na obrázku 5-1 je vidieť graf závislosti drsnosti povrchu na lineárnej energii dodanej prútom. Pri rastúcej lineárnej energii rastie aj drsnosť povrchu, avšak pri lineárnych energiách od 0,4 J/mm začína drsnosť povrchu výrazne kolísať pri všetkých uhloch sklonu prútu, čo môže byť spôsobené veľkou nestabilitou taveniny a jej nepredvídateľným správaním. Avšak do hodnoty 0,4 J/mm je graf veľmi podobný závislosťou, ktorú získali Suchy et al. [9].



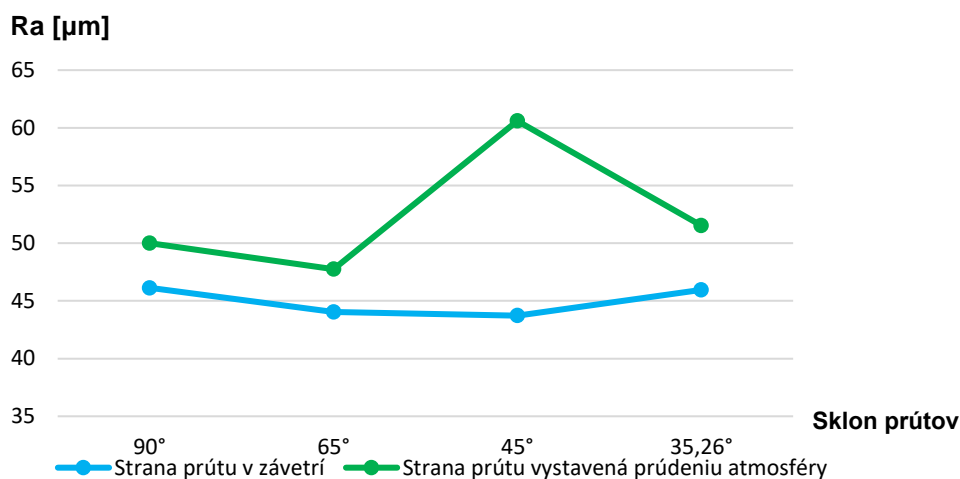
Obr. 5-2 Závislosť drsnosti povrchu na výkone laseru a uhle sklone prútu

Obrázok 5-2 zobrazuje závislosť drsnosti povrchu na výkone laseru použitom pri výrobe prútov. Z dát je vidieť stúpajúci trend drsnosti povrchu so stúpajúcim výkonom. Najväčší rozdiel je pozorovateľný pri prúte so sklonom 45°. Pri výkone laseru 50 W vyšla priemerná drsnosť povrchu 37,53 μm , zatiaľ čo pri výkone 200 W vyšla priemerná drsnosť povrchu prútov na 60,96 μm , čo je 62,43% nárast drsnosti povrchu. Najnižší nárast drsnosti povrchu nastal podľa očakávaní pri priamych prútoch. Pri výkone laseru 50 W vyšla priemerná drsnosť povrchu 38,97 μm a pri výkone laseru 200 W sme získali priemernú drsnosť prútov 51 μm . To je percentuálny nárast o 30,87 %.

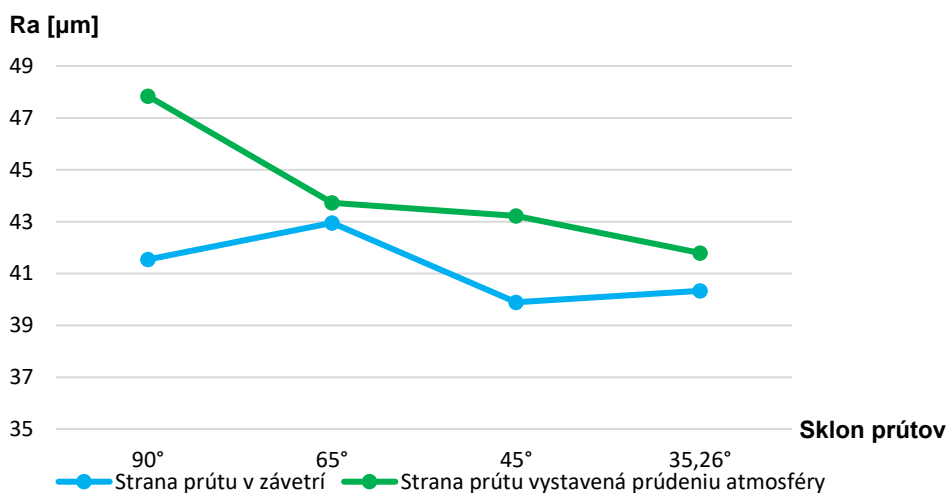


Obr. 5-3 Závislosť drsnosti povrchu na skenovacej rýchlosti a uhle sklone prútu

Obrázok 5-3 vyjadruje závislosť priemernej drsnosti povrchu na skenovacej rýchlosti. Táto závislosť nie je tak jasná ako pri závislosti drsnosti povrchu a výkone laseru. Pri priamom prúde sa s rastúcou skenovacou rýchlosťou priemerná drsnosť povrchu najprv zhorší a pri najväčšej skenovacej rýchlosti zlepší o 4,48 % oproti najnižšej skenovacej rýchlosti 200 mm/s. Priemerná drsnosť povrchu sklonených prútov sa s rastúcou skenovacou rýchlosťou zlepšuje, pričom najhoršia je pre všetky prúty pri skenovacej rýchlosti 200 mm/s. Prúty s uhlom sklonu 65° majú najlepšiu priemernú drsnosť povrchu 41,19 μm pri skenovacej rýchlosti 1100 mm/s, čo je zlepšenie oproti najvyššej priemernej drsnosti povrchu o 25,71 %, zatiaľ čo ostatné sklonené prúty (45° a 35,26°) majú najnižšiu priemernú drsnosť povrchu pri skenovacej rýchlosti 800 mm/s. Prúty so sklonom 45° majú najnižšiu priemernú drsnosť povrchu 43,22 μm a najhoršiu 60,20 μm. Prúty so uhlom sklonu 35,26° majú najnižšiu priemernú drsnosť povrchu 41,79 μm a najvyššiu 58,23 μm. Toto sú percentuálne rozdiely 39,29 %, resp. 39,34 %.



Obr. 5-4 Závislosť drsnosti povrchu na prúdení atmosféry pri prútoch vyrobených s výkonom laseru 150 W a rôznymi skenovacími rýchlosťami

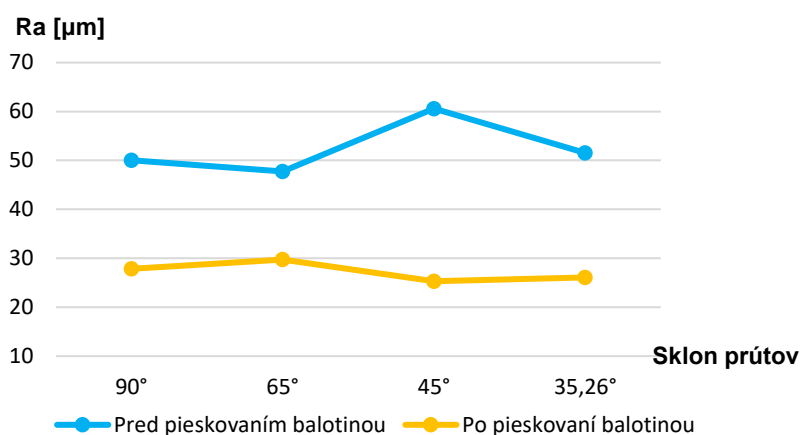


Obr. 5-5 Závislosť drsnosti povrchu na prúdení atmosféry pri prútoch vyrobených so skenovacou rýchlosťou 800 mm/s a rôznymi výkonmi

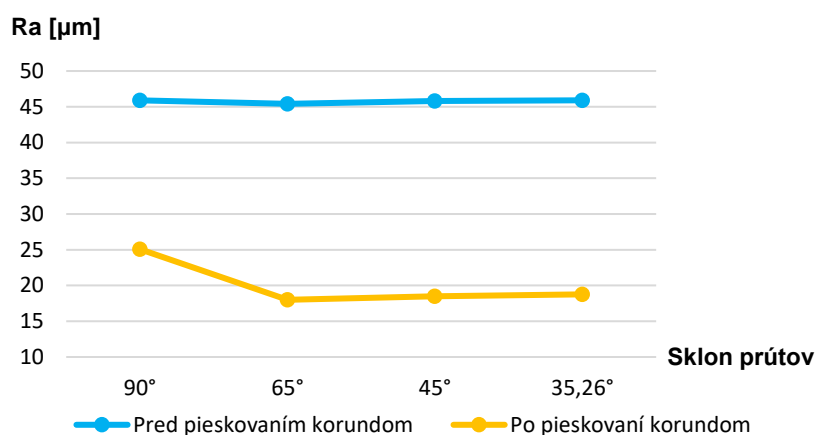
Obrázky 5-4 a 5-5 zobrazujú závislosť drsnosti povrchu na sklone prútu, pričom boli vyrobené za konštantného výkonu laseru 150 W, resp. za konštantnej skenovacej rýchlosti 800 mm/s. Na obidvoch závislostiach je vidieť, že je drsnosť povrchu na ploche v závetří prúdenia atmosféry nižšia ako drsnosť povrchu na ploche vystavenej prúdeniu atmosféry. Toto je v priamom rozpore s výsledkami Li et al. [11], ktorí pri experimentoch s objemovými vzorkami získali opačný efekt.

5.2 Vyhodnotenie meraní drsnosti povrchu pieskovaných vzoriek

Vplyv pieskovania bol skúmaný s cieľom zistiť, či je takéto mechanické opracovanie rentabilná metóda zníženia drsnosti povrchu a ako účinné sú rôzne pieskovacie materiály.



Obr. 5-6 Porovnanie zmeny priemernej drsnosti povrchu pred pieskovaním balotinou a po pieskovaní balotinou pre rôzne sklony prútov

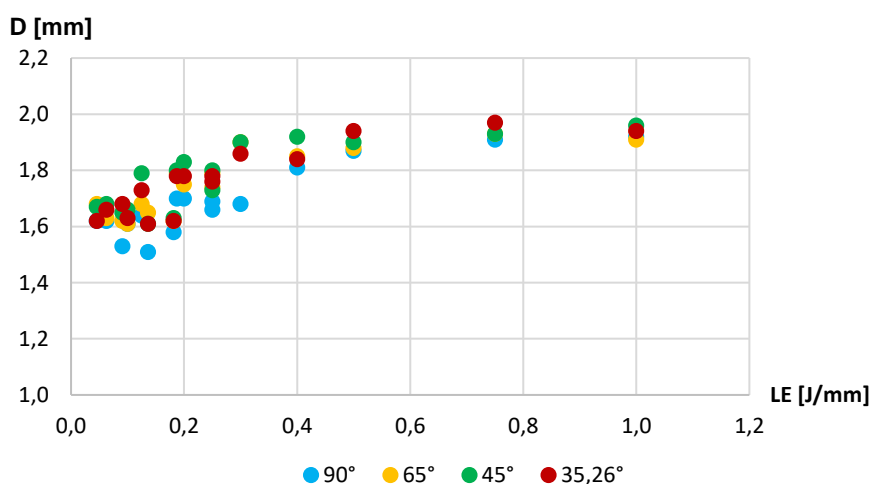


Obr. 5-7 Porovnanie zmeny priemernej drsnosti povrchu pred pieskovaním korundom a po pieskovaní korundom pre rôzne sklony prútov

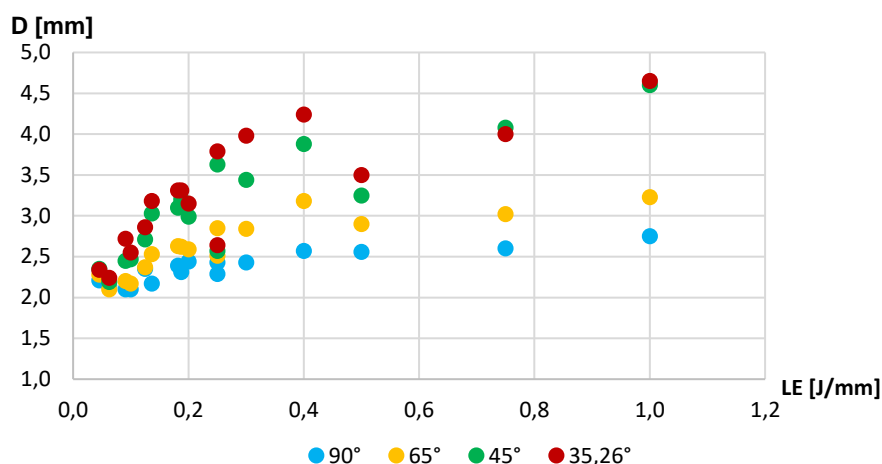
Na obrázkoch 5-6 a 5-7 je porovnanie zmeny priemernej drsnosti povrchu prútov, vyrobených pri konštantnom výkone laseru 150 W, resp. 100 W, pred a po pieskovaní balotinou, resp. korundom. Balotina mala zrnitosť 200 – 300 μm a korund mal zrnitosť 425 – 500 μm . Vizuálne balotina a korund odstránili všetky pritavené častice prášku na povrchu prútov, čo potvrdilo aj vyhodnotenie drsnosti povrchu. Vyhodnotením pieskovaných prútov sme zistili priemerné zníženie drsnosti povrchu pre balotinu 94,26 % a pre korund 132,02 %.

5.3 Vyhodnotenie rozmerovej presnosti nepieskovaných vzoriek

V rešerši sme zistili, že pri použití nevhodných procesných parametrov dochádza k výraznému zväčšovaniu alebo zmenšovaniu návarov. Kvôli tomuto bola skúmaná aj rozmerová presnosť vyrobených prútov s nominálnym priemerom prútov 1,5 mm. Pri výpočtoch vyhodnocovania boli použité priemery maximálneho vpísaného valca, resp. minimálneho opísaného valca.



Obr. 5-8 Závislosť priemeru maximálneho vpísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu



Obr. 5-9 Závislosť priemeru minimálneho opísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu

Na obrázkoch 5-8 a 5-9 sú zobrazené závislosti maximálneho vpísaného valca, resp. minimálneho opísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu. Pri obrázku 5-8 sme získali podobnú závislosť ako v prípade závislosti drsnosti povrchu na lineárnej energii, pričom sa nedá jednoducho vysloviť závislosť priemeru maximálneho vpísaného valca na uhle sklonu prútu. Avšak to isté nemôžeme tvrdiť o závislosti priemeru minimálneho opísaného valca na uhle sklonu prútu v obrázku 5-9, kde je pomerne jasná korelácia väčšieho priemeru minimálneho opísaného valca na veľkosti sklonu uhla prútov. Toto je spôsobené množstvom prášku pritaveného na spodnú stranu prútu, pričom toto množstvo výrazne rastie s klesajúcim uhlom sklonu prútov. Tento jav je vidieť aj v tabuľke 5-1, kde sa priemerná deviácia maximálneho vpísaného priemeru mení v rozmedzí od 12,67 % do 18,67 %, zatiaľ čo priemerná deviácia minimálneho opísaného priemeru výrazne rastie s rastúcim uhlom sklonu prútov a pohybuje sa v rozmedzí od 58 % do 118,67 %.

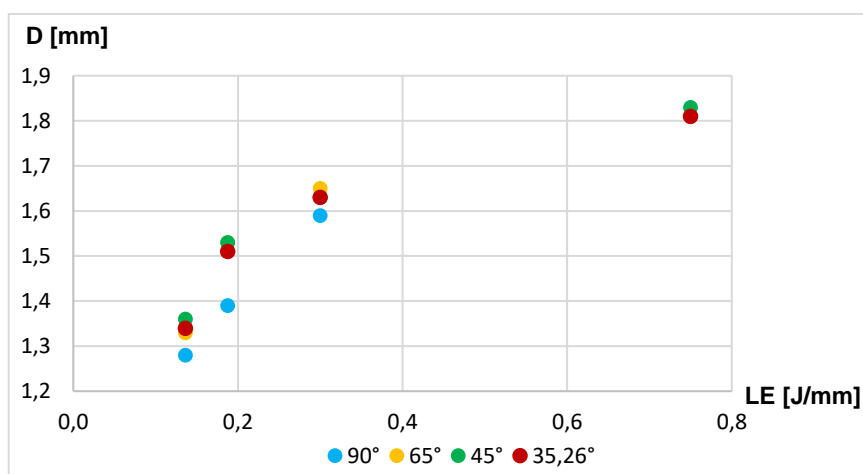
Tab. 5-1 Priemerné deviácie maximálneho vpísaného a minimálneho opísaného priemeru valca

Uhol sklonu prútov [°]	Priemerná deviácia maximálneho vpísaného priemeru [mm]	Priemerná deviácia minimálneho opísaného priemeru [mm]
90	0,19	0,87
65	0,25	1,13
45	0,28	1,62
35,26	0,26	1,78

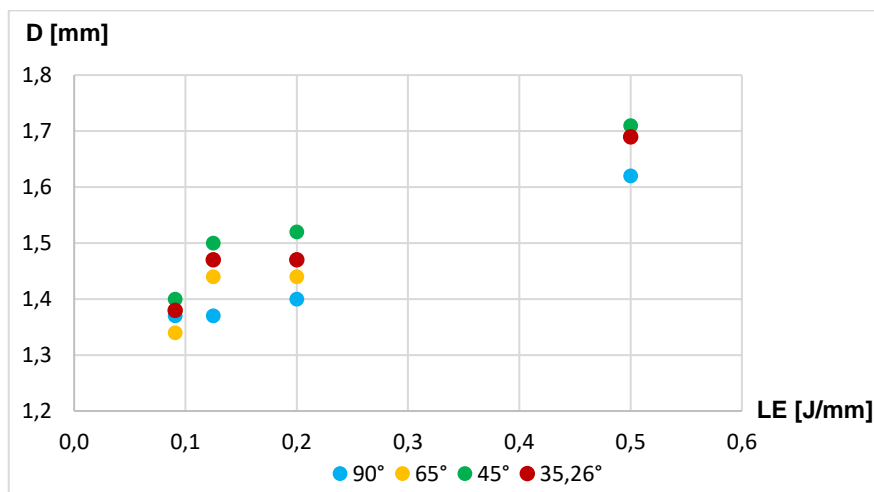
5.4 Vyhodnotenie rozmerovej presnosti pieskovaných vzoriek

Výrazné zlepšenie drsnosti povrchu po pieskovaní naznačilo, že by mohlo ísť o rentabilnú metódu znižovania drsnosti povrchu. Avšak horčik a jeho zliatiny sú pomerne mäkké kovy, preto musíme overiť, ako sa zmenila rozmerová presnosť a či sme pri pieskovaní prútoch neodobrali aj materiál z nosnej časti prútu.

Pieskovanie balotinou o zrnitosti 200 – 300 μm bolo vykonané na prútoch vyrobených s konštantným výkonom 150 W a rôznych skenovacích rýchlostiach. To isté platí aj pre pieskovanie korundom, ktorý má zrnitosť 425 – 500 μm a pieskovanie bolo vykonané na prútoch vyrobených s konštantným výkonom 100 W a rôznych skenovacích rýchlostiach.



Obr. 5-10 Závislosť priemeru maximálneho vpísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu pieskovaných balotinou



Obr. 5-11 Závislosť priemeru maximálneho vpísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu pieskovaných korundom

Na obrázkoch 5-10 a 5-11 vidíme, že po pieskovaní balotinou nám až 5 vzoriek kleslo pod nominálnu hodnotu priemeru prútu 1,5 mm a až 11 prútov nám kleslo pod alebo na nominálnu hodnotu priemeru prútu po pieskovaní korundom. Toto znamená, že pri pieskovaní horčíkovej zliatiny WE43 pomerne výrazne odoberáme aj nosný materiál prútu a nie len pritavené častice prášku, ako sme sa domnievali pri vyhodnocovaní drsnosti povrchu pieskovaných prútov. Toto je vidieť aj na obrázku 5-12, kde máme priamy prút vyrobený pri výkone laseru 150 W a skenovacej rýchlosti 200 mm/s pred a po pieskovaní. Na snímku (a) je vidieť prút po výrobe, pričom na povrchu prútu sa nachádza veľké množstvo pritavených kovových častíc. Na snímku (b) je prút po pieskovaní balotinou. Aj keď je balotina menej agresívne brusivo ako korund, tak je vidieť značné odoberanie materiálu na vyznačených miestach. Z tohto vychádza, že pieskovanie horčíkových zliatin nie je rentabilný spôsob zníženia drsnosti povrchu, keďže výrazne znižujeme nosný priemer prútov a jeho mechanické vlastnosti.



Obr. 5-12 Povrch jedného prútu so zvýraznenými miestami, kde nastalo odoberanie materiálu: (a) Prút po výrobe, (b) Prút po pieskovaní balotinou.

Tab. 5-2 Priemerné deviácie maximálneho vpísaného priemeru a minimálneho opísaného priemeru po pieskovaní balotinou a korundom.

Uhol sklonu prúťov [°]	Pieskovanie balotinou		Pieskovanie korundom	
	Priemerná deviácia max. vpísaného priemeru [mm]	Priemerná deviácia min. opísaného priemeru [mm]	Priemerná deviácia max. vpísaného priemeru [mm]	Priemerná deviácia min. opísaného priemeru [mm]
90	0,02	0,56	-0,06	0,43
65	0,08	0,74	-0,02	0,48
45	0,09	1,11	0,03	0,75
35,26	0,07	1,30	0,00	0,80

V tabuľke 5-2 je vidieť, výrazné zníženie priemernej deviácie ako minimálneho opísaného priemeru, tak maximálneho vpísaného priemeru oproti tabuľke 5-1. Ako bolo opísané vyššie aj tu je vidieť až nadmerné odobranie materiálu prúťov pri pieskovaní korundom, kde sme dostali dve záporné hodnoty pri priemerných deviáciách maximálneho vpísaného priemeru a tým pádom stenšenie funkčného priemeru prúťu na 1,44 mm, resp. na 1,48 mm.

6 DISKUSIA

Aditívne technológie nám dovoľujú vyrábať súčasti s komplexnými geometriami, ktoré nie sú vyrobiteľné tradičnými technológiami, ako napríklad prútové štruktúry. Procesné parametre majú obrovský vplyv na kvalitu výsledného výrobku, pričom prútové štruktúry sú ešte citlivejšie na nevhodne zvolené procesné parametre.

Po vyhodnotení drsnosti povrchu prútov sme získali závislosti rastúcej drsnosti povrchu na rastúcej lineárnej energii a rastúcom výkone laseru, pričom tieto závislosti sú súhlasné vo vedeckom článku od Suchy et al. [9]. Avšak v našom prípade sme nezískali podobnú závislosť aj na skenovacej rýchlosti, ktorú autori danej práce získali. Toto je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené rozdielnosťou vzoriek, keďže autori vykonávali dané merania na dlhých tenkých stenách. Napriek tomu Han et al. [14] skúmali drsnosť povrchu na prútových štruktúrach a ich kolísavá závislosť drsnosti povrchu na skenovacej rýchlosti, sa podobá našej závislosti.

Taktiež nám so Suchy et al. [9] koreluje informácia o zvýšení množstva pritavených častíc prášku so zvyšujúcou sa energiou dodanou do vzoriek.

Závislosť rastúcej drsnosti povrchu s klesajúcim uhlom sklonu je zhodná s autormi Tian et al. [10].

Naša závislosť nižšej drsnosti povrch v závetří prúdenia inertnej atmosféry je však v priamom rozpore so závislosťou, od Li et al. [11]. To znamená, že autori získali pri objemových vzorkách vyššiu drsnosť povrchu na strane, ktorá bola v závetří prúdenia atmosféry a nižšiu drsnosť povrchu na strane vystavenej prúdeniu atmosféry. Táto nezhoda môže byť spôsobená rozdielnosťou vzoriek, keďže autori skúmali objemové vzorky, zatiaľ čo my sme skúmali prúty, ale môže to byť spôsobené aj množstvom vzoriek na stavebnej doske. Zatiaľ čo my sme mali na jednej doske 64 prútov, autori tam mali len jednu objemovú vzorku. V ich prípade sa mohla prskajúca tavenina zachytávať len na ploche, ktorá bola v závetří, ale v našom prípade sa mohla prskajúca tavenina zachytávať aj na strane prútu, ktorá bola vystavená prúdeniu atmosféry, keďže boli vzorky uložené za sebou.

Závislosť rozmerovej presnosti maximálneho vpísaného valca je klesajúca s rastúcou lineárnou energiou, pričom však uhly sklonu prútov hrajú minimálnu rolu na danú rozmerovú presnosť. Na druhej strane závislosť rozmerovej presnosti minimálneho vpísaného valca je klesajúca s lineárnou energiou a taktiež je klesajúca so sklonom uhlu prútov.

Najlepšie drsnosti povrchu sme získali pri nízkych lineárnych energiách, nízkych výkonoch laseru (okolo 50 W) a stredne veľkých skenovacích rýchlostiach (500 až 800 mm/s). Tieto oblasti procesných parametrov by sa oplatilo bližšie preskúmať. Taktiež by sa oplatilo preskúmať iné procesné parametre ako vzdialenosť dráh laseru alebo hrúbka vrstvy, aby sa lepšie vymedzili oblasti s nízkymi drsnosťami povrchu. Ďalší parameter, ktorý by bolo vhodné preskúmať je vplyv prúdenia atmosféry na drsnosť povrchu, keďže sme s Li et al. [11] získali diametrálne odlišne výsledky. A v neposlednom rade by sa oplatilo overiť iné metódy mechanického alebo chemického opracovania povrchu prútov, keďže pieskovanie nie je rentabilné ani s menej abrazívnou balotinou, ktorá rovnako ako korund znižuje nosný priemer prútov.

7 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo objasnenie vplyvu skenovacej rýchlosti a výkonu laseru na výslednú drsnosť povrchu mikro-prúťových štruktúr vyrobených z horčíkovej zliatiny WE43 technológiou selective laser melting (SLM).

V teoretickej časti práce boli objasnené dôležité závislosti procesných parametrov a ich vplyv na drsnosť povrchu. Taktiež boli vysvetlené javy, ktoré negatívne ovplyvňujú drsnosť povrchu objemových vzoriek a mikro-prúťových štruktúr.

V praktickej časti bol navrhnutý experiment s prúťmi pod rôznymi uhlami sklonu (90° , 65° , 45° a $35,26^\circ$) o priemere 1,5 mm s rôznymi kombináciami procesných parametrov. Získali sme 64 vzoriek, na ktorých sme vyhodnocovali drsnosť povrchu a ich rozmerovú presnosť. Pri vyhodnocovaní drsnosti povrchu sme použili digitálny mikroskop KEYENCE VHX-6000 a pri vyhodnocovaní rozmerovej presnosti sme použili 3D skener ATOS Triple scan a program GOM Inspect.

Najnižšie drsnosti povrchu v rozmedzí 29,33 – 38,41 μm sme získali pri nízkych lineárnych energiách, ktoré sa pohybovali v rozmedzí od 0,045 do 0,1 J/mm. Absolútne najnižšia drsnosť povrchu 29,33 μm bola získaná pri prúťe sklonenom pod uhlom 45° a lineárnej energii 0,063 J/mm. Bolo dosiahnuté jednoznačných závislostí rastúcej drsnosti povrchu s rastúcou lineárnou energiou a rastúcim výkonom laseru. Pre skenovací rýchlosť boli najnižšie drsnosti povrchu nájdené pri hodnotách 500 mm/s a 800 mm/s. Taktiež sme objavili výrazné zníženie drsnosti povrchu na strane prúťu, ktorá sa nachádzala v závetří prúdenia atmosféry.

Vysoká rozmerová nepresnosť vyrobených prúťov bola spôsobená najmä veľkým množstvom pritavených častíc prášku na povrchu prúťov. Maximálny vpísaný priemer bol v najlepšom prípade väčší o 12,67 % a v najhoršom prípade väčší až o 18,67 %. Minimálny opísaný priemer bol aj v najlepšom prípade o niekoľko radov horší a tento priemer sa zväčšil oproti nominálnemu priemeru prúťu od 58 % do 118,67 %, čo bolo spôsobené veľkým množstvom pritavených častíc prášku na spodné strany prúťov.

Taktiež bola overená rentabilita pieskovania ako metóda zníženia drsnosti povrchu prúťov. Bolo zistené, že aj balotina, aj korund efektívne odstránili všetky pritavené častice prášku na povrchu prúťov. Avšak značným negatívom pieskovania ako balotinou, tak korundom je odoberanie nosného materiálu prúťov. Bližšou analýzou bola zistená vyššia agresivita korundu pri odoberaní nosného materiálu.

Všetky ciele bakalárskej práce boli splnené.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] What is 3D Printing?. *3DPrinting.com* [online]. 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: 3dprinting.com/what-is-3d-printing/
- [2] ZAPLATÍLEK, Dominik. Rapid prototyping: vysvětlení, využití. *Medium* [online]. 2021, [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: medium.com/design-kisk/rapid-prototyping-vysvetleni-vyuziti-8505bf920c28
- [3] SHIELDS, Gerald. 3D Printing Lattice Structures – The Ultimate Guide. *All3DP* [online]. 2022, [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: all3dp.com/1/3d-printing-lattice-structures-the-ultimate-guide/
- [4] Types of 3D Printing in Metal. *Markforged* [online]. 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal
- [5] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, **2**(4) [cit. 2023-05-23]. ISSN 1931-9401. Dostupné z: [doi:10.1063/1.4935926](https://doi.org/10.1063/1.4935926)
- [6] CHAKRABORTY BANERJEE, Parama, Saad AL-SAAD, Lokesh CHOUDHARY, Shervin Eslami HARANDI a Raman SINGH. Magnesium Implants: Prospects and Challenges. *Materials* [online]. 2019, **12**(1) [cit. 2023-05-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: [doi:10.3390/ma12010136](https://doi.org/10.3390/ma12010136)
- [7] DRÁPALA, Jaromír, Lumír KUCHAR, Karel TOMÁŠEK a Zuzana TROJANOVÁ. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs: Magnesium, its alloys and Mg-admixture binary systems*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0579-0.
- [8] ASTM B951-11(2018). *Standard Practice for Codification of Unalloyed Magnesium and Magnesium-Alloys, Cast and Wrought*. 6. West Conshohocken (Pennsylvania): ASTM International, 2018.
- [9] SUCHY, Jan, Miroslava HORYNOVÁ, Lenka KLAČURKOVÁ, David PALOUSEK, Daniel KOUTNY a Ladislav CELKO. Effect of Laser Parameters on Processing of Biodegradable Magnesium Alloy WE43 via Selective Laser Melting Method. *Materials* [online]. 2020, **13**(11), 2623-2640 [cit. 2023-05-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: [doi:10.3390/ma13112623](https://doi.org/10.3390/ma13112623)
- [10] TIAN, Yang, Dacian TOMUS, Paul ROMETSCH a Xinhua WU. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2017, **13**, 103-112 [cit. 2023-05-23]. ISSN 22148604. Dostupné z: [doi:10.1016/j.addma.2016.10.010](https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.10.010)

- [11] LI, Bao-Qiang, Zhonghua LI, Peikang BAI, Bin LIU a Zezhou KUAI. Research on Surface Roughness of AlSi10Mg Parts Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Metals* [online]. 2018, **8**(7), 524-534 [cit. 2023-05-23]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met8070524
- [12] DONG, Zhichao, Xiaoyu ZHANG, Wenhua SHI, Hao ZHOU, Hongshuai LEI a Jun LIANG. Study of Size Effect on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Samples Made by Selective Laser Melting. *Materials* [online]. 2018, **11**(12), 2463-2477 [cit. 2023-05-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11122463
- [13] DELROISSE, Pauline, Pascal J. JACQUES, Eric MAIRE, Olivier RIGO a Aude SIMAR. Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting. *Scripta Materialia* [online]. 2017, **141**, 32-35 [cit. 2023-05-23]. ISSN 13596462. Dostupné z: doi:10.1016/j.scriptamat.2017.07.020
- [14] HAN, Xuesong, Haihong ZHU, Xiaojia NIE, Guoqing WANG a Xiaoyan ZENG. Investigation on Selective Laser Melting AlSi10Mg Cellular Lattice Strut: Molten Pool Morphology, Surface Roughness and Dimensional Accuracy. *Materials* [online]. 2018, **11**(3), 392-405 [cit. 2023-05-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11030392
- [15] LEARY, Martin, Maciej MAZUR, Joe ELAMBASSERIL, et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials & Design* [online]. 2016, **98**, 344-357 [cit. 2023-05-24]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.02.127
- [16] SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing* [online]. 2019, **35**, 1286-1296 [cit. 2023-05-23]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2019.06.089
- [17] SHI, Xuezhi, Shuyuan MA, Changmeng LIU, Cheng CHEN, Qianru WU, Xianping CHEN a Jiping LU. Performance of High Layer Thickness in Selective Laser Melting of Ti6Al4V. *Materials* [online]. 2016, **9**(12), 975-990 [cit. 2023-05-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma9120975
- [18] JING, Li-li, yu-hua LI, Ke wei CHENG, Feng WANG a Jin Wen SHI. Application of Selective Laser Melting Technology Based on Titanium Alloy in Aerospace Products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, **740**(1) [cit. 2023-05-23]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-8981/740/1/012056

- [19] WANG, D.W., Y.H. ZHOU, J. SHEN, et al. Selective laser melting under the reactive atmosphere: A convenient and efficient approach to fabricate ultrahigh strength commercially pure titanium without sacrificing ductility. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2019, **762** [cit. 2023-05-23]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2019.138078
- [20] SLM 280HL. *EKZO* [online]. 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: www.3dprintekzo.be/products-services/3d-printers/slm-hl280/
- [21] Optický mikroskop VHX-6000. *KEYENCE* [online]. 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: www.keyence.eu/cscz/landing/lpc/1811-vh-opticky-mikroskop.jsp
- [22] Zoomovací objektiv s vysokým zvětšením a duálním přísvitem (250 x až 2500 x): VH-Z250R. *KEYENCE* [online]. 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: www.keyence.eu/cscz/products/microscope/digital-microscope/vhx-7000/models/vh-z250r/
- [23] ATOS Triple Scan: Profesionální 3D optický skener. *MCAE* [online]. 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: www.mcae.cz/wp-content/uploads/2020/10/GOM_Brochure_ATOS_TripleScan_CZ_nahled.pdf

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

AM	additive manufacturing technology
CAD	computer-aided design
PBF	powder bed fusion
SLM	selective laser melting
3D	three-dimensional
μ CT	micro-computed tomography
HCP	hexagonal closed-packed
BCC	body-centered cubic
BCCZ	body-centered cubic with Z struts
FCC	face-centered cubic
FCCZ	face-centered cubic with Z struts
FBCCZ	face and body-centered cubic with Z struts
KVZ	kovy vzácnych zemín
SS	skenovacia stratégia
LS [mm/s]	skenovacia rýchlosť laseru
LP [W]	výkon laseru
LE [J/mm]	lineárna energia
HD [mm]	vzdialenosť dráhy
E [GPa]	modul pružnosti v ťahu
Ra [μ m]	drsnosť povrchu
Ra _t [μ m]	teoretická priemerná drsnosť povrchu

10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 2-1	Tri rôzne kategórie výsledkov a grafická závislosť LS-LP.....	18
Obr. 2-2	Grafická vizualizácia rozdielu šírky tenkých stien voči návarkom pri rôznych procesných parametroch: (a) LS = 450 mm/s; (b) LS = 750 mm/s.....	19
Obr. 2-3	Aritmetická deviácia drsnosti povrchu v závislosti na plošnej energii: (a) Delené LP; (b) Delené LS.....	20
Obr. 2-4	Pohľad zhora na jednotlivé dráhy s LP = 170–370 W a LS = 1100–6700 mm/s.....	21
Obr. 2-5	Prierez jednotlivých dráh a ich uhly zmáčania pri konštantnom výkone laseru 170 W a meniacej sa skenovacej rýchlosti: (a) Veľmi dobrá zmáčavosť, LS = 1900 mm/s, (b) Zhoršená zmáčavosť, LS = 3100 mm/s, (c) Zlá zmáčavosť, LS = 4300 mm/s.....	21
Obr. 2-6	Jednotlivé dráhy vyrobené pri výkone 170 W a rôznych skenovacích rýchlostiach: (a) Konzistentná, spojitá dráha (1100 mm/s), (b) Nekonzistentná, rozpadajúca sa dráha (2700 mm/s), (c) Dráha rozpadnutá na guľôčky (5500 mm/s).....	22
Obr. 2-7	Závislosť povrchovej drsnosti na vzdialenosti dráh.....	22
Obr. 2-8	Povrchová analýza viacvrstvových vzoriek s rozdielnymi dráhovými vzdialenostiam so zvýrazneným časticami neroztaveného prášku: (a) HD = 0,05 mm, (b) HD = 0,09 mm, (c) HD = 0,13 mm.....	23
Obr. 2-9	Schematické diagramy skenovacích stratégií: (a) Contour skenovacia stratégia, (b) Skywriting skenovacia stratégia.....	23
Obr. 2-10	Pohľad zhora na vzorky vyrobené pri LS = 2700 mm/s, LP = 300 W a HD = 0,09 mm: (a) Bez použitia contour alebo skywriting skenovacej stratégie, (b) Contour skenovacia stratégia, (c) Skywriting skenovacia stratégia.....	24
Obr. 2-11	Grafická závislosť : (a) Bez použitia contour alebo skywriting skenovacej stratégie, (b) Contour skenovacia stratégia, (c) Skywriting skenovacia stratégia.....	24
Obr. 2-12	Grafická závislosť uhlu sklonených vzoriek na drsnosti povrchu pri rôznych kombináciách parametrov.....	25
Obr. 2-13	Rez spodnej plochy objemových vzoriek vyrobených pod uhlom sklonu 45° pri dvoch rôznych kombináciách procesných parametrov: (a) LS = 3000 mm/s a LP = 200 W, (b) LS = 1900 mm/s a LP = 370 W.....	26
Obr. 2-14	Orientácia kocky vo výrobnjej komore a zvýraznenie smeru prúdenia atmosféry.....	26

Obr. 2-15	Tri rôzne situácie s rôznymi smermi laseru: (a) Prvá situácia, tavenie začalo na ľavej strane kocky, (b) Druhá situácia, tavenie začalo na zadnej strane kocky, (c) Tretia situácia je kombinácia prvej a druhej situácie, ktoré sa navzájom striedajú.....	26
Obr. 2-16	Drsnosti povrchu pri troch situáciách s rôznymi smermi laseru na rôznych stranách kocky.....	27
Obr. 2-17	μ CT analýza porozity prútových štruktúr s rôznymi priemerami: (a) $d = 1$ mm, (b) $d = 2$ mm, (c) $d = 3$ mm, (d) $d = 4$ mm, (e) $d = 5$ mm.....	28
Obr. 2-18	Schematické zobrazenie odvodu tepla, tepelne ovplyvnených zón a skenovacej stratégie pri rôznych priemeroch prútov: (a) $d = 1$ mm, (b) $d = 2$ mm, (c) $d = 3$ mm, (d) $d = 4$ mm, (e) $d = 5$ mm.....	28
Obr. 2-19	Schematický nákres odvodu tepla prútov pod rôznymi uhlami sklonu: (a) Vertikálny prút (uhol sklonu 90°), (b) Prút s uhlom sklonu $35,5^\circ$, (c) Skenovacia stratégia použitá na výrobu prútov.....	29
Obr. 2-20	Porovnanie mikroštruktúry a porozity v reze pre prúty s rôznymi uhlami sklonu: (a) Vertikálny prút (uhol sklonu 90°), (b) Prút s uhlom sklonu $35,5^\circ$, (c) Porovnanie porozity dvoch rôznych zón v prúte so sklonom $35,5^\circ$	30
Obr. 2-21	Priemerná drsnosť povrchu R_a spodnej plochy v závislosti na LS a HD.....	31
Obr. 2-22	Porovnanie drsnosti povrchu sklonených prútov vyrobených s $LP = 200$ W a $HD = 0,08$ mm a rôznymi skenovacími rýchlosťami: (a) $LS = 600$ mm/s, (b) $LS = 1800$ mm/s, (c) $LS = 3000$ mm/s.....	32
Obr. 2-23	Kubická bunka so štyrmi možnými orientáciami prútov: Modrá 0° ; Zelená $35,26^\circ$; Žltá 45° ; Červená 90°	32
Obr. 4-1	Základný princíp technológie SLM.....	38
Obr. 4-2	Zariadenie SLM 280HL.....	39
Obr. 4-3	Digitálny mikroskop KEYENCE VHX-6000.....	39
Obr. 4-4	3D skener ATOS Triple Scan.....	40
Obr. 4-5	Použitá skenovacia stratégia pre výrobu prútov, väčšie množstvo dráh znamená menšie HD: (a) Dráhy laseru pre sklon prútu 90° , (b) Dráhy laseru pre sklony prútu iné ako 90°	41
Obr. 4-6	Vyrobených 64 prútov s uhlami sklonu 90° ; 65° ; 45° a $35,26^\circ$	42
Obr. 4-7	Príklad uloženia priamok pri vyhodnocovaní drsnosti povrchu prútu.....	43
Obr. 4-8	Príklad vyhodnotenia drsnosti povrchu dvoch priamok na jednom prúte, pričom vyšedivená časť priebehu je spôsobená korekčným súčiniteľom λ_c	43

Obr. 4-9	Príklad analýzy rozmerovej presnosti skloneného prútu pod uhlom 65° po opieskovaní korundom v programe GOM Inspect.....	44
Obr. 5-1	Závislosť drsnosti povrchu na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu prútu.....	45
Obr. 5-2	Závislosť drsnosti povrchu na výkone laseru a uhle sklone prútu.....	46
Obr. 5-3	Závislosť drsnosti povrchu na skenovacej rýchlosti a uhle sklone prútu.....	46
Obr. 5-4	Závislosť drsnosti povrchu na prúdení atmosféry pri prútoch vyrobených s výkonom laseru 150 W a rôznymi skenovacími rýchlosťami.....	47
Obr. 5-5	Závislosť drsnosti povrchu na prúdení atmosféry pri prútoch vyrobených so skenovacou rýchlosťou 800 mm/s a rôznymi výkonmi.....	47
Obr. 5-6	Porovnanie zmeny priemernej drsnosti povrchu pred pieskovaním balotinou a po pieskovaní balotinou pre rôzne sklony prútov.....	48
Obr. 5-7	Porovnanie zmeny priemernej drsnosti povrchu pred pieskovaním korundom a po pieskovaní korundom pre rôzne sklony prútov.....	48
Obr. 5-8	Závislosť priemeru maximálneho vpísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu.....	49
Obr. 5-9	Závislosť priemeru minimálneho opísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu.....	50
Obr. 5-10	Závislosť priemeru maximálneho vpísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu pieskovaných balotinou.....	51
Obr. 5-11	Závislosť priemeru maximálneho vpísaného valca na lineárnej energii pre prúty s rôznymi uhlami sklonu pieskovaných korundom.....	51
Obr. 5-12	Povrch jedného prútu so zvýraznenými miestami, kde nastalo odoberanie materiálu: (a) Prút po výrobe, (b) Prút po pieskovaní balotinou.....	52

11 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2-1	Označenie legujúcich prvkov v horčikových zliatinách na základe normy ASTM B951-11(2018).....	17
Tab. 2-2	Drsnosť povrchu (Ra) prútov pod rôznymi uhlami.....	33
Tab. 4-1	Základné parametre zariadenia SLM 280HL.....	38
Tab. 5-1	Priemerné deviácie maximálneho vpísaného a minimálneho opísaného priemeru valca.....	51
Tab. 5-2	Priemerné deviácie maximálneho vpísaného priemeru a minimálneho opísaného priemeru po pieskovaní balotinou a korundom.....	53